

Research on the Construction of a Comprehensive Early Warning System for Fire Steel Cylinder Explosion Prevention

Tailiang YU¹ Jungang Wang¹ Shouyun Wang¹ Yihan Liu²

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

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

Abstract

Gas fire extinguishing systems are widely used in places sensitive to fire extinguishing media, such as data centers, rail transit, and power substations, due to their residue free and non-conductive characteristics. As the core of the system, the fire steel cylinders that store a large amount of high-pressure fire extinguishing media have been in service for a long time and face the risk of leakage or even explosion. The comprehensive anti explosion warning system for fire steel cylinders uniformly lays anti explosion detection lines (linear sensors) on the outer wall of the cylinder, combined with high-precision temperature and pressure sensors, to monitor the micro deformation, environment, and multi-dimensional parameters such as pressure and temperature inside the cylinder in real time, achieving full chain coverage of “centralized control regional coordination on-site perception”. The fundamental transformation from “passive disaster relief” to “active disaster prevention” has been achieved, providing strong technical support for the safe operation of fire steel cylinders.

Keywords

Steel cylinder deformation; Pressure changes; Explosion prevention; Digital firefighting; Comprehensive warning

消防钢瓶防爆裂综合预警系统的构建研究

俞太亮¹ 王军港¹ 王守运¹ 刘益晗²

1. 常州地铁集团有限公司, 中国·江苏 常州 213000

2. 江苏荣夏安全科技有限公司, 中国·江苏 常州 213000

摘要

气体灭火系统因其无残留、不导电的特性,被广泛应用于数据中心、轨道交通、电力变电站等对灭火介质敏感的场所。作为系统核心,大量储存高压灭火介质的消防钢瓶长期服役,面临着泄漏甚至爆裂风险。消防钢瓶防爆裂综合预警系统通过在钢瓶外壁均匀敷设防爆裂探测线(线型传感器),结合高精度温度与压力传感器,实时监测钢瓶的微变形量、环境及瓶内压力、温度等多维参数,实现“集中管控-区域协同-现场感知”的全链条覆盖。实现了从“被动救灾”到“主动防灾”的根本转变,为消防钢瓶的安全运行提供了强有力的技术保障。

关键词

钢瓶形变; 压力变化; 防爆裂; 数字消防; 综合预警

1 引言

气体灭火系统因不导电、无残留,可高效保护精密设备、贵重文献及易损设施,广泛应用于数据中心、电力变电站、轨道交通等场所^[1]。气体(灭火介质)以高压的形式存储在

消防钢瓶中,钢瓶存贮压力为15MPa(以IG541为例)。由于钢瓶的材质、生产工艺、介质腐蚀等因素的影响,钢瓶存在爆裂的风险。近年来我国一些采用气体灭火系统的场所,多次出现气瓶爆炸事件。

以城市轨道交通为例,设备多数在地下安装使用,消防上属高危场所,又属于人员密集场所,一旦发生爆炸事故,损失巨大,影响恶劣。因此对消防钢瓶的综合监控,可以防止消防钢瓶爆裂这类恶性事故的发生。

2 消防钢瓶爆裂原因分析

钢瓶环境温度过高,压力超标,形变是消防钢瓶爆裂主要原因^[2],我们研究这些参数变化对建立钢瓶防爆裂综合预警系统有非常重要的意义。

【作者简介】俞太亮(1977-),男,中国江苏常州人,硕士,高级工程师,中国城市轨道交通协会技术装备委员会专家、江苏省城市轨道交通运营安全技术研究中心管理委员会委员、常州市人工智能学会副理事长,从事轨道交通智能运维、新线运营筹备、既有线设备升级改造、车辆运营管理、安全管理等领域研究。

2.1 环境温度变化对消防钢瓶安全的影响

消防钢瓶（以 IG541 气体灭火剂瓶组为例）的贮存环境温度范围为 0 ~ 50 ℃，应考虑该温度变化对变形量参数的影响。根据理想气体状态方程（ $pV=nRT$ ）在物质的量（ n ）不变时的推论 $P_1V_1/T_1=P_2V_2/T_2$ （ P - 压力， V - 体积， T - 温度）^[3]，由于气瓶材质为 30CrMo 合金钢，热膨胀系数很小，其热胀冷缩因素可忽略不计，因此，IG541 气瓶在 20 ℃ 时的充装压力为 15MPa，各温度下对应的压力变化如表 1 所示，该压力变化会引起相应的气瓶变形。

