

文章编号: 1674—8247(2020)04—0055—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.04.011

## 寒区隧道新型环向盲沟排水体系及温度场分析

刘龙卫<sup>1</sup> 孙源<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401123; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**寒冷地区的隧道常发生冻害问题,大多是由排水系统的冻结引起的。针对这一问题,结合冬季降温和春季升温时隧道围岩温度的变化特点,本文提出了一种环向盲沟保温排水结构体系:在隧道衬砌后的围岩内沿环向设置排水盲管,盲管由宽幅1m保温混凝土填充的环向盲沟进行保温,环向排水管由上而下直通排水横沟汇集排水。对围岩温度场的有限元数值模拟分析结果表明:通过在保温环向盲沟后设置环向排水管,结合在两盲沟环向排水管之间的防水板后环向排水管,无论是在降温冻结期还是在升温融化期,均能保证排水系统的通畅。

**关键词:**寒区隧道; 温度场; 环向盲沟; 隧道排水

中图分类号:U453.6 文献标志码:A

## Analysis of New Circular Blind Drainage System and Temperature Field of Tunnel in Cold Region

LIU Longwei<sup>1</sup> SUN Yuan<sup>2</sup>

(1. The First Construction Division Co., Ltd. of China Railway Tunnel Group, Chongqing 401123, China ;  
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Freezing damage often occurs in tunnels in cold areas, which is mostly caused by freezing of the drainage system. To solve this problem, considering the temperature change characteristics of tunnel surrounding rock with the temperature drop in winter and temperature rising in spring, this paper puts forward a circular blind drainage and insulation system; setting drainage blind pipe in the surrounding rock behind tunnel lining along the circular direction, with insulation provided by the circular blind ditch filled with 1m wide insulation concrete; the circular drainage pipe leads to the horizontal ditch from top to bottom. The results of finite element numerical simulation analysis on the temperature field of surrounding rock show that the drainage system can be ensured to be smooth no matter during the freezing period or the heating melting period, by setting the circular drainage pipe behind the insulation circular blind ditch and the waterproof board rear circular drainage pipe between the two blind ditch circular drainage pipes.

**Key words:** tunnel in cold region; temperature field; circumferential blind ditch; tunnel drainage

隧道保温的主要目的就是在围岩冻结和解冻过程中使排水系统尽可能畅通<sup>[1]</sup>。在寒冷季节,渗漏水会

诱发各种隧道冻害,威胁安全行车和结构稳定<sup>[2]</sup>。因此,保证隧道衬砌壁后水系统的冬季畅通非常重要。

收稿日期:2020-04-14

作者简介:刘龙卫(1980-),男,高级工程师。

引文格式:刘龙卫,孙源. 寒区隧道新型环向盲沟排水体系及温度场分析[J]. 高速铁路技术,2020,11(4): 55-59.

LIU Longwei, SUN Yuan. Analysis of New Circular Blind Drainage System and Temperature Field of Tunnel in Cold Region[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 55-59.

国内防止排水系统堵塞主要采用保温法<sup>[3-4]</sup>:一是在隧道衬砌的外表面全面设置保温层;二是在隧道衬砌壁后全面设置保温层。但通过对隧道冻害情况的调查发现<sup>[5-10]</sup>,寒冷地区隧道在温度恶劣(大约 $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的条件下,现有保温层措施存在因衬砌壁后排水系统冻结而产生渗漏水冻害的问题。目前,针对隧道防冻措施的研究主要集中在整体保温方面,很少有保温和排水相结合的防冻措施。因此,针对现存隧道防排水问题,本文提出了一种寒区隧道局部保温+排水的保温排水结构——环向盲沟保温排水结构体系,分析了该结构体系对围岩温度场的影响,并验证了其保温排水效果。

## 1 环向盲沟防排水结构

环向盲沟保温排水结构体系是一种局部保温+排水相结合的措施,即在保持现有防水保温的措施下,于隧道衬砌后的围岩内沿环向设置排水盲管,盲管由宽幅1 m的轻质保温混凝土填充的环向盲沟进行保温,结构示意如图1所示。

