文章编号：1003－1251(2024)06－0080－05

隧道瓦斯防治综合检测监控技术实践和分析

杨 毅[1]，武 磊[2,3]

(1. 昭通市鲁巧高速公路投资开发有限公司，云南 昭通 657199；2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司，重庆 400037；
3. 煤矿灾害防控全国重点实验室，重庆 400037)

摘 要：云南省鲁巧高速巧家隧道设计瓦斯段落长，瓦斯灾害严重。为确保施工安全，对有毒有害气体进行实时、全覆盖检测监控，采取智能监控系统、人工检测、重点作业重点跟踪检测的综合检测监控安全防控技术手段，结合建立的瓦斯预警管理机制和措施，通过现场实践，比计划工期提前2个月，且瓦斯浓度总体稳定在0.00%～0.16%安全管控范围内，取得了良好的安全和经济效益，对类似隧道具有借鉴意义。

关 键 词：瓦斯预警；检测监控；隧道设计

中图分类号：TD712 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.06.013

Practice and Analysis of Comprehensive Detection and Monitoring Technology for Tunnel Gas Prevention and Control

YANG Yi[1], WU Lei[2,3]

(1. Zhaotong Luqiao Expressway Investment and Development Co., Ltd., Zhaotong 657199, China;
2. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400037, China;
3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China)

Abstract: The design of the Qiaojia Tunnel on the Luqiao Expressway in Yunnan Province has a long gas section and severe gas disasters. In order to ensure construction safety and achieve real-time and full coverage detection and monitoring of toxic and harmful gases, a comprehensive detection, monitoring, and safety prevention and control technology method of intelligent monitoring system, manual detection, and key operation tracking detection has been adopted. Combined with the established gas warning management mechanism and measures, through on-site practice, the construction period has been advanced by 2 months compared to the planned period, and the overall gas concentration has remained stable within the safety control range of 0.00% to 0.16%, achieving good safety and economic benefits, which has reference significance for similar tunnels.

Key words: gas warning; detection and monitoring; tunnel design

瓦斯是一种无色无味的气体，生产实践中无法通过视觉、触觉和味觉辨识，需要通过瓦斯检测仪器来测定瓦斯浓度大小。高浓度瓦斯易引起瓦斯燃烧、爆炸，对安全生产具有极大的破坏性[1-2]。

目前，隧道瓦斯赋存规律难以精准掌握，瓦斯涌出具有突发性，瓦斯浓度与地质条件、通风质量、施工工艺、开挖进度及组织管理等多因素相

收稿日期：2024－04－25

基金项目：重庆市杰出青年科学基金项目(CSTB2022NSCQ－JQX0014)；国家自然科学基金青年基金项目(52204261)；“十三五”国家重点研发计划重点专项(2018YFC0808001)

作者简介：杨毅(1987—)，男，工程师。

关。在瓦斯隧道开挖掘进过程中,围岩平衡被破坏,瓦斯等有毒有害气体涌入开挖空间,将严重影响安全生产、施工进度甚至后期运营质量,该问题已引起监管部门和参建单位的高度重视。

针对隧道瓦斯治理这一关键技术难题,国内外专家学者对其影响因素进行深入研究,取得了一定的实践成果。吴平等[3]针对施工中瓦斯超限的原因进行分析并提出预防措施,但对如何做好提前检测存在局限性。雷帅等[4]针对隧道通风优化可以稀释降低瓦斯浓度进行阐述分析,保障了工作环境安全,但对如何全方位检测监控瓦斯浓度存在模糊问题。

针对上述不足,本文首先对瓦斯来源和涌出赋存规律进行分析,结合工程实践对隧道瓦斯综合检测监控技术进行阐述[5-7],建立瓦斯预警管理机制,完善瓦斯隧道检测监控安全防控技术应用体系。本文方法对类似瓦斯隧道具有借鉴意义。

1　瓦斯来源和涌出赋存规律

瓦斯是历史地质作用的产物,瓦斯的来源和涌出赋存规律与地质条件、构造、岩层等因素息息相关[8-9],不同区域瓦斯的来源和涌出赋存规律也呈现出多源化特点[10-11]。目前,瓦斯来源主要为非煤系地层瓦斯和煤系地层瓦斯。

