

文章编号: 1674—8247(2021)06—0026—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.006

## 高地温跨断层隧道隔热减震技术研究

魏杭杭<sup>1</sup> 庄永香<sup>2</sup> 邱枫博<sup>1</sup> 谢 优<sup>1</sup> 崔光耀<sup>1</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 莒南县园林环卫保障服务中心, 山东 莒南 276600)

**摘 要:**为探索高地温跨断层隧道隔热减震技术,本文依托桑珠岭隧道工程,分析了初支与二衬之间设置减震层和阻尼层的隔热减震效果。研究表明:(1)在初支与二衬间设置减震层和阻尼层后,隧道整体温度下降,最高温度降低了 3.26%;(2)隧道应力降低效果明显,最大主应力最大值减小了 25.17%,最小主应力最大值减小了 43.28%;(3)隧道安全系数有较大提升,最小安全系数提高了 175.62%;(4)设置减震层和阻尼层可降低高地温跨断层隧道的温度,提高隧道安全性能。

**关键词:**隧道工程;高地温;断层;减震层;阻尼层;隔热减震

中图分类号:U452.2 文献标志码:A

## A Study on Thermal Insulation and Shock Absorption for Tunnels with High Geo-temperature Crossing Fault

WEI Hanghang<sup>1</sup> ZHUANG Yongxiang<sup>2</sup> QIU Fengbo<sup>1</sup> XIE You<sup>1</sup> CUI Guangyao<sup>1</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Junan County Garden Sanitation Support Service Center, Junan 276600, China)

**Abstract:** In order to explore the thermal insulation and shock absorption for tunnels with high geo-temperature crossing fault, this paper, relying on the project of the Sangzhuling Tunnel, analyzes the thermal insulation and shock absorption effect of setting shock absorption layer and damping layer between the primary supporting and the inner lining. The results show that: (1) After setting the shock absorption layer and damping layer between the primary supporting and the inner lining, the overall temperature of the tunnel decreases, and the maximum temperature decreases by 3.26%. (2) The tunnel stress reduction effect is obvious, with the maximum value of the maximum principal stress reduced by 25.17% and the maximum value of the minimum principal stress reduced by 43.28%. (3) The tunnel safety factor has been greatly improved, with the minimum safety factor increased by 175.62%. (4) Setting the shock absorption layer and damping layer can reduce the temperature of the tunnel crossing fault with high geo-temperature and improve the safety performance of the tunnel.

**Key words:** tunnel engineering; high geo-temperature; fault; shock absorption layer; damping layer; thermal insulation

高地温跨断层隧道建设同时面临隔热和减震的双重难题。高地温不仅会影响隧道正常施工和运营,还

收稿日期:2021-04-16

作者简介:魏杭杭(1997-),男,硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目资助(52178378)、北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”大学生科研训练计划深化项目(21XN217/016)、北京市大学生科学研究与创业行动计划项目(21XN216/006)

引文格式:魏杭杭,庄永香,邱枫博,等.高地温跨断层隧道隔热减震技术研究[J].高速铁路技术,2021,12(6):26-31.

WEI Hanghang, ZHUANG Yongxiang, QIU Fengbo, et al. A Study on Thermal Insulation and Shock Absorption for Tunnels with High Geo-temperature Crossing Fault[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6):26-31.

会影响隧道的衬砌稳定性,造成衬砌开裂;断层处岩体破碎,自稳能力差,对隧道衬砌的要求比较高。因此,开展对高地温跨断层隧道隔热减震技术的研究尤为重要。

目前,对跨断层隧道减震技术的研究较多,如对跨断层隧道地震破坏特征的研究<sup>[1]</sup>、利用数值模拟对断层破碎带地震反应规律的研究<sup>[2]</sup>、通过振动台试验对跨断层减震技术的探索<sup>[3-6]</sup>、对减震层在跨断层隧道中应用的研究<sup>[7-8]</sup>、对减震缝在强震区跨断层隧道应用的研究等<sup>[9]</sup>。对于高地温隧道的研究也有一些,如对高地温隧道衬砌受力特性的研究<sup>[10-11]</sup>、对高地温隧道不同隔热材料隔热效果的研究<sup>[12]</sup>、对高地温隧道隔热层选择及隔热技术的研究<sup>[13-14]</sup>、对施工期间高地温隧道隔热降温技术的探索<sup>[15]</sup>、对隧道初期支护与二衬在 高地温环境下力学性能的研究等<sup>[16-17]</sup>。

