

公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术研究

李 成 冯 馨 谷宝田

云南交投公路建设第一工程有限公司 云南 昆明 650200

【摘 要】：在山区公路隧道建设中，瓦斯气体突涌已成为威胁施工安全的首要灾害源。据统计，我国近五年隧道瓦斯事故中 83% 源于监测滞后与预警失效。传统便携式检测仪存在响应延迟、盲区覆盖不足等缺陷，而智能传感与物联网技术的发展为实时动态监测提供了新路径。基于此，本文简要分析了公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术，并针对其应用存在的问题进行了深入探究，提出了公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术应用的有效策略，以供参考。

【关键词】：公路隧道；施工；瓦斯气体监测；预警技术

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.022

引言

公路隧道施工相对而言比较复杂，除了需要关注开挖段围岩地质特点、排查因为围岩不稳定、底层软弱失衡等带来的隐患之外，还应该重点加强对隧道瓦斯含量的监测，动态掌握瓦斯赋存情况，提前制定事故应对预案并加强事故处置应急演练。此外，在获知瓦斯含量的基础上，应对隧道施工瓦斯气体预警技术方法进行适应性改进，加强通风措施建设，这样才能在保证施工安全的基础上，实现施工质量、工期与成本控制目标的完全统一。

1 公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术分析

（1）光学瓦斯监测技术

光学瓦斯监测技术主要基于光干涉原理。当含有瓦斯的空气进入仪器的气室时，由于瓦斯气体与空气的折射率不同，会导致光的干涉条纹发生移动，通过测量干涉条纹的移动距离，便能准确计算出瓦斯的浓度。这种技术的优势在于测量精度高，受其他气体干扰小，稳定性强，适用于瓦斯浓度较低且对测量精度要求较高的施工环境。光学瓦斯监测仪器体积较大，携带和操作相对不便，且价格较高，对维护人员的专业要求也较高。

（2）催化燃烧式监测技术

催化燃烧式监测技术的原理是利用瓦斯气体在催化元件表面发生无焰燃烧，使催化元件温度升高，电阻值发生变化，通过检测电阻值的变化来确定瓦斯浓度。该技术响应速度快，测量范围广，能够实时监测瓦斯浓度的变化，在隧道施工中得到广泛应用。不过，催化元件在使用过程中容易受到硫化物等杂质气体的影响而中毒失效，需要定期更换元件，增加了使用成本和维护工作量。

（3）热导式监测技术

热导式监测技术依据不同气体具有不同的热导率这一特性。含有瓦斯的混合气体进入热导池时，由于瓦斯的热导率与空气不同，会导致热丝温度发生变化，进而引起热丝电阻值改变，通过测量电阻值的变化就可以计算出瓦斯浓度。此技术适

用于高浓度瓦斯气体的监测，对环境适应性强，不易受湿度等因素影响。然而，热导式监测技术的灵敏度相对较低，在低浓度瓦斯监测时准确性欠佳。

（4）红外吸收式监测技术

红外吸收式监测技术利用瓦斯气体对特定波长的红外光具有选择性吸收的特性。在红外光穿过含有瓦斯的气体时，特定波长的红外光会被瓦斯吸收，通过检测红外光强度的衰减程度，就能确定瓦斯的浓度。该技术的精度高、稳定性好、响应速度快、抗干扰能力强等优点，可以使其同时监测多种气体成分。但是，红外吸收式监测设备价格非常昂贵，对安装环境要求较高，因此需要定期进行校准和维护。

2 公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术应用存在的问题

（1）技术原理与复杂施工环境的适配性矛盾突出

光学瓦斯监测技术依赖光干涉原理，对气室密封性要求极高，而隧道内频繁的机械振动、潮湿空气流动极易破坏设备气密性，导致测量精度下降。红外吸收式监测技术虽具备高灵敏度，但隧道内粉尘、水汽对红外光的散射与吸收，会干扰特定波长光强检测，造成浓度误判。热导式监测技术在高湿度、高粉尘环境下，热导池易被污染，改变气体热导率测量基准，致使低浓度瓦斯监测失效。这些技术与环境间的适配性矛盾，使监测数据的可靠性大打折扣。

（2）设备全生命周期管理存在系统性漏洞

设备维护管理链条存在诸多薄弱环节。一方面，催化燃烧式监测设备的催化元件受硫化物等杂质气体影响易中毒失效，而施工方因成本考量常忽视元件定期更换，导致仪器灵敏度持续衰减。另一方面，无线传感器网络节点部署后，因缺乏有效的能耗管理策略，设备频繁出现电量耗尽、数据传输中断的情况。此外，红外吸收式监测设备对安装环境要求严苛，在隧道施工中因震动、温度骤变等因素，设备校准周期被迫缩短，但实际操作中校准流程常被简化，设备测量误差不断累积，难以满足长期稳定监测需求。

