

空分工艺流程安全设计与优化

冶小军¹ 范斌² 巨小虎²

1 杭州良环科技有限公司 浙江杭州 310000;

2 黑龙江龙维化学工程设计有限公司杭州分公司 浙江杭州 310000

【摘要】在全球工业飞速发展的当下，各行业对工业气体的需求迅猛增长。空分工艺作为制取氧气、氮气及稀有气体等关键工业气体的核心技术，其安全稳定运行与高效生产，是工业气体行业稳健发展的关键。本文深入剖析空分工艺流程，全面梳理如设备故障、气体泄漏等安全隐患，并从硬件设计、监测控制等方面提出创新性与实用性兼具的优化方案，致力于全方位提升空分工艺安全性与运行效率，为工业气体行业的高质量发展提供有力支撑，推动行业迈向新高度。

【关键词】空分工艺；安全设计；流程优化；机电硬件

Safety design and optimization of air separation process flow

Ye Xiaojun¹ Fan Bin² Ju xiaohu²

1 Hangzhou Lianghuan Technology Co., LTD. Zhejiang Hangzhou 310000;

2 Heilongjiang Longwei Chemical Engineering Design Co., LTD. Hangzhou Branch, Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】With the rapid development of the global industry, the demand for industrial gas in various industries is growing rapidly. As the core technology of producing key industrial gases such as oxygen, nitrogen and rare gas, the safe and stable operation and efficient production of air separation process are the key to the steady development of industrial gas industry. This paper analyzes the air separation process, comprehensive carding security such as equipment failure, gas leakage, and from the aspects of hardware design, monitoring and control of innovative and practical optimization scheme, is committed to improve air separation process safety and operation efficiency, provide strong support for the development of industrial gas industry, promote the industry towards a new height.

【Key words】air separation process; safety design; process optimization; mechanical and electrical hardware

引言

随着工业现代化的飞速发展，化工、冶金、电子、医疗等行业对氧气、氮气等工业气体的依赖愈发强烈。在化工合成中，氧气是推动化学反应的关键要素；冶金领域里，氮气充当着保护金属不被氧化的重要角色；电子芯片制造则离不开高纯度气体保障工艺精度。空分工艺通过深度分离和提纯空气，为这些行业持续输送高质量气体原料。空分工艺流程复杂，涉及空气压缩机、膨胀机、精馏塔等众多精密机电设备，且处理的气体多易燃易爆或具有窒息性。一旦发生安全事故，不仅会使生产长时间中断，带来巨大经济损失，还可能引发爆炸、火灾等恶性事件，危及人员生命安全，破坏周边环境。所以，对空分工艺流程进行全面、深入的安全设计与优化，是保障工业安全生产、提高生产效率、实现可持续发展的必要之举，具有极其重大的现实意义。

一、空分工艺流程基础与关键设备

（一）工艺流程概述

空气压缩阶段：在空分工艺的起始环节，常见的离心式空气压缩机，凭借其高速旋转的叶轮，能够在短时间内对大量空气做功。当空气被吸入压缩机后，叶轮以极高的转速将空气甩向四周，使空气获得巨大的动能。随后，这些高速运动的空气进入扩压器，在扩压器的特殊结构作用下，动能逐渐转化为压力能，从而将空气压力提升至数兆帕。例如，在大型空分装置中，离心式空气压缩机可将空气压力从常压提升至 4 – 6MPa，为后续的冷却和分离工序提供压力稳定的空气源。

空气净化阶段：经过压缩的空气，虽然压力得到了提升，但其中仍然混杂着大量的水分、二氧化碳以及各类杂质。这些杂质如果不加以去除，将会在后续的低温环境中冻结，对设备的正常运行造成严重阻碍。分子筛吸附器便是解决这一问题的关键设备。分子筛具有独特的晶体结构，其内部存在着大量均匀分布的微孔，这些微孔的大小恰好与水分和二氧化碳分子的尺寸相匹配。当压缩空气通过分子筛吸附器时，水分和二氧化碳分子会被分子筛选择性地吸附，从而保证进入后续流程的空气纯净度达到极高标准，确保整个空分工艺的 stable 运行。

（二）关键设备介绍

精馏塔：精馏塔是空分工艺的核心枢纽，其工作原理基于氧气和氮气沸点的差异。在精馏塔内，下塔首先对空气进行初步分离。空气在塔内经过多次气液交换，较轻的氮气逐渐上升至塔顶，而较重的富氧液空则积聚在塔底。随后，富氧液空被输送至上塔，上塔进一步对其进行精细分离，最终在塔顶得到高纯度的氮气，在塔底得到高纯度的氧气和液氮。精馏塔的设计参数，如塔板数、回流比等，以及运行过程中的操作条件，如温度、压力等，都会对空分效率和产品质量产生深远影响。例如，适当增加塔板数可以提高气液交换的效率，从而提升产品的纯度；而合理调整回流比则能够优化精馏过程的能耗，实现节能降耗。