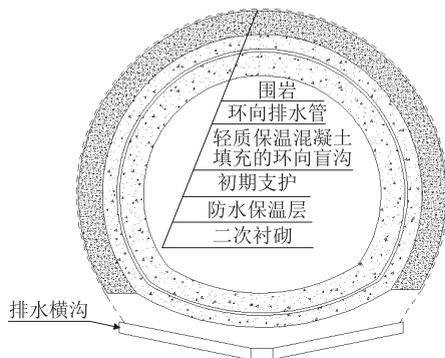


图1 环向保温盲沟结构示意图

具体方法是:沿隧道初期支护以外围岩内设置环向盲沟,并采用陶粒轻质混凝土进行填充,盲沟内设外裹无纺布的排水盲管(如图2所示)。本环向保温盲沟设施适用于冬季严寒且持续时间长、冰冻期长、冻土深地区的隧道保温防水。

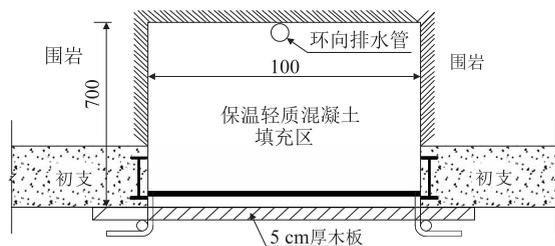


图2 盲沟局部示意图(cm)

## 2 工程实例分析

通过对近20座隧道防冻保温层敷设形式及设计厚度的调查,保温隔热层设计厚度基本上可满足隧道环境温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的排水系统防冻保温要求。反过来讲,当隧道环境温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,便可能导致隧道防排水系统冻结<sup>[11]</sup>。结合实际工程,采用有限元方法分析环向盲沟对隧道围岩温度场的影响,借以探讨环向盲沟结构体系的保温排水效果。

### 2.1 工程概况

格库铁路阿尔金山隧道全长13 195 m,为全线第一长隧道,也是本线的重点控制性工程<sup>[12]</sup>。隧址区年平均气温 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最冷月平均气温 $-25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最热月平均气温 $17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温 $-34.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为有效疏导隧道地下水,防止衬砌背后积水,最大程度减小衬砌冻胀危害,隧道两端洞口各1 500 m范围内设置环向保温盲沟,位置在初期支护以外距离衬砌内缘的1.2 m处,间距6~12 m。

### 2.2 计算模型建立及参数选取

#### 2.2.1 物理模型

将隧道衬砌环向传热转化为平面热传导问题,建立物理模型<sup>[13]</sup>如图3所示。隧道二次衬砌厚度50 cm,初期支护厚度25 cm,防水板厚度2 mm,保温层厚度5 cm。结合工程实际,环向盲沟设置在初期支护以外,初步取距离衬砌内缘1.2 m,即实际厚度45 cm,宽1 m。取距衬砌表面10 m处为地层恒温线,同时根据TB 10003-2016《铁路隧道设计规范》关于排水管间距的规定,环向盲管间距宜为8~12 m,当地下水发育时可适当加密至3~5 m。本文结合工程实际,选取盲沟纵向间距6 m进行研究。

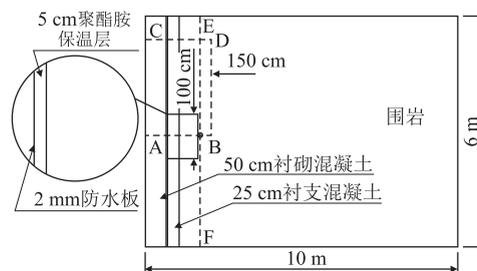


图3 物理模型图

采用ANSYS二维实体单元PLANE55划分网格,模拟的二维结构区域共划分6 184个单元,6 256个节点。

#### 2.2.2 计算参数

依据寒区隧道特性,材料热物理参数如表1所示。

表1 材料热物理参数<sup>[14]</sup>

材料	导热系数 /(W/(m·k))	比热 /(kJ/(kg·°C))	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )
围岩	0.96	1.46	1 500
普通混凝土	2.32	1.92	2 480
陶粒混凝土	0.7	1.05	1 500
防水板	0.3	2.30	920
保温层	0.02	1.20	40

