



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404227

引用格式: 韦勇克, 陈光友, 吴悦, 等. 高寒隧道热物性参数对衬砌温度-损伤的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(14): 6054-6061.

Wei Yongke, Chen Guangyou, Wu Yue, et al. Effect of thermophysical parameters on lining temperature and damage in alpine tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 6054-6061.

高寒隧道热物性参数对衬砌温度-损伤的影响

韦勇克^{1,2}, 陈光友³, 吴悦³, 晏启祥^{3*}, 何廷全^{2,3}, 陈人豪⁴

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 广西新发展交通集团有限公司, 南宁 530029;
3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031; 4. 广西交通设计集团, 南宁 530029)

摘要 冻害问题是高寒隧道建设过程中的关键难题, 为有效防控隧道衬砌低温损伤破坏, 设计合理的保温措施, 建立了考虑热传导与热对流作用的数值模型。通过正交试验工况设计分析不同热物性参数对衬砌温度的显著性影响, 并进一步分析显著性因素对衬砌损伤的影响。研究表明: 对流系数、保温层导热系数、围岩导热系数对试验结果具有显著性影响, 其中保温层导热系数影响最为显著。随着保温层导热系数增大, 衬砌最低温度降低, 衬砌整体损伤水平逐步提高。随着对流系数的增加, 高寒隧道衬砌最低温度逐渐降低, 衬砌整体损伤程度增大。随着围岩导热系数的增加, 高寒隧道衬砌最低温度增大, 高损伤区域由拱顶向两侧扩散, 且受拉损伤值分布离散性愈发明显。通过减小保温层导热系数与对流系数以及增大围岩导热系数有利于改善隧道衬砌整体损伤分布。

关键词 高寒隧道; 热物性参数; 温度场; 衬砌损伤; 显著性分析

中图分类号 U455; 文献标志码 A

Effect of Thermophysical Parameters on Lining Temperature and Damage in Alpine Tunnels

WEI Yong-ke^{1,2}, CHEN Guang-you³, WU Yue³, YAN Qi-xiang^{3*}, HE Ting-quan^{2,3}, CHEN Ren-hao⁴

(1. Department of Underground Construction and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;
3. Key Laboratory of Traffic Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 4. Guangxi Traffic Design Group, Nanning 530029, China)

[Abstract] Frost damage is a key problem in the construction of alpine tunnels. A numerical model was established to consider heat conduction and convection for designing effective thermal insulation measures. Orthogonal test conditions were designed to analyze the significance of different thermophysical parameters on lining temperature and their influence on lining damage. The results show that the convection coefficient, the thermal conductivity of the insulation layer, and the thermal conductivity of the surrounding rock have significant influences. The thermal conductivity of the insulation layer has the most significant impact. As its thermal conductivity increases, the lowest lining temperature decreases, and the damage level increases. An increase in the convection coefficient decreases the minimum lining temperature and increases damage. Higher thermal conductivity of surrounding rock raises the minimum lining temperature, spreading damage from the vault to the sides. Reducing the thermal conductivity and convection coefficient of the insulation layer, while increasing the thermal conductivity of the surrounding rock, improves overall damage distribution.

[Keywords] high-altitude cold area tunnel; thermophysical parameter; temperature field; lining damage; significance analysis

随着交通基础设施的快速发展, 中国隧道工程的规模不断增加^[1]。高海拔寒区隧道冻害问题严重, 威胁隧道结构及设施的使用安全, 若不采取合理的保温防冻措施, 将会极大地增加工程建设成本。根据实际工程案例, 提出合理的保温防冻措施

是工程建设过程中一大难题。

为有效解决高寒隧道冻害问题, 不少学者采用室内外试验和数值模拟手段对隧道在低温作用下的劣化损伤特性展开了研究。赵立财等^[2]和张莉莉等^[3]分别对季冻区隧道的冻胀力分布规律和考

收稿日期: 2024-06-06; 修订日期: 2025-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20152, 52278416)

第一作者: 韦勇克(1971—), 男, 汉族, 广西河池人, 博士, 正高级工程师。研究方向: 高速公路建设与运营管理。E-mail: 530388612@qq.com。

* 通信作者: 晏启祥(1971—), 男, 汉族, 四川泸县人, 博士, 教授。研究方向: 隧道与地下工程。E-mail: 764365015@qq.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

考虑冻融作用的岩石统计损伤本构模型进行了研究。蒋望涛等^[4]建立了考虑围岩不均匀冻胀特性的弹塑性损伤力学计算模型,提出了基于统一强度理论的寒区隧道弹塑性应力场和位移场统一解,并对所得解进行验证和参数分析。陈建勋等^[5]通过现场气温测试,结合隧道温度场和结构应力数值模拟计算,研究了考虑衬砌结构渐变劣化的寒区隧道承载性能演化规律。王仁远等^[6]模拟分析了高海拔隧道温度场的一般性规律,通过正交试验对影响因素进行敏感性分析,并建立了衬砌保温层厚度计算公式及衬砌寿命预测模型。

