

化工领域空分装置的运行经济性分析

马江（内蒙古中煤远兴能源化工有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 017307）

摘要：空分装置的生产流程是先空压机对气体进行压缩，然后进入预冷系统进行洗涤降温，然后进入纯化系统水平双层结构的分子筛，除去空气中的水、乙炔、二氧化碳及碳氢化合物等杂质，然后一部分气体进入下塔，而另一部分气体经增压机增压后由透平膨胀机进行膨胀制冷，然后进行精馏，得到高纯度的氮、氧供给气化炉，同时得到副产品液氧、液氮、液氩等。合理优化的空分装置设计，既能使空分装置整体的运行能耗降低，又能使得经济性得到大幅提高。

关键词：空分装置；节能；经济运行分析；处理措施

0 引言

空分装置用于煤化工过程，普遍面临着空压机组因轴位移问题不能稳定运行，空分启动费用高，备用设备切换影响后线产量导致经济性损失等问题。通过对上述问题的工艺改进，使整个装置的启动费用大大降低，同时也能保证后线产量，增加公司经济收入，从而确保整个空分装置的安全、平稳运行。

1 空分装置的节能降耗

使用了一种全新的空气压缩机，通过对压缩机的结构和生产技术的不断完善，进一步改善了压缩机的性能。等温式压缩机是目前空分机组发展的主流，它具有良好的制冷性能和良好的等温性能，能够在很少功率的情况下完成有效的压缩，与常规压缩机相比，节能 3%，尤其是在大型压缩机上。

最近几年，除空分技术水平有所提升之外，在气体精馏方面也取得了重大进步，即以规整化填料代替了筛板层。规整化的填料塔压降低，塔径变小，操作弹性大，能耗降低，使用规则化的填料可以减少上塔阻力，改善精馏效果及运行稳定。尤其是对上塔顶的压力降低、空气压缩机的排气压力降低更为明显。数据表明，采用该装置后，上塔阻力降低到常规筛板的 15%~20%。工作压力越小，能源消耗越小。采用规整化填料可以增强精馏过程，增加精馏速率，增加氧气输出，减少精馏阻力，减少压缩机排气压力，实现高效率 and 低能耗的目标。通过对上部塔底压差 Δp 的分析，得出了上部塔底侧压强减小 3 个 Δp 的结论，上塔规整化填料填充后，从理论上可以节约 8% 左右的能源。实践证明，该工艺可使生产过程中的能源消耗降低 4%~5%。因为上塔的阻力显著降低，所以不需要像以往一样，使进料气体进入下部塔时的压力较高。这样，压缩机的排气压力就可以达到整个流程的要求，

从而降低了压缩机的能量消耗，降低了动力消耗。

取消冷冻机组。当用户采用的氧氮比为 1:1 时，可在工艺流程中增设一水冷却塔，该冷却塔充分发挥多余的污氮及氮的不饱和（吸湿）特性，当氮流经水冷却塔冷却水时，其所含的水含量较高，且其挥发需潜热，在短时循环期间，很难从外部获取热能，仅能通过水的内部能进行汽化，从而将水的温度降低到 12~13℃，从而使塔出塔的风温度可达 14℃，从而充分符合空分技术的需求。

2 空分装置的安全运行

2.1 利用分子筛进行预纯化

本项目拟采用长时间、双层床净化、无冲击切换控制技术，采用双层床结构（活性氧化铝 + 分子筛）对大气中的水分、二氧化碳、乙炔、丙烯、丙烷、重烃、一氧化二氮等杂质进行吸收，使其在进入精馏塔前就被完全去除，从而解决了板式换热器冻堵的安全问题。底部的活性氧化铝对分子筛起到了很好的保护作用，提高了催化剂的使用寿命。利用两层流化床可以有效地减小吸附塔的再生阻力，从而减少回收的温度，节省回收能量。该开关系统由 DCS 进行自动化，具有压差的自动判定功能，与阀门位置反馈信号相结合，能完全确保开关系统的可靠运行。针对空分装置的技术需求，将 CO_2 含量测定装置安装于分子筛吸收塔的出口处，对其进行实时监测，使其达到 $\phi(\text{CO}_2) \leq 1 \times 10^{-6}$ 。这样既可以除去水分、乙炔等有害物质，又可以保证空分装置的正常运转。当 $\phi(\text{CO}_2) \geq 1 \times 10^{-6}$ 时，要分析原因，减少空气量或者减少吸附时间。

2.2 采用内压缩流程

在净化过程中，除利用高效率的分子筛对大气中的有害物质进行有效的脱除之外，还可以通过液态氧

进行内部压缩。因为氧液化压转换为液氧泵,所以在液态阶段就已经结束了增压处理,从而极大地提高了安全性。而且,液氧泵安装在低温箱内,可以将液态氧经高压板式换热器汽化后直接送往使用单位,从而解决了空气压缩机车间中高压氧管线穿越的问题,提高了压缩机车间的安全性。此外,空分精馏塔的主冷凝蒸发器需要不断地通过液氧泵抽取液态氧,然后增压汽化后供应给使用单位,这样就不会让大量的碳氢化合物堆积在主冷凝蒸发器内,也就避免了爆炸的危险性。因此,液态氧的内压缩比常规氧压机更安全、更可靠。

