

文章编号: 1674—8247(2023)06—0078—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 015

复杂艰险山区铁路隧道精细化工程地质勘察研究

张营旭¹ 张广泽¹ 蒋 帅² 王哲威¹ 陈明浩¹ 徐学渊¹ 刘小莎¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 国家铁路局安全技术中心, 北京 100106)

摘 要:西部艰险山区铁路隧道建设面临复杂的地形地貌条件、恶劣的气候条件、强烈的内外动力地质作用、活跃的新构造运动以及频发的地质灾害等问题,隧道勘察难度大。本文梳理了艰险山区5条铁路隧道工程勘察期间在物探布置、钻探布置以及勘探成果的综合分析方面存在的不足,通过对导致勘察工作不足的原因进行剖析,提出了针对艰险山区铁路隧道勘察阶段物探与钻孔的布置要点,总结了勘察成果综合分析存在的不足与解决方法,以期复杂地质艰险山区隧道工程精细化工程地质勘察工作提供借鉴。

关键词:复杂地质;艰险山区;综合分析;精细勘察;勘察总结

中图分类号: U212.22; U25 **文献标志码:** A

A Study on Detailed Geological Investigation of Railway Tunnel in Challenging Mountain Area

ZHANG Yingxu¹ ZHANG Guangze¹ JIANG Shuai² WANG Zhewei¹ CHEN Minghao¹
XU Xueyuan¹ LIU Xiaosha¹

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

2. Safety Technology Center, National Railway Administration of the People's Republic of China, Beijing 100160, China)

Abstract: The construction of railway tunnels in challenging mountain areas in Western China is confronted with complex topographical conditions, severe climatic conditions, intense internal and external geological dynamics, active neotectonic movements, and frequent geological disasters. The complexity of the terrain makes tunnel surveys challenging. This paper reviewed the inadequacies encountered during the survey of five railway tunnels in challenging mountain areas in terms of geophysical layout, drilling layout, and the comprehensive analysis of exploration results. By dissecting the reasons for these inadequacies in the investigation, the paper proposed the key points for the layout of geophysical and drilling during investigation of railway tunnels in challenging mountain areas. The paper summarized the weaknesses and solutions in the comprehensive analysis of investigation results, expecting to provide references for detailed geological investigations of tunnel projects in complex and challenging mountain areas.

Key words: complex geological conditions; challenging mountainous area; comprehensive analysis; detailed investigation; investigation summary

随着我国社会主义现代化建设的稳步推进,基础设施 建设也得到长足的发展。其中,铁路行业作为基础设

收稿日期:2023-09-01

作者简介:张营旭(1985-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路经济规划研究院有限公司科研课题(2021YJJ06)

引文格式:张营旭,张广泽,蒋帅,等. 复杂艰险山区铁路隧道精细化工程地质勘察研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(6):78-83.

ZHANG Yingxu, ZHANG Guangze, JIANG Shuai, et al. A Study on Detailed Geological Investigation of Railway Tunnel in Challenging Mountain Area [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 78-83.

施建设中重要的一环,也在国家的战略布局中稳步推进^[1]。铁路向西部复杂艰险山区不断深入的同时,隧道工程的建设规模也随之突飞猛进。艰险山区地形起伏大,隧道往往占据了全线的大部分比例,也控制了工程建设的工期与投资,隧道的建设对于推进西部复杂艰险山区铁路的建设起着至关重要的作用。

艰险山区隧道建设面临复杂的地形地貌条件、恶劣的气候条件、强烈的内外动力地质作用、活跃的新构造运动以及频发的地质灾害^[2]等问题,勘察难度大,难以准确查明隧道工程地质条件,从而导致施工过程中出现围岩变更、灾害频发、工期延误、投资超概等诸多问题。

