

列车速度对寒区隧道保温防融长度的影响研究

黄华南¹,陈勇²,王一博³,吴亚平⁴

(1.河南工业和信息化职业学院,河南 焦作 454000;2.湖北省路桥集团有限公司,湖北 武汉 430056;
3.中国建筑西南设计研究院有限公司,四川 成都 610042;4.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:为了研究列车速度对寒区隧道围岩保温防融措施的影响,首先要分析温度场的情况。该文以昆仑山寒区隧道工程为背景,综合考虑了外界大气温度、不同车速引起的活塞风效应及行车阻力对隧道内温度场分布的影响。然后运用热流固耦合技术建立包括隧道围岩、混凝土衬砌和隧道内空气的三维数值计算模型,对列车不同速度运行引起的隧道内热环境变化进行合理的预测。结果表明:当列车通过隧道长期运行时,活塞风风速和列车车头尾压差随车速的提升而增大,行车阻力也随之增大,使得隧道围岩温度明显升高;无论列车是否长期运行,隧道围岩径向温度的影响深度随隧道进深的增大均不断减小,且在隧道轴向上的温度变化幅度也明显减小;当列车以速度 $v=80$ km/h和160 km/h长期运行时,推荐昆仑山隧道两端洞口保温防融长度分别设置为470 m、790 m,以有效防止昆仑山隧道围岩发生融沉危害。

关键词:寒区隧道;活塞风;温度场;设防长度;列车速度

中图分类号:U457

文献标志码:A

Influence of Train Speed on Thermal Insulation and Anti-Thawing Length for Tunnel in Cold Region

HUANG Huanan¹, CHEN Yong², WANG Yibo³, WU Yaping⁴

(1.Henan College of Industry & Information Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2.Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China; 3.China Southwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610042, China;
4.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To study the influence of train speed on thermal insulation and anti-thawing measures for surrounding rock of tunnels in cold regions, it is necessary to analyze the temperature field. By using the Kunlun Mountain Tunnel Project in cold regions as a case study, the effects of external atmospheric temperature, piston wind effects caused by varying train speeds, and the driving resistance on the distribution of the tunnel's internal temperature field were considered. A three-dimensional numerical calculation model including the surrounding rock, concrete lining, and tunnel air was established by utilizing the thermo-fluid-structure interaction (TFSI) technique. The thermal environment variations caused by trains at different speeds were predicted. The result shows that during long-term train operation through the tunnel, both the piston wind speed and the pressure difference between the front and rear of the train increase as the train speed rises. This, along with increased driving resistance, significantly raises the surrounding rock temperature. Regardless of operational duration, the radial temperature impact depth of the surrounding rock decreases with greater tunnel depth, and axial temperature variations are reduced. For long-term train operation at speeds of 80 km/h and 160 km/h, it is recommended to set the thermal insulation and anti-thawing lengths at the two tunnel portals of the Kunlun Mountain Tunnel to 420 m and 790 m, respectively, so as to effectively prevent thaw settlement hazards in the surrounding rock of the Kunlun Mountain Tunnel.

Keywords: tunnel in cold region; piston wind; temperature field; thermal insulation and anti-thawing length; train speed

收稿日期:2024-11-26(修改稿)

基金项目:国家科技支撑计划项目(编号:2014BAG05B00,2014BAG05B05)

作者简介:黄华南,女,硕士,工程师.E-mail:873741354@qq.com

0 引言

在多年冻土地区修建隧道时,列车运行速度、外界气温等变化均会打破隧道周围岩体原有的平衡,比如:列车设备的散热和空气摩擦等产生的热量通过温度的传递,致使围岩温度不断升高,进而引发多年冻土发生“融沉”病害。冻融循环的存在使得衬砌结构产生反复冻胀力作用,破坏隧道衬砌结构。田四明等^[1]、于建游等^[2]、吴涛等^[3]针对寒区隧道的冻害机理和防治进行了研究,得到冻胀力是引起冻害的最主要因素,并从衬砌厚度方面对冻胀力进行了计算,根据结果提出了防治措施;高焱等^[4]、张瑶等^[5]、潘文韬等^[6]对寒冷及严寒地区隧道冻害机理与防治也进行了研究,并根据结果提出相应的措施。为了避免隧道内危害的产生,确保隧道结构的安全性和耐久性,对隧道内温度场分布及保温隔热层的铺设长度进行研究是很有必要的。