保温防冻技术直接影响到工程防冻效果,关于保温防冻技术的研究成果颇多。例如,陈建勋等^[7]和 Ma 等^[8]研究了寒区隧道保温层抗冻性及其影响因素,提出了相应的优化设计方案。王建军等^[9]采用数值模拟方法对隧道通风竖井的温度场以及保温措施展开了研究。于建游等^[10]以河北延崇高速棋盘梁隧道为研究对象,对季节性寒区隧道冻结锋面的移动规律进行了探究,得出考虑冻结锋面移动规律的保温隔热层计算公式。其中众多技术均涉及保温层的设计,不同的保温材料具有对应的热物性参数,直接影响到保温效果。张长兴等^[11]基于现场热物性试验,利用正交试验方法确定了各因素对测试结果的影响情况,并进行了定量分析。刘造保等^[12]研究了康定花岗岩在不同高温及轴向应力加载下的导热系数和不同高温下岩石比热容与热膨胀系数演化特性。Adam 等^[13]研究确定了硬化混凝土热物理参数的演化识别方法。

上述研究中主要针对高寒隧道损伤以及保温防冻技术展开研究,对材料热物性参数的系统研究在高寒隧道防冻中鲜有体现。为有效进行保温防冻设计,现建立考虑热传导与热对流作用的数值模型。通过正交试验工况设计分析不同热物性参数对衬砌温度的显著性影响,探究热物性参数对衬砌温度的影响趋势。并进一步分析显著性因素对衬砌损伤的影响,为高寒隧道结构与材料优化提供依据。

1 高寒隧道背景

高寒隧道建设面临着严重的冻害问题,第一类为影响结构安全类冻害,譬如隧道衬砌开裂、拱顶掉块、施工缝变形缝混凝土剥落、洞门墙开裂等,该类冻害特征在于受到围岩冻胀力作用后隧道自身结构发生变形并出现一定程度的破损,隧道耐久性、防水性等问题凸显。第二类为危及行车安全类冻害,譬如隧道衬砌挂冰、排水系统堵

塞、热融塌陷等,该类冻害主要是由于地下水出入隧道异常发生冻结产生的,冻害造成车辆限界受侵、路面不平等现象,不利于隧道运营期正常运转。

存在冻害问题的隧道诸多,例如,昆仑山隧道,隧道渗漏现象泛滥,水沟、盖板、电缆槽存在明显积冰;天山二号隧道,隧道渗漏频繁且程度较大,地下水冻胀使得隧道几近报废;玉希莫勒盖隧道,同样由于隧道渗漏水问题,出现了拱顶挂冰、拱底结冰,衬砌结构反复遭受冻融循环破坏,隧道已被弃用;五峰山隧道,衬砌背后存在空洞,冬季空洞内积水冻结,在挤压作用下衬砌发生掉块。现场隧道冻害如图 1 所示。



图 1 高寒隧道冻害

Fig. 1 Frost damage in alpine tunnels

在国家交通基础设施建设不断推进下,隧道工程逐步向我国高海拔寒冷冻土地区发展,相较于过去建设的寒区隧道,这些高寒隧道的规模更大、设计施工技术要求更多,面临的冻害危险系数更高。我国冻土地区分布集中在中西部高原地区和北部高纬度地区。寒区隧道通常以铺设保温层的方式来抵御外界寒冷气流的侵袭,保温材料和围岩本身的热物性参数极大程度决定着保温防冻效果。

2 数值模拟

为探究各结构热物性参数对衬砌温度的影响趋势以及不同结构热物性参数下衬砌损伤变化规律。开展考虑高寒隧道的热传导与热对流作用的数值模拟工作。

如图 2 所示,高寒隧道内部在通风作用或列车运行过程中,内外环境的空气相互交换,隧道内部

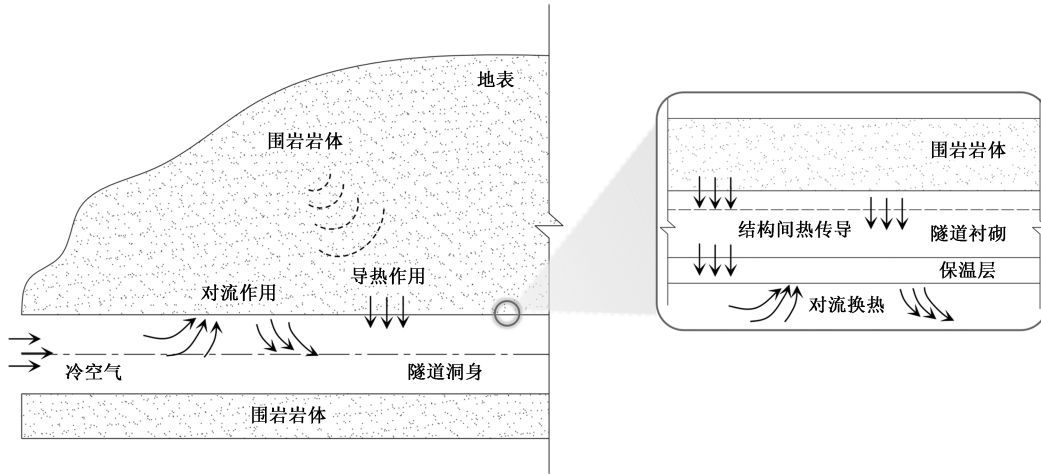


图2 高寒隧道-地层传热模型示意

Fig. 2 Schematic of alpine tunnel-stratum heat transfer modelling

低温环境致使与隧道结构的对流换热。同时,隧道结构间(如初期支护与二次衬砌、二次衬砌与保温层等)以及隧道结构与地层间进行传导换热。热传导与热对流作用共同构成了高寒隧道-地层传热机制。

