

# 长距离隧洞施工期有害气体监测与预警机制研究

朱江旭 潘登登

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 本文以向家坝灌区北总干渠鸡冠岭隧洞为研究对象,结合现代物联网、RFID定位、智能传感与信息化管理技术,系统构建了一套集“实时监测—智能预警—应急响应—人员定位—物资保障”于一体的有害气体监测与预警机制。研究内容包括:有害气体的来源与危害特性分析、智能监测系统的架构设计、多系统融合的预警响应机制、现场标准化建设对安全体系的支撑作用。结果表明,该机制显著提升了隧洞施工安全管理水平,实现了从“被动应对”向“主动防控”的转变,为类似工程提供了可复制、可推广的技术路径与管理范式。

**关键词:** 长距离隧洞;有害气体;智能监测;预警机制;RFID定位;应急响应;安全信息化

## 引言

近年来,我国在“交通强国”“水利现代化”“能源安全”等国家战略推动下,长距离隧洞工程数量激增。此类工程穿越复杂地质构造带,常伴随高地应力、高水压、断层破碎带及有害气体释放等多重风险。其中,有害气体积聚是隧洞施工中最隐蔽、最致命的安全隐患之一。传统隧洞施工中,有害气体监测多依赖人工手持式检测仪进行定时巡检。该方式存在检测频次低、覆盖范围有限、数据滞后、人员暴露风险高等问题,难以满足现代大型隧洞工程对“全天候、全覆盖、全要素”安全管控的要求。一旦发生气体超限或突发泄漏,极易引发中毒、窒息、爆炸等重大安全事故。因此,构建一套科学、高效、智能的有害气体监测与预警机制,已成为保障长距离隧洞施工安全的核心课题。

## 1 长距离隧洞有害气体来源与危害特性

### 1.1 有害气体主要类型及来源

长距离隧洞施工中,有害气体产生有地质与工艺双重属性。CO源于爆破残留、内燃机械尾气及火灾隐患,无色无味,易致中毒。H<sub>2</sub>S多见于含硫或有机质富集地层,低浓度有臭鸡蛋味,高浓度致“闪电式死亡”<sup>[1]</sup>。CH<sub>4</sub>(瓦斯)来自煤层气等逸出,虽无毒但爆炸极限宽,易爆炸。隧洞通风受限,氧气浓度可能降至19.5%以下致缺氧窒息。丙烷等可燃气体也可能积聚,加剧风险。

### 1.2 危害特性与风险等级

有害气体危害具隐蔽性、快速扩散性与高致死率。多数气体无色无味,难靠感官识别,人工巡检易漏检;在隧洞内,气体可迅速扩散并积聚;高浓度暴露致死快,救援时间短。这些气体均被列为高风险因子,风险等级与浓度、暴露时间、防护及应急响应相关。需建立

“早发现、早预警、早处置”的防控机制。

## 2 长距离隧洞施工期有害气体监测系统架构

基于项目实践,构建“四系统融合”的智能监测体系(见图1):

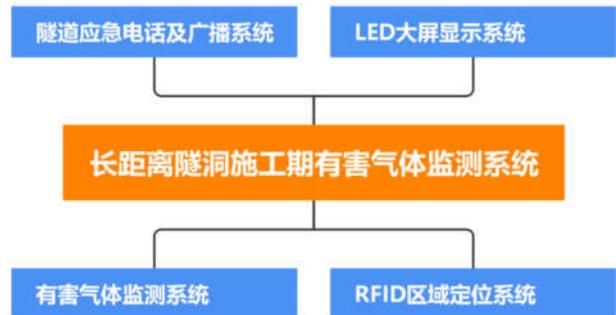


图1 长距离隧洞有害气体系统组成

### 2.1 有毒有害气体监测系统

有毒有害气体监测系统是整个智能监测体系的核心感知层,承担着对隧道内空气质量的连续、自动监测任务。系统通过部署在隧道内部的气体传感器,实时采集一氧化碳(CO)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)、甲烷(CH<sub>4</sub>)及氧气(O<sub>2</sub>)等关键气体的浓度数据,并将其转换为标准电信号(如4~20mA或RS485)进行传输。传感器布设遵循“均匀覆盖、重点加密”原则,沿隧道轴线每50至100米设置一个常规监测点,在掌子面、通风死角等高风险区域则进一步加密布设,确保无监测盲区<sup>[2]</sup>。一旦检测到气体浓度超过预设安全阈值(例如CO浓度高于24ppm、H<sub>2</sub>S超过10ppm、CH<sub>4</sub>达到1%LEL或O<sub>2</sub>低于19.5%),系统将立即触发声光报警,并通过网络将超限信息实时推送至洞口值班室的监控终端。同时,所有监测数据均被自动存储,支持后续的趋势分析、历史回溯与风险评估,为安全管理决策提供数据支撑。



