

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-493-09

地铁分层围岩温度场演变及影响因素分析

刘思忆 靳 婷 郭泽浪 周启桂 蒋福建

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 地铁围岩温度场受埋深、环控温度、气候及热物性等多因素耦合影响,明确各因素作用机制对地下空间热环境调控具有重要意义。基于 COMSOL Multiphysics 建立地铁站分层围岩三维瞬态传热模型,采用控制变量法系统分析了埋深、环控温度、气候条件、导热系数及分层厚度五类关键因素的影响规律。结果表明,五类因素按作用方式可分为两类:环控温度与气候条件主要通过改变边界温度输入影响围岩整体温度水平;埋深、导热系数与分层厚度主要通过改变传热路径与扩散能力影响热扰动的空间衰减特征。量化分析显示,寒冷地区年蓄热量较炎热地区高出约 6.9 倍,埋深由 18m 增至 30m 使年蓄热量降低 18.9%。在传热范围与波动强度方面,导热系数增大使下部传热范围扩大 24.6%,分层厚度变化使温度年波动幅值由 8℃ 降至 5.5℃。结果可为地铁热环境节能设计与运营调控提供理论支撑。

【关键词】 地铁站房; 分层围岩; 温度场; 年蓄热量; 控制变量法
中图分类号 TU111 文献标志码 A

Evolution of Temperature Field and Influencing Factors Analysis in Layered Surrounding Rock of Subway

Liu Siyi Jin Ting Guo Zelang Zhou Qigui Jiang Fujian

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The temperature field of subway surrounding rock is influenced by multiple coupled factors. A three-dimensional transient heat transfer model of layered surrounding rock for a subway station was established using COMSOL Multiphysics. The effects of burial depth, environmental control temperature, climatic conditions, thermal conductivity, and layer thickness were systematically analyzed via the control variable method. Results show that the five factors can be classified into two categories by their modes of action: environmental control temperature and climatic conditions primarily affect the overall temperature level, while burial depth, thermal conductivity, and layer thickness mainly influence the spatial attenuation of thermal disturbance. Quantitative analysis shows that annual heat storage in cold regions is approximately 6.9 times that in hot regions, and increasing burial depth from 18 m to 30 m reduces annual heat storage by 18.9%. Higher thermal conductivity expands the heat transfer range in the lower surrounding rock by 24.6%, and variations in layer thickness reduce the annual temperature fluctuation amplitude from 8℃ to 5.5℃. The results provide theoretical support for energy-efficient thermal environment design in subway systems.

【Keywords】 Subway station; Layered surrounding rock; Temperature field; Annual heat storage; Control variable method

0 引言

地铁系统在长期运营过程中会持续产生大量

热量,热量持续在隧道、衬砌结构及周边围岩中累积。其中,隧道周边围岩所吸收的热量占地铁系统

作者简介: 刘思忆 (2001.03-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 3116414759@qq.com

通讯作者: 蒋福建 (1989.03-), 男, 博士, 副教授, E-mail: jfjhvac@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-04-23

总产热量的约 10%~30%^[1,2]。随着运营年限增加,围岩储热与散热能力下降,围岩热影响范围持续扩展并最终趋于动态平衡。围岩长期热沉积不仅影响隧道及车站热环境,也会改变环控系统冷负荷水平和长期运行能耗^[3-5]。因此,研究地铁围岩温度场演变规律对环控系统的设计、运行优化和长期安全运营具有重要意义。

目前,国内外学者已围绕地铁热环境、隧道空气温度预测和围岩蓄热特性开展了较多研究。相关成果表明,隧道埋深、运营年限、气候边界、隧道周期热边界及围岩热物性参数均会显著影响围岩温度场演变。Song 等^[6,7]从无量纲分析和埋深效应角度研究了浅埋地铁隧道周围土体温度场,指出隧道温度场同时受到地表气温和隧道气温扰动,并在上覆土层中形成耦合影响区。针对兰州地铁的实测研究表明,浅层地温随环境气温呈近似正弦式波动,并存在明显相位滞后;当埋深达到一定程度后,地层温度逐渐进入相对稳定状态^[8]。王丽慧等^[9]采用 CHAMPS-BES 软件和正交实验方法分析了围岩土体温度分布的影响因素,发现土壤导温系数对热库峰值位置和热影响范围具有显著作用,导温能力越强,热量向远离隧道区域扩散越快。还通过缩尺模型实验与数值模拟研究了围岩温度和蓄热量随运营年限的演化规律,指出长期运营后围岩土体温度会逐渐达到动态平衡,不同地质材料的蓄热能力存在明显差异^[10,11]。与此同时,响应面分析及监测研究也从不同角度证明,气候条件、通风组织形式、热边界设定以及列车运行工况等因素均会对围岩温度场产生显著影响^[5,12-14]。

