

大型深冷空分装置制造安装调试全过程质量管控体系研究

寿泽涛¹ 朱焱龚¹ 徐鹏翀²

1. 杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310014

2. 杭州杭氧技术服务有限公司 浙江 杭州 310014

摘要：大型深冷空分装置是冶金、化工、能源等行业的核心装备，具有工艺链条长、设备集成度高、工况条件严苛、质量精度要求高等特点，其制造、安装、调试全流程质量直接决定装置投运后的安全性、稳定性与经济性。装置长期处于高压、超低温环境运行，任一环节质量管控缺失，都可能引发设备泄漏、冻堵、振动超标、纯度不达标等问题，甚至导致非计划停机与安全事故。本文基于大型深冷空分装置工程实践，从设计、制造、安装、调试四大核心阶段，系统梳理各环节质量控制要点与常见问题，构建全流程、全要素、全员参与的质量管控体系，明确关键工序管控标准、责任分工与验收规范，为大型深冷空分装置高质量建设与长周期稳定运行提供技术支撑与实践参考。

关键词：大型深冷空分装置；全过程质量管控；制造精度；安装规范；调试标准

引言：随着国内工业产业升级与高纯气体需求激增，大型深冷空分装置朝着大型化、智能化、高效化、模块化方向快速发展，单套装置产能突破数十万立方米每小时，设备结构与工艺复杂度显著提升。深冷空分装置依托空气压缩、净化、低温换热、膨胀制冷、精馏分离工艺流程，产出高纯度氧、氮、氩等工业气体，核心设备涵盖离心空压机、板式翅式换热器、透平膨胀机、精馏塔、分子筛纯化器、低温液体泵等，对制造精度、安装精度、调试精度提出极高要求。

大型深冷空分装置建设周期长、参与方多、工序交叉频繁，质量管控难度极大。据行业统计，空分装置投运后故障中，60%以上源于制造或安装阶段质量缺陷，如焊接裂纹、密封泄漏、基础沉降、管道脱脂不彻底、保温层破损等，不仅造成能耗上升、产能下降、产品纯度不达标，还可能引发燃爆、低温冻伤等安全事故，给企业带来巨大经济损失。因此，突破传统分段式、碎片化质量管控模式，构建覆盖设计、制造、安装、调试的全过程质量管控体系，细化各阶段质量控制标准，强化关键工序管控与责任落实，对保障大型深冷空分装置建设质量、降低运行风险、提升经济效益具有重要工程意义与实践价值。

1 全过程质量管控体系框架构建

1.1 体系核心目标

以“零缺陷、零事故、零泄漏、长周期”为核心目标，通过全过程、全要素、全员参与的质量管控，确保大型深冷空分装置制造精度达标、安装质量可靠、调

试一次成功，投运后设备运行稳定、参数达标、安全可控，满足设计产能、纯度、能耗指标要求^[1]。

1.2 体系核心原则

全过程覆盖质量管控贯穿设计、制造、运输、安装、调试、验收全流程，无死角、无遗漏。关键节点严控聚焦焊接、脱脂、密封、基础施工、冷箱安装、系统气密、低温调试等关键工序，制定专项管控标准。全员责任落实明确设计、制造、施工、监理、调试、运维等各参与方质量责任，落实“谁主管、谁负责”。标准化规范化严格遵循GB/T 36227-2018、JB/T 8693-2015等行业标准，统一管控标准、施工工艺、验收规范。预防为主闭环强化事前预防、事中控制、事后复盘，建立质量问题整改闭环机制，杜绝同类问题重复发生^[2]。

1.3 体系组织架构

建立“业主牵头、总包统筹、监理监督、各方落实”的组织架构，成立质量管控领导小组，下设设计质量组、制造质量组、安装质量组、调试质量组、检测验收组，明确各组职责，统筹协调全流程质量管控工作，定期召开质量例会，通报质量问题，制定整改措施。

2 各阶段核心质量管控要点

2.1 设计阶段质量管控

设计阶段是质量管控的源头，直接决定装置结构合理性、工艺匹配性与运行可靠性，核心管控要点如下：

模块化与参数匹配设计：优化模块化结构设计，确保精馏塔、换热器、纯化器等子系统参数匹配，减少现场安装工作量，提升安装精度；明确各设备材质要求，

低温关键部件选用铝合金、不锈钢等低温韧性材料,避免低温脆化。

结构精度设计:严格控制塔体圆度公差 $\leq$ 公称直径0.5%、直线度公差 $\leq$ 长度0.1%;板翅式换热器翅片间距公差 $\pm 0.1\text{mm}$;法兰对接平行度偏差 $< 0.5\text{mm/m}$,从设计层面规避变形、泄漏风险^[3]。

低温密封与防振设计:优化低温密封结构,选用耐低温密封材料;开展抗振动、抗疲劳设计,关键部件设置温度、压力、振动传感器,预留在线监测接口,保障长周期运行。

图纸审核与技术交底:建立图纸多级审核制度,重点审核工艺流程、设备参数、焊接节点、密封结构、基础尺寸;施工前开展详细技术交底,明确质量标准、施工工艺、验收要求,确保各方理解一致。