1)非煤系地层瓦斯来源一般与含气地层有关,如四川盆地,存在油气、天然气。瓦斯涌出具有随机性、不均匀性且相对广泛的特点,气体通过构造、裂隙运移至开挖空间。

2)煤系地层瓦斯来源主要为煤层内赋存瓦斯,瓦斯涌出与煤层瓦斯压力、含量、透气性系数及埋深等因素有关,瓦斯涌出量一般与以上因素成梯度或正向关系。

3)瓦斯超限易出现在隧道揭露煤系地层或其他含气地层期间,瓦斯比空气轻,常积聚在隧道拱部、冒落区等[12-13],瓦斯扩散性很强,如果从一处涌出瓦斯,随着隧道内空气的流动,能扩散到隧道内任何瓦斯容易积聚的位置。

4)结合瓦斯的性质和隧道压入式通风特点,大断面隧道瓦斯会出现自上而下明显的分层分布,同时瓦斯浓度超限出现的时间和空间分布规律表现为:出现时间常发生在施工爆破揭露煤岩层后的一段时间内,出现地点常发生在掌子面附近、拱顶超挖空间、二衬台车、人(车)横通道、硐室及无风或微风作业地点。说明煤系地层或含气地层爆破揭露后,煤岩层中吸附的瓦斯大量解析,在短时间内不能及时稀释和排除。

2　综合检测监控安全防控技术

为实时有效全覆盖检测监控瓦斯等气体,确保有毒有害气体浓度在可管可控范围内,本文提出一套瓦斯隧道综合检测监控安全防控应用技术。

2.1　智能监控系统

智能监控系统集成了传感器技术、数据采集与处理技术、通信技术等,对隧道施工过程中的各种参数进行实时监测和预警,实现瓦斯等气体预警和趋势分析。

2.1.1　智能监控系统原理

智能监控系统由监控中心站、分站、输入、输出设备构成。中心站和分站通过逻辑变换,输出控制信号,断电器通过通电、断电对监控对象进行控制。

传感器连续测定甲烷、硫化氢、一氧化碳等有毒有害气体浓度,超限自动报警,再通过设备开停传感器、馈电断电器对被控设备自动断电。系统可及时准确地对洞内各工作面的瓦斯状况进行24小时全方位监控,达到隧道安全生产的目的。智能监控系统原理如图 1 所示。

2.1.2　智能监控系统结构

1)地面中心站。地面中心站是整个系统的大脑,主要用于设置、实时显示并存储隧道的环境参数。

2)隧道监控分站。监控分站提供电源,并接收数据同步传送到主机。

3)传感器。传感器主要有甲烷传感器、硫化氢传感器、一氧化碳传感器和风速传感器。

智能监控系统结构如图 2 所示。

2.1.3　智能监控系统配置

掌子面开挖,围岩暴露面积大,瓦斯涌出量集中;二衬台车附近,施工作业工序多,通风不畅易造成瓦斯积聚;回风流数据反映隧道总体状况。结合隧道施工工艺,对隧道内智能监控系统进行配置,每个监控单洞不少于 3 组,分别为掌子面、二衬台车和回风流。智能监控系统传感器布置对应如表 1 所示。

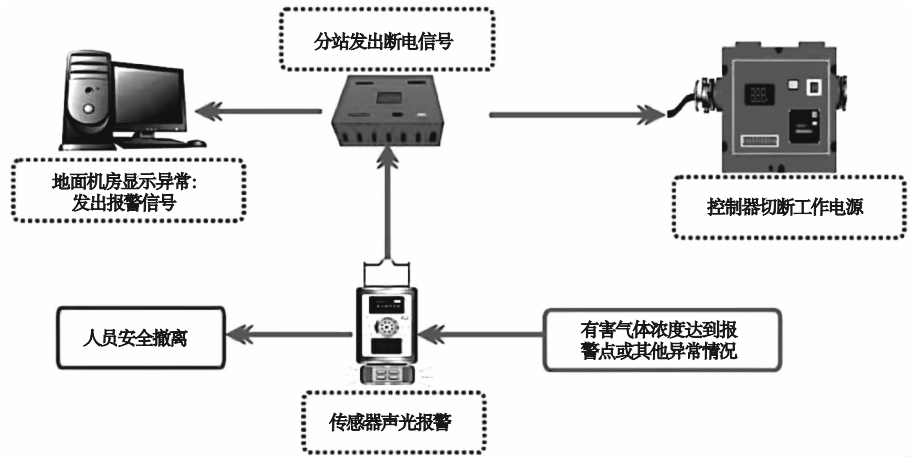


图 1 智能监控系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent monitoring system

