

冷媒全流程质量风险防控与实践

王雷涛 贺炎超 张宏博

格力电器（郑州）有限公司 河南 郑州 450000

摘要：在空调智能制造规模化生产中，冷媒充注、系统真空抽取、冷媒管路切换是决定空调整机性能、可靠性与出厂质量一致性的核心工序。冷媒型号匹配、加注精度、真空洁净度与全流程管控水平，直接影响空调整机能效、换热效率、使用寿命及售后故障率。当前空调总装多采用多机型混线共线生产，传统模式依赖人工操作，易出现冷媒错加漏充、真空度不达标、工艺参数偏移等批量质量问题，同时存在产能损耗大、数据不可追溯、储罐安全管控粗放等弊端。本文以空调总装现场为研究对象，围绕冷媒储罐储运、管路供给、真空处理、智能充注、工序互锁防错、不良品拦截、成品出站全链路，从硬件升级、PLC 程序优化、扫码识别、工序互锁、物理防错、储罐智能监测六大方向实施工艺优化，建成软硬件协同、全流程闭环的冷媒质量管控与储罐安全防护体系。应用结果表明，改造可实现管路自动切换、储罐实时监测、真空数字化管控、加注智能防错、不合格品自动拦截、泄漏联锁防护；单班组机型切换提升产能 500 ~ 700 台，从根源上杜绝人为失误引发的批量质量缺陷与安全隐患，为家电行业冷媒全流程管控提供可复制参考。

关键词：空调制造；R32 冷媒；储罐安全监测；冷媒充注；全流程管控；质量风险；防错技术；精益生产

引言

当前空调行业向高效、智能化转型，R32 环保冷媒广泛应用但易燃易爆特性对生产管控提出严苛要求。多机型混线共线生产中，传统冷媒制程依赖人工操作，易出现冷媒错充、真空度不达标、储罐安全管控薄弱等问题，严重影响空调整机质量与生产安全。为此，本文构建冷媒全流程质量与安全闭环防控体系，通过硬件升级、程序优化与智能防错，实现制程自动化、管控数字化、安全本质化，为家电行业冷媒管控提供实践参考。

1 绪论

1.1 研究背景与意义

双碳背景下，R32 冷媒因低温室效应、换热效率高、环保性优良成为空调主流冷媒，但 R32 具有易燃性，高温高压易分解，泄漏后易形成可燃混合气，对储罐仓储、卸液输送、泄漏检测与全流程管控提出严苛要求。

国内空调制造普遍采用多机型柔性共线生产，需频繁切换冷媒规格与工艺参数。传统管控以人工为核心，管路切换、参数设定、质量判定、工序出站均手动完成；储罐仅靠人工定时巡检，无 24 小时在线监测、联锁报警与自动处置机制。生产质量受人员技能、状态影响大，批量生产中质量失控、安全隐患、产能损耗、管理冗余无法根本规避。传统模式缺乏数字化采集、过程溯源与异常实时拦截，质量问题多在成品检测或用户使用阶段暴露，造成资源浪费、售后成本增加、品牌口碑受损。因此，开展冷媒全流程风险排查、工艺改造与管控体系搭建，实现质

量前置预防、安全在线监测、生产智能管控、不良自动拦截、安全联锁防护，具有重要理论与实践价值。

1.2 国内外研究现状

国外制冷家电制造起步早，欧美、日韩企业已实现冷媒加注、真空工艺全密闭自动化、云端管控、少人化作业，依托工业互联网、PLC、高精度传感实现制程闭环管控；易燃冷媒储罐配套全自动监控、泄漏探测、联锁停机系统，本质安全体系成熟。但国外设备造价高，运行逻辑与国内多品种、小批量、高柔性生产模式适配性差，引进性价比低，不贴合国内工厂现状。

国内研究多聚焦加注精度、单一设备升级，局限于单点工序优化，缺少从储罐安全、管路输送、真空处理、充注、工序防错、不良回流的全链条一体化研究；多数方案仍保留大量人工环节，储罐管控依赖巡检，无数字化监控与联锁保护，无法根除人为风险，在多机型频繁换线、易燃冷媒常态化使用场景下管控效果不佳。国内头部企业结合产线基础、生产需求与安全规范，开展低成本、高适配、全覆盖的质量安全改造，填补学术与工程空白，形成适配本土工厂的标准化方案。

1.3 研究内容与研究方法

1.3.1 主要研究内容

梳理 R32 冷媒全流程生产工艺，分析传统模式安全隐患、质量缺陷与潜在风险；制定软硬件一体化优化方案，搭建自动化、数字化、闭环化质量安全管控体系；完成现场安装调试与试运行，实现全流程智能防错与安