2.3 主冷凝蒸发器的设计制造

为了避免在操作过程中液氧发生析晶而引起的阻塞,在主凝结汽化器的板翅型结构中,应注意肋翼间距应适当减小。在制作主要凝结汽化器时,应保持洁净、无油的环境,避免机器异物侵入管道,导致流通道阻塞或堵塞,存在安全风险。根据有关标准及生产厂家的规定,在工程设计中,对主要凝结汽化器要进行严密的接地处理,以避免产生静电,并且其接地电阻不能小于 10 欧。

3 改造案例及其经济行分析

3.1 空分装置概况

内蒙古中煤远兴能源化工有限公司空分装置采用杭氧第六代深冷分离技术,2013 年建成,单套加工空气量为 $231000\text{Nm}^3/\text{h}$,单套产能为 $45000\text{Nm}^3/\text{HO}_2$,主要产品有氧气、氮气、液氮、仪表气、吹灰气、工厂空气,主要包括:压缩机系统、预冷系统、纯化系统、膨胀机系统、精馏系统及储存系统。其中,汽轮机为杭州汽轮机股份有限公司生产,型号为 HNKS50/71/32,额定功率为 38694kW;空压机为西安陕鼓动力股份有限公司生产,型号为 RIK125-4,额定功率为 20140kW;增压机为西安陕鼓动力股份有限公司生产,型号为 RBZ45-7,额定功率为 12780kW;齿轮箱为台朔重工股份有限公司生产,型号为 TA400-SFC,额定功率为 13816kW。额定运行转速为 4360r/min。

3.2 存在的问题及改造措施

2020 年 6 月份,机组大修后,自 7 月 3 日起开始启机运行,起初各设备监测参数均比较稳定,但在一个月后,汽轮机轴位移出现了缓慢变化的趋势:在 2021 年 1 月 31 日,汽轮机轴位移数值分别变化至 -0.551mm 和 -0.560mm ,触发报警值。2021 年 3 月 23 日,汽轮机轴位移最高达到 -0.595mm 和 -0.609mm ,累计

变化范围达到 0.273mm 。在此期间,汽轮机主推力轴承温度也有同步变化,从 80°C 缓慢上涨至最高 92°C 左右。而在同一时间段内,空压机和增压机轴位移数值和推力轴承温度均无明显变化。在汽轮机排气侧转子的裸露位置外接导线测量轴电压值,经现场检测,转子的轴电压值在 $50\text{V}\sim 60\text{V}$ 左右,转子上的确有轴电压存在,由此判断此问题与轴电流腐蚀有关。因推力轴承处存在电腐蚀现象,导致推力瓦块表面的巴氏合金出现磨损,推力轴承抵消残余轴向力的能力下降,轴位移和轴承温度都出现了缓慢变化的情况。改进方法:经现场研究、查看,决定在汽轮机排汽侧汽封处转子裸露部位增加导电碳刷将轴电压接地消除,询价生产厂家及检修厂家接地碳刷价格昂贵且采购周期长,无法及时解决目前问题。为及时尽快导出轴电压、消除对主推力轴承的电腐蚀现象,稳定汽轮机位移数值。通过对热电发电机组接地碳刷的构成及原理分析研究,自制一套静电接地装置,经现场检测,轴电压能够持续为“0V”,彻底消除轴电压对主推力轴承的电腐蚀现象。

空分后备系统原设计一台 300m^3 液氧储罐 SV581701,一台 300m^3 液氮储罐 SV581801。液氧储罐主要用于液氧装车或充瓶销售,目前无法办理销售许可,暂停使用。液氮储罐主要用于提供系统密封或吹扫的 13.2MPa 超高压氮气和 6.0MPa 中压氮气。系统 0.5MPa 低压氮气直接由采用下塔供给。空分装置停车,系统将无法提供系统低压氮气。当装置计划停车检修时,空分需等甲醇装置彻底降温、置换完成后才能停车进行系统检修。无液氮低压氮气后备系统,延长了空分和热电装置停车运行时间,增加系统停车能源消耗。改进方法:为保证空分事故状态和计划检修停车期间能够连续稳定供给甲醇装置低压氮气,现增加空分低压液氮后备系统。原液氧储罐改造为液氮储罐,通过连通管线将两个储罐连通。利用现有的液氮装车泵管线 LN-58-1824-100-B46C-C 引出 DN80 的液氮管线,作为新增低压液氮泵 NP581807A/B 的入口管线,液氮经泵加压后送入低压气化器 LE581805A/B,汽化后的低压氮气送至 0.5MPaG 低压氮气管网(N3-51-101-300-B01-C)(如图 1 所示)。低压氮气管网的氮气流最大 $16000\text{Nm}^3/\text{h}$,考虑设计余量,气化器的设计流量为 $17600\text{Nm}^3/\text{h}$;为保证低负荷时可切化气化器,设计两台流量为 $8800\text{Nm}^3/\text{h}$ 的空浴式气化器(所需主要材料如表 1 所示)。低压液氮泵单台正常流量为一半