上述研究表明,地铁围岩温度场演变受气候边界、埋深条件、运营年限及岩土热物性参数等多种因素共同影响。需要指出的是,实际地铁工程所处地层通常具有明显的竖向分层特征,不同岩土层之间热物性差异会导致热量传播出现非均匀扩散及局部温度梯度突变^[15,16]。然而,现有地铁隧道热环境与围岩蓄热研究中,较多模型仍将围岩简化为均质介质,难以充分反映分层地层条件下不同岩土层之间的热响应差异。相关研究也表明,其多层地层的有效导热系数与厚度加权导热系数之间的相对误差达 6.52%^[17],若忽略地层非均质性而采用均质化假设,可能导致环控负荷预测和围岩热资源评估产生不可忽视的偏差^[18,19]。

综上所述,现有针对分层围岩条件下温度场长期演变及多类因素影响的研究仍有进一步探究空间。基于此,本文在考虑围岩分层特性的基础上,采用有限体积法建立地铁站分层围岩三维瞬态传热模型,并通过控制变量法系统分析隧道埋深、环控设定温度、气候条件、岩体导热系数及分层厚度等因素对围岩温度场时空演变和年累计换热量的影响规律。研究结果可为地铁站房热环境节能设计、环控系统运行优化及长期运营调控提供更加可靠的理论依据。

1 模型建立与验证

模型主要尺寸如图 1 所示,详细建模与验证过程参见前期工作^[20],后文仅对边界条件与工况设置进行说明。

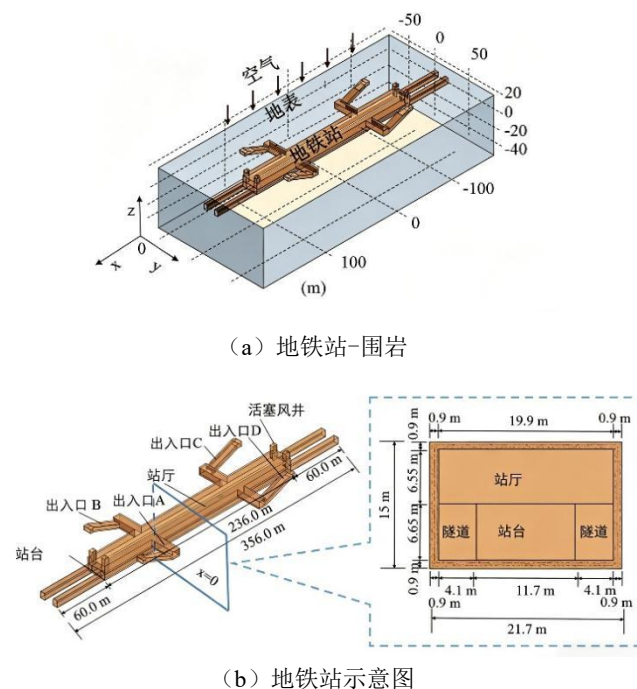


图 1 地铁站-围岩三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the 3D subway station-surrounding rock model

1.1 边界条件

本研究初始温度参考北京地区选取,其初始土壤温度 12.6℃^[21],侧面和底部边界土体设为绝热边界。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (1)$$

地表、站厅、站台与隧道边界采用第三边界法

设置, 换热系数与温度变化的设置如后续公式所示。

根据天气文件数据, 大气温度年内波动近似可由单谐余弦函数描述, 其一般形式可表示为:

$$T_f = \bar{T}_m + A_f \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau_0} + \varphi\right) \quad (2)$$