全连锁；对比改造前后产能、人力、不良率、安全管控水平，量化评估成效，总结创新点与改进方向。

1.3.2 研究方法

现场实地调研法跟踪全作业流程，梳理风险节点；鱼骨图分析法从人、机、料、法、环、管六大维度拆解问题；自动化技术改造法融合气动、PLC、传感检测、光电识别、工业通信、扫码联动技术设计方案；数据对比分析统计产能、损耗、人力、不良率、故障频次、报警频次，验证方案价值。

2 传统冷媒生产工艺流程及现存风险问题

2.1 冷媒制程与储罐管控基础流程

R32 冷媒是空调热力循环核心介质，属易燃危化品，标准化生产流程为：槽车卸液入库→储罐密闭稳压储存→管路稳压输送→整机流水线配送→抽真空除湿→冷媒精准充注→工序核验→成品出站。前置储罐安全是制程基础，真空工序是加注合格前提，任一环节疏漏均会引发质量故障或安全事故，工艺与安全容错率极低。多机型共线生产需频繁切换冷媒型号、充注量、真空标准，风险高度集中。

2.2 传统生产模式现存核心问题

2.2.1 冷媒储罐管控缺失，消防安全隐患突出

原有储罐仅配就地仪表，无远程集中监控、数据采集与连锁保护，依靠人工定时巡检记录压力、液位、管路状态，管控漏洞显著。无法 24 小时监测压力、液位、泄漏浓度，超压、液位异常、微量泄漏难以及时发现；卸液与输送流量无数字化管控，无连锁清零与紧急切断；泄漏靠人工排查，无实时预警、声光报警与断阀保护；阀门人工手动切换，易误操作导致串压、冷媒混存，引发设备损坏与安全事故^[7]。

2.2.2 机型切换效率低，产能损耗严重

人工拆装对接冷媒管路，易接错、漏接，引发批量错加事故，且存在泄漏与操作风险；机型切换前需人工检测冷媒水分，停机等待耗时，单次切换产能损耗最高 500~700 台；参数需人工后台修改、多级核对，调试久、易漏改错改，引发批量不良^[4]。

2.2.3 抽真空人工操作，质量一致性失控

真空工序依赖人工插管、主观判定、拔管放行，无数据自动判定、工位锁定、不良回流与数据追溯，时长、压力靠经验判断，标准不统一，不合格品直接流入加注工序，埋下售后故障隐患^[3]。

2.2.4 灌注设备管控薄弱，隐性质量隐患多

设备参数人工锁定，运行、加注、故障数据无系统化存储，过程不透明，少充、漏充、多充、型号不匹配

等问题难以及时发现，仅在全检或售后暴露；无程序互锁与强制拦截，人为风险无法规避，易引发批量质量波动，浪费资源、增加售后成本、耗费人力^[1]。

2.2.5 工序独立，无全流程防错架构

储罐、真空、加注、出站管控相互独立，无数据互通与逻辑互锁。真空不合格可流入加注；储罐异常、泄漏超标无法自动断阀、停机；加注后无核验与锁定，漏充、未充整机易流出，质量与安全风险贯穿全流程^[5]。

3 冷媒全流程质量+安全风险防控优化实施方案

3.1 冷媒储罐监控系统优化与本质安全改造

数字化升级储罐监控，搭建 24 小时远程集中监控体系。实时采集压力、液位、温度、泄漏浓度，数据上传中控，超限自动声光报警、弹窗提醒；数字化管控卸液与输送流量，自动清零、全程溯源；搭建连锁逻辑，异常时报警、锁定阀门、启动保护，人工复位后方可恢复；阀门接入 PLC 自控，杜绝人工误操作；增设通讯异常监测，消除监控盲区，筑牢源头安全防线。

3.2 全流程闭环管理系统开发

开发专项数字化系统，覆盖入库审批、安全确认、储罐监控、质量检验、过程监督、异常整改、工艺迭代七大模块，实现冷媒全生命周期数字化闭环管理，打破碎片化、人工化、经验化模式，全环节可记录、可溯源、可管控、可优化^[6]。

3.3 冷媒管路自动切换硬件改造

加装专用加注机组与气动控制阀组，PLC 程序控制管路自动切换，取消人工拆装对接，消除接错、漏接与安全隐患，省去停机等待与参数调试，杜绝产能损耗，实现机型切换零人工干预、全自动运行。

3.4 抽真空数据采集与智能判定

部署真空计、真空规管、显示器与工业交换机，对接 PLC 系统，录入各机型标准参数，自动采集时长、压力、工况数据，系统智能判定合格与否，统一工艺标准，无需人工排查，解决质量参差不齐问题。

