

氮氧化物气体粉尘过滤器在硝酸装置中的应用

韩 非, 刘 欣, 刘 辉, 原 源, 杨成安

[中海油(山西)贵金属有限公司, 山西 晋中 030600]

[摘 要] 硝酸生产中, 铂网损耗一直是氨氧化制硝酸的第二大成本, 而氮氧化物气体粉尘过滤器是针对贵金属损耗而设计的一种捕集装置, 可以有效捕获铂网燃烧损失的贵金属颗粒, 起到回收贵金属、净化工艺气、提升产品品质的作用。以中海油(山西)贵金属有限公司设计开发的一款氮氧化物气体粉尘过滤器在双加压法硝酸装置上的应用为例, 简介其基本参数、滤芯特点以及过滤器的安装, 基于典型应用企业过滤器压差情况, 利用压缩机功率计算模型, 较为详细地计算与分析过滤器压差造成的系统蒸汽损耗以及相关成本, 同时对过滤器安装后可能出现的异常工况及处理进行了简要总结, 以期合理设计过滤器压差与贵金属回收率提供重要的理论依据, 并为硝酸生产企业安装过滤器后的运行管理提供一点参考与借鉴。

[关键词] 硝酸装置; 铂网; 氮氧化物气体粉尘过滤器; 贵金属回收; 过滤器压差; 蒸汽损耗分析; 异常工况处理

[中图分类号] TQ111.26 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1004-9932(2022)02-0040-03

0 引 言

硝酸生产工艺主要分为高压法、常压法、中压法、双加压法。高压法由于高能耗和低产能, 加之如今严苛的环保政策, 目前在国内已逐渐被淘汰, 而异军突起的双加压法以其低能耗、低排放和高产能优点已成为国内硝酸生产工艺的主力军。硝酸生产是以氨、氧为原料, 通过铂网的催化作用实现氨与氧的充分燃烧、化合; 铂网工作温度为 $800\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1], 在高压气流的持续冲击下, 铂网损耗会随着硝酸装置运行时间的延长而逐渐增大。正常生产工况下, 吨酸(折100%硝酸)铂耗设计值一般为高压法 0.24 g 、双压法 0.12 g 、常压法 0.07 g , 铂网损耗一直是氨氧化制硝酸的第二大成本^[2]。在硝酸生产工艺技术的发展过程中, 使用过多种气态氧化铂回收方法, 其中钯回收是最常见的回收方法^[3], 但仍有大量的贵金属颗粒随气流进入系统内。硝酸装置氮氧化物气体粉尘过滤器(简称过滤器), 是针对贵金属损耗而设计的一种捕集装置^[4], 可以有效捕获铂网燃烧损失的贵金属颗粒, 同时可以净化工艺气, 避免氧化氮压缩机叶片结垢而导

致的喘振, 提升硝酸、硝酸盐及其相关产品的品质。过滤器适用于铂铑二元催化剂、铂铑钨三元催化剂和功能套网双功效催化剂燃烧过程产生的贵金属的捕集, 适用于不同产能的中压法、双加压法硝酸装置高压机组入口氮氧化物气体中夹带的贵金属捕集, 但不适用于常压法硝酸装置。以下以中海油(山西)贵金属有限公司设计开发的一款过滤器在双加压法硝酸装置上的应用为例, 对有关情况作一介绍。

1 氮氧化物气体粉尘过滤器简介

氮氧化物气体粉尘过滤器最初应用于硝酸装置高压机组入口贵金属颗粒的捕集, 过滤器采用单筒式滤芯, 更换滤芯时需将过滤器整体吊装下来, 过滤器运行周期初始与末期压差约为 $3\sim 8\text{ kPa}$ 。近年来, 随着国内双加压法硝酸装置高压机组数量的逐年增加, 为满足硝酸企业节能降耗及贵金属管理的要求, 国内过滤器生产厂家从不同设计角度出发, 在满足贵金属回收收益的情况下, 开发出了运行周期初始与末期压差在 $2\sim 4\text{ kPa}$ 的低阻力过滤器, 目前此类型过滤器在国内硝酸装置中已有60余套在用, 一些新建硝酸装置在设计阶段就要求设计单位在高压机组入口前增设过滤器。

