

褐煤提质装置中 PSA 制氮机 运行故障分析及处理

朱自洲*, 喻纯钢

(中国神华煤制油化工有限公司呼伦贝尔洁淨煤分公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021025)

摘要:褐煤提质装置中氮气对系统的安全生产起着至关重要的作用,但是投料试车期间 PSA 制氮机运行故障频发,影响着装置的安全、稳定运行,为此对 PSA 制氮机运行故障原因做了详细地分析,并对故障处理情况进行了介绍。

关键词:褐煤提质;PSA 制氮机;原理;变压吸附;运行故障

中图分类号:TQ536.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0143-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.035

Reason analysis and processing of running faults of pressure swing adsorption nitrogen making machine in lignite upgrading project

ZHU Zi-zhou*, YU Chun-gang

(Hulunbuir Clean Coal Branch of China Shenhua Coal-to-oil Chemical Engineering Co., Ltd., Hulunbuir 021025, China)

Abstract: In the Lignite upgrading project, nitrogen plays an important role in the safe production system. But the running faults of PSA nitrogen making machine are frequently occurred in the process of feed and trial, which affects the secure and stable operation of the systems. Reasons for running faults of PSA nitrogen making machine are analyzed in detail. The corresponding processing measures are also introduced.

Key words: lignite upgrading; pressure swing adsorption nitrogen making machine; working principle; pressure swing adsorption; running faults

氮气是一种无色无味、无毒、无腐蚀、不自燃,一般不与任何物质发生反应的惰性气体,占大气体积分数的 78.12%,其化学性质稳定^[1]。基于它的这种惰性,在呼伦贝尔 0.5 Mt/a 褐煤提质工业试验装置中得到了广泛的应用。自 2009 年装置投料试车至今,氮气被用于煤仓、输送粉体设备及管线的惰化保护,输送粉体设备的轴端密封,设备管线吹扫,粉煤仓的振打气源,气力输灰系统气源等诸多方面。但是在装置投料试车期间,PSA 制氮机故障现象频繁发生,影响装置的安全连续生产。通过对制

氮机出现故障的原因进行专题分析和处理后,制氮机恢复正常运行,为装置连续提供合格的氮气的来源。

1 制氮概述

1.1 氮气制备的工艺及特点

目前空气分离制氮有 3 类,即深冷空分制氮、变压吸附(PSA)制氮和膜分离制氮。PSA 制氮技术工艺简单,还可随时开停车,众多优点在褐煤提质试验项目中得到了很好的体现,详见表 1。

表 1 氮气制备工艺、特点及应用

制备方法	制备原理	优点	缺点	应用
深冷空分制氮	利用空气中氧氮的沸点不同,使空气深冷液化,进行分离提纯	纯度高,分离量大	工艺复杂,设备制造、安装、调试要求高,投资大,占地面积大,操作人员多,产气慢	适宜于大规模工业制氮
变压吸附制氮	以空气为原料,用碳分子筛作吸附剂,利用其对空气中的氧和氮选择吸附的特性,运用变压吸附原理在常温使氧和氮分离制取氮气	工艺简单,设备制造容易,占地少,启动时间短,操作维护简便,适应性强,自动化程度高,开停方便,产气快,能耗小,成本低,纯度可调节	分子筛易中毒,失去活性后影响氮气纯度,分子筛易粉化,使用寿命短	适宜于中小规模装置
膜分离制氮	以空气为原料,在一定的压力下,利用氧和氮在中空纤维膜中的不同渗透速率来使氧、氮分离制取氮气	设备结构更简单,体积更小,无切换阀门,操作维护也更为简便,产气更快	空纤维膜对压缩空气清洁度要求更严,膜易老化而失效,难以修复,需要换新膜	适合氮气体积分数要求在≤98%的中小型用户

