Leybold

Manual de segurança de vácuo

Manual de segurança

Instruções de operação 300314311_035_C1

Tradução das instruções originais

Aviso de Copyright

©Copyright 2026. Todos os direitos reservados.

Publicação: 9/9/2026

Sumário

1 Introdução. 6

1.1 Escopo desta publicação 6

1.2 Análise do perigo 7

1.3 Quando surgirem perigos. 7

1.3.1 Projeto 8

1.3.2 Construção. 8

1.3.3 Operação/Comissionamento. 8

1.3.4 Manutenção/Desmantelamento. 9

2 Fontes químicas de perigos. 10

2.1 Gases do processo perigosos 10

2.2 Reações químicas. 10

2.2.1 Reações homogêneas. 10

2.2.2 Reações heterogêneas. 10

2.2.3 Contaminação cruzada. 11

2.3 Materiais inflamáveis/explosivos. 12

2.3.1 Riscos de explosão. 13

2.3.2 Fontes de misturas de gás ou vapor potencialmente explosivas. 14

2.3.3 Evitando a zona inflamável. 15

2.3.4 Hermeticidade (vazamento de ar atmosférico). 19

2.4 Oxidantes. 20

2.5 Materiais pirofóricos. 21

2.6 Material tóxico. 22

2.7 Materiais corrosivos. 23

2.8 Resumo - fontes químicas de perigos. 25

3 Fontes físicas de perigos. 26

3.1 Exaustão da bomba sobrepressurizada. 26

3.1.1 Proteção contra a sobrepressão de exaustão. 27

3.1.2 Bloqueio da exaustão. 27

3.2 Sobrepressão de entrada. 27

3.2.1 Suprimentos de gás comprimido e contrapressão. 27

3.2.2 Sobrepressão desde os sistemas de purga. 28

3.2.3 Operação incorreta da bomba. 29

3.3 Temperatura. 29

Sumário

3.4 Resumo — fontes físicas de perigos. 30

4 Projeto do sistema. 32

4.1 Classificações da pressão em um sistema. 32

4.2 Eliminação de volumes estagnados. 32

4.3 Sistema de exaustão de extração. 33

4.4 Uso dos sistemas de proteção corta-chamas (sistemas HazLoc). 33

4.5 Vazamento de água para o sistema de vácuo. 34

4.6 Retorno dos gases de exaustão. 34

4.7 Fontes de ignição. 34

4.8 Resumo — projeto do sistema. 36

5 Práticas gerais. 37

5.1 Formação de depósitos na tubulação. 37

5.2 Uso de inversores de frequência — uso de senhas. 37

5.3 Posição da válvula de entrada. 37

5.4 Armadilhas quentes. 38

5.5 Armadilhas frias. 38

5.6 Condensadores. 38

5.7 Níveis de integridade do sistema. 38

6 A escolha correta do equipamento. 40

6.1 Bombas de palhetas rotativas e de pistão seladas lubrificadas a óleo. 41

6.2 Bombas secas. 41

6.3 Projeto da tubulação. 41

6.3.1 Foles. 41

6.3.2 Tubulações flexíveis. 42

6.3.3 Pontos de âncora. 42

6.3.4 Vedações. 42

6.4 Proteção física contra a sobrepressão. 42

6.4.1 Alívio de pressão. 42

6.4.2 Alarme/desarme da sobrepressão. 43

6.4.3 Reguladores de pressão. 43

6.4.4 Proteção corta-chamas. 43

6.5 Sistemas de purga. 44

Sumário

6.6 Resumo — a escolha correta do equipamento. 44

7 Procedimento operacional e treinamento. 45

8 Modificação dos sistemas de vácuo. 47

9 Resumo. 48

1 Introdução

1.1 Escopo desta publicação



ADVERTÊNCIA:

A não observância das instruções de segurança contidas neste manual e no manual de instruções da bomba relevante pode causar danos graves ou morte.

Este documento registra nossa experiência na especificação, projeto, operação e manutenção de bombas de vácuo e sistemas de vácuo para o benefício dos usuários de bombas e sistemas de bomba. Ele identifica alguns dos perigos potenciais que podem surgir e fornece diretrizes para ajudar a minimizar a probabilidade de riscos à segurança e garantir que, se um perigo surgir, ele será controlado adequadamente. Isso é especialmente pertinente, pois o uso crescente de produtos químicos de processo perigosos leva a um potencial maior de ocorrência de condições de risco.

As informações contidas neste documento não podem ser consideradas uma lista completa, mas se destinam a comunicar perigos previsíveis. É essencial que qualquer usuário de equipamentos a vácuo realize sua própria análise de risco/perigo para demonstrar conformidade com os requisitos normativos.

A estrutura deste documento considera a segurança nas seguintes áreas:

- Materiais de processo
- Pressão
- Projeto do sistema
- Escolha dos equipamentos
- Operação do sistema e treinamento

Todas essas áreas precisam ser cuidadosamente consideradas para minimizar os riscos.

Este documento foi projetado para ser lido por qualquer pessoa que especificar, projetar, instalar, operar ou efetuar a manutenção das bombas a vácuo e sistemas a vácuo. Recomendamos que ele seja lido junto com:

- Os manuais de instruções fornecidos com o seu equipamento
- As informações concedidas pelos fornecedores dos gases e substâncias químicas do processo
- As informações fornecidas pelo departamento de segurança.
- Manual da bomba
- Manual do sistema
- Análise do HAZOP
- Folha de Dados de Segurança de Material
- Padrões gerais, diretiva de máquinas etc

Nós nos isentamos de toda a responsabilidade e toda a garantia relacionada à precisão, prática, segurança e resultados das informações, aos procedimentos ou suas aplicações aqui descritas. Nós não nos responsabilizamos por nenhuma perda ou dano resultado de qualquer confiança depositada nas informações contidas nesta apresentação, ou se a informação fornecida estiver incorreta ou incompleta em qualquer aspecto. Observe que as informações aqui contidas são apenas consultivas e, enquanto nós podemos fornecer orientações relacionadas aos riscos

potenciais do uso de materiais perigosos, é responsabilidade do usuário final conduzir uma análise de riscos específica para suas operações e ambiente e cumprir com as regulamentações governamentais.

Se você precisar de outras informações sobre a adequação dos seus produtos para a aplicação do seu processo, ou sobre aspectos de segurança de suas bombas a vácuo ou sistemas a vácuo, entre em contato com o seu fornecedor ou conosco.

1.2 Análise do perigo

As técnicas de análise de perigo fornecem uma abordagem estruturada para a identificação e análise dos perigos em um sistema sob o uso normal, e os perigos que podem surgir em condições de falha e defeito. Essas técnicas fornecem um caminho para o gerenciamento de perigos; seu uso pode, em muitas circunstâncias, ser um requisito estatutário/legal. Para ser totalmente efetiva, a análise de perigos deve começar durante o projeto inicial de um sistema e continuar por toda a instalação e operação, bem como a manutenção e desmantelamento do sistema.

Um estudo detalhado das técnicas de análise de perigos está fora do escopo desta publicação. No entanto, muitas técnicas de análise de perigos são descritas em outras fontes de referência. Um exemplo de uma técnica comumente usada no setor de processamento químico é o HAZOP (Estudo de perigo e operabilidade). Esse é um procedimento de análise de perigos que se refere à identificação dos perigos potenciais e problemas operacionais.

Normalmente, a análise de perigos gera informações sobre o tipo de perigo, sua gravidade e a probabilidade de ocorrência. Essas informações podem ser usadas para decidir qual é a melhor maneira de reduzir os efeitos dos perigos para níveis aceitáveis. Dependendo da origem do perigo, pode ser possível eliminá-lo, reduzir sua gravidade e/ou reduzir a probabilidade de que ele ocorra. No entanto, é raro que os perigos possam ser eliminados completamente.

Você deve considerar todos os possíveis efeitos de um perigo quando decidir qual é a melhor maneira de gerenciá-lo. Por exemplo, uma superfície quente e pequena pode apresentar um perigo secundário para um operador, porque pode causar uma queimadura. Para reduzir a probabilidade da ocorrência de queimadura, o desenvolvedor do sistema pode colocar uma advertência visível na superfície quente, ou uma proteção ao redor. No entanto, a análise de perigo do sistema também pode indicar que a mesma superfície quente poderia servir como fonte de ignição para vapores inflamáveis; isso pode levar a uma explosão ou à liberação de uma nuvem de vapor tóxico. Para reduzir a probabilidade de ignição, o desenvolvedor do sistema deve reduzir a temperatura da superfície quente, ou garantir que os vapores inflamáveis não possam ficar em contato com ela.

1.3 Quando surgirem perigos

Os perigos podem surgir durante todas as fases da vida de um sistema. Essas fases são:

- Projeto
- Construção
- Operação/Comissionamento
- Manutenção/Desmantelamento.

Os tipos de problemas que surgem em cada fase estão resumidos abaixo. Em todos os casos, você deve estar ciente de que só pode minimizar os perigos em seu sistema depois de compreender totalmente o equipamento e o processo/aplicação no sistema. Se você estiver em dúvida, peça mais informações ou conselhos aos seus fornecedores.

1.3.1 Projeto

Quando você projetar o seu sistema, deve escolher o tipo correto de equipamento para a sua aplicação. Você deve considerar:

- a especificação técnica do equipamento
- os materiais usados na construção do equipamento
- os itens de consumo operacionais usados com o equipamento (como lubrificantes e fluidos operacionais)
- as condições e materiais do processo.

Você também deve pensar na conveniência geral do equipamento para a sua aplicação e certificar-se de que sempre será usado dentro de suas condições operacionais especificadas.

Você deve estabelecer procedimentos no projeto para garantir que os erros sejam reduzidos a um mínimo. Esses procedimentos devem incluir uma verificação independente dos cálculos do projeto, bem como a consulta aos parâmetros do projeto.

A análise de perigo sempre deve fazer parte de sua revisão do projeto. Você pode eliminar muitos perigos potenciais com uma consideração cuidadosa do uso do equipamento em seu sistema.

1.3.2 Construção

Reduza a probabilidade da ocorrência de um perigo durante a construção com a alocação de pessoas qualificadas e treinadas e os procedimentos de garantia de qualidade. A equipe qualificada pode identificar os componentes corretos que são exigidos durante a montagem e também os componentes e equipamentos mal fabricados ou defeituosos. Os procedimentos de garantia de qualidade ajudam a identificar e retificar trabalhos insatisfatórios e garantem que a especificação do projeto seja estritamente seguida.

A equipe deve tomar cuidado especial e observar todas as precauções de segurança ao instalar novos equipamentos em um sistema no qual substâncias tóxicas, corrosivas, inflamáveis, asfixiantes ou pirofóricas foram bombeadas, produzidas ou que ainda possam estar presentes.

O equipamento elétrico deve ser instalado por uma equipe qualificada, de acordo com todas as regulações elétricas locais e nacionais apropriadas.

1.3.3 Operação/Comissionamento

Os perigos podem ser causados durante a operação com uma falha do equipamento e do componente como resultado de idade, uso inadequado ou manutenção insatisfatória. Reduza a probabilidade de tais perigos com treinamento adequado sobre o uso (e manutenção) do equipamento. Quando necessário, consulte as informações fornecidas por nós e os outros fornecedores na forma de manuais de instruções, treinamento e serviços pós-vendas.

1.3.4 Manutenção/Desmantelamento



ADVERTÊNCIA:

Deve ser realizada uma análise completa de perigos, que inclua todos os procedimentos de manutenção. Não realize nenhuma manutenção sem considerar os possíveis riscos e o equipamento de proteção necessário.

Para evitar que o a equipe entre em contado com substâncias perigosas, deve-se tomar cuidado especial e observar todas as precauções de segurança durante a manutenção de um sistema no qual substâncias tóxicas, corrosivas, inflamáveis, asfixiantes ou pirofóricas foram bombeadas ou produzidas.

Todos os sistemas de vácuo requerem manutenção em algum momento, e a qualidade dessa manutenção pode ter um efeito significativo na segurança do sistema. A análise de risco deve levar em consideração os detalhes do procedimento de manutenção para garantir que não resultem em condições de risco. Alguns pontos a considerar:

- O interior do sistema de vácuo pode se contaminar com materiais de processo que podem ser perigosos para a saúde.
- Materiais em específico, como óleos de PFPE, podem ter sido selecionados para uso com o gás do processo. Se esses materiais forem alterados durante a manutenção, é possível criar uma nova situação perigosa.
- Bombas que param inesperadamente podem conter gás perigoso do processo; nesse caso, podem ser necessários procedimentos especiais para proteger o pessoal quando a bomba for removida.
- Uma situação de sobrepressão dentro de um sistema de vácuo pode não ser observada até que um componente seja removido e forçado para fora sob pressão.
- O equipamento elétrico deve ser isolado antes de dar-se início a qualquer procedimento de manutenção no sistema de vácuo.
- Considere o efeito dos solventes de limpeza no sistema de vácuo, especialmente se forem corrosivos ou inflamáveis.

Também é necessário considerar o programa de manutenção e o descarte seguro de componentes que possam estar contaminados com substâncias perigosas. Você deve seguir as indicações de manutenção fornecidas nos manuais de instruções para todos os equipamentos para garantir uma operação segura e confiável. Os sistemas HazLoc tipicamente têm requisitos adicionais.

2 Fontes químicas de perigos

2.1 Gases do processo perigosos

Gases e vapores perigosos são definidos como materiais que podem ser:

- Material inflamável
- Corrosivos
- Pirofóricos
- Radioativo
- Tóxico
- Explosivo
- Oxidantes

Devido à sua natureza perigosa, é essencial considerar suas características e a forma como elas podem afetar a segurança do sistema de vácuo. É normal discutir esses tipos de gás do processo com seu fornecedor de vácuo ao especificar um sistema de vácuo; entretanto, os pontos a seguir trazem uma visão geral de alguns dos perigos.

Observação:
Às vezes, a reação de gases do processo não perigosos dentro de um sistema de vácuo pode resultar na geração de subprodutos, os quais podem ser considerados perigosos.

2.2 Reações químicas

Você deve considerar com cuidado todas as possíveis reações químicas que possam ocorrer nas condições de uso normal, uso incorreto e falha, em qualquer ponto do seu sistema a vácuo. Particularmente, deve-se considerar as reações que envolvam gases e vapores que possam levar a explosões. A experiência mostrou que ocorreram explosões nas quais os materiais envolvidos não haviam sido considerados originalmente pelo desenvolvedor do sistema, e nas quais o modo de falha desse equipamento não foi levado em consideração.

