

高地温铁路隧道温度场影响因素分析

冯国会,李兆星,孙佳琳,黄凯良

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 常规的隧道冷负荷预测方法不适用处于高地温极端环境的川藏铁路隧道,亟须开展相关研究。**方法** 以川藏铁路色季拉山隧道为背景,建立热湿耦合的多孔介质模型,分析围岩渗流水、保温层、送风速度和温度等对隧道温度场的影响。**结果** 保温层可以显著降低隧道空气温度,含水围岩的隧道有效通风距离提高了5.87%,固体围岩的有效通风距离增加了25.51%,增加保温层厚度并没有显著降低隧道温度;围岩温度和送风速度对隧道温度有显著影响,围岩温度决定了隧道温度的上限;送风速度从1 m/s分别增加到2、3 m/s,隧道温度分别降低20.53%、24.83%;各因素对隧道温度场强度影响由大到小依次为围岩温度、送风速度、送风温度、保温层厚度。**结论** 围岩温度决定了隧道的温度上限和降温难度,增加保温层厚度降温效果不明显,提高送风速度可以显著降低隧道温度。

关键词 高地温铁路隧道;热湿耦合;多孔介质;温度场分布;敏感性分析

中图分类号 TU111;U455

文献标志码 A

引用格式:冯国会,李兆星,孙佳琳,等.高地温铁路隧道温度场影响因素分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1047-1053.(FENG Guohui,LI Zhaoxing,SUN Jialin,et al. Analysis of influencing factors on the temperature field in high geothermal railway tunnel[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(6):1047-1053.)

Analysis of Influencing Factors on the Temperature Field in High Geothermal Railway Tunnel

FENG Guohui, LI Zhaoxing, SUN Jialin, HUANG Kailiang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Conventional tunnel cooling load prediction methods are inadequate for the high geothermal extreme conditions of the Sichuan-Tibet Railway tunnels, creating an urgent need for new predictive methods and research. Using the Sejila Mountain Tunnel of the Sichuan-Tibet Railway as a case study, a thermal-humidity coupled porous medium model was developed to assess the effects of surrounding rock seepage water, insulation layer, and air supply velocity and temperature on the tunnel temperature field. The insulation layer significantly lowers the tunnel air

收稿日期:2023-09-13

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52038009);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220935)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能及新能源利用等方面研究。

temperature. The effective ventilation distance increases by 5.87% in tunnels with water-containing surrounding rock and by 25.51% in tunnels with solid surrounding rock. Increasing the insulation layer's thickness does not significantly lower the tunnel temperature; however, the surrounding rock temperature and air supply velocity have a considerable impact on it. The surrounding rock temperature sets the upper limit for tunnel temperature. When the air supply speed increases from 1 m/s to 2 m/s or 3 m/s, the tunnel temperature decreases by 20.53% or 24.83%, respectively. The factors influencing the intensity of the tunnel temperature field, in order of impact, are surrounding rock temperature, air supply speed, air supply temperature, and insulation layer thickness. The surrounding rock temperature sets the upper temperature limit and affects the cooling challenge of the tunnel. Increasing the insulation layer's thickness has little effect, while the air supply velocity can significantly reduce the tunnel temperature.

Key words: high geothermal railway tunnel; heat and humidity coupling; porous medium; temperature field distribution; sensitivity analysis

川藏铁路平均海拔超过 4 km,隧道和桥梁占铁路总长度 81%^[1-2]。川藏铁路隧道施工经常会遇到高温、高湿、低压等极端环境,如已完工的桑珠岭隧道围岩温度可达 89.9 ℃^[3-4]。这种极端施工环境会造成隧道出现热害问题,不仅损害施工人员的身心健康,降低工作效率^[5],还会破坏施工设备和隧道结构^[6]。D. Fruhwirt 等^[7]提出了一种考虑隧道能耗和温度场变化的隧道冷却设计方法,在隧道中使用保温层,极大程度上削弱了热量传递,并根据隧道温度场变化,计算出隧道的有效通风距离和最佳保温层厚度^[8-9]。根据不同的送风策略所达到的降温效果,研究人员确定了最佳的送风参数和工人舒适区^[10-11]。韩斐、王靖超等^[12-13]利用试验方法研究隧道降温过程中的传热传质特性,证明高温围岩对隧道温度场影响显著^[14-15]。此外,隧道湿环境变化对隧道整体产生显著影响,无论是围岩内部渗流水的作用^[16-17],还是围岩表面的水分蒸发^[18-19],均会对隧道的温度场产生显著影响。基于热湿耦合,K. M. Zhao 等^[20]研究隧道施工过程中温度场变化,计算不同通风参数和海拔高度下隧道热湿环境变化。