建立热导热-热对流耦合作用下的有限元计算模型,如图3所示,采用结构材料的物理力学参数如表1所示。隧道衬砌损伤模型采用引入低温硬化系数的低温环境混凝土塑性损伤本构模型,本构参数如表2所示。在模型中,针对应力场边界方面,设置模型四周为法向位移约束、底部为固定约束;针对温度场边界方面,定义围岩初始温度为5℃,隧道内环境温度为-20℃,并设置模型四周为固定温度荷载条件。

3 衬砌温度分析

针对不同结构热物性参数,进行多因子、多层次的综合分析。首先利用正交试验手段,对高寒隧道温度场进行敏感性分析,探究各结构热物性参数对衬砌温度的影响趋势;基于其中显著性影响因素,研究不同结构热物性参数下衬砌损伤变化规律。

3.1 显著性分析

在高寒隧道热传导与热对流作用过程中,主要涉及热物性参数包括对流换热系数、衬砌导热系数与比热、保温层导热系数与比热以及围岩导热系数与比热,它们不同程度地影响着高寒隧道衬砌温度变化。故正交试验以衬砌温度最低值 T_{min} 为分析结果,主要选取衬砌导热系数 λ_1 、对流换热系数 β 、保温层导热系数 λ_2 、保温层比热 c_2 、围岩导热系数 λ_3 以及围岩比热 c_3 共6个影响因素,每个因素下设置有5个水平,如表3所示。

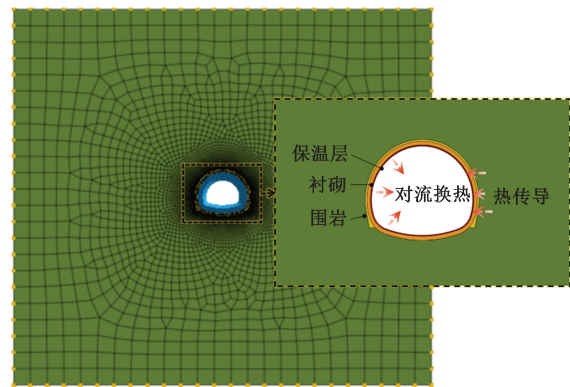


图3 有限元模型平面示意

Fig. 3 Schematic representation of the finite element model

表1 模型材料热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of model materials

名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
保温层	60	0.5	0.45
混凝土	2 500	30	0.16
围岩	2 000	5	0.30

表2 混凝土塑性损伤本构参数

Table 2 Concrete plastic damage constitutive parameters

参数	膨胀角/ ($^\circ$)	偏心率	σ_b/σ_c	不变应 力比	黏性 系数	w_c	w_t
取值	30	0.1	1.16	2/3	0.000 5	1	0

注: σ_b/σ_c 为双轴与单轴抗压强度比值; w_c 、 w_t 分别为受压与受拉刚度恢复因子。

采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表形成 25 组正交试验工况,求得各工况下隧道衬砌最低温度计算结果如表4所示。

根据正交试验结果,计算不同因素不同水平下均值以及极差,汇总到表5中。对各影响因素极差 R 的数值排序,得到各因素的影响主次顺序为:保温层导热系数 $\lambda_2 >$ 对流系数 $\beta >$ 围岩导热系数 $\lambda_3 >$ 衬

表3 正交试验影响因素与各因素对应水平值

Table 3 Orthogonal test influencing factors and corresponding level values of each factor

衬砌导热系数/ [W·(m·°C) ⁻¹]	对流系数/ [kJ·(m ² ·h·°C) ⁻¹]	保温层导热系数/ [W·(m·°C) ⁻¹]	保温层比热/ [J·(kg·°C)]	围岩导热系数/ [W·(m·°C)]	围岩比热/ [J·(kg·°C) ⁻¹]
1.800	1.430	0.005	1900	1.900	500
2.000	2.930	0.010	2100	2.100	700
2.200	4.430	0.015	2300	2.300	900
2.400	5.930	0.020	2500	2.500	1100
2.600	7.430	0.025	2700	2.700	1300

表4 高寒隧道衬砌最低温度正交试验模拟结果

Table 4 Simulation results of orthogonal test on minimum temperature of alpine tunnel lining