综上可知,目前的许多研究成果都是单独针对隧道减震或隔热的,对跨断层隧道地震破坏特征和抗震减震措施的研究及对高地温隧道隔热技术的研究都已十分成熟,但对两者结合的研究较少,对高地温跨断层隧道隔热减震技术的研究几乎没有,进行跨断层隧道减震技术与高地温隧道隔热技术的联合研究可弥补隧道在隔热减震技术方面的不足,有效地提高高地温跨断层隧道的安全性能。因此,本文依托川藏铁路桑珠岭隧道工程,利用有限差分软件 FLAC 3D 建立数值模型,对比分析了素混凝土隧道与设置了减震层与阻尼层隧道的隔热效果和减震效果,探索了高地温跨断层隧道的隔热减震技术。该研究成果可为高地温跨断层隧道的隔热减震技术提供参考。

## 1 桑珠岭隧道概况

### 1.1 隧道概况

桑珠岭隧道全长 16.45 km,地势为海拔 3 300 ~ 5 100 m,位于西藏至林芝段铁路的雅鲁藏布江缝线区。隧道所在区域处于欧亚板块与印度板块交界处,同时穿过温泉活跃的断层带,因此隧道地热活动十分强烈,洞内环境温度高达 56 ℃,隧道地温高达

89.9 ℃,是我国地温最高的隧道。该隧道的围岩以闪长岩和花岗岩为主要成分,坚硬易碎。

### 1.2 隧道支护参数

该隧道采用曲墙带仰拱形式的复合衬砌,初期支护采用 25 cm 厚的喷射混凝土,二衬采用 45 cm 厚的模筑混凝土。

## 2 研究概况

### 2.1 计算模型

本文根据桑珠岭隧道地质条件和地温钻孔资料,以隧道断层为研究背景,建立 FLAC 3D 数值模型。模型纵向厚度为 200 m,隧道左右宽度各取 50 m。隧道埋深为 50 m,模型底部基岩厚度为 20 m,基岩为Ⅱ级围岩。断层破碎带与隧道正交,倾角为 80°,断层宽度为 10 m。断层处岩体破碎,较完整岩体更易导热,隧道在断层处受地温影响较大,故建立模型时需设置好断层处的导热系数。围岩采用摩尔库伦模型,衬砌采用弹塑性模型。静力计算时的模型边界条件为模型上部无约束,底部和侧面全约束;动力计算时的模型边界条件为自由场边界。动力计算时采用 2008 年汶川地震卧龙测站测得的加速度波。热分析时,初始温度场为上部初始温度 54 ℃,断层底部固定温度 90 ℃。隧道模型如图 1 所示。

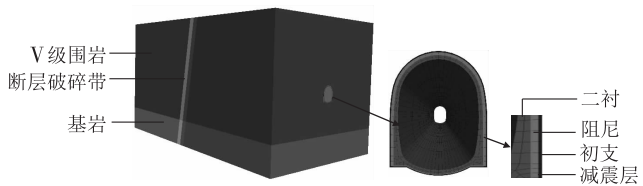


图 1 计算模型图

### 2.2 计算参数

根据地质资料确定围岩参数,减震层采用橡胶板,阻尼层为 Qtech-506 浇筑阻尼,室温条件下粘度可达  $600 \times 10^4$  cP,断裂增长率在 10 倍以上,材料自身损耗因子大于 0.5,泊松比为 0.5。材料具体参数如表 1 所示。