针对寒区隧道温度场的研究,国内外学者进行了大量分析。Taylor等^[7]基于有限元方法对有相变非线性热传导问题进行了研究;Song等^[8]和李彬嘉等^[9]分别通过数值模拟研究了高速列车通过地铁隧道时对温度场产生影响,包括气流场和压力的变化情况。中国学者对寒区隧道内温度场研究成果也颇为丰富,王志杰等^[10]、张玉伟等^[11]依据现场实测温度数据,建立了圆形隧道传热方程,得到有隔热层措施下的隧道温度场解析方法;Zhan等^[12]通过对寒区隧道现场温度测试,总结了隧道内温度场的变化规律;杜耀辉等^[13]研究了高速列车运行对寒区隧道温度场的影响,发现高速列车运行缩小了隧道内外温差,并针对温度场变化提出了防冻措施研究;周家作等^[14]采用无量纲和摄动技术,求解得到了寒区隧道圆形截面的温度场解析解;冉洪伍等^[15]根据昆仑山隧道现场勘测信息,对常年冻土隧道冻融圈邻近区域的温度场变化进行了研究;Bekele等^[16]研究了昆仑山隧道内气温和地温的变化规律。

依据隧道温度场的分布情况,可以合理地设置保温设防长度,以防止隧道结构发生病害。Lai等^[17]、黄加明等^[18]、吴占东^[19]、刘红岩等^[20]采用拉普拉斯积分变换法,得到因保温作用而未发生相变的寒区隧道温度场解析解,并对保温层厚度进行了合理的计算;Jame等^[21]、夏才初等^[22]、白雪莹^[23]以及吕康成等^[24]基于流体力学、传热学和空气动力学基本原理和方法,对西藏嘎隆拉隧道在通风影响下隧道

的温度场进行了研究,并求得防寒保温敷设长度。查阅相关文献发现^[25-27],目前针对列车运行引起的活塞风效应和行车阻力对温度场影响的研究相对较少,尤其是关于列车以不同速度长期运行时对寒区隧道温度场影响的研究更少。

鉴于此,本文采用热流固耦合技术建立空间有限元三维模型,并结合已经确定的计算参数和边界条件,对列车在不同时速持续运行条件下引起的热环境变化进行合理的预测,计算并分析了列车在隧道中运行时产生的空气动力学效应及洞内流体与围岩之间热传递产生的温度场分布规律,并根据计算成果得出保温层设防长度。

1 工程背景

本研究以青藏铁路格拉段第一大控制工程、世界上最长的冻土隧道——昆仑山隧道为依托对象,该隧道全长1 686 m,里程为DK976+250~DK977+936,线路高程4 666 m,区内昼夜温差很大,空气干冷稀薄,气压低,一年内有长达7~8个月为冻结状态,1977年底的观测资料表明:西大滩处的年平均温度为 -3.6°C ,其山脉多为板岩体,少数为夹片岩层。隧道进口位置地处阴面,植被覆盖率约为40%,冻土上限约为2.7 m,隧道出口地处阳面,几乎没有植被发育,冻土上限2.1~2.7 m,最浅埋段埋深2.8 m,位于DK977+630 m断面处。据有关资料推测,昆仑山隧道的年平均地温为 $-1.81\sim-2.65^{\circ}\text{C}$,属于地温稳定冻土区。纵断面如图1所示。

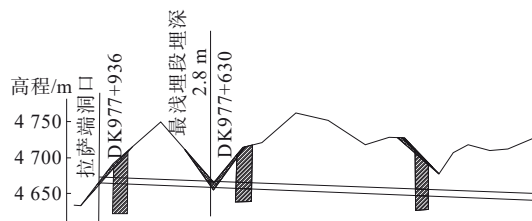


图1 昆仑山隧道纵断面图

Figure 1 Longitudinal section of Kunlun Mountain Tunnel

2 基本假设

本文分析隧道温度场分布情况时,自然通风和列车运行均会使得隧道内的温度场发生变化,根据《铁路隧道运营通风设计规范》(TB 10068—2024),当无列车通过隧道时,进出口处的自然风速取 1.5 m/s ,列车速度取 80 km/h 和 160 km/h ,为简化数值计算,在列车运行时考虑了隧道内空气与围岩、围岩与围

岩之间沿围岩径向的热传递以及隧道内空气与围岩沿隧道进深的热传递,如图2所示。本计算中未考虑围岩温度因地表温度产生的影响、水分迁移产生的热量改变及涌水产生的对流换热。假设没有保温材料,自然状况下衬砌壁面的对流换热系数取 $15.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