目前, 中海油(山西)贵金属有限公司设计开发的过滤器已有30余套投入应用, 产生了

[收稿日期] 2021-09-14 [修稿日期] 2021-09-26

[作者简介] 韩 非(1986—), 男, 山西静乐人, 工程师, 主要从事技术研发管理工作。

良好的经济效益和社会效益。该过滤器由外壳、挡板、多个滤芯和过滤材料组合而成，其外壳、挡板和滤芯选用与管线同质的材料；滤芯一端用薄板密封，另一端采用焊接或法兰板固定在挡板上，滤芯外部缠绕叠层过滤材料；过滤器滤层材质为三元复合陶瓷纤维。实际应用情况表明，该过滤器适用于化工、钢铁、冶金、燃煤锅炉、耐火材料以及水泥等行业的高温烟气过滤，介质可以是一氧化氮、二氧化氮、氧气、氮气等，在高温、腐蚀性介质工况下，过滤器性能优良，可有效过滤粉尘。过滤器基本设备参数见表1。

表1 过滤器基本设备参数

项 目	参 数
气体流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	30 000 ~ 150 000
管道内径/mm	1 000 ~ 1 300
工作压力/MPa(A)	0.45
高温气气换热器出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	≤ 400 (设计值)
使用周期内额定压差/kPa	≤ 1.5 (初始)/ ≤ 3.8 (末期)
过滤器直径/mm	400 ~ 600
滤芯有效长度/mm	$\leq 2 000$
滤芯数量/根	7 ~ 15
总过滤面积/ m^2	20 ~ 90
滤芯使用周期	与铂网运行周期同步

注：可通过调整滤芯型号和滤芯长度调整过滤器的总过滤面积，以满足生产所需。

2 过滤器滤芯的特点

中海油（山西）贵金属有限公司针对双加压法或高压法硝酸装置，在充分研究铂网网灰的形成、成分、粒径及氮氧化物气流特点等基础上，对国外大型单筒滤芯结构进行了优化设计，设计开发出的新型滤芯具有如下特点。

(1) 采用小型多滤芯布局。优化设计的滤芯长度减小、个数增加，实现了设备体积更小和过滤器内滤芯的可拆卸，可减少有害气体泄漏隐患，便于滤芯安装和更换。

(2) 极大地增大了滤芯的机械强度。新型过滤器采用三元复合陶瓷纤维过滤材料叠层裹覆填充滤芯，该材料是一种结构合理、性能优良的三维孔结构新型高温过滤材料，不仅使得滤芯孔隙率高、阻力小、强度高，而且除尘效率比织物滤料高出1倍左右。

(3) 过滤效果好、过滤器压降极低。新型过滤器滤芯滤材采用风琴状的折叠设计，可有效

增大过滤面积，最大程度降低过滤器对系统气体流量的影响，增强过滤器的过滤效果；此外，滤材风琴状的折叠设计有助于分散滤材上的贵金属，确保滤材过滤通道的畅通，从而可有效控制过滤器带来的压降，确保整个运行周期内系统压降控制在极低范围。

3 过滤器的安装

氮氧化物气体粉尘过滤器为压力容器，其安装需符合国家压力容器的相关规范和标准。据双加压法硝酸装置各工艺单元的流程、管线排布状况以及过滤器的运行工况，过滤器的安装位置位于高温气气换热器尾部出口管道的水平段或垂直段，该水平段或垂直段的长度 $\geq 6 000$ mm，场地许可的情况下，优选在高温气气换热器尾部出口管道水平段切割安装直通式过滤器，水平段切割长度需与过滤器净长度相同；过滤器进出口分别与水平段两端切口对接，加支撑并对接口进行焊接。过滤器可安装就地压差计，以利后期运行过程中过滤器压差的监测，数据采集可通过信号线接至中控室；过滤器侧部开有人孔，滤筒安装与后期更换拆卸通过人孔进行，滤筒安装完成后过滤器外壁加装保温材料。

