

空分装置能耗特性分析与节能改造

蔡元航 张 斌

杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310000

摘要:在现代工业生产中,空分装置发挥着至关重要的作用,本文围绕空分装置展开研究。先阐述其基本原理与工艺流程,涵盖空气组成、压缩、预冷和纯化、低温分离和换热等环节。接着分析能耗特性,包括能耗组成、各环节影响因素、运行参数对能耗影响及动态特性。随后介绍节能改造技术,涉及压缩、预冷、纯化、膨胀机、塔器及整体节能改造。最后说明节能改造方案设计与实施的原则、目标、具体方案、实施步骤与注意事项,为空分装置节能降耗提供全面指导。

关键词:空分装置;能耗特性;节能改造技术;改造方案实施

引言:空分装置作为工业领域关键公辅设备,通过低温精馏法分离空气获取氮、氧、氩等产品。然而,运行周期过长后,因机组老化、设备积垢、循环水换热不均、阀门开关不畅等问题,空分装置能耗逐年升高。在国家能源紧张的大背景下,降低其能耗、实现节能减排迫在眉睫。当前,空分设备用户对装置能耗特性认识不足,节能改造缺乏系统方案。深入研究装置能耗特性,挖掘节能潜力,提出有效改造意见并制定合理方案,既能充分发挥装置能源利用效率、降低生产成本、增强企业竞争力,也有助于推动行业可持续发展。

1 空分装置基本原理与工艺流程

1.1 空气的组成与特性

空气主要由氮气、氧气及少量稀有气体、二氧化碳等组成。氮气占比约78%,化学性质稳定,常温下不易反应;氧气占比约21%,化学性质活泼,有强氧化性和助燃性;稀有气体占比小,但有独特化学性质,在特定领域有重要应用;二氧化碳占比极低,是食品保鲜气,也是工业焊接保护气,这些特性为后续分离利用奠定基础。

1.2 空分的压缩过程

空气压缩是空分流程首要环节。现代空分配套离心式空气压缩机压缩过程为连续流式多级压缩,核心是动能与压力能逐级转化^[1]。经原料空气过滤器过滤后的洁净空气先进入一级高速旋转叶轮,叶轮叶片对空气做功,带动空气同步高速运动,使其动能和流速大幅提升,压力小幅升高。随后空气流入截面积渐扩的扩压器,流速降低,动能转化为压力能,实现压力跃升,同时空气温度升高。为保障压缩效率与设备安全,一级压缩空气需经冷却器降温,再依次进入后续各级叶轮与扩压器,重复“加速-扩压-冷却”流程,逐级叠加压力。最终达到设定压力的高压空气经排气管道输出,全程由压力、温度监

控系统精准调控。

1.3 空分的预冷与纯化

空气压缩后进入空气预冷系统,气流由下而上穿过空气冷却塔,依次与常温水 and 冷冻水进行热质接触,降低空气温度,清洗空气中有害物质,从空冷塔引出后温度降至15℃左右,然后进入空气纯化系统。压缩空气自下而上通过分子筛吸附器,空气中所含的杂质相继被吸附清除,避免杂质在后续设备中积聚、堵塞。分子筛吸附器通常两台交替运行,一台工作时另一台再生,单台吸附工作周期为4-6小时,净化过程会增加空气阻力与机组能耗,但为后续精馏塔分离提供洁净原料气。

1.4 空分的制冷来源

绝热等熵膨胀是获得低温的重要途径,也是对外做功的重要热力过程。膨胀机是实现接近绝热等熵膨胀过程的有效机械,分为活塞式和透平式两大类。现代空分设备低重压、流量相对较高领域多采用透平膨胀机,通过其做功为后续低温精馏提供充足冷量,它是空分设备心脏部件之一。

1.5 空分的分离过程

精馏塔是空气分离核心设备,通过多次部分汽化与冷凝实现气体分离。精馏塔内设置多层塔板或填料,原料气自塔底进入后上升,与自上而下的回流液逆流接触,在低温下利用气液各组分沸点不同实现分离。氮气沸点低于氧气,在塔顶富集,氧气在塔底富集。一般精馏塔操作压力在0.5-0.9MPa之间,合理控制操作参数可获高纯度氮、氧产品,氮气纯度可达99.999%,氧气纯度可达99.6%。

1.6 空分的冷量传热回收

为保持整个空分装置稳定持续运行,冷箱内精馏产出的低温氧气、氮气、污氮等产品需送出冷箱,低压空气、增压空气等原料气需进入冷箱,需用板翅式换热器

实现冷量传热回收。在换热器各翅片通道内正流空气和返流气体进行热交换后,低压空气由常温冷却至约-173℃后去精馏塔,增压空气由常温冷却至膨胀机前温度进行膨胀,氧气、氮气、污氮等返流气体则由低温复热至约24℃后去用户管网使用。