2.2.1 Reações homogêneas

As reações homogêneas ocorrem na fase de gás entre dois ou mais tipos de moléculas de gás. As reações de combustão do gás geralmente ocorrem dessa forma. Por exemplo, pelo que sabemos, a reação entre o silano (SiH_4) e o oxigênio (O_2) é sempre homogênea. Portanto, se você tem essas reações em um processo de fabricação, deve controlar cuidadosamente a pressão do processo e as concentrações do reagente para prevenir a ocorrência de taxas de reação excessivas.

2.2.2 Reações heterogêneas

As reações heterogêneas precisam de uma superfície sólida para ocorrer, por ex. algumas moléculas de gás apenas reagem quando são adsorvidas por uma superfície, mas não reagem na fase de gás em pressões baixas. Esse tipo de reação é ideal para determinados processos, pois minimiza os efeitos de reações que ocorrem dentro da câmara do processo, reduz a geração de particulados e reduz a probabilidade de contaminação.

A maioria das reações heterogêneas torna-se homogênea em pressões mais altas, comumente bem abaixo da pressão atmosférica. Isso significa que a maneira como os gases reagem nas câmaras de processo não é

necessariamente relacionada à maneira como reagem quando comprimidos por uma bomba a vácuo.

2.2.3 Contaminação cruzada

Muitas vezes, o sistema de vácuo é alternado para aplicações em que são usados diferentes gases do processo, o que pode ocorrer devido ao equipamento ser reutilizado em uma aplicação diferente ou mesmo devido a diferentes etapas do processo em uma determinada aplicação.

Em todos esses casos, é preciso considerar a possibilidade de contaminação cruzada entre gases/vapores/materiais de um processo com os gases do processo/vapores/materiais de outro. Em alguns casos, podem ocorrer reações perigosas entre dois materiais que normalmente não apresentam perigo quando bombeados individualmente.

Em locais onde é possível ocorrer reações perigosas, é prática normal purgar com um gás inerte entre as etapas do processo por ~15 minutos; muitas vezes, isso remove o primeiro material antes que o segundo material seja bombeado; entretanto, deve-se observar que, em alguns sistemas de vácuo, há o potencial de haver bolsões de gás do processo que não são removidos efetivamente pela etapa de purga. Quando for possível que ocorra uma reação perigosa, deve-se considerar cuidadosamente o projeto do sistema de vácuo e a identificação de qualquer volume confinado.

Purgas pré/pós-processo

Para evitar reações químicas indesejadas, uma prática comum é purgar a bomba de vácuo com um gás de purga inerte por 15 minutos antes e depois de admitir gases do processo. Uma purga pré-processo removerá todos os vestígios de oxigênio atmosférico e água, enquanto uma purga pós-processo removerá os gases do processo residuais.

Problemas com reações anormais

As reações anormais podem ocorrer quando substâncias químicas entram em contato com gases ou materiais que o desenvolvedor do sistema não previu. Por exemplo, isso pode ocorrer quando há um vazamento que permite que os gases atmosféricos vazem para dentro do sistema, ou que gases tóxicos, inflamáveis, explosivos ou perigosos vazem para fora na atmosfera.

Para evitar a ocorrência dessas reações, você deve manter uma hermeticidade de 1×10^{-3} mbar l/s (1×10^{-1} Pa l/s), ou inferior, no seu sistema. Aplicações de vácuo alto normalmente manteriam uma hermeticidade de 1×10^{-5} mbar l/s (1×10^{-3} Pa l/s) ou inferior. Você deve se certificar de que todas as válvulas do sistema são à prova de vazamento por toda a base.

Os gases que normalmente não entram em contato uns com os outros durante o ciclo do processo podem ser misturados no sistema de bombeamento e nas tubulações de exaustão.

Quando uma bomba de vácuo for desligada com vácuo na entrada, haverá sucção de retorno de gases de exaustão desde a tubulação/sistema de exaustão. Se esse gás contiver ar/oxigênio, poderão ocorrer reações químicas indesejáveis com o gás do processo ou depósitos internos. Recomenda-se que, onde isso possa ocorrer, a exaustão da bomba de vácuo seja equipada com uma válvula de retenção de não retorno para desacelerar o fluxo reverso de gases de exaustão. Além disso, o uso

de uma purga de nitrogênio na bomba de vácuo garantirá que o ar seja excluído do sistema de vácuo.

É possível que o vapor de água ou as soluções de limpeza estejam presentes na câmara do processo após os procedimentos rotineiros de manutenção. Isso pode ocorrer depois que a câmara do processo foi lavada e limpa. O vapor de água também pode entrar no sistema a partir dos ductos e purificadores de exaustão.

Quando os solventes são usados para irrigar os depósitos do processo do sistema a vácuo, é importante garantir que o solvente selecionado seja compatível com todos os materiais do processo no sistema a vácuo.

Mudança de fase

Um sistema de vácuo é projetado para elevar a pressão dos gases e vapores bombeados do vácuo para a pressão atmosférica, fazendo com que seja possível que os materiais mudem de fase para uma forma líquida ou mesmo sólida. Materiais que passaram por uma mudança de fase têm potencial para causar perigos como tubulação bloqueada, corrosão ou até mesmo materiais inflamáveis. Normalmente, a mudança de fase ocorrerá à medida que a pressão se aproximar da atmosfera dentro da bomba seca; no entanto, em condições ambiente muito frias, é possível que os materiais sofram uma mudança de fase na linha de frente para a bomba de vácuo.

Onde for possível que isso gere condições de risco, recomenda-se que seja usado o aquecimento de traços ou gases de purga inertes secos.

Se partículas sólidas estiverem se formando na linha de frente, há o potencial de camadas se formarem nas paredes e, com o tempo, elas podem se soltar e entrar na bomba — consulte a Seção *Formação de depósitos na tubulação* na página 37.

Se for desejável recuperar os materiais condensados, recomenda-se que um condensador e um receptor sejam instalados no sistema de vácuo, onde esses materiais possam ser coletados com segurança.

2.3 Materiais inflamáveis/explosivos

Muitos gases e poeiras, como hidrogênio (H_2), acetileno (C_2H_2), propano (C_3H_8) e dióxido de silício finamente dividido, são inflamáveis e/ou explosivos em certas concentrações em um oxidante se uma fonte de ignição for fornecida. Uma fonte de ignição pode surgir, por exemplo, de um acúmulo de calor localizado. Isso é discutido em *Fontes de ignição* na página 34.

Gases/vapores inflamáveis são aqueles que, quando misturados com uma determinada quantidade de ar ou oxidante, podem criar uma mistura explosiva, mas nem todas as concentrações são perigosas.

Você pode evitar o perigo de explosão certificando-se de que a concentração das misturas potencialmente inflamáveis seja mantida longe da zona inflamável. Outros detalhes são fornecidos em *Evitando a zona inflamável* na página 15.

Outro método que você pode usar para reduzir a probabilidade de explosão é eliminar a fonte de ignição. Outros detalhes são fornecidos em *Fontes de ignição* na página 34.

As concentrações perigosas estão dentro da faixa inflamável e, geralmente, são chamadas de "atmosferas potencialmente explosivas" devido ao fato que podem sofrer ignição e causar uma explosão. A faixa inflamável é a

faixa de concentração de combustível/ar entre o limite inflamável superior e o limite inflamável inferior. As misturas nessa faixa queimarão ou explodirão se entrarem em contato com uma fonte de ignição.

Quando não for possível evitar a zona inflamável, você deve se certificar de que o equipamento foi projetado para conter qualquer explosão resultante sem romper ou transmitir a chama para a atmosfera externa. O uso de corta-chamas é discutido em *Uso dos sistemas de proteção corta-chamas (sistemas HazLoc)* na página 33. Se a atmosfera externa do seu sistema de vácuo for perigosa, você deve garantir que todo o equipamento é adequadamente classificado para ela.

O HazLoc fornece instruções claras para o projeto de equipamentos a serem utilizados em atmosferas potencialmente explosivas.

Quando for possível evitar bombear atmosferas potencialmente explosivas em todas as condições, todos os nossos tipos de bombas de vácuo podem ser usados para bombear os gases ou vapores inflamáveis.

A fonte dos perigos de explosão geralmente está em uma das categorias a seguir:

- Oxidantes
- Materiais inflamáveis/explosivos
- Materiais pirofóricos
- Azida de sódio.

Observação:

Nos países da União Europeia (e alguns outros), os fornecedores de materiais do processo são obrigados por lei a publicar os dados físicos e químicos dos materiais que vendem (normalmente na forma de folhas de dados de segurança de material). Os dados para o material devem incluir, quando aplicável, informações sobre os limites explosivos inferior e superior, as propriedades físicas e termodinâmicas do material e qualquer perigo à saúde associado ao uso do material. Consulte essas informações para obter orientação.

2.3.1 Riscos de explosão

Observação:

As bombas estão disponíveis atendendo a diretiva ATEX Europeia para equipamentos utilizados em atmosferas potencialmente explosivas.

Explosões inesperadas são invariavelmente causadas por desvio das orientações de segurança. Todavia, alguns dos incidentes de explosão foram extremamente violentos e poderiam ter causado lesão grave ou morte.

As causas comuns de ruptura violenta de um componente do sistema de vácuo são a ignição de materiais inflamáveis ou o bloqueio ou restrição da exaustão da bomba. Para evitar perigos e a fim de garantir a operação segura das suas bombas e sistemas a vácuo, preste atenção aos seguintes pontos.

- A menos que seu sistema tenha sido projetado para materiais de bombeamento em concentrações onde poderiam ser inflamados na bomba de vácuo, você deve garantir que as misturas de materiais inflamáveis e oxidantes sejam mantidos fora da gama de inflamabilidade. O uso de uma purga inerte é um modo de fazê-lo. Consulte *Evitando a zona inflamável* na página 15.

- Certifique-se de que os bloqueios da exaustão não possam ocorrer durante a operação, seja pelos componentes mecânicos (por exemplo, válvulas ou blocos) ou por causa do depósito dos materiais ou subprodutos do processo nas tubulações, filtros e outros componentes da exaustão, a não ser que seu sistema tenha sido projetado para lidar com eles.
- Use apenas óleos de PFPE (perfluoropoliéter) nos mecanismos da bomba que fiquem expostos a altas concentrações de oxigênio ou outros oxidantes. Outros tipos de óleos vendidos como "não inflamáveis" podem ser adequados apenas para o uso com concentrações de oxidantes de até 30% por volume.
- Certifique-se de que a sobrepressão acidental de um sistema a vácuo deliberadamente fechado e isolado não possa ocorrer; por exemplo, como resultado de uma falha no regulador de pressão ou sistema de controle de purga.
- Nos casos em que o produto bombeado possa reagir violentamente com a água, é recomendável que um material de resfriamento diferente da água (por exemplo, fluido de transferência de calor) seja usado no circuito de resfriamento. Fale conosco para obter orientação.

Materiais explosivos podem reagir sem a presença de ar ou de um oxidante; são especialmente perigosos de bombear.

Sólidos explosivos de polissilício podem ser criados em sistemas de vácuo e se acumularão em superfícies horizontais. É normal minimizar a quantidade de material que se forma por meio da realização regular de uma etapa de ataque químico com um oxidante forte, como NF_3 ou SF_6. Isso garante a presença de menos material na câmara de vácuo e reduz a possibilidade de um evento perigoso. Deve-se dar atenção especial ao projeto do sistema de vácuo para evitar volumes em que os depósitos de polissilício possam se formar, mas que não sejam lavados eficazmente pelos gases de ataque. Um exemplo comum desse tipo de design é o fole horizontal, no qual depósitos podem se formar dentro das convoluções, mas os gases de ataque só podem atacar a pequena superfície exposta.

A solução aqui é evitar o uso de foles ou montá-los em uma orientação vertical.

2.3.2 Fontes de misturas de gás ou vapor potencialmente explosivas

Quando um gás ou vapor inflamável é misturado com a concentração correta do oxigênio ou outro oxidante adequado, ele forma uma mistura potencialmente explosiva que inflama na presença de uma fonte de ignição.

Embora geralmente seja aparente quando o material bombeado é potencialmente explosivo, na nossa experiência existem algumas condições em que uma mistura potencialmente explosiva é produzida devido a condições que não foram consideradas ao projetar o sistema para o processo. Você deve identificar todas as condições de processo e fontes possíveis de misturas potencialmente explosivas que poderiam ser geradas pelo seu equipamento. Alguns exemplos da nossa experiência são listados a seguir, porém essa lista não está completa:

- **Contaminação cruzada** – quando uma bomba de vácuo estiver sendo usada para várias tarefas, é possível que o seu uso com materiais individuais seja seguro; mas se ela não for purgada antes do uso com outro material, pode ocorrer a contaminação cruzada com reações inesperadas.

- **Fluidos de limpeza** – uma aplicação pode ser considerada benigna; porém, o uso de fluidos de limpeza inflamáveis e a secagem subsequente por evacuação através da bomba de vácuo podem criar uma mistura potencialmente explosiva.
- **Materiais inesperados** – nas tarefas de "vácuo interno" em que a bomba de vácuo é usada para fornecer um sistema de vácuo distribuído, é possível bombear materiais inflamáveis que não tenham sido considerados durante o projeto do sistema. Esses materiais podem ter temperaturas de autoignição menores que as temperaturas internas ou taxa de temperatura da bomba a vácuo.
- **Vapores dissolvidos** – eles podem evoluir durante a operação do processo, e é necessário tomar cuidado ao selecionar a classificação de temperatura interna correta para seu processo. Tipicamente no mercado de processos químicos, ele é coberto pelos requisitos HazLoc.
- **Vazamento de ar** – o ingresso acidental de ar ou oxidante em um sistema pode alterar a concentração de um gás ou vapor inflamável e criar uma mistura potencialmente explosiva.
- **Líquidos de vedação inflamáveis** – quando um líquido inflamável for usado como líquido de vedação em uma bomba de vácuo de anel líquido, a entrada de ar criará uma mistura interna potencialmente explosiva.
- **Materiais de processo condensados –** se houver a possibilidade de que um material inflamável se condense dentro do seu sistema, você deve estar ciente de que ele pode reagir com oxidantes de outras etapas do processo ou com o ar (por exemplo, na exaustão). Isso pode ser evitado com temperatura adequada ou controle de pressão parcial.

