

文章编号: 1674—8247(2025)02—0110—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.018

市域(郊)铁路成眉线地下工程浅层天然气分布 特征及评价研究

任 云¹ 陈明浩¹ 邱 鹏² 张培盛³ 陈兴海¹ 许晓君¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南石油大学, 成都 610500;
3. 四川成眉轨道交通有限公司, 成都 610041)

摘 要:市域(郊)铁路成眉线(S5)眉山城区段地下区间位于盐井沟气田圈闭范围内,浅表地层具备受油气浸染的条件,且浅层天然气对盾构隧道的施工运营影响巨大。通过有害气体全孔检测方案以及创新性的分层检测方案,分别揭示出眉山城区段地下区间浅层天然气在线路纵向与高程的分布特征,并对区内浅表地层瓦斯富集及运移模式进行分析,据此提出隧道选线建议及防控措施。相关勘察工作对成都平原区类似隧道工程建设具有借鉴意义。

关键词:浅层天然气;勘察;分层检测;富集特征

中图分类号:U212.22; U239.5 文献标志码:A

110

Study on Distribution Characteristics and Evaluation of Shallow Natural Gas in the Underground Engineering of Chengdu-Meishan Suburban Railway (S5) Line

REN Yun¹ CHEN Minghao¹ QIU Peng² ZHANG Peisheng³ CHEN Xinghai¹ XU Xiaojun¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Sichuan Chengdu-Meishan Rail Transit Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The Meishan underground section of the Chengdu-Meishan Suburban Railway (S5) Line is situated in the trap zone of the Yanjinggou gas field. The shallow strata possess conditions for oil and gas infiltration, and the shallow natural gas has a significant impact on the construction and operation of shield tunnels. The conventional full-hole detection scheme and the innovative stratified detection scheme were used to reveal the vertical and elevation distribution characteristics of shallow natural gas in the Meishan underground section. And an analysis of gas enrichment and migration patterns in the shallow surface layer of the area was conducted. Based on this, suggestions for tunnel routing selection and preventive measures were put forward. The geological investigation has significant reference value for the construction of similar tunnels in the Chengdu Plain area.

Key words: shallow natural gas; geological investigation; stratified detection; enrichment characteristics

收稿日期:2024-04-28

作者简介:任云(1992-),男,工程师。

基金项目:四川省重点研发项目(2019YFG0460);中铁二院科技研究开发计划课题(KDNQ242072,KSNQ202035,KDNQ21203)

引文格式:任云,陈明浩,邱鹏,等.市域(郊)铁路成眉线地下工程浅层天然气分布特征及评价研究[J].高速铁路技术,2025,16(2):110-115.

REN Yun, CHEN Minghao, QIU Peng, et al. Study on Distribution Characteristics and Evaluation of Shallow Natural Gas in the Underground Engineering of Chengdu-Meishan Suburban Railway (S5) Line[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):110-115.

非煤系浅层天然气问题是制约铁路隧道建设的一大难题,其随机和不均匀分布的特点,让常规勘察手段难以预测和量化。对非煤系浅层天然气认识不足,会大大加深瓦斯隧道的施工和运营风险。如果发生瓦斯爆炸事故,将造成严重的人民生命财产损失与恶劣的社会影响,如炮台山隧道(1993年)、洛带五洛路1号隧道(2015年)等。成都平原区在成渝地区双城经济圈建设和成德眉资同城化等国家、省级发展战略的布局下,提升推进市域(郊)铁路、城市轨道交通等融合发展的步伐正不断加快。然而,在隧道建设过程中遭受浅层天然气危害的问题也越来越突出。因此,研究非煤系浅层天然气的富集规律与运移模式对铁路隧道建设具有重要意义。

针对非煤系浅层天然气问题,专家学者做过大量研究,岳志勤等^[1]对川南、川西南地区浅层天然气的产、储、运移的基本规律展开勘察研究,为成贵铁路工程设计提供了依据。苏培东等^[2]依托成都轨道交通19号线,分析非煤系地层浅层天然气的运移机制、气体赋存形式,并通过分层检测试验,探究瓦斯隧道区间的瓦斯空间分布规律。唐鸥玲等^[3]研究借助通风抽排方式提前降低隧道内瓦斯气体的浓度,为高瓦斯区段隧道设计和施工提供技术支撑。然而,既有文献中研究区非煤系浅层天然气具有不同的富集特征。岷江阶地上覆卵石层为浅层天然气提供了富集空间。本文以市域(郊)铁路成都至眉山线为依托,在原有勘察手段的基础上,有针对性的设计瓦斯检测方案,以期对区内浅层天然气空间富集特征与运移模式进行深化研究,从而对成都平原区类似铁路隧道的选线、施工、运营提供指导。