表 1 IG541 系统储存压力随温度变化参考值 [4]

储存温度 /℃	0	10	20	30	40	50
储存压力 /MPa	13.5	14.3	15.0	15.7	16.5	17.2

2.2 压力变化对消防钢瓶安全的影响

消防钢瓶是储存灭火剂的核心容器，其内部压力直接关系到气灭系统的安全性、有效性及可靠性，是消防设施能否在火灾中发挥作用的“生命线”。IG-541 气体出厂时标准充装压力为环境温度 20℃时 15MPa，当温度降低或升高时，压力也随之下降或升高（如表 2 所示）。若实际测量压力，低于对应温度时的压力，则判断钢瓶泄漏。

表 2 惰性气体灭火剂瓶组工作压力 [5]

灭火剂瓶组类别	贮存压力 (20℃时) /MPa	最大工作压力 (50℃时) /MPa	最小工作压力 (0℃时) /MPa
IG-01 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	14.0
	20.0	23.2	18.0
IG-100 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	13.6
	20.0	23.2	18.0
IG-55 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	14.0
	20.0	23.2	18.0
IG-541 气体灭火剂瓶组	15.0	17.2	13.6
	20.0	23.2	18.0

当存储压力高于泄放动作压力设定值时，消防钢瓶将进行自动安全泄放程序。如表 3 所示，IG541 存储温度 20℃时 15MPa，其安全泄放动作压力设定值为 24MPa。

表 3 典型的灭火系统灭火剂瓶组的安全泄放装置设定值 [5]

灭火剂瓶组类别	贮存压力（20℃时）MPa	泄放动作压力设定值 MPa
IG-01 气体灭火剂瓶组	20.0	24.0
IG-100 气体灭火剂瓶组		
IG-55 气体灭火剂瓶组		32.5
IG-541 气体灭火剂瓶组		
内贮压式七氟丙烷灭火系统	2.5	5.9
	4.2 ^a	7.5
	4.2 ^b	9.4
	5.6	11.0

a 指瓶组充装密度为 1120kg/m³ 时。

b 指瓶组充装密度为 950kg/m³ 时。

2.3 钢瓶形变对消防钢瓶安全的影响

IG541 钢瓶是一种合金结构钢，具有良好的韧性和塑性，当前被广泛应用于消防钢瓶的制造。结合材料力学中的应力-应变特性（尤其是塑性材料的破坏规律）^[6]，我们对气瓶爆破的各阶段进行详细拆解及关键逻辑说明。

2.3.1 弹性变形阶段（可恢复稳定状态）

当内部压力逐渐升高时，气瓶壁材料受拉应力 / 压应力（取决于压力方向，通常为环向拉应力为主）作用，进入弹性变形阶段。此阶段遵循胡克定律（ $\sigma=E\varepsilon$ ， σ 为应力， E 为弹性模量， ε 为应变），变形完全可逆即若卸载（停止加压），气瓶会恢复原尺寸^[7]。

由于弹性变形的可逆性，气瓶体积随压力的变化呈线性关系（ $V=V_0(1+\varepsilon)$ ）， V_0 为初始体积， ε 为线应变， V 为变形后的体积）。此时气瓶处于安全贮存状态，无永久损伤。

2.3.2 屈服阶段（不可逆塑性变形开始）

当压力继续升高，材料内部应力达到屈服极限时，进入屈服阶段。此时材料的原子间滑移开始加剧，晶体结构发生不可逆调整，即使应力不再增加（或小幅波动），应变也会持续增大（即“屈服平台”）。

屈服阶段的变形是不可逆的（残余变形），意味着气瓶的结构完整性已被破坏。若继续使用，残余变形会累积，导致局部应力集中，最终引发爆破。因此，屈服极限是气瓶的“安全警戒线”，超过此值必须报废。

2.3.3 强化阶段（塑性变形持续，抵抗能力恢复）

屈服阶段后，材料发生加工硬化（又称“冷作硬化”）——塑性变形使晶体中的位错密度增加，位错运动受阻，导致材料的强度（屈服极限、抗拉强度）提高，塑性（延伸率）下降。此时，即使气瓶继续发生塑性变形（应变增大），其抵抗进一步变形的能力反而增强（对应应力-应变曲线中“屈服平台”后的上升段），变形速率（单位压力变化对应的应变变化）会减慢^[8]。

