

Research on the Application of Smart Monitoring System for Gas-Extinguishing Cylinders in Rail Transit

Wang Jungang¹ Xu haojun¹ Xia Huijun² Liu Yihan²

1.Changzhou Metro Group Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

2.Jiangsu Rongxia Safety Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China

Abstract

This study addresses the safety and maintenance challenges of the core component of the gas fire extinguishing system for underground enclosed spaces in rail transit - gas extinguishing steel cylinders. Based on relevant standards, an innovative smart monitoring system consisting of “deformation monitoring pressure monitoring intelligent management platform” was constructed to achieve dynamic integration, risk warning, and remote control of the entire lifecycle data of steel cylinders. Taking the “Intelligent Detection and Management System for the Whole Life Cycle Operation of Gas Extinguishing Cylinders in Urban Rail Transit” project of Changzhou Metro as a case study, the feasibility of the system operation and its effectiveness in key indicators were verified. The research results provide theoretical and practical support for the intelligent transformation of fire protection facilities in rail transit, and have important engineering application value in reducing the risk of steel cylinder explosion and improving the overall safety management level.

Keywords

gas extinguishing cylinder; Smart monitoring system; rail transit; Intelligent fire protection

气灭钢瓶智慧监测系统在轨道交通的应用研究

王军港¹ 徐浩军¹ 夏慧钧² 刘益晗²

1. 常州地铁集团有限公司, 213000 常州;

2. 江苏荣夏安全科技有限公司, 213000 常州

摘 要

本研究针对轨道交通地下封闭空间气体灭火系统核心组件——气灭钢瓶的安全运维难题,依据相关标准,创新构建了“形变监测-压力监测-智能管理平台”三位一体的智慧监测系统,实现钢瓶全生命周期数据的动态整合、风险预警与远程管控。以常州地铁“城轨气灭钢瓶全生命周期运营工况智慧检测管理系统”项目为案例,验证了系统运行的可行性和在关键指标上的有效性。研究成果为轨道交通消防设施的智能化转型提供了理论与实践支撑,对降低钢瓶爆裂风险、提升全周期安全管理水平具有重要工程应用价值。

关键词

气灭钢瓶; 智慧监测系统; 轨道交通; 消防智能化

引言

轨道交通作为城市公共交通的骨干系统,其消防安全直接关系到公众生命财产安全。气体灭火系统作为地下封闭空间的核心消防设施,其钢瓶长期承受高压环境,易因腐蚀、疲劳、误操作等因素引发失效风险。当前行业普遍依赖人工巡检模式,存在诸多难点和痛点,难以满足轨道交通高密度运营与全周期安全管理的需求。随着物联网、传感器技术的快速发展,智慧监测系统为实现钢瓶状态实时感知、风险精

准预警提供了技术可能。

1 轨道交通行业内气灭钢瓶维保的现状

1.1 维保面临的客观环境

气体灭火系统是轨道交通消防安全的核心保障之一,气体灭火系统的灭火剂通常以高压形式贮存于钢瓶中,钢瓶内长期贮存 15.0MPa 的高压气体^[1],是保障地下车站、车辆段等封闭空间消防安全的关键设备。当前维保模式以定期人工巡检为主,设备检测与维护存在如下困难:

(1) 空间限制: 钢瓶分布于地铁车站的设备区(如配电间、通信机房等区域),地下车站空间狭窄、管线密集,部分设备间仅能容纳 1-2 人作业,大型维保设备(如气瓶搬运工具)难以进入;部分开通较早的地铁城市存在钢瓶间设

【作者简介】王军港(1977-)男,汉,河南省西华县,本科,高级工程师、技术管理部长,主要研究方向:轨道交通运营管理,应急指挥以及科技创新等。

置在隧道内轨道侧的情况，进入房间巡查需经调度许可，且存在人车冲突风险。

(2) 时间受限：轨道交通需保障全天候运营安全，钢瓶维保（尤其是拆卸、检测、充装）需在非运营时段完成，且需避免影响相邻设备（如与火灾报警系统、BAS 系统联动测试需在非运营时段模拟火灾场景）。

(3) 环境干扰：地下车站湿度大（相对湿度常 > 80%）、存在渗水风险，钢瓶易受电化学腐蚀；部分设备间靠近牵引供电设备（如整流变压器室），存在电磁干扰^[2]，可能影响钢瓶压力传感器的准确性；夏季高温（设备间无窗、散热差）可能导致钢瓶内压力异常升高，需加强温度监测。