2.3.3 Evitando a zona inflamável

Um material inflamável cria uma atmosfera potencialmente explosiva apenas se for combinado com ar ou oxigênio ou outro oxidante e sua concentração estiver entre o Limite Inferior de Inflamabilidade — LFL (ou Limite Inferior de Explosão — LEL) e o Limite Superior de Inflamabilidade — UFL (ou Limite Superior de Explosão — UEL). Observe que a maioria dos dados encontrados na literatura referem-se à limites de inflamabilidade no ar, por ex. quando o oxigênio for o oxidante. Todas as informações adicionais fornecidas abaixo baseiam-se nesta consideração.

Para ser potencialmente explosivo, também é necessário que a concentração do oxigênio esteja acima da Concentração Mínima do Oxigênio — MOC (ou Concentração limite de Oxigênio — LOC). A MOC (LOC) para a maioria dos gases inflamáveis é de 5% vol. ou mais.

Observação:

Isso não se aplica aos materiais pirofóricos, que exigem precauções especiais.

Existem várias estratégias que podem ser usadas para evitar a operação com misturas de gás na zona inflamável. A escolha da estratégia depende do resultado da avaliação do risco (análise do perigo) para o processo e o sistema de bombeamento:

De acordo com a Diretiva da União Europeia sobre atmosferas explosivas ("ATEX 114" e 2014/34/CE, respectivamente), o método preferencial para garantir a segurança de gases inflamáveis é garantir que sua concentração no ar não fique dentro da faixa inflamável, garantindo que eles não possam queimar caso seja gerada uma fonte de ignição. Portanto, é necessário realizar uma das seguintes ações:

Fontes químicas de perigos

- **Mantenha a concentração do gás inflamável abaixo do LFL (LEL)**

  Para minimizar o risco de que um gás inflamável entre acidentalmente na zona inflamável, deve ser usada uma margem de segurança para a operação abaixo do LFL (LEL).

  Uma margem de segurança deve ser determinada pelo usuário após uma avaliação de riscos. Algumas autoridades sugerem manter a concentração abaixo de 25% LFL (LEL).

  O método mais usado para manter a concentração abaixo do LFL (LEL) é a diluição com purga de gás inerte (por exemplo, nitrogênio), introduzido na entrada da bomba e/ou nas conexões da purga. A integridade exigida do sistema de diluição e de qualquer alarme ou intertravamento dependerá da zona perigosa que resultaria se o sistema de diluição falhasse.

  O limite inferior inflamável pode ser encontrado normalmente na MSDS (Folha de Dados de Segurança de Material) fornecida pelos fornecedores do gás ou vapor; essa é a concentração mínima de ar/oxidante, na qual uma mistura de gás inflamável pode ser inflamada e sustentar uma chama ou explosão.

  Para evitar uma atmosfera potencialmente explosiva e fornecer uma margem de segurança, é necessário fazer a diluição com um gás inerte até que a concentração de combustível/ar [ou oxidante] seja de 25% da concentração no limite inferior de inflamabilidade.

  Esse é um modo de operação preferencial, pois o efeito de um vazamento de ar no sistema de vácuo apenas dilui ainda mais os gases/vapores inflamáveis; no entanto, é necessário considerar o sistema de gás inerte como essencial de segurança.

  Observação:

  Certifique-se de que as precauções adequadas sejam tomadas para evitar o risco de asfixia.

- **Mantenha a concentração do gás inflamável acima do UFL (UEL)**

  Normalmente, o limite superior inflamável pode ser encontrado na MSDS fornecida pelos fornecedores do gás ou vapor; ele é a concentração máxima de ar/oxidante na qual uma mistura de gás inflamável pode ser inflamada e sustentar uma chama ou explosão.

  Para evitar uma atmosfera potencialmente explosiva e fornecer uma margem de segurança, é necessário limitar a concentração de ar/oxidante a 60% da concentração de ar/oxidante necessária no limite superior de inflamabilidade de ar/combustível.

  Esse modo de operação requer o controle cuidadoso do vazamento de ar do reservatório de processo, da tubulação e do sistema de vácuo; além disso, é necessário considerar a entrada acidental de ar devido a atividades operacionais ou de manutenção, como abertura de válvulas ou substituição de cilindros de gás inerte.

  A vantagem dessa abordagem é que não é necessário usar uma purga de gás inerte, facilitando/possibilitando a redução de gases do processo e a redução de custos.

- **Mantenha a concentração do oxigênio abaixo da MOC (LOC)**

  Esse modo de operação exige o uso do monitoramento da concentração do oxigênio dos gases bombeados para garantir a operação segura. Para minimizar o risco de que um gás inflamável entre acidentalmente na zona inflamável, deve ser usada uma margem de segurança para a operação abaixo da MOC (LOC). Os padrões de indústria disponíveis indicam que quando a concentração do oxigênio

for continuamente monitorada, deve ser mantida a concentração de oxigênio em menos de 2% por volume abaixo da MOC (LOC) mais baixa publicada para a mistura de gás. A não ser que a MOC (LOC) seja menor que 5%, a concentração de oxigênio deve ser mantida abaixo de 60% da MOC (LOC). Se o monitoramento for realizado apenas na forma de verificações rotineiras do nível de oxigênio, não permita que o nível de oxigênio exceda 60 % da MOC (LOC) mais baixa publicada, a não ser que a MOC (LOC) seja inferior a 5%, no qual a concentração de oxigênio deve ser mantida abaixo de 40% da MOC (LOC).

O método preferível para manter o nível de oxigênio abaixo da MOC (LOC) mais baixa publicada é a exclusão rigorosa do ar e do oxigênio do processo e do sistema da bomba, junto com a diluição do gás bombeado com um gás de purga inerte (como o nitrogênio), introduzido se necessário na entrada da bomba e/ou nas conexões da purga. A integridade exigida das medidas de exclusão do ar/oxigênio e de quaisquer alarmes e intertravamentos dependerá da zona perigosa que resultaria se os sistemas de exclusão e diluição falhassem.

As precauções normalmente exigidas para excluir totalmente o ar do processo e do sistema da bomba são fornecidas no final desta seção.

A concentração de oxigênio mínima é aquela na qual pode existir uma atmosfera potencialmente explosiva. Em concentrações de oxigênio abaixo desse nível, não é possível que a mistura inflamável sustente uma queima ou explosão.

Para evitar uma atmosfera potencialmente explosiva e fornecer uma margem de segurança, é necessário limitar a concentração de oxigênio a 60% da concentração mínima.

Mais uma vez, esse modo de operação requer o controle cuidadoso do vazamento de ar do reservatório de processo, da tubulação e do sistema de vácuo; além disso, é necessário considerar a entrada acidental de ar devido a atividades operacionais ou de manutenção, como abertura de válvulas ou substituição de cilindros de gás inerte.

- **Mantenha a concentração do gás inflamável acima do UFL (UEL)**

  Quando as concentrações do gás inflamável forem altas, a operação acima do UFL (UEL) pode ser mais adequada. Para minimizar o risco de qualquer incursão acidental na zona inflamável, deve ser usada uma margem de segurança para a operação acima do UFL (UEL). É recomendável que o nível de oxigênio residual no gás seja mantido em menos de 60% do nível de oxigênio absoluto normalmente presente na concentração do UFL (UEL) do gás inflamável.

  O método preferencial para manter o nível de oxigênio abaixo dessa margem de segurança é a exclusão rigorosa do ar e do oxigênio do processo e do sistema da bomba. A diluição do gás bombeado com um gás de purga inerte (como o nitrogênio) ou com um gás inflamável adicional (gás de "empuxo") introduzido na entrada da bomba e/ou nas conexões da purga também pode ser necessária. A integridade exigida das medições de exclusão do ar em qualquer sistema de introdução do gás de purga, e de quaisquer alarmes e intertravamentos, dependerá da zona perigosa que resultaria se os sistemas de exclusão e diluição falhassem.

- **Manutenção da concentração do gás inflamável abaixo da pressão mínima de explosão**

  Todo material inflamável tem uma pressão mínima abaixo da qual não se pode sustentar uma explosão. Se a pressão na entrada da bomba de vácuo pode ser mantida com segurança abaixo desta pressão, então as ignições começando dentro da bomba de vácuo não poderão se

espalhar para a entrada. Precauções, contudo, devem ser tomadas para a exaustão da bomba de vácuo.

As precauções normalmente exigidas para excluir o ar rigorosamente do processo e do sistema da bomba são as seguintes:

- **Eliminação de vazamentos de ar**

  Use um detector de vazamentos ou realize um teste de taxa de aumento de pressão. Antes de admitir materiais inflamáveis na câmara do processo, é possível realizar um teste para estabelecer se o vazamento do ar (oxigênio) no sistema de vácuo está dentro dos limites permitidos.

  Para realizar um teste de taxa de aumento da pressão, a câmara do processo vazia é evacuada a uma pressão abaixo da pressão operacional normal, e depois isolada da bomba de vácuo. A pressão na câmara do processo é então registrada por um período fixo. Quando o volume da câmara do processo for conhecido junto com o vazamento máximo permitido de ar, é possível calcular o aumento máximo de pressão permitido que pode ocorrer em um período predeterminado de tempo. Se o limite máximo da pressão for excedido, é necessário tomar uma ação para vedar a fonte do vazamento de ar (oxigênio) para a câmara do processo; o teste deve ser repetido com sucesso antes de permitir a admissão de materiais inflamáveis para a câmara do processo.

  Em alguns casos, a capacidade do sistema a vácuo de atingir uma boa pressão de base pode ser usada para indicar a hermeticidade do sistema.

- **Remova todo o ar de um sistema antes de iniciar o processo**

  Antes da entrada de qualquer tipo de gás inflamável no processo, o sistema deve ser totalmente evacuado e/ou purgado com gás inerte (como nitrogênio) para remover todo o ar do sistema. No final do processo, repita esse procedimento para remover todo o gás inflamável antes que o sistema seja finalmente ventilado para o ar.

- **Para as bombas de vácuo secas**

  Certifique-se de que os gases de vedação do eixo ou purga não possam ser fornecidos ou contaminados com ar em nenhuma circunstância e de que a porta de lastro de gás esteja vedada ou seja usada apenas para introduzir gás inerte.

- **Para as bombas de vácuo úmidas (p. ex., bombas de pistão ou de palhetas rotativas)**

  Mantenha as vedações do eixo totalmente de acordo com as instruções do fabricante e use um sistema de lubrificação por óleo bombeado ou pressurizado com uma indicação de alarme para a perda da pressão do óleo. Esse sistema pode incluir um acessório externo para fornecer óleo lubrificante filtrado e pressurizado, com um interruptor de pressão. Certifique-se de que qualquer porta de lastro do gás seja vedada ou usada apenas para introduzir gás inerte. Forneça uma purga adequada do gás inerte para a caixa do óleo, para remover o ar antes do início do processo.

- **Para as bombas booster de vácuo Roots**

  Mantenha a vedação do eixo de acionamento primário totalmente de acordo com as instruções do fabricante e garanta que todas as conexões da porta de purga ou de respiro possam ser usadas apenas para introduzir gás inerte.

- **Fluxo inverso**

Certifique-se de que os procedimentos operacionais do sistema e as instalações protejam o sistema contra qualquer fluxo de ar inverso que poderia resultar de uma falha da bomba. Certifique-se de que qualquer gás inflamável bombeado seja descartado com segurança na ventilação final da exaustão da bomba. Use uma purga inerte adequada da tubulação antes do início (e após o final) do processo de gás inflamável para se certificar de que as misturas de gás inflamável não possam subir pelo duto de exaustão; e use uma purga de gás inerte adequada durante a operação para impedir que a contramistura turbulenta do ar desça pela exaustão.

2.3.4 Hermeticidade (vazamento de ar atmosférico)

O sistema de vácuo que manipula gases perigosos do processo deve ser avaliado cuidadosamente para determinar a consequência do vazamento de ar para o interior do sistema. Recomenda-se que seja realizada uma análise de risco para determinar o nível de risco; tal análise deve levar em conta a operação normal, os modos de falha e os procedimentos de manutenção. Estes são os problemas típicos:

- Reação com gases pirofóricos
- Mover gases e vapores inflamáveis para a região inflamável
- Corrosão devido à entrada de umidade atmosférica
- Reações indesejáveis com gases do processo.

Nenhum sistema de vácuo é 100% à prova de vazamentos; há sempre algum nível de vazamento de ar, mesmo no sistema de vácuo ultra-alto. Quando a falta de hermeticidade puder criar um problema de segurança, devem-se realizar cálculos para estabelecer qual é o nível de hermeticidade necessário para criar uma condição segura.

Geralmente, os sistemas de vácuo são projetados para serem à prova de vazamentos. No entanto, a hermeticidade do sistema adjacente não pode ser garantida. Você deve usar um método adequado de detecção de vazamento (por exemplo, detecção de vazamento por espectrometria da massa de hélio) para confirmar a integridade do vácuo e do sistema de exaustão. O uso de uma tubulação de vácuo padrão, como ISO-KF ou ISO-K, é recomendado, por terem sido projetadas para serem à prova de vazamentos, de acordo com os padrões de vácuo. Se for bombear acima do limite explosivo superior, leve em conta a hermeticidade de toda a instalação. Verifique a taxa de vazamento regularmente.

Se o fornecimento de um sistema à prova de vazamentos for um essencial de segurança, o nível de desempenho do sistema de vácuo deve ser calculado para estabelecer o nível de risco.

Quando a hermeticidade for essencial para evitar condições de risco, é necessário realizar verificações regulares para confirmar que o sistema permanece à prova de vazamentos. Deve-se dar atenção especial às atividades de manutenção que podem levar a vazamentos de ar acidentais e possíveis perigos.

Observação:

Quando a hermeticidade de um sistema for um essencial de segurança, mas não for possível fornecer o nível de integridade necessário, recomenda-se usar diluição de gás inerte dos gases do processo para colocá-los abaixo do limite seguro.

2.4 Oxidantes

Oxidantes como oxigênio (O_2), ozônio (O_3), flúor (F_2), trifluoreto de nitrogênio (NF_3) e hexafluoreto de tungstênio (WF_6) são frequentemente bombeados em sistemas de vácuo. Os oxidantes reagem prontamente com uma ampla variedade de substâncias em um sistema de vácuo, incluindo elastômeros como anéis-O, polímeros e óleos, e a reação geralmente produz calor e uma pressão de gás aumentada. Os perigos potenciais resultantes incluem o fogo e a sobrepressão na bomba ou no sistema de exaustão.