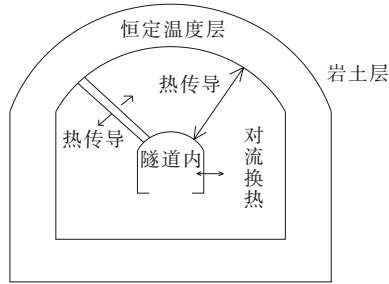


图2 隧道内部发生的热传递

Figure 2 Heat transfer in tunnel

该文空气按理想气体考虑,气体密度按理想气体定律计算,空气动力黏性系数 $\mu=0.000\ 017\ 894\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,气体比热 $c_a=1\ 006.43\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,导热系数 $\lambda_a=0.02\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,气体的密度为 $\rho=1.2\text{ kg}/\text{m}^3$,根据昆仑山隧道的气象资料统计,其洞外月平均气温拟合成一条正弦曲线:

$$T=269.55+12\sin\left(\frac{2\pi}{8\ 640}t+\frac{3}{2}\pi\right) \quad (1)$$

式中: T 为昆仑山隧道洞外月平均气温(K); t 为时间(h)。

2.1 模型及材料参数的确定

针对不同的行车速度和自然通风引起的隧道内温度场分布情况,本文利用有限元软件建立了隧道内三维空间模型。考虑隧道断面结构及边界条件的对称性,选取断面的一半进行分析,根据试算,模型的径向深度取 10 m ,如图3所示。

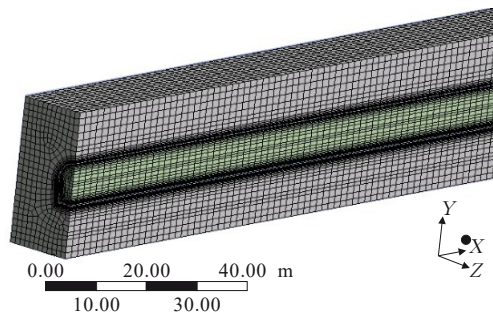


图3 有限元计算模型及网格划分(单位:m)

Figure 3 Finite element calculation model and mesh generation (unit:m)

衬砌材料混凝土的计算参数取值见表1。围岩温度取该地区的平均地温 -2.5°C ,分析围岩温度时所涉及的参数主要有密度 ρ 、导热系数 λ 、比热容 c 、热焓 H 等,它们均与岩体的物理特性、构成等密切相关,并且围岩按均质、连续的材料处理,计算所需参数取值见表2。

表1 衬砌计算参数

Table 1 Calculation parameters of lining

$E/$ MPa	$\lambda/$ [W·(m·K) ⁻¹]	$c/$ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	μ	$\gamma/$ (kN·m ⁻³)
20 000	1.51	0.84	0.2	23

注: E 为变形模量; μ 为摩擦系数; γ 为重度。

表2 围岩热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of surrounding rock

温度/ °C	$\rho/$ (kg·m ⁻³)	$W_u/$ %	$\lambda_t, \lambda_u/$ [W·(m·K) ⁻¹]	$c_t, c_u/$ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	$H/(10^6)$ J·m ⁻³
-10.0	1 926	9.8	1.49	1.18	0.00
-5.0	1 926	10.8	1.49	1.18	1.16
-2.0	1 926	13.7	1.49	1.18	18.57
-1.0	1 926	15.7	1.49	1.18	21.45
-0.5	1 926	17.6	1.49	1.18	23.21
-0.2	1 926	21.6	1.49	1.18	25.16
0.0	1 926	24.6	1.12	1.49	26.48
10.0	1 926	24.2	1.12	1.49	53.99

注: W_u 为冻结后未冻水质量含水量; λ_t, λ_u 分别为未冻结和冻结条件下的导热系数; c_t, c_u 分别为未冻结岩体和冻结岩体的比热; H 为热焓。

2.2 控制微分方程及边界条件的确定

本文在方便建模计算时,将列车和隧道均简化为长方体,列车速度取 $80\text{ km}/\text{h}$ 、 $160\text{ km}/\text{h}$,每天分别通过8对、12对列车,均单向运行,列车长 $l_t=200\text{ m}$, $A_t=10.8\text{ m}^2$,隧道总长 $1\ 686\text{ m}$,最浅埋深为 2.8 m ,最大埋深为 106 m ,隧道断面的净宽 $\times$ 高 $=8.4\text{ m}\times 6.0\text{ m}$ 。湍流模型采用标准的 κ - ϵ 模型与标准的壁面函数相结合。

针对本文计算列车通过隧道引起的空间温度场变化时,隧道内空气仍然是可压缩、黏性、非稳态的三维流动,并且湍流发展充分。空气温度场控制方程为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度; u_i 或 u_j 分别代表速度在 u 、 v 、 w 3个方向的流场速度分量; t 为时间; p 为压力; τ_{ij} 为黏性应力分量; x_i 或 x_j 分别代表 x 、 y 、 z 3个方向的坐标分量。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j e) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: e 为气体的内能; λ 为导热系数; T 为气体温度。