图2 有毒有害气体监测系统

### 2.2 RFID区域定位系统

RFID区域定位系统通过在施工人员安全帽内嵌入UHF频段的RFID芯片，并在隧道内部布设读写器阵列，实现对人员位置的高精度动态追踪。该系统定位精度可达10至30厘米，能够准确识别人员所处的具体区段。系统不仅可实时显示洞内人员的姓名、工种、进洞时间及当前分布状态，还能与气体监测系统深度联动：当某一区域发生气体超限报警时，系统自动锁定该区域内所有人员信息，并在管理端弹出撤离提示，辅助指挥人员快速下达疏散指令。在突发灾情发生后，该系统还能为应急救援提供关键的位置信息，显著提升被困人员的定位效率和救援成功率，是保障人员生命安全的重要技术手段。

### 2.3 隧道应急电话及广播系统

隧道应急电话及广播系统作为现场应急通信的关键通道，由壁挂式应急电话、35W高功率扬声器及爆闪灯光报警器组成，具备高可靠性与强环境适应性。系统支持多种通信模式，包括摘机直通、一键拨号及自动接听，确保在紧急情况下通信不中断。其核心优势在于与气体监测系统的智能联动：一旦监测系统触发报警，广播系统将自动启动，播放预设语音提示，如“XX区域气体超限，请立即撤离！”，同时爆闪灯同步闪烁，形成声、光双重警示，有效提升警报的识别度与响应速度<sup>[3]</sup>。此外，该系统还可与洞外项目部及应急指挥中心实现语音互通，确保内外信息实时同步，为统一调度和协同处置提供有力保障。

### 2.4 LED大屏显示系统

LED大屏显示系统部署于洞口值班室及项目部指挥中心，是整个智能监测体系的可视化中枢。大屏集中展示隧道内各项关键信息，包括实时气体浓度变化曲线、人员分布热力图、最新报警事件列表以及对应的应急预案提示等内容。通过“一屏统管”的设计理念，管理人员无需切换多个界面即可全面掌握隧道运行状态和安全态势，显著提升对突发事件的感知能力与决策效率。该系统不仅强化了日常监控的直观性，也在应急响应中发挥着信息整合与指挥引导的重要作用，是实现智慧工地可视化管理的关键载体。

## 3 预警与应急响应机制设计

### 3.1 分级预警机制的构建逻辑

根据气体浓度与风险程度，设定三级预警机制：

表1 三级预警机制

预警等级	触发条件	响应措施
黄色预警	气体浓度达阈值80%	系统提示，加强通风，增加巡检频次
橙色预警	气体浓度超阈值	自动声光报警，广播提示，暂停非必要作业
红色预警	气体浓度严重超限或快速上升	全员撤离，启动应急预案，关闭电源，启用正压呼吸器

### 3.2 应急响应流程的闭环管理

预警触发后，系统随即启动标准化应急响应流程。首先，气体监测数据与人员定位信息在LED大屏上联动显示，管理人员可迅速掌握事态全貌；其次，应急广播系统自动播放预设撤离语音，爆闪灯同步闪烁，形成多重感官警示；作业人员依据日常培训和现场标识，沿指定路线撤离至安全集结点。与此同时，洞外应急指挥中心启动预案：通风系统全功率运行以稀释有害气体，应急救援小组携带便携式检测仪和正压呼吸器进入排查泄漏源，技术人员调取历史数据进行溯源分析<sup>[4]</sup>。整个过程强调“监测—报警—响应—处置—评估”的闭环管理，确保每一起事件都能得到系统化、规范化的处理，并为后续风险防控提供数据支撑。