针对复杂艰险山区勘察数据难获取、勘察精度低等难题,前人提出过一大批新技术与新方法^[3],如定向钻进技术^[4]、航空电磁法^[5]、音频大地电磁法^[6]以及综合物探技术,这些新兴技术与方法结合传统的钻探与物探手段,在一定程度上提高了勘察的精度。然而,常规勘察方法在面临复杂艰险山区存在的问题与不足也亟需解决与补强,如:物探与钻探布置不够精准,导致地质条件查不清;勘探成果综合分析不系统,勘察资料利用率低,缺乏区域特征的综合对比分析,以点盖面,导致评价结果偏离实际。因此,对复杂艰险山区铁路隧道工程地质勘察存在的问题进行分析与总结,研究复杂艰险山区铁路隧道的精细勘察要点,对该地区后续建设的隧道勘察具有重要的理论意义与应用价值。

鉴于此,本文依托跨越兰坪-思茅陷与昌宁-孟连褶皱带的大理至临沧铁路(大临铁路)、跨越扬子亚板块的玉溪至磨憨铁路(玉磨铁路)、地处印度板块与欧亚板块碰撞带前缘活动构造带的丽江至香格里拉铁路(丽香铁路)、跨越印支亚板块与滇缅泰亚板块的大理至瑞丽铁路(大瑞铁路)以及跨越秦-祁-昆造山系的兰州至重庆铁路(兰渝铁路)5条穿越复杂艰险山区的铁路,共计1 459.47 km的隧道勘察与施工成果,对复杂艰险山区隧道精细勘察的要点进行总结,以期为该地区的隧道建设提供参考。各铁路位置如图1所示。

1 物探布置要点

隧道物探工作的主要目的是解译验证调绘所认识的地质问题,需根据调绘认识及工作建议,针对性选择物探方法、布置测线,并开展现场工作。常规的隧道物探通常忽视隧道的地层岩性、地质构造等地质特征,任何隧道均只采用一种物探方法沿隧道轴线布



图1 依托工程位置图

置。通过梳理复杂艰险山区的5条铁路工程勘察阶段物探布置存在的不足,发现在复杂艰险山区铁路隧道工程物探布置除了需要满足常规的物探布置要求外,为了更准确地探明复杂艰险山区隧道地层岩性、地质构造、地下水等工程地质条件,物探工作还应该遵循以下要点:

- ①对于一般地质条件隧道,沿隧道轴线至少选择一种物探方法(如大地电磁法)拉通布置。
- ②对于地层岩性存在软硬互层,大型构造等特殊隧道或段落,需增加地震法等对地质界面敏感的物探方法进行综合验证。
- ③大型断裂构造、褶皱核部需增加瞬变电磁法等方法对地下水进行综合探测。
- ④与隧道轴线伴行或小角度相交的断层、褶皱、可溶岩与非可溶岩界线、侵入岩接触界线等重大地质界线,构造迹线在地面出露位置与构造迹线在洞身段的地面投影位置相差较大,仅依靠物探纵断面难以确定构造与洞身的位置关系。因此,需要适当布置横断面探测各类构造、界线及其影响范围,如图2所示。

2 钻探布置要点

根据隧道钻探孔的深度是否大于100 m可将钻探孔分为深孔和浅孔。通过梳理复杂艰险山区的5条

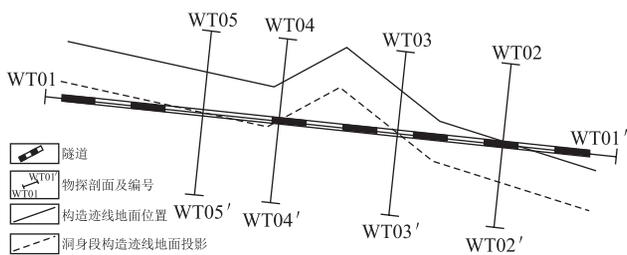


图2 构造与隧道伴行或小角度相交时物探剖面布置示意图

铁路工程勘察阶段的钻孔布置,发现浅孔布置间距过大,难以查明浅埋段不良地质条件,深孔位置与钻孔类型也布置的不太合理,不仅未能准确查明深埋段不良地质条件,而且浪费了钻探进尺,增加了勘察成本与勘察周期。经综合分析,为了更准确地查明复杂艰险山区隧道地质条件,浅孔与深孔的布置应遵循以下要点:

(1) 浅孔布置要点

浅孔一般布置在隧道的进出口,主要用于查明基覆界线、地层界线、不良地质发育情况,现行的TB 10012-2019《铁路工程地质勘察规范》^[7]规定“洞身埋深小于100 m的长大地段,钻孔间距不宜大于500 m。”由于复杂艰险山区地形起伏大,隧道进出口斜坡坡度大,普遍坡度大于 30° 。若以平均坡度为 30° 斜坡为例,埋深小于100 m的隧道段落长为173.21 m,按规范规定的500 m浅孔布置间距要求,复杂艰险山区的多数隧道仅需要布置1个浅孔。值得注意的是,复杂艰险山区浅埋段一般差异风化严重,上部覆盖层较厚且厚度变化大,按规范规定的浅孔布置间距往往不能达到勘探精度要求。由于相关研究与规范并未对浅孔的合适间距进行探讨与规定,根据复杂艰险山区多条铁路隧道工程的勘察经验总结,浅埋段宜按钻孔深度控制浅孔间距,孔间距不宜大于相邻钻孔深度,如图3所示。在浅埋段覆盖层更厚的位置会适当加密钻孔,随着埋深的增加,覆盖层厚度变薄,钻孔间距会逐渐变大,这样既能保证勘探精度,也能节约勘探预算。

(2) 深孔布置要点

深孔分为两类,一类是为了解决隧道地质问题(如揭示地质界线、断裂等)而布置,另一类是为了验证重大物探异常而布置。深孔必须在详细工程地质调绘与物探的基础上进行,并布置于不同的地质单元。常规的深孔主要布置在需揭示的各地质体内和重大物探异常处。通过梳理复杂艰险山区的5条铁路工程勘察阶段深孔布置存在的不足,发现在复杂艰

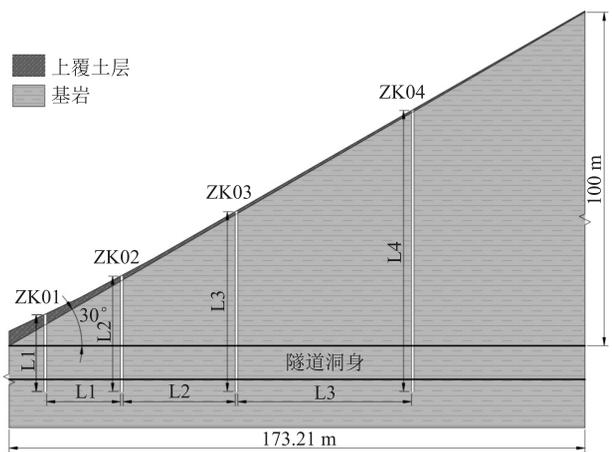


图3 浅埋段隧道钻孔布置示意图

险山区铁路隧道工程深孔布置除了需要满足常规的深孔布置原则外,还应该遵循以下要点:

①在同一构造环境下,隧道埋深越深,往往工程地质与水文地质条件越复杂,高地应力、高地温、地下水与有害气体的涌突问题越突出,因此,深孔还需要考虑布置在隧道的最大埋深处。

②针对长大深埋隧道,为了利用更少的钻探进尺揭示隧道洞身穿过的更多地层,或在地层厚度内最大限度地揭示该地层地质情况(即垂直层面的原则),根据《铁路工程地质手册》(2版)^[8]层状岩体的发育特征判定标准,结合岩层走向与线路关系,以此作为深孔布置参考原则,同时兼顾钻探工艺难易程度及经济成本,综合布置垂直孔、倾斜孔与水平孔,如图4、图5所示。深孔布置原则如下:当岩层倾角 $< 45^\circ$,此时采用垂直孔,既能有效揭示地层情况,其钻探工艺简单、钻孔成本较低;当岩层倾角 $> 45^\circ$,分两种情况:

当岩层走向与线路走向夹角 $< 30^\circ$ 时,即顺层状态,倾角 $45^\circ \sim 70^\circ$,此时纵断面视倾角较缓,垂直孔能有效穿过更多地层(如图4(a)所示),宜采用垂直孔,横断面方向上钻孔布置在岩层倾向相反侧;倾角 $> 70^\circ$,沿横断面方向尽可能垂直层面布置水平孔,能最大的程度揭穿地层(如图4(b)所示)。

