

文章编号: 1674—8247(2024)04—00106—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.019

川西高原某隧道幔源气逸出机理及防控研究

张夏临^{1,2} 冯涛² 孟少伟²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 川西高原地区特殊的构造和岩性为幔源气提供了赋存环境。本文针对幔源气成因、出气段落超前地质预报探测原则、检测与监测进行了阐述,总结了幔源气出气段工作思路:(1)辨识幔源气类型及其不同浓度下的危害;(2)树立“物钻结合,长短结合”的超前地质预报理念;(3)加强气体的检测与监测,加强幔源气的通风管理。通过以上探测及防控手段,实现了对岩浆岩幔源气的可防可治,保证了施工安全。研究成果可为类似地质背景环境的隧道施工提供针对性探测及防控思路。

关键词: 川西高原; 幔源气; 超前地质预报; 检测与监测; 安全防控

中图分类号: U45; P618.13

文献标志码: A

Research on the Mechanism of Mantle-derived Gas Emission and Prevention & Control Measures in a Tunnel in the Western Sichuan Plateau

ZHANG Xialin^{1, 2} FENG Tao² MENG Shaowei²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The distinctive structure and lithology of the western Sichuan Plateau offer an occurrence environment for mantle-derived gas. This paper delves into the origin of mantle-derived gas, the advanced geological prediction principles for gas emission sections, as well as detection and monitoring methods. The working strategies for gas emission sections are summarized as follows: (1) Identifying the type of mantle-derived gas and assess its hazards under varying concentrations. (2) Combining geological surveys with drilling and long-range with short-range prediction. (3) Enhancing gas detection and monitoring, as well as ventilation management for the emission of mantle-derived gas. These detection and prevention measures enable the prevention, control and mitigation of magma-derived mantle gas, thereby ensuring construction safety. The research findings can offer targeted detection and prevention strategies for tunnel construction in similar geological settings

Key words: western Sichuan Plateau; mantle-derived gas; advanced geological prediction; detection and monitoring; safety prevention and control

非煤有毒有害气体通常以甲烷(CH_4)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)、二氧化硫(SO_2)

等气体为主^[1]。随着近年来西部铁路事业的蓬勃发展,长大深埋隧道揭示有毒有害气体的工点逐渐增多,非

收稿日期: 2023-12-22

作者简介: 张夏临(1978-),男,高级工程师。

引文格式: 张夏临,冯涛,孟少伟. 川西高原某隧道幔源气逸出机理及防控研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 106-110.

ZHANG Xialin, FENG Tao, MENG Shaowei. Research on the Mechanism of Mantle-derived Gas Emission and Prevention & Control Measures in a Tunnel in the Western Sichuan Plateau[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 106-110.

煤系有毒有害气体出气类型中幔源气出气占绝大多数。幔源气具有不稳定性、窒息性、复杂多样性、高浓度性、随机性、高危害性等特征,探测难度极大。幔源气安全岩盘一旦被击穿,将造成严重的后果,如成昆线沙木拉达隧道有害气体突涌^[2]、达成线炮台山隧道气体爆炸^[3-5]、大临铁路红豆山隧道高压幔源气 H₂S 爆突^[6]。川西高原某隧道位于四川盆地及青藏高原之间,受青藏高原隆升影响,构造条件复杂,有害气体孕育背景特殊。区域内岩浆岩受区域构造影响具有分布面积广,纵向深度大的建造特征,幔源气往往在岩浆岩内赋存。地壳深处含有大量 CH₄、CO₂、氢气(H₂)、氨气(NH₃)等各类原生气体,气体与灼热的岩浆相混溶,与岩浆一起运动。随着岩浆上升,温度、压力下降,一部分气体从溶解状态中解析出来成为游离相,此时气体的释放速度和释放量很小,可能以孤立的气泡形式发生运移;随着温、压的进一步降低,气体的释放速度和量逐渐增大,成为串珠状;地壳浅层处,释放出的更多气体可汇成气流逸出。川西高原某隧道施工期间揭示了高浓度 CO₂,气体逸出具有偶发性及随机性,预报探测难度大,一旦大量逸出极易造成窒息。本文旨在研究川西高原某隧道建设期气体预报探测方法、检测与监测方案,以期为类似地质条件的隧道提供借鉴。