### 3.3 应急物资保障体系的协同作用

高效的应急响应离不开坚实的物资保障。项目部在洞外专门设立应急物资库，系统化储备正压式空气呼吸器、便携式气体检测仪、急救药品、担架、防爆照明及通讯设备等关键物资。所有物资均建立台账，实行定期检查与维护制度，确保随时处于可用状态。更重要的是，物资库与洞内智能监测系统实现信息联动：一旦红色预警触发，系统自动向物资管理员发送待命通知，缩短了应急准备时间。这种“监测预警—人员定位—通信指挥—物资保障”四位一体的协同机制，显著提升了整体应急处置能力，为人员生命安全构筑了最后一道防线。

## 4 现场标准化建设对安全体系的支撑

### 4.1 安全体验区对安全意识的内化作用

技术手段的先进性必须与人员安全意识的提升相辅相成。为此，项目部在鸡冠岭隧洞入口处创建了集教育性、体验性与互动性于一体的安全体验区。该区域通过灭火器操作、安全帽撞击、高处坠落模拟、VR有害气体泄漏场景等八项沉浸式体验，让作业人员在“亲身经历”中直观感受违规操作的严重后果。例如，在VR模拟中，作业人员可“亲历”因未佩戴检测仪进入高浓度硫

化氢区域而导致的窒息过程,这种震撼远胜于传统口头说教。截至目前,所有进场人员均已完成体验培训,覆盖率100%。这种“体验—反思—内化”的教育模式,有效将“要我安全”转变为“我要安全”,为智能监测系统的高效运行奠定了坚实的人文基础。

#### 4.2 智能化标识与信息管理的融合实践

在物理环境层面,项目部针对隧洞照明受限、常规警示标识可视性差的问题,创新采用吸光材质警示牌、安全标语射灯及语音提示器等装置。这些设备在正常照明下清晰可见,在突发断电时仍能依靠蓄光材料维持数小时可视性,极大提升了警示效果。同时,项目部推行“帽贴”制度,在每位作业人员的安全帽上张贴包含个人安全信息的二维码。管理人员通过扫码即可实时查验其三级安全教育记录、技术交底情况、岗位操作规程掌握程度及特种作业证件有效性。这种“一人一码、信息随行”的管理模式,不仅提高了巡查效率,更实现了人员资质的动态验证与闭环管理。

#### 4.3 设备与车辆管理的数字化延伸

安全管理体系的覆盖范围进一步延伸至施工设备与运输车辆。项目部为每台设备和车辆生成专属二维码,集成驾驶证、行驶证、保险资料、设备报验信息及维保记录等关键数据。在设备进场或每日作业前,管理人员通过扫码即可完成合规性核查,杜绝无证操作或“带病”设备投入使用。这种从“人”到“机”的全链条数字化管理,有效控制了因设备故障或操作不当引发的次

生风险,使整个施工环境的安全防线更加严密。

### 5 结语

本文依托鸡冠岭隧洞工程,构建并验证了有害气体智能防控机制,集实时监测、智能预警等多种功能于一体。研究显示,融合电化学与催化燃烧传感技术,能高精度连续监测关键有害气体;RFID定位与气体数据联动,让人员安全管理精准到人;应急广播与LED大屏协同,提升了信息传递与指挥决策效率;标准化措施则为技术系统运行提供保障。该机制实现了风险前置、管理精细、响应高效,提升了长距离隧洞施工本质安全水平。未来,可引入人工智能与大数据构建预测模型,实现“趋势预警”;融合5G与边缘计算提升系统鲁棒性。长远看,构建多灾种耦合的数字孪生平台是发展方向,此类防控体系将在重大工程中发挥关键作用。

### 参考文献

- [1]周鹤.深埋长隧洞有害气体的预测分析及防治措施[J].河南水利与南水北调,2023,52(07):139-140.
- [2]蒋裕飞.超长水工隧洞有毒有害气体施工防控技术[J].水电站设计,2022,38(04):60-62+105.
- [3]刘钊涵,钱程,贾澄澄,等.基于GA-BP的隧洞有毒有害气体预测模型研究[J].大坝与安全,2024,(06):46-51.
- [4]董源,赵芹,罗文品.川东北红层地区引水隧洞有害气体形成原因及安全施工对策研究[J].四川水利,2023,44(06):98-101+118.