

# 高原环境下低温制氧装置的适应性改造与性能研究

顾 伟

杭州杭氧低温液化设备有限公司 浙江 杭州 311305

**摘 要:** 高原环境低气压、低气温且多强紫外线、风沙,对低温制氧装置运行影响大。本文开展适应性改造与性能研究,针对低气压、低气温等分别对压缩机、换热器、精馏塔、控制系统进行改造。搭建模拟高原环境实验平台,通过模拟测试与数值模拟验证,结果表明改造后装置在不同海拔模拟环境下均稳定运行,氧气产量、纯度达标,单位制氧能耗降低,证明改造方案合理有效,能满足高原地区用氧需求。

**关键词:** 高原环境;低温制氧装置;适应性改造;性能研究

**引言:** 高原地区独特的低气压、低气温、强紫外线、昼夜温差大等环境特点,给低温制氧装置的稳定运行与性能发挥带来诸多挑战。低气压使装置进气量不足、气液平衡紊乱;低气温影响部件性能与系统稳定性;强紫外线等加速设备老化。为使低温制氧装置适应高原环境,保障高原地区用氧需求,开展适应性改造与性能研究十分必要,本文将围绕此展开深入探讨。

## 1 高原环境特点及对低温制氧装置的影响分析

### 1.1 高原环境主要特点

高原环境最核心的特点是低气压、低气温,且伴随强紫外线、昼夜温差大、多风沙等特殊条件,其环境参数与平原地区差异显著。通常海拔每升高1000m,大气压力下降约10kPa,海拔4000m以上地区气压仅为平原的60%左右,空气密度大幅降低。气温方面,高原年均气温低于5℃,冬季极端低温可达-40℃,昼夜温差常超过20℃,远超平原地区波动范围。同时,高原空气稀薄且干燥,相对湿度普遍低于40%,紫外线强度是平原的3-5倍,易造成材料老化<sup>[1]</sup>。另外,部分高原区域存在强风沙、冰雹等天气,加上气压随海拔升高持续降低,氧气分压同步下降,这些综合因素共同构成了高原环境的特殊性,也对低温制氧装置的稳定运行、性能发挥提出了严苛要求,需全面分析各因素的具体影响。

### 1.2 低气压对低温制氧装置的影响

低气压是高原环境影响低温制氧装置的核心因素,主要作用于装置的进气系统、压缩环节及精馏过程。低气压导致空气密度减小,装置进气量不足,使得压缩机实际吸气量低于设计值,进而降低单位时间内的氧气产量。同时,低气压下空气的饱和蒸气压下降,水分和杂质更易在进气管道内凝结,堵塞过滤器和管路,增加设备运行阻力。在精馏环节,低气压会导致精馏塔内气液平衡状态被打破,塔内压力难以维持设计值,造成氧气纯度

波动,甚至出现液泛、漏液等故障。此外,低气压还会降低换热器的传热效率,因为空气密度减小导致对流换热系数下降,使得装置的制冷负荷增加,能耗上升,严重时会导致装置无法达到额定制氧能力,影响设备的长期稳定运行。

### 1.3 低气温对低温制氧装置的影响

低气温对低温制氧装置的影响贯穿整个运行流程,重点危害设备部件的性能和系统的稳定性。首先,低气温会导致装置内润滑油黏度增大,流动性变差,压缩机、泵体等运动部件的摩擦阻力增加,易出现卡涩、磨损等问题,降低部件使用寿命,甚至引发机械故障。其次,低气温会使管路、阀门等部件材质脆性增加,尤其是碳钢和普通合金钢部件,在低温环境下易发生冷脆断裂,导致制冷剂、氧气泄漏,存在安全隐患。此外,低气温会影响制冷系统的冷凝效果,使得冷凝器出口制冷剂温度过低,影响节流装置的正常工作,导致装置制冷量不稳定,进而影响精馏分离效果,造成氧气产量和纯度下降,无法满足高原地区的用氧需求。

### 1.4 强紫外线和其他环境因素对低温制氧装置的影响

强紫外线和高原地区的风沙、干燥等其他环境因素,虽不直接影响低温制氧装置的核心制氧流程,但会加速设备老化、增加维护成本,间接影响装置的长期稳定运行。强紫外线会破坏装置外壳、管路保温层及密封件的材质,导致保温层老化脱落、密封件硬化失效,不仅降低设备的保温效果,增加冷损,还可能致制冷剂或氧气泄漏。风沙天气会使大量沙尘进入进气系统,堵塞空气过滤器,降低进气效率,同时沙尘会附着在换热器表面,形成污垢层,大幅降低传热效率,增加设备能耗。高原空气干燥会导致电气控制系统的电子元件易产生静电,引发接触不良、短路等故障,同时干燥环境会加速金属部件的腐蚀,尤其是氧气接触的部件,腐蚀后可能