2.2 制造阶段质量管控

制造阶段直接决定设备本体质量,核心管控材质、焊接、加工、组装、出厂检测五大关键环节:

材质质量管控:严格执行原材料入厂检验制度,核对材质证明、规格参数,对铝合金板材、不锈钢管材、密封件、珠光砂等关键材料进行抽样检测,杜绝不合格材料投入生产;珠光砂需出厂检验合格并提供证书,现场膨化后复检达标方可使用。

焊接质量管控:焊接是制造阶段核心工序,严格执行焊接工艺评定(PQR)与焊接作业指导书(WPS);焊工需持证上岗并通过试样焊接考核;冷箱内管道、塔器对接焊缝采用氩弧焊打底、电弧盖面,焊接环境湿度 $< 60\%$ 、设置防风屏障;焊缝100%外观检查,按比例实施X射线探伤或渗透检测,确保无裂纹、缩孔、夹渣等缺陷。

加工精度管控:塔器、换热器、膨胀机等核心部件加工严格遵循设计公差,采用精密机床加工,实时监测加工精度;板翅式换热器芯体组装严格控制翅片间距与钎焊质量,杜绝内部泄漏;转子动平衡精度严格达标,避免运行振动超标。

组装质量管控:设备组装在洁净车间进行,严格控制环境清洁度,防止杂质、油污附着;分子筛装填均匀、床层平整,避免气流偏流;密封件安装前检查完好性,按标准扭矩紧固法兰螺栓,确保密封可靠。

出厂检测管控:设备出厂前开展全面性能检测,包括水压试验、气密性试验、尺寸精度复核、转子动平衡校验、仪表校准等;关键设备(如换热器、膨胀机)进行模拟工况测试,各项指标达标后方可出厂,出具完整出厂报告^[4]。

2.3 安装阶段质量管控

安装阶段是质量管控的重中之重,工序交叉多、精度要求高,核心管控基础施工、冷箱安装、设备就位、管道安装、脱脂清洁、密封连接、保温施工七大关键工序:

基础施工质量管控:设备基础施工前复核尺寸、标高、预埋件位置,强度、抗冻、抗渗等级达标;基础表面平整度误差 $\leq 5\text{mm}$,标高偏差 $\pm 3\text{mm}$;采用无收缩灌浆料二次灌浆,确保承载均匀;基础验收合格后方可设备就位。

冷箱安装质量管控:冷箱是低温系统核心,安装时严格控制中心线与垂直度,每层箱体顶面标高、对角线差、接头错位符合规范;外部面板采用密封焊,焊接完成后整体气密性试验,确保无泄漏;冷箱封闭前全面检查法兰、穿墙套管,杜绝泄漏隐患。

设备就位与对中管控:以冷箱中心线为基准,采用激光对中仪定位;主精馏塔垂直偏差 $< 1/1000$ 且 $\leq 10\text{mm}$;空压机、膨胀机等旋转设备找平对中,联轴器对中偏差 $\leq 0.05\text{mm}$,避免运行振动超标。

管道安装质量管控:管道安装遵循“先大后小、先主后支、先长后短”原则;冷箱内管道采用氩弧焊,焊后无损检测;氧气、氮气管道彻底脱脂,用四氯乙烯清洗,油脂含量 $\leq 125\text{mg/m}^3$,防止燃爆隐患;管道坡度、支架间距符合设计,避免应力集中。

脱脂与清洁管控:低温管道、阀门、设备内部脱脂是核心环节,脱脂后用洁净氮气吹扫,残留水分露点 $\leq -70^\circ\text{C}$;纯化系统、精馏塔内部彻底清理,无油污、杂质、粉尘,防止低温冻堵与吸附剂污染。

密封连接管控:低温密封件选用耐低温材质,安装前检查完好性;法兰螺栓对称均匀紧固,控制扭矩;冷箱内密封连接完成后分段气密试验,工作压力下保压24小时,压力降 $\leq 0.5\%$ 为合格。

保温施工管控:冷箱内填充珠光砂,填充密实、无空隙,厚度误差 $\pm 5\text{mm}$;保冷层施工在气密试验合格后进行,外层密封防水,防止湿气侵入导致珠光砂受潮、保冷失效^[5]。

2.4 调试阶段质量管控

调试阶段是检验全流程质量的最终环节,分为单机调试、系统联动调试、负荷调试、性能考核四阶段,核心管控如下:

单机调试管控:空压机、膨胀机、水泵、阀门等单机空载、负载调试,校验运行参数、振动、温度、噪声;旋转设备试运转时间 ≥ 4 小时,各项指标达标;仪表、DCS系统单点校准,信号传输准确。