(3) 多技术协同与数据融合存在机制性障碍

光学、催化燃烧、红外吸收等不同原理的监测设备各自独立运行，数据格式、传输频率存在差异，导致监控系统难以整合多源数据形成完整的瓦斯浓度变化图谱。无线传感器网络虽具备数据集成潜力，但因缺乏统一的通信协议和数据标准，与其他监测设备之间的数据交互困难，无法实现多技术间的优势互补，难以构建全面、精准的预警模型，削弱了整体监测预警能力。

(4) 人员操作与技术应用要求存在明显脱节

部分操作人员对光学瓦斯监测仪器的复杂操作流程掌握不熟练，导致仪器调试不到位、测量数据偏差。对于无线传感器网络这类新兴技术，施工人员缺乏基础的网络维护知识，无法及时排查节点故障与数据传输异常。另外，部分施工单位对监测预警技术的培训流于形式，人员对预警阈值设定、报警响应流程理解不深，在实际监测中常出现误判、漏判现象，致使预警系统难以发挥应有的安全防护作用。

3 公路隧道施工中瓦斯气体监测与预警技术应用的有效策略

(1) 研发复合传感与自适应技术，攻克环境适配难题

为解决复杂施工环境对监测技术的干扰，应着力研发复合传感与自适应技术。将光学、催化燃烧、红外吸收等多种传感技术集成于同一监测设备，利用不同技术的优势互补，减少单一技术的局限性。例如，通过光学传感技术获取高精度基础数据，结合催化燃烧传感技术的快速响应能力，实时修正测量结果。引入自适应算法，针对隧道内的机械振动、潮湿空气流动等干扰因素，对监测设备进行动态补偿。如在光学瓦斯监测设备中，利用惯性传感器感知振动数据，通过算法自动调整光干涉路径，确保测量精度不受环境变化影响，提升监测技术在复杂环境下的稳定性与准确性。

(2) 构建智能化设备全生命周期管理体系

构建智能化设备全生命周期管理体系是保障设备可靠性的关键。在设备采购阶段，运用大数据分析市场上各类监测设备的性能参数、用户评价及故障率，建立科学的选型评估模型，优先选择抗干扰能力强、稳定性高且具备远程运维功能的设备。在设备使用过程中，通过物联网技术为每台设备安装智能芯片，实时采集设备运行状态数据，如工作电压、温度、数据传输频率等。当无线传感器网络节点电量低于设定阈值时，系统自动触发备件调配流程，并规划最优更换路径。针对红外吸收式监测设备，根据安装环境的震动、温度变化数据，利用机器学习算法自动调整校准周期与校准参数，确保设备长期稳定运行。同时，建立设备数字孪生模型，通过虚拟仿真模拟设备老化、故障等场景，提前制定维护计划，降低设备突发故障风险。

(3) 打造统一数据标准与智能融合平台

实现多技术协同与数据深度融合，需建立统一的数据标准并打造智能融合平台。制定涵盖数据采集频率、格式规范、传输协议、时间同步等全流程的统一标准，确保光学、催化燃烧、红外吸收等不同原理的监测设备数据能够无障碍交互。搭建基于云计算与边缘计算的智能数据融合平台，在隧道现场利用边缘计算节点对原始数据进行初步处理与筛选，减少数据传输压力。在云端运用大数据分析 with 人工智能技术，对多源数据进行深度挖掘与关联分析。例如，通过深度学习算法建立瓦斯浓度时空变化预测模型，结合地质勘探数据、施工进度数据以及实时监测数据，提前预判瓦斯浓度变化趋势，并生成可视化分析报告，为施工决策提供科学依据，构建全面、精准的监测预警体系。

智能融合平台应用案例表

项目名称	贵州某特长瓦斯隧道	重庆千厮门隧道	港珠澳大桥沉管隧道	广西贺巴高速隧道群
技术架构	边缘计算节点（激光甲烷传感+红外光谱）+云端 LSTM 预测模型	多源异构数据融合（TGS 声发射+催化燃烧传感器）+UWB 定位联动	云边协同架构（边缘端数据清洗+云端三维可视化）	5G+AIoT 平台（分布式光纤测温+红外成像）
数据标准应用	采用 JT/G/T 3374-2020 附录 H 传输协议，采样频率 1Hz，时间同步精度 ≤10ms14	自定义 JSON 接口规范，兼容煤矿/铁路隧道历史数据	参照交通运输部安全监测技术要求，建立元数据管理库	制定企业级《隧道监测数据白皮书》，实现与 BIM 系统对接
预警成效	误报率 0.5%，突涌预警提前 15 分钟	人员撤离响应时间 45 秒，突出事故零发生	预测误差 < 3%，能耗降低 22%	监测盲区减少 80%，设备自诊断准确率 92%
规范符合性	满足规范 7.3 条监测要求	符合 JT/T XXXX-20XX 架构标准	通过 ISO 15839 认证	适配《公路施工安全监测要求》