强化阶段是气瓶“过载保护”的重要机制——当压力意外超过设计压力时，材料通过加工硬化延缓破坏，为泄压或维修争取时间（但需注意，强化阶段的变形仍是不可逆的，最终会导致失效）。

2.3.4 破坏阶段（强度耗尽，断裂失效）

当压力升高至抗拉强度极限时，材料无法再通过加工硬化提高强度，此时局部应力集中（如焊缝缺陷、表面划痕、内部腐蚀等薄弱处）会导致该区域的有效应力超过极限，进入破坏阶段。对于塑性材料（如钢材），破坏阶段通常表现为颈缩现象（局部截面急剧缩小），随后从薄弱处撕裂破裂（爆破）^[8]。

破坏阶段是材料储存的弹性应变能突然释放的过程，表现为爆破瞬间的碎片飞散和能量冲击，具有极强的危害性。

因此对钢瓶形变的在线监测可以对消防钢瓶的爆裂风

险提供预警,防止钢瓶爆裂事故的发生。

3 消防钢瓶防爆裂综合预警系统解决方案

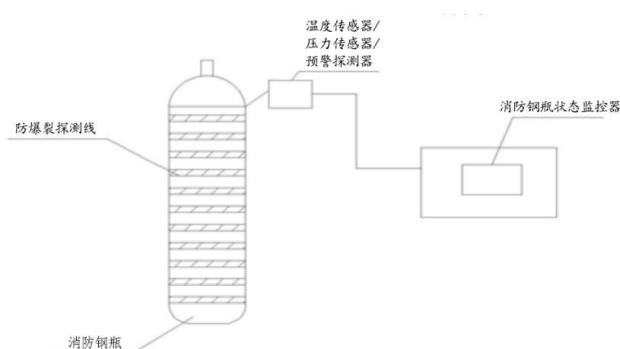


图1 消防钢瓶防爆裂综合预警系统的组成

消防钢瓶防爆裂综合预警系统由温度传感器、压力传感器、防爆裂探测线、预警探测器、消防钢瓶状态监控器组成(如图1所示)。

防爆裂探测线均匀地缠绕在消防钢瓶上,用环氧胶固化在钢瓶的外壁上。测量钢瓶的微变量,当钢瓶发生0.4%的形变时发出声光报警信号。

温度传感器、压力传感器、预警探测器固定在钢瓶上,当出现温度、压力异常发出明显不同声光信号,提醒值班人员及时处理。

消防钢瓶状态监控器安装在消防控制室,实时监控每个钢瓶的温度、压力、微变量等状态信息,综合分析钢瓶的安全性,为用户决策提供依据^[8]。

3.1 钢瓶状态探测器具有以下功能

- 1) 钢瓶状态探测器具有温度探测功能,探测精度不小于0.5级。
- 2) 钢瓶状态探测器具有压力探测功能,探测精度不小于0.5级。
- 3) 钢瓶状态探测器具有微变量探测功能,并能进行温度补偿。
- 4) 具有报警阈值的修改应通过操作权限(密码)保护,且只能现场设置。

3.2 钢瓶状态监控器应有以下功能

- 1) 信息采集功能、报警功能、自检功能和信息显示、状态查询与分析功能,信息采集范围至少应包含SSU信息与自身状态^[9]。
- 2) 中文功能标注和信息显示功能。
- 3) 本机故障报警,类别至少应有主电源故障、备用电源故障、备用电源输出电压低于欠压电压、通信故障、数据存储故障,以及探测器与主机之间连接线路的故障(短路、开路、并接负载)。

4 消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台功能

2024年,江苏省消防救援总队印发《“数字消防”实

施方案》,明确要求“推广应用基层成熟的火灾风险评估、监测预警等模型算法,提升火灾防控工作质效”。物联网与AI技术的成熟,恰好为“数字消防”提供了技术落地路径——通过“物联感知+智能分析”,将消防钢瓶从“静态设备”转化为“动态数据节点”^[9]。消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台的构建,是物联网(感知互联)与AI(数据智能)技术发展的必然结果。