Para bombear esses gases com segurança você deve seguir as instruções de segurança do fornecedor do gás, bem como as seguintes recomendações:

- Quando a concentração de oxigênio for maior que 25% em volume, é essencial usar um lubrificante de PFPE e polímeros quimicamente resistentes para componentes como anéis-O, palhetas de bomba etc. Ao bombear oxigênio puro, o uso de uma bomba qualificada para O2 é essencial.
- Use lubrificantes de PFPE nas bombas que são usadas para bombear gases nos quais a porcentagem de oxigênio normalmente está abaixo de 25% por volume, mas que poderia subir acima de 25% sob condições de falha — se oxidantes além do oxigênio forem bombeados, consulte o fornecedor do lubrificante para os níveis recomendados do oxidante presente.
- Os lubrificantes de PFPE são preferíveis, mas os do tipo de hidrocarboneto podem ser usados se uma purga de gás inerte adequada for usada para garantir que o óleo não seja exposto a níveis inseguros do oxidante.

O efeito real desses oxidantes dependerá da pressão e da temperatura do gás; ambos afetam a taxa de reação. À medida que a taxa de reação aumenta, o mesmo acontece com o potencial de uma possível sobrepressão ou incêndio. Em circunstâncias normais, os lubrificantes de PFPE não oxidam nem se decompõem em uma caixa de óleo da bomba de pistão ou de palhetas rotativas seladas lubrificadas a óleo ou caixa de engrenagem, e assim se reduz a probabilidade de explosão.

Observe que a decomposição térmica dos lubrificantes de PFPE pode ocorrer em uma temperatura de 290 °C ou mais, na presença de metais ferrosos e do ar. No entanto, a temperatura da decomposição térmica baixa para 260 °C quando o titânio, magnésio, alumínio ou suas ligas estão presentes.

Se você não desejar usar os lubrificantes de PFPE em uma bomba de vácuo de pistão ou de palhetas rotativas selada lubrificada a óleo, dilua o oxidante até uma concentração segura com um gás inerte como o nitrogênio seco.

Essa abordagem é possível apenas para taxas de fluxo baixas dos gases oxidantes. Você deve instalar recursos de segurança no seu sistema para garantir que o fluxo mínimo do gás de diluição exigido para reduzir a concentração do oxidante para um nível seguro esteja sempre disponível, e garantir que o fluxo do oxidante não exceda a vazão máxima permitida. Você deve projetar o sistema para que o fluxo do oxidante pare imediatamente se essas condições não forem cumpridas.

Recomendamos usar nossas bombas secas para bombear oxidantes (consulte *Bombas secas* na página 41). As bombas secas não têm fluidos de vedação no volume movimentado e, portanto, a probabilidade

de ocorrência de uma explosão é imensamente reduzida se você usar uma bomba seca para processar os oxidantes. Recomendamos uma purga de gás inerte para os rolamentos e na caixa de engrenagem quando um lubrificante de hidrocarboneto é usado.

2.5 Materiais pirofóricos

Na maioria das condições, gases pirofóricos como silano (SiH_4) e fosfina (PH_3) ou poeiras pirofóricas sofrem combustão espontânea em ar sob pressão atmosférica. Portanto, essa combustão pode ocorrer quando esses gases entram em contato com o ar ou outro oxidante em um local onde a pressão seja suficientemente alta para levar à combustão. Um gás pirofórico se inflamará espontaneamente em contato com o ar; trata-se efetivamente um gás inflamável com um limite superior de inflamabilidade de 100%. Isso pode ocorrer se o ar vazar para o sistema, ou se a exaustão do sistema entrar em contato com a atmosfera. O calor da reação de um oxidante ou gás pirofórico pode agir como fonte de ignição para materiais explosivos.

Não são apenas gases que são pirofóricos; é possível que poeiras e pós também o sejam, e isso vale especialmente para poeiras e pós metálicos que foram formados por sublimação na câmara de vácuo. Essas poeiras não formaram uma camada protetora de óxido e, portanto, são sensíveis à autoignição ao serem expostas ao ar.

A poeira também pode funcionar como um absorvedor de gases do processo inflamáveis e pirofóricos. A taxa de adsorção na poeira é aumentada por alta pressão, baixa temperatura e grande área de superfície.

Se os gases de exaustão de diferentes processos forem ventilados por meio de um sistema de extração comum, pode ocorrer combustão ou explosão. É recomendado, portanto, que você use sistemas de extração independentes ao bombear materiais pirofóricos. Os processos que utilizam fósforo podem fazer com que o fósforo sólido condense no sistema a vácuo ou na exaustão. Na presença do ar e sujeito a uma agitação mecânica mesmo que leve (por exemplo, a ativação de uma válvula ou a rotação da bomba causada pelo diferencial de pressão), o fósforo pode queimar espontaneamente e liberar gases tóxicos. É recomendável que as bombas sejam operadas com a purga de gás inerte e de modo quente o suficiente para minimizar a condensação do fósforo.

Os lubrificantes de PFPE podem absorver gases do processo que, no caso de materiais pirofóricos, podem levar à ignição local quando o lubrificante estiver exposto ao ar. Esse perigo pode se tornar particularmente aparente durante a manutenção, ou quando um oxidante é bombeado pelo sistema depois de poeira ou gás pirofórico. Você pode reduzir a probabilidade da ocorrência desse perigo se usar as bombas secas, que não contêm lubrificantes no volume movimentado. Você deve garantir que todo o material pirofórico tenha sido passivado antes de ser ventilado ou manuseado.

Ao lidar com gases pirofóricos, poeiras ou depósitos, é essencial excluir vazamentos de ar que possam criar uma reação perigosa. Pequenos vazamentos de ar reagirão com o gás pirofórico, mas podem não criar uma situação perigosa; o nível de vazamento permitido precisa ser calculado para cada aplicação, e uma margem de segurança adequada deve ser determinada.

Pós e poeiras inflamáveis podem ser coletados em filtros ou podem simplesmente formar camadas na tubulação. Quando expostos à atmosfera, há uma possibilidade real de reação muito exotérmica. Devem ser tomadas medidas para garantir que o ar seja excluído desses sistemas

em operação normal, durante a manutenção e durante condições de falha. Quando o sistema precisar de respiro para a atmosfera, recomenda-se que o nitrogênio seja usado para esse fim e, se o sistema de vácuo precisar ser desmontado, deve-se usar equipamento de proteção para caso haja alguma reação não planejada.

Observação:

Deve-se ter cuidado para identificar todos os materiais nocivos e determinar uma estratégia de manuseio adequada.

Antes de abrir o sistema da bomba para o ar, é recomendável operar por um tempo com gás de purga para remover os gases adsorvidos de qualquer camada de poeira. Uma oxidação controlada bombeando oxigênio em baixas concentrações pode ser usada para remover os gases pirofóricos dentro da poeira e também para oxidar a poeira. Essa abordagem precisa ser definida cuidadosamente, pois há o risco potencial de que somente o material na superfície seja tratado, enquanto a maior parte da camada de poeira retém seu gás absorvido.

O uso de banhos de água ou de óleo nos quais os componentes do sistema de vácuo podem ser submersos após a desmontagem pode ser muito eficaz; entretanto, a segurança de tal procedimento precisa ser analisada para cada aplicação.

Outros materiais, como o silício e o polissilício, podem formar depósitos instáveis dentro dos sistemas de vácuo, e esses materiais são a linha de fronteira entre o pirofórico e o explosivo. Consulte a seção sobre explosivos.

2.6 Material tóxico

Muitas aplicações a vácuo envolvem o processamento e manuseio de materiais tóxicos e exigem procedimentos específicos.

Os materiais tóxicos por natureza são perigosos para a saúde. No entanto, a natureza do perigo é específica do material e sua concentração relativa. Você deve seguir os procedimentos de manipulação corretos, indicados pelo fornecedor do material e legislação aplicável.

Os sistemas de vácuo são uma excelente maneira de manusear materiais tóxicos, pois um vazamento no lado do vácuo só aspirará ar da atmosfera e não permitirá que os gases do processo tóxicos escapem. A situação é diferente quando você começa a considerar a linha de exaustão do sistema de vácuo: aqui a pressão está próxima da atmosfera ou logo acima da atmosfera, e um vazamento resultará em um vazamento de qualquer gás tóxico sendo bombeado.

Você também deve considerar os pontos a seguir:

- **Diluição de gás** – Existem instalações para permitir a diluição de gases do processo tóxicos à medida que passam pela bomba de vácuo e entram na exaustão. Você pode usar essa diluição para reduzir a concentração abaixo do limite tóxico. Recomendamos que monitore seu suprimento de gás de diluição para alarmar se o suprimento falhar. Especificamente para bombas de óleo seladas, consulte o manual de instruções da bomba para possíveis kits de retorno de óleo requeridos.
- **Vedação do eixo (bombas secas)** – muitas bombas de vácuo secas utilizam um sistema de purga de gás para garantir que os gases do processo não entrem na caixa de engrenagem e rolamentos e, portanto, potencialmente na atmosfera em volta do sistema de vácuo. Você deve garantir a integridade de suprimento de gás ao manusear materiais tóxicos. Os reguladores sem ventilação devem ser usados em conjunto

com uma válvula de retenção sem retorno, conforme discutido em *Reguladores de pressão* na página 43.

- **Vedação do eixo (outras bombas)** – designs de vedação do eixo encharcada a óleo (por exemplo, bombas booster mecânica EH e bombas de palhetas rotativas EM) minimizam o risco de vazamento de gás do processo (ou vazamento interno do ar) e podem fornecer uma advertência visual (vazamento ou redução do nível de óleo) antes que ocorra algum perigo. Outros projetos de vedação podem não fornecer uma advertência adequada da falha.
- **Acionamentos magnéticos** - onde for necessária a vedação hermética total, entre em contato com a equipe de atendimento ao cliente para obter mais recomendações. Considere todas as possíveis fontes de vazamento. Dependendo da bomba, vedações específicas podem ser oferecidas, como acionamentos magnéticos e vedações mecânicas duplas.

Se as válvulas de alívio da pressão ou os discos de ruptura forem usados para aliviar o excesso de pressão, verifique se são seguramente ventilados para um sistema de exaustão adequado, que impeça o perigo tóxico.

A exaustão do sistema de vácuo deve ser cuidadosamente cogitada, pois pode não ser possível fazer o respiro de materiais tóxicos diretamente para a atmosfera. Nesse caso, é recomendável procurar a consultoria de uma empresa de redução de gás para encontrar uma forma segura de descartar o fluxo de gás residual.

Em locais em que gases tóxicos foram bombeados, há uma alta possibilidade de que as superfícies internas ou volumes internos presos possam conter material tóxico. Antes de remover bombas ou componentes que tenham estado em contato com gases tóxicos, recomenda-se que eles sejam purgados para remover todos os gases nocivos.

Observação:

Deve-se ter cuidado para identificar todos os materiais nocivos e determinar uma estratégia de manuseio adequada.

Ao remover a bomba, todos os flanges de vácuo devem ser vedados; as peças que não puderem ser vedadas devem ser armazenadas em recipientes herméticos. Quando for preciso desmontar a bomba para fins de manutenção, é essencial que ela seja devolvida a uma instalação de serviço onde haja instalações especializadas de descontaminação disponíveis.

Quando você devolver o equipamento a vácuo contaminado para nós para serviço ou manutenção, deve seguir os procedimentos específicos (Formulário HS1) e preencher a declaração (Formulário HS2) que está no manual de instruções fornecido com o equipamento.

2.7 Materiais corrosivos

Muitas aplicações a vácuo envolvem o processamento e manuseio de materiais corrosivos e exigem procedimentos específicos. Gases corrosivos têm o potencial de danificar o sistema de vácuo e criar uma situação perigosa.

Alguns materiais corrosivos como fluirino, cloro, outros halogênios, ou halogenetos e agentes oxidantes tais como ozono ou agentes de redução, tais como sulfureto de hidrogênio, pode também atacar os materiais que estão em contato com a redução, sem a necessidade de qualquer líquido que possa estar presente. Nesses casos, a pressão parcial do material corrosivo deve ser minimizada com o uso de um gás de diluição adequado.

Fontes químicas de perigos

Os materiais de construção do sistema de vácuo e o modelo da bomba devem ser selecionados como sendo compatíveis com o gás particular nas concentrações esperadas. Temperaturas altas podem acelerar a corrosão e devem ser minimizadas onde outras considerações de processo permitem. Os intervalos de manutenção devem ser revisados para considerar o efeito de materiais corrosivos no sistema.

Todos os materiais corrosivos devem ser identificados, e suas compatibilidades com os materiais no sistema de vácuo devem ser confirmadas. No entanto, é importante observar o seguinte:

- A corrosão é baseada em reações físicas, químicas ou eletroquímicas.
- A corrosão metálica mais comum é baseada em uma reação eletroquímica e, portanto, é necessário um eletrólito; isso normalmente significa a presença de água. Em locais que o material corrosivo for anídrico [sem água], não é possível que uma reação ocorra.
- Certos produtos químicos, como halogênios ou ácidos orgânicos, podem reagir com o material da bomba sem a presença de água e gerar produtos de reação constituídos por íons dos materiais bombeados e dos gases corrosivos. Dependendo do tipo de material, esses produtos de reação podem desenvolver camadas que, em seguida, impedirão/minimizarão outras reações. Alguns dos produtos de reação, por exemplo, $AlCl_3$; O SiF_4 tem uma pressão do vapor relativamente alta e será removido com o fluxo de gás. Em tais condições, o material da bomba será removido ao longo do tempo e destruirá a bomba.
- Materiais oxidantes fortes como NF_3 ou flúor podem reagir com o material orgânico usado dentro da bomba e destruir esses componentes. Esses materiais são vedações, juntas, óleo de graxa etc.
- Onde materiais corrosivos possam ser mantidos na fase de vapor, normalmente não é possível que ocorram corrosões.
- É possível ocorrer reações químicas ou físicas em materiais poliméricos e cerâmicos.