试验 编号	影响因素						衬砌最 低温度 $T_{min}/^{\circ}C$
	衬砌导 热系数	对流 系数	保温层导 热系数	保温层 比热	围岩导 热系数	围岩 比热	
	λ_1	β	λ_2	c_2	λ_3	c_3	
1	1.8	1.429 2	0.005	1 900	1.9	500	-3.932
2	1.8	2.929 2	0.010	2 100	2.1	700	-7.661
3	1.8	4.429 2	0.015	2 300	2.3	900	-9.685
4	1.8	5.929 2	0.020	2 500	2.5	1 100	-10.956
5	1.8	7.429 2	0.025	2 700	2.7	1 300	-11.827
6	2.0	1.429 2	0.010	2 300	2.5	1 300	-5.388
7	2.0	2.929 2	0.015	2 500	2.7	500	-8.083
8	2.0	4.429 2	0.020	2 700	1.9	700	-12.085
9	2.0	5.929 2	0.025	1 900	2.1	900	-12.862
10	2.0	7.429 2	0.005	2 100	2.3	1 100	-3.877
11	2.2	1.429 2	0.015	2 700	2.1	1 100	-8.004
12	2.2	2.929 2	0.020	1 900	2.3	1 300	-10.287
13	2.2	4.429 2	0.025	2 100	2.5	500	-11.489
14	2.2	5.929 2	0.005	2 300	2.7	700	-2.922
15	2.2	7.429 2	0.010	2 500	1.9	900	-9.037
16	2.4	1.429 2	0.020	2 100	2.7	900	-7.419
17	2.4	2.929 2	0.025	2 300	1.9	1 100	-12.192
18	2.4	4.429 2	0.005	2 500	2.1	1 300	-4.165
19	2.4	5.929 2	0.010	2 700	2.3	500	-7.704
20	2.4	7.429 2	0.015	1 900	2.5	700	-9.630
21	2.6	1.429 2	0.025	2 500	2.3	700	-9.049
22	2.6	2.929 2	0.005	2 700	2.5	900	-2.975
23	2.6	4.429 2	0.010	1 900	2.7	1 100	-6.472
24	2.6	5.929 2	0.015	2 100	1.9	1 300	-11.036
25	2.6	7.429 2	0.020	2 300	2.1	500	-12.080

砌导热系数 $\lambda_1 >$ 围岩比热 $c_3 >$ 保温层比热 c_2 。由此可知,对高寒隧道衬砌最低温度影响最大的结构热物性参数是保温层导热系数,其次是对流系数与围岩导热系数,然后是衬砌导热系数,围岩比热与保温层比热则影响程度较小。

极差分析无法判定各因素是否会对结果产生显著性影响,而运用方差分析,建立各影响因素的 F 统计量,并与显著性标准值相比较,能够筛选出对试验结果具有显著性影响的因素。基于正交试验结果分别计算各影响因素的离差平方和、自由度、均方以及 F,结果如表 6 所示。

表5 高寒隧道衬砌最低温度影响因素极差分析表

Table 5 Extreme difference analysis table of factors affecting minimum temperature of alpine tunnel lining

因素 水平	衬砌导 热系数	对流 系数	保温层导 热系数	保温层 比热	围岩导 热系数	围岩 比热
k1	-8.812	-6.758	-3.574	-8.637	-9.656	-8.658
k2	-8.459	-8.240	-7.252	-8.296	-8.954	-8.269
k3	-8.348	-8.779	-9.288	-8.453	-8.120	-8.396
k4	-8.222	-9.096	-10.565	-8.258	-8.088	-8.300
k5	-8.322	-9.290	-11.484	-8.519	-7.345	-8.541
R	2.951	12.659	39.548	1.893	11.559	1.941

表6 高寒隧道衬砌最低温度影响因素方差分析表

Table 6 Analysis of variance (ANOVA) table for factors affecting minimum temperature of alpine tunnel lining

影响因素	SS	df	MS	F	显著性
衬砌导热系数	1.043	4	0.261	2.119	—
对流系数	20.680	4	5.170	42.032	**
保温层导热系数	197.933	4	49.483	402.304	**
保温层比热	0.493	4	0.123	—	—
围岩导热系数	15.851	4	3.963	32.218	**
围岩比热	0.539	4	0.135	1.096	—

查表得临界值 $F_{0.05}(4,4) = 6.388, F_{0.01}(4,4) = 15.977$ 。对于给定的显著性水平 $\alpha = 0.05$,对流系数 β 、保温层导热系数 λ_2 、围岩导热系数 λ_3 这三个因素对高寒隧道衬砌最低温度值影响显著,其中最显著影响因素为保温层导热系数 λ_2 ,而对高寒隧道衬砌最低温度值影响相对较小的因素有衬砌导热系数、围岩比热和保温层比热。

3.2 影响趋势分析

为进一步研究各影响因素的影响趋势,以极差分析计算结果为依据,绘制如图 4 所示高寒隧道衬砌最低温度值随各显著影响因素的变化曲线。

图 4(a) 显示出随着保温层导热系数的增大,高寒隧道衬砌最低温度逐渐减小的规律。且保温层导热系数越小,对隧道衬砌温度影响程度越大。由图 4(b) 可知,随着对流系数的增加,高寒隧道衬砌最低温度逐渐降低。同时,随流系数增加,隧道衬砌温度的下降速率在逐渐变缓,表明了对流系数越小,对衬砌温度的影响越大。从图 4(c) 可知,随着围