1.2 PSA 制氮机的结构及制氮工艺原理

PSA 制氮机主要由吸附塔 A/B、上部压紧气缸、中部均压管、消音器、塔底布气板、塔顶集气板、压板、滤网、椰垫、吸附剂、阀组和管道组成。PSA 制氮技术是以碳分子筛为吸附剂,利用加压吸附,降压解吸的原理从空气中吸附和释放氧气,从而分离和制取氮气。主要由空气压缩、空气净化、氮气变压吸附及氮气应用 4 大部分组成。见图 1。

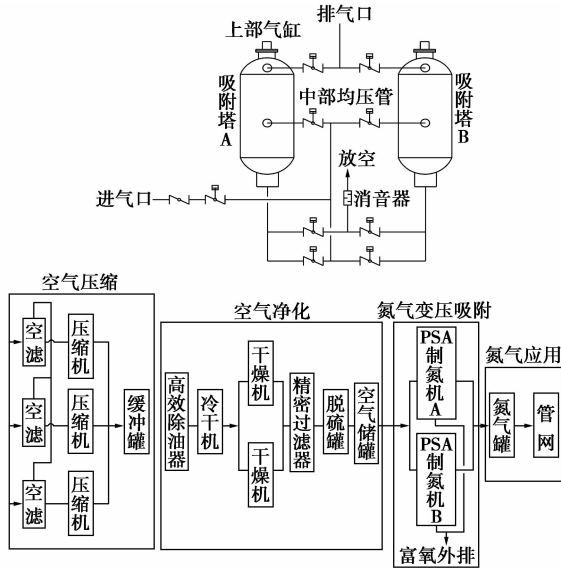


图 1 制氮机的结构及 PSA 制氮工艺

制氮工艺流程:空气过滤后进入螺杆压缩机,产生的压缩空气进入缓冲罐后经过除尘、除油、脱水和碳氢化合物后存储于空气储罐中作为稳定气源。当气源压力 ≥ 0.6 MPa 时启动制氮机,打开进气阀,压缩空气由底部进入 A 吸附塔,压力升高的同时经过碳分子筛缓慢地向塔顶集气板扩散,由于碳分子筛在常温下对 O_2 和 N_2 在吸附剂上的吸附速率的差异或吸附容量不同,升压时压缩空气中的 O_2 、 CO_2 、 H_2O 分子被碳分子筛吸附,未被吸附的氮气分子穿过集气板,经过排气阀进入氮气储罐,这个过程称为 A 塔吸附制氮,持续 40 ~ 120 s。A 塔制氮结束后,通过均压阀及管道使 A、B 2 个吸附塔的压力达到均衡,这个过程称为均压,持续 2 ~ 3 s。均压结束后,压缩空气进入 B 吸附塔,进行 B 塔制氮过程,同时 A 吸附塔中碳分子筛吸附的氧气通过放空阀降压放空,此过程称之为解吸。反之 A 塔吸附时 B 塔在解吸。两塔交替进行加压吸附和降压解吸过程,如此反复循环,完成氧气和氮气的分离,连续输出体积分数为 95% ~ 99.9% 的合格氮气至氮气缓冲罐,通过调节流量控制系统,向各用氮部位提供稳定的氮气流量^[2]。

2 运行故障及原因分析

PSA 制氮机作为褐煤提质装置中的公用工程系统设备,为装置的安全运行提供有效的保障。然而 2 台制氮机在运行过程中却出现分子筛泄露、椰垫及滤网破损、产品气纯度达不到使用要求、设备内部构件焊缝开裂等现象,虽然检修周期短,但是能否连续、合格地供气直接影响褐煤提质工艺系统是否能安全稳定运行,为保证制氮机能正常供气,通过以下几方面对加速分子筛粉化和设备内部损坏的原因进行分析。

2.1 分子筛泄露的原因分析

制氮机分子筛泄露的主要现象是制氮机运行富氧排空过程中从排空管里冒出黑烟,甚至是喷出分子筛颗粒,分子筛的粉化及设备内部构件损坏是导致制氮机漏粉的直接原因。

2.1.1 分子筛质量差

分子筛是一种分离氮气吸附氧气的吸附剂,它的质量好坏直接影响着制氮机的性能和供气纯度。质量好的分子筛的抗灰尘、防潮能力、强度、吸附性均比一般质量的分子筛性能好,质量差的分子筛使用寿命较短,在运行过程中加剧粉化。