4.1 平台组成

消防钢瓶防爆裂综合预警系统,采集信息应至少包括驱动装置安装状态、驱动装置动作状态、选择阀动作状态、信号反馈装置动作状态、瓶组状态参数(如压力、液位、质量、瓶组储存环境温度等)、灭火系统基本参数(瓶组数量、地理位置、灭火系统类型、用户单位、生产者等)、操作记录等信息^[10]。

消防钢瓶防爆裂综合预警数据应用平台采用三级分布式架构,以“集中管控-区域协同-现场感知”为核心逻辑,实现消防钢瓶全生命周期状态监测与防爆裂预警的全链条覆盖(如图2所示)。

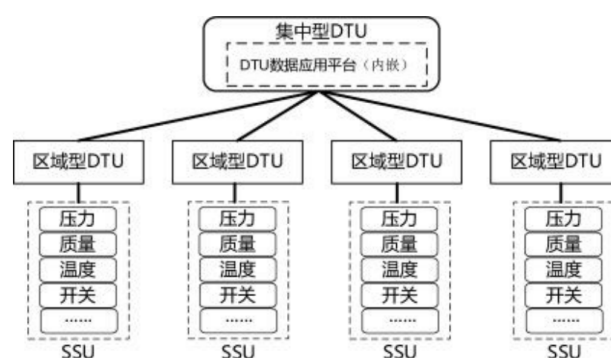


图2 集中型DTU、区域型DTU和SSU连接关系示例[5]

4.2 平台架构解析

集中型DTU(数据传输单元)与数据应用平台,作为整个系统的“大脑”,承担数据汇聚、处理、存储及业务应用的核心功能。

- 1) 集成多区域型DTU上传的海量异构数据(压力、温度、质量、开关状态等),通过边缘计算或云计算实现数据清洗、关联分析及模型训练;
- 2) 内嵌消防钢瓶防爆裂预警算法(如基于压力-温度耦合模型的泄漏预测、基于振动信号的裂纹识别模型),实时输出风险等级评估与预警决策;
- 3) 提供可视化交互界面,支持多维度数据展示(如钢瓶状态热力图、预警事件时空分布)、报表生成及远程配置管理;
- 4) 对接城市轨道交通综合监控系统(ISCS)、消防指挥中心等外部平台,实现跨系统联动(如自动触发消防喷淋、通风系统联动)。

区域型DTU集群作为区域级“神经中枢”,实现分布

式数据采集与本地化智能处理。按城市轨道交通线路、站点或设备区域（如车辆段、主变电所）划分，覆盖半径通常≤500米，降低长距离通信延迟与网络负载。其核心功能如下：

- 1) 接入辖区内多个 SSU（现场感知单元）数据，通过 LoRa/NB-IoT/工业以太网等通信技术实现本地化数据中继^[1]；
- 2) 集成轻量化边缘计算模块，预处理异常数据（如过滤瞬时噪声、触发本地预警阈值），减少无效数据上传；
- 3) 支持区域级冗余备份，当集中型 DTU 故障时，可独立运行并缓存关键数据，保障业务连续性。

SSU（现场感知单元）与传感器集群作为“神经末梢”，实现钢瓶状态的多参数实时感知^[1]。实时在线监测以下参数：

- 1) 压力传感器：监测钢瓶内灭火剂压力（如七氟丙烷压力值），实时预警超压/低压异常（压力波动超过±10%额定值触发预警）；
- 2) 温度传感器：监测钢瓶表面及环境温度，预警高温环境下的材料老化加速风险（温度超过60℃持续30分钟触发预警）；
- 3) 爆裂预警探测器：监测钢瓶微变形量，当钢瓶发生0.4%的形变时发出声光报警信号。

4.3 价值提升维度解析

消防钢瓶防爆裂综合预警平台不仅是安全隐患的“终结者”，更是消防管理模式的“革新者”。通过三级架构的协同联动，其价值从单点设备监控升级为覆盖“人-设备-场景-管理”的立体化安全生态。

安全价值：从“被动救灾”到“主动防灾”。通过毫米级数据采集（压力精度±0.1MPa、温度实时监测）和AI算法，将钢瓶爆裂预警提前至隐患萌发阶段，相比传统人工巡检实现指数级安全提升。

管理价值：降本增效与流程再造。通过平台推送风险提示，通知运维人员远程核查。自动生成预警工单，记录钢瓶编号、风险类型、处置时间等信息，对接运维管理系统实现“监测-预警-维修-复检”全流程数字化闭环。