1 隧道概况

该隧道为单洞双线隧道,全长 26 474.5 m,最大埋深超过 1 800 m。隧道设 1 座贯通平导,4 座横洞。隧道整体位于大渡河西岸,属构造剥蚀中高山-高山峡谷地貌。隧道所处区域下伏基岩较杂乱,不同期次侵入。隧址区地层岩性主要为晋宁-澄江期花岗岩,岩石抗压强度 60~120 MPa。隧道处于鲜水河构造带、龙门山构造带、川滇南北向构造带三大构造体系交汇部位,偏于龙门山构造带一侧。洞身穿经断层 13 条,其中区域断裂 2 条,一般断层 11 条。复杂的地层岩性及地质构造背景,为幔源气的形成、流通及局部段落富集提供了条件。该隧道位于活动断裂夹持区,岩体隐伏结构面及构造节理密集发育,同时隧道位于高地应力区,有害气体沿节理、裂隙通道缓慢渗透并赋存。

2023 年 10 月 22 日,2 号横洞平导大里程已开挖 1 734 m,在 PDK 234+055(埋深约 1 044 m)处,在施作炮孔过程中,拱顶及右侧拱腰共 3 个炮孔有不明气体逸出,且有明显压力。现场测试拱顶炮孔气压为 0.42 MPa,风速为 14.7 m/s;取样在隧道外进行模拟燃爆试验,结果显示气体样品不可燃,涌出气体无异

味。掌子面已经施作完成 20 个炮眼,仅 3 个炮眼出气,其余 17 个炮眼未发生气体突涌。

2 气体采集及分析结果

该隧道 2 号横洞平导大里程逸出气体后,对气体进行取样并进行样品检测。检测结果如表 1~表 4 所示。检测结果显示,不明气体成分组分复杂,有 CH₄、CO、CO₂、NH₃ 和氮氧化物(NO₂)等。值得注意的是,检出了幔源气标志性气体氦气(He),但主要以 CO₂ 为主,炮孔口浓度含量在 90%以上,未发现可燃、可爆气体。在 10 月 30 日的检测报告中,发现了 He、NH₃ 等幔源气标志性气体。高浓度 CO₂ 气体虽然本身无毒性,不自燃或助燃,但是在浓度达到 5%以上可造成窒息,甚至永久性脑损伤死亡^[7]。因此仍然具有较高安全风险。

表 1 2023 年 10 月 24 日测试结果表

气体组分	含量
O ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	0.59
N ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	9.11
CH ₄ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
乙烷 CH ₃ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
丙烷 C ₃ H ₈ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
CO ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	90.30
硫化氢 H ₂ S/(10 ⁻⁶ mol/mol)	0.00
CO/(10 ⁻⁶ mol/mol)	3.00

表 2 2023 年 10 月 25 日测试结果表

气体组分	含量
O ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	0.79
N ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	4.24
CH ₄ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
CH ₃ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
C ₃ H ₈ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
CO ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	94.97
H ₂ S/(10 ⁻⁶ mol/mol)	0.00
CO/(10 ⁻⁶ mol/mol)	1.00

表 3 2023 年 10 月 26 日测试结果表

气体组分	含量
O ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	0.34
N ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	2.45
CH ₄ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
CH ₃ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
C ₃ H ₈ /(10 ⁻² mol/mol)	0.00
正丁烷/(10 ⁻² mol/mol)	0.00
异丁烷/(10 ⁻² mol/mol)	0.00
正戊烷/(10 ⁻² mol/mol)	0.00
己烷及更重组分 C ₆ */(10 ⁻² mol/mol)	0.00
CO ₂ /(10 ⁻² mol/mol)	97.21
硫化氢/(10 ⁻⁶ mol/mol)	0.00

表 4 2023 年 10 月 30 日测试结果表

样品号	CO ₂	CH ₄	CO	CO ₂	NH ₃	He
	/(10 ⁻² mol/mol)	/(10 ⁻⁶ mol/mol)				
Q1	91.79	27.4	2.4	0.1	7.7	12.3
Q2	90.49	11.3	0.2	0.0	2.1	14.6
Q3	92.34	32.5	7.1	0.1	4.2	11.1
Q4	91.18	15.6	2.1	0.1	4.3	12.1