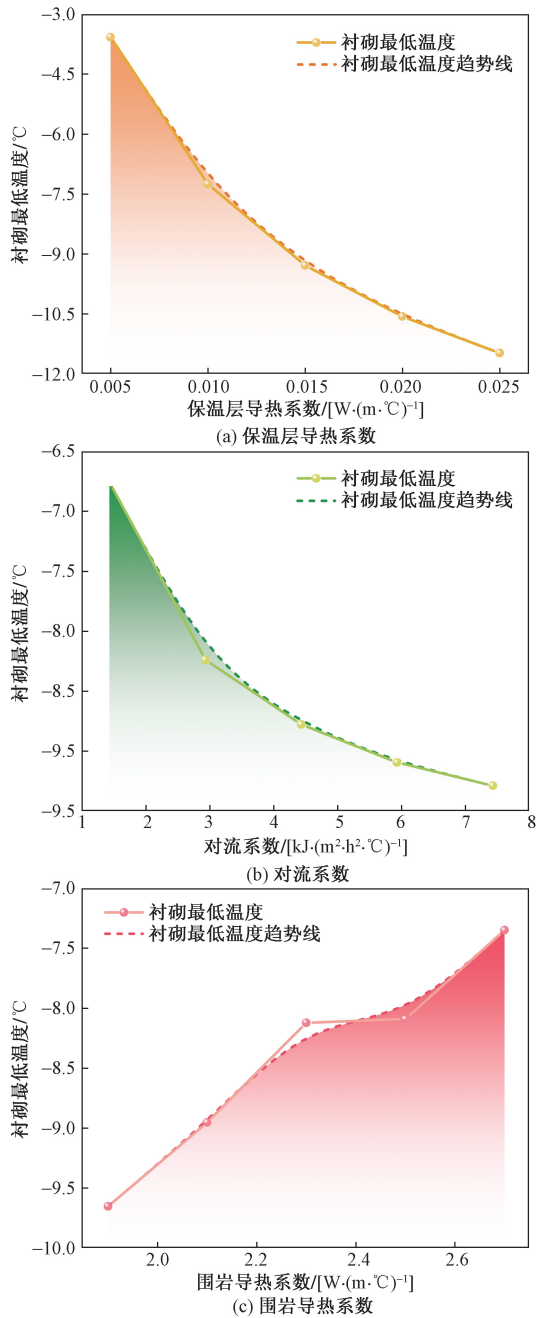


图4 高寒隧道衬砌温度最小值随各显著影响因素的变化
Fig. 4 Variation of the minimum value of lining temperature in alpine tunnels with each significant influencing factor

岩导热系数的增加,高寒隧道衬砌最低温度逐渐增大。围岩导热系数越大,隧道衬砌内部的围岩热量传导越多,隧道衬砌的温度变化越大。

在高寒隧道工程中,为确保隧道在严寒季节的安全,关键措施包括增加保温层厚度、提高衬砌混凝土的传热系数以及降低隧道内风速,这些都能有效降低对流系数。此外,改变近场围岩的物理性质以提高传热效率,也有助于充分利用地温,减少内部热量流失。这些综合措施显著提升隧道的保温性能,确保在极端寒冷条件下的结构稳定 and 安全性。同时,加强材料科学研究,开发低热传导率且经济的新型材料,将为隧道抗冻设计提供重要支持。

4 衬砌损伤分析

通过上述高寒隧道温度场正交试验可知,对衬砌温度影响显著的结构热物性参数包括保温层导热系数、对流系数以及围岩导热系数。在此基础上按照单一变量原则,依次研究不同保温层导热系数、不同对流系数及不同围岩导热系数下的高寒隧道衬砌力学损伤效应。

4.1 保温层导热系数

保持对流系数、围岩导热系数等结构热物性参数相同,改变保温层导热系数分别为 0.005、0.010、0.015、0.020、0.025 W/(m·℃)。以单位长度衬砌段为例,得到不同保温层导热系数下高寒隧道衬砌受拉损伤云图,如图 5 所示,并统计各工况下受拉损伤区间占比,绘制不同保温层导热系数下隧道衬砌受拉损伤变化曲线,如图 6 所示。

由图 5 可知,隧道衬砌受拉损伤值与保温层导热系数成正相关关系,随着保温层导热系数的增大,隧道衬砌整体损伤水平逐步提高。当保温层导热系数增至 0.020 W/(m·℃) 时,衬砌损伤明显增加,受拉损伤值基本都大于 0.3,并且在隧道拱顶与拱底部位出现了高损伤现象;当保温层导热系数达到 0.025 W/(m·℃) 时,衬砌损伤分布对比鲜明,衬砌内侧高损伤区域沿隧道纵向、环向及衬砌厚度方向进一步扩散,受拉损伤程度加深。

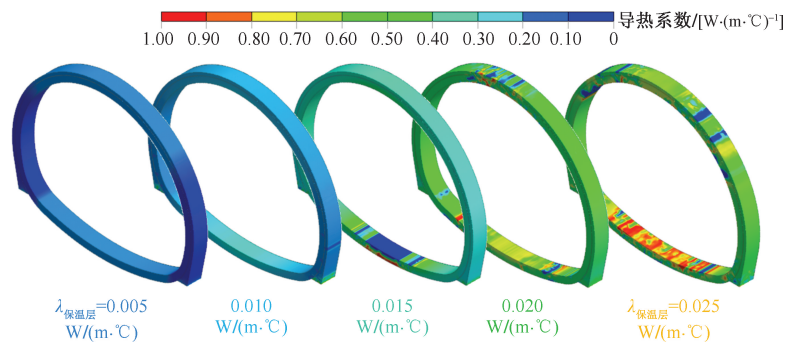


图5 不同保温层导热系数下衬砌受拉损伤云图
Fig. 5 Tensile damage cloud of lining with different thermal conductivity of insulation layer