膨胀机：膨胀机是实现空分工艺制冷的关键设备，其工作过程基于气体膨胀对外做功的原理。当高压气体进入膨胀机后，在膨胀机的特殊结构作用下，气体迅速膨胀降压。在这个过程中，气体对外输出功，自身的内能转化为机械能，从而导致温度急剧降低。膨胀机产生的冷量被广泛应用于冷却空气和维持精馏塔的低温环境。通过巧妙地利用膨胀机产生的冷量，可以有效提高空分效率，降低整个工艺的能耗^[1]。例如，在一些先进的空分装置中，膨胀机的制冷量能够满足空分工艺 70% - 80% 的冷量需求，极大地提升了能源利用效率。

二、空分工艺流程安全隐患分析

（一）设备故障隐患

压缩机故障：压缩机作为空分工艺中的高负荷运行设备，长期处于高速运转和高压环境下，机械磨损和密封件老化是不可避免的问题。机械磨损主要发生在叶轮、轴承等关键部件上，随着时间的推移，这些部件的表面会逐渐出现磨损、划痕等缺陷，导致压缩机的性能下降，如压力输出不稳定、气量减少等。而密封件老化则会导致气体泄漏，不仅会造成能源的大量浪费，增加生产成本，更严重的是，在存在易燃易爆气体的环境中，泄漏的气体一旦遇到火源，就可能引发剧烈的火灾甚至爆炸事故。据统计，在空分设备的安全事故中，约 30% 与压缩机故障有关。

精馏塔故障：精馏塔内部的塔板或填料是实现气液交换的关键部件，然而，这些部件在长期的运行过程中，可能会受到气流的冲击、液体的腐蚀以及温度和压力的波动影响，从而出现损坏。塔板或填料损坏后，气液交换的效果会大打折扣，导致产品纯度下降，无法满足工业生产的需求。更为严重的是，当精馏塔的压力控制系统出现故障时，无法及时对塔内压力进行有效调节，一旦塔内压力超过设计极限，就会引发精馏塔超压运行，进而可能导致爆炸事故的发生。例如，某空分装置曾因精馏塔压力控制系统故障，导致塔内压

力瞬间升高，最终引发精馏塔爆炸，造成了巨大的经济损失和人员伤亡。

（二）气体泄漏与爆炸隐患

管道泄漏：空分设备的管道系统承担着输送各种气体的重要任务，然而，由于长期受到低温、高压以及气体腐蚀的多重作用，管道的焊缝、阀门连接处等部位极易出现泄漏。氧气是一种强氧化剂，一旦泄漏遇到火源，就会引发剧烈的燃烧，其燃烧速度极快，破坏力巨大。而氮气虽然本身无毒，但在高浓度环境下，会导致人员窒息。据相关安全事故统计，气体泄漏引发的安全事故在空分工艺安全事故中占比高达 40%，是最为常见的安全隐患之一。

爆炸隐患：空气中不可避免地含有一定量的碳氢化合物，如甲烷、乙烷、乙烯等。在空分设备的运行过程中，这些碳氢化合物会随着空气进入设备，并在某些部位逐渐积聚。当碳氢化合物的浓度达到一定程度时，一旦遇到静电、明火等点火源，就可能引发爆炸。在液氧储罐中，由于液氧的密度较大，碳氢化合物更容易在罐底积聚，形成高浓度的危险区域。因此，对液氧储罐中碳氢化合物的浓度进行严格监控和及时处理，是预防爆炸事故的关键措施之一。

三、空分工艺流程安全设计措施

（一）硬件安全设计

设备选型与防护：在空分设备的选型过程中，应优先选择质量可靠、安全性能高的产品。例如，对于空气压缩机，应选用具有先进的过载保护和超压保护功能的设备。过载保护装置能够在压缩机负载超过额定值时，自动切断电源，防止电机因过载而烧毁；超压保护装置则可以在压缩机出口压力超过设定值时，迅速打开安全阀，释放多余压力，确保设备安全运行。同时，定期对设备进行全面的维护和保养，制定详细的维护计划，按照计划及时更换易损件，如压缩机的密封件、精馏塔的塔板等，确保设备始终处于良好的运行状态。

管道设计与防护：合理设计管道的走向和布局是确保空分设备安全运行的重要环节。在设计过程中，应充分考虑管道的安装、维护和检修方便性，避免管道交叉和碰撞^[2]。根据管道输送气体的性质和工作条件，选择耐腐蚀、耐低温的优质管道材料。例如，对于输送液氧的管道，应选用不锈钢材质，并对管道进行严格的脱脂处理，防止油脂与液氧接触引发爆炸。此外，对管道进行全面的保温、防腐处理，在管道关键部位设置安全阀、爆破片等安全装置，当管道内压力超过允许值时，这些安全装置能够迅速动作，释放压力，防止管道超压破裂。