表 1 计算参数表

材料名称	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/Pa	导热系数/(W/m·℃)
V 级围岩	20	0.4	1.5	25	$1 \times 10^5$	2.3
基岩	25	0.2	20	50	$1.5 \times 10^6$	2.2
断层破碎带	18	0.38	1	24	$0.5 \times 10^5$	8.0
初支	22	0.2	23	—	—	2.0
二衬	25	0.2	28	—	—	2.0
减震层	10	0.45	0.3	0.5	$5 \times 10^6$	0.18

2.3 计算工况

本文主要研究在初支与二衬之间设置减震层与阻尼层后隧道的减震隔热效果,计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况表

工况	计算内容
1	不设置减震层和阻尼层
2	铺设 9 mm 减震层和 9 mm 阻尼层

2.4 监测布置

在隧道通过断层中心部位的左右两侧各设置 6 个监测断面,其中,D1 为下盘监测断面中接近断层中心部位的监测断面,D2 为上盘监测断面中接近断层中心部位的监测断面,断面分布如图 2 所示。每个监测断面共设置 8 个监测点,测点布置如图 3 所示。

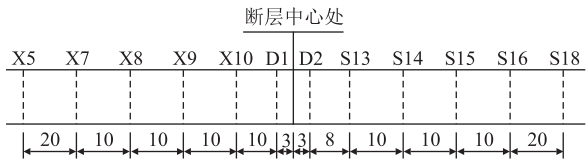


图 2 断面分布图(m)

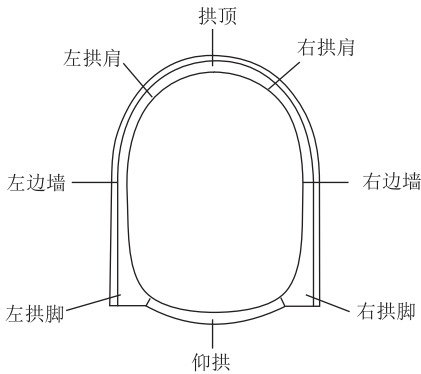


图 3 测点布置图

2.5 动力参数

此次模拟采用常规动力的加载方式,将地震波从  $(x,y,z)$  3 个方向通过模型底部传输到顶部。地震波持续时间共 15 s,并按照 9 度地震烈度进行标准化。数值模拟过程中,力学阻尼采用局部阻尼,阻尼系数为 0.157 1。处理后的加速度时程曲线如图 4 所示(以  $x$  方向为例)。

3 隔热减震效果分析

3.1 隔热效果分析

提取两种工况 12 个监测断面各个测点的监测温度(以隧道右侧为例),如图 5 所示。

由图 5 可知,两种工况的隧道衬砌最高温度均出现在距断层最近处,两种工况的温度变化趋势相似,距

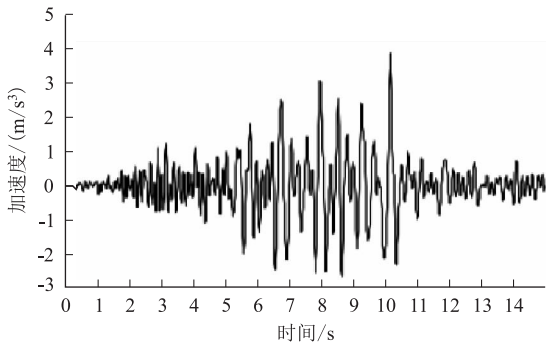
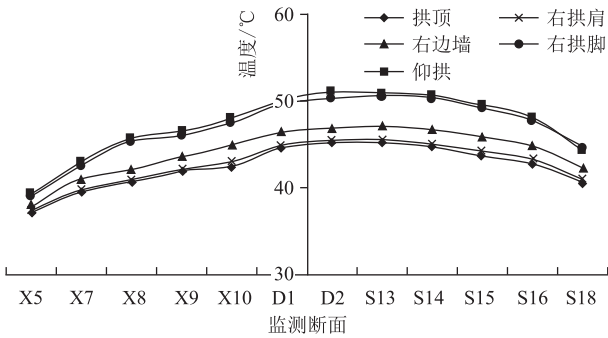
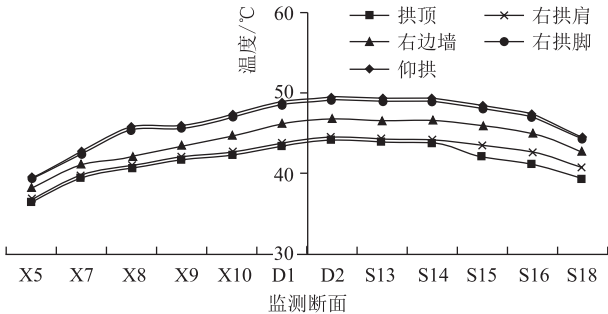