状态方程:

$$P = \rho RT \quad (5)$$

式中: P 为压强; ρ 为流体密度; R 为气体常数。

3 隧道温度场分析

自然通风、列车运行引起的活塞风不仅将外界空气带入隧道内,还增大了行车阻力,加剧了隧道内原有的热环境的变化,可能导致隧道洞口出现病害问题,影响列车的后期运行。因此,需要在隧道的轴向和径向设置一定厚度和长度的保温隔热层。为防止融沉病害的发生,本文在确定了昆仑山隧道的保温设防长度后,根据相关现场实测温度和气象统计资料,以其外界大气月平均温度为最高的月份(8月)作为依据,分析无保温隔热层时在有、无列车运行情况下隧道温度场的变化情况。

3.1 活塞风风速和行车阻力

本文研究活塞风效应时,假设隧道的横断面为定值,列车在隧道内匀速运行,即阻塞比一定,车头为流线形的工况。利用Fluent软件,采用动网格技术,分别模拟列车以 $v=80$ km/h和160 km/h的速度驶入隧道、在隧道内运行以及驶出隧道过程中列车周围产生的气流场分布来计算活塞风效应。在模拟列车长期运行时,活塞风按间隔作用计算,其间隔时间按目前最小的行车间隔180 s计算,活塞风风速按相对风速取值。假定任意时刻活塞风在隧道横断面上的速度分布是均匀的,根据数值计算结果得出不同时刻的平均活塞风风速,如表3、4所示。

由表3、4可知:在两种列车速度下,列车刚驶入隧道时,活塞风风速相比车速分别增大了4 m/s、7 m/s左右,这是由于列车驶入隧道时,车头空间减小,车头前方空气通过列车间的环状空间被排挤流入列车后方,车体周围局部气流场增大,活塞风风速也增大。随着距离隧道入口距离的增大,活塞风

风速逐渐减小,但随列车时速的提升,环状空间内气流速度增大,活塞风风速随之增大,并且隧道内空气流动的湍流现象因受活塞风的影响而变得愈加明显。

表3 不同时刻隧道内的活塞风平均风速

(列车速度 $v=80$ km/h)

Table 3 Average piston wind speed in tunnel at different time($v=80$ km/h)

时间/ s	活塞风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时间/ s	活塞风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	26.5	48	5.2
8	15.4	56	4.7
16	10.2	64	4.3
24	8.2	72	4.0
32	6.7	80	3.5
40	5.8	86	3.4

表4 不同时刻隧道内的活塞风平均风速

(列车速度 $v=160$ km/h)

Table 4 Average piston wind speed in tunnel at different time($v=160$ km/h)

时间/s	活塞风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	时间/s	活塞风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	51.2	25	9.0
5	35.6	30	6.2
10	23.9	35	5.8
15	15.9	40	5.3
20	9.6	43	5.1

列车在隧道中运行时的行车阻力计算公式:

$$R = D_p + D_{fr} \quad (6)$$

压差阻力公式:

$$D_p = \Delta P A_t \quad (7)$$

式中: R 为行车阻力; D_p 为车头尾之间的压差阻力; D_{fr} 为列车壁面与空气之间的摩擦阻力; ΔP 为车头车尾之间的压力差; A_t 为列车横截面积。

本计算中忽略由转向系统、车床摩擦等引起的机械阻力,行车阻力主要与车的头尾压力差及列车壁面与空气的摩擦有关。由于篇幅所限,本文根据以上公式计算得到列车以速度 $v=80$ km/h、160 km/h运行时需要克服的压差阻力分别为2.18 kN、12.0 kN。计算摩擦阻力时,未考虑隧道的壁面摩擦,得出列车的摩擦阻力分别为1.16 kN、3.95 kN,行车阻力分别为2.34 kN、12.95 kN。

由计算结果可知:列车以80 km/h、160 km/h时

速运行所受的压差阻力分别约占总阻力的 65%、75%，即随着车速的提升，列车所受的阻力在增大，这使得隧道内热量增加。

综上可知：列车与空气作用产生的行车阻力随车速提升而增大，加剧了隧道内的热量，同时，在活塞风作用下进一步带动了洞内外空气和热量的交换，使得隧道内围岩温度的热传递发生显著变化，这为分析隧道内温度场分布提供了前提基础。

3.2 隧道围岩温度场分布

隧道内温度的传递包括空气与围岩、围岩与围岩之间的热量传递，本文研究的流体与岩体之间的对流换热过程属于无内热源的三维非稳态空间热传递过程，则围岩的热传递微分方程为：

$$D\left[T(x, y, z, t)\right] = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

式中： x, y, z 为不同方向； t 为时间； k 为导热系数。

隧道内空气与隧道围岩之间存在对流换热，因此有：

$$q = \alpha(T_w - T_a) \quad (9)$$

式中： α 为对流换热系数[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]； T_w 为围岩温度； T_a 为空气温度。