自掌子面出气后,针对掌子面采用有毒有害气体自动监测仪进行连续监测,逸出气体主要为 CO₂,其浓度随时间变化曲线如图 1 所示。

3 气体成因及预测分析

3.1 成因分析

隧道主要岩性为岩浆岩。该段构造背景特殊复

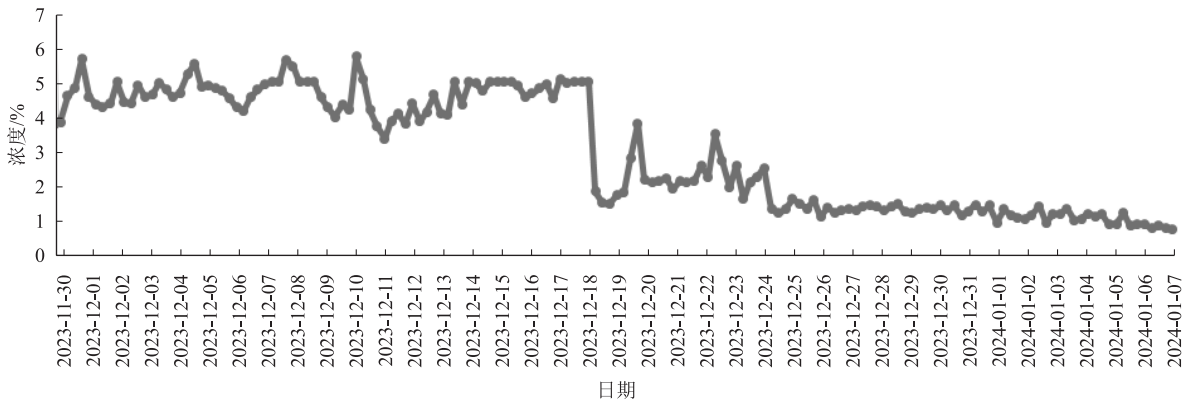


图 1 CO₂ 浓度随时间变化曲线图

杂,施工揭示小微隐伏构造较发育且具有隐蔽性和无规律性,且岩浆岩多期次侵入,岩性混杂多变。有害气体样本检测结果显示,主要以 CO₂ 为主,其次含少量 CO、N₂、CH₄、He、NH₃。据此可判断有害气体为岩浆岩幔源气,气体储存形式为结构面发育地段聚集形成封闭高压裂隙气。特殊复杂的构造背景和多期次岩浆岩侵入及变质过程,为有害气体提供了特殊的孕灾环境。隧道幔源气赋存条件复杂多样,逸出、涌出方式具有相当的不确定性。在施工过程中揭露、击穿储气气囊或高压裂隙时,气体才会逸出,因此该气体具有偶发性和随机性的特点。

3.2 气体逸出预测

截至 2023 年 12 月 30 日,与该隧道地层岩性、地质构造背景相似的其他 5 座隧道中均未出现气体逸出现象。该隧道气体浓度随时间具有明显的衰减趋势,因此预测气体主要赋存于封闭裂隙中。气体集中富集段隧道埋深较大,气体为高压裂隙气,在裂隙通过后,气体也随之排泄完成;通过出气段落,加强监测检测,针对出气集中部位采取集中接管引排等安全防范措施。

隧道掘进通过裂隙段后,气体出现明显消减,经集中引排,至 2024 年 1 月气体已经不再逸出。预测出气部位和气体逸出状态与实际揭示情况基本一致。

4 幔源气防控技术

依托隧道非煤系地层隧道气体逸出案例,应加强对气体的超前地质预报、检测监测以及防控。从依托隧道揭示情况看,幔源气气体类型、浓度、逸出部位、涌出压力等具有不确定性,最好的防控方式就是及时发现、加强检测监测并及时采取措施。

在该隧道施工发生气体逸出事件后,及时调整了超前地质预报方案、检测与监测方案,加强了工程措施,取得了良好的效果。

4.1 超前地质预报

针对隧道 TSP 成果,按照“物钻结合,长短结合”的超前地质预报理念,增加地质雷达,并针对掌子面出气部位进行钻孔,加快气体排泄。充分利用物探、钻探等超前预报手段,结合勘察成果和现场气体监测成果,预测高压封闭气体的赋存位置^[8-9]。

4.1.1 明确赋存条件

通过隧道出气部位综合分析得出,勘察期间揭示的物探视电阻率Ⅳ类、Ⅴ类封闭异常、煤系地层、断层、节理密集带、背斜及向斜核部等地段可能赋存高压气体。充分利用施工期物探、钻探等超前预报手段,结合勘察期间成果和现场气体监测成果,预测高压封闭气体的赋存位置。

4.1.2 物探

针对可能赋存高压封闭气体的地段,宜实施地质雷达,结合 TSP 探测成果通过“长短结合”策略综合判断气体异常体可能分布的位置。首先通过 TSP 判识纵波明显下降或者反射界面集中的段落,先行洞拉通,后行洞针对性实施地质雷达探测,对裂隙段落进行进一步查明。