### 2.2.3 边界条件与初始条件

由于隧道洞口段是冻害最不利地段,故假定隧道衬砌表面温度与大气温度一致,且以年为周期按正弦规律变化。依托隧道工程地区年平均气温为2.9℃,年温差约为60℃,提出模型的左边界温度条件为:

$$T_c = 30\sin(2\pi t/T + 3\pi/2) + 2.9 \quad (1)$$

式中: $T$ ——作用时间。

全年的温度分布如图4所示。

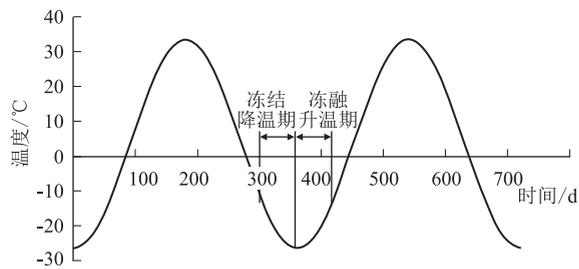


图4 衬砌表面温度随时间变化曲线图

从图4可以看出,最低作用气温约为-26.4℃,最高作用气温约为33.6℃,为模拟恶劣的环境温度,模拟分析时,左边界温度取1年之中的持续负温段;假定离地表10m处围岩温度保持6℃不变,并以此作为右边界条件;上、下边界考虑为绝热条件。初始衬砌温度与围岩温度保持一致。考虑到围岩温度变化相对于环境温度有一定的延迟效应,故取图4曲线300d对应时间点为模拟的起始作用时间,冻结降温期为300~360d,冻融升温期为360~420d,最终作用时间考虑为120d。

## 2.3 计算结果分析

### 2.3.1 冻结降温期

随着冬季环境气温逐渐降低,从隧道衬砌表面到围岩深处的整个区域温度都在逐渐降低,隧道沿径向的负温线逐渐加深。从图3的物理模型可以看出,AB方向上,围岩左端有保温盲沟;CD方向上,围岩左端没有保温盲沟。因此,保温盲沟作用下的围岩径向温度,即为AB方向上的温度曲线;同理,CD方向即为无保温盲沟作用下的围岩径向温度。为分析冻结降温期环向盲沟对围岩温度的影响,分别提取沿AB方向和CD方向不同时刻的温度分布值,得到有无保温盲沟

的围岩深度曲线,如图5、图6所示。其中初始时间为0d,即图4中300d的位置。

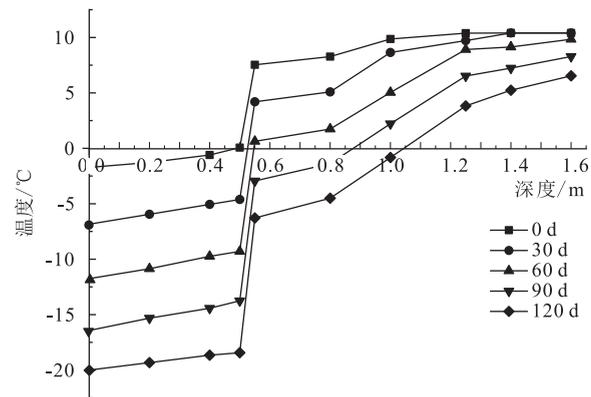


图5 有环向盲沟围岩温度曲线图

从图5可以看出,径向温度分布受保温措施的影响,存在明显的分层现象。由于衬砌混凝土导热能力较好,衬砌层温度受环境温度影响变化较快,曲线较为平缓;到保温层,由于保温材料隔绝传热,两侧温度相差较大;初期支护层曲线平缓,至盲沟填充的保温混凝土层(径向深度约在0.8~1.25m)两端温差又变大,直到围岩层又相对平缓。且在径向深度约为1.25m处(即环向排水管位置),温度大约都在2.5℃以上,基本保证不会发生冻结。