流量, 约 $12.5\text{m}^3/\text{h}$, 额定流量 $13.8\text{m}^3/\text{h}$ 。液氮经气化器后直接送至空分界区低压氮气管网, 供给全厂低压氮气用户。

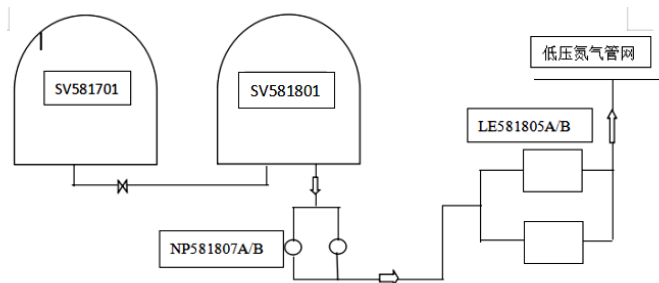


图1 低压氮气系统改造流程图

表1 低压氮气系统改造主要设备及材料表

序号	设备或材料名称及规格	单位	数量	备注
1	低压液氮泵	台	2	
2	低压气化器	台	2	
3	调节阀	台	2	
4	涡街流量计	台	1	
5	热电阻	台	2	
6	压力变送器	台	3	
7	压力表	台	2	

空分装置原始设计配有两台膨胀机（一台国产，一台进口），正常运行时膨胀机处于一开一备。因膨胀机膨胀端进口阀门选用手动蝶阀，前后压差为 3.2MPa ，无法实现在线切换；每次切换膨胀机时必须后线减负荷，严重影响装置安全稳定运行及甲醇产量。改进方法：在两台膨胀机加温气阀前管线处增加 DN25 的跨线，在切换膨胀机前可以在线充压，使得蝶阀前后压力一样，实现在线切换。

空分装置共 4 台低温液体氧泵，氧泵密封气供应来自仪表气系统，正常情况下仪表气由分子筛后去除掉水和 CO_2 的洁净气体经增压机增压后供应。在 2 套机组同时停车情况下，密封气则由仪表空压机供应，仪表空压机送风不能去除 CO_2 ，露点也不能完全达到要求，而低温液氧泵在停泵后不能迅速排掉液体进行加温，泵密封处温度最低能达到 -100°C 左右，在这种

情况下密封气中的水分和 CO_2 将会析出，冻结氧泵密封环及轴承，影响再次送氧的时间及甲醇产量约 800t/次。改进方法：引事故氮气管道 0.5MPa 氮气并入氧泵密封气供应管道，加装三通及手动阀门，在增压机停止供应密封气情况下切换至事故氮气供应密封气，可以大大减少再次送氧的时间。

3.3 改造后的经济性分析

对汽轮机增加自制导电碳刷，节约了购买碳刷的费用约 20 万，并实现了安全、稳定生产，空分机组的单次启动、停机及维修成本约为 200 万，技改后可节省约 220 万人民币。

增加液氮后备系统后，能降低开停车所需时间（约 20h）及费用，空分装置每小时耗蒸汽 120t，按 120 元/t 价格计算，每小时消耗蒸汽费用为 14400 元；空分装置每小时耗电 800kW，按 0.46 元/(kW·h) 价格计算，每小时耗电费用为 368 元；每小时耗循环水量为 11000t，按 0.2 元/t 价格计算，每小时消耗循环水费用为 2200 元。空分装置开车每小时费用为 16968 元，20h 共计节约 33.9 万元。同时避免当事故情况下，两套空分装置停车，主装置无置换用氮气，合成塔、变换炉等催化剂容易高温，且装置系统内的有毒有害气体无法及时置换的安全隐患。膨胀机切换 1 次影响甲醇产量约 400t，一年切换 4 次，按照目前甲醇价格 2200 元每吨计算，1 年约 352 万元。液氧泵密封气冻堵影响甲醇产量 800t/次，按照目前甲醇价格 2200 元每吨计算，一次节约 176 万。

4 结语

总之，在目前化工领域的整体经济条件下，有目标的设计可以减少空气分离装置的投资；利用分子筛对低温容器进行预处理，可以防止烃类物质的混入；采用液态氧进行内部压缩，既节约了装置的装置投入，又可以改善装置的安全性；同时，规整化填料上部塔和水冷塔的应用，降低了操作费用，节省了能源。各种改进措施使整个公司的产能得到了很大程度的提高，特别是在节约能源上做出了巨大的贡献，给公司创造了特别显著的经济利益，这也是现代化的化工企业达到绿色、低碳、经济、可持续发展的必然选择。

参考文献：

- [1] 廖文强. 大型内压缩流程空分装置的安全探讨[J]. 化工管理, 2018(02).
- [2] 李浩宇. 闭式循环氨水预冷系统杂质浓缩的分析与处理[J]. 当代化工, 2021(11).