考虑隧道空气热湿耦合和围岩渗流水的相互作用,笔者以川藏铁路的高地温隧道为背景,建立了热湿耦合多孔介质模型,将不同

因素对隧道温度场的影响进行了对比分析和显著性比较,找出影响隧道温度场的关键因素,为改善川藏高海拔隧道铁路施工热湿环境提供技术支持。

1 模拟方法

1.1 物理模型

研究对象为川藏铁路色季拉山隧道。图 1 为高地温铁路非施工段的物理模型。物理模型一共包含三个部分:围岩、隧道空气、衬砌。隧道直径为 8.8 m,衬砌厚度为 0.7 m,围岩厚为 10 m。假设隧道非施工段总长为 1 500 m。

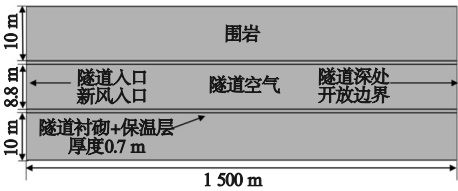


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

1.2 数学方法

1.2.1 基本假设

温差存在导致围岩内部出现热质传递。物理场包括流体流动、传热、水分传递三部分。为了方便计算,简化数学方程,做以下几个假设:①假定热湿传递介质为连续、均匀、各向同性;②流体为不可压缩;③岩石孔隙被认为是注满水,忽略岩石内部的空气;④忽略

热辐射的影响。

1.2.2 数学模型

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0.$$
 (1)

流体动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \mathbf{F}.$$
 (2)

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为流体速度, m/s ; p 为压力, Pa ; μ 为流体运动黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{F} 为动量源项。

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q_1.$$
 (3)

式中: ρ 为固体体密度, kg/m^3 ; C_p 为流体的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; \mathbf{q} 为热流密度, W/m^2 ; Q_1 为热源项, W/m^3 。

导热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q.$$
 (4)

对流换热方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T).$$
 (5)

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; t 为时间, s 。

含水多孔介质传热方程:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_g c_{p,g} \mathbf{u}_g + \rho_l c_{p,l} \mathbf{u}_l) \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q_2 + Q_{\text{evap}}.$$
 (6)

式中: $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为有效体积热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_g 和 ρ_l 分别为水蒸气和液态水的密度, kg/m^3 ; $C_{p,g}$ 和 $C_{p,l}$ 分别为水蒸气和液态水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; \mathbf{u}_g 和 \mathbf{u}_l 分别为水蒸气和液态水速度场, m/s ; Q_2 为总热扩散量, W/m^3 ; Q_{evap} 为水相变产生的热源项, W/m^3 。

表2 不同影响因素及取值

Table 2 Different influencing factors				
参数	围岩温度/ $^{\circ}\text{C}$	送风速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	送风温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温层厚度/ m
标准值	50	1.0	20	0.04
插值点	30,35,40,45,50	1.0,1.5,2.0,2.5,3.0	10,15,20,25,28	0.02,0.04,0.06,0.08,0.10

多孔介质水分传递:

$$\frac{\partial \omega(\Phi_w)}{\partial t} + \rho_g \mathbf{u}_g \cdot \nabla \omega_v + \nabla \cdot \mathbf{g}_w + \mathbf{u}_l \cdot \nabla \rho_l + \nabla \cdot \mathbf{g}_{lc} = G.$$
 (7)

式中: $\omega(\Phi_w)$ 为总含水量, kg/m^3 ; ω_v 为湿空气中的蒸汽质量分数, m^3/kg ; \mathbf{g}_w 为水分扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; \mathbf{g}_{lc} 为液态水孔隙通量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; G 为水分源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

1.3 参数设置

使用 Comsol Multiphysics 软件模拟隧道的送风流动、传热传质过程。具体物理场边界条件如下:

- ①围岩热物性参数如表 1 所示;
- ②围岩空气初始温度 50°C , 送风温度 20°C , 相对湿度 90%, 降温时间 90 d;
- ③围岩孔隙率为 0.25, 渗透率为 10^{-12}m^2 ;
- ④隧道压力为 0.76 个大气压, 并选为压力出口。