系统联动调试管控:打通压缩、净化、换热、制

冷、精馏全流程,模拟实际工况调试DCS控制逻辑与安全连锁;测试紧急停车、超压泄放、低温报警等功能,确保异常工况自动响应;公用工程(循环水、仪表气)参数达标,供应稳定。

低温与负荷调试管控:预冷阶段降温速率 $\leq 15^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、中冷 $\leq 8^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、深冷 $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{h}$,控制热应力,避免设备变形开裂;升压缓慢进行,严禁憋压;按30%→50%→80%→100%负荷梯度提升,每级稳定运行 ≥ 24 小时,监测压力、温度、纯度、能耗等参数。

精馏工况优化管控:稳定进塔空气流量、温度,波动 $\leq \pm 2\%$;调整回流比至设计区间(氧回流比2.5-3.5);优化膨胀机转速、制冷量,平衡冷量;确保氧气纯度 $\geq 99.6\%$ 、氮气纯度 $\geq 99.99\%$,产品指标达标。

气密性与安全管控:调试全过程严格执行气密试验,系统无泄漏;低温操作佩戴防护用具,严禁皮肤接触低温介质;冷箱保持微正压,防止湿空气进入结冰堵塞通道^[6]。

性能考核与验收:满负荷稳定运行72小时后开展性能考核,产能、纯度、能耗、振动等指标达标;整理全流程质量记录、检测报告、调试数据,形成完整验收。

3 质量问题防控与闭环管理

3.1 常见质量问题及防控措施

焊接裂纹/泄漏:防控—严格焊接工艺、控制焊接环境、加强无损检测;处理—裂纹打磨清除后补焊,泄漏处重新密封紧固。

管道脱脂不彻底:防控—规范脱脂流程、抽样检测清洁度;处理—重新脱脂、氮气吹扫,直至达标。

冷箱泄漏/保冷失效:防控—冷箱焊接密封、气密试验合格、珠光砂填充密实;处理—补焊泄漏点、重新填充珠光砂、修复保冷层。

设备振动超标:防控—制造阶段动平衡达标、安装阶段精准对中、基础加固;处理—重新动平衡、校正对中、紧固地脚螺栓。

低温冻堵:防控—净化系统达标、水分/二氧化碳含量严控、升降温速率合理;处理—加温吹除、清除冰堵、修复净化系统。

产品纯度不达标:防控—精馏塔安装精度达标、回流比合理、冷量平衡;处理—调整回流比、优化膨胀机工况、清理塔内杂质。

3.2 质量闭环管理机制

项目全程推行闭环化质量管理模式,依照发现问题、成因研判、方案制定、落地整改、复核验收、复盘优化的完整流程开展管控工作。在装置设计、设备制

造、现场安装与系统调试各个阶段,配置专职质量检验人员开展常态化巡检排查,将各类质量隐患与缺陷统一登记造册,形成标准化问题台账。针对影响整体施工进度与设备运行安全的重大质量问题,及时召集技术管理人员开展专项研讨,深度剖析问题产生的根本诱因,结合现场工况制定科学可行的整改方案。同时细化任务划分,敲定具体负责人员与整改时限,全程跟进施工整改进度,保障各项处置工作落实落地。整改作业结束后,联合监理单位、建设方共同开展质量核验,检验结果达到规范标准,才可推进后续施工工序。项目阶段性完工以及整体工程竣工后,定期组织质量复盘工作,梳理管控过程中暴露的短板与经验优势,结合实际施工情况优化完善管控细则,从制度与工艺层面规避同类质量问题再次出现。

结束语

大型深冷空分装置制造安装调试全过程质量管控是一项系统工程,贯穿设计、制造、安装、调试全流程,涉及多专业、多工序、多参与方,任何环节管控缺失都可能引发严重后果。构建以源头设计为基础、制造精度为保障、安装规范为核心、调试标准为关键、闭环管理为支撑的全过程质量管控体系,明确各阶段核心管控要点、质量标准与防控措施,落实全员质量责任,强化关键工序管控与质量闭环管理,可有效防范质量缺陷,降低运行风险,保障大型深冷空分装置高质量建设与长周期稳定运行。随着智能化技术发展,未来可融合大数据、物联网、人工智能技术,搭建智能化质量管控平台,实现关键工序实时监测、质量数据自动分析、质量问题智能预警,推动大型深冷空分装置质量管控向智能化、精细化、高效化方向发展,进一步提升装置建设质量与运行效益。

参考文献

- [1] 王怀义. 大型空分设备操作与维护[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [2] GB/T 36227-2018, 特大型空气分离设备[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [3] JB/T 8693-2015, 大中型空气分离设备[S]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [4] 李刚. 深冷空分装置换热器冻堵故障分析与处理[J]. 化工设备与管道,2022,59(4):78-82.
- [5] 张健. 空分装置冷箱安装质量控制要点[J]. 深冷技术,2023(2):52-55.
- [6] 刘军. 大型空分设备焊接质量管控措施[J]. 压缩机技术,2021(3):60-63.