影响氧气纯度，进一步缩短设备的使用寿命。

## 2 高原环境下低温制氧装置适应性改造方案设计

### 2.1 压缩机改造

针对高原低气压、低气温导致压缩机进气不足、运行阻力大的问题，采用针对性改造方案提升压缩机的高原适应性。优化压缩机进气结构，扩大进气口尺寸，配备高效增压装置，补偿低气压下空气密度不足的问题，确保压缩机实际吸气量达到设计标准，保障氧气产量稳定<sup>[2]</sup>。更换适配高原低温环境的专用润滑油，选用低温流动性好、黏度适中的合成润滑油，降低低气温下润滑油黏度增大带来的摩擦阻力，避免运动部件卡涩、磨损。同时对压缩机气缸、活塞等部件进行耐低温处理，采用耐冷脆材质进行改造或涂层防护，防止低温下部件断裂。增加压缩机排气冷却装置，优化排气压力调节系统，使压缩机排气压力适应高原低气压环境，减少排气温度过高带来的能耗损失，确保压缩机在高原环境下长期稳定、高效运行。

### 2.2 换热器改造

换热器作为低温制氧装置的核心传热部件，针对高原低气压、低气温及风沙导致的传热效率下降、冷损增加等问题，进行全方位适应性改造。首先，优化换热器结构设计，采用高效紧凑型换热器，增加换热面积，提高对流换热系数，补偿低气压下空气密度减小带来的传热损失，降低装置冷损。其次，对换热器表面进行防垢、防腐处理，采用耐腐蚀、抗磨损的涂层，减少风沙粉尘附着和高原干燥环境下的腐蚀，延长换热器使用寿命，维持传热效率稳定。同时，加强换热器的保温防护，更换耐高温、抗紫外线的高效保温材料，增厚保温层，减少低温环境下的热量交换，避免管路结霜、结冰。另外，在换热器进气端增设预处理装置，过滤沙尘杂质，防止管路堵塞，确保换热器内介质顺畅流动，进一步提升换热器的高原适应能力。

### 2.3 精馏塔改造

精馏塔作为低温制氧装置中实现氧气和氮气分离的核心部件，其运行稳定性直接关系到制氧质量。在高原地区，低气压环境会严重干扰塔内气液平衡，导致氧气纯度出现明显波动。为有效解决这一问题，需对精馏塔开展针对性改造以提升精馏效果。在内部结构方面，优化塔板布局，科学调整塔板间距与数量，增大气液接触面积，强化气液传质过程，使塔内即便处于低气压环境，也能维持稳定的气液平衡，进而提升氧气分离纯度。针对塔身，进行耐低温、耐压力波动改造，选用高强度耐冷脆材质，增强塔身密封性能，杜绝低气压下漏液、漏

气现象，保障塔内压力稳定。回流系统上，增设回流液增压装置，合理调整回流比，弥补低气压造成的回流液流量不足，提高分离效率。此外，在精馏塔底部增设液位稳定装置，有效避免低气压、低温环境下液位大幅波动引发的液泛等故障，确保精馏塔能够持续稳定运行，为制氧提供可靠保障。

### 2.4 控制系统改造

结合高原环境参数波动大、电气元件易失效的特点，对低温制氧装置的控制系统进行升级改造，提升系统的自动化控制水平和稳定性。首先更换适配高原低温、强紫外线环境的电气元件，选用耐低温、抗静电、抗紫外线的专用控制器、传感器，防止低温下元件失灵、静电引发的故障，确保控制系统正常工作。其次优化控制算法，增加气压、气温、氧气纯度等关键参数的实时监测模块，实现参数的动态调节，当环境参数或装置运行参数出现波动时，系统可自动调整运行状态，保障氧气产量和纯度稳定<sup>[3]</sup>。同时增设故障预警和报警系统，对压缩机、换热器、精馏塔等关键部件的运行状态进行实时监测，及时发现故障并发出报警信号，便于工作人员及时处理。另外，优化控制系统的供电稳定性，增设备用电源，避免高原地区电压波动导致的系统停机，提升装置的连续运行能力。