表1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters			
结构类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)
围岩	2 700	850	2.650
衬砌	2 500	1 046	1.740
保温层	450	555	0.034

使用参数化扫描, 为考核不同影响因素对隧道降温的影响, 当某一因素为变值时, 其他因素保持基准值不变。具体参数设置如表 2 所示。

1.4 模型验证

1.4.1 网格数无关性验证

为了提高模拟精度, 对围岩与空气的接触面进行了网格细化, 如图 2 所示。

构建四种网格方案,网格数分别为 38.6 万、49.8 万、62.1 万和 73.6 万,进行网格数验证。

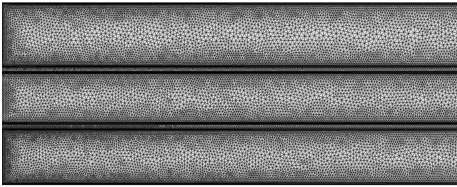


图2 网格细化
Fig.2 Mesh refinement

图3 为不同网格数下的隧道温度场分布。结果显示,随着网格数的增加,隧道温度不断降低,不同方案之间的误差不断减小。方案1与方案2之间误差为 4.01%,方案2与方案3之间误差为 0.17%,方案3与方案4之间误差为 0.45%。考虑到计算的精度和成本,选择方案3作为网格模型。

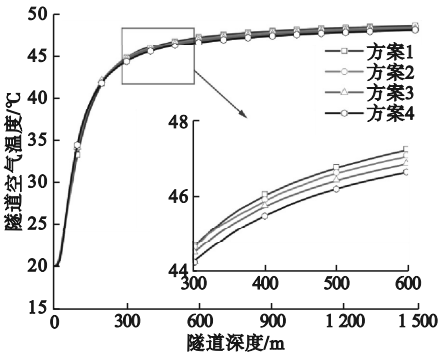


图3 网格无关性验证

Fig.3 Mesh independence verification

1.4.2 模型验证

使用文献[21]的模拟数据和文献[22]的实测数据验证模型的准确性。构建的验证模型与文献中的物理模型及边界条件相同,同时构建含水围岩比较模型。图4为模拟结果与文献结果的对比。在围岩表面附近,验证模型与文献[21]的模拟数据存在较大差异,误差为 13.48%。随着围岩深度的增加,差异逐渐减小,最终在 6 m 处接近。相较于文献[21]的模拟结果,模拟结果与文献[22]的实测数据更接近,随着围岩深度的增加,模拟数据与实测数据的差异逐渐减小。平均误

差为 2.03%,最大误差为 7.63% 发生在围岩深度 1.2 m 处。误差的主要原因为现实隧道降温过程中,隧道的空气温度和壁面温度是一个变化过程。在验证模型中将隧道空气和壁面温度维持一个恒定的低温环境,因此围岩温度模拟值会低于实际温度值。含水围岩模拟结果在围岩表面处与文献[21]的结果相近,误差为 0.7%;与文献[22]的数据相差 3.43%。但是随着围岩深度的增加,围岩温度快速上升,显著高于其他模型,在围岩深 4 m 处达到最高温度。这证明渗流水显著影响围岩的温度场,使隧道传热过程变得更加复杂,也说明了该模型具有准确性,可以模拟高地温铁路隧道的降温过程。

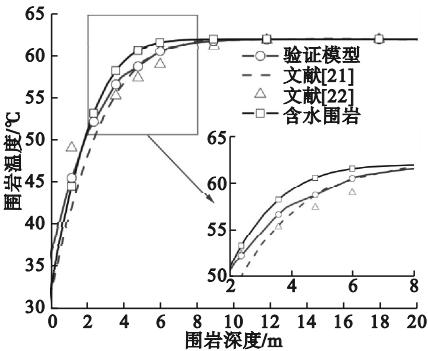


图4 模型验证

Fig.4 Model validation

2 隧道温度场影响因素分析

2.1 渗流水和保温层

根据围岩渗流水和保温层的存在状态建立四种模型,并以有效通风距离(通风后温度低于 28 °C 的隧道长度^[8])为对比结果。图5为不同模型的隧道有效通风距离差异结果。在降温前期,保温层的存在导致固体围岩的有效通风距离要显著高于含水围岩。随着降温时间增加,两者之间的差异不断减小。在降温 35 d 时两者有效通风距离相等,然后两者差异不断扩大,降温 90 d 时两者相差 3.99 m。证明含水围岩前期降温需要更多的冷量,导致其有效通风距离明显小于固体围岩。增加保温层后,可以显著提高隧道有