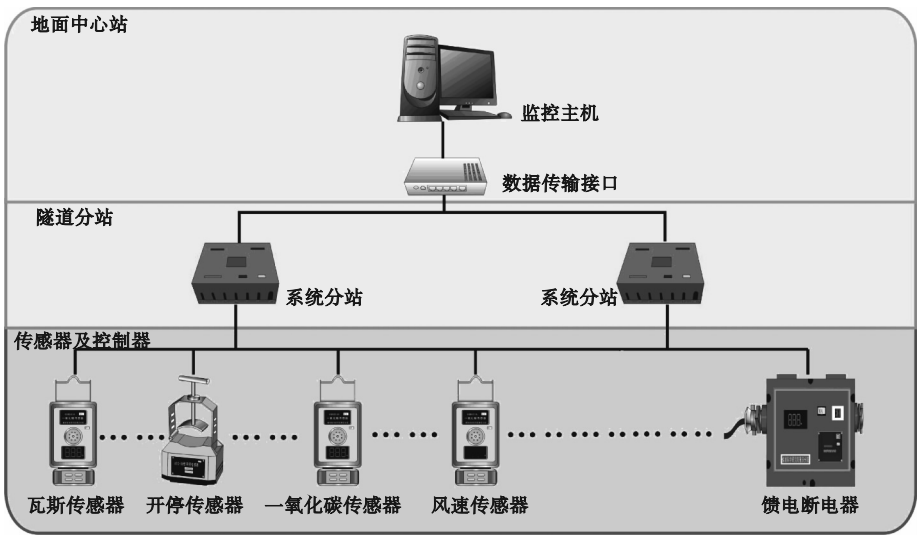


图 2 智能监控系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of intelligent monitoring system

表 1 智能监控系统传感器布置对应表

Table 1 Corresponding table for sensor layout of intelligent monitoring system

类别	布置地点	要求及标准
甲烷传感器	掌子面、衬砌台车、回风流	悬挂在拱顶下 25 cm,悬挂处支护良好,无滴水
硫化氢传感器	掌子面、二衬台车	硫化氢传感器应垂直悬挂在距离隧道底部 1.0 ~ 1.2 m 位置,不影响行人和行车,方便安装、维护工作
一氧化碳传感器	掌子面、二衬台车	一氧化碳传感器应垂直悬挂在隧道拱顶上部,不影响行人和行车,方便安装、维护工作
风速传感器	挂布台车、回风流	安装点前后 10 m 内无分支风流、无拐弯、无障碍、断面无变化

2.2 人工检测

瓦斯检查员对重点区域进行定期检测,不仅是对智能监控系统定点连续监测的精细化补充和验证,还可提高检测的全面性和可靠性,增强对瓦斯浓度变化的响应能力,形成双重保障机制,提供更全面的安全保障。

1)人工检测配置要求。瓦斯检查员属特殊作业,工种需持证上岗,人工检测实行 24 小时三班

轮换制,每次检查结果记入瓦斯检测日报表和检测位置悬挂的瓦斯记录牌,做到“三对口”。

2)人工检测范围。二衬、掌子面等所有工作场所;坍塌的不良地质段;瓦斯异常涌出点;通风盲区和薄弱区。

3)人工检测频率。瓦斯隧道非瓦斯段落和存在少量裂隙瓦斯逸出的微瓦斯工区,日常气体检测的重点是预防瓦斯与设计出现较大误差;低瓦斯工区和高瓦斯工区日常检测的重点是防止施工期间瓦斯浓度偏高或超限;突出工区、动火作业区及异常区域环境复杂,重点跟踪检测。结合规范[1]要求,非瓦斯段落及微瓦斯工区≥1 次/4 h;低瓦斯工区和高瓦斯工区≥1 次/2 h;突出工区、动火作业区及异常区域随时检测。