隧道出入口处：温度梯度为 0，即 $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$ ；隧道壁面处为流体与固体的接触边界，空气与围岩进行对流换热，且边界处滑移速度为 0，即 $u=0$ ；由于计算模型尺寸和边界条件的对称性，模型的对称面法线方向上热流量为 0。

由于岩体周围流体的温度以及衬砌壁面的对流换热系数已知，则隧道衬砌壁面与隧道内气流的接触面处的热交换方程为：

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{s_3} = \alpha(T_s - T_f) \quad (10)$$

式中： α 为隧道壁面与空气的表面传热系数； T_s 为隧道壁面处温度； T_f 为空气在接触面处的温度。

本文中隧道衬砌表面与围岩是完全接触且以热传导方式进行热传递，则接触面的边界条件为：

$$T_s = T_f \quad (11)$$

根据文献[16]所述，通过现场对昆仑山隧道部分断面布置测温元件，实测了 6—10 月隧道内气温和地温，其洞口温度值如表 5 所示。

由表 5 可知：洞口气温在 8 月份最高，即此月份

外界大气温度最高。

由上述可知：本文模拟分析温度场时，按最高平均气温模拟在有、无列车时持续运行 10 年后对隧道周围岩体的影响，此结果比定义成几个月零上几十度的气温边界条件更为不利，但对设计隧道围岩的保温敷设长度更靠谱。图 4 为列车以不同时速持续运行 10 年情况下围岩温度的变化情况。

表 5 不同月份洞口气温

Table 5 Atmospheric temperature at tunnel portals in different months

月份	边墙/℃	拱腰/℃
6	5.0	8.0
7	8.5	10.0
8	8.7	10.5
9	4.5	5.3
10	-2.5	-1.7

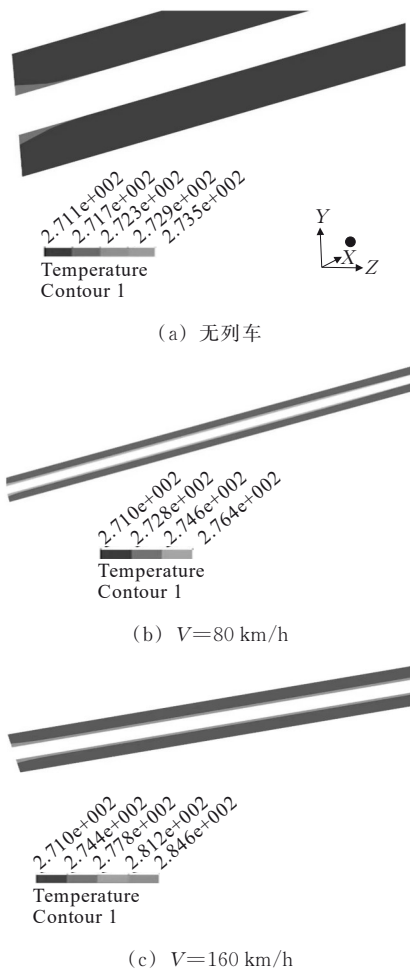


图 4 列车以不同时速运行 10 年隧道围岩对称面上的温度分布 (单位:K)

Figure 4 Temperature distribution on symmetry plane of tunnel surrounding rocks with different train speeds in ten years (unit:K)

由图4可知:在3种工况下,温度在围岩径向的传递深度随隧道轴向距离的增加均减小,且沿隧道轴向传递的深度随车速的提升越来越长;当无列车通过时,1.5 m/s的自然通风引起隧道围岩的径向和轴向温度变化幅度最小,车速为80 km/h引起的温度变化幅度次之,这是因为列车运行引起的活塞风效应和行车阻力加大了温度的传递,且活塞风风速随车速的提升而增大,随之带入隧道内的空气也越多,加上列车运行受到的阻力增加了热能的转换,使得围岩与隧道内空气之间的对流换热加剧,进而围岩的轴向温度传递也越来越明显。