当岩层走向与线路走向夹角 $> 30^\circ$ 时,纵断面视倾角较大,倾角 $45^\circ \sim 70^\circ$ 时,倾斜孔能在相同进尺条件下有效穿过更多地层(如图5(a)所示),宜尽可能垂直层面布置倾斜孔;倾角 $> 70^\circ$ 时,水平孔能有效穿过更多地层(如图5(b)所示),宜采用水平孔。

③各地质单元、地层岩性中,不同物探异常带需布置有代表性钻孔验证,尤其长大硬质岩段落,因复杂艰险山区岩性多变、矿物成分混杂导致的物性不足以真实反应岩体完整程度,因此采用硬质岩高阻带控

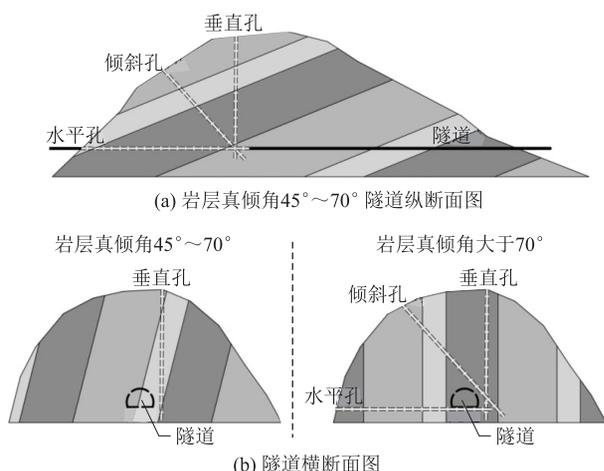


图4 岩层走向与线路夹角小于30°时不同产状地层钻孔布置示意图

制性钻探原则,可解决硬质岩段落因复杂环境导致物探解译成果失真而遗漏破碎岩体信息的难题;若上述验证孔揭示围岩受构造影响差异大,可适当加密对应异常带的验证孔。以大临铁路红豆山隧道为例,隧道

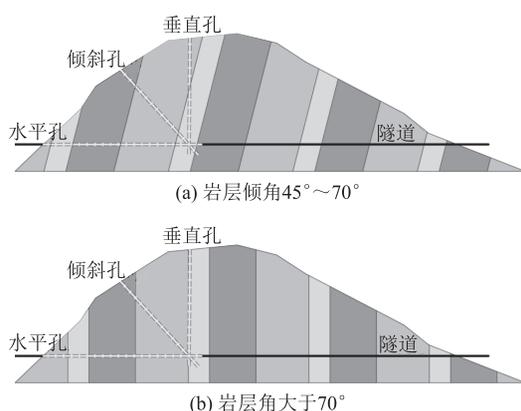


图5 岩层走向与线路夹角大于30°时不同产状地层钻孔布置示意图

中部的DK 118+730~DK 119+610段为花岗岩地层,物探揭示V类围岩异常,如图6所示。该段未布置勘察钻孔,在施工过程中揭示的有害气体浓度明显高于两侧IV类围岩地层,由于该段在勘察阶段未布置验证钻孔,导致施工中风险陡增。