2.3　动火作业检测

瓦斯隧道内不可避免动火作业时,必须严格执行动火作业审批制度。建立动火作业工作流程;施工前,班组提出申请,瓦斯检查员检测不超限,安全员监督,现场负责人、技术负责人及监理单位签字批准后实施;提出申请后,瓦斯检查员检测瓦斯超限,严禁动火,采用局部通风机吹散,再次检测动火地点周围 20 m 范围内瓦斯浓度不大于 0.5%,并旁站动态检测瓦斯不超限,执行签字审批后施工;动火地点放置灭火器,连接水管等消防灭火措施,以便意外着火时及时扑灭,避免扩大影响范围。

3　瓦斯预警管理机制

通过案例分析可以看出,瓦斯隧道施工过程中如果漏检、疏于管理或检测监控不到位,则易发生瓦斯积聚或超限,存在重大隐患,即使投入瓦斯检测人员和监测监控设备,瓦斯事故常有发生。因此,施工期间应建立隧道瓦斯检测监控预警管理机制,在检测监控到瓦斯浓度异常变化情况时,及时采取有效措施,防范瓦斯事故的发生。

根据检测监控实时数据,结合地方标准[1]和煤炭行业的要求[14],对不同瓦斯浓度检测监控数据进行预警级别划分,实施预警分级管理,将瓦斯浓度检测监控预警级别模糊分级为 4 级,分别为正常、关注、警戒、危险。隧道瓦斯灾害预警级别评价如表 2 所示,表中 φ 表示体积分数。

表 2　隧道瓦斯灾害预警级别评价

Table 2　Evaluation of early warning level for tunnel gas disasters

预警级别	瓦斯参数条件	说明
正常	$\varphi(CH_4)<0.25\%$	瓦斯浓度未发现异常涌出
关注	$0.25\%\leqslant\varphi(CH_4)<0.50\%$	瓦斯测定数值偏高或偶尔出现浓度超限
警戒	$0.50\%\leqslant\varphi(CH_4)<0.75\%$	瓦斯数值达到警戒值或瓦斯浓度波动频繁
危险	$\varphi(CH_4)\geqslant0.75\%$	撤离人员,封闭隧道洞口,禁止入内

瓦斯涌出不仅和地质条件、通风质量等多因素有关,而且具有较强的气体渗透性和扩散性,瓦斯浓度的变化往往呈现不稳定发展趋势,常常具有突发性,一旦误检,易产生不良后果。近几年瓦斯隧道发生的爆炸事故,皆因瓦斯积聚超限遇到火源发生,造成较大的不良社会影响。因此,针对隧道瓦斯灾害发展趋势和预警级别,采取相应的安全措施。隧道瓦斯灾害预警安全措施如表 3 所示。

表 3　隧道瓦斯灾害预警安全措施

Table 3　Safety measures for early warning of tunnel gas disasters

预警级别	安全措施
正常	检测监控数据在安全范围内,保持瓦斯浓度日常安全检测监控及管理
关注	通知现场施工人员关注甲烷传感器监测显示和报警情况,及时分析甲烷浓度偏高或偶尔出现浓度超限原因,并采取预防措施
警戒	通知现场施工人员及时采取警戒措施,上报项目部和总监办等参建单位相关负责人,及时查明甲烷异常涌出的原因并制定抽排瓦斯治理措施
危险	撤离出隧道内全部人员,切断洞内所有电源,项目部和总监办等参建单位相关负责人,及时查明甲烷异常涌出的原因,加强通风、监测,制定完善的、有针对性的抽排瓦斯治理专项方案及应急预案

4 工程实践

4.1 工程概况

鲁巧高速巧家隧道左线长 7 885 m,隧道右线长 7 857 m,属特长隧道。其中进口段左线 ZK62 +499 ~ ZK62 +900,长 401 m;右线 K62 +445 ~ K62 +880,长 435 m;平导 K0 +700 ~ K1 +020,长 320 m。穿过二叠系梁山组煤系地层,围岩破碎,裂隙发育,地质条件复杂。

4.2 防控效果评价

1)2023 年 11 月至 2024 年 3 月,隧道平导穿越煤系地层施工期间,通过调阅智能监控系统数据、查询现场人工瓦斯检测记录,隧道瓦斯浓度总体稳定在 0.00% ~ 0.16%,均低于瓦斯浓度 0.25%,瓦斯浓度未发生预警现象,掌子面瓦斯浓度数据如图 3 所示。