图5为围岩径向温度影响深度随隧道进深距离的变化情况。

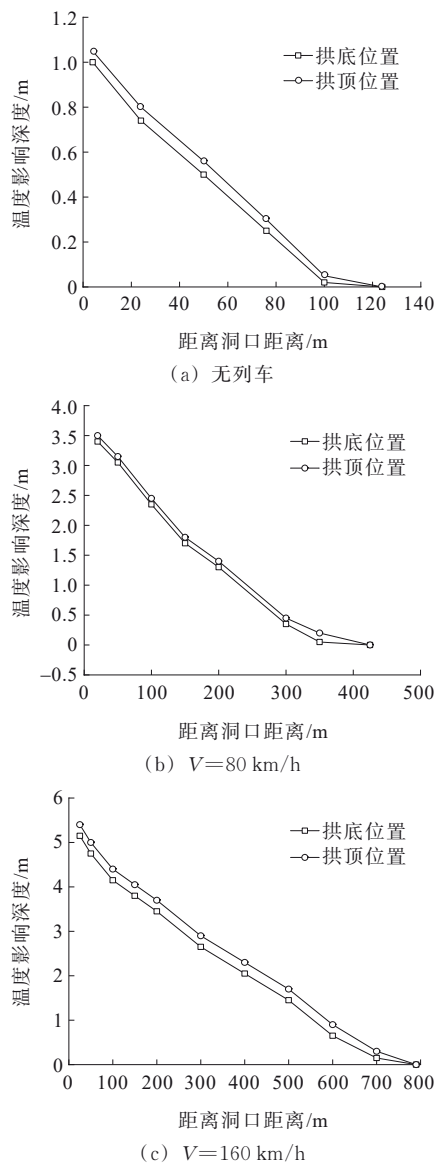


图5 围岩径向温度影响深度随隧道进深距离的变化(10年)
Figure 5 Variation of radial temperature impact depth of surrounding rock with increasing tunnel depth(ten years)

从图5可知:在3种工况下,围岩径向温度影响深度沿隧道轴向呈线性降低的趋势,且在洞口附近最大,同时,围岩径向温度变化幅度沿隧道轴向也减小;当无列车通过隧道时,1.5 m/s的自然通风引起的围岩径向深度为1.05 m,约为整个围岩深度的1/10,轴向影响深度约为123 m;以80 km/h、160 km/h运行引起的最大径向深度分别约为3.51 m、5.43 m,各自达到整个围岩深度的1/3和1/2,并且轴向影响深度分别约为420 m、790 m,即以160 km/h运行引起的最大径向深度较80 km/h运行时增加35%,轴向影响深度增加47%,且有列车运行引起的最大径向深度和轴向影响深度幅度变化值是无列车运行时的3~7倍。由此可知,列车速度对隧道内围岩温度场的变化影响很大,且随着行车速度的提升,寒区隧道围岩的温度升高愈加明显,使得隧道围岩的保护性显得更加重要。

4 昆仑山隧道保温设防长度

在寒区隧道施工过程中,经常通过设置保温层来减少隧道冻害的发生,这样可保障行车安全并提高隧道使用寿命,如何设置合理的保温铺设长度来满足以上要求并减少工程费用是一个关键性问题。

根据以上隧道温度场的计算可知:当列车通过隧道,单向以 $v=80\text{ km/h}$ 、 160 km/h 持续运行10年的情况下,隧道轴向的温度影响深度分别不小于420 m、790 m,则与其相对应所需的保温防融长度分别为420 m、790 m。由于昆仑山隧道是单线双向隧道,在双向行车密度相等的前提下,列车运行对隧道空间温度场的影响在隧道两端口处是相同的,即列车运行对围岩温度的影响范围和变化幅度均相同,则两端保温设防长度可以设置一致。

因此,当列车通过昆仑山隧道时,针对不同的列车时速可以设置不同的保温设防长度,为了安全起见,当列车以80 km/h、160 km/h速度运行时,推荐该隧道的两端洞口保温设防长度分别为420 m、790 m,寒区隧道设置保温措施可以参考这些长度,以确保列车的安全运行。

5 结论

(1) 列车运行速度的提升使得隧道内活塞风效应增强和热环境发生变化。

(2) 列车与空气作用产生的行车阻力使得隧道内热量加剧,随车速提升而增大的活塞风进一步带

动了洞内外空气和热量的交换,使得隧道内温度传递发生显著变化。

(3) 在有、无列车长期持续运行时,围岩径向温度的影响深度随隧道进深的增大而减小,在隧道轴向上的温度变化幅度也明显减小,并且以 160 km/h 运行引起的最大径向深度较 80 km/h 运行时增加 35%,轴向影响深度增加 47%,且有列车运行时的围岩温度变化幅度是无列车运行时的 3~7 倍。

(4) 当列车以 80 km/h、160 km/h 速度通过昆仑山隧道并长期运行时,推荐昆仑山隧道两端洞口防冻设防长度分别为 420 m、790 m。

参考文献:

References:

- [1] 田四明,王伟,吕刚,等.寒区隧道洞内温度场分布规律及防寒设计探讨[J].铁道标准设计,2022,66(12):84-90.
TIAN Siming, WANG Wei, LYU Gang, et al. Research on distribution law of temperature field in tunnel in cold region and cold proof design[J]. Railway Standard Design, 2022,66(12):84-90.
- [2] 于建游,王志杰,蒋新政,等.传热系数及围岩条件对寒区隧道温度场影响[J].铁道工程学报,2021,38(7):40-47.
YU Jianyou, WANG Zhijie, JIANG Xinzheng, et al. Research on the influence of heat transfer coefficient and surrounding rock conditions on temperature field in cold region tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021,38(7):40-47.
- [3] 吴涛,刘志春,刘雪娇,等.寒区隧道保温层铺设方式与材料选型优化研究[J].中外公路,2023,43(2):157-163.
WU Tao, LIU Zhichun, LIU Xuejiao, et al. Optimization research of laying method and material type selection of thermal insulation layer for tunnels in cold region[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(2):157-163.
- [4] 高焱,朱永全,耿纪莹,等.寒区隧道温度场分布规律及保温层适应性研究[J].铁道标准设计,2017,61(10):105-111.
GAO Yan, ZHU Yongquan, GENG Jiying, et al. Research on distribution law of temperature field of tunnel in cold region and thermal insulation layer adaptability[J]. Railway Standard Design, 2017,61(10):105-111.
- [5] 张瑶,夏才初,彭文波,等.高寒隧道围岩蓄热型防冻系统及其防冻效果影响因素分析[J].中国公路学报,2024,37(10):151-161.
ZHANG Yao, XIA Caichu, PENG Wenbo, et al. Thermal storage antifreeze system and its influencing factors analysis in high cold-region tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024,37(10):151-161.
- [6] 潘文韬,吴枋胤,谢金池,等.高寒山区隧道温度场及冻害控制措施研究[J].公路,2022,67(4):364-371.
PAN Wentao, WU Fangyin, XIE Jinchi, et al. Research on temperature field and freezing damage control measures of tunnel in alpine mountain area[J]. Highway, 2022,67(4):364-371.
- [7] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978,15(4):548-555.
- [8] SONG J, LI Z Y, FAN Y Y. Suitability evaluation of tunnel engineering to protect ecological environment[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,316/317:335-339.
- [9] 李彬嘉,晏启祥,曾勤,等.冰-水相变对寒区隧道动态温度场影响研究[J].铁道标准设计,2017,61(10):90-94.
LI Binjia, YAN Qixiang, ZENG Qin, et al. Study on the effect of water-ice phase change on temperature field of tunnel in cold region[J]. Railway Standard Design, 2017,61(10):90-94.
- [10] 王志杰,蔡李斌,李金宜,等.考虑相变和围岩含水裂隙的隧道冻胀力研究[J].铁道工程学报,2020,37(3):53-60.
WANG Zhijie, CAI Libin, LI Jinyi, et al. Research on the frost heaving force of tunnel considering phase change and water-bearing fracture of surrounding rock[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(3):53-60.
- [11] 张玉伟,谢永利,李又云,等.基于温度场时空分布特征的寒区隧道冻胀模型[J].岩土力学,2018,39(5):1625-1632.
ZHANG Yuwei, XIE Yongli, LI Youyun, et al. A frost heave model based on space-time distribution of temperature field in cold region tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,39(5):1625-1632.
- [12] ZHAN Y X, LU Z, YAO H L, et al. A coupled thermo-hydromechanical model of soil slope in seasonally frozen regions under freeze-thaw action[J]. Advances in Civil Engineering, 2018,2018(1):1-10.
- [13] 杜耀辉,杨晓华,晏长根.季节性寒区隧道温度场数值分析[J].冰川冻土,2017,39(2):366-374.
DU Yaohui, YANG Xiaohua, YAN Changgen. Numerical analysis of tunnel temperature field in seasonal frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017,39(2):366-374.
- [14] 周家作,韦昌富,李东庆,等.正冻土水热迁移的移动泵模型[J].冰川冻土,2016,38(4):1083-1089.
ZHOU Jiazuo, WEI Changfu, LI Dongqing, et al. A moving-pump model for moisture and heat transfer during soil freezing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016,38(4):1083-1089.
- [15] 冉洪伍,范继辉,黄菁.冻融过程土壤水热力耦合作用及其模型研究进展[J].草业科学,2019,36(4):991-999.
RAN Hongwu, FAN Jihui, HUANG Jing. Review of the coupling of water and heat in the freeze-thaw process and its model of frozen soil[J]. Pratacultural Science, 2019,36(4):991-999.
- [16] BEKELE Y W, KYOKAWA H, KVARVING A M, et al. Isogeometric analysis of THM coupled processes in ground freezing[J]. Computers and Geotechnics, 2017,88:129-145.
- [17] LAI Y M, WANG Q S, NIU F J, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold

- Regions Science and Technology,2004,38(2/3):165-184.
- [18] 黄加明,夏才初,白雪莹.冻融循环下隧道非冻土段底部融沉变形规律[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):453-460.
- HUANG Jiaming,XIA Caichu,BAI Xueying.Deformation rules of thaw settlement of non-frost section of tunnel under freezing-thawing cycle[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(2):453-460.
- [19] 吴占东.冻融环境浅埋砂质黄土隧道围岩变形规律研究[J].铁道工程学报,2021,38(1):55-59.
- WU Zhandong. Research on the surrounding rock deformation law of shallow buried sandy loess tunnel in freeze-thaw environment[J]. Journal of Railway Engineering Society,2021,38(1):55-59.
- [20] 刘红岩,赵雨霞.冻融循环下隧道围岩冻胀力理论计算[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(4):1049-1058.
- LIU Hongyan,ZHAO Yuxia.Theoretical calculation of frost heaving pressure in tunnel surrounding rock during freeze-thaw cycles[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2020,51(4):1049-1058.
- [21] JAME Y W,NORUM D I.Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium[J].Water Resources Research,1980,16(4):811-819.
- [22] 夏才初,黄文丰,韩常领.冻融循环条件下寒区隧道衬砌的服役性能[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(3):347-356.
- XIA Caichu,HUANG Wenfeng,HAN Changling.A study of the service performance of tunnel lining in the cold zone when subjected to the freeze-thaw cycle[J].Journal of Harbin Engineering University,2020,41(3):347-356.
- [23] 白雪莹.寒区隧道地基冻融变形的多场耦合数值模拟计算及应用[J].四川建材,2017,43(3):74-76.
- BAI Xueying.Numerical simulation method and its application to foundation deformation of road tunnel due to freezing-thawing process in cold regions[J].Sichuan Building Materials,2017,43(3):74-76.
- [24] 吕康成,马超超,吉哲,等.寒冷地区隧道衬砌壁后冻融及其影响分析[J].现代隧道技术,2012,49(5):29-33.
- LYU Kangcheng,MA Chaochao,JI Zhe,et al.An impact analysis of the freeze-thawing behind tunnel linings in cold regions[J].Modern Tunnelling Technology,2012,49(5):29-33.
- [25] 邓顺熙,刘人通.公路隧道空气质量模式及应用[J].西安公路交通大学学报,2000,20(2):27-30.
- DENG Shunxi,LIU Rentong.Roadway tunnel air quality models and their applications[J].Journal of Xi'an Highway University,2000,20(2):27-30.
- [26] 封晓黎,胡彦杰,宋晓,等.“双洞互补式+静电除尘”通风方式下公路隧道污染物浓度分布规律研究[J].中外公路,2021,41(2):237-240.
- FENG Xiaoli,HU Yanjie,SONG Xiao,et al.Study on pollutant distribution law of combined ventilation of twin-tube complementary and electrostatic dust removal for highway tunnels in ventilation mode[J].Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):237-240.
- [27] 李刚.隧道纵向通风设计中应注意的一些问题[J].公路,1999,44(3):49-51.
- LI Gang.Some problems that should be paid attention to in tunnel longitudinal ventilation design[J].Highway,1999,44(3):49-51.

(上接第195页)

- [11] 沈向前,陈道云,郑超.隧道掌子面预应力锚杆支护作用效果研究[J].中外公路,2023,43(2):150-156.
- SHEN Xiangqian,CHEN Daoyun,ZHENG Chao.Study on supporting effect of pre-stressed rock bolts on tunnel face[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(2):150-156.
- [12] 李斌,漆泰岳,吴占瑞,等.隧道掌子面锚杆加固参数确定方法[J].铁道学报,2012,34(10):115-121.
- LI Bin,QI Taiyue,WU Zhanrui,et al.Method for determination of reinforcement parameters of fiber glass anchor bar for tunnel face[J].Journal of the China Railway Society,2012,34(10):115-121.
- [13] 王秀英,郑维翰,张建国,等.软岩隧道玻纤锚杆预加固掌子面的稳定性分析[J].土木工程学报,2017,50(增刊1):53-58.
- WANG Xiuying,ZHENG Weihuan,ZHANG Jianguo,et al.Stability analysis of working face pre-reinforced by glass fiber anchor in soft rock tunnel[J].China Civil Engineering Journal,2017,50(sup 1):53-58.
- [14] 刘卫.预加固对软弱围岩隧道掌子面稳定性的影响研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- LIU Wei.Research on the effect of pre-reinforcement to the stability of soft rock tunnel face[D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2013.
- [15] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范 第一册 土建工程:JTG 3370.1—2018[S].北京:人民交通出版社,2019.
- China Merchants Chongqing Communications Technology Research&Design Institute Co.,Ltd..Specifications for design of highway tunnels section 1 civil engineering:JTG 3370.1—2018[S].Beijing:China Communications Press,2019.