4 过滤器的压差

4.1 典型应用企业过滤器压差情况

氮氧化物气体粉尘过滤器拦截贵金属颗粒的效率越高，过滤器压差增加更快也更大。过滤器压差增加，系统阻力增大，空压机组做功增大，其汽轮机蒸汽消耗增加，硝酸生产成本上涨，过大的过滤器压差甚至会导致回收的贵金属的价值不足以平衡阻力增大带来的蒸汽消耗增加，使得过滤器应用的经济性下降，因此，设计合理的过滤效率、控制合理的过滤器压差，对于贵金属回收收益最大化具有重要的意义。中海油（山西）贵金属有限公司设计的过滤器运行周期初始与末期压差为1.5 ~ 3.8 kPa，实际生产中，经合理调整后过滤器压差一般可降低——典型应用企业A、B、C硝酸装置的产能分别为270 kt/a、180 kt/a、150 kt/a，经合理调整后，实际生产中企业A、B、C过滤器运行周期初始与末期压差（均值）分别为0.557 ~ 2.50 kPa、0.65 ~ 2.80 kPa、0.84 ~ 3.00 kPa。

4.2 过滤器压差造成的蒸汽损耗分析

4.2.1 蒸汽损耗量的模拟计算

以国内典型应用企业 B (硝酸装置产能 180 kt/a) 为分析对象, 利用压缩机功率计算模型, 以 10 kPa 的极限阻力为例, 对安装氮氧化物气体粉尘过滤器后空压机组汽轮机蒸汽消耗增加情况进行模拟计算。

(1) 硝酸装置负荷为 90% 时, 未安装过滤器时, 空压机打气量 100 700 m³/h、入口压力 0.10 MPa(A)、出口压力 0.40 MPa(A); 安装过滤器后, 空压机打气量 100 700 m³/h (标况, 下同)、入口压力 0.10 MPa(A)、出口压力 0.41 MPa(A), 即安装过滤器后系统气体阻力增加 10 kPa。取理论功率计算系数为 0.119、机械效率为 97%、传动效率为 100%, 计算得气体阻力增加前空压机的理论功率约 7 214.7 kW、轴功率约 7 437.8 kW, 驱动机功率约 8 181.6 kW; 气体阻力增加后空压机的理论功率约 7 343.2 kW、轴功率约 7 570.3 kW, 驱动机功率约 8 327.3 kW。可以看出, 硝酸装置负荷为 90% 时, 安装过滤器后空压机轴功率增加约 133 kW, 增幅约 1.8%。据生产运行数据, 硝酸装置 90% 负荷下 [空压机出口压力 0.4 MPa(A)] 汽轮机的蒸汽消耗约为 17 000 kg/h, 查汽轮机功率流量曲线对应的输出功率约为 4 000 kW, 如果在此条件下汽轮机输出功率增加 133 kW, 则对应的蒸汽流量为 4.88 kg/s (17 568 kg/h), 即汽轮机的蒸汽消耗增加 568 kg/h, 按年运行时间 8 000 h 计, 全年汽轮机将多耗蒸汽 4 544 t。

(2) 硝酸装置负荷为 100% 时, 未安装过滤器时, 空压机打气量 100 700 m³/h、入口压力 0.10 MPa(A)、出口压力 0.45 MPa(A); 安装过滤器后, 空压机打气量 100 700 m³/h、入口压力 0.10 MPa(A)、出口压力 0.46 MPa(A), 即安装过滤器后系统气体阻力增加 10 kPa。取理论功率计算系数为 0.119、机械效率为 97%、传动效率为 100%, 计算得气体阻力增加前空压机的理论功率约 7 827.6 kW、轴功率约 8 069.7 kW, 驱动机功率约 8 876.7 kW; 气体阻力增加后空压机的理论功率约 7 942.0 kW、轴功率约 8 187.7 kW, 驱动机功率约 9 006.4 kW。可以看出, 硝酸装置负荷为 100% 时, 安装过滤器后空压机轴功率增加约 118 kW, 增幅约 1.5%。据生产运行