## 3 改造后低温制氧装置性能测试与评估

### 3.1 实验平台搭建

为全面测试改造后低温制氧装置的高原适应性和运行性能，搭建模拟高原环境的实验平台，确保测试结果贴合实际应用场景。实验平台主要由改造后的低温制氧装置、高原环境模拟系统、参数监测系统、数据采集系统四部分组成。其中，高原环境模拟系统可精准调节实验环境的气压、气温、紫外线强度等参数，模拟海拔3000-5000m的高原环境，气压调节范围为50-101kPa，气温调节范围为-40℃至10℃，紫外线强度可模拟高原实际强度。参数监测系统配备高精度传感器，实时监测装置的进气量、排气压力、氧气产量、氧气纯度、制冷量等关键运行参数。数据采集系统采用高精度数据采集仪，实时记录各项监测参数，采样频率为1次/分钟，确保数据的准确性和完整性。实验平台搭建完成后，进行全面调试，确保各系统运行稳定，参数调节精准，为后续性能测试奠定基础。

### 3.2 测试方法与指标

结合高原环境特点和装置改造重点，制定科学合理的测试方法，明确测试指标，全面评估改造后装置的性能。测试采用模拟高原环境测试法，分别模拟海拔

3000m、4000m、5000m的环境参数,每个海拔梯度下维持环境参数稳定,让装置连续运行72小时,进行性能测试。测试指标主要包括核心性能指标和稳定性指标,核心性能指标有氧气产量、氧气纯度、单位制氧能耗,其中氧气产量需达到设计值的95%以上,氧气纯度不低于93%,单位制氧能耗较改造前降低10%以上;稳定性指标包括装置连续运行时间、参数波动范围、故障发生率,要求连续运行无故障,氧气纯度波动不超过 $\pm 0.5\%$ ,各部件运行参数波动在设计范围内。测试过程中,每12小时记录一次关键参数,测试结束后对数据进行整理分析,评估改造效果。

### 3.3 实验结果与分析

实验结果表明,改造后的低温制氧装置在不同海拔的高原模拟环境下,均能稳定运行,各项性能指标均达到设计要求,改造效果显著。在海拔3000m环境下,装置连续运行72小时无故障,氧气产量达到设计值的98%,氧气纯度稳定在93.5%~94%,单位制氧能耗较改造前降低12%;海拔4000m环境下,氧气产量为设计值的96%,氧气纯度维持在93%~93.8%,单位制氧能耗降低11%;海拔5000m环境下,氧气产量仍能达到设计值的95%,氧气纯度稳定在93%以上,单位制氧能耗降低10.5%。对比改造前,装置在低气压、低气温环境下的进气量显著提升,压缩机、换热器等部件运行稳定,无卡涩、泄漏等故障。分析可知,各项改造措施有效补偿了高原环境的不利影响,提升了装置的适应性和运行效率,满足高原地区用氧需求。

### 3.4 数值模拟验证

为进一步验证改造后低温制氧装置的性能稳定性,采用数值模拟方法,结合实验测试数据,对装置的运行过程进行模拟分析,实现实验结果与模拟结果的相互印

证。采用专业流体力学和传热学模拟软件,建立低温制氧装置的三维数值模型,涵盖压缩机、换热器、精馏塔等核心部件,模拟参数与实验平台的高原环境参数保持一致,分别模拟不同海拔下装置的流场、温度场、压力场分布<sup>[4]</sup>。模拟结果显示,改造后装置内空气流动顺畅,换热器内温度分布均匀,传热效率与实验测试值偏差不超过3%;精馏塔内气液平衡稳定,氧气分离过程与实验结果吻合度较高,氧气纯度模拟值与实验值偏差不超过0.3%;压缩机排气压力、进气量等参数的模拟结果与实验数据基本一致,偏差控制在2%以内。数值模拟进一步验证了改造方案的合理性和有效性,证明改造后的装置在高原环境下可长期稳定运行,各项性能指标满足设计要求。

### 结束语

通过对高原环境下低温制氧装置适应性改造与性能研究,成功解决了高原环境对装置运行的不利影响。改造后的装置在模拟高原环境下性能显著提升,氧气产量和纯度达标,能耗降低,且运行稳定。数值模拟进一步验证了改造方案的有效性。本研究为高原地区低温制氧装置的设计与应用提供了参考,有助于保障高原地区用氧安全,推动相关领域技术发展,未来可进一步优化改造方案,提升装置性能。

### 参考文献

- [1]赵智军,朱浩,张红.环境温度对分子筛制氧机制氧性能的影响研究[J].化工设计通讯,2023,49(1):85-87.
- [2]王博,刘晓峰,刘文佳,等.高海拔自适应制氧装置设计及性能验证[J].医疗卫生装备,2025,46(4):29-34.
- [3]罗树蓉,陈伟,徐利民,等.制氧装置模块化与智能装备制造工艺研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(10):142-144.
- [4]刘福明,姜超,罗建伟,等.深冷法制氧装置优化运行研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(12):126-127,130.