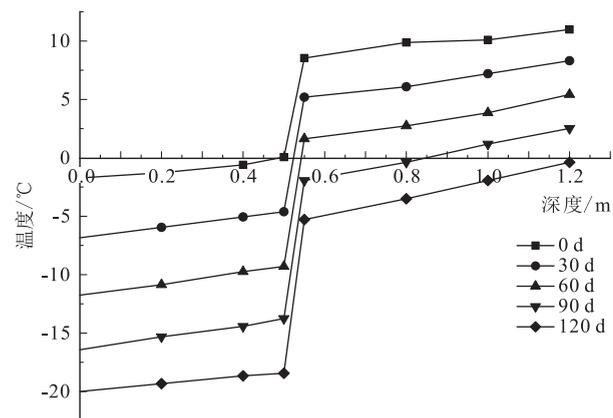


图6 无保温盲沟围岩温度曲线图

从图6可以看出,到90d衬砌表面温度(环境温度)已经下降到-15℃以下,同时保温层后的围岩温度达到-1.94℃,此时环向排水管不可避免地会出现冻结的情况,这说明在极端温度下,保温层的保温效果确实存在达不到保证排水通畅要求的情况。

对比图5和图6可知,受盲沟保温作用的影响,从整体上来看,有保温盲沟区域的近壁面处围岩温度受明显高于未设保温盲沟区域的近壁面处围岩温度,设置保温盲沟能有效防止排水系统的冻结问题。

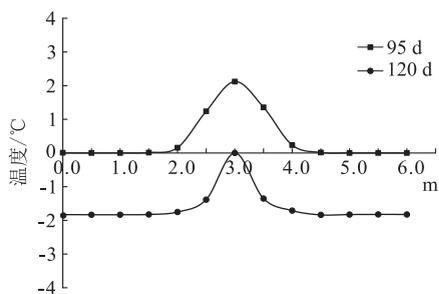


图7 1.05 m 深度处围岩温度曲线图

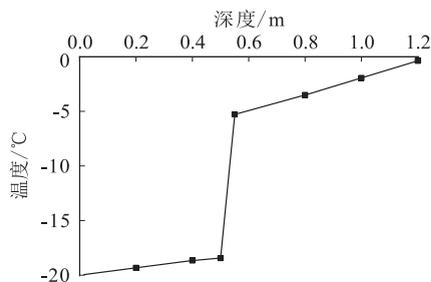


图8 120 d 无保温盲沟径向 1.2 m 范围内围岩温度曲线图

根据设置保温盲沟时的围岩温度曲线,可得保温盲沟影响下不同时间的围岩冻结深度,如表2所示。

表2 不同时间的围岩冻结深度表

时间/d	0	30	60	90	120
冻结深度/m	0.5	0.53	0.55	0.87	1.05

从表2可以看出,考虑最不利情况,120 d时的最大冻结深度为1.05 m,对于径向深度在1.25 m的环向排水管,仍有一定的安全距离。反过来讲,若环向排水管设置在深度1.05 m的位置,也能保证自身排水通畅。那么对于保温盲沟来讲,其设置厚度应做一定调整,最小厚度可为25 cm,即环向盲管可位于深度1.05 m处。考虑最不利条件,以环向盲管位置深度为1.05 m(盲沟厚度25 cm)进行建模分析。

在上述假设的环境温度下,环向盲沟对防排水起到了良好的效果,但对于更低温度(最低气温低于 $-26.4^{\circ}\text{C}$ )的环境条件,仍需验证最小厚度是否能保证排水通畅。保持温度边界条件不变,采用25 cm厚度的环向盲沟进行模拟分析。模拟结果表明,在设置环向盲沟后,环向排水管所在深度(即径向深度1.05 m)处围岩温度有了明显的变化(如图7所示),盲沟处降温速度更慢。120 d无保温盲沟径向1.2 m范围内围岩温度曲线如图8所示。从图8可以看出,未设环向保温盲沟区段的冻结深度已经达到1.2 m。可以预想,当设有环向盲沟区段的环向盲管开始冻结时,无保温盲沟区段应已形成了一层围岩冻结层,此时

反而可阻隔地下水的渗透。

上述结果表明,盲沟厚度为25 cm时能保证排水系统的通畅。即使在更恶劣(小于 $-26.4^{\circ}\text{C}$ )的环境温度下,环向排水管发生冻结,但当排水管冻结时,在隧道未设保温盲沟区段的衬砌壁后围岩已经冻结,隧道渗漏水也不会发生。