数据, 硝酸装置 100% 负荷下 [空压机出口压力 0.45 MPa(A)] 汽轮机的蒸汽消耗约为 24 400 kg/h, 查汽轮机功率流量曲线对应的输出功率约为 5 652 kW, 如果在此条件下汽轮机输出功率增加 118 kW, 则对应的蒸汽流量为 6.92 kg/s (24 912 kg/h), 即汽轮机的蒸汽消耗增加 512 kg/h, 按年运行时间 8 000 h 计, 全年汽轮机将多耗蒸汽 4 096 t。

4.2.2 蒸汽损耗量模拟计算结果的验证

在硝酸装置负荷 90%、空压机出口压力 0.40 MPa(A) 下进行空压机加负荷试验, 当空压机因打气量增加出口压力达到 0.41 MPa(A) 并处于稳态时, 测得汽轮机耗汽量增加 1 t/h。如果换算成仅用汽轮机增加轴功率来克服系统气体阻力增加 10 kPa, 汽轮机耗汽量增加不会超过 1 t/h, 耗汽量增加应该至少减半, 即汽轮机耗汽量增加约 0.5 t/h, 按年运行时间 8 000 h 计, 全年汽轮机将多耗蒸汽 4 000 t, 与上述蒸汽损耗模拟计算值基本相符, 从而验证了上述模拟计算的合理性, 同时也验证了相同阻力下机组满负荷工况可比低负荷工况 (吨产品) 少耗蒸汽这一结论。

4.3 过滤器压差造成的成本增加分析

同样以国内典型应用企业 B (硝酸装置产能 180 kt/a) 为例, 实际生产中硝酸装置 100% 负荷下氮氧化物气体粉尘过滤器运行周期初始与末期压差 (平均值) 是由初始低于 1 kPa 缓慢增加到末期的约 3 kPa, 空压机组汽轮机需增加轴功率以克服过滤器压差带来的系统气体阻力增加, 从而会多消耗蒸汽, 实际汽轮机耗汽量增加值应低于最大阻力 3 kPa 对应的汽耗增加值的一半。实际生产中, 企业 B 过滤器运行周期初始与末期压差为 0.65 ~ 2.80 kPa, 实际平均压差低于 1.5 kPa, 按上述相同模拟方法、以平均压差为 1.5 kPa 进行估算, 汽耗增加低于 872 t/a, 汽轮机所耗 4.0 MPa、440 °C 过热蒸汽价格按 90 元/t 计, 全年增加的蒸汽成本为 78 480 元。使用同样的计算方法, 可计算得出 270 kt/a、150 kt/a 硝酸装置满负荷工况下因过滤器压差造成的空压机组汽轮机汽耗增加分别为 1 095 t/a、496 t/a, 汽轮机所耗 4.0 MPa、440 °C 过热蒸汽价格按 90 元/t 计, 则 270 kt/a、150 kt/a 硝酸装置全年增加的蒸汽成本分别为 98 550 元、(下转第 61 页)

2 h 后联锁停主机，在此段时间内可以及时处理油泵故障及其影响。

(2) 为防止干扰信号或假信号的影响，设置变频器自身故障延时 0.5 s 停车。

3 结束语

金陵石化利用 PLC 及通信技术相继对 3 台

(上接第 42 页) 44 640 元。

5 安装过滤器后可能的异常工况及其处理

过滤器安装后，硝酸装置可能会出现一些异常工况，需进行相应的应急处理。

5.1 过滤器压差突增

过滤器运行过程中，若出现过滤器差压计示数大幅上涨，需考虑是否有大量粉尘进入过滤器中，滤材上捕获的粉尘量大增导致过滤器压差大幅上涨。此时需继续观察差压计示数，如短时间上涨后不再出现上涨趋势，在不影响生产的情况下可继续维持运行；如过滤器差压计示数持续上涨，应安排停车，更换滤芯，并对滤芯上附着的粉尘进行分析，以查找原因并作出相应的处理。