1 研究区地质环境

1.1 工程概况

市域(郊)铁路成都至眉山线(S5)为向南至眉山方向的跨行政区市域铁路。本文主要以眉山城区段眉山北站-音乐广场站-眉山东站地下区间(右线里程K 59+600~K 64+266.8)为研究段,勘察过程中在该区段大量钻孔内检测到高浓度瓦斯气体。

研究区属冲积平原地貌,为岷江冲积形成的I级阶地,地形平坦开阔。场地地表广泛分布第四系全新统人工填土(Q_4^{ml}),下为第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})软-硬塑状黏性土、稍密-中密卵石夹松散粉细砂;下伏基岩为白垩系上统灌口组(K_2g)泥岩。区内构造行迹微弱,无明显线性构造与线路相交,工程地质条件较为简单。区间隧道多采用盾构法施工,左右线并行。隧道全长4.66 km,轨面埋深3~40 m,顶板

覆土厚2.4~22.0 m,地下水位埋深0.5~7.8 m。结合区间工程地质特征,并依据规范要求,勘察期间钻孔多沿线路方向交叉布置,勘探深度一般为30~55 m。勘探成果揭示隧道洞身主要穿越稍密~中密卵石、强~中风化泥岩地层。

1.2 油气背景

研究区所处四川盆地为含油气盆地,区内油气田及含油气构造众多。成眉线眉山城区段位于川西油气区苏码头-盐井沟含气构造南段盐井沟气田圈闭范围,如图1所示。该气田构造核部主要为侏罗系上统蓬莱镇组地层,天然气来源于下伏三叠系上统须家河组煤系(碳质页岩)地层,通过背斜核部的盐井沟断裂向上运移至侏罗系上统蓬莱镇组地层中进行储集。从油气地质背景看,隧址区油气资源丰富,浅表地层具有受油气浸染的条件。勘探过程中钻孔深度范围内并未揭示生烃地层,推测区内浅表地层赋存瓦斯来源于下伏盐井沟气田侏罗系上统蓬莱镇组储层,再通过断层和破碎岩体裂隙向上运移,至勘探深度范围内地层进行富集。同时,根据邻近的既有龙泉山地区隧道施工经验,气田产生的天然气经断层运移至浅表地层,形成气囊(瓦斯富集体),隧道一旦揭示气囊(瓦斯富集体)则可能产生施工风险^[4-5]。

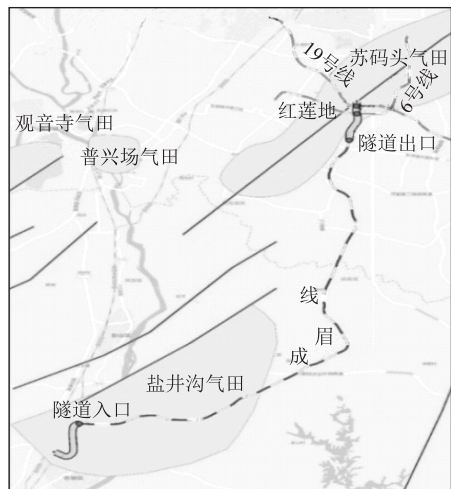


图1 研究区构造与油气田分布图

2 浅层天然气勘察方法研究

2.1 浅层天然气划分标准

市域(郊)铁路成都至眉山线眉山段地下盾构区间主要受浅层天然气影响。TB 10027-2022《铁路工程不良地质勘察规程》中第14.5.2条对浅层天然气特征有明确描述,根据对隧道危害程度,将浅层天然气按油气、地质、工程设置等因素进行了量化取值与评分^[6]。本文结合规程中浅层天然气隧道瓦斯区段量

化因素与现场有害气体检测成果,将其作为有害气体的判定标准,如表1所示。

表1 浅层天然气隧道瓦斯等级划分表

区段瓦斯分级	等级划分界限值	
	天然气(CH_4)浓度/ppm	综合判定评分 T_i
高瓦斯区段	$> 20\,000$	80~100
低瓦斯区段	10 000~20 000	60~80
微瓦斯区段	100~10 000	30~60
无瓦斯区段	< 100	0~30