图 4 加速度时程曲线图



(a) 工况1



(b) 工况2

图 5 不同条件下隧道温度曲线图

离断层破碎带越近,衬砌温度越高,距离越远,温度越低。各监测断面的最高温度均出现在仰拱处,最低温度均出现在拱顶处,从拱顶至仰拱,隧道衬砌温度逐渐升高。

工况 1 隧道衬砌的最高温度为 51.16 ℃,在施加减震层和阻尼层后,隧道衬砌的最高温度降低至 49.49 ℃(工况 2),相较于工况 1 降低了 3.26%,说明铺设阻尼层和减震层可起到隔热效果。

3.2 减震效果分析

3.2.1 最大主应力

提取断层完成错动时两种工况 12 个监测断面所有测点中的最大主应力值,如图 6 所示。

由图 6 可知,各监测段面中最大主应力最大值均出现在 D2 监测断面处,故提取 D2 监测断面各监测点

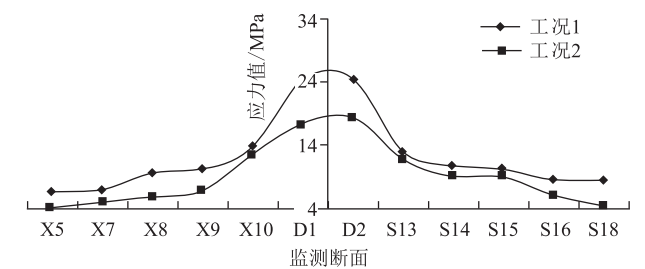


图6 各监测断面的最大主应力图

最大主应力值,如表3所示。

表3 D2 监测断面最大主应力值表 (MPa)

监测点	工况 1	工况 2
拱顶	24.51	18.34
左拱肩	23.61	12.78
左边墙	10.77	6.67
左拱脚	7.54	9.7
仰拱	6.22	5.96
右拱脚	9.27	9.2
右边墙	13.74	9.1
右拱肩	21.21	11.55

由图6和表3可知,从隧道纵向来看,断层破碎带处最大主应力值较大,最大主应力最大值出现在上盘断层处,而距离断层破碎带越远,最大主应力值越小。在同一个监测断面中,隧道拱顶处的最大主应力值最大,仰拱处的最大主应力值最小。工况1的最大主应力值最大为24.51 MPa,设置阻尼层和减震层后,隧道整体最大主应力有明显减小,工况2的最大主应力值最大为18.35 MPa,相较工况1降低了25.17%,说明隧道最大主应力得到了有效控制。

3.2.2 最小主应力

提取断层完成错动时两种工况12个监测断面所有测点中的最小主应力值,如图7所示。

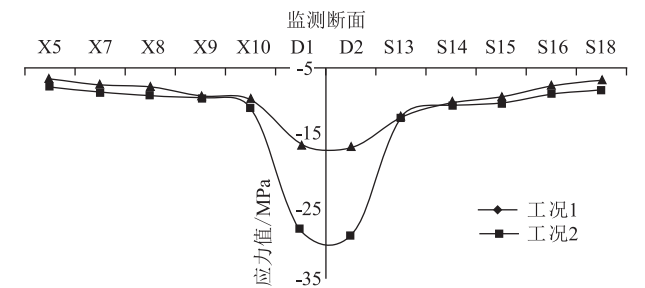


图7 各监测断面的最小主应力图

由图7可知,各监测段面中最小主应力最大值均出现在D2监测断面处,故提取D2监测断面的各监测点最小主应力值,如表4所示。

由图7和表4可知,从隧道纵向来看,断层破碎带处最小主应力值较大,最小主应力最大值出现在上盘

表4 D2 监测断面最小主应力值表 (MPa)