二级减排催化剂（ N_2O 炉内减排催化剂）具有消除 N_2O 温室气体的作用，安装于氨氧化炉内铂网下方，二级减排催化剂运行过程中会有部分碎化，产生大量粉尘，过滤器对催化剂粉尘的有效截留对工艺气的净化具有重要意义，因此，需根据粉尘的产生量调整过滤器的滤材参数、降低过滤器的运行压差。

5.2 过滤器压差突降

过滤器运行过程中，若出现过滤器差压计示数大幅下降，需考虑是否有大颗粒异物进入了过滤器中，滤材被大颗粒异物冲击出现破损导致了气流从破损部位溢出。此异常工况的出现不会影响硝酸装置的正常生产，但会对过滤器本运行周期的过滤效果（亦即贵金属回收效果）产生影响，应在过滤器本运行周期结束后对颗粒异物进行分析，以查找原因并采取相应的措施。

5.3 液态水侵蚀过滤器

过滤器安装段严禁大量液态水通过，一旦液态水侵蚀过滤器，会导致滤材吸水而失去通透功能，此时需紧急停车，排出过滤器内的水，同时

高压煤浆泵电气控制系统实施改进，通过较小的改造投入及较易实施的方式实现了高压煤浆泵电气控制系统的改进，提高了高压煤浆泵的自动化控制水平，并给高压煤浆泵的巡检操作及维修带来了便利，运行至今 3 台高压煤浆泵未出现过电气方面的故障，保障了高压煤浆泵及气化装置的安全、稳定运行。

查找液态水泄漏的原因并予以处理，维修破损部位并更换滤材。另外，硝酸装置重启前需打开过滤器底部的排污阀排水，确保其内部积水排尽。

6 结束语

随着双加压法硝酸装置数量在国内的迅猛增长，与其配套使用的过滤器也应运而生，经过多年的改进与升级，如今用于贵金属颗粒捕集的过滤器已完全能满足双加压法硝酸装置的生产运行要求。上述中海油（山西）贵金属有限公司设计开发的（贵金属）过滤器，在高温气气换热器后截取管段通过焊接的方式安装于系统管线中后，通过人孔可方便地进行滤芯更换，避免了使用吊车吊装设备或法兰盖造成的频繁热紧而易发生泄漏，滤芯使用三元复合陶瓷纤维滤材并采用风琴状设计，使滤芯的强度增大、压差降低。应用实践表明，该型过滤器具有结构合理、安装方便、压降小的特点。此外，利用压缩机功率计算模型模拟计算的该型过滤器压差对高压机组汽轮机蒸汽消耗的影响，可为合理设计过滤器压差与贵金属回收率提供重要的理论依据，过滤器运行过程中异常工况及处理的简要总结也可为硝酸生产企业安装过滤器后的运行管理提供一点参考与借鉴。

[参考文献]

- [1] V. A. Sadykov, L. A. Isupova, I. A. Zolotarskii, et al. Oxide catalysts for ammonia oxidation in nitric acid production: properties and perspectives [J]. Applied Catalysis A: general, 2000, 204 (1): 59-87.
- [2] 贺小塘, 赵雨, 王欢, 等. 铂族金属催化网在硝酸工业中的应用 [J]. 贵金属, 2014, 35 (S1): 158-163.
- [3] 韩非, 刘欣. 两种钯合金网在硝酸催化网中捕集铂的比较 [J]. 贵金属, 2017, 38 (1): 31-35.
- [4] 张兵, 余波. 贵金属过滤器在硝酸装置上的应用 [J]. 石化技术, 2018, 25 (8): 49.