

Research on equipment installation process optimization and quality control in low temperature cold box

Jingfan Zhang Ruihong Du

Zhejiang Industrial Equipment Installation Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310001, China

Abstract

as the key core unit of air separation unit, natural gas liquefaction and low-temperature storage and transportation system, the installation quality of its internal equipment is directly related to the safety, stability and economy of system operation. Limited by the characteristics of the cold box, such as narrow internal space, complex structure, high equipment integration and closed construction environment, the traditional equipment installation process has gradually exposed its shortcomings in construction efficiency, installation accuracy and quality controllability. In this paper, the internal equipment installation of low-temperature cold box is taken as the research object, and on the basis of systematically combing the structural characteristics and installation technical difficulties of cold box, the problems existing in the current installation process are deeply analyzed. From the aspects of construction organization, process path, key node control and collaborative management, targeted process optimization strategies are proposed, and the installation process is systematically reconstructed. The proposed process optimization and quality control method can effectively improve the overall quality level and project implementation efficiency of low-temperature cold box equipment installation, and has strong practical significance for similar low-temperature equipment installation projects.

Keywords

low temperature cold box; Equipment installation; Process optimization

低温冷箱内设备安装工艺优化与质量控制研究

张静帆 杜瑞红

浙江省工业设备安装集团有限公司, 中国·浙江 杭州 310001

摘 要

低温冷箱作为空分装置、天然气液化及低温储运系统中的关键核心单元,其内部设备安装质量直接关系到系统运行的安全性、稳定性与经济性。受限于冷箱内部空间狭小、结构复杂、设备集成度高以及施工环境封闭等特点,传统设备安装工艺在施工效率、安装精度及质量可控性方面逐渐暴露出不足。本文以低温冷箱内部设备安装为研究对象,在系统梳理冷箱结构特征与安装技术难点的基础上,深入分析现行安装工艺存在的问题,从施工组织、工艺路径、关键节点控制及协同管理等方面提出针对性的工艺优化策略,并对安装流程进行系统重构。研究所提出的工艺优化与质量控制方法能够有效提升低温冷箱设备安装的整体质量水平与工程实施效率,对类似低温装备安装工程具有较强的实践指导意义。

关键词

低温冷箱; 设备安装; 工艺优化

1 引言

随着能源结构调整和高端装备制造水平的不断提升,低温工程装备在空分制氧、天然气液化、石化深冷分离等领域得到广泛应用。低温冷箱作为承载换热器、塔器、管束及内部结构件的综合性装备,其制造与安装质量直接决定整套装置的运行性能与使用寿命。相比常规设备安装工程,低温冷箱内部设备安装具有空间封闭、作业窗口有限、交叉作业频繁以及安装精度要求极高等显著特点,对施工工艺与质量管理提出了更高要求。

【作者简介】张静帆(1988-),女,本科,工程师,从事机电安装技术质量研究。

2 冷箱内部设备安装工艺特性与关键技术需求

2.1 低温冷箱内部设备安装的工艺特性分析

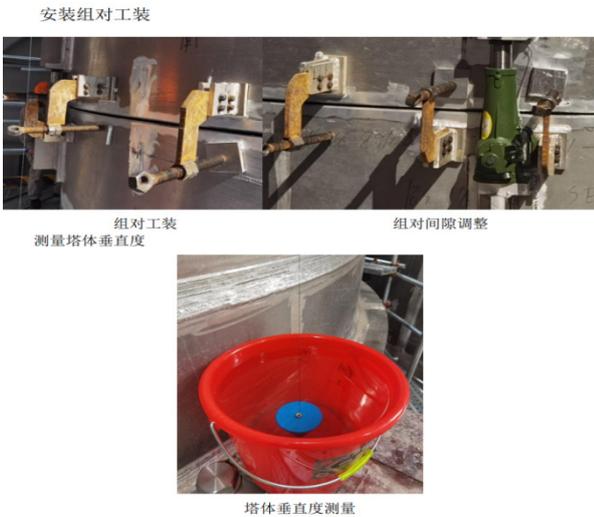
低温冷箱内部设备安装具有典型的高集成度与强约束性工艺特征。冷箱内部通常集中布置精馏塔、换热器、支撑结构及大量低温管路,各设备之间空间间距有限,安装顺序和相对位置高度依赖整体结构设计^[1]。一旦前序设备定位精度偏差控制不足,极易在后续安装过程中产生误差叠加,增加返工风险并影响整体装配质量。与常规设备安装相比,冷箱内部安装更强调系统协同而非单体精度控制。