2.1.2 分子筛填充不实

制氮机在填充分子筛时无专业填充振动设备导致制氮机内部分子筛填充密实度低。制氮机运行时,压缩空气气流经罐体底部上升,氧气被分子筛吸附后,氮气输送至下游管线。由于气流频繁冲击,内部分子筛磨损加剧,分子筛的料位逐渐下降,当降至顶部气缸的下限时,气缸对分子筛不再起压紧、限制作用,从而加速了分子筛的粉化,导致粉末透过滤网,随富氧排空。

2.1.3 气源压力大小

净化处理后的压缩空气进入制氮机塔体底部,供气气源的压力大小影响制氮机的工作状况。由于 PSA 制氮设备的加压、减压频率较高,带压气体对碳分子筛的冲击很容易造成碳分子筛磨损,所以首先要对气源的压力、流速进行严格地控制。气源压力过大,在气动阀门打开的瞬间,气源对分子筛的冲击力大,加大了分子筛之间的静摩擦力,在分子筛吸附饱满后,进气启动阀关闭的瞬间,分子筛下落时静摩擦力也相对较大。气源压力过小,分子筛吸附氧气达到饱和的时间较长,换言之就是制氮机输出合格氮气的工作时间加长,分子筛之间的摩擦时间变长,加速了分子筛的粉化。

2.1.4 气动阀门不严

制氮机管路配置气动快开蝶阀阀组,均压阀组、排气阀组与放空阀组,任何阀组关不严漏气都可能在暂时不工作的另一台制氮机中产生气流,气流的涌动也会加大分子筛之间的静摩擦,加剧了分子筛的粉化。

2.1.5 进气水分、油气大导致失效

制氮机前端进气源配有多级过滤设施和干燥设施,本套设备中主要包括冷干机、高效除油器、 Al_2O_3 加热干燥机、精密过滤器组成的气源净化系统。

气源净化系统中的过滤器滤芯和 Al_2O_3 瓷球需定期更换,滤芯损坏或更换不及时都会导致气源中含水和油气,而水和油却是影响分子筛质量和使用寿命的最重要的因素。当气源中的水分和油气体积分数大于 0.01×10^{-6} 时,分子筛吸附效率降低,强度下降,加剧了分子筛的粉化。

2.1.6 顶部气缸压不紧

仪表风压力小、气缸损坏及制氮机的料位低等都是顶部气缸压不紧的原因。而顶部气缸压不紧时气缸对分子筛不再起限制作用,气流进入后给分子筛更大的活动空间,加大了分子筛之间的撞击力,加速了分子筛的粉化,严重时影响设备内部结构的牢固性,加剧了设备内部构件的损坏。

2.1.7 滤网和椰垫破裂

制氮机内布气板下部是 $\phi 32 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的4根支撑柱,上部铺设40目的滤网及50mm厚的椰垫,滤网通过法兰式压板紧固在布气板上。由于气流和分子筛长时间的冲击,滤网和椰垫中间部位破损,导致分子筛落入罐底,随富氧外排管外泄。若破损的滤网和椰垫不及时更换,就会形成恶性循环,影响产品气的纯度、流量,严重影响设备运行的稳定性和安全性。

2.2 设备内部构件开裂的原因分析

在制氮机运行期间,总出现分子筛泄露的故障现象,为从根本上解决设备带病运行的问题,拆解设备,经对塔体进行全面检查后发现制氮机内部构件焊缝部位开裂、塔底布气板断裂现象。

2.2.1 布气板断裂

布气板是使气源均匀分布到制氮机内的构件,可提高分子筛的使用效率。布气板下部有4根 $\phi 32 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的支撑柱,制氮机低料位排气运行时,分子筛在自重(3.5 t)下长时间对布气板冲击造成支撑柱对布气板局部冲击,由于支撑柱与布气板的有效接触面积较小,经过一段时间的冲击后导

