

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.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.003

Wu B, Peng X J, Yuan C, et al. Discussion on Lining Structure Design and Construction Technology of High Ground Temperature Tunnel[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(2): 18-24. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.003

高地温隧道衬砌结构设计探讨及施工技术

吴彪¹, 彭学军¹, 袁超^{2*}, 朱胥仁¹, 凌涛¹

(1. 中铁五局集团第一工程有限责任公司, 湖南长沙 410117; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 现场测试结果显示,拉林铁路桑珠岭隧道地温最高达 86.7 °C,高地温对衬砌结构的力学特性和耐久性的影响不容忽视.依托拉林铁路桑珠岭隧道工程,采用现场实测和数值模拟相结合的方法,研究了温度和隔热层对衬砌受力特性的影响,并对桑珠岭隧道高地温段施工技术进行介绍.研究表明:不考虑温度影响时,隧道支护结构衬砌内力偏小,衬砌安全系数偏大;隔热层的设置改善了衬砌结构的受力,二次衬砌轴力和弯矩显著减小,但其分布特征相似;工程现场所采取的超前地质预报、爆破控制和环境温度控制是确保高地温隧道施工安全的有效措施,确保了桑珠岭隧道准时开通.

关键词: 温度;隔热层;衬砌结构;安全系数

中图分类号:U455.91

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)02-0018-07

Discussion on Lining Structure Design and Construction Technology of High Ground Temperature Tunnel

Wu Biao¹, Peng Xuejun¹, Yuan Chao², Zhu Xuren¹, Ling Tao¹

(1. China Railway No.5 Group, the First Engineering CO., LTD., Changsha 410117, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Field test results showed that the highest ground temperature of the Sangzhuling Tunnel in Lalin Railway was 86.7 °C. The stress characteristics and durability of the lining structure of tunnels was influenced by geo-temperature. Based on the Sangzhuling Tunnel Project of Lalin Railway, the influence of temperature and insulation layer on the stress characteristics of lining was studied by combining field measurement with numerical simulation, and the construction technology of high ground temperature section of Sangzhuling Tunnel was introduced. The results show that without considering the influence of temperature, the lining internal force of tunnel support structure is small and the lining safety coefficient is large. The setting of the heat insulation layer improves the stress of the lining structure, and the axial force and bending moment of the secondary lining are significantly reduced, but their distribution characteristics are similar. The advanced geological forecast, blasting control and environmental temperature control adopted in the engineering site are effective measures to ensure the safety of the construction of the tunnel with high ground temperature and ensure the timely opening of the Sangzhuling tunnel.

Keywords: temperature; insulating layer; Lining structure; safety factor

收稿日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804109)

*通信作者,E-mail:yuanchaozh1@126.com

随着我国交通事业的发展,修建的深埋长大隧道越来越多.长大隧道可能穿越各种地层,并产生多种地质灾害,其中高地温是在长大隧道施工过程中较为突出的问题.例如,瑞士埋深为2 136 m的辛普伦隧道的地温达到55.4℃,日本安房公路隧道最大埋深仅700 m,但地温达到了77.5℃^[1].根据现场测试,拉林铁路桑珠岭隧道地温最高达86.7℃.高地温不仅影响隧道施工效率和材料选取,对衬砌结构的力学特性和耐久性的影响不容忽视.