效通风距离。相较于对含水围岩的影响,保温层对纯固体围岩的影响更大。含水围岩的隧道有效通风距离提高了 5.87%,而固体围岩的有效通风距离增加了 25.51%。保温层在含水围岩中没有发挥出显著作用,这也证明了渗流水在围岩降温后也承担了一部分保温层的作用。

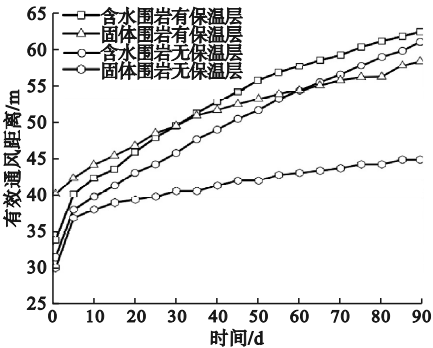


图5 四种模型结果对比

Fig. 5 Comparison of results from four models

2.2 围岩温度

不同围岩温度下的隧道温度分布如图 6 所示。围岩温度越高,隧道 1 500 m 处空气温度与围岩初始温度之间的差异越大。围岩温度分别为 30 ℃、40 ℃、50 ℃,空气温度与初始围岩温度差异分别为 1.64 ℃、1.71 ℃、1.76 ℃。不同围岩温度之间的隧道空气温度差异相等,例如 1 500 m 处空气温度的差异均为 4.97 ℃。将围岩温度对隧道温度场的影响进行单因素方差分析,其 P-value 结果为 0.000 1,由此看出,围岩温度的变化对隧道温度场产生显著影响。

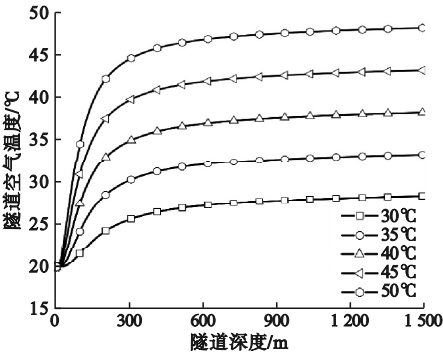


图6 不同围岩温度的影响

Fig. 6 Effect of different surrounding rock temperatures

2.3 送风速度

不同送风速度下的隧道温度分布如图 7 所示。结果表明,随着送风速度的提高,隧道温度出现明显下降趋势,隧道深处的温度显著降低。隧道空气保持通风温度的距离变得更长,空气温度上升的坡度越加缓慢。送风速度分别为 1 m/s、2 m/s、3 m/s 时,隧道 1 500 m 处空气温度分别为 48.23 ℃、42.31 ℃、33.14 ℃。随着送风速度的提升,不同风速之间的隧道温度差异不断明显。送风速度每提升 1 m/s,隧道空气温度分别降低 20.53%、24.83%。这表明随着风速的提高,换热效率增大,降温收益不断扩大。风速的提高,一方面加强了空气与隧道壁面的换热;另一方面,加剧了空气与隧道壁面的扰动,这有利于空气与高温围岩的换热。将送风速度对隧道温度场的影响进行单因素方差分析,其 P-value 结果为 0.000 2,低于 0.05,证明送风速度对隧道温度场有显著影响。

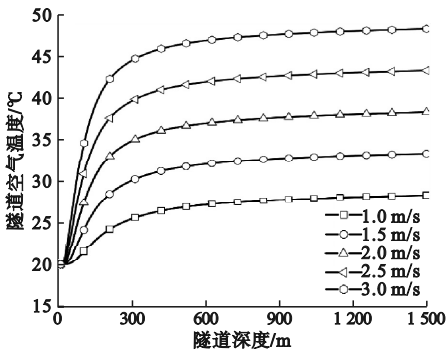


图7 不同送风速度的影响

Fig. 7 Effect of different air supply velocities

2.4 送风温度

不同送风温度下的隧道温度场如图 8 所示。随着送风温度的升高,隧道内的温度逐渐上升。送风温度分别为 10 ℃、20 ℃和 28 ℃时,距离隧道口 100 m 处的温度分别为 32.24 ℃、34.56 ℃和 36.71 ℃,差异为 2 ℃左右,1 500 m 处的温度分别为 48.23 ℃、48.24 ℃、48.24 ℃,差异不大,这表明改变送风温度只会在隧道入口段显著影响隧道空气温度。随着隧道深度的增加,空气温度差异