1.2 维保现状中存在的痛点

安全隐患难以及时发现：钢瓶爆炸的主要原因包括使用时间过长、产品缺陷、灭火剂杂质腐蚀、充装失误、未定期检验等，而人工巡检仅能捕捉表面问题，无法实时监测钢瓶内部压力变化和微观形变，难以提前预警潜在爆裂风险。国内已发生多起消防钢瓶爆炸事故^[3]，对人员安全和运营秩序造成严重影响。

检验周期与实时需求脱节：根据《气瓶安全技术规程（TSG 23-2021）》，IG541 钢瓶定期检验周期为 3 年，但若在检验周期内出现压力异常或形变，人工巡检难以覆盖，存在“检验空窗期”的安全漏洞。且定检需要进行水压测试、内壁检查等流程^[4]，并存在三大问题：

- 1) 送检过程需拆卸、运输钢瓶，增加风险；
- 2) 检验周期长，期间需备用瓶组替代，增加管理成本；
- 3) 残留杂质可能加剧内壁腐蚀，形成“越检越险”的恶性循环^[5]。

人力成本高且效率低：每周一次的人工巡检需投入大量人力，巡检人员需逐个记录数据，不仅劳动强度大，还可能因人为疏忽导致数据误差，无法满足高密度、高精度的监测需求。

2 国家及行业对气灭钢瓶管理的相关要求

2.1 国家标准与行业规范解读

近年来，国家及行业已出台多项标准规范，明确要求加强气灭钢瓶的安全管理，推动智能化监测技术的应用。

国标 GB/T51314-2018《数据中心基础设施运行维护标准》规定采用气体灭火系统的数据中心，可以配置消防钢瓶爆裂预警探测系统，以实时在线监测消防钢瓶自身的安全状态。

《数据中心消防技术白皮书》（2021 年）第六章《灭火技术》指出消防钢瓶设置消防钢瓶爆裂预警探测装置，对钢瓶进行实时在线监测预警，以防止钢瓶的爆裂爆炸。

2.2 智能化转型的迫切性

气灭钢瓶作为压力容器与消防系统的核心部件，其失效（如腐蚀泄漏、阀门卡阻、压力不足）可能直接导致灭火

失效。若瓶内介质泄漏，不仅影响灭火效能，还可能在封闭空间积聚有毒气体（如七氟丙烷分解产生 HF）或导致人员窒息（IG-541 泄露可能造成氧气浓度降低，二氧化碳浓度升高）^[6]。因此，全面而细致的维保工作的重要性不言而喻。

传统人工巡检模式效率低且易漏检，已无法满足标准规范对“实时性、精准性、全周期”的要求。一方面，钢瓶数量庞大与人工效率有限的矛盾日益突出；另一方面，地下空间的高风险环境对“提前预警”提出了更高需求。而运营单位需在“合规成本”（如第三方检测费、配件更换费）与“安全冗余”（如备用钢瓶配置）间权衡，面临长期的成本压力。

因此，推动气灭钢瓶管理从“人工巡检”向“智能监测”转型，是落实国家及行业要求、降低安全风险的有效方法。

3 气灭钢瓶智慧监测系统实施方案可行性分析

气灭钢瓶智慧监测系统通过整合“形变监测、压力监测、智能平台”三大核心模块，实现对钢瓶全寿命周期的实时监管，其技术方案具备成熟性和可操作性。

3.1 钢瓶形变监测

钢瓶形变是爆裂前的关键预警信号，系统通过“线性传感器 + 数据转换”技术实现精准监测。

监测原理：在钢瓶外壁规律缠绕变形量探测线，感知钢瓶因内压变化产生的微观形变（如材料屈服、裂纹扩张等）。当形变达到 1% 时，探测线将物理变化转化为电参数信号，通过 RS485 总线传输至数据采集器，触发预警。

3.2 钢瓶压力监测

压力异常是钢瓶安全的直接反映，系统采用“高精度传感器 + 实时传输”技术实现压力监控。

监测方式：在钢瓶上安装高精度压力传感器（如 RXQM-P 型钢瓶压力探测装置），实时采集压力值（精度可达 0.1MPa），并通过 RS485 总线传输至数据采集器，确保压力数据与形变数据同步分析。