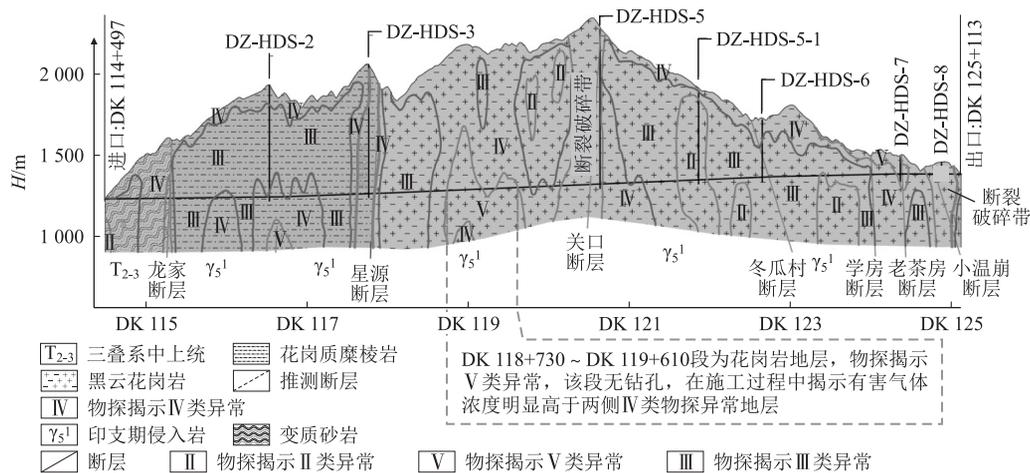


图6 大临铁路红豆山隧道钻孔布置图

④复杂艰险山区构造复杂,断层产状多变,在洞身段的产状往往不同于地表露头。如图7所示,若断层产状变化不大,根据地表露头推测断层位置按钻孔布置①的方式布置钻孔既能探明断层地质特征,又能节约进尺。然而,当断层产状变化大时,按钻孔布置①的方式布置钻孔不能揭示断层,按钻孔布置②的方式增大钻孔与断层的夹角布置钻孔才能揭示断层。因此,在复杂艰险山区布置钻孔时,应综合考虑断层的产状,并适当增加钻孔与断层的夹角,降低钻孔未揭示断层的可能性,提高勘察精度。另外,构造复杂区域,背、向斜核部地质条件较差,为较丰富孕灾环

境,是控制隧道工程地质风险的主要因素,因此,背、向斜核部应有控制性钻孔揭示其工程地质与水文地质条件。

3 勘探成果的综合分析

复杂艰险山区隧道勘察物探与钻探工作量大,隧道勘探成果丰富,对物探成果、钻探成果、孔内原位试验,室内实验等勘探成果的进一步综合分析,有助于提高勘察的精度。通过对复杂艰险山区多条铁路隧道工程勘探成果进行总结,发现物探成果与钻探成果之间的相互结合与运用还存在不足,主要体现在以下

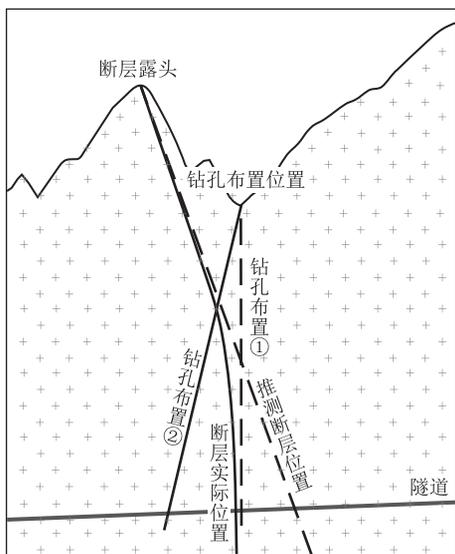


图7 揭示断层的钻孔布置示意图

几个方面:

①在物探完成后,根据勘察工作布置建议,重新确定加密深孔,更利于钻孔准确查明隧道的地层岩性结构特征及岩体的完整性。

②钻探与物探完成后,需根据钻探成果重新解译物探成果,具体操作流程如下:首先根据钻孔岩芯的岩体强度、完整性、结构面情况、结合综合测井波速等,综合确定深孔全孔围岩级别;然后,根据钻孔全孔段穿越不同物探参数级别段落将钻孔分段,统计各段落内钻孔岩芯围岩级别及占比情况,将隧道按地层岩性特征、地质构造影响程度划分地质单元,以地质单元为单位,建立物探参数级别与围岩分级的对应关系;最后,各地质单元内物探类型与深孔围岩分级对应关系,指导无钻孔段隧道围岩分级,单元长度越大,钻孔数量越多,指导钻孔临近段落分级越准确。

以大瑞线高黎贡山隧道为例,如图8所示,该隧道的DZ-GLGS-06号孔大地电磁高阻段根据钻孔岩芯判定为V级围岩,综合测井判定以V级为主;DZ-GLGS-07根据岩芯判定孔底附近为V级围岩,未做综合测井。两个钻孔之间高阻较多,再无其他钻孔校正。根据两孔的钻探数据结合物探修正,综合在该段划分了长1240m的V级围岩,与施工揭示情况基本一致。