2.2 浅层天然气检测方法

2.2.1 全孔检测

全孔检测是隧道有害气体勘察过程中常用手段,该方法采用提钻即检的检测方式,对钻探施工进度影响小,适合全线大范围开展,适用于初步探明沿线有害气体的线状纵向分布规律(即各里程段地下最大有害气体富集浓度),检测结果可为瓦斯富集区域的初步划分提供参考。

(1) 检测工艺

全孔检测工作共分3步进行,当钻孔钻进至隧道顶板附近时,提钻取芯后进行第一次检测,为中途检测;当钻孔钻进至设计深度时,提钻取芯后进行第二次检测,为终孔检测;之后,使用封孔膜密封孔口24 h后再进行一次检测,为封孔检测,一般将封孔24 h检测获得的数据作为瓦斯高低浓度的判定依据^[3]。全孔检测流程如图2所示。

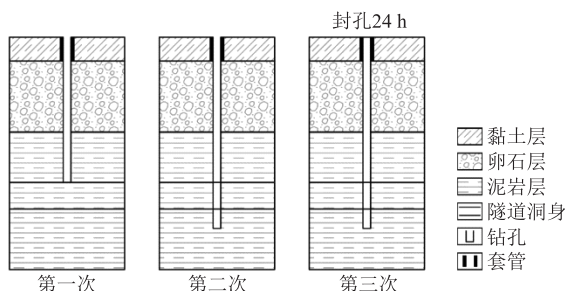


图2 全孔检测工艺图

(2) 检测孔布置

有害气体检测钻孔随勘探孔沿线路两侧交叉布置,检测孔平均间距为100 m。研究区共计布置有害气体检测孔43个,可获得43组全孔检测数据。

2.2.2 分层检测

通过全孔检测数据可以判定出浅层天然气随线路平面纵向分布的宏观规律。然而,由于中途检测和终孔检测浓度均不能直接代替测试段地层内有害气体的最大浓度,全孔检测结果只能反映瓦斯在钻孔深度方

向上的大致规律,无法对瓦斯空间分布规律做精细判定,故不能指导线路在空间上的选线设计。因此,本文在结合研究区地层岩性特征以及前期全孔检测成果的基础上,创新性地设计了AB孔分层检测方案,通过研究重点区段瓦斯气体的空间分布特征,对瓦斯富集进行垂直分带,并结合其与隧道的空间关系,研究隧道受瓦斯影响的程度。

(1) AB孔分层检测工艺

AB孔分层检测的重点层位为上部卵石层位与下部基岩层位。为减少不同层位之间的相互干扰,提高有害气体测试精度,将一组有害气体分为A、B2个孔,其中,A孔用于测试上部卵石层位内的有害气体,B孔用于测试下部基岩层位不同深度段的有害气体。

A. A孔

A孔共进行3次有害气体检测,分为2个阶段。
①第一阶段:A孔钻至进卵石2 m时,黏土层下入普通套管,进行第一次有害气体检测;
②第二阶段:A孔钻至基覆界面终止,第一阶段终孔深度处下入普通套管,进行第二次有害气体检测,然后用封孔膜对孔口进行封闭,24 h后进行第三次有害气体检测。A孔检测工艺如图3所示。

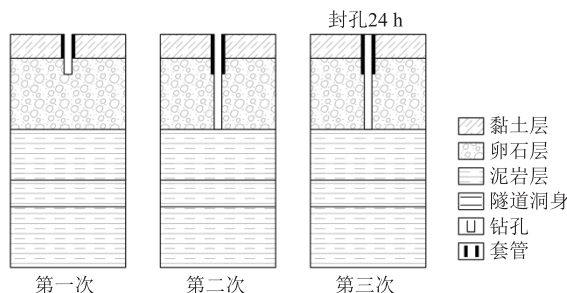


图3 A孔检测工艺图

B. B孔

B孔共进行4次有害气体检测,分为2个阶段。
①第一阶段:钻孔钻进至隧道顶板位置,并将套管下至基覆界面处,进行第一次有害气体检测,孔口封孔24 h后再进行第二次有害气体检测;
②第二阶段:钻孔钻进至隧道底板以下5 m深度,在第二阶段终孔深度处下入普通套管,进行第三次有害气体检测,同样封孔24 h后进行第四次有害气体检测。B孔检测工艺如图4所示。

(2) 检测孔布置

AB孔以前期全孔检测成果为基础,在隧道高浓度瓦斯富集的3个区段布置,AB孔距离为8~10 m^[2],沿研究区隧道外侧2~5 m位置共布置20组(40个)有害气体分层检测钻孔。