4.1.3 钻探

若物探发现隧道影响区域有节理密集带、断层影响带或空腔等异常体,应采用机械化设备施做超前靶向探孔,进一步查明高压气体的具体位置与特征。施工过程中一旦进入可能赋存高压气的段落,或施工过程中出现过气体喷涌、逸出的段落,应采用机械化设备实施“长短结合”的超前钻孔策略,原则上实施 1 孔超前钻孔,单线隧道及辅助坑道每循环加深炮孔不少于 3 孔,双线隧道每循环加深炮孔不少于 5 孔,并根据幔源气检测监测结果动态调整超前钻孔和加深炮孔的位置和数量。所有超前钻孔、加深炮孔、炮孔、管棚、锚杆等钻探作业均需采用机械化设备,不可采用人工实施,以避免幔源气突涌造成安全事故。超前水平钻孔布置如图 2 所示。

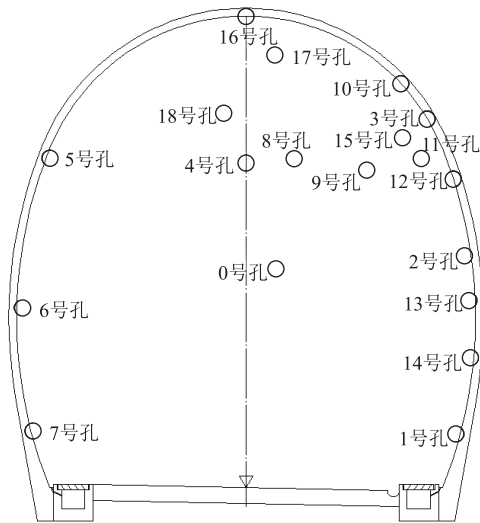


图 2 超前水平钻孔布置图

4.2 检测与监测

现场出现气体后采用重庆大学自主研发的“六合一”多气体综合检测仪,进行各种幔源气气体的检测,采集气样同步进行室内气体成分分析,准确查明各种幔源气气体成分、浓度、压力。现场对出气孔和掌子面开展气体长期监测,包括气体成分、浓度、压力等参数。

4.3 工程措施

针对幔源气气体的潜在危险,最关键且最有效的工程措施为通风,同时开展相应安全监测与防护。

4.3.1 通风

针对隧道 2 号横洞贯通平导大里程建立通风检查、检测及监测的组织系统和管理制度,及时测定风速、风量、浓度。结合 CO₂ 浓度实时数据,及时增强了风机及风管的通风能力。由于该段除 2 号横洞贯通平导大里程外,还有贯通平导小里程、正洞大里程、正洞小里程 3 个开挖面,因此各开挖工作面采用独立通风,防止任意两个工作面之间出现串联通风现象。

4.3.2 安全监测及防护要求

鉴于 CO₂ 浓度介于 0.79% ~ 5.74% 之间,风险等级为中等 ~ 极高。因此,按照极高风险等级进行施工安全监测。除洞内观察、净空收敛、风速、有害气体浓度等常规监测项目外,同时开展了围岩压力、喷射混凝土应力等专项监测项目。有害气体监测采用自动监测与人工监测相结合的方法。有害气体自动监测断面在开挖作业的掌子面、风管出风口后方作业台架、回风巷等位置均进行布置,每个断面设置 5 个监测点,分别为拱顶 1 个,两侧拱腰各 1 个,两侧基底以上 1.5 ~ 2.0 m 位置各 1 个。由于 CO₂ 密度大于空气密度,易在基底富集,气体自动监测探头主要布置在拱腰和拱脚位置。O₂ 监测探头和回风巷的风速监测探头布置在拱顶、拱腰和拱脚位置。人工监测频次按 6 h/次计。

4.3.3 安全防护

集中出气段落结构设防段采用复合式衬砌。结构设防段初期支护喷射混凝土应拱墙、仰拱(底板)全环设置,厚度不小于 10 cm,不低于 C25 强度等级。结构设防段二次衬砌结构厚度不应小于 40 cm,混凝土透气系数不应大于 10⁻¹¹ cm/s。设置全封隔离层。

5 结论

本文以川西高原某隧道出气为例,通过对气体成因分析和气体危害程度评价,明确了超前地质预报方案、检测与监测方案以及工程防控重点,得到主要结论如下:

(1) 构造背景复杂多期次岩浆岩侵入带附近,幔源气存在赋存条件,其逸出、涌出方式具有不确定性,无明显规律。在施工过程中揭露、击穿储气裂隙时,气体才会逸出,因此气体具有隐蔽性、偶发性和无规律性的特点。

(2) 针对长大深埋复杂隧道具备非煤有毒有害气体出气风险的段落,应充分利用物探、钻探等超前预

报手段,结合勘察成果和现场气体检测监测成果,预测高压封闭气体的赋存位置,贯彻“物钻结合,长短结合”的超前地质预报理念。

(3)对非煤系有毒有害气体隧道,有效通风是降低安全风险的重要手段。应加强管理,提高参建人员对非煤有毒有害气体的认识。针对风险段落按要求做好气体检测与监测,将高浓度气体集中引排至洞外,同时加强支护强度。

参考文献:

[1] 陈伟,杜宇本,蒋良文. 综合超前地质预报在玉磨铁路复杂地质隧道的运用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 42-48.
CHEN Wei, DU Yuben, JIANG Liangwen. Application of Comprehensive Advance Geological Prediction in Tunnels with Complex Geological Conditions of Yuxi-Mohan Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 42-48.