逐渐减小,最终都趋于围岩温度。将送风温度对隧道温度场的影响进行单因素方差分析,计算其 P -value 值为 0.001,低于 0.05,说明送风温度的变化也会对隧道温度场产生显著影响。

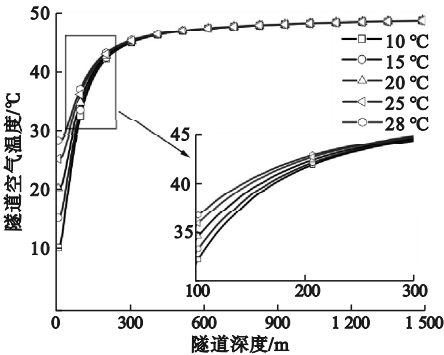


图 8 不同送风温度的影响

Fig. 8 Effect of different air supply temperatures

2.5 保温层厚度

图 9 为不同保温层厚度下的隧道温度场分布。

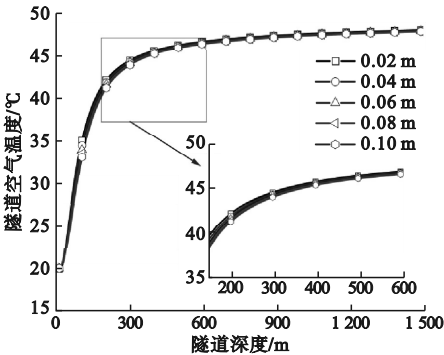


图 9 不同保温层厚度的影响

Fig. 9 Effect of different insulation thicknesses

从图 9 看出,随着保温层厚度的增加,隧道温度不断降低,但没有出现显著温度差异。在隧道送风与围岩换热最剧烈的区域出现明显温度差异。例如在 100 m 处,保温层厚度由 0.02 m 提升至 0.06 m 和 0.1 m 时,隧道温度分别为 35.13 °C、34.04 °C、33.17 °C,分别降低了 1.09 和 1.96 °C。在 1 500 m 处,隧道温度分别由 48.29 °C 降低至 48.19 °C 和 48.11 °C,分别降低了 0.10 和 0.18 °C。将保温层厚度对隧道空气的影响进行单因素方

差分析,得出其 P -value 为 1.000 大于 0.05,说明改变保温层厚度对隧道温度场没有显著影响。

3 结 论

(1)保温层可以显著降低隧道空气温度,降温效果随围岩状态的不同而有所改变,含水围岩降低了 5.87%,纯固体围岩降低了 25.51%,这凸显了围岩状态对于隧道环境的影响。

(2)围岩温度和送风速度对隧道温度有显著影响,围岩温度决定了隧道的温度上限和降温难度,而送风速度相对于送风温度可以更有效地降低隧道温度,隧道深处降温效果明显;送风速度从 1 m/s 分别增加到 2、3 m/s,隧道温度分别降低 20.53%、24.83%;相较其他于主动降温手段,增加保温层厚度并没有显著降低隧道温度。

(3)由不同因素对隧道温度场的影响显著性分析结果看出,影响由大到小依次为围岩温度、送风速度、送风温度、保温层厚度。

参考文献

[1] WANG W D,LI J Y,HAN Z. Comprehensive assessment of geological hazard safety along railway engineering using a novel method; a case study of the Sichuan-Tibet railway, China[J]. Geomatics natural hazards and risk, 2019,11(1):1-21.

[2] 田四明,王伟,李国良,等. 川藏铁路隧道设计理念与主要原则[J]. 隧道建设(中英文), 2021,41(4):519-530.

(TIAN Siming, WANG Wei, LI Guoliang, et al. Design concept and main principles of tunnel on sichuan-tibet railway [J]. Tunnel construction,2021,41(4):519-530.)

[3] HU Y P,WANG Q L,WANG M N,et al. A study on the thermo-mechanical properties of shotcrete structure in a tunnel, excavated in granite at nearly 90 °C temperature [J]. Tunnelling and underground space technology, 2021,110:103830.