目前,国内外关于高地温隧道的研究主要集中在温度对岩体的物理力学特性以及高地温隧道隔热通风设计、衬砌力学特性和隧道施工工艺等方面.在温度对岩体的物理力学特性研究方面,武晋文等^[2]发现温度变化会引起岩石内部矿物颗粒膨胀(收缩)不均匀,发生热破裂;赵亚永等^[3]运用偏光显微技术,分析对比了常温~800℃高温处理后砂岩、花岗岩和大理岩的纵波波速、孔隙率、弹性模量、峰值应力及应变的变化规律;陈宇龙等^[4]通过试验发现随着温度的升高,岩石的内部缺陷增大,体积密度、纵波波速、弹性模量、抗拉和抗压强度逐渐降低,孔隙度逐渐升高的结论;何涛等^[5]指出较高温度引起的热膨胀会明显地破坏岩石结构,使其弹性模量和强度随温度的升高降低;S. Liu和J. Xu^[6]分别采用细观力学和宏观唯像模型,研究了热损伤花岗岩和大理岩的变形特性.在山地温隧道隔热通风设计、衬砌力学特性和隧道施工工艺等研究方面,谷柏森^[7]结合高黎贡山隧道,给出了高地温隧道施工和运营通风计算方法;吕玉松^[8]采用数值分析方法,分析了压入式通风降温效果;吴根强^[9]、白国权等^[10]依托实际高地温隧道工程,采用数值模拟方法,研究了高地温隧道隔热层设计;崔圣爰^[11]、Cui S. G.等^[12]对高地温条件下喷射混凝土与岩石粘结强度进行了研究;孙其清等^[13]采用荷载结构法,对高地温条件下衬砌的力学特性进行研究;郑文等^[14]通过数值模拟分析发现隧道衬砌应力和锚杆轴力随着围岩温度升高而逐渐增大;刘金松^[15]、杨长顺^[16]、李国良等^[17]开展了高地温隧道施工关键技术的研究.

综上所述,温度对隧道施工和运营的影响不可忽视,而我国的高地温隧道研究起步晚,目前高地温隧道设计、施工缺少参考标准和规范,急需开展高地温下隧道衬砌力学特性及施工措施相关研究.本文依托桑珠岭隧道,采用现场实测和数值模拟相结合的方法,详细研究了温度和隔热层对衬砌受力特性的影响,并详细介绍了桑珠岭隧道高地温段施工措施,研究结果为后续高地温隧道的设计和施工提供参考.

1 工程概况

1.1 工程概述

拉林铁路桑珠岭隧道位于藏南谷地桑家上游段,进口端位于西藏山南地区桑日县藏嘎村,出口位于桑日县干登,全长16 449 m.隧址区地面标高3 300~5 100 m,高差达1 800 m,隧道最大埋深达1 347 m.洞身穿越沃卡地堑、断陷盆地、巴玉断层等不良地质带,存在活动断裂、地震、地应力、高地温、放射性和危岩落石等不良地质条件,进而造成隧道围岩变形大,喷射混凝土剥落、钢拱架扭曲,支护屡遭破坏,围岩整体稳定性差,隧道开挖断面成型差.桑珠岭隧道进口段横穿沃卡地堑东缘,该断裂带为地热异常区,且该断裂带具有富水、导水性,隧道穿越该断裂带遭遇高地温难题.钻孔地温资料显示:隧道洞身上52 m岩体温度54℃,超前探孔内地温最高达86.7℃,地温之高居我国铁路隧道之首.隧道共设置1个进口、2个横洞和1个平导.

1.2 衬砌结构

隧道开挖后,伴随着热对流、热传导和热辐射的进行,隧道围岩温度场不断变化,由于约束的存在,衬砌受到附加温度应力作用而开裂,严重影响隧道的稳定性.针对桑珠岭隧道存在的高地温情况,为减小衬砌的附加温度应力,隧道衬砌采用隔热复合式衬砌的设计,从围岩到隧道内部依次为25 cm厚C25喷射混凝土初期支护、防水板、45 cm厚C30模筑混凝土、隔热层、防水板和30 cm厚C30二次衬砌,如图1所示.