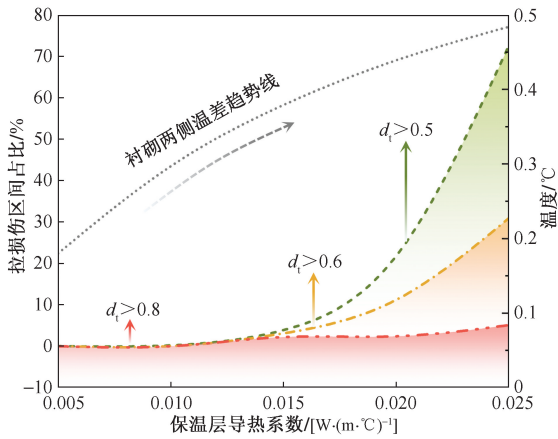


图6 衬砌受拉损伤分布随保温层导热系数的变化
Fig. 6 Variation of lining tensile damage distribution with thermal conductivity of insulation layer

图6直观反映了保温层导热系数对隧道衬砌受拉损伤的影响趋势。当保温层导热系数在0.005~0.015 W/(m·°C)范围内,衬砌基本处于无损伤或损伤较小状态。在保温层导热系数增大至0.020 W/(m·°C)后,衬砌受拉损伤发展迅速,受拉损伤值 $d_i > 0.5$ 与 $d_i > 0.6$ 区间占比明显增加。衬砌温差同损伤发展一致,亦随着保温层导热系数的增大而增大。从改善高寒隧道损伤破坏考虑,应尽量减小保温层导热系数。针对类似本次模拟的高寒隧道工程,建议采用导热系数小于0.02 W/(m·°C)的保温层材料,避免衬砌产生连续高损伤区域。

4.2 对流系数

保持保温层导热系数、围岩导热系数等结构热物性参数相同,改变对流系数分别为1.43、2.93、4.43、5.93、7.43 kJ/(m²·h·°C)。通过数值计算得到不同对流系数下高寒隧道二次衬砌受拉损伤云图,如图7所示,并统计各工况下衬砌受拉损伤区间占比,绘制不同对流系数下隧道衬砌拉损伤变化曲线,如图8所示。

在图7中,由内至外对应工况的对流系数依次为1.43、2.93、4.43、5.93、7.43 kJ/(m²·h·°C)。对比各工况下隧道衬砌受拉损伤云图可知,保温层与隧道洞内环境之间的对流系数越大,隧道衬砌整体损伤程度越高。在不同对流系数工况下,隧道衬砌损伤变化最显著位置是在两侧拱脚附近,受拉损伤值从0.5左右增长至0.9以上,拉损伤增长率接近100%。可见,随着对流系数变化,隧道拱脚处最易产生力学损伤破坏,工程中应注意对拱脚结构进行加固。

图8所示为对流系数对隧道衬砌受拉损伤的影响趋势。对流系数对受拉损伤值 $d_i > 0.8$ 区间占比的影响较小,而受拉损伤值 $d_i > 0.5$ 与 $d_i > 0.6$ 区间

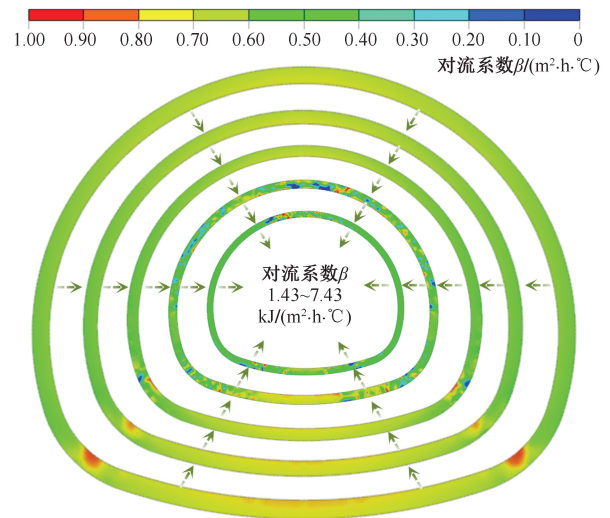


图7 不同对流系数下衬砌受拉损伤云图
Fig. 7 Tensile damage cloud of lining under different convection coefficients

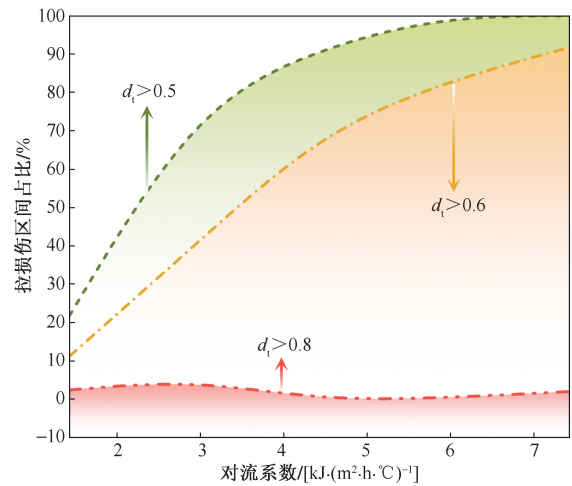


图8 高寒隧道衬砌拉损伤分布随对流系数的变化
Fig. 8 Variation of tensile damage distribution of alpine tunnel lining with convection coefficient

