

洁净室送风管道系统气密性检测与改进研究

孙兆雷

中国电子系统工程第二建设有限公司 江苏 无锡 214028

【摘要】：洁净室送风管道气密性是维持室内洁净度、保障生产与实验精度的核心前提。当前电子、医药等领域对洁净环境要求持续提升，管道泄漏导致的能耗增加、污染风险等问题愈发突出。现有检测多依赖传统压力法，存在效率低、定位难等局限，且缺乏系统性改进方案。本文将简要分析洁净室送风管道系统气密性检测的内容，并针对洁净室送风管道系统气密性检测与改进的有效策略，以期实现洁净室送风系统可靠性的提升，助力相关行业降本增效与质量管控升级。

【关键词】：洁净室；送风管道系统；气密性；检测；改进

DOI:10.12417/2811-0528.26.03.070

引言

空调及通风管道系统及技术在当代建筑中得到了广泛的应用。在送风空调的管道系统中，局部阻力一般占总阻力损失的40%以上。洁净室送风管道系统气密性的检测与改进，对于提高能源的利用率、节能减排有着重要的作用。

1 洁净室送风管道系统概述

洁净室送风管道系统是洁净环境控制的核心载体，承担着将经过过滤、温湿度调节的洁净空气精准输送至室内各区域的关键功能，其设计与运行直接决定洁净室的洁净级别、气流稳定性及能耗水平。在电子半导体、生物医药、精密仪器制造等对微环境要求严苛的领域，该系统需同时满足低泄漏率、气流均匀性、抗污染性三大核心需求——既要通过密封结构阻断外部杂质侵入，也要借助合理的管道布局与风口设计，避免局部气流紊乱引发的洁净度波动。

2 洁净室送风管道系统气密性检测分析

2.1 检测标准与指标设定

洁净室送风管道气密性检测需遵循行业规范，如《洁净厂房设计规范》（GB50073-2013）中明确要求，不同洁净级别管道泄漏率需控制在对应阈值内——例如百级洁净室送风管道，在1000Pa静压下泄漏率应 $\leq 0.2\%$ 。检测前需根据管道用途确定核心指标，包括静压维持时间、泄漏量占总送风量比例等，同时结合管道材质与连接方式设定个性化检测参数，确保指标既符合标准又贴合实际工况。

2.2 传统压力检测法的操作要点

压力衰减法是当前应用最广的传统检测技术，具体流程分为三步：首先对管道系统进行分段封堵，关闭所有风口与阀门，利用风机将管道内压力升至设定值（通常为1000-2000Pa）；其次关闭风机并记录初始压力，静置30-60分钟后读取压力衰

减值；最后通过公式计算泄漏率，若衰减值超出允许范围，则需进一步排查泄漏点。该方法优势在于设备简单、成本低，但存在检测周期长、难以定位微小泄漏的局限，适用于对检测精度要求较低的一般洁净区域。

2.3 新型高精度检测技术应用

随着行业对洁净度要求提升，新型检测技术逐渐普及。其中，超声波泄漏检测法通过发射高频超声波信号，捕捉管道泄漏处产生的湍流噪声，搭配便携式检测仪可精准定位直径 $\geq 0.1\text{mm}$ 的微小泄漏点，检测效率较传统方法提升3-5倍，尤其适用于复杂管道布局的半导体洁净室。此外，氦质谱检漏法凭借极高灵敏度（最小可检测泄漏率达 $10^{-12}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ），成为医药无菌车间等高端场景的首选，但因设备成本高、操作复杂，暂未大规模推广。

2.4 泄漏点定位与验证流程

泄漏点定位与验证需遵循“初步筛查+精准核验”的两步执行逻辑。第一步通过压力衰减法完成管道泄漏区段的初步锁定，明确存在泄漏风险的范围；第二步聚焦精准定位，采用超声波检测仪沿管道外壁匀速扫描，重点检测法兰密封面、焊缝、阀门接口、咬口连接处及变径部位等易泄漏区域——洁净风管大多采用咬口打胶的连接方式，咬口处及变径部位的密封完整性直接影响系统气密性，需作为检测重点。当超声波检测仪出现噪声值异常突变时，即刻标记该疑似泄漏点。疑似点确定后需通过双重验证确认：一是向管道内部通入无毒烟雾，观察标记位置是否有烟雾外泄；二是用肥皂水均匀涂抹疑似区域，根据气泡产生的速率与规模，判定泄漏的具体位置及泄漏量大小。针对隐藏在夹层、吊顶等隐蔽空间的泄漏点，需搭配管道内窥镜开展深度检测，全面排查潜在隐患，确保泄漏点无遗漏。