致布气板断裂。

2.2.2 布气板焊缝开裂

塔底布气板与筒体是焊接而成的,只有一条环形角焊缝,检查中发现与布气板相接 $2/3$ 周长的焊缝已开裂。根据现场情况分析判断:焊接前布气板边缘的坡口留的较小,焊接时母材未完全焊透,存在焊接缺陷,经分子筛上升、下落来回冲击后焊缝开裂。

2.2.3 均压管端部断裂

均压管均衡的是2台制氮机在加压吸附和减压解吸过程中的气压,可有效降低气源对分子筛及设备结构的冲击力。设备拆解后发现,均压管与筒体承插端部开裂,分子筛沿断裂处进入管道。由于焊接工艺、缺陷在该部位产生应力集中,制氮机运行时分子筛对均压管的冲击造成该部位疲劳断裂。

2.3 产品气纯度不合格

PSA变压吸附制氮机制取氮气的体积分数可达到95%~99.9%,褐煤提质装置的氮气主要用于系统的惰化保护,要求氮气的体积分数必须 $\geq 96.5\%$,对于不符合体积分数要求的氮气直接排空。在制氮机运行过程中,总出现氮气体积分数低于95%的现象,达不到装置氮气体积分数使用条件,既影响装置运行,还造成不必要的人力、物力、财力方面的损耗。

2.3.1 气源压力不稳定

制氮机的进气气源压力、流量不稳定导致产品气体积分数低,制氮机进气工作压力是0.6~0.7 MPa。在满足氮气设计工作流量的情况下,气源压力过高或过低,分子筛均不能完全吸附空气中的氧气,未被吸附的氧气随氮气排至下游导致氮气体积分数低。

2.3.2 分子筛失效

碳分子筛(CMS)是一种非极性速度分离型吸附材料,常以煤为主要原料经过特殊加工而成^[3]。分子筛颗粒直径一般为1 mm,长度3~5 mm,颗粒内部含有大量微孔,该微孔对氧分子有较强的亲和力。净化后的原料气要满足长期制氮的标准(油体积分数 $\leq 0.01 \times 10^{-6}$,硫化氢体积分数 $\leq 0.01 \times 10^{-6}$,露点 $\leq -23^\circ\text{C}$)^[4],否则大量的油、水进入碳分子筛,将会使分子筛内部微孔堵塞而失去吸附能力,即分子筛失效。

冷冻干燥机能否正常运行是脱水的关键,初步脱水后的空气在高效除油器中还得脱除大量水分,水分进入高效除油器的滤芯后影响除油效果, Al_2O_3 加热干燥机脱除水后进入精密过滤器再次除油脱

水,最后通过脱硫罐来脱除硫化氢气体。经过上述五级净化过滤来确保原料气满足制氮用气的条件。从上述可以看出,压缩空气中的水分、油分脱除不彻底是造成制氮机碳分子筛失效的主要原因。

2.3.3 氧/氮分析仪失灵

氮气罐出口管路安装有氮气取样管,将取得的样气送至智能氧/氮分析仪,经微处理机对比标信号处理后,利用氧浓度值算出氮浓度值后提供氮纯度值显示。制氮过程中,氮气气压不稳,取样管漏气,分析仪故障损坏等都是造成氮气纯度误差或不合格的原因。

3 故障处理

在制氮系统运行过程中,暴露出诸多故障现象,为保证主装置正常连续生产,制氮机曾在短期内带病运行,可是随着时间的延长,故障现象加剧(如分子筛轻微泄露至严重泄露)。为彻底解决制氮机的运行故障,通过对故障原因进行仔细分析,经多次处理,终于解决了各种故障,保证了制氮机和主装置的连续稳定运行。