从施工环境看,冷箱内部属于封闭或半封闭空间,作业通道受限,吊装、翻转与姿态调整条件受结构限制明显,施工操作依赖专用工装和精细化操作流程。安装过程中多工

种交叉作业频繁，工序衔接紧密，任何环节失控都可能引发连锁性质量问题。此外，冷箱在封闭前完成绝大多数内部设备安装，具有明显的“不可逆”特征，要求安装阶段必须一次成优，对工艺稳定性和过程控制提出更高要求。低温设备安装质量对运行阶段高度敏感。设备轴线偏移、支撑受力不均或装配间隙控制不当，在常温条件下可能并不显现，但在低温运行后因材料收缩和应力重分布而被放大，进而影响设备安全性和系统运行效率。

2.2 冷箱设备的关键技术需求与控制重点

基于上述工艺特性，低温冷箱内部设备安装在技术层面提出了更为严格的控制需求。第一，在安装组对垂直度精度控制方面力学精确控制：采用我司自主研发的“可调式塔器设备组对工装”，通过液压千斤顶施加可控、可调的顶升力（最大425kN），精确校正设备椭圆度，实现组对间隙和错边量的毫米级微调，替代了传统的暴力敲击方式。变形主动补偿：基于焊接热收缩规律（收缩率约1.5mm/m），在组对时进行反向预偏差调整，主动补偿焊接过程中产生的变形，从而保证最终的安装精度。动态监测反馈：以0°、90°、180°、270°四向组对线为基准，采用“线坠水浴法”消除风载干扰，实现超高精度（0.1mm/m）的垂直度实时测量。并将监测数据反馈指导焊接顺序和策略的动态调整，形成闭环控制（见下图）。



第二，在结构与材料适应性方面，安装过程中需充分考虑低温工况下金属材料的收缩特性和支撑结构的受力变化，通过合理设置滑动支座、补偿间隙和柔性连接，降低温度变化对设备运行状态的影响。这要求安装工艺在执行阶段即融入低温运行逻辑，而非仅满足常温装配要求。

在施工组织与过程管理层面，冷箱设备安装对工序策划和节点控制提出了更高要求。关键工序需明确质量控制标准与验收节点，将偏差控制前移至安装过程中，通过动态调整和过程确认，减少封闭后质量缺陷暴露的可能性。同时可以强化工艺文件的标准化与可操作性，降低施工对个人经验

的依赖，提升整体工艺一致性。可见低温冷箱内部设备安装的关键技术需求集中体现在“系统性、前置性与稳定性”三个方面，只有在工艺设计与实施阶段同步强化这些要求，才能为后续工艺优化和质量控制体系构建奠定坚实基础。

3 冷箱设备施工工艺优化策略及施工流程重构

3.1 基于系统集成的冷箱设备施工工艺优化思路

针对低温冷箱内部设备安装工序复杂、空间约束强以及质量风险前移不足等问题，工艺优化应由传统的“设备逐台安装”思路转向以系统集成为核心的整体优化路径。冷箱内部各类设备在结构功能和运行状态上高度耦合，其安装质量并非单一设备精度的简单叠加，而是整体空间关系和受力体系共同作用的结果。因此，工艺优化的首要目标在于建立系统化的安装逻辑，确保各设备在安装阶段即形成稳定、合理的协同关系。

在具体实施层面，应强化安装前策划环节，通过对冷箱内部结构、设备布置及安装顺序进行系统梳理，明确关键设备、关键工序和关键控制参数，避免施工过程中频繁调整和被动修正^[2]。通过合理划分安装区段和功能模块，明确各模块之间的接口关系，使设备安装由“点状作业”转变为“模块化协同作业”，从而提升整体工艺的可控性和稳定性。同时在工艺方法选择上，应注重标准化与适应性的结合。针对设备定位、标高传递和姿态调整等关键工序，统一技术路线和操作方法，减少不同班组、不同施工阶段之间的工艺差异。在此基础上，根据冷箱结构特点和现场条件，灵活调整工装配置和施工顺序，使工艺方案既具备统一性，又具备工程适用性。通过上述优化，可有效降低安装误差的累积风险，为施工流程重构提供现实基础。

3.2 冷箱设备安装施工流程的重构与实施要点

在工艺优化思路指导下，对冷箱设备安装施工流程进行重构，是提升施工效率和质量稳定性的关键。施工流程重构应突破传统线性作业模式，围绕关键节点构建以“策划—执行—校核”为核心的闭环流程，将质量控制嵌入每一道工序之中。