监测点	工况 1	工况 2
拱顶	1.49	1.02
左拱肩	-17.01	-14.24
左边墙	-26.37	-15.34
左拱脚	-27.44	-14.31
仰拱	-17.85	-16.05
右拱脚	-28.79	-16.33
右边墙	-20.98	-15.36
右拱肩	-16.94	-4.92

断层处,而距离断层破碎带越远,最小主应力值越小。在同一个监测断面中,隧道拱脚处的最小主应力值最大,仰拱处的最小主应力值最小。工况1的最小主应力最大值为-28.79 MPa,在设置阻尼层和减震层后,断层破碎带处的最小主应力值有明显减小,工况2的最小主应力最大值为-16.33 MPa,相较于工况1降低了43.28%,说明隧道最小主应力得到了有效控制。

3.2.3 安全系数

提取计算结果,根据规范规定<sup>[18]</sup>计算D2监测断面各个监测点的安全系数。

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h \tag{1}$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_l b h}{6 e_0 / h - 1} \tag{2}$$

式中:K——安全系数;

N——轴力;

$\varphi$ ——构件纵向弯曲系数;

$\alpha$ ——轴向力偏心影响系数;

$R_a$ ——混凝土抗压极限强度;

b——衬砌宽度,常取1 m;

h——衬砌厚度;

$R_l$ ——混凝土抗拉极限强度;

$e_0$ ——偏心距。

当 $e_0 \leq 0.2h$ 时,采用式(1)计算安全系数,当 $e_0 \geq 0.2h$ 时,采用式(2)计算安全系数。

提取模拟结果数据计算安全系数,两种工况D2监测断面的安全系数如表5所示。

表5 D2 监测断面安全系数表

位置	安全系数	
	工况 1	工况 2
拱顶	2.143	3.555
左拱肩	1.739	2.184
左边墙	4.697	5.893
左拱脚	0.283	0.783
仰拱	0.516	0.78
右拱脚	0.418	0.794
右边墙	3.798	5.681
右拱肩	2.061	2.99

由表5可知,两种工况同一监测断面安全系数的

分布趋势基本相同,左、右边墙处的安全系数较大,仰拱及拱脚处的安全系数最小。工况1的最小安全系数出现在左拱脚处,最小值为0.283,工况2的最小安全系数出现在仰拱处,最小值为0.78。设置阻尼层和减震层后,最小安全系数提高了175.62%,隧道整体安全系数也有较大提升。综上可知,设置阻尼层和减震层可有效提高隧道安全性能。但设置减震层和阻尼层后,隧道仍有部分位置低于规范要求,故在实际工程中需要增强支护强度,提高隧道安全性能。

## 4 结论

本文依托桑珠岭隧道工程,通过建立有限元模型,对比分析了不设置减震层和阻尼层隧道和设置了9 mm阻尼层和9 mm减震层的隧道的隔热效果和减震效果,得出主要结论如下:

(1)高地温跨断层隧道靠近断层处易受到断层错动影响,隧道温度、主应力和内力较其他位置均处于较高的水平,施工时应在断层处采取措施提高隧道的安全性能。

(2)设置阻尼层和减震层后,隧道衬砌温度整体都有所下降,最高温度降低了3.26%。

(3)设置阻尼层和减震层后,隧道最大主应力值和最小主应力值均有所减小,最大主应力最大值减小了25.17%,最小主应力最大值减小了43.28%;隧道安全系数有较大提升,最小安全系数提高了175.62%。