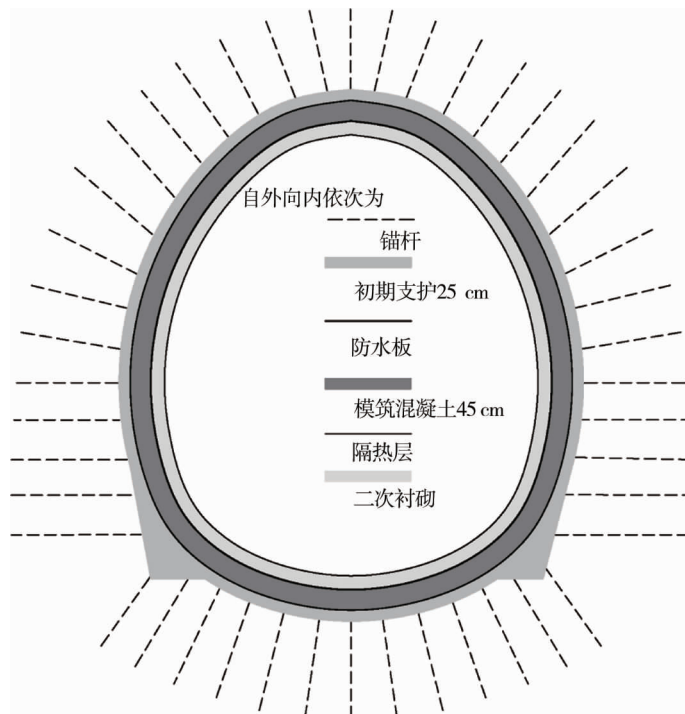


图1 高温段衬砌断面

2 围岩温度现场测试

桑珠岭隧道 1# 横洞自里程 H1DK0+751 (进洞 81 m) 位置出现岩温异常, 随着隧道开挖的推进, 岩温逐步升高. 在里程 H1DK0+421 位置处, 采用 SH612 型便携式智能测温仪对横洞拱顶、左右侧边墙 50 m 超前地质探孔进行了温度量测. 图 2 为里程 H1DK0+421 超前探孔温度分布曲线图. 由图可以看出: 超前探孔内围岩温度随深度的增加而急剧增大, 最后稳定在 86.7 °C. 据既有数据分析, 预计正洞里程 D1K175+760~D1K175+910 沃卡东缘断裂带存在高地温特征, 且温度不低于 86.7 °C.

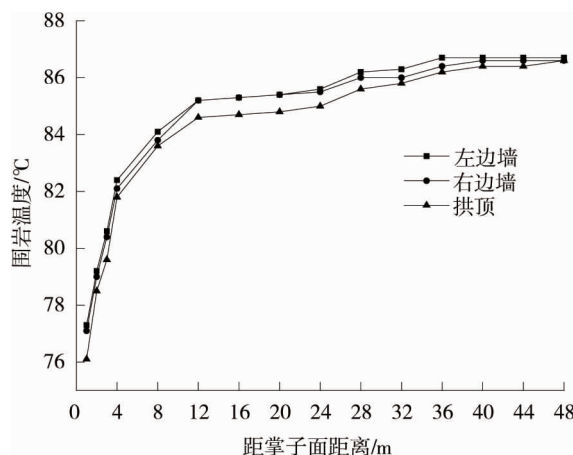


图2 围岩温度曲线

3 衬砌受力特性分析

为了研究高地温下隧道衬砌结构受力特征, 采用 ABAQUS 有限元软件对隧道围岩及其衬砌结构进行热力耦合数值模拟, 探讨支护结构中隔热层的设置对结构内力的影响.

3.1 有限元模型建立

数值模型尺寸为 100 m×100 m, 模型侧面、底面采用位移约束, 顶面为自由边界. 模型初始温度场: 顶部初始温度为 54 °C, 底部初始温度为 88 °C, 沿竖直方向线性分布, 模型边界设置恒温边界条件. 围岩、衬砌均采用实体单元 (CPE4) 模拟, 共划分 27 138 个单元. 采用 Interaction 中的 Surface to Surface Contact 实现围岩衬砌间的接触、热传导, Surface film condition 实现衬砌和空气对流换热, 其中对流换热系数取 12, 环境温度取 20 °C, 导热系数取 1.9, 见图 3. 分析类型采用 Coupled temp-displacement (Transient), 表 1 为数值模拟参数. 共分 3 种计算工况: 工况 1 为不考虑温度时的衬砌受力特性, 工况 2 为考虑温度影响不设置隔热层时衬砌的受力特性, 工况 3 为考虑温度影响设置隔热层时的衬砌受力特性.