3.1 制氮机分子筛泄露处理

制氮机分子筛的泄露不仅污染环境,更重要的是它的泄露形成了恶性循环,加剧了设备的损坏。在保证分子筛质量的情况下,通过一系列措施使得分子筛不再泄露。

3.1.1 间断启停法填充分子筛

在分子筛填装期间,由于没有专业填充振动设备,只能在填装塔体体积的1/4、1/2、3/4及满塔位置时用 $\phi 60$ mm的木棒进行转动,至碳分子筛上限不再下沉且上限距密封面100 mm左右时安装上部压紧气缸,拧紧法兰螺栓。然后正常启动制氮机,压紧装置法兰、人孔等处正常无漏气时运行30 min后拆解气缸添补分子筛,此后依次按间隔1、2、4、8、24 h间断运行,直至分子筛料位不再下降为止。

3.1.2 稳定、净化气源

调整压缩机出口压力和其他部位压缩空气的使用量,确保制氮机进气的稳定。同时加强检查冷干机的制冷效果,将空气储罐、过滤器底部手动排污阀更换为电磁定时排污阀,及时排除水和油污,以减轻后续净化设施的负荷,促使气源符合制氮用气的标准,以延长分子筛的使用寿命。

3.1.3 安装电磁感应报警器

压紧气缸通过气压推动行程顶板来实现分子筛的压紧,分子筛泄露直接导致分子筛料位下降,因此

在距气缸法兰密封面150 mm的位置处安装电磁感应报警器来监测分子筛料位的低限,当气缸的行程超过设定的行程时,电磁感应报警器将会在操作面板上发出报警信号,这样就可以及时填补分子筛,避免分子筛低位造成的故障现象。

3.1.4 更换滤网、椰垫

滤网和椰垫主要起布气、过滤及缓冲作用,防止气流冲击分子筛导致的粉化。设备拆解后仔细检查滤网、椰垫的完好情况和压板对滤网的压紧情况,及时更换破损的滤网和椰垫,以确保布气的均匀性和缓冲效果。

3.2 设备内部构件开裂部位处理

通过对设备内部构件的开裂部位进行原因分析后,制定处理方案,从根本上解决设备内部结构缺陷。

3.2.1 局部焊缝处理

将原有塔体与布气板的角焊缝打磨平整,并打成单面V形坡口,对焊口预热至150℃后进行焊接,焊后对焊缝进行初磨,防止局部高点导致滤网压不紧。

对均压管端部焊缝磨平处理后,将均压管的位置重新调平,固定后从外侧焊接,然后在均压管内侧按120°焊装3块60 mm×40 mm的钢板对其限位。

3.2.2 更换布气板及底部支撑

布气板断裂后对其进行平整,补焊以后局部有高点,影响滤网的使用,还不能保证设备的长期稳定运行。切除原有布气板及钢管支撑,打磨焊口后水平均匀焊装3根10#槽钢代替原有钢管支撑,增大布气板与支撑的有效接触面积。重新焊装布气板,按压板螺栓孔的位置对布气板钻孔,铆焊M12×40 mm,8.8级的螺杆,焊缝打磨平整后进行超声波探伤检验焊缝质量,焊缝质量合格后安装滤网及椰垫。

3.3 产品气体积分数调节

氮气的纯度直接影响装置的安全生产,氮气纯度低于装置使用要求只能排空,除加剧设备损耗外还造成能源浪费,只有消除故障才能保证氮气的纯度。

3.3.1 调整供气与排气流量

在保证氮气需求流量的前提下,通过适当加大进气(压缩空气)压力,减少排气(氮气)流量的方式调节氮气的纯度。

3.3.2 更换碳分子筛

碳分子筛的正常使用寿命3~5年,可是往往

(下转第148页)

成结构。

本项目设计的内置 LED 光生物反应器主体结构是在不锈钢罐顶部或底部制作多个法兰孔,将耐温、耐压、耐温度急变的硼硅玻璃筒体植入不锈钢材质反应罐体内,在密封反应罐内将集成了高亮 LED 光源的支撑体通过玻璃筒体放入反应器内部^[5-6]。反应器主体结构如图 1 所示。