2.5 检测结果评估与报告编制

检测完成后需从三方面评估结果：一是判断泄漏率是否符

合预设指标,若超标需分析原因;二是统计泄漏点数量与分布,评估管道系统整体密封性水平;三是结合检测过程中的异常数据,提出针对性改进建议。最终编制的检测报告需包含检测标准、设备参数、原始数据、泄漏点分布图及整改方案,确保数据可追溯、结论可落地,为后续管道密封改进提供依据。

3 洁净室送风管道系统气密性检测与改进的有效策略

3.1 开展检测技术场景化适配

根据洁净室不同运行需求与管道特性,构建分层检测体系以提升精准度与效率。对于洁净级别较低、管道布局简单的区域,采用压力衰减法作为基础检测手段,通过合理划分检测区段控制单次检测范围,优化静置观察时长,在保障基础密封性判断的同时缩短检测周期。针对高洁净要求、管道结构复杂的区域,在压力衰减法初筛基础上,需叠加超声波检测技术,聚焦管道连接节点、变径部位等易泄漏区域,通过调节检测设备灵敏度捕捉微小泄漏信号,避免单一技术检测盲区;对于疑似泄漏的管道区段,引入负压检测法进行二次核验,通过抽真空构建稳定负压环境,观察压力变化规律,进一步验证泄漏情况,形成“基础检测-精准补测-二次验证”的完整检测流程,确保不同场景下检测结果的可靠性。

3.2 强化材料工艺的针对性革新

从源头优化管道材料选择与连接工艺,强化系统气密性基础。在材料选用上,依据洁净室温湿度、腐蚀性等环境条件,挑选适配的管道基材,对特殊环境区域的管道,采用表面处理工艺提升材料抗腐蚀、抗附着性能,减少因材料老化或腐蚀导致的密封失效。在连接工艺升级方面,针对传统法兰连接易出现密封间隙的问题,更换高性能密封垫片,采用均匀受力的螺栓紧固方式,控制螺栓拧紧扭矩,确保密封面紧密贴合。对于高精度要求的管道连接部位,还要采用自动化焊接工艺,借助精准定位技术保证焊缝成型质量,减少人工操作误差带来的泄漏隐患,通过材料与工艺的协同优化,从根本上降低管道系统泄漏风险。

参考文献:

- [1] 刘华恩.利用气流模拟优化洁净室内通风系统的设计与运行[J].居舍,2025,(14):95-97.
- [2] 栾鹏.大跨度电子洁净室气流组织和污染物扩散研究[D].东华大学,2023.
- [3] 张帆.基于洁净度的生物洁净室变风量控制策略优化[D].天津大学,2022.

3.3 实施运维流程全周期规范

建立覆盖管道全生命周期的运维管理体系,延长气密性保持周期。在安装阶段,执行多级验收机制,从管道预制件的尺寸精度、表面质量检查,到现场安装过程中连接部位的平整度、阀门安装的规范性核查,再到安装完成后的整体气密性检测,每环节留存完整记录,确保安装质量可追溯。在运行阶段,制定周期性巡检计划,定期监测管道静压变化,检查易损耗密封部件的完好状态,按季度开展局部泄漏复测,及时发现密封件老化、螺栓松动等潜在问题。在维护阶段,建立备件管理机制,根据密封件使用寿命与管道配件损耗规律,提前储备常用备件,制定标准化维修流程,明确泄漏处理的操作步骤与技术要求,同时定期开展运维人员专业培训,提升其设备操作、故障判断与维修能力,保障运维操作的规范性与有效性。

3.4 智能监测系统一体化构建路径

引入物联网与数据分析技术,打造智能监测体系实现气密性动态管控。在硬件部署上,在管道系统关键节点安装高精度压力、温湿度传感器,搭配无线传输模块实现数据实时采集与上传,在管道复杂区段增设可视化监测设备与超声波探测装置,全方位捕捉系统运行状态信息。在软件平台开发中,集成实时监测、数据分析与故障定位功能,实时展示各节点运行参数,设定压力波动预警阈值,当数据超出正常范围时自动触发报警。通过构建泄漏率预测模型,结合历史运行数据与设备损耗规律,提前预判潜在泄漏风险并推送维护建议。当检测到泄漏信号时,利用多传感器数据融合技术,快速定位泄漏位置,同时实现与洁净室中央控制系统的联动,在泄漏发生时自动调整送风参数,临时维持室内洁净环境,为故障处理争取时间,通过智能系统实现气密性监测、预警、定位与应急处理的一体化运作。

总而言之,洁净室送风管道气密性是保障洁净环境的关键,对其进行检测与改进,能有效降低泄漏风险、提升系统可靠性,助力相关行业降本增效。未来,还需进一步探索技术融合,推动检测与改进更智能化、高效化,为洁净室持续稳定运行提供更坚实支撑,助力行业高质量发展。