(4) 实施分层分类精准化培训体系

针对人员操作与技术应用要求脱节的问题，实施分层分类精准化培训体系。对于一线操作人员，开发标准化操作培训课程，采用“理论知识+三维虚拟仿真操作+实地演练”的培训模式，重点培训光学瓦斯监测仪器的调试校准、无线传感器网络节点的安装维护、催化燃烧式监测设备的元件更换等基础操作技能。对于技术管理人员，开设高级技术研修班，涵盖监测预警技术前沿发展、数据建模分析、系统优化设计等课程，提升其对监测系统的管理与创新能力。定期组织全员参与的应急演练，模拟瓦斯浓度超标、设备故障等多种突发场景，通过情景模拟与复盘总结，强化人员对预警阈值设定、报警响应流程、应急处置方案的熟悉程度。建立培训效果评估与反馈机制，根据人员岗位需求与学习进度，动态调整培训内容与方式，确保培训工作切实提升人员专业素养。

(5) 部署智能巡检与预测性维护系统

部署智能巡检与预测性维护系统可有效降低设备故障风险。利用搭载高清摄像头、多种传感器的无人机、巡检机器人等智能设备,按照预设的巡检路线与时间间隔,对隧道内的监测设备进行全方位巡检。通过图像识别技术检测设备外观损坏、线路松动等问题,利用振动(如图1所示)、温度传感器获取设备运行参数,结合历史数据与设备运行规律,运用机器学习算法建立设备故障预测模型。当分析发现催化燃烧式监测设备的电流、电压出现异常波动趋势时,系统自动预警并生成包含故障原因、维修建议的诊断报告;针对红外吸收式监测设备的光强变化数据,通过算法判断光路是否存在堵塞、元件是否老化等问题,并提前安排维护工作。同时,建立设备故障案例库,将常见故障现象、处理方法及经验教训进行整理归档,为维修人员提供快速参考,提高故障处理效率,减少设备停机时间。



图1 电机驱动泵设备提供专业振动检测服务

(6) 建立动态风险评估与智能预警优化机制

为增强预警准确性,需建立动态风险评估与智能预警优化机制。综合考虑隧道施工进度、地质构造变化、气象条件波动、设备运行状态等多维度因素,构建基于大数据与人工智能的动

态风险评估模型。利用历史瓦斯浓度数据、地质勘探数据、施工日志等信息,训练风险评估算法,实时评估瓦斯灾害风险等级。根据风险等级,智能调整预警阈值与预警方式,在隧道穿越瓦斯富集区域或施工扰动较大阶段,降低预警阈值,采用声光报警、短信推送、APP弹窗等多种方式提高预警强度。在地质条件稳定、瓦斯浓度较低阶段,适当提高预警阈值,减少误报干扰。定期对预警数据进行深度分析,运用数据挖掘技术找出预警成功与失败的关键影响因素,优化预警模型与算法,不断提升预警系统的准确性、及时性与可靠性。

(7) 推动多方协同与应急联动机制建设

推动施工单位、监测设备供应商、科研机构、应急管理部门等多方协同合作,建立完善的应急联动机制。施工单位与监测设备供应商建立紧密的技术合作关系,供应商为施工单位提供设备远程技术支持、定期维护保养服务,并根据现场使用反馈优化设备性能;与科研机构合作开展瓦斯监测预警技术的联合攻关,将前沿科研成果快速转化为实际应用。制定统一的应急联动预案,明确各方在瓦斯事故应急处置中的职责与分工。当监测预警系统发出警报后,施工单位立即启动现场应急响应,组织人员疏散、采取通风降温等措施;监测设备供应商迅速提供设备故障排查与修复支持;科研机构利用专业知识提供技术分析与决策建议;应急管理部门协调消防、医疗等外部救援力量,实现信息共享、资源整合与协同作战,最大限度降低瓦斯事故造成的损失,保障施工人员生命安全与工程顺利推进。

总而言之,公路隧道施工是一项比较复杂的系统工程,为了确保工程建设的施工工期、质量和安全,需要加强对瓦斯含量进行监测,根据监测值动态优化施工方法,以此达到预期的建设效果,为公路隧道施工安全筑牢坚实防线。

参考文献:

- [1] 罗利,李岩松,蔡金生,等.复杂地质条件瓦斯隧道有害气体检测研究[J].建筑安全,2024,39(10):73-77.
- [2] 何晓东.高瓦斯隧道施工中有毒有害气体的分析[J].工程建设与设计,2024,(18):31-33.
- [3] 王辉,张廷睿,周生仪,等.高原瓦斯隧道“风帘+巷道式”通风方案应用研究[J].安全与环境学报,2024,24(11):4306-4315.
- [4] 罗程太.穿越煤系瓦斯地层隧道施工安全技术研究[D].昆明理工大学,2024.
- [5] 陈治宇,杨枫,谢可,等.3车道瓦斯隧道通风流场及瓦斯运移规律研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(05):1029-1044.