[2] 苏培东,廖军兆,王奇,等. 四川盆地龙泉山含油气构造浅层天然气对隧道工程危害研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1287-1293.
SU Peidong, LIAO Junzhao, WANG Qi, et al. Harm to Tunnel Engineering Due to Gas in Shallow Oil-gas Structures at Longquan Mountains [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1287-1293.

[3] 黄润秋,王贤能,唐胜传,等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997(1): 51-69.

HUANG Runqiu, WANG Xianneng, TANG Shengchuan, et al. Study on the Main Geological Hazards of Deep-buried Long Tunnel Excavation [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997(1): 51-69.

[4] 闫光明. 炮台山隧道施工中的瓦斯治理[J]. 铁道建筑技术, 1995(4): 21-24.
YAN Guangming. Gas Treatment in Construction of Paotai Shan Tunnel [J]. Railway Construction Technology, 1995(4): 21-24.

[5] 闫光明. 应加强对非煤系地层中瓦斯的防治[J]. 铁道建筑技术, 1994(5): 44.
YAN Guangming. Strengthen Prevention of the Gas in Non-coal Strata [J]. Railway Construction Technology, 1994(5): 44.

[6] 卞国忠. 炮台山隧道天然气的地质条件[J]. 科学技术通讯, 1995(1): 1-4.
BIAN Guozhong. Geological Conditions of Gas in Paotai Shan Tunnel [J]. Communications of Science and Technology, 1995(1): 1-4.

[7] 陈浩栋. 大临铁路红豆山非煤系隧道有害气体成因机制与防治技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
CHEN Haodong. Study on Formation Mechanism and Prevention Technology of Harmful Gas in Hongdoushan Non-coal Tunnel of Dalin Railway [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[8] TB 10027-2022 铁路工程不良地质勘察规程[S].
TB 10027-2022 Specification for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering [S].

[9] Q/CR 9217-2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S].
Q/CR 9217-2015 Technical Specification for Geological Prediction in Advance of Railway Tunnel [S].

(上接第75页)

化研究和设计,有待设备制造商按照方案标准进行设备研发制造,有待于现场测试验证结果,有待铁路相关行业标准规划制定,并通过不断研究总结和创新,降低铁路建设、改造、维护成本。

参考文献:

[1] 钟章队. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)无线网络规划与优化[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2012.
ZHONG Zhangdui. Wireless Network Planning and Optimization of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2012.

[2] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[3] TB 10088-2015 铁路数字移动通信系统(GSM-R)设计规范[S].
TB 10088-2015 Code for Design of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [S].

[4] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S].

[5] 丁珣. 高速铁路 GSM-R 网络直放站覆盖区段网络优化[J]. 高速铁路技术, 2016, 51(2): 29-35.

DING Xun, Network Optimization of GSM-R Network Repeater Coverage Section of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 51(2): 29-35

[6] TZJ 3001-2017 铁路基本建设工程设计概(预)算费用定额[S].
TZJ 3001-2017 Railway Capital Construction Project Design Estimate (Budget) Cost Quota [S].

[7] TG/01-2014 铁路技术管理规程[S].
TG/01-2014 Railway Technical Management Regulations [S].

[8] 成凌飞,张薇静,焦晓龙,等. 天线选型对隧道中电磁波传播的影响[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9): 20-23.
CHENG Lingfei, ZHANG Weijing, JIAO Xiaolong, et al. Influence of Antenna Selection on Electromagnetic Wave Propagation in Tunnels [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(9): 20-23.

[9] 王惠生. 900 MHz 频段电波在山区隧道的覆盖特性和应用设计[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 94-98.
WANG Huisheng. Coverage Characteristics and Application Design of 900 MHz Frequency Band in Mountain Tunnels [J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 94-98.

[10] TB 10430-2014 铁路数字移动通信系统(GSM-R)工程检测规程[S].
TB 10430-2014 Specification for Engineering Test of Railway Digital Mobile Communication System (GSM-R) [S].