(4)由隔热和减震分析可知,阻尼层和减震层可降低高地温跨断层隧道的衬砌温度,同时可提高隧道的安全性能,起到较好的减震效果。

## 参考文献:

- [1] 信春雷,高波,闫高明,等.跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗减震措施研究[J].振动工程学报,2016,29(4):694-703.  
XIN Chunlei, GAO Bo, YAN Gaoming, et al. Seismic Damage Characteristics and Anti-seismic Damping Measures for Tunnel Across Strike-slip Faults [J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(4): 694-703.
- [2] 朱长安,李海清,林国进,等.断层破碎带隧道地震反应规律的数值模拟研究[J].公路,2012,57(4):254-259.  
ZHU Changan, LI Haiqing, LIN Guojin, et al. A Study on Numerical Simulation of Seismic Response of Tunnel in Fault-rupture Zone [J]. Highway, 2012, 57(4): 254-259.
- [3] 王帅帅,高波,隋传毅,等.减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1086-1092.  
WANG Shuaishuai, GAO Bo, SUI Chuanyi, et al. Mechanism of Shock Absorption Layer and Shaking Table Tests on Shaking

Absorption Technology of Tunnel Across Fault [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1086-1092.

- [4] 信春雷,高波,周佳媚,等.跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(8):1414-1422.  
XIN Chunlei, GAO Bo, ZHOU Jiamei, et al. Shaking Table Tests on Performances of Anti-seismic and Damping Measures for Fault-crossing Tunnel Structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1414-1422.
- [5] 王峥峥,高波,李斌,等.跨断层隧道振动台模型试验研究I:试验方案设计[J].现代隧道技术,2014,51(2):50-55.  
WANG Zhengzheng, GAO Bo, LI Bin, et al. Experimental Study Using a Shaking Table Model for a Tunnel Passing Through Faults (Part I): Test Scheme Design [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 50-55.
- [6] 王峥峥,李斌,高波,等.跨断层隧道振动台模型试验研究II:试验成果分析[J].现代隧道技术,2014,51(3):105-109.  
WANG Zhengzheng, LI Bin, GAO Bo, et al. Experimental Study Using a Shaking Table Model for a Tunnel Passing Through Faults (Part II): Test Scheme Analysis [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 105-109.
- [7] 李守刚.减震层对跨断层隧道抗错断效果的模型试验研究[J].铁道标准设计,2019,63(12):106-111.  
LI Shougang. Model Experimental Study on Anti-dislocation Effect of Shock Absorption Layer on Cross-fault tunnel [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 106-111.
- [8] 崔光耀,纪磊,荆鸿飞.高烈度艰险山区跨断层隧道减震层减震技术研究[J].地震工程学报,2019,41(2):286-291.  
CUI Guangyao, JI Lei, JING Hongfei. Damping Shake Technology of the Shock Absorption Layer of Fault-crossing Tunnels in a Dangerous Mountainous Area with High-Intensity Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 286-291.
- [9] 涂瀚,倪嵩陟,左奎现.强震区跨断层隧道减震缝减震技术研究[J].高速铁路技术,2019,10(1):59-63.  
TU Han, NI Songzhi, ZUO Kuixian. Study on Shock Absorption Technology of Shock Absorption Joint of Fault-crossing Tunnels in Meizoseismal Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 59-63.
- [10] 吴彪,彭学军,袁超,等.高地温隧道衬砌结构设计探讨及施工技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):18-24.  
WU Biao, PENG Xuejun, YUAN Chao, et al. Discussion on Lining Structure Design and Construction Technology of High Ground Temperature Tunnel [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(2): 18-24.
- [11] 郑文,刘乃飞,刘小平.高地温隧洞支护结构受力特性[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):138-143.  
ZHENG Wen, LIU Naifei, LIU Xiaoping. Mechanical Characteristics of Supporting Structures for High Geo-temperature Tunnel [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 138-143.
- [12] 伍修刚,左奎现,何兆才,等.强震区高岩温隧道两种隔热材料的隔热减震效果分析[J].国防交通工程与技术,2017,15(6):34-37.  
WU Xiugang, ZUO Kuixian, HE Zhaoai, et al. An Analysis of the

Thermal Insulation and Shock Absorption Effects of Two Kinds of Thermal Insulation Materials in High-Rock-Temperature Tunnels in Meizoseismal Areas [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2017, 15(6): 34-37.

[13] 吴根强,王志杰. 高地温铁路隧道隔热层方案研究[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(8):1715-1726.