3.5 加注扫码自动匹配防错

工位扫码设备与加注机 PLC 联动，扫描整机 MES 条码，自动识别机型、冷媒型号、加注量、工艺参数，自动切换管路、修改参数，替代人工操作，从底层杜绝参数错误、型号选错、加注量偏差等质量隐患。

3.6 工位自动拔枪智能出站

优化 PLC 程序，绑定真空参数与判定逻辑，合格自动拔枪放行，不合格锁定工位、循环作业；加注合格后解锁皮带放行，减少人工工作量，实现降本与质量标准化^[2]。

3.7 真空与加注工序互锁防错

搭建强互锁逻辑,加注工位优先调取真空数据,真空不合格则报警锁定、回流返工,仅合格产品解锁加注权限,实现全流程防错闭环,规避不合格品跨工序流转。

3.8 物理硬件防漏灌出站改造

新增防漏工装,对射光电与 PLC 对接,整机到位自动锁定,仅接收加注合格信号后解锁放行,未接收则持续锁定,软件互锁+物理锁定+储罐联锁三重防护,杜绝漏充、未充整机流出。

4 标准化质量防错+安全管控落地运行流程

系统 24 小时在线监测储罐参数,超限报警;卸液流量自动归档,阀门程序管控,故障联锁断阀,人工复位恢复输送。整机扫码自动启动真空作业,数据实时采集、智能判定,合格自动出站,不合格循环处理。整机到位自动匹配参数,加注合格核验后放行,不合格原位锁定。机型切换时系统自动下发指令,气动阀自动切换管路、更新参数。系统自动调取前置数据,匹配加注参数,前置不合格或储罐异常,锁定设备禁止作业^[8]。

5 优化实施效果与创新点分析

5.1 实施应用成效

安全管控实现储罐全流程 24 小时智能监控、超限报警、联锁防护,消除易燃易爆隐患;质量管控实现全流程标准化运行,双重防错杜绝人为质量风险;生产效率取消人工耗时工序,机型切换不停机,单班切换提升产能 500~700 台;人力成本自动化缩减操作、巡检、核对工作量,精简人员;智能管理实现数据自动采集、上传、追溯、分析,支撑工艺优化与问题溯源。

5.2 方案核心创新亮点

易燃冷媒储罐智能安防,构建四位一体监控与联锁保护;气动阀全自动切换,实现零等待柔性换型;真空质量数字化管控,统一工艺标准;多设备互联智能防错,一体化智能控制;软硬件三重闭环防控,可靠性高;低改造高适配,增量优化易复制;全链条一体化防控,实现从储罐到成品全流程闭环。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文以 R32 冷媒储罐与生产全流程为对象,剖析传统模式五大核心问题,通过储罐监控升级、系统开发、硬件

改造、程序优化、扫码搭建、工序互锁、工装加装,建成适配多机型混线、易燃冷媒使用的全流程质量与安全闭环防控体系。实践证明,方案有效解决传统模式效率低、人为风险高、标准不统一、数据不可追溯、储罐管控粗放等问题,在不改动原有设备、控制成本前提下,实现产能提升、人力精简、质量零缺陷、本质安全、管理数字化多重效益,契合家电制造长远发展需求,工程实践价值突出。

6.2 研究不足与未来展望

本次改造主要针对现有量产机型及常规冷媒工艺进行优化,对新型环保冷媒、全新结构制冷产品的适配性研究不足;同时现阶段管控体系以单条产线独立运行为主,尚未实现全厂数据互联互通。

后续可从三方面持续优化:一是针对环保新型冷媒迭代升级硬件管路与控制参数,提升方案通用性;二是引入大数据与智能预警算法,实现故障预判与风险前置预警;三是将本次防错管控模式标准化、模块化,在制冷行业全品类产线推广落地,助力家电制造业整体品质升级与智能化转型。

参考文献

- [1]王健.空调制冷系统冷媒加注工艺质量管控研究[J].家电科技,2022(04):112-115.
- [2]李海涛.精益生产下家电制造工序防错技术应用[J].机械制造与自动化,2023,52(02):189-192.
- [3]张磊.空调生产线抽真空工艺优化与质量控制[J].制冷与空调,2021,21(07):78-79.
- [4]陈阳.多机型共线生产自动化防错系统设计[J].制造业自动化,2023,45(05):96-99.
- [5]刘峰.制冷设备冷媒制程质量风险分析与防控措施[J].日用电器,2022(09):65-68.
- [6]赵旭.智能制造下空调总装生产线工艺优化研究[J].机械工程师,2023(06):102-105.
- [7]孙明.易燃型冷媒储罐安全监控与联锁保护系统设计[J].化工安全与环境,2024(12):32-35.
- [8]周凯.家电工厂危化冷媒储存输送安全管控技术研究[J].现代制造工程,2023(08):145-149.