Ao bombear materiais corrosivos com as bombas de vácuo, você deve considerar o seguintes pontos:

- **Entrada de água** – É necessário tomar cuidado especial para evitar a entrada de ar úmido, que pode acelerar os efeitos corrosivos. Uma purga inerte deve ser usada como parte do procedimento de desligamento, a fim de irrigar os corrosivos para fora do sistema antes de desligar.
- **Diluição** – Use um gás de diluição adequado para evitar a condensação de corrosivos e, consequentemente, a corrosão decorrente dela.
- **Temperatura** – Aumente a temperatura da linha de exaustão e da bomba para evitar a condensação do vapor de água e, assim, limitar a corrosão. Em alguns casos, temperaturas mais altas podem aumentar as taxas de corrosão, consulte o parágrafo abaixo.
- **Corrosão do equipamento de segurança** – Quando um equipamento essencial de segurança (como elementos do corta-chama, sensores de temperatura e outros) puder ser danificado por produtos corrosivos no fluxo de gás do processo, seu material de construção deve ser selecionado para eliminar esse perigo.
- **Mudanças de fase** – Mudanças de fase não planejadas podem resultar em condensação. A consideração de alterações na temperatura e na pressão é exigida para evitar esse perigo.

- **Reações não planejadas** – Reações químicas não planejadas podem levar à geração de produtos corrosivos. É necessária uma consideração cuidadosa da possibilidade de contaminação cruzada quando o equipamento é usado para mais de um objetivo.

Para evitar a corrosão, as seguintes medidas podem ser tomadas:

A adição de gás de purga na porta de lastro de gás ou no escape da bomba pode garantir que os gases corrosivos sejam mantidos na fase de vapor.

Se as bombas forem desligadas, recomenda-se que um pequeno fluxo de gás de purga (por exemplo, purga da vedação do eixo) seja mantido em funcionamento para purgar a bomba de materiais corrosivos e evitar a entrada de ar úmido da linha de exaustão. Além disso, a instalação de uma válvula de retenção na linha de exaustão ao lado da bomba evitará o refluxo de umidade quando a bomba for desligada. Isso é altamente recomendado quando limpadores úmidos estiverem instalados para a redução de gás.

Superfícies frias e superfícies sob alta pressão são os locais com maior probabilidade de condensação, levando à corrosão. O maior risco, portanto, está no duto de exaustão, especialmente se a tubulação estiver localizada em um local frio (por exemplo, ao ar livre); recomenda-se que a especificação da linha de exaustão seja cuidadosamente considerada para evitar uma corrosão perigosa. Os materiais de vedação devem ser selecionados cuidadosamente para garantir sua compatibilidade com os materiais corrosivos.

O uso de alumínio ou ligas de alumínio não é recomendado para bombas que lidam com halogênios; para evitar uma reação entre o material da bomba e halogênios ou ácidos, o revestimento da câmara de bombeamento é uma prática comum. O uso de cobre ou latão em contato com gases do processo reativo não é recomendado.

Para bombear gases corrosivos ou oxidantes fortes com bombas seladas a óleo ou com bombas que usam rolamentos lubrificados com graxa na câmara de vácuo, recomenda-se o uso de PFPE para evitar a degradação do óleo.

2.8 Resumo - fontes químicas de perigos

- Considere todas as possíveis reações químicas dentro do seu sistema.
- Inclua a consideração de reações químicas anormais, incluindo aquelas que podem ocorrer em condições de falha.
- Consulte as folhas de dados de segurança do material quando analisar os perigos potenciais associados aos materiais do processo.
- Use técnicas de diluição para minimizar reações com oxidantes e materiais inflamáveis.
- Na UE, quando uma área inflamável tiver sido especificada, é necessário utilizar uma bomba de vácuo HazLoc certificada e adequada. Para todas as outras regiões, recomendamos o uso de bombas que tenham sido certificadas pela HazLoc onde possível.
- Use o tipo correto de lubrificante em sua bomba quando bombear oxidantes, e considere o uso de uma bomba seca.
- Não use metais pesados no trajeto de gás do seu sistema do processo, se o processo usar ou produzir azida de sódio.
- Tome cuidado especial ao manusear materiais tóxicos, corrosivos ou instáveis.

3 Fontes físicas de perigos

Tipos de perigos de sobrepressão

A sobrepressão dos componentes em um sistema de vácuo pode ocorrer como resultado de um dos seguintes itens:

- a introdução de gás de alta pressão no sistema
- a compressão do gás pelo sistema
- um aumento repentino na temperatura do gás volátil no sistema
- uma alteração de fase que leve ao acúmulo de produto sólido
- a reação dentro do sistema de vácuo bloqueou a exaustão. Outros casos são possíveis.

3.1 Exaustão da bomba sobrepressurizada

Uma causa comum de qualquer exaustão sobrepressurizada é um bloqueio ou restrição no sistema de exaustão. Isso pode levar à falha da bomba ou de outros componentes do sistema.

As bombas de vácuo são compressores especificamente projetados para operar com altas relações de compressão de saída para entrada. Além da possível sobrepressão causada pela operação da bomba, a introdução de um gás comprimido (como um gás de purga ou diluição) também pode sobrepressurizar o sistema, se o sistema de exaustão for restringido ou bloqueado.

Normalmente, os sistemas de vácuo são projetados e operados em uma faixa de pressão que vai de pouco acima da pressão atmosférica até o vácuo total. Eles não são projetados para alta pressão e, portanto, deve-se tomar cuidado para evitar condições que possam levar a condições perigosas de sobrepressão. As áreas que precisam ser cogitadas são as seguintes ("Bloqueio da exaustão", "Sobrepressão a partir dos sistemas de purga", "Pressão de projeto").

Quando uma bomba é equipada com corta-chamas ou outros equipamentos como filtros e condensadores no lado da exaustão, é essencial que a contrapressão de exaustão não exceda o limite máximo declarado no manual de instruções do sistema de vácuo. Um programa de manutenção adequado deve ser empregado para garantir que os depósitos do processo não bloqueiem o sistema de exaustão e o corta-chama.

Se isso não for praticável, um sensor de pressão localizado entre a bomba e o corta-chama deve ser usado para detectar o bloqueio. Considerações similares devem ser fornecidas a outros equipamentos de exaustão como filtros e condensadores.

A sublimação ou alteração de fase pode levar ao bloqueio por resíduos sólidos da tubulação do processo e a um perigo de sobrepressão. A formação de depósitos de processo na linha de exaustão pode levar a uma condição de sobrepressão, que ocorre quando a bomba está operando com um fluxo de gás elevado. Normalmente, isso resultará na parada da bomba de vácuo devido ao excesso de corrente do motor, mas ainda é possível que, em certas condições, a bomba de vácuo produza uma significativa sobrepressão perigosa. O potencial de acúmulo de depósitos de processo na exaustão do sistema de vácuo deve ser avaliado e, quando isso não puder ser evitado, deve-se usar alguma forma de detecção de pressão para detectar condições de sobrepressão. É importante evitar que o sensor de pressão se contamine com resíduos do processo.

Consulte o manual de instruções fornecido com o sistema da bomba a vácuo para ver a contrapressão contínua e máxima recomendada de todos os seus componentes de exaustão, incluindo sua bomba de vácuo. Projete o sistema de exaustão para que estas limitações sejam satisfeitas.

Para limites durante operações contínuas, consulte o manual de instruções da bomba.

3.1.1 Proteção contra a sobrepressão de exaustão

Geralmente, recomendamos que as bombas sejam operadas com a exaustão tubulada para um sistema de exaustão livremente ventilado. No entanto, o seu sistema de exaustão pode incorporar componentes que podem causar uma restrição ou bloqueio do sistema. Nesse caso, você também deve incorporar métodos adequados de proteção contra a sobrepressão. Esses métodos incluem, por exemplo:

Componente	Método de proteção
Válvula na tubulação de exaustão	Intertrave a válvula de maneira que ela fique sempre aberta quando a bomba está operando.
	Incorpore um desvio de alívio da pressão.
Purificador de exaustão	Incorpore um desvio de alívio da pressão.
	Incorpore um monitor de pressão e o intertrave com a bomba, de forma que a bomba seja desligada quando a pressão de exaustão estiver muito alta.
Corta-chama	Medição da pressão de exaustão.
	Medição da pressão diferencial.

Em suma, se a pressão no sistema de exaustão se aproximar da pressão máxima permitida:

- Reduza a pressão por um dispositivo em um trajeto do gás paralelo à restrição ou bloqueio.
- Reduza a fonte da pressão. Pare a bomba ou desligue qualquer suprimento de gás comprimido.

3.1.2 Bloqueio da exaustão

A exaustão de um sistema de vácuo pode ficar bloqueada de várias formas, gerando sobrepressão. O mais óbvio é a instalação de uma válvula na linha de exaustão; claramente, se a válvula falhar em abrir a bomba de vácuo, isso criará uma pressão que poderá levar a uma condição perigosa de sobrepressão. Quando uma válvula for essencial, sua operação deverá ser cuidadosamente intertravada com a operação da bomba de vácuo.

Em algumas aplicações, é possível usar o gerenciamento de temperatura na bomba e/ou no tubo de exaustão para evitar bloqueios. Essa técnica seria empregada com processos de produtos com altas pressões de vapor.

3.2 Sobrepressão de entrada

3.2.1 Suprimentos de gás comprimido e contrapressão

É comum subestimar a classificação de pressão exigida da tubulação que conecta a bomba ao sistema a vácuo, devido à crença de que essa tubulação não estará sujeita a pressões acima da pressão atmosférica. Na prática, isso é verdadeiro apenas sob condições normais de operação do projeto. Você deve estimar a classificação de pressão exigida para permitir pressões mais altas causadas por condições anormais ou de falha.

Uma causa comum da sobrepressão nas tubulações de entrada da bomba é a introdução de gases comprimidos (como os gases de purga) quando a bomba não estiver operando. Se os componentes da tubulação de entrada não forem adequados para as pressões resultantes, a tubulação irá romper e os gases do processo irão vazar do sistema. Um fluxo reverso de gases do sistema para uma câmara de processo que não seja capaz de suportar a pressão resultante irá causar rompimentos e vazamentos.

Quando conectar os suprimentos de gás comprimido ao sistema, através de reguladores de pressão projetados para fornecer um fluxo de pressão baixa, certifique-se de que a pressão está dentro da classificação do sistema.

Os reguladores de pressão sem ventilação mais usados irão fazer a pressão dentro do sistema subir até a pressão do suprimento de gás do regulador, se operados sob condições em que não haja fluxo de gás do processo através do sistema. Portanto, você deve usar um dos dois métodos a seguir para impedir a sobrepressurização:

- reduza a pressão, permita que os gases desviem da bomba e fluam para um sistema livremente ventilado
- monitore a pressão do sistema e use uma válvula de fechamento positivo para desligar o suprimento de gás comprimido para um nível de pressão predefinido.

3.2.2 Sobrepressão desde os sistemas de purga

É comum os sistemas de vácuo serem equipados com sistemas de purga para auxiliar no bombeamento confiável de gases do processo e na prevenção de reações químicas perigosas. Embora essas purgas desempenhem uma função muito útil, elas também podem gerar seu próprio perigo de sobrepressão caso sua implementação não seja cuidadosamente considerada.

O gás de purga é fornecido a partir de um tanque ou cilindro de gás de purga e chegará ao sistema de vácuo com uma pressão do suprimento entre 2 e 10 bar(g); na maioria dos casos, é necessário reduzir essa pressão através do uso de um regulador de pressão. Um regulador de pressão reduzirá a pressão do gás da pressão do suprimento de entrada para a pressão operacional desejada; é perfeitamente normal ter pressões operacionais, na região, de 0,1 a 1 bar(g).

Quando o gás de purga é fornecido em um sistema aberto, esses sistemas de purga regulados funcionam bem; no entanto, se for um sistema fechado ou se um sistema fechado for criado por uma ação tal como fechar uma válvula, haverá o risco de uma situação de sobrepressão.

Existem dois tipos de regulador de pressão: Um é chamado de regulador "de alívio", enquanto o outro é chamado de regulador "sem alívio"; eles operam de modo diferente e podem gerar seus próprios perigos.

O regulador de alívio controlará a pressão em um sistema fechado através do respiro do excesso de pressão para a atmosfera; embora isso pareça ser uma boa característica, deve-se lembrar que esse excesso de pressão poderia estar na forma de um gás do processo perigoso.

No caso do regulador sem alívio, ele foi projetado para ser usado com um sistema aberto e não reduzirá a pressão em uma situação de sobrepressão. Se um regulador sem alívio for usado junto com um sistema fechado, ao longo do tempo, haverá um pequeno vazamento de gás do lado de alimentação do regulador para o sistema; com o tempo, isso fará com que o sistema fique pressurizado até atingir a pressão do suprimento. Como a

maioria dos sistemas de vácuo abertos tem potencial para se tornar um sistema fechado no caso de uma condição de falha, há um risco de usar esse tipo de dispositivo que deve ser considerado.

Uma das soluções é usar um regulador de alívio equipado com uma válvula de não retorno entre o regulador e o sistema de vácuo. O regulador garantirá que a pressão do lado do sistema seja controlada na pressão desejada, enquanto a válvula de "retenção" sem retorno impedirá um fluxo reverso de gás do sistema para o regulador. As válvulas de retenção estão disponíveis com um diferencial de pressão baixo de 25 mbar, minimizando a queda de pressão. Deve-se observar que, quando houver outras fontes de pressão no sistema de vácuo, elas devem ser consideradas de modo independente, pois o regulador de alívio não fará o respiro dessa pressão em excesso.

Se forem usadas válvulas de respiro de sobrepressão, é essencial considerar o tipo de gás que está sendo expelido e para onde ele está sendo enviado. É possível fazer o respiro de gás do processo perigoso para a atmosfera local, caso isso não tenha sido considerado.

3.2.3 Operação incorreta da bomba

Precauções especiais devem ser tomadas até que tenha sido estabelecido que a bomba está operando corretamente.

Se a direção da rotação da bomba estiver incorreta e a bomba for operada com a entrada bloqueada ou restringida, a bomba irá gerar uma alta pressão na tubulação de entrada. Isso pode resultar na ruptura da bomba, da tubulação e/ou de componentes da tubulação.

Sempre use uma placa em branco fixada (com uma certa folga) por parafusos na entrada da bomba, até que tenha estabelecido que a direção da rotação da bomba está correta.

A operação em altas velocidades de rotação pode resultar na quebra da bomba. Não opere a bomba em velocidades de rotação acima do máximo projetado; isso é particularmente importante quando os inversores de frequência são usados para o controle de velocidade.