### 2.3.2 冻融升温期

随着冬季过去,环境气温逐渐升高,从隧道衬砌表面到围岩深处的冻结区域,随温度升高会发生冻融。升温期有、无环向盲沟情况的围岩温度分布曲线如图9、图10所示。

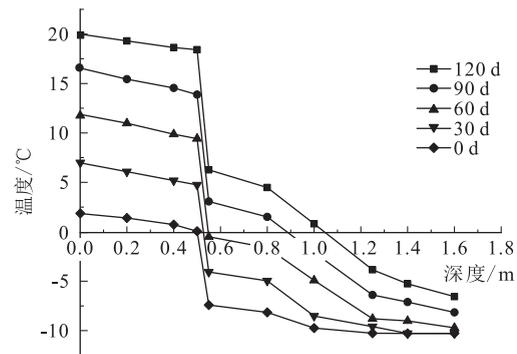


图9 有环向盲沟围岩温度曲线图

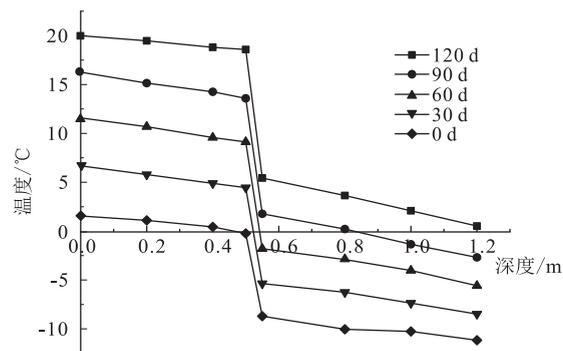


图10 无保温盲沟围岩温度曲线图

从图9和图10可以看出,在冻融升温期,设置环向盲沟区域的围岩温度比不设盲沟的区域升温慢,解冻开始时间较不设盲沟区域有所推延。

冻融升温期排水盲管深度处围岩温度曲线如图11所示。从图11可以看出,未设置环向盲沟区域(即EF线两端),在100 d时已升温至 $0^{\circ}\text{C}$ ,而设有保温盲沟区域在120 d时围岩温度才达至 $0^{\circ}\text{C}$ ,故有保温盲沟区域的环向排水管要比无保温盲沟区域的环向排水管晚解冻20 d左右,即设有保温盲沟区域的环向排水管要晚20 d开始工作。因此,在这段时间内,围岩内的地下水不能从有保温盲沟的环向排水管中有效排出。

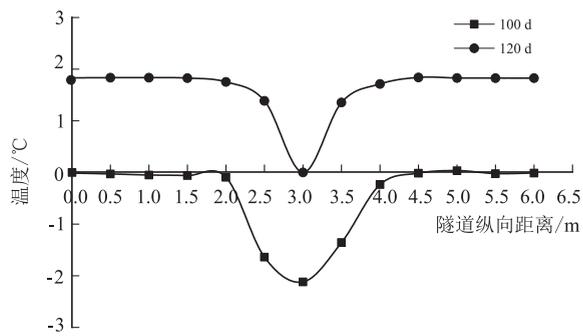


图11 1.05 m 深度处围岩温度曲线图

#### 2.4 现场测试分析

在洞口处环向盲沟布置径向温度测点,且在设置盲沟的纵向范围内也布置测点,现场进行温度测试,得到环向盲沟段的纵向与径向温度分布,如图12、图13所示。

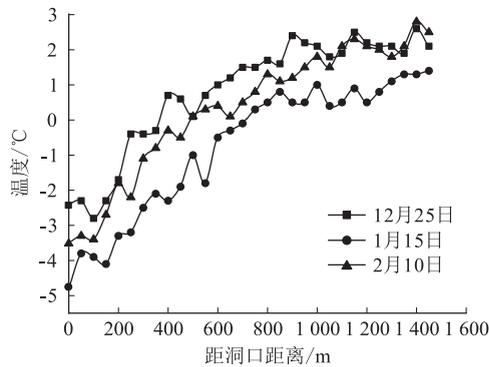


图12 环向盲沟段纵向隧道壁面温度图

从图12可以看出,由于设置环向盲沟,在最冷的冬季,洞口段温度基本保持在 $-5^{\circ}\text{C}$ 以上,此时隧址大气温度约在 $-10^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 左右,且随着冬季温度的下降,洞口段温度变化幅度很小,只有 $2^{\circ}\text{C}$ 左右。