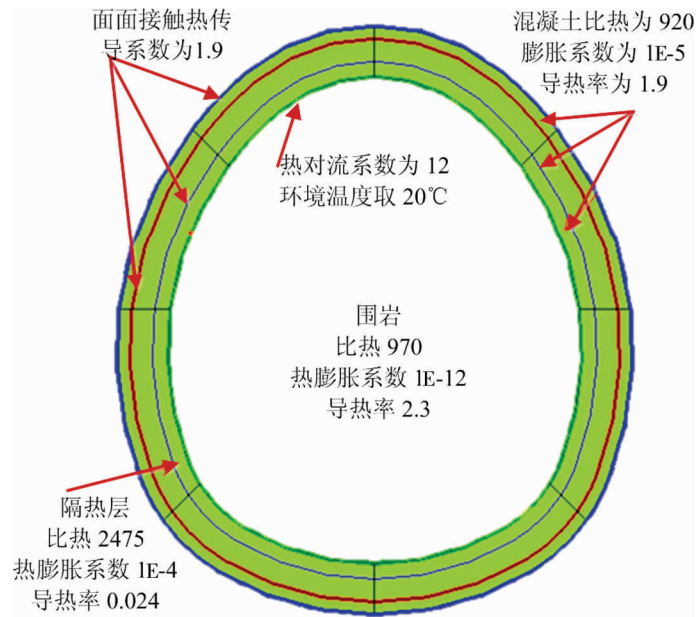


图 3 热传导、热对流

表 1 数值模拟参数

结构	材料	E/GPa	μ	$\rho/(\text{N}/\text{m}^3)$	$k/(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$	$\varphi/(\text{°})$	C/MPa	α	$c/(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$
围岩	花岗岩	1	0.35	20	2.3	27	0.12	1E-12	970
初支	C25	23	0.25	21	1.9			1E-5	920
模筑混凝土层	C30	31	0.2	23	1.9			1E-5	920
隔热层	聚氨酯	0.001	0.48	10	0.024			1E-4	2 475
二次衬砌	C30	31	0.2	23	1.9			1E-5	920

注: E 为围岩和隧道结构弹性模量; μ 为泊松比; ρ 为密度; k 为热传导系数; φ 为内摩擦角; C 为黏聚力; α 为热膨胀系数; c 为比热

3.2 围岩温度场分析

图 4 为分别为通风换热 90 d 后设置隔热层和不设置隔热层时的围岩温度场,即围岩与外界环境热交换 90 d 后围岩的温度场.由图可以看出:隔热层的设置能够有效地阻止围岩与外界环境的热交换.

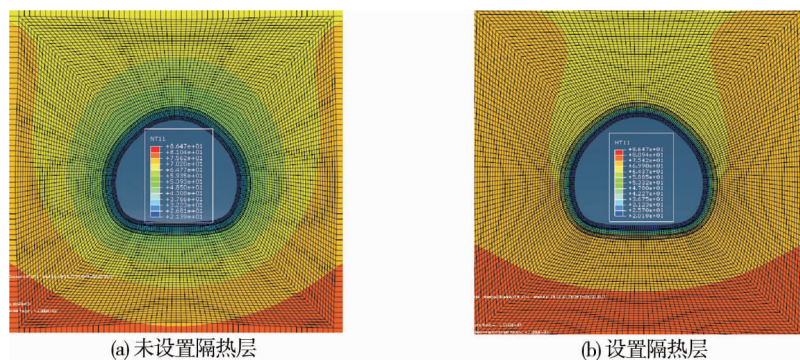


图 4 围岩温度场

3.3 隧道衬砌热力耦合分析

通过热力耦合数值模拟计算,得到了隧道通风换热 90 d 后,隧道支护结构体系各部位的内力,对 3 种工况二次衬砌内力进行了对比分析.

3.3.1 衬砌轴力与弯矩对比

图 5 为不同工况下二次衬砌轴力和弯矩对比图,由图对比分析知:3 种工况计算得到二次衬砌轴力和

弯矩的分布特征相似;由于隔热层的隔热作用,二次衬砌的温度较低,与不设置隔热层相比,使得设有隔热层的二次衬砌轴力和弯矩均较小.