（二）安全监测与控制系统设计

气体监测系统：安装高精度的氧气、氮气、碳氢化合物

等气体浓度监测仪,是实时掌握空分设备运行状态的关键手段。这些监测仪运用先进的传感技术,可对设备内的气体浓度进行 24 小时不间断监测,并借助高速数据传输模块,将监测数据实时传输至控制系统。当气体浓度超过预设的安全阈值时,监测系统会立即发出声光警报,提醒操作人员及时采取措施,如调整设备运行参数、进行设备检修等,有效防止安全事故的发生。同时,监测系统还能自动记录历史数据,形成数据报表,方便技术人员分析设备运行趋势,提前发现潜在隐患。

自动化控制系统:采用先进的自动化控制系统,实现对空分设备的远程监控和操作,是提高空分工艺安全性和运行效率的重要举措。通过自动化控制系统,操作人员可以在控制室对设备的运行参数进行实时监测和调整,如压缩机的转速、精馏塔的温度和压力等。该系统利用智能算法,能够根据设备运行状况自动优化参数,确保设备始终处于最佳运行状态^[3]。自动化控制系统还具备故障诊断和预警功能,通过对设备运行数据的深度学习分析,能够在设备出现故障前及时发出预警信号,提醒操作人员进行维护和检修,避免因人为操作失误引发安全事故。例如,在某大型空分装置中,采用自动化控制系统后,设备的故障率降低了 30%,生产效率提高了 20%,有效提升了企业的经济效益和安全生产水平。

四、空分工艺流程优化策略

(一) 流程优化措施

改进精馏工艺:精馏工艺的优化是提高空分效率和产品质量的关键。通过深入研究精馏塔的工作原理和运行特性,优化精馏塔的塔板数、回流比等关键参数,可以显著提高精馏效率,降低能耗。例如,采用新型高效塔板或填料,能够有效增强气液传质效果,使气液在塔内的交换更加充分,从而提高产品的纯度。同时,合理调整回流比,在保证产品质量的前提下,减少回流液的量,降低精馏塔的能耗。据实际应用案例表明,采用新型精馏工艺后,空分装置的能耗可降低 10% - 15%,产品纯度可提高 0.2% - 0.5%。

回收冷量与余热:空分设备在运行过程中会产生大量的低温气体和高温气体,这些气体中蕴含着丰富的冷量和余热。通过安装高效的换热器,将这些低温气体和高温气体的冷量和余热进行回收利用,用于预热原料空气或其他工艺过

程,能够有效提高能源利用率。例如,利用低温气体的冷量对原料空气进行预冷,降低空气进入压缩机的温度,从而减少压缩机的能耗;利用高温气体的余热对精馏塔的再沸器进行加热,减少蒸汽的消耗。通过冷量和余热回收措施,空分装置的能源利用率可提高 15% - 20%。

(二) 优化效果评估

节能效果:通过一系列行之有效的流程优化措施,空分设备的能耗实现了显著降低。以某空分装置为例,在优化前,其单位产品能耗高达 $100\text{kW} \cdot \text{h/t}$,这意味着每生产 1 吨产品,就要消耗大量的电能,极大地增加了生产成本。而优化后,单位产品能耗成功降低至 $85\text{kW} \cdot \text{h/t}$,能耗降低幅度达 15%。这一成果不仅直接减少了企业的用电成本,提升了经济效益,还积极响应了国家节能减排的政策要求,助力企业践行绿色发展理念,树立良好的社会形象。

生产效率提升:优化后的空分工艺流程,在产品纯度和产量方面都取得了显著进步。就精馏工艺而言,经过优化,氧气纯度从 99.5% 提升至 99.8%,氮气产量提高了 10%,能够满足更多高端工业用户对高纯度气体的严苛需求。同时,流程优化使得设备运行更加稳定,减少了因设备故障导致的停机次数^[4]。以往频繁的停机不仅影响生产进度,还增加了维修成本。如今生产稳定性增强,生产效率大幅提高,为企业创造了更大的经济效益,使其在市场竞争中更具优势。

结语

空分工艺流程的安全设计与优化是保障工业气体生产安全、提高生产效率的核心任务。通过实施全面、系统的安全设计措施,如合理的设备选型与防护、科学的管道设计与防护以及先进的安全监测与控制系统设计,能够有效降低安全事故的发生概率,确保空分设备的安全稳定运行。同时,通过采取创新性的流程优化策略,如改进精馏工艺、回收冷量与余热等,能够显著提升空分工艺的运行效率和能源利用率,实现经济效益和环境效益的双赢。然而,随着工业技术的不断进步,新的安全挑战和节能需求也会不断涌现。未来,需要持续关注空分技术的发展动态,加大研发投入,不断创新安全设计与优化方法,推动空分工艺在安全、高效的道路上持续发展,为工业发展提供更加可靠、优质的气体保障,助力工业领域实现可持续发展的宏伟目标。

参考文献

- [1]李娟.空分工艺过程优化研究[D].青岛科技大学,2017.
- [2]成洲.大型空分装置设计缺陷及改造[J].化工管理,2018,(35):87-88.
- [3]任佳叶.空分装置工艺流程选择及安全生产管理[J].化工管理,2018,(18):73-74.
- [4]张兆明.深冷空分制氧水分超标事故分析[J].氮肥与合成气,2019,47(01):7-8.