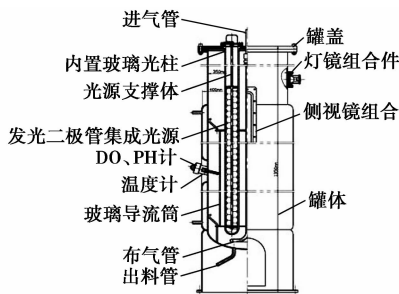


图 1 反应器主体结构图(气升式)

1.2 设计独特的 LED 光源集成结构,实现光照均匀、波长可选和功率可调

本项目在光源上着重研发 LED 光源在光合生物反应器内的集成结构。根据不同的培养要求选择不同特性的高亮度 LED,做了 5 种光合菌试验,即螺旋藻、微蓝藻、鱼腥藻 7120、 β 胡萝卜素、叶绿素。试验结果表明,不同种类的光合生物对光源波长要求不同,并且在生长与合成阶段对光源的波长要求也不同^[7-9]。因此,必须据不同的培养对象选择适

当的照射功率和光源波长,光源集成体应具有区块分割和方便更换的模块化结构,实现光源照射的均匀性和可选可调性^[10-11]。本项目设计制造的 LED 光源集成体实物图如图 2 所示。



图 2 集成 LED 光源

1.3 发光二极管光源支撑体及密封结构设计

本项目中发光二极管光源内置于反应器,且反应器可高温高压灭菌,故作为光源的支撑体的材料必须具有高透明性,以及能耐受高温高压及温度急变等特性。光源支撑体的材料选定为硼硅玻璃,由于硼硅玻璃光柱与不锈钢罐体二种材料的热膨胀系数不同,容易引起硼硅玻璃破碎,为了解决这一问题设计了在结合处使用成型的硅胶密封圈,实验证明,该结构能很好解决这一难题,具体结构如下:插入罐内的耐温、耐压、耐温度急变的硼硅玻璃管与反应器联为整体,形成密闭反应空间。LED 强制水冷集成支架放入玻璃筒,通过固定板与上夹紧法兰连接。LED 光源透过玻璃筒体对反应器内部光合

装法、在压紧气缸上安装电磁感应报警器、加强气源处理效率有效解决了分子筛的泄漏问题;通过对焊缝处理,更换布气板支撑有效解决了内部构件损坏的故障;通过调整进气、排气的流量,调校氧/氮分析仪保证了氮气出口的体积分数。

对 PSA 制氮机在褐煤提质装置生产中的故障进行原因分析和处理后,大大降低了生产运行成本和检修成本,提高了设备运行的稳定性,有效保证了褐煤提质装置生产的连续性和安全性。

参考文献

- [1] 韩有龙. 氮气在煤矿防火中的应用[J]. 中国科技博览, 2013, 6(4): 202 - 202.
- [2] 朱自洲, 刘云肖, 吴涛. 氮气在褐煤提质装置中的制备和综合应用[J]. 中国化工贸易, 2014, 6(31): 156 - 157.
- [3] 卢樟好, 赵开利. 碳分子筛制氮技术研究[J]. 低温与特气, 1996, 14(2): 27 - 31.
- [4] 朱自洲, 刘云肖, 吴涛. 氮气在褐煤提质装置中的制备和综合应用[J]. 中国化工贸易, 2014, 6(31): 156 - 157. ■

(上接第 146 页)

由于各种原因导致分子筛粉化、失效,降低了吸附性能,影响氮气的纯度,更换分子筛后氮气的纯度明显提高。

3.3.3 调校氧/氮分析仪

氧/氮分析仪是监测和显示氮气纯度最直接的部位,它的完好性与测量数值的准确性直接影响氮气的使用情况。因此在不影响生产使用的情况下及时调校氧/氮分析仪,确保测量氮气纯度数值的合格。

4 结语

分子筛质量的好坏、塔体填装分子筛的密实度、气源压力的稳定性及净化设施的效率等都直接影响分子筛的使用寿命和吸附效果,不满足任何条件都会加剧分子筛的粉化,最终导致设备内部构件损坏,设备无法正常运行。

在保证分子筛质量的情况下,通过间断启停填