数据价值：数据资产沉淀，决策效率指数级提升。通过分析历史预警数据，识别钢瓶老化周期规律（如某型号钢瓶使用8年后泄漏率显著上升），优化全生命周期更换计划，避免过度维护或维护不足。

技术价值：打破传统单一压力监测的局限性。通过“压力+质量+温度+状态”多参数建模，将爆裂预警准确率提升至95%以上。支持模块化扩展，可根据实际应用场景动态增减区域型DTU节点，降低初期建设成本。

5 技术难点

微变形监测是钢瓶主防爆监控的主要技术难点。

5.1 测试原理

线型传感器的电阻为固定值，施加一定电压后，产生

稳定的电流。传感器紧贴气瓶外壁，若气瓶发生变形、局部鼓包，线性传感器会拉伸变形，使长度伸长、截面缩小。电阻计算公式如式（1）所示^[2]。

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (1)$$

长度L增大，截面S减小时，电阻R会增大，电参数的变化导致电流降低。因此可通过电参数的变化监测气瓶的微变形。

考虑温度对传感器特性的影响，将相同长度的传感器放入高低温试验箱，测量0~50℃温度下输出的电参数，掌握变化规律，通过软件进行修正。

5.2 实施方案

气瓶微变形监测，采取在气瓶表面缠绕防爆裂探测线的方法，具体如图1所示，气瓶表面缠绕的防爆裂探测线圈数相同且间距均匀四根线探测器和监控器。防爆裂探测线可将气瓶的体积变化转换为电参数变化，通过有线形式传输至数据探测器。探测器将钢瓶的状态信息上传给监控器。

5.3 钢瓶爆裂预防

前文论述了气瓶爆破经历以下4个阶段：弹性变形阶段→屈服阶段→强化阶段→破坏阶段。弹性变形阶段，气瓶体积随内部压力线性变化；屈服阶段，气瓶失去抵抗变形的能力，开始发生塑性变形；强化阶段，气瓶恢复抵抗变形的能力，但依然继续塑性变形；破坏阶段，达到强度极限，气瓶承压能力降低，加剧塑性变形，最后从薄弱处撕开破裂。

在整个变化过程中，仅第1阶段是可恢复的稳定贮存状态，一旦到达屈服极限，将发生不可恢复的塑性变形，气瓶应报废。经测试，当钢瓶的形变超过1%时，钢瓶将达到屈服极限。微变形监测要实现的是当形变达到0.4%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。

6 结论

本文通过对消防钢瓶的压力、变形量等因素研究，论证采用在气瓶表面均匀敷设线型传感器的方法，对钢瓶微变形进行监测，可有效防止钢瓶爆裂，并提出构建消防钢瓶防爆裂综合预警系统，为消防钢瓶的安全管理提供可量化、可持续的解决方案。

参考文献

- [1] 王海宾. 气体灭火系统在建筑消防中的应用研究[J]. 工程建设(维泽科技), 2024, 7(3):165-167.
- [2] 公安部天津消防研究所. GA 124-2017 气体灭火系统及零部件性能要求和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 王永雄. 理想气体状态方程的多维进阶推导探究[J]. 中学教学参考, 2024(32).
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB 50263—2007 气体灭火系统施工及验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.

- [5] 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.
- [6] 李毅, 王志滨. 恒温下结构钢的应力-应变关系[J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2013(4):735-740.
- [7] 罗培林."胡克(Hooke)定律"的革新与理论和实验数据的格式化整理和应用[C]. 钢结构工程研究 (七) ——中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会2008年学术交流会论文集. 2008.
- [8] 魏陆原, 杨飞, 延睿, et al. 结构钢材全过程真实应力-应变关系研究[J]. Engineering Mechanics / Gongcheng Lixue, 2025, 42(4).
- [9] 吴志毅, 徐秀会, 韩鹏. 消防设施云管理系统的设计[J]. 通信与信息技术, 2022(003):000.
- [10] 王建国, 李志强, 张磊. 基于多传感器融合的特种设备形变监测方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(5): 156-163.
- [11] 张颖, 张浩, 胡安林. 基于MPGA-BP神经网络的消防钢瓶综合安全评价[J]. 科学技术与工程, 2025(14).
- [12] 郑懿, 邹学成, 李福敏. 地铁气体灭火系统气瓶微变形监测技术研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(3):369-373.