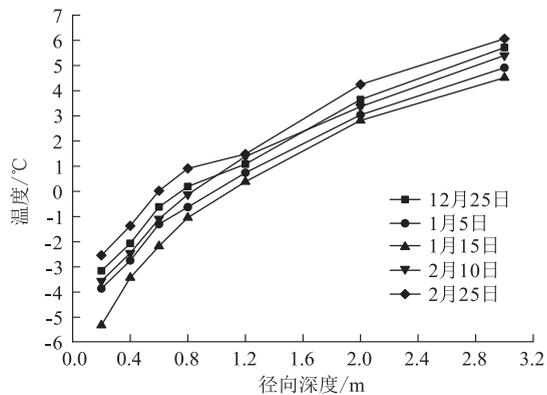


图13 环向盲沟段径向温度图

从图13可以看出,在整个冬季,初期支护以外距离衬砌内缘1.2 m处,温度始终保持在 $0^{\circ}\text{C}$ 以上,不会出现盲沟后排水盲管冻结的情况。目前来看,在阿尔

金山隧道隧址的高寒环境下,环向盲沟能有效保证隧道洞口段衬砌排水系统的通畅。

### 3 结论与建议

(1)相比于传统的防寒排水系统,环向盲沟排水体系在初期支护以外一定深度的岩层内就能起到排水效果,同时能防止排水盲管的冻结堵塞。在阿尔金山隧道的应用中,环向盲沟的设计实现了隧道洞口段衬砌排水系统的通畅。

(2)盲沟厚度为25 cm时能保证排水系统的通畅,即使在更恶劣(小于 $-26.4^{\circ}\text{C}$ )的环境温度下,环向排水管会发生冻结,但当排水管冻结时,隧道未设保温盲沟区段衬砌壁后的围岩已经冻结,不会发生渗漏水问题。

(3)若环境温度特别低(定义为小于 $-25^{\circ}\text{C}$ ),在温度由低逐渐升高的融化期,未设保温盲沟区段的冻结围岩会比设保温盲沟区段的围岩先一步融化,在设保温盲沟区段还未解冻期间将会出现渗漏水的情况。因此,在环境温度小于 $-25^{\circ}\text{C}$ 的地区,建议除在保温环向盲沟后设置环向排水管外,还应在两盲沟环向排水管之间的防水板后增设环向排水管,两者可在冻融期交替发挥排水作用,无论是降温冻结期,还是升温融化期均可保证排水系统的通畅。

#### 参考文献:

- [1] 袁超,李树忱,李术才,等.寒区老旧隧道病害特征及治理方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3354-3361.  
YUAN Chao, LI Shuchen, LI Shucui, et al. Study of Defects Characteristics and Repair Methods of Old Tunnel in Cold Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3354-3361.
- [2] 张恒.严寒地区铁路隧道衬砌冻胀病害及治理措施研究[J].铁道标准设计,2012,55(S1):8-11.  
ZHANG Heng. Research on Frost Heaving Diseases and Control Measures of Railway Tunnel Lining in Severe Cold Regions [J]. Railway Standard Design, 2012, 55(S1): 8-11.
- [3] 邱军领,赖金星,张广龙,等.季节性寒区隧道主动加热保温防冻方法及其试验[J].地下空间与工程学报,2017,13(4):982-987.  
QIU Junling, LAI Jinxing, ZHANG Guanglong, et al. A Case Study on Antifreeze of Tunnel in Seasonal Cold-region Using the Electric Heat Tracing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 982-987.
- [4] 张玉伟,谢永利,李又云,等.寒区隧道合理保温型式及保温效果试验[J].铁道科学与工程学报,2016,13(8):1569-1577.  
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. Rationality of Heat Preservation Mode in Cold Region Tunnels and Model Test Verification [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1569-1577.