3.3 Temperatura

Ciclos térmicos

Quando o equipamento estiver sujeito a ciclos térmicos [por exemplo, devido ao ciclo normal de redução da pressão por bombeamento], é importante reconhecer que, ao longo do tempo, esses ciclos térmicos podem levar ao afrouxamento de fixadores e encaixes se eles não estiverem corretamente travados com vedações ou dispositivos mecânicos. Quando houver risco de ciclos térmicos e a consequência do afrouxamento dos fixadores puder criar uma situação perigosa, o aperto desses fixadores deverá ser verificado regularmente.

Superfícies quentes

Os sistemas de vácuo e as bombas de vácuo frequentemente exibem superfícies quentes devido à natureza do processo. Por exemplo, em alguns processos é necessário aquecer as linhas de exaustão para evitar a condensação de gases nocivos. Quando ocorrerem superfícies quentes acima de 70 °C, recomenda-se que uma etiqueta de aviso de superfície quente seja anexada a ela. Se a temperatura estiver acima de 100 °C, é

necessário que a superfície tenha alguma forma de proteção para evitar contato.

Temperatura operacional ambiente

Normalmente, o sistema de vácuo é projetado para ter uma temperatura operacional ambiente máxima de 40 °C. Em temperaturas acima desse nível, é possível que vedações elastoméricas em bombas de vácuo possam superaquecer, levando a possíveis vazamentos e, possivelmente, à geração de produtos da decomposição perigosos. Deve-se ter cuidado para compreender os perigos associados às altas temperaturas operacionais ambientais.

Baixas temperaturas ambiente também podem resultar em perigos devido à fragilização de elastômeros, tais como anéis-O, ou à condensação do processo por produtos para formar líquidos perigosos. Uma análise de risco deve levar em consideração a temperatura mínima de projeto do equipamento a vácuo e a possibilidade de condensação dos produtos no processo.

Aquecimento da linha de exaustão

O aquecimento da linha de exaustão deve ser usado quando houver a possibilidade de condensação ou solidificação dos gases do processo na linha de exaustão, resultando em bloqueio, corrosão ou explosões. Quando o aquecimento da linha de exaustão é usado, é essencial considerar a segurança do sistema, especialmente em condições de falha em que a temperatura possa subir fora do controle e sobreaquecer vedações elastoméricas dentro da tubulação.

Temperatura do projeto

Quando um reservatório ou tubulação for projetado para conter uma pressão, é necessário definir a temperatura máxima de projeto até a qual o reservatório ou a tubulação tenham classificação de pressão. Não opere um sistema acima da temperatura máxima de projeto.

3.4 Resumo — fontes físicas de perigos

- Quando você efetuar os cálculos de segurança, certifique-se de que as pressões operacionais seguras, para todos os componentes do sistema, sejam levadas em consideração.
- Certifique-se de que a exaustão da bomba não possa ser bloqueada ou restringida.
- Se houver risco de alta pressão em excesso da escala de pressão de qualquer parte de seu sistema de vácuo, recomendamos que seu sistema incorpore equipamento de medição de pressão adequadamente posicionado. Ele deve estar conectado ao seu sistema de controle para colocar o sistema em um estado de segurança se uma condição de sobrepressão for detectada.
- Leve em consideração as condições anormais e de falha quando avaliar a classificação de pressão exigida do sistema de vácuo e dos componentes da bomba.
- Certifique-se de incorporar o tipo correto de dispositivo de alívio da pressão, que seja adequadamente classificado para a sua aplicação.
- Certifique-se de que os suprimentos de gás comprimido sejam adequadamente regulados e monitorados. Desligue estes suprimentos se a bomba for desligada.

- Quando possível, certifique-se de que a pressão do suprimento para qualquer purga regulada seja menor que a pressão estática máxima do sistema. Ou então, certifique-se de que o alívio da pressão seja possível em caso de falha do componente.

4 Projeto do sistema

4.1 Classificações da pressão em um sistema

Conforme discutido em *Fontes físicas de perigos* na página 26, as tubulações e os componentes do sistema de vácuo foram projetados para funcionar com pressões internas inferiores à pressão atmosférica. Na prática, no entanto, normalmente é necessário projetar o sistema para usar pressões internas também acima da pressão atmosférica. Se necessário, você deve incorporar dispositivos de alívio de pressão para impedir o excesso de pressurização durante condições de falha.

É importante não permitir que os tubos de entrada e outros componentes de entrada se tornem a parte mais fraca do sistema, supondo que eles sempre irão operar a vácuo, mesmo em condições de falha.

Os sistemas de exaustão sempre devem ser projetados para garantir a menor contrapressão possível à bomba durante a operação. No entanto, é importante projetar o sistema de exaustão com uma classificação de pressão adequada. Ele deve ser adequado para usar com as pressões que podem ser geradas pela bomba e também pela introdução de um gás comprimido no sistema, e também adequado para uso com as atuais medidas de proteção contra a sobrepressão.

Quando você realizar a análise do perigo, sempre deve considerar:

- Entradas externas, como conexões de gás inerte
- Isolamento e constrição de todas as fontes, especialmente nas linhas de exaustão
- Reações entre os gases do processo.

Deve-se observar que quando um recipiente contém um líquido volátil e pode ser isolado do restante do sistema, a aplicação do calor externo (por exemplo, de um fogo) pode resultar em pressões internas maiores que a pressão do projeto do recipiente. Você deve considerar a necessidade de um alívio de pressão adequado nesse caso.

4.2 Eliminação de volumes estagnados

Um volume estagnado é qualquer volume em um tubo ou componente de vácuo que não esteja sujeito a um fluxo de gás que o atravesse. Os exemplos são a caixa de engrenagem de uma bomba booster mecânica ou o cabeçote do medidor de um instrumento. A tubulação com válvula e os tubos de entrada do gás nitrogênio também podem se tornar volumes estagnados quando são isolados.

Os volumes estagnados devem ser estimados quando você considerar a mistura e a reação de gases do processo que normalmente não estão presentes juntos na câmara do processo. Tubos, bombas e câmaras do processo geralmente transportam os gases linearmente, com um gás ou uma mistura de gases seguido por outro. Os gases movimentados nesses fluxos lineares não são normalmente misturados, a menos que a velocidade do gás de exaustão seja reduzida por uma restrição/bloqueio. O volume estagnado não é purgado e pode ser preenchido com os gases do processo à medida que a pressão do sistema aumenta ou diminui. Dessa maneira, os gases que passam pelo sistema em uma fase do processo podem ser retidos. Em seguida, eles podem reagir com os gases de uma fase subsequente do processo. A purga e evacuação total da câmara

entre a introdução de gases incompatíveis irá proteger contra o risco de explosão.

Você precisa tomar um cuidado especial ao considerar a contaminação cruzada nos volumes estagnados quando os gases forem potencialmente explosivos. Particularmente, deve considerar o perigo de acúmulo nos filtros e separadores e outros componentes. Quando apropriado, use fluxos contínuos e de alta integridade do gás da purga inerte para reduzir a probabilidade de contaminação cruzada. Isso pode garantir que você não atinja concentrações de misturas que possam ser problemáticas.

Ao bombear inflamáveis, é possível que os volumes estagnados preencham os gases ou vapores potencialmente explosivos que não podem ser removidos pela purga normal. Quando uma fonte de ignição também puder estar presente, a purga específica do volume estagnado deve ser considerada.

4.3 Sistema de exaustão de extração

É importante usar o tipo correto de sistema de exaustão da extração para o seu processo. Conforme declarado previamente, o sistema de extração deve ser projetado para suportar as pressões da operação e, quando materiais perigosos forem introduzidos ou processados, eles devem ser suficientemente herméticos para conter os materiais de processo e seus subprodutos e impedir liberações perigosas para a atmosfera.

4.4 Uso dos sistemas de proteção corta-chamas (sistemas HazLoc)

Se a mistura dos vapores e gases bombeados for inflamável (consulte *Evitando a zona inflamável* na página 15) continuamente ou por longos períodos de tempo (ou seja, Condição de área 0) e se houver risco de uma fonte de ignição (consulte *Fontes de ignição* na página 34) se tornar ativa durante a operação normal ou mau funcionamento previsível, é preciso ajustar os sistemas de proteção corta-chamas conforme necessário à sua bomba primária (consulte também *Proteção corta-chamas* na página 43). Para evitar a transmissão de chama ao longo da tubulação do processo ou para a atmosfera circundante, os corta-chamas devem ser testados com bombas de vácuo.

Onde a mistura inflamável estiver presente por longos períodos de tempo, um transmissor de temperatura testado e aprovado deve ser instalado no sistema de proteção corta-chama interno para detectar uma chama contínua. Se uma chama contínua for detectada, a bomba necessita ser desligada e isolada da fonte de combustível. Entre em contato com seu centro de assistência local para obter indicações sobre sistemas de proteção de chamas e transmissores de temperatura aprovados. Para proteger o sistema de proteção de chamas termicamente com maus funcionamentos raros (área 0) da bomba, um transmissor de temperatura exausto deve ser instalado na exaustão da bomba. Desligue os pontos que dependem de sistemas de bombeamento. Consulte o manual HazLoc pertinente para a bomba.

Se o transmissor de temperatura na entrada ou exaustão alcançarem seu limite máximo, indicando uma condição de falha, ações adequadas devem ser tomadas. Isso depende da aplicação, mas pode incluir:

- **Interrupção do suprimento de combustível** – O fechamento de uma válvula localizada na entrada da bomba de vácuo impede o suprimento de combustível para a bomba de vácuo

- **Interrupção da fonte de ignição** – Parar a bomba de vácuo, desligando a energia do motor
- **Inércia da área de queima** – a adição rápida de um gás inerte à área da queima (normalmente, mas nem sempre, localizada no coletor de exaustão da bomba) eliminará a chama. Observe que é possível que uma chama reinflame se a fonte de ignição não for removida.

4.5 Vazamento de água para o sistema de vácuo

Quando vapores e gases do processo estiverem sendo bombeados, o que pode criar um perigo no caso de contato com água, é preciso considerar a hermeticidade do sistema da água de resfriamento. Líquidos de resfriamento alternativos podem ser considerados, mas antes de fazer isso, entre em contato com seu centro local de atendimento ao cliente.

4.6 Retorno dos gases de exaustão

Quando uma bomba de vácuo for desligada com vácuo na entrada, haverá sucção de retorno de gases de exaustão desde a tubulação/ sistema de exaustão. Se esse gases contiverem ar/oxigênio, podem ocorrer reações indesejáveis com os gases do processo ou depósitos internos. Recomenda-se que, onde isso possa ocorrer, a exaustão da bomba de vácuo seja equipada com uma válvula de retenção de não retorno para desacelerar o fluxo reverso de gases de exaustão. Além disso, o uso de uma purga de nitrogênio quando a bomba de vácuo parar garantirá que o ar seja excluído do sistema de vácuo.

4.7 Fontes de ignição

Onde as bombas de vácuo forem usadas para bombear misturas inflamáveis, você deve considerar todas as fontes de ignição. A seguir, estão algumas áreas que você pode considerar como parte de uma revisão geral. Dependendo do seu processo você deve poder evitar algumas das fontes de ignição. Se você não puder evitar a fonte de ignição porque a sua condição de processo ou requisito de sistema, você deve então projetar seu sistema de acordo.

Observação:
Algumas bombas são certificadas por um terceiro para confirmar que (se corretamente aplicadas) irão conter uma explosão interna.

- **Contato mecânico** – o contato mecânico de peças giratórias e fixas dentro da bomba de vácuo e do sistema pode fornecer uma fonte de ignição. Todas as bombas de vácuo são projetadas e construídas para manter as folgas em funcionamento corretas dentro da bomba durantes todas as condições de operação. Para evitar esta fonte de ignição, é importante evitar depositar materiais nas superfícies internas ou limpar a bomba. Os rolamentos devem ser mantidos em boas condições, ter lubrificação suficiente e gás de purga adequado para eliminar o contato com gases do processo. O regime de manutenção para os rolamentos recomendado deve ser seguido para garantir uma operação segura e confiável.
- **Ingestão de partículas** – todos os mecanismos de bombeamento têm potencial para ingerir partículas criadas pelo processo ou que resultem de um processo de fabricação. Quando ocorre a rolagem entre uma superfície móvel e outra estática, é possível gerar calor. Uma tela de entrada adequada (malha) ou filtro irá prevenir a entrada de partículas na bomba de vácuo para reduzir o tamanho e volume das partículas em

uma quantidade segura. Deve-se tomar cuidado para que se tenha um regime de manutenção adequado para a tela de entrada ou filtro.

- **Acúmulo de poeira** – o acúmulo de poeira fina compactada dentro dos espaços desobstruídos internos pode ocorrer quando qualquer mecanismo de bombeamento é colocado em um processo de geração de poeira. Mesmo com o uso de filtros de poeira de entrada, ainda é possível que partículas pequenas entrem na bomba. Com pequenas alterações dimensionais devido às alterações térmicas, a poeira compactada pode tocar uma superfície móvel e criar calor. Além disso, esse calor pode causar a ignição da poeira. Para obter mais detalhes, consulte *Materiais pirofóricos* na página 21.
- **Calor da compressão (autoignição)** – o calor interno da compressão dentro de qualquer compressor deve ser considerado em relação à temperatura de autoignição de qualquer gás ou vapor que seja bombeado. Você deve garantir que a bomba tenha uma classificação de temperatura que seja pelo menos a mesma ou maior do que as dos gases que bombeia.
- **Superfícies quentes** – quando for permitido que gases ou vapores inflamáveis entrem em contato com uma superfície quente, eles podem se inflamar se a temperatura de autoignição for excedida. Observação: As bombas e proteções corta-chamas não devem ser termicamente isoladas se isso puder causar aumento nas temperaturas de superfície interna (e externa), levando à autoignição.
- **Calor externamente aplicado** – o calor aplicado externamente pode ocorrer, por exemplo, no caso de um incêndio dentro na área imediata do equipamento a vácuo. Sob essas condições, é possível gerar pressões internas acima da pressão estática máxima do sistema e temperaturas acima da temperatura de autoignição. Isso deve ser considerado como parte da análise de perigo do sistema.
- **Fluxo de gás do processo a quente**– as altas temperaturas do gás de entrada podem fazer com que as superfícies internas (ou externas) excedam a temperatura de autoignição dos materiais que estão sendo bombeados. O gás de entrada com alta temperatura também pode levar ao bloqueio do rotor/estator Consulte seu manual de instruções da bomba de vácuo para as temperaturas do gás internas permitidas. Consulte seu centro local de atendimento ao cliente para obter mais informações.
- **Reação catalítica** – a presença de certos materiais pode levar à ignição catalítica. Todos os materiais de construção no sistema a vácuo devem ser considerados quanto ao seu potencial de agir desse modo com os gases ou vapores bombeados.
- **Reação pirofórica** – o calor da combustão dos materiais pirofóricos causada pelo ar ou pela entrada de oxidantes pode agir como fonte de ignição para qualquer material inflamável presente. Consulte *Materiais pirofóricos* na página 21.
- **Eletricidade estática** – pode haver determinadas condições em que a eletricidade estática pode se acumular nos componentes isolados antes da descarga para a terra na forma de faísca. O potencial de acúmulo estático deve ser considerado como parte do projeto do sistema.
- **Raios** – quando o sistema estiver localizado ao ar livre, um raio pode fornecer a energia de ignição. O potencial de ocorrência desse evento deve ser considerado como parte do projeto do sistema.