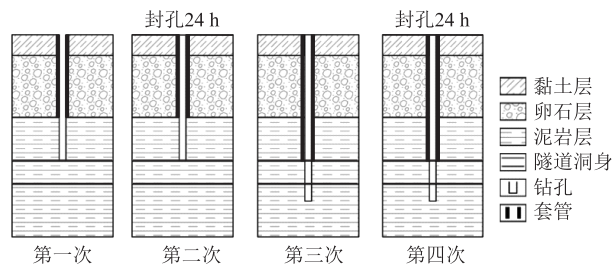


图4 B孔检测工艺图

3 浅层天然气分布特征

3.1 纵向分布特征

根据全孔检测获得的数据,在剔除无效数据后,剩

下42组封孔24 h数据。其中,超过20 000 ppm的数据有24组,占比57.1%,介于10 000 ppm至20 000 ppm之间的数据有8组,占比19.0%。因此,区间内瓦斯气体较为富集,测试值大于20 000 ppm的钻孔占1/2以上。全孔检测钻孔瓦斯浓度随线路里程的变化趋势如图5所示。研究区整个地下区间均有瓦斯分布,在线路纵向上K 60 + 200 ~ K 60 + 550、K 61 + 000 ~ K 61 + 900和K 62 + 950 ~ K 63 + 950段3个区段瓦斯检测浓度超过20 000 ppm,达到了高瓦斯区段划分标准。

3.2 高程分布特征

根据分层检测工艺,A孔和B孔均经历2个阶段

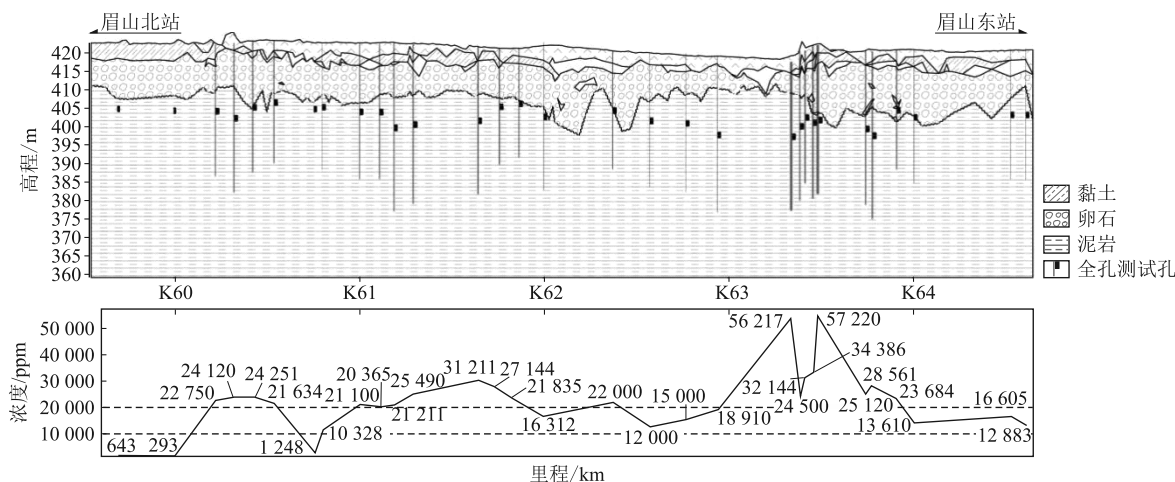


图5 全孔检测瓦斯浓度随里程变化趋势图

的检测工作,其中A孔获取2组敞孔数据和1组封孔数据,共计3组数据;B孔分别获取2组敞孔数据和封孔数据,共计4组数据。因此,1组AB孔在检测完成后将获取3组封孔数据和4组敞孔数据,其中敞孔数据可用于初步判定钻孔中瓦斯气体受扰动后的补给情况,封孔的浓度数据则代表了被测深度段地层内瓦斯气体的浓度水平。

因此,本文利用AB孔检测出的3组封孔数据,可将钻孔揭示的地层分为卵石层(405~420 m)、泥岩层上部(390~405 m)、泥岩层下部(375~390 m)3个高程段,相应得出各高程段的地层瓦斯气体浓度水平,将多组AB孔检测数据联合分析,即可得出地层中瓦斯气体在隧址区不同高程的富集分布特征。AB孔分层检测在勘探深度范围内的卵石层、泥岩层上部以及泥岩层下部层位可分别获取20组封孔24 h数据,均可代表被测层位的地层瓦斯浓度水平。