(下转第104页)

- 41(5): 417-419.
- SHEN Baohan, WANG Fengliang. Construction Technology of Screw Rod Filling Pile[J]. Architecture Technology, 2010, 41(5): 417-419.
- [6] 闭历平, 方崇, 张信贵. 新型螺杆灌注桩的施工工艺与质量控制措施[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(12): 15-16.
- BI Liping, FANG Chong, ZHANG Xingui. Construction Technique and Quality Control Measures for a New Kind of Screw Grout Pile[J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(12): 15-16.
- [7] 秦永军, 张亦凡. 全螺纹灌注桩施工质量控制[J]. 科技信息, 2009(11): 655.
- QIN Yongjun, ZHANG Yifan. Full Thread Filling Pile Construction Quality Control [J]. Science & Technology Information, 2009(11): 655.
- [8] 王京汉, 黎光明. 螺纹桩桩基承载力静载与高应变检测对比分析[J]. 工程建设, 2007, 39(1): 14-17.
- WANG Jinghan, LI Guangming. Analysis of Comparing Static Loading Test with Dynamic High Strain Testing for Screw Pile Foundation[J]. Engineering Construction, 2007, 39(1): 14-17.
- [9] 李秀华, 从卫民, 岳晨曦, 等. 新型螺杆灌注桩的技术性能及工程应用[J]. 江苏建筑, 2013(3): 82-84.
- LI Xiuhua, CONG Weimin, YUE Chenxi, et al. Technical Performance and Engineering Applications of the New Cast-in-Place Concrete Pile with Half-screwed[J]. Jiangsu Construction, 2013(3): 82-84.

(上接第59页)

- [5] 邓刚. 高海拔寒区隧道防冻害设计问题[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- DENG Gang. Investigation of Frost Protection Design for Tunnels in High Altitude Cold Regions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [6] 魏星星, 郑波, 王仁杰. 季节性冻土隧道冻害机理分析及防冻探索[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 44-50.
- WEI Xingxing, ZHENG Bo, WANG Renjie. Frost Damage Mechanisms and Anti-freezing Measures for Tunnels in a Seasonally Frozen Soil Region [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(2): 44-50.
- [7] 马晓良, 董新平. 寒冷及严寒地区隧道冻害发生机理及防治[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1996-1999.
- MA Xiaoliang, DONG Xinping. The Frost Damage Mechanism and Countermeasures for Tunnels in Cold Regions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S2): 1996-1999.
- [8] 张旭珍. 关角隧道排水设施冻害原因分析及处理方案研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(3): 86-89.
- ZHANG Xuzhen. Study on Freezing Damage of Drainage Facility Cause and Treatment Scheme for Guanjiiao Tunnel [J]. Railway Engineering, 2016, 56(3): 86-89.
- [9] 张羽, 张涛. 基于温度场的季冻区隧道冻胀机理和综合防冻技术[J]. 公路, 2016, 61(6): 294-298.
- ZHANG Yu, ZHANG Tao. Mechanism of Tunnel Frost Heave in Seasonal Frozen Zone Based on Temperature Field and Comprehensive Anti-freezing Technology [J]. Highway, 2016, 61(6): 294-298.
- [10] 高焱, 朱永全, 赵东平, 等. 隧道寒区划分建议及保温排水技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3489-3499.
- GAO Yan, ZHU Yongquan, ZHAO Dongping, et al. Study on Classified Suggestion of Tunnel in Cold Region and Thermal Insulation-considered Drainage Technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3489-3499.
- [11] 王占宇, 储江伟, 刘秀. 高海拔隧道热固型材料防冻保温层厚度的隔热效果仿真分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 15-20.
- WANG Zhanyu, CHU Jiangwei, LIU Xiu. Simulation Analysis on the Thermal Insulation Effect of the Thickness of the Thermosetting Thermal Insulation Layer in High-Altitude Tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(4): 15-20.
- [12] 朱琴生. 高原高寒特长铁路单线隧道机械化施工配套技术应用[J]. 中国设备工程, 2017(10): 147-148.
- ZHU Qinsheng. Application of Complete Set of Technology for Machinery Construction of Extra-long Single-track Tunnels in Plateaus and Alpine Regions[J]. China Plant Engineering, 2017(10): 147-148.
- [13] 吕康成, 马超超, 吉哲, 等. 寒区隧道环向排水管的条带保温及温度场分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 304-308.
- LV Kangcheng, MA Chaochao, JI Zhe, et al. Analysis on Stripe Insulating Layer for Ring Drain Pipe of Tunnel in Cold Region and Its Temperature Field [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 304-308.
- [14] 贾辉. 气象要素对寒区隧道温度场影响及纵向分区研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- JIA Hui. Study on the Influence of Meteorological Elements on the Temperature Field of Tunnel in Cold Region and Longitudinal Zoning [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.