Projeto do sistema

4.8 Resumo — projeto do sistema

Para projetar sistemas de bombeamento de vácuo seguro, os seguintes pontos devem ser levados em consideração. Dependendo da aplicação, pode haver outros.

- Se você bombear materiais perigosos, deve projetar o sistema para uma condição segura em falhas.
- Use lubrificantes de PFPE (perfluoropoliéter) nas bombas quando bombear oxidantes.
- Quando se utiliza gás inerte para reduzir a concentração do gás inflamável abaixo do limite inferior de explosão ou inflamabilidade, ou abaixo da concentração mínima ou inferior de oxidante, é essencial garantir a integridade do suprimento de gás inerte.
- A concentração também pode ser mantida acima do limite superior de explosão ou inflamabilidade, mas é necessário implementar medidas de segurança adequadas para garantir que ela não possa cair dentro da faixa inflamável.
- Faça o teste de vazamento de sistemas e equipamento para garantir a hermeticidade necessária antes da utilização.
- Dilua gases pirofóricos para níveis seguros com um gás inerte, antes que os gases sejam eliminados para a atmosfera ou misturados com gases oxidantes.
- Você não deve permitir o contato entre a azida de sódio e os metais pesados em nenhuma parte do trajeto do gás no seu sistema.
- Você não deve permitir que a pressão máxima do sistema exceda o nível seguro individual de qualquer peça isolada do sistema.
- Você sempre deve consultar as informações de segurança fornecidas com as substâncias que pretende bombear.
- Considere o uso das bombas secas em preferência às bombas de pistão ou com palhetas rotativas seladas lubrificadas a óleo, quando houver perigos associados ao óleo no volume movimentado.
- Onde as bombas de vácuo forem usadas para bombear misturas inflamáveis, você deve considerar todas as possíveis fontes de ignição e a potencial consequência de uma possível explosão.

5 Práticas gerais

5.1 Formação de depósitos na tubulação

Em algumas aplicações, é possível que se formem depósitos na linha de frente do sistema de vácuo; um exemplo seria a formação de camadas de silício após uma etapa de deposição de semicondutor. Esses depósitos sólidos se formam na fase de vapor e formam camadas que apresentam vários perigos.

- À medida que as camadas aumentam, é possível que elas se quebrem e se movam em direção à bomba de vácuo. Em alguns casos, a bomba de vácuo pode ser danificada por essas camadas e, em casos raros, é possível que as camadas causem danos mecânicos significativos e rompam a carcaça da bomba.
- As camadas são depositadas sob vácuo e, portanto, muitas vezes não têm camadas de óxido protetoras que as impeçam de queimar em contato com oxigênio. Deve-se ter cuidado quando esses materiais forem finalmente expostos à atmosfera.
- O acúmulo de camadas significativas pode bloquear as linhas de linha de frente, levando à perda de desempenho de vácuo. Recomenda-se que, em locais em que os depósitos de processo possam se separar das paredes da linha de frente, uma seção de trecho morto seja instalada na linha de frente para capturar as partículas maiores. Além disso, uma tela de malha metálica deve ser instalada em posição vertical junto ao trecho morto ou um separador de ciclone para evitar o transporte de partículas para a bomba.

Quando for possível que os depósitos do processo sejam de natureza perigosa, é essencial que o usuário do sistema de vácuo realize uma análise de risco para determinar a maneira segura de manusear esses materiais.

5.2 Uso de inversores de frequência — uso de senhas

Os inversores de frequência são frequentemente usados para melhorar o desempenho de um sistema de vácuo; no entanto, é necessário ter cuidado para configurar corretamente a velocidade rotacional máxima.

Muitos inversores de frequência são capazes de criar uma velocidade máxima de saída de até 200 Hz que, quando acoplados ao tipo correto de motor, pode resultar em uma velocidade rotacional de 12.000 rpm. Como a maioria das bombas de vácuo opera em velocidades rotacionais entre 3.000 e 6.000 rpm, pode haver risco considerável se o inversor for programado acidentalmente com uma velocidade rotacional mais alta.

Recomenda-se que, quando inversores de frequência forem usados, a velocidade rotacional máxima na lista de parâmetros seja protegida por senha. Isso ajudará a garantir que o ajuste acidental do parâmetro de velocidade máxima seja evitado.

5.3 Posição da válvula de entrada

A válvula de entrada localizada entre o sistema de vácuo e a câmara do processo é frequentemente usada para isolar o sistema de vácuo enquanto a manutenção é realizada. É essencial que esta válvula esteja na posição correta enquanto a manutenção estiver sendo realizada.

Onde a posição dessa válvula for um essencial de segurança, recomenda-se que ela seja revisada como parte da análise de perigos para determinar práticas operacionais seguras.

5.4 Armadilhas quentes

O uso de armadilhas quentes, para reter gases do processo ou a eles reagir antes que cheguem à bomba de vácuo, gera seus próprios perigos. O principal perigo é térmico, pois normalmente essas armadilhas operam com temperaturas internas de muitas centenas de graus Celsius. Normalmente, essa temperatura não é transmitida totalmente às superfícies externas; porém, há a possibilidade de os componentes adjacentes, tais como anéis-O elastoméricos etc., serem termicamente danificados. Deve-se ter cuidado extra ao se especificar uma armadilha quente.

5.5 Armadilhas frias

Quando uma armadilha fria de nitrogênio é usada para condensar materiais que normalmente são gases ou vapores à pressão atmosférica, é essencial considerar a consequência de um aquecimento inesperado. Gases e vapores líquidos aquecidos criarão grandes volumes de gases/vapores que, caso o respiro seja feito em um sistema fechado, poderão levar a uma sobrepressão perigosa. Deve-se considerar cuidadosamente a forma como é feita o respiro do sistema para evitar a possibilidade de uma sobrepressão perigosa.

5.6 Condensadores

Os condensadores são uma forma muito eficaz de remover um vapor de um fluxo de processo, mas é essencial considerar a possibilidade de bloqueio do condensador. Normalmente, será usado um condensador com um recipiente receptor adequado localizado abaixo, para o qual o líquido pode ser drenado, que seria, por sua vez, equipado com um indicador de nível, usado para determinar quando esvaziar o receptor. Se o reservatório não for drenado, há a possibilidade de que o líquido flua em excesso para a bomba de vácuo e comece a bloquear a linha de exaustão.

5.7 Níveis de integridade do sistema

Nas seções anteriores, os métodos de proteção usando a diluição de gás inerte foram discutidos. O princípio do método é que você mistura um gás inerte (normalmente o nitrogênio) com os gases do processo para diluí-los até um nível em que a explosão ou reação não possa ocorrer. Quando você usa a diluição do gás como sistema de segurança primário para proteger contra uma possível explosão, pode ser necessário um sistema de alarme e intertravamento de alta integridade para impedir a operação quando o sistema de diluição do gás não estiver operacional. A integridade do sistema de diluição do gás deve ser considerada durante a avaliação do risco (análise do perigo) e dependerá do zoneamento interno (isto é, nível de risco) que resultaria se o sistema de diluição falhasse. A melhor prática atual sempre deve ser aplicada à avaliação do risco para determinar os níveis exigidos de integridade do sistema.

Por exemplo, se um sistema de diluição fosse usado para manter uma concentração de gás inflamável fora da zona inflamável, e se o resultado da falha da diluição fosse que o gás bombeado ficasse dentro da zona inflamável de maneira contínua ou por longos períodos (por exemplo, o requisito ATEX Área 0 consideraria > 50%), então o sistema de diluição deve cumprir um dos seguintes requisitos:

- Ele deve ser à prova de falhas mesmo no caso de um defeito raro.
- Ele deve ser seguro quando duas falhas estiverem presentes.
- Ele deve ter dois sistemas independentes de suprimento de diluição.
- Como alternativa, se o resultado da falha do sistema de diluição fosse que o gás bombeado ficasse dentro da zona inflamável ocasionalmente (por exemplo, condição de área 1 de ATEX) então o sistema de diluição deve cumprir com um dos seguintes requisitos:
    - Ele deve ser à prova de falhas mesmo no caso de um defeito esperado
    - Ele deve ser seguro quando uma falha estiver presente.

Se o resultado da falha do sistema de diluição fosse que o gás bombeado ficasse dentro da zona inflamável apenas ocasionalmente (por exemplo, condição de área 2 de ATEX), então o sistema de diluição deve ser seguro em operação normal.

6 A escolha correta do equipamento

Para garantir que você escolha o equipamento correto para a sua aplicação, é necessário considerar os limites dentro dos quais o sistema precisará operar. Os dados técnicos para o equipamento são fornecidos no nosso catálogo de produtos, publicações de marketing e nos manuais de instruções do equipamento. Na maioria dos casos, outras informações estão disponíveis mediante solicitação; entre em contato conosco para obter orientações adicionais.

Quando você projetar o seu sistema de vácuo, leve em consideração os parâmetros da bomba mecânica relevantes:

- Pressão estática máxima (entrada e exaustão)
- Pressão operacional máxima da entrada
- Pressão operacional máxima da exaustão
- Condutância dos componentes de entrada e exaustão
- Especificação de pressão de outros componentes instalados na bomba
- Monitoramento da pressão caso a linha de exaustão se torne bloqueada
- Para as bombas de pistão e de palhetas rotativas seladas lubrificadas a óleo, você também deve considerar por exemplo:
    - Taxa de fluxo do lastro de gás
    - Taxa de fluxo da purga da caixa de óleo
    - Gases e vapores aprisionados na caixa de óleo
    - Gases e vapores absorvidos pelo óleo na caixa de óleo.

A pressão estática máxima define a pressão máxima à qual uma conexão de entrada ou saída de uma bomba pode ser exposta, quando a bomba não está operacional. A pressão é dependente do projeto mecânico da bomba.

As bombas de pistão e de palhetas rotativas seladas lubrificadas a óleo foram projetadas para operar com pressões de entrada na pressão atmosférica (ou abaixo) e, embora a classificação da pressão estática máxima possa estar acima da pressão atmosférica, não deve ser permitido que a pressão de entrada máxima da bomba, quando estiver operando, fique acima da pressão atmosférica. Alguns fabricantes limitam a pressão de entrada contínua de suas bombas para pressões abaixo da pressão atmosférica. A pressão de entrada máxima com a bomba em operação é denominada pressão operacional máxima.

O motivo pelo qual a pressão operacional máxima é limitada não é necessariamente relacionado à integridade mecânica da bomba. A pressão máxima é normalmente proporcional à classificação de energia da bomba nas pressões altas da entrada, e associada a um perigo potencial de superaquecer os componentes mecânicos da bomba ou do motor elétrico.

Por motivos semelhantes, recomendamos manter a pressão de saída da bomba de vácuo o mais baixa possível (tipicamente igual ou inferior a 0,15 barg, 1,15 x 10^5 Pa para uma operação contínua). As bombas foram projetadas para operar com exaustões irrestritas, e uma pressão de saída de 0,15 barg (1,15 x 10^5 Pa) costuma ser alta o suficiente para impulsionar os gases da exaustão ao longo do sistema de exaustão da extração e do equipamento de tratamento.

6.1 Bombas de palhetas rotativas e de pistão seladas lubrificadas a óleo

Nossas bombas rotativas seladas/lubrificadas a óleo incluem as bombas rotativas de palhetas séries E1M, E2M, ES e RV, e a linha Strokes Microvac de bombas de pistão seladas/lubrificadas a óleo. Geralmente, todas as bombas a vácuo são projetadas para operar com pressões de abaixo da pressão atmosférica e com a exaustão da bomba ventilada livremente para a atmosfera.

As bombas de pistão e com palheta rotativa seladas lubrificadas a óleo são compressores de deslocamento positivo e podem gerar pressões de exaustão muito altas se a saída estiver bloqueada ou restringida. Nesses casos, as pressões podem exceder a pressão estática segura da caixa de óleo da bomba e, em muitos casos, as pressões estáticas seguras dos componentes à jusante do sistema (como o purificador de polipropileno ou as juntas de anel-O a vácuo). Portanto, recomendamos fortemente que você posicione um sensor de pressão de exaustão de alta integridade na linha de exaustão da bomba.

Para atingir um nível seguro de diluição, um lastro de gás pode ser aumentado por uma purga da caixa de óleo (quando esse recurso estiver disponível) conectada a caixa de óleo na bomba. Um aumento na taxa de fluxo do lastro de gás e da purga da caixa de óleo aumenta a quantidade do óleo transportado para o sistema de exaustão.

Todas as bombas seladas/lubrificadas a óleo têm volumes significativos na caixa de óleo, que podem reter misturas de gás inflamável e explosivo. O óleo na caixa de óleo pode absorver ou condensar efetivamente os subprodutos gasosos e de vapor. Os vapores e gases aprisionados no óleo podem ser pirofóricos ou tóxicos. Portanto, você deve ter procedimentos de manuseio especiais para garantir a segurança durante a manutenção.

6.2 Bombas secas

A pressão operacional máxima é limitada pelos mesmos fatores que afetam as bombas seladas lubrificadas a óleo (isto é, o perigo potencial de superaquecer os componentes mecânicos da bomba ou o motor elétrico).

As bombas secas são compressores de deslocamento positivo e podem gerar altas pressões de exaustão. Quando as bombas estão incorporadas a um sistema em que o processo possa resultar em subprodutos sólidos (e portanto existe a possibilidade de bloqueio na linha de exaustão), recomendamos fortemente que você instale um monitor de pressão de exaustão de alta integridade. Consulte o manual de instruções da bomba para ver as pressões operacionais em que os interruptores devem ser configurados.