[4] 严健,何川,汪波,等. 雅鲁藏布江缝合带深埋长大隧道群岩爆孕育及特征[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(4):769-781.

(YAN Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Inoculation and characters of rock bursts in extra-long and deep-lying tunnels located on Yarlung Zangbo suture [J]. Chinese journal of

- rock mechanics and engineering, 2019, 38 (4): 769 – 781.)
- [5] JIANG J, WANG D J, LIU Y F, et al. A holistic approach to the evaluation of the indoor temperature based on thermal comfort and learning performance [J]. Building and environment, 2021, 196: 107803.
- [6] 扶凤姣, 胡玄旺, 吴银芳, 等. 高地温热害对隧道及围岩影响的研究进展 [J]. 建筑施工, 2022, 44 (3): 602 – 605.
(FU Fengjiao, HU Xuanwang, WU Yinfang, et al. Research progress of influence of high geothermal hazards on tunnels and surrounding rocks [J]. Building construction, 2022, 44 (3): 602 – 605.)
- [7] FRUHWIRT D, STURM P, STEINER H, et al. Development of a methodology for studying tunnel climate in long railway tunnels and for optimizing the design process of cross-passage cooling systems [J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 138: 105194.
- [8] KANG F C, LI Y C, TANG C. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer [J]. Applied thermal engineering, 2020, 179: 115654.
- [9] WANG Y J, WANG C C, SHANG G, et al. The impact of thermal insulation on cooling energy consumption and optimal insulation thickness for underground tunnel [J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2021, 47: 101495.
- [10] ZHANG G L, JIANG Z G, CHEN J H, et al. Study of the convection heat transfer law and temperature prediction of the duct in high-temperature tunnels [J]. Case studies in thermal engineering, 2022, 36: 102208.
- [11] WANG J Z, DU C F, WANG Y. Study on the influence of ventilation parameters on the airflow temperature in excavation roadway and ventilation duct [J]. Case studies in thermal engineering, 2021, 28: 101387.
- [12] 韩斐. 矿井围岩传热相似模拟实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
(HAN Fei. Experimental study on similar simulation of heat transfer in mine surrounding rock [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.)
- [13] 王靖超. 高温裂隙水作用下巷道风流温湿度场变化规律实验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
(WANG Jingchao. Experimental study on variation law of airflow temperature and moisture field of roadway under the action of high temperature fracture water [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019.)
- [14] MA M G, XIAO Y N, WANG T, et al. An integrated thermal parameters estimation method for tunnel rock based on field tests [J]. Energy and buildings, 2023, 290: 113068.
- [15] VASILYEV G P, PESKOV N V, LYSAK T M. Heat balance model for long-term prediction of the average temperature in a subway tunnel and surrounding soil [J]. International journal of thermal sciences, 2022, 172: 107344.
- [16] 张瑜. 矿井巷道围岩渗流 – 传热耦合数值模拟研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
(ZHANG Yu. Numerical simulation study on seepage-heat transfer coupling of surrounding rock in mine roadway [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.)
- [17] CHEN L, LI J B, ZHANG Y, et al. Study on coupled heat transfer and seepage in large sparsely fractured surrounding rocks in deep underground spaces [J]. Applied thermal engineering, 2019, 162: 114277.
- [18] LI Z J, XU Y, LI R R, et al. Impact of the water evaporation on the heat and moisture transfer in a high-temperature underground roadway [J]. Case studies in thermal engineering, 2021, 28: 101551.
- [19] XU Y, LI Z J, WANG J J, et al. Ventilation and heat exchange characteristics in high geotemperature tunnels considering buoyancy-driven flow and groundwater flow [J]. International journal of thermal sciences, 2022, 173: 107400.
- [20] ZHAO K M, YUAN Y P, JIANG F J, et al. Numerical investigation on temperature humidity field under mechanical ventilation in the construction period of hot-humid tunnel along the Sichuan – Tibet Railway [J]. Underground space, 2023 (8): 123 – 43.
- [21] ZHANG Y, XIA C C, ZHOU S W, et al. A novel sustainable cooling system in a tunnel with high geotemperature: concept and thermal performance [J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 137: 105122.
- [22] WANG M N, HU Y P, LIU D G, et al. A study on the heat transfer of surrounding rock-supporting structures in high-geothermal tunnels [J]. Applied sciences, 2020, 10 (7): 2307.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)