3.3 智慧监测管理平台架构

平台作为数据整合与决策中枢，实现了“监测 - 预警 - 管理”全流程智能化。

(1) 数据监测：将形变、压力数据通过网络传输至监控主机，再汇总至管理平台，形成钢瓶全生命周期数据库（包括制造信息、检验记录、实时状态等）^[7]。

(2) 功能预警：当瓶体发生屈服（爆炸之前），变形量探测线能感受到气瓶外壁局部的微量变形，可提前预警，并通过短信、终端弹窗等方式通知管理人员。

(3) 远程管理：管理人员可通过平台远程查看钢瓶实时状态（压力值、形变状态、位置信息等），定位具体问题钢瓶，实现“精准维保”。

(4) 维保优化：平台自动记录钢瓶状态变化，生成维保建议（如“压力异常需补气”、“形变超标需更换”），

推动维保模式从“计划修”（按固定周期巡检）向“状态修”（按实际状态按需维保）转型^[8]。

4 案例与效果评估——以常州地铁项目为例

4.1 项目概况

常州地铁于2024年启动“城轨气灭钢瓶全寿命周期运营工况智慧检测管理系统”项目，试点对控制中心30个瓶组（IG541钢瓶）安装智慧监测系统，涵盖系统安装、试运行、效果验证等阶段。

4.2 实施方式

系统部署采用“空间适配-分阶段施工-联动调试”的三阶实施策略。设备选型遵循“环境适配优先”原则，采用高精度、抗电磁干扰能力强、绝缘性能高的集合压力监测、形变预警功能的探测器。系统联调阶段创新性采用“虚拟调试+物理验证”双轨模式。在数字孪生平台中完成90%的逻辑校验，现场仅需针对通信延迟、数据同步等关键指标进行实测优化，联调效率提升40%。同时借助预留光纤通道实现钢瓶实时状态数据与消防室操作终端同步，实现远程监控的目的。



4.3 实施效果评估

气灭钢瓶智慧监测系统运行以来，运维效率的显著提升主要源于四个维度的优化。

（1）监测模式升级：从“每周人工巡检”转为“24小时实时监测”，解决了人工巡检的“阶段性盲区”。

（2）管理效率提高：管理人员通过平台可随时查看30个瓶组的压力值和形变数据，无需去现场即可掌握钢瓶状态。

（3）运维成本降低：试点后，减少了该区域钢瓶巡检人力投入，原每周2人/次降至每月1人/次。

（4）安全等级提升：系统通过形变与压力双参数监测，将钢瓶安全系数从传统模式的“依赖人工判断”提升至“数据化精准预警”，有效规避了爆裂风险，减少因爆炸导致的经济损失和人员恐慌。

5 未来展望

气灭钢瓶智慧监测系统在常州地铁的试点验证了其技术可行性与应用价值，提供了可复制的技术范式，系统将从单一监测工具向“预测-决策-处置”全链条解决方案升级，

推动安全管理模式从被动响应向主动防御转型。未来在轨道交通行业的推广可从以下方面展开：

（1）既有线路推广：对已运营线路的气灭钢瓶分批加装监测系统，优先覆盖客流量大、环境复杂的车站（如换乘站等），逐步实现全网钢瓶智能化管理。

（2）新线规划整合：在新线设计阶段将智慧监测系统纳入消防工程，实现“钢瓶出厂-安装-运营-报废”全周期数据贯通，避免后期改造的额外成本。

气灭钢瓶智慧监测系统的成熟，绝非单一主体的“独角戏”。各方通过“需求反哺-技术攻关-产品验证-标准完善-规模推广”的闭环协作，最终推动系统从“可用”向“好用、耐用”升级，为轨道交通消防安全提供更可靠的保障。未来，随着各方协同机制的进一步深化（如建立跨行业创新联合体），智能监测系统有望成为轨道交通消防的“标配”，引领行业向“主动预防、智慧运维”的新阶段迈进。



参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 25972-2024 气体灭火系统及部件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [2] 齐万明, 陈小琳, 穆晓彤. 复杂电磁环境下轨道交通车辆整车抗电磁干扰设计[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2021.
- [3] 李国华, 濮春干, 尹杰. 从一起气瓶爆炸事故谈在用消防气瓶的检验与维护管理[C]//2015 中国消防协会科学技术年会论文集, 2015.
- [4] 国家市场监督管理总局. TSG R0006-2014 气体安全技术监察规程[S].
- [5] 姜勇, 巩建鸣, 涂善东. 37 Mn 高压消防气瓶爆炸原因分析及对策[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(1): 4.
- [6] 东靖飞. 气体灭火系统安全评估技术的研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(9): 5.
- [7] 胡威龙. 基于RFID技术的消防气瓶全生命周期管理系统研究与设计[J]. 信息与电脑, 2022(002): 034.
- [8] 何国才. 浅谈IG541气体灭火系统在地铁施工及维保中的问题[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2022(1): 4.
- [9] 王磊, 李鑫, 张宇. 物联网技术在地铁气体灭火系统中的应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(5): 45-49.