占比则随着对流系数的增大而明显增加。在对流系数达到2.93 kJ/(m²·h·°C)前,隧道衬砌拉损伤值 $d_i > 0.5$ 区间占比近线性增加,之后该区间占比增长速率降低。对于受拉损伤值 $d_i > 0.6$ 区间,其占比增加速率在对流系数达到4.43 kJ/(m²·h·°C)后开始逐渐趋于缓和,此时隧道损伤状态已较高。为减缓隧道结构与洞内冷空气的热交换行为,除了常规保温层等防控措施,也可从调控通风技术方面控制对流系数以减少隧道洞内热量散失。

4.3 围岩导热系数

保持保温层导热系数、对流系数等结构热物性参数相同,改变围岩导热系数分别为1.9、2.1、2.3、2.5、2.7 W/(m·°C)。以单位长度衬砌段为例,得到不同围岩导热系数下高寒隧道衬砌拱顶处受拉

损伤云图,如图9所示,并统计各工况下衬砌受拉损伤区间占比,绘制不同围岩导热系数下隧道衬砌拉损伤变化曲线,如图10所示。

低温环境下高寒隧道衬砌拱顶及附近边墙部位通常损伤破坏程度较高,以隧道衬砌拱顶处为特征研究对象,图9展示了其在不同围岩导热系数工况下的受拉损伤分布情况。随着围岩导热系数逐渐减小,高损伤区域逐步由拱顶沿隧道环向扩散,且受拉损伤值分布离散性愈发明显。当围岩导热系数为 $2.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时,衬砌高损伤区仅集中于拱顶中心附近,高损伤范围占监测段的 $1/3$;当围岩导热系数为 $2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时,高损伤区进一步发展,占监测段的 $1/2$;当围岩导热系数减小至 $1.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时,衬砌拱顶位置刚度快速衰减,高损伤区几乎遍布全监测段。围岩导热系数是影响隧道衬砌拱顶部位低温损伤产生与演变的主要因素之一。

图10直观反映了围岩导热系数对隧道衬砌受拉损伤的影响趋势。受拉损伤值 $d_i > 0.8$ 区间占比在不同围岩导热系数工况下亦变化不大;受拉损伤值 $d_i > 0.5$ 与 $d_i > 0.6$ 区间占比则随着围岩导热系数的增大而明显减小。特别是受拉损伤值 $d_i > 0.5$ 区间,其占比在围岩导热系数介于 $2.1 \sim 2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时下降幅度较大,由 71.5% 下降至 21.8% 。综合热物性参数对衬砌损伤场的影响,在减小保温层导热系数与对流系数的基础上,增大围岩导热系数也有利于改善隧道衬砌整体损伤分布。

5 结论

基于高寒隧道冻害问题严重性,建立考虑热传导与热对流作用的数值模型,分析不同热物性参数对衬砌温度和损伤影响,得出以下结论。

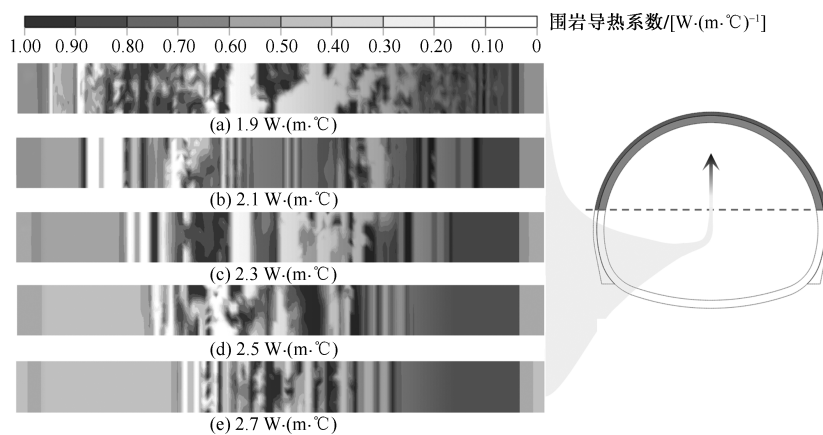


图9 不同围岩导热系数下拱顶衬砌受拉损伤云图

Fig. 9 Cloud diagram of tensile damage of vault lining under different thermal conductivity of surrounding rock

(1)正交试验分析结果表明,各因素的影响程度主次顺序为:保温层导热系数 $>$ 对流系数 $>$ 围岩导热系数 $>$ 衬砌导热系数 $>$ 围岩比热 $>$ 保温层比热。对流系数、保温层导热系数、围岩导热系数对试验结果具有显著性影响,其中保温层导热系数影响最为显著。

(2)随着保温层导热系数增大,衬砌最低温度降低,衬砌整体损伤水平逐步提高。当保温层导热系数增至 $0.020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时,受拉损伤值 $d_i > 0.5$ 与 $d_i > 0.6$ 区间占比明显增加,并且在隧道拱顶与拱底部位出现了高损伤现象。

(3)随着对流系数的增加,高寒隧道衬砌最低温度逐渐降低,衬砌整体损伤程度增大。损伤变化在拱脚最显著,对流系数增大至 $4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}\cdot\text{C})$ 后,高损伤区间占比增长速率降低。