WU Genqiang, WANG Zhijie. Study on Thermal Insulation Layer of High Ground Temperature Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(8): 1715-1726.

[14] 白国权,仇文革,张俊儒. 高地温隧道隔热技术研究[J]. 铁道标准设计,2013, 57(2):77-80.

BAI Guoquan, QIU Wenge, ZHANG Junru. Study on the Thermal Insulation Technology of Tunnel in High Geo-temperature Region [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(2): 77-80.

[15] 朱宇,周佳媚,赵大权,等. 高地温隧道施工期降温隔热技术研究[J]. 现代隧道技术,2019,56(S2):563-571.

ZHU Yu, ZHOU Jiamei, ZHAO Daquan, et al. Research Progress of Cooling and Heat Insulation Technology during Construction of High Geotemperature Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2):563-571.

[16] 王明年,王奇灵,胡云鹏,等. 高地温环境下隧道初期支护力学性能研究[J]. 铁道学报,2019,41(11):116-122.

WANG Mingnian, WANG Qiling, HU Yunpeng, et al. Mechanical Characteristics Analysis of Initial Support of High Geothermal Tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 116-122.

[17] 孙其清,郑宗溪,谭永杰. 高地温隧道二次衬砌受力特性分析[J]. 铁道工程学报,2018,35(4):70-74.

SUN Qiqing, ZHENG Zongxi, TAN Yongjie. Analysis of the Stress Characteristics of the High Ground Temperature Tunnel Secondary Lining [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(4): 70-74.

[18] Q/CR 9129-2018 铁路隧道设计规范[S].

Q/CR 9129-2018 Code for Design of Railway Tunnel [S].

(上接第15页)

参考文献:

[1] 刘成龙,杨雪峰,卢建康,等. 高速铁路CPⅢ三角高程网构网与平差计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 434-439.

LIU Chenglong, YANG Xuefeng, LU Jiankang, et al. Construction and Adjustment Method for CPⅢ Trigonometric Leveling Network of High-Speed Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3): 434-439.

[2] 王国祥,赖鸿斌. 高速铁路轨道控制网CPⅢ建网与精度控制[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(1): 18-19.

WANG Guoxiang, LAI Hongbin. Establishment and Precision Control of Track Control CPⅢ Network of High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(1): 18-19.

[3] 刘成龙,杨友涛,徐小左. 高速铁路CPⅢ交会网必要测量精度的仿真计算[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(6): 718-723.

LIU Chenglong, YANG Youtao, XU Xiaozuo. Simulated Determination of Accuracy Requirement for Control Points Ⅲ Intersection Networks in High-speed Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(6): 718-723.

[4] TB 10101-2018 铁路工程测量规范[S].

TB 10101-2018 Code for Railway Engineering Survey [S].

[5] 王铜,罗刊. 免量高精度三角高程对向观测及其数据检核方法[J]. 铁道勘察, 2012, 38(3): 9-12.

WANG Tong, LUO Kan. Without Measuring High Precision Triangulated Height Subtend Observation and the Data Check Method [J]. Railway Investigation and Surveying, 2012, 38(3): 9-12.

[6] 徐京海. 利用中间三角高程传递法进行桥梁水中墩沉降观测[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(5): 41-42.

XU Jinghai. Settlement Observation of Immersed Bridge Piers with Midpoint Trigonometric Leveling Method [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(5): 41-42.

[7] 潘正风. 数字测图原理与方法习题和实验[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.

PAN Zhengfeng. Principles and Methods of Digital Mapping: Exercises and Experiments [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005.

[8] 尚云东. 全站仪三轴误差的检验分析[J]. 测绘技术装备, 2006, 8(2): 45-46.

SHANG Yundong. Inspection and Analysis of Error of Three-axis of Total Station [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2006, 8(2): 45-46.

[9] 王雪荣. 全站仪三轴误差检验探讨分析[J]. 科技展望, 2016, 26(28): 274.

WANG Xuerong. Discussion and Analysis of Inspection of Error of Three-axis of Total Station [J]. Science and Technology, 2016, 26(28): 274.