2 空分装置能耗特性分析

2.1 装置能耗的组成

空分装置运行过程中,能耗主要源自多个环节。压缩能耗占据显著比例,空气压缩是提升压力以满足后续分离需求的关键步骤,此过程需消耗大量电能或者蒸汽能驱动压缩机运转,一般大型空分装置运行一天能消耗数万千瓦时或者数千吨蒸汽。预冷与纯化系统能耗也不容忽视,预冷系统降低空气温度,需常温水泵、低温水泵、冷水机组一直在线运行;纯化系统去除空气中杂质,分子筛吸附器加温再生需投用电加热器,这两个系统能耗每天也有数百千瓦时损耗。除此之外,还有液体泵、氮压机、风机等辅助设备,同样产生能耗。

2.2 各能耗环节的影响因素

压缩环节能耗受多种因素制约。进气压力与温度影响压缩起始状态,进气压力低或温度高,压缩机需做更多功以达到目标压力,能耗随之上升。压缩比决定压缩程度,压缩比过大,压缩机内部摩擦与泄漏损失增加,效率降低,能耗增大。压缩机效率直接反映能量转换效果,效率越高,相同压缩任务下能耗越低。预冷与纯化环节,冷却水温度影响预冷效果,水温高则冷却能力减弱,预冷系统需消耗更多能耗。空气流量决定纯化效率,流量大则吸附器需填充更多分子筛,吸附剂性能直接影响纯化效率与周期,性能优异的吸附剂可降低更换频率,减少能耗。

2.3 装置运行参数对能耗的影响

空分设备工况运行参数变化会直接改变空压机、增压机、液体泵及精馏系统负荷,进而影响整体能耗。对于主流的内压缩空分流程,参数对能耗的影响更侧重于压缩系统负荷、精馏分离效率、冷量平衡这三个维度。以一套八万等级空分设备为例,当压缩系统额定空气量由100%提升至105%时,机组功率总能耗会上升约5%;当机组排压上升10kpa,能耗会上升10%以上,机组的压缩功与机组排压呈指数关系,因此压力升高造成的能耗增量远大于流量升高带来的变化;进气温度也会影响机组能耗,因为进气温度会影响空气密度,也直接改变主空压机的体积流量和功率,夏季空气温度升至35℃,空气密度下降6%,主空压机功率上升约9%,冬季空气温度降至-5℃,空气密度下降10%,空压机功率下降约8%;另外,若要提升空分装置产出氧纯度,需增加回流比,也

需间接增加空气量和压缩负荷。

2.4 装置能耗的动态特性

启动与停车过程能耗变化明显。启动时,各设备从静止到运行,需克服静摩擦与惯性,能耗瞬间增大^[2]。停车时,系统需逐步卸载,避免压力突变对设备造成损害,此过程同样伴随能量消耗。负荷变化时,能耗响应特性复杂。负荷增加,各环节设备需快速调整运行状态,能耗随之上升;负荷减小,设备调整需一定时间,能耗不会立即下降,可能存在短暂滞后。

3 空分装置节能改造技术

3.1 压缩系统节能改造技术

压缩系统作为空分装置能耗大户,节能改造潜力大。压缩机选型优化是首要环节,需依装置实际运行工况,精准匹配压缩机类型与规格,避免大马拉小车,确保其在高效区运行,降单位压缩能耗。压缩机余热回收利用是另一重要途径,压缩过程产生的大量余热若直接排放,既浪费能量又可能造成热污染,安装余热回收装置可将余热转化为蒸汽或热水,用于装置内部加热或其他工艺需求,实现能量梯级利用。变频调速技术的应用为压缩系统节能提供新思路,传统压缩机多定速运行,无法依负荷变化灵活调速。而变频调速技术可实时调节压缩机转速,使压缩量与负荷完美匹配,避免能量浪费,显著降低运行能耗。

3.2 预冷和纯化系统节能改造技术

空气预冷系统部分,常规水泵采用定频设计,通过加装变频器调节水泵转速,匹配循环水流量需求,空分低负荷时,冷却需求降低,可减小循环水量,节能率可达25%-35%;同时也可以优化污氮气或者多余常压氮气的冷量回收,优化气液接触比例,使多余氮气与循环水在水冷塔内逆向充分换热,将冷冻水进水温度降低3-5℃,减少冷水机组电耗10%-15%;空气纯化系统部分,可以将传统的13X分子筛更换为13X-APG高效分子筛,吸附容量提升20%-30%,CO₂吸附能力加强,吸附周期延长,减少再生次数,使整套空分设备工况运行更稳定;另外采用自适应分子筛切换系统,通过动态匹配空分负荷调整吸附周期,再生次数减少33%,再生电耗降低21%,气体放空损失降幅达85%;延长了分子筛寿命,也减少了更换成本,节能与稳定运行效益显著。