(4)随着围岩导热系数的增加,高寒隧道衬砌最低温度增大,高损伤区域由拱顶向两侧扩散,且受

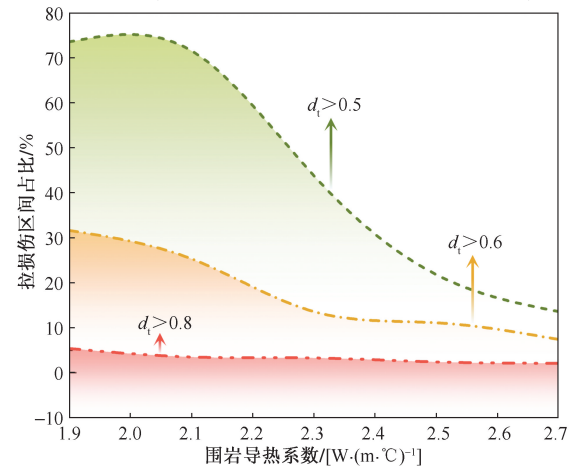


图10 高寒隧道衬砌拉损伤分布随围岩导热系数的变化
Fig. 10 Variation of tensile damage distribution of alpine tunnel lining with thermal conductivity of surrounding rock

拉损伤值分布离散性愈发明显。在减小保温层导热系数与对流系数的基础上,增大围岩导热系数也有利于改善隧道衬砌整体损伤分布。

参 考 文 献

- [1] 刘德军, 仲飞, 黄宏伟, 等. 运营隧道衬砌病害诊治的现状与发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 178-199.
Liu Dejun, Zhong Fei, Huang Hongwei, et al. Present status and development trend of diagnosis and treatment of tunnel lining disease [J]. China Highway Journal, 2021, 34(11): 178-199.
- [2] 赵立财, 殷珂, 王瑞, 等. 斜风作用下季冻区隧道冻胀力分布规律及结构安全性评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 7087-7095.
Zhao Licai, Yin Ke, Wang Rui, et al. Distribution law of frost heave force and structural safety evaluation of tunnel in seasonally frozen area under oblique wind[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 7087-7095.
- [3] 张莉莉, 郎松军, 邓林, 等. 季冻区隧道砂岩三轴压缩力学特性及损伤本构模型研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 95-103.
Zhang Lili, Lang Songjun, Dang Lin, et al. Study on the triaxial compression mechanical properties and damage constitutive model of tunnel sandstone in seasonal frozen regions[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(4): 95-103.
- [4] 蒋望涛, 姜海强, 马勤国, 等. 考虑损伤和不均匀冻胀的寒区隧道弹塑性统一解[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 69-79, 100.
Jiang Wangtao, Jiang Haiqiang, Ma Qinguo, et al. Unified elastoplastic solution for cold regions tunnel considering damage and non-uniform frost heave[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 69-79, 100.
- [5] 陈建勋, 荀文杰, 赵鹏宇, 等. 考虑衬砌渐变劣化的寒区隧道承载性能演化规律[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1678-1690.
Chen Jianxun, Xun Wenjie, Zhao Pengyu, et al. evolution law of bearing performance of tunnel in cold regions considering gradual deterioration of lining[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1678-1690.
- [6] 王仁远, 朱永全, 高焱, 等. 基于正交试验的高海拔寒区隧道温度场影响因素及防冻措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8225-8233.
Wang Renyuan, Zhu Yongquan, Gao Yan, et al. Orthogonal test on influencing factors of tunnel temperature field in high altitude and cold region and study on anti-freezing measures[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8225-8233.
- [7] 陈建勋, 董体健, 赵鹏宇, 等. 寒区隧道防冻保温层隔热作用机理及其厚度影响因素研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 129-137.
Chen Jianxun, Dong Tijian, Zhao Pengyu, et al. Research on mechanism of insulation effect and thickness influencing factors of tunnel anti-freezing insulation layer in cold regions [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 129-137.
- [8] Ma Y F, Xu L S, Shi X M. The multi-factor influence of frost resistance and prevention effect of tunnel thermal insulation layer in cold areas[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 78: 15-25.
- [9] 王建军, 杨林霖, 杨文波, 等. 高寒地区通风竖井温度场分布规律及防冻保温研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 118-126.
Wang Jianjun, Yang Linlin, Yang Wenbo, et al. Study on the distribution pattern of temperature fields and anti-freezing and heat preservation of ventilation shafts in high-altitude and cold regions [J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(4): 118-126.
- [10] 于建游, 姜逸帆, 林铭, 等. 季节性寒区隧道保温隔热层厚度计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 16219-16228.
Yu Jianyou, Jiang Yifan, Lin Ming, et al. Calculation method of tunnel insulation layer thickness in seasonal cold zone [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 16219-16228.
- [11] 张长兴, 孙鹏堃, 王新杰, 等. 现场试验工况对岩土热物性参数确定的影响[J]. 可再生能源, 2022, 40(4): 463-467.
Zhang Changxing, Sun Pengkun, Wang Xinjie, et al. Effect of *in-situ* experimental conditions on determination of ground thermal properties parameters [J]. Renewable Energy, 2022, 40(4): 463-467.
- [12] 刘造保, 吴名. 康定花岗岩热物性参数与深部储层采热潜力评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1821-1831.
Liu Zaobao, Wu Ming. Thermal properties of Kangding granite and evaluation of thermal extraction potential in deep reservoirs [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1821-1831.
- [13] Długosz A, Pokorska I, Jaskulski R, et al. Evolutionary identification method for determining thermophysical parameters of hardening concrete [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(1). DOI: 10.1007/s43452-020-00154-7.