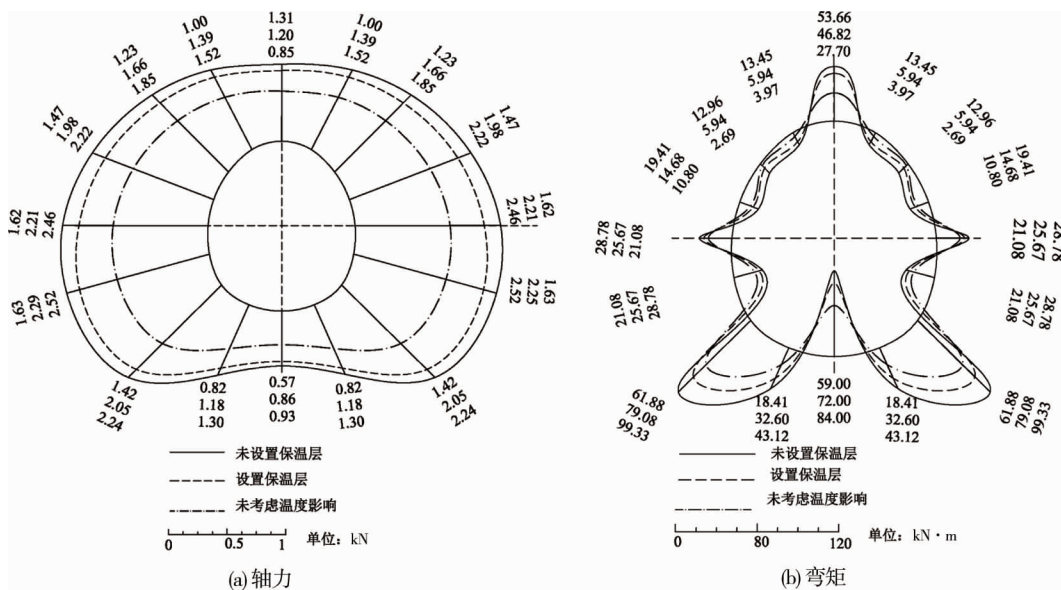


图5 二次衬砌内力

3.3.2 隧道安全系数对比

为综合评价隔热层设置对隧道支护结构受力的影响,根据计算得到的轴力、弯矩值,利用《铁路隧道设计规范》中的容许应力法,计算二次衬砌各截面的安全系数.

图6为不同工况下二次衬砌安全系数对比分析图.由图可以看出:隔热层的存在有效地提高了二次衬砌的安全系数,显著改善了结构受力,但安全系数均小于不考虑温度影响计算值.

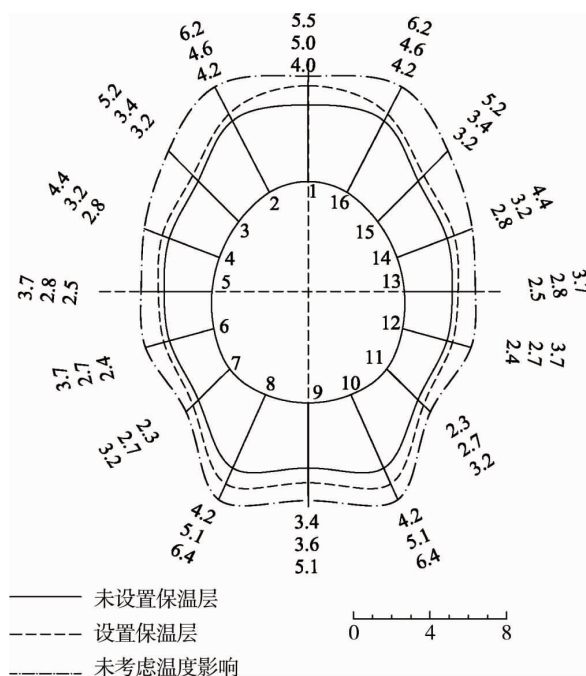


图6 二次衬砌安全系数

因此,较常规隧道,高地温使桑珠岭隧道衬砌结构受力大大增加,桑珠岭隧道衬砌结构设计时应考虑高地温的影响;较未设置隔热层衬砌结构,隔热层的设置有效地降低了桑珠岭隧道衬砌结构受力,提高了衬砌结构安全系数.因此,桑珠岭隧道高地温段衬砌应采用考虑温度且设置隔热层的衬砌结构,即隔热复

合式衬砌,见图1.

4 高地温段综合施工技术

为了保证桑珠岭隧道衬砌结构的安全,桑珠岭隧道采用了隔热复合式衬砌,详见图1.同时,高地温还会影响工程施工人员安全、施工进度和施工材料的选取.因此,在保证衬砌结构安全的前提下,还需采取一系列工程措施确保施工安全.