3.3 加装液体膨胀机的节能改造技术

近年来,内压缩空分设备高压液空节流阀并联加装液体膨胀机的案例也比较多,采用“膨胀机为主、节流阀备用”的并联架构,液体膨胀机承担70%-90%的高压液空流量。其核心节能在于将传统节流浪费的压力能转化

为电能,比如一套四万等级空分年发电超100万千瓦时;同时蒸汽能耗降低1.8吨~2吨,推动空压机降压,进一步减少蒸汽能或者电能消耗。增产方面,液体产品产量提高2%~3%,并通过DCS联动控制与气蚀抑制设计改造,保障装置的稳定运行,投资回收期2~3年,典型案例年节能效益超500万元。

3.4 冷箱内塔器的节能改造技术

早期投用的空分下塔为筛板塔经过匹配核算可以改造成填料塔,核心是通过高效填料替代传统筛板,降低塔内阻力、提升分离效率实现节能。选用低压降金属孔板波纹填料,适配下塔0.5~0.6MPa工况,搭配槽式液体分布器与气体再分布器,确保气液均匀接触。改造后,空压机排气压力可直接降低16~20kPa,机组能耗下降明显;另外空分设备增效塔流程改造精制氩技术,是针对原有“假氩塔”模式空分设备的升级方案,可低成本实现从粗氩废气排放到高纯度氩产品产出的转变。该技术核心是在现有氩增效塔基础上外接附加精制氩系统,通过优化管路系统实现模式匹配,通过新旧塔协同精馏提升氩提取率,改造成本低且冷量利用高效,实现空分设备附加值跃升。

3.5 装置整体节能改造技术

装置整体节能改造需从系统集成优化与智能控制系统应用入手。运用空分设备自动变负荷技术,针对传统装置固定负荷运行、人工调节响应慢的痛点,通过控制系统等协同改造,实现负荷随下游需求动态适配^[3]。改造内容含升级智能控制系统、配套高精度传感器与执行器、优化精馏工艺联动逻辑。改造后设备可在50%~105%负荷区间平稳切换,保障产品纯度稳定达标,大幅降人工干预成本,适配行业峰谷用气差异,实现节能降耗5%~15%,提升运行灵活性与经济效益。

4 节能改造方案设计与实施

4.1 节能改造方案的设计原则与目标

节能改造方案设计需遵循科学合理、经济可行、安全可靠原则。科学合理要求改造契合装置实际运行状况,利用现有设备基础,避免盲目改造浪费资源。经济可行强调改造投入与节能收益形成合理比例,确保装置生命周期内通过节能降耗收回成本并产生效益。安全可靠要求改造后装置运行稳定,各设备性能指标满足生产需求,杜

绝因改造引发隐患。改造目标设定应明确,以降低装置整体能耗为核心,兼顾提升运行效率与产品质量,实现绿色可持续发展。

4.2 具体节能改造方案的制定

针对不同节能环节制定改造措施组合是关键。压缩系统可更换高效压缩机、优化压缩流程;预冷与净化系统可应用高效换热设备、优化吸附剂再生工艺。改造方案可行性分析不可或缺,技术可行性要评估改造技术是否成熟,能否在现有装置顺利实施,改造后设备性能是否达标。经济可行性要核算改造投入成本,包括设备购置等费用,预测节能收益,通过成本效益分析判断方案是否具经济吸引力。

4.3 节能改造方案的实施步骤与注意事项

改造前准备工作需充分,成立专门改造小组,明确成员职责分工。对装置全面检测评估,掌握设备运行状况与问题,制定详细改造计划与应急预案。改造过程中施工管理要严格,加强现场安全监管,确保施工人员遵守安全规程,避免事故发生。严格按改造方案施工,保证质量,对关键工序重点监控,及时解决施工问题。改造后调试与验收工作细致,对改造后装置全面调试,检查设备运行参数是否达标,系统整体性能是否稳定。组织专业人员按验收标准验收,对未达标部分提整改意见,直至装置符合节能改造目标。

结束语

通过对空分装置能耗特性分析与节能改造研究,明确了各环节能耗组成、影响因素及动态特性。提出的节能改造技术,涵盖压缩、制冷等多个系统,从设备选型优化到智能控制系统应用,全方位降低能耗。设计的节能改造方案,遵循科学合理等原则,制定具体措施并规范实施步骤。合理实施节能改造可显著降低装置能耗,提升运行效率,为企业带来良好经济效益与环境效益。

参考文献

- [1]姜义涛.大型深冷空分装置提取氩气的分析[J].低温与特气,2023,41(1):9-10,50.
- [2]张伟.深冷空分工艺流程模拟及优化[J].内蒙古石油化工,2023,49(9):34-37.
- [3]王鹏.浅析十万等级空分装置开车前管道节能吹扫方法[J].当代化工研究,2023(14):101-104.