从获取的封孔24 h检测数据中,卵石层位超过20 000 ppm的数据有8组,占比40.0%,介于10 000 ppm至20 000 ppm之间的数据有11组,占比

55.0%。泥岩上部层位无超过20 000 ppm的数据,而介于10 000 ppm至20 000 ppm之间的数据有15组,占比75.0%。泥岩下部层位亦无超过20 000 ppm的数据,而介于10 000 ppm至20 000 ppm之间的数据有5组,占比25.0%。

研究区内瓦斯富集在勘探深度范围上显示出较明显的高程分布规律,高浓度瓦斯气体更倾向于在卵石层位内富集,在上部泥岩层位,瓦斯富集体分布也较为广泛,以中浓度富集体为主,而下部泥岩层位则主要赋存中低浓度的瓦斯,如图6所示。

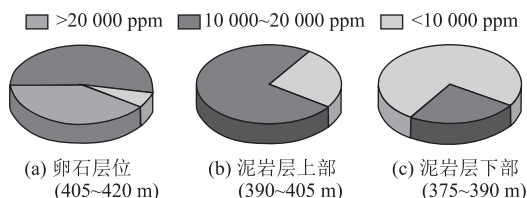


图6 不同高程段瓦斯浓度分布图

3.3 浅层天然气富集特征

根据前文的检测成果,研究区浅层天然气赋存规

律可知,相较既往四川盆地浅层天然气研究,浅层天然气具有一定的特殊性^[1,2]。其位于岷江 I 级阶地,勘探揭示其上覆 10~20 m 厚卵石,勘探深度范围内可为瓦斯提供赋存空间的地层主要有两层,分别为卵石层与破碎泥岩层。破碎泥岩既可作为瓦斯的运移通道,也可作为瓦斯赋存地层,但因其上覆的卵石层孔隙度更大,加之瓦斯本身具有向上运移的特性,因此对于岷江 I 级阶地的浅表地层,相较于下部泥岩层,瓦斯更加趋向于富集在上覆卵石层内。同时,区内地表上覆发育的黏土层,厚 3~5 m,且分布广泛,渗透性弱,该层直接覆盖于卵石层上,可作为瓦斯富集体的良好盖层从而有效阻止瓦斯继续向地表进行逸散,故下伏地层中的瓦斯气体运移至卵石层后大多在卵石层内赋存。随着时间的推移,卵石层内的瓦斯气体越聚越多,便形成了一定规模的高浓度瓦斯富集体。区内浅表地层瓦斯富集及运移模式如图 7 所示。

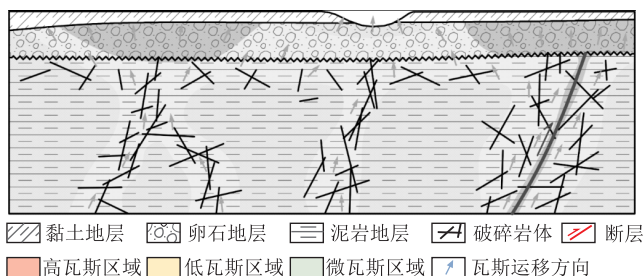


图7 浅表地层瓦斯富集及运移模式图

4 隧道选线建议及防控对策

根据区内全孔检测及进一步的 AB 孔分层检测揭示拟建成眉线眉山段地下区间勘探深度范围内浅层天然富集特征,建议隧道选线应尽量使隧道下压于下部完整基岩的低微瓦斯区通过,避开上部卵石层中的高瓦斯富集体,从而降低工程建设安全风险和对周边环境的影响。

同时,对区内瓦斯富集特征的揭示,可使隧道施工过程中的瓦斯防治更具针对性。盾构隧道邻近或通过瓦斯富集体时,可在地表采取瓦斯自然排放、驱替等措施,主动降低地层内瓦斯浓度,排除断层破碎带等潜在的运移通道内高浓度快速补给瓦斯气体对施工的危害。亦可在相应区段采用洞内深孔注浆等被动措施,切断瓦斯向洞内运移的通道,保障隧道运营过程中的安全。

5 结论

本文基于成都平原区市域(郊)铁路成都至眉山线工程,在采取有害气体全孔检测方案基础上,结合研

究区地层岩性特征,创新性设计了更适合测试浅表地层瓦斯空间分布规律的 AB 孔分层检测方案,对眉山段地下区间浅层天然气的富集特征与运移模式进行勘察与评价研究。得到主要结论如下:

(1)运用常规的全孔检测方案查明线路纵向上 K 60+200~K 60+550、K 61+000~K 61+900 和 K 62+950~K 63+950 段 3 个地下区段存在高浓度瓦斯气体。

(2)在全孔检测的基础上,创新设计了 AB 孔瓦斯分层检测方案,查明了地下区段瓦斯高程分布特征,高浓度瓦斯更倾向于在卵石层内富集。

(3)区内地层赋存的瓦斯来源于下伏盐井沟气田侏罗系上统蓬莱镇组储层,主要通过断层和破碎岩体裂隙向上运移,运移至浅表后部分赋存在破碎泥岩内,而大多数瓦斯则在黏土层封盖下的卵石层内赋存。随着时间的推移,卵石层内的瓦斯气体越聚越多,形成了一定规模的高浓度瓦斯富集体。

(4)根据区内地下区间瓦斯富集及运移特征,建议线路应尽量于下部完整基岩的低微瓦斯区段通过,避开卵石层中的高瓦斯富集体,施工及运营过程针对性地采取防治措施。

参考文献:

- [1] 岳志勤,丁浩江,苏培东,等. 成贵铁路川南、川西南浅层天然气勘察[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(3): 1-5.
YUE Zhiqin, DING Haojiang, SU Peidong, et al. Survey of Shallow Layer Natural Gas in Chengdu-Guiyang Railway of South Sichuan and Southwest Sichuan[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(3): 1-5.
- [2] 苏培东,黎俊麟,徐正宣,等. 非煤系地层浅层天然气赋存规律及瓦斯隧道工程防护方案[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 88-97.
SU Peidong, LI Junlin, XU Zhengxuan, et al. Occurrence Regularity of Shallow Natural Gas in Non-coal Strata and Protection Scheme of Gas Tunnel Engineering[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 88-97.
- [3] 唐鸥玲,陈兴海,常兴旺,等. 非煤系地层高瓦斯隧道浅层天然气赋存特征及抽排试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 140-146, 158.
TANG Ouling, CHEN Xinghai, CHANG Xingwang, et al. Study on the Occurrence Characteristics and Drainage Tests of Shallow Natural Gas in High-gas Bearing Tunnels in Non-coal Measure Strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 140-146, 158.
- [4] 付开隆,崔建宏,陈明浩,等. 铁路隧道煤与瓦斯突出危险性判定分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 39-44.
FU Kailong, CUI Jianhong, CHEN Minghao, et al. Assessment and Analysis of Coal and Gas Outburst Hazard in Railway Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 39-44.
- [5] 强新刚,袁东,何平,等. 隧道突出气体特征及形成机理研究[J].

高速铁路技术, 2024, 15(2): 39-44.

QIANG Xingang, YUAN Dong, HE Ping, et al. Study on Characteristics and Formation Mechanisms of Tunnel Gas Outbursts [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 39-44.

[6] TB10027-2022 铁路工程不良地质勘察规程[S].

TB10027-2022 Specification for Unfavorable Geological Condition Investigation of Railway Engineering[S].

(上接第109页)

[7] 邹云峰, 何旭辉, 周佳, 等. 基于实测数据的CRH380列车风作用下风屏障风荷载多分辨率分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 407-414.

ZHANG Zhengzhou, OUYANG Peng, HAN Yongjun, et al. A Study on Method for Workshop Process Design of EMU Depot [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 1-7.

[8] 吕娜, 刘伟, 谢海清, 等. 叶片式导风屏障挡风性能优化研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 78-82, 88.

LV Na, LIU Wei, XIE Haiqing, et al. Study on Optimization of Wind-Proof Performance of Vane-type Wind Deflector [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 78-82, 88.

[9] 吕娜, 张英虹, 谢海清, 等. 基于风-车-桥耦合振动的导风屏障防风效果研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 32-36.

LV Na, ZHANG Yinghong, XIE Haiqing, et al. A Study on the Windproof Effect of Wind Deflector Based on Windvehicle-bridge Coupled Vibration [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 32-36.

[10] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].

GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock [S].

[11] 张楠, 夏禾, 郭薇薇, 等. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥风-车-桥耦合振动分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 41-48.

ZHANG Nan, XIA He, GUO Weiwei, et al. Analysis on the Wind-vehicle-bridge Coupling Vibration for Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge of Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 41-48.

[12] 许自强, 何德华, 于卫东. 大风工况动车组运行速度限值研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 39-43.

XU Ziqiang, HE Dehua, YU Weidong. Research on Limit Operational Speed of CRH Train under High-speed Wind Condition [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(1): 39-43.