通过上述勘探成果的综合分析,对大瑞铁路高黎贡山隧道进出口段落围岩重新划分围岩级别,如图9、图10所示。利用勘探成果的划分方法所划分的围岩等级更接近于施工开挖揭示情况,对隧道围岩划分具有重要指导意义。

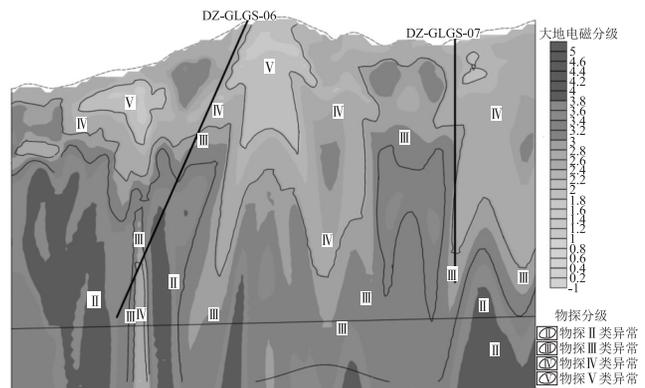


图8 大瑞铁路高黎贡山隧道物探综合成果图

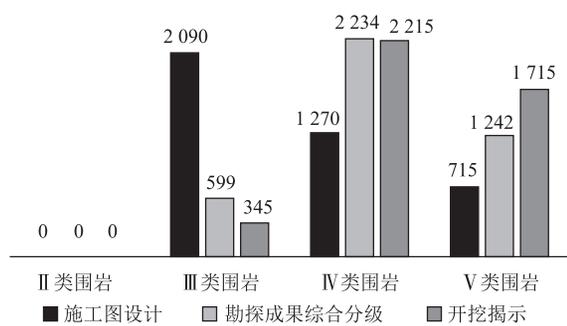


图9 进口D1 K 196 + 625 ~ D1 K 200 + 900段各阶段围岩划分成果对比图(m)

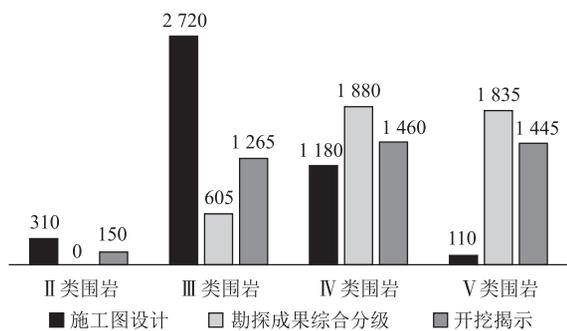


图10 出口D1 K 221 + 000 ~ D1 K 225 + 420段各阶段围岩划分成果对比图(m)

4 结论

针对复杂艰险山区铁路隧道工程勘察过程中存在的不足,依托已建的大临、玉磨、丽香、大瑞、兰渝铁路共计1459.47 km隧道的勘察与施工经验,总结了复杂艰险山区铁路隧道精细勘察要点,得到主要结论如下:

(1)对于地质界面、地下水特定的工程地质问题,需采用针对性的物探手段进行探测;对于复杂的工程地质问题可采用多方法多手段进行相互验证;对于构

造与隧道伴行或小角度相交时,应增加物探横剖面。

(2) 浅埋段宜按钻孔深度控制浅孔间距,孔间距不宜大于相邻钻孔深度。

(3) 深孔布置应结合物探成果与地质调绘成果综合确定,同时不能忽视在隧道最深处布置深孔;深孔的类型也应根据地层产状综合确定,尽量减少钻探进尺与预算;针对艰险山区断层产状变化大可能导致钻孔未能揭示断层的问题,深孔布置应综合考虑断层的产状变化,并适当增大钻孔与断层的夹角。

(4) 加强勘察成果的综合分析,需要根据物探成果综合调整、加密深孔的布置,并结合物探与钻探成果指导未布置钻孔的段落围岩划分。

参考文献:

- [1] 刘佩,赵东. “十四五”时期铁路高质量发展内涵、特征及实施路径[J]. 铁道经济研究, 2021(6): 1-3.
LIU Pei, ZHAO Dong. The Connotation, Characteristics and Implementation Path of the High-quality Development of Railway during the 14th Five-Year Plan Period [J]. Railway Economics Research, 2021(6): 1-3.
- [2] 杜宇本,蒋良文,陈明浩,等. 中国铁路隧道勘察技术的发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1943-1952.
DU Yuben, JIANG Liangwen, CHEN Minghao, et al. Development and Prospect of Geological Surveying Technology for Railway Tunnels in China [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1943-1952.
- [3] 谢毅,徐正宣,陈明浩,等. 山区铁路隧道超长定向钻探关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 1-5, 11.
XIE Yi, XU Zhengxuan, CHEN Minghao, et al. Research on the Key Technology of Ultra Long Directional Drilling in Railway Tunnel in Mountainous Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 1-5, 11.
- [4] 尹小康,王安平,赵思为,等. 音频大地电磁法在铁路隧道勘察中的应用[J]. 科技通报, 2023, 39(3): 32-37, 51.
YIN Xiaokang, WANG Anping, ZHAO Siwei, et al. Application of Audio Frequency Magnetotelluric Method in Tunnel Investigation [J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(3): 32-37, 51.
- [5] 蔡盛,陈洪杰. 综合物探技术在深埋隧道勘探中的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S1): 127-130.
CAI Sheng, CHEN Hongjie. The Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technique in Deep Tunnel Survey [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S1): 127-130.
- [6] 王进华. 滇藏铁路主要工程地质问题及地质选线原则研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 7-13.
WANG Jinhua. Research on Main Engineering Geological Problems and Principles of Geological Route Selection for Yunnan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 7-13.
- [7] TB 10012-2019 铁路工程地质勘察规范[S].
TB 10012-2019 Code for Geological Survey of Railway Engineering [S].
- [8] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程地质手册[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Handbook of Railway Engineering Geology [M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [9] 成棣,孙琛,胡晓依,等. 面向低锥度晃车的CRH3平台动车组车轮型面优化[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 135-144.
CHENG Di, SUN Chen, HU Xiaoyi, et al. Wheel Profile Optimization of CRH3 EMU Oriented to Carbody Shaking Caused by Low Equivalent Conicity [J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 135-144.
- [10] 李晓峰,李国栋,宋春元,等. 基于实测钢轨廓形的高速动车组车轮踏面外形优化研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.
LI Xiaofeng, LI Guodong, SONG Chunyuan, et al. Research on Optimization of Contour of Wheel Tread for High Speed Multiple Units Based Upon Actually Measured Rail Profile [J]. Rolling Stock, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.

(上接第77页)

Hunting Frequency Jump Phenomenon of High-speed Bogies with Elastic Motor Suspension [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(10): 20-28.

[7] 黄彩虹,罗仁,曾京,等. 系统参数对高速列车车轮踏面凹陷磨损的影响[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(3): 55-62.

HUANG Caihong, LUO Ren, ZENG Jing, et al. Effect of System Parameters on Tread-hollow Wear of High-speed Train Wheels [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(3): 55-62.

[8] 孟葳. 动车组车体蛇行失稳机理与影响因素试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(2): 28-32, 69.

MENG Wei. Experimental Study on Mechanism and Influencing

Factors of Carbody Instability in EMU Train [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(2): 28-32, 69.

[9] 成棣,孙琛,胡晓依,等. 面向低锥度晃车的CRH3平台动车组车轮型面优化[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 135-144.

CHENG Di, SUN Chen, HU Xiaoyi, et al. Wheel Profile Optimization of CRH3 EMU Oriented to Carbody Shaking Caused by Low Equivalent Conicity [J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 135-144.

[10] 李晓峰,李国栋,宋春元,等. 基于实测钢轨廓形的高速动车组车轮踏面外形优化研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.

LI Xiaofeng, LI Guodong, SONG Chunyuan, et al. Research on Optimization of Contour of Wheel Tread for High Speed Multiple Units Based Upon Actually Measured Rail Profile [J]. Rolling Stock, 2019, 57(8): 11-12, 24, 4.