在流程组织上，应突出关键设备和关键工序的先导作用，优先完成对整体结构影响最大的设备安装与初始定位，并以此作为后续设备安装的基准。通过建立统一的基准传递体系，确保标高、轴线和空间位置在不同安装阶段之间保持一致，避免因基准失准引发系统性偏差。在施工实施过程中，应强化工序衔接与过程确认机制。每一道关键工序完成后，均应进行必要的复核与确认，合格后方可进入下一阶段施工，从流程上减少质量问题向后传递的可能性。同时，通过优化交叉作业顺序，合理安排吊装、调整和固定等工序，降低作业干扰，提高施工连续性。而流程重构还应注重信息反馈和动态调整。通过对安装过程数据和现场情况的及时分析，对工艺参数和施工节奏进行适度修正，使施工流程在受

控状态下实现持续优化。实践表明,经优化和重构后的施工流程,能够在保证安全和质量的前提下,提高冷箱设备安装的整体效率和工程可控水平。

4 冷箱设备安装的质量控制体系构建与综合评价

4.1 面向低温工况的全过程质量控制体系构建

低温冷箱内部设备安装的质量控制应突破传统以结果验收为主的管理模式,构建覆盖安装前、安装中与封闭前的全过程质量控制体系。该体系以低温工况适应性为核心约束,将设备几何精度、结构稳定性与运行可靠性纳入统一控制框架,实现安装质量由“事后判定”向“过程约束”的转变。

在质量控制对象层面,应围绕换热器、精馏塔、支撑结构及内部管系等关键设备,明确控制要素和允许偏差范围。除常规的轴线偏差、标高偏差和垂直度指标外,还需关注支撑受力状态、连接间隙合理性及构件相对位移裕度,以满足低温收缩条件下的运行要求。通过将低温运行边界条件前置至安装阶段,可有效降低后期运行阶段的结构应力集中风险。为提高质量控制的系统性与可操作性,可将冷箱设备安装全过程的关键质量控制要点进行结构化梳理,如表1所示,从控制阶段、控制对象与控制重点等维度对质量管理要求进行明确界定。

表1 低温冷箱内部设备安装全过程质量控制要点

控制阶段	主要控制对象	关键质量控制要点
安装前阶段	设备本体、支撑构件、连接件	几何尺寸复核、制造偏差校验、保温材料适配性确认
就位安装阶段	换热器、精馏塔、内部框架	轴线一致性、标高传递精度、姿态稳定性控制
精度调整阶段	支撑系统、连接节点	支撑受力均衡性、安装间隙合理性、补偿预留量
固定锁定阶段	紧固件、焊接或连接结构	固定可靠性、结构稳定性、防止过约束
冷箱封闭前	隐蔽部位、整体结构	综合复核、影像记录、质量状态可追溯性

通过上述控制要点的分阶段落实,可有效避免质量管理碎片化问题,使冷箱内部设备安装始终处于受控状态。在

管理支撑层面,质量控制体系需与工艺标准和施工流程保持高度协同。通过统一质量判定口径和技术标准,减少不同施工班组之间的理解偏差,使质量控制从个体经验判断转向制度化、规范化执行,从而提升整体安装质量的一致性与稳定性。

4.2 冷箱设备安装质量的综合评价方法与应用效果

在全过程质量控制基础上,引入系统化的质量综合评价方法,有助于冷箱设备安装质量进行客观判定与持续改进。质量评价不应局限于单项指标合格性判断,而应从结构完整性、工艺一致性与运行适应性等维度进行综合分析,反映安装质量对系统运行性能的实际支撑能力。从评价指标构成看,可围绕几何精度指标、结构稳定性指标和工艺符合性指标建立多维评价体系^[1]。几何精度评价侧重设备空间定位的整体协调性,结构稳定性评价关注支撑体系和连接结构在低温条件下的受力合理性,工艺符合性评价则用于检验安装过程与既定工艺方案的一致程度。通过多指标协同分析,可有效避免单一指标合格但系统性能不足的问题。工程实践表明,将表1所列质量控制要点与综合评价机制相结合,能够显著提升冷箱设备安装质量的稳定性和可靠性,为低温装置安全、长周期运行提供坚实保障,同时也为高端低温装备安装质量管理提供了可复制的技术路径。

5 结语

低温冷箱内部设备安装是一项技术密集型和管理复杂度较高的工程活动,其质量水平直接关系到低温装置的长期安全运行。本文围绕低温冷箱设备安装工艺优化与质量控制问题,系统分析了安装工艺特性与关键技术需求,在此基础上提出了施工流程重构与质量控制体系构建的思路与方法。

参考文献

- [1] 杭氧集团.《大型空分设备技术[M]》.杭州:浙江大学出版社,2020
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部《空分制氧设备安装工程施工与质量验收规范》GB 50677-2011(S).北京:中国计划出版社,2011
- [3] 周金城,刘江淮,王胜利.空分设备冷箱中低温设备加温方法分析运用[J].低温与特气,2021,39(5):28-31.