4.1 环境温度控制

交通部规定,隧道内气温不得高于 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,为保证施工人员安全生产,拉林铁路桑珠岭隧道通过高地温段主要采取以下降温措施:(1)采用3台通风机进行通风降温;(2)洒水、喷雾降温;(3)隔绝高温围岩:在喷射混凝土中添加 0.03% 高效引气剂,使内部形成分布均匀、不连续的封闭气泡,起到一定的隔热作用;(4)洞内接力通风:洞内增加接力风机加强洞内通风,缩短通风管路长度,提高风机运行效率,加快作业面风的循环;(5)作业面增加局扇,加强局部通风效果;(6)冰块降温;(7)增加工业空调,加强洞内降温.见图7.



图7 通风降温现场

4.2 开挖爆破控制

采用耐 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温的导爆管、导爆索,改进装药结构.采用导爆索引爆炸药的方式:导爆索与炸药装入炮孔内,由雷管在炮孔口进行激发导爆索,导爆索在孔底反向起爆炸药.为降低炮孔内温度和减少爆破后的粉尘量,高温段隧道采用水压爆破.

4.3 超前地质预报

现场以超前地质钻孔为主,辅以地质雷达、红外探水,结合地质调查、加深炮孔,对前面地质情况进行综合判定.超前地质钻孔长 50 m ,分布于拱顶和两侧边墙,搭接长度 10 m ;红外探水每次预报 30 m ,搭接长度 5 m .

超前钻孔施工时,为保证钻孔施工人员安全,钻进过程严禁任何人员在孔口附近及正对孔口方向停留.钻孔渗水出现变化时,应做好记录,注意观察.

4.4 实施效果分析

现场通过采取综合措施,将高地温段隧道内作业环境温度控制在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,顺利完成了桑珠岭隧道超过 3 km 的高地温特殊地质段施工,未发生一起安全质量事故,为川藏铁路施工提供了类似的施工经验.

5 结论

1) 隔热层的设置改善了衬砌结构的受力,二次衬砌轴力和弯矩显著减小,但其分布特征相似.

2)不考虑温度影响而计算得到的隧道支护结构内力均小于考虑温度影响值,所计算得到安全系数较大,支护结构的设计偏于保守.

3)在超前地质预报、爆破控制、环境温度控制等综合措施下,顺利完成了高地温段施工,未发生安全质量事故,确保了桑珠岭隧道准时开通.

参考文献:

- [1] 黄润秋,王贤能.深埋隧道工程主要灾害地质问题分析[J].水文地质工程地质,1998(4):21-24.
- [2] 武晋文,陈淑萍.升温 and 降温对无约束花岗岩热破裂的影响[J].地下空间与工程学报,2019,15(1):108-111.
- [3] 赵亚永,魏凯,周佳庆,等.三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):143-150.
- [4] 陈宇龙,张玉.不同温度热处理石灰岩的物理力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s2):3732-3738.
- [5] 何涛,曹雅娴.高温后岩石三轴变形及渗透率演化规律[J].长江科学院院报,2018,35(11):111-115.
- [6] Liu S, Xu J. Analysis on damage mechanical characteristics of marble exposed to high temperature[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2015,24(8):1180-1193.
- [7] 谷柏森.隧道高地温应对措施及通风设计——高黎贡山铁路特长隧道可行性研究[J].现代隧道技术,2007(2):66-71.
- [8] 吕玉松.压入式通风对高地温隧道衬砌的降温效果分析[J].铁道建筑,2017,57(9):96-99.
- [9] 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.
- [10] 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(2):77-80.
- [11] 崔圣爱,李江渭,叶跃忠,等.高地温隧道干热环境中喷射混凝土与岩石黏结强度[J].建筑材料学报,2013,16(4):663-666.
- [12] Cui S G, Liu P, Wang X W. Experimental study on deformation of concrete for shotcrete use in high geothermal tunnel environments[J]. Computers and Concrete, 2017,19(5):443-449.
- [13] 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.
- [14] 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):138-149.
- [15] 刘金松.川藏铁路高地温隧道施工关键技术研究[J].施工技术,2018,47(1):100-102.
- [16] 杨长顺.高地温隧道综合施工技术研究[J].铁道建筑技术,2010(10):39-46.
- [17] 李国良,程磊,王飞.高地温隧道修建关键技术研究[J].铁道标准设计,2016,60(6):55-59.