As bombas secas têm uma capacidade de alta produção de lastro de gás. A adição de um gás de diluição como o nitrogênio pode ser efetuada no mecanismo da bomba, para otimizar a supressão da reação. Consulte seu manual de instruções da bomba de vácuo para as vazões da purga de gás.

6.3 Projeto da tubulação

6.3.1 Foles

Os foles são componentes curtos e de paredes finas, com convoluções profundas. Eles são usados para reduzir a transferência de vibração de uma bomba para o seu sistema a vácuo.

Sempre instale os foles em uma linha reta com as duas extremidades rigidamente fixadas. Quando instalados corretamente, os foles podem suportar uma pequena pressão interna positiva (consulte o manual de instruções fornecido com os foles para ver os detalhes). Não use os foles em exaustões de bomba seca; utilize tubulações flexíveis trançadas (consulte *Tubulações flexíveis* na página 42).

Considere a possibilidade de falha por fadiga dos foles quando usados em aplicações de ciclos frequentes.

6.3.2 Tubulações flexíveis

As tubulações flexíveis têm uma seção de parede mais grossa e convoluções mais rasas que os foles. Elas formam um método conveniente para a conexão dos componentes do sistema a vácuo e ajudam a compensar o desalinhamento ou pequenos movimentos nas tubulações a vácuo rígidas. As tubulações flexíveis podem ser formadas em flexões relativamente acentuadas, mantendo sua posição.

Elas foram desenvolvidas para a instalação em sistemas estáticos. Elas não são adequadas para a flexão repetida, que poderia causar a falha por fadiga.

Quando você usar uma tubulação flexível, utilize o menor comprimento possível e evite flexões desnecessárias. Para aplicações em que possam ocorrer altas pressões de exaustão, devem ser usadas tubulações flexíveis trançadas.

As tubulações flexíveis trançadas são foles com uma camada protetora externa de uma malha de aço inoxidável trançada. Quando você instala uma tubulação flexível trançada, deve observar o raio mínimo de flexão indicado no manual de instruções fornecido com a tubulação.

6.3.3 Pontos de âncora

Você deve ancorar as tubulações e seus componentes corretamente. Por exemplo, se você ancorar os foles incorretamente, eles não reduzirão a vibração gerada pela bomba e isso poderia levar à fadiga das tubulações.

6.3.4 Vedações

Quando houver possibilidade de ocorrência de pressões positivas em qualquer parte do sistema de vácuo (mesmo nas condições de falha), você deve usar vedações adequadas e materiais que sejam capazes de suportar as pressões positivas e o vácuo esperados.

6.4 Proteção física contra a sobrepressão

Conforme discutido anteriormente, a sobrepressão pode ser causada por uma restrição ou bloqueio no sistema ou um de seus componentes. Ela pode ocorrer como resultado do fluxo do gás comprimido da bomba ou de suprimentos externos de gás comprimido (como aqueles usados no sistema de diluição). Há dois métodos principais da proteção de sobrepressão do sistema: ou seja, alívio de pressão e alarme de sobrepressão/curso, que são descritos nos parágrafos seguintes.

6.4.1 Alívio de pressão

Você pode usar discos de ruptura ou válvulas de alívio de pressão para aliviar uma condição de sobrepressão. A pressão operacional do dispositivo deve estar abaixo da classificação de pressão do projeto do sistema. Você deve conectar esses dispositivos com tubulações adequadas em uma

área em que seja seguro ventilar os gases do processo e que não tenha restrições de ventilação. Se o processo produzir subprodutos sólidos, os dispositivos de alívio da pressão devem ser inspecionados regularmente para garantir que não sejam bloqueados ou restringidos. O projeto desses dispositivos de proteção deve levar em consideração o efeito das pulsações da pressão na vida da fadiga do disco de ruptura ou na vida útil da válvula.

6.4.2 Alarme/desarme da sobrepressão

Esse método de proteção é usado por nós com frequência. Esse tipo de proteção é recomendado para qualquer sistema, porém, pode não ser adequado para os sistemas que produzem subprodutos sólidos.

6.4.3 Reguladores de pressão

Existem dois tipos principais de reguladores de pressão: com e sem ventilação. Os reguladores com ventilação eliminam o gás para a atmosfera ou uma linha de ventilação separada, a fim de manter uma pressão de saída constante em condições sem fluxo. Eles são geralmente usados quando a integridade da tubulação for de máxima importância.

Os reguladores sem ventilação podem manter uma pressão de saída constante apenas em condições de fluxo. Em condições sem fluxo, a pressão de saída de alguns reguladores pode aumentar até o nível da pressão de suprimento. A taxa de aumento é dependente das características do regulador e do volume ao qual a saída está conectada. O aumento pode demorar alguns minutos a vários meses.

Os reguladores de pressão não foram projetados para serem válvulas de desligamento e devem ser usados em combinação com um dispositivo isolante adequado (como uma válvula solenoide) quando o isolamento for exigido.

Ou então, você deve tomar medidas para ventilar com segurança as pressões excessivas.

6.4.4 Proteção corta-chamas

Os corta-chamas não são dispositivos de prevenção de explosão. Eles foram projetados para impedir a propagação da frente da chama ao longo de um tubo ou duto (consulte *Uso dos sistemas de proteção corta-chamas (sistemas HazLoc)* na página 33). Os corta-chamas oferecem uma grande área de superfície e pequenas lacunas de condutância para a frente da chama, fazendo com que a chama seja extinguida. Geralmente, os corta-chamas são adequados apenas para os sistemas usados para gases ou vapores limpos.

A energia explosiva das misturas de gás aumenta com a pressão. A maioria dos corta-chamas foi projetada para proteger áreas em que a pressão interna não excede a pressão atmosférica. Você deve garantir que a pressão operacional no Sistema de exaustão/extração, que leva ao corta-chama, não possa exceder a pressão de operação máxima. No entanto, no caso de corta-chamas certificados para uso com bomba de vácuo seca para produtos químicos, consulte o manual de instruções do produto associado para ver as pressões máximas permitidas. Você também deve considerar a contrapressão máxima permitida em sua bomba de vácuo.

Os corta-chama funcionam removendo o calor da combustão da frente da chama, e portanto têm uma temperatura operacional segura máxima. Você não deve permitir que essa temperatura exceda o calor residual, o isolamento ou a temperatura do fluxo de gás que passa por eles.

A escolha correta do equipamento

A capacidade de um corta-chama de interromper a chama depende da velocidade da frente da chama, que por sua vez depende da distância da fonte de ignição. Quando usadas com as bombas de vácuo secas para produtos químicos, elas devem ser estreitamente acopladas à entrada e à exaustão. O uso das peças de cotovelo e conexões T entre a bomba e a proteção é aceitável para algumas bombas em certas condições. Fale conosco para obter orientação.

6.5 Sistemas de purga

Os sistemas de purga de gás inerte podem ser instalados no equipamento para remover o gás do processo que permanece no sistema após o final de um ciclo do processo.

O uso correto da purga pode garantir que produtos corrosivos sejam removidos, impedindo que danifiquem a bomba e, mais importante, que danifiquem sistemas protetores como os corta-chamas. Além disso, a remoção dos gases do processo garante que reações químicas indesejáveis e potencialmente perigosas não ocorram entre os materiais usados em diferentes círculos do processo.

6.6 Resumo — a escolha correta do equipamento

- Selecione o tipo correto do equipamento para sua aplicação
- Incorpore todos os dispositivos de segurança apropriados e necessários para garantir a segurança no caso de uma falha
- Elimine os volumes estagnados.
- Certifique-se de que o sistema seja adequadamente controlado e regulado
- Quando apropriado, incorpore dispositivos de alívio de pressão
- Use corta-chamas quando apropriado
- Faça o teste do vazamento de sistemas e equipamentos antes de usar.

7 Procedimento operacional e treinamento

A operação de segurança do equipamento exige treinamento adequado, instruções concisas e claras e uma manutenção regular. É importante que todo a equipe que usa o equipamento a vácuo seja corretamente treinada, qualificada e, quando necessário, supervisionada.

Se você tiver dúvidas sobre qualquer detalhe da operação ou segurança relacionado ao nosso equipamento, entre em contato conosco para obter orientação.

A segurança de um sistema de vácuo é influenciada significativamente pelo design; no entanto, a experiência mostrou que a operação correta do sistema é igualmente importante, especialmente ao considerar o potencial de uso indevido ou falhas.

Não é possível fornecer aqui uma lista completa dos perigos associados à operação de qualquer sistema de vácuo específico; isso deve ser estabelecido pelo usuário final através do uso de uma análise de risco adequada.

É particularmente importante que seja estabelecido um procedimento operacional detalhado que não apenas abranja a operação normal, mas também o que fazer no caso de uma etapa de manutenção ou uma falha. Geralmente, são esses eventos planejados que levam a perigos inesperados e a potenciais danos ou lesões.

Abaixo estão alguns exemplos para dar uma ideia do tipo de perigo inesperado que pode ocorrer:

- Um processo que cria pós metálicos puros dentro do sistema de vácuo é operado com purgas de nitrogênio para garantir que a atmosfera dentro do sistema de vácuo esteja livre de oxigênio. Durante uma perturbação do processo, torna-se necessário abrir a câmara para remover alguns componentes danificados. Esse procedimento leva apenas alguns minutos, durante os quais a bomba de vácuo é isolada da câmara pela válvula de isolamento da entrada. Após a conclusão da etapa de manutenção, a câmara é vedada e, em seguida, evacuada usando a bomba de processo. Infelizmente, a câmara agora contém ar atmosférico, e a pressão resultante na bomba de vácuo gera uma ignição dos pós metálicos reativos.
- Em uma aplicação de forno, os materiais do processo são extraídos através de um filtro localizado na linha de exaustão que precisa ser limpo regularmente. Devido às pressões de produção, a etapa de limpeza foi ignorada e, ao longo do tempo, o filtro ficou bloqueado, causando o desarme da bomba de vácuo devido à sobrepressão na exaustão. Normalmente, isso teria sido uma condição segura, exceto pelo fato de o operador do processo tentar fazer a bomba funcionar novamente mantendo o botão iniciar verde pressionado e ignorando a proteção térmica do motor. A consequência foi que a bomba de vácuo gerou uma contrapressão excessiva, o que provocou a explosão do filtro.
- Em uma usina química, uma bomba de vácuo foi equipada com um condensador de exaustão para capturar um produto corrosivo antes de que este entrasse na linha de exaustão. Parte do procedimento de operação era drenar o reservatório quando o interruptor de nível alto indicasse que estava cheio. A exaustão foi conectada em uma linha

de exaustão comum que normalmente estava em torno da pressão atmosférica; no entanto, devido a uma falha, ela estava em uma pressão mais alta. Quando o operador abriu o reservatório para drená-lo, o líquido corrosivo foi forçado para fora sob pressão e respingou sobre o operador, tendo consequências graves.

8 Modificação dos sistemas de vácuo

Normalmente, o sistema de vácuo é projetado para uma finalidade específica, e é comum conduzir uma análise de risco com uma aplicação específica em mente.

Se o sistema de vácuo for usado para uma finalidade diferente ou se os gases do processo que estão sendo bombeados forem alterados de alguma maneira, a análise de perigo original não será mais válida e haverá risco de ocorrência de um perigo inesperado.

Sempre que um sistema de vácuo for modificado ou os gases do processo forem alterados de alguma forma, realize uma nova análise de risco.

9 Resumo

- Realize uma avaliação de risco para identificar e, se não for possível eliminar, então mitigar todos os riscos. Isso precisa ser efetuado para o projeto de sistema de vácuo, construção, comissionamento, operação, manutenção e desmantelamento.
- Considere todas as possíveis reações químicas dentro do seu sistema. Inclua a consideração de reações químicas anormais, incluindo aquelas que podem ocorrer em condições de falha.
- Consulte as folhas de dados do material/folhas de dados de segurança do material quando avaliar os perigos potenciais associados aos materiais do processo, como, por exemplo, a autoignição.
- Use técnicas de diluição para minimizar reações com oxidantes e materiais inflamáveis.
- Use o tipo correto de lubrificante em sua bomba quando bombear oxidantes e materiais pirofóricos.
- Não use metais pesados no trajeto do gás do seu sistema de bombeamento, se o processo produzir ou usar azida de sódio.
- Quando você efetuar os cálculos de segurança, certifique-se de que as pressões operacionais seguras, para todos os componentes do sistema, sejam levadas em consideração. Certifique-se de levar em consideração as condições anormais ou de falha.
- Certifique-se de incorporar o tipo correto de dispositivo de alívio de pressão, e que eles sejam adequadamente classificados para a sua aplicação.
- Certifique-se de que os bloqueios da exaustão não possam ocorrer.
- Certifique-se de que os gases de diluição sejam adequadamente regulados e monitorados.
- Se você bombear materiais perigosos, deve projetar o sistema para uma condição segura em falhas.
- Use óleos e lubrificantes PFPE (perfluoropoliéter) em bombas quando bombear oxidantes.
- Use um gás inerte para diluir gases pirofóricos e inflamáveis em níveis de segurança ou certifique-se de manter-se acima do limite de explosão/inflamabilidade superior considerando os fatores de segurança adequados durante todas as condições de processo incluindo falhas.
- Você não deve permitir que a pressão máxima do sistema exceda a classificação da pressão máxima de qualquer parte isolada do sistema.
- Considere o uso das bombas secas em preferência às bombas de vedação de óleo onde houver perigos associados com o óleo no volume movimentado.
- Elimine os volumes estagnados.
- Certifique-se de que o sistema seja adequadamente controlado e regulado.
- Use corta-chamas quando apropriado.
- Faça o teste do vazamento de sistemas e equipamentos antes de usar.

Limites normais de operação — não exceda os limites normais de operação

Há muitos componentes que podem formar um sistema de vácuo. Em todos os casos, esses componentes devem ser selecionados e operados dentro de seus limites operacionais projetados. Caso contrário, pode ocorrer uma falha inesperada.

Resumo

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco.

Leybold

Pioneering products. Passionately applied.

Leybold GmbH
Bonner Strasse 498
50968 Colônia,
ALEMANHA
+49-(0)221-347-0
info@leybold.com
www.leybold.com