2)2023 年 12 月,隧道揭煤期间,瓦斯浓度与其他月份相比明显呈现增大趋势,项目部通过动态综合检测监控数据,调整施工进度、加强主通风和局部通风机管理,保持瓦斯浓度日常安全检测监控及管理,使检测监控数据稳定在安全可控可管范围内。

3)隧道顺利穿越了煤系地层段落,比计划工期提前了 2 个多月,取得了较好的安全和经济效益。

4)平导顺利揭穿了煤系地层段落且超前于隧道正洞施工,为下一步正洞揭煤和瓦斯治理工作积累了宝贵的现场经验。

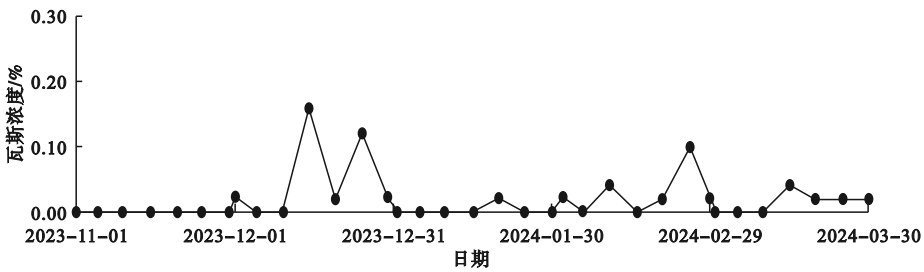


图 3 掌子面瓦斯浓度数据

Fig. 3 Gas concentration on palm face

5 结论

本文通过对隧道掘进过程中瓦斯的来源和赋存规律进行分析,结合隧道施工工艺,总结了瓦斯容易积聚和超限的特点,建立了瓦斯预警管理机制和措施,提出了一套隧道瓦斯防治综合检测监控安全防控应用技术,对隧道内的瓦斯浓度和涌出量进行分析和研判并指导施工,确保了施工环境的安全管控。隧道施工期间还加强瓦斯抽排工作、强化通风管理、应急处理预案等,使检测监控数据稳定在安全控管范围内。通过现场实践,巧家隧道平导穿过煤系地层段落比计划工期提前 2 个月,且瓦斯浓度总体稳定在 0.00% ~0.16% 安全管控范围内,取得了良好的安全和经济效益。

参考文献(References):

[1] 云南省市场监督管理局. 滇东北公路瓦斯隧道施工技术规范:DB53/T 1140—2023[S]. 昆明:云南科技出版社,2023.

[2] 吴平,武磊. 瓦斯隧道穿越突出煤层安全技术研究[J]. 沈阳理工大学学报,2021,40(3):90 -94.
WU P,WU L. Study on safety technology of gas tunnel passing through outburst coal seam[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2021,40(3):90 -94. (in Chinese)

[3] 吴平,武磊. 隧道施工过程中瓦斯超限事故的分析及预防措施[J]. 沈阳理工大学学报,2022,41(3):90 -94.
WU P,WU L. Analysis and preventive measures of gas overrun accident in tunnel construction[J]. Journal of Shenyang Ligong University,2022,41(3):90 -94. (in Chinese)

[4] 雷帅,方勇,刘静,等. 南大梁高速公路华蓥山隧道施工通风优化研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(2):194 -200.
LEI S,FANG Y,LIU J,et al. Research of construction ventilation optimization for Huayingshan tunnel on Nanchong-dazuliangping expressway[J]. Modern Tunnelling Technology,2019,56(2):194 -200. (in Chinese)

[5] 范红伟,杨涛. 基于 CFD 模拟的采空区瓦斯分布规律研究[J]. 煤炭技术,2022,41(2):113 -116.
FAN H W,YANG T. Research of gas distribution law in goaf based on CFD simulation[J]. Coal Technology,2022,41(2):113 -116. (in Chinese)

[6] 刘春,杜俊生,郭臣业,等. 大断面瓦斯隧道风筒布置对瓦斯浓度的影响研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(5):114 -121.
LIU C,DU J S,GUO C Y,et al. Influence of air duct arrangement on gas concentration in the large-section gas tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,2019,56(5):114 -121. (in Chinese)

[7] WANG D P,ZHANG P M,ZHANG Y L,et al. Distribution characteristic and migration mechanism of toxic gases in goafs during close-distance coal seam mining:a case study of shaping coal mine[J]. ACS Omega,2022,7(8):7403 -7413.

(下转第 90 页)