式中: $\bar{T}_m$ 为年平均温度; A_f 为年振幅; τ_0 为周期 (取 1 年); φ 为相位参数。

根据实际物理情况, 设置了符合实际气象与运营条件的年周期热条件。地表换热系数计算如式 (3) (4) 所示:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\text{ground}} = h_{\text{air}} (T - T_{\text{air}}(t)) \quad (3)$$

$$h_{\text{air}} = 11.6 + 7\sqrt{v_a} \quad (4)$$

式中: h_{air} 为地表与大气间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 其值根据式 (5) 计算^[22]; v_a 为年平均风速, m/s ; $T_{\text{air}}(t)$ 为随时间变化的空气温度。

站厅、站台、隧道壁面的换热系数计算如式 (5) (6) 所示:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{inner}} (T - T_{\text{tunnel}}(t)) \quad (5)$$

$$h_{\text{inner}} = 6.76v^{0.8} + 0.74 \quad (6)$$

式中: h_{inner} 为衬砌内表面与空气的对流换热系数, 由式 (7) 给出^[23], $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; v 为站内断面平均风速, m/s 。

站厅和站台风速参照 Yang 等^[24]在地铁站内的现场实测结果, 分别取 0.3m/s 和 0.5m/s 。隧道等效平均风速参照 Ji 等^[25]提出的计算方法及典型参数, 按 $v_a = v \cdot n / 3600$ 计算, 取活塞风速度 6.48m/s 、区间隧道列车运行时间 138s 、每小时行车对数 6 对, 得 1.49m/s 。

基于地铁每日运营时间为 6:00–24:00 (共 18 小时)、停运时间为 0:00–6:00 (共 6 小时) 的运行制度, 本研究将空调季站内温度与停运时段室外气温按运行时间权重进行加权平均, 构建了能够反映地铁周期性运行特征的等效日平均温度边界条件, 如式 (7) 所示:

$$T_{\text{daily}} = (18 \times T_{\text{ac}} + 6 \times T_{\text{air}}) / 24 \quad (7)$$

式中: T_{ac} 为空调季站内设计温度 (站厅 29°C / 站台 28°C)。关于该边界条件的可用性在之前的文章中进行了说明^[20]。

隧道内空气温度边界参考杜志萍的文章进行

设置^[26], 逐日变化值如图 2 所示。

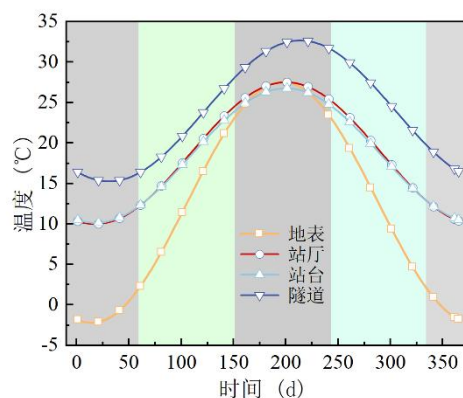


图 2 四个年周期温度边界

Fig.2 Four annual periodic temperature boundaries

1.2 工况设置

本研究选取埋深、环控设定温度、气候条件、导热系数及分层厚度五个因素, 每个因素设置四个水平, 采用控制变量法进行分析。以各因素的水平 1 为基准工况, 当一个因素改变时, 其他因素固定于水平 1。各因素水平设置如表 1 所示, 各代号对应的具体参数如表 2 所示。

各因素取值的依据如下: 埋深指车站底板埋深, 车站高度固定为 15m , 四个埋深水平通过改变覆土厚度实现 ($3\sim 15\text{m}$)。覆土厚度取值参考了 Cheng 等^[27]的研究范围 ($2\sim 11\text{m}$) 并适当扩展。环控温度依据《地铁设计规范》(GB 50157-2013)^[28]中站厅空气计算温度不应超过 30°C 、站台应低于站厅 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 的规定, 并参考谷雅秀等^[29]对地铁车站公共区夏季舒适温度范围的实测结果 ($22.3\sim 28.2^\circ\text{C}$), 由高至低设置四个水平。气候条件选取了年均温度为 $4.12\sim 22.23^\circ\text{C}$ 的四个典型气候区, 覆盖寒冷至炎热的气候梯度。导热系数及分层厚度参照了相关文献中对岩土热物性参数及地层厚度的研究^[30], 并略有调整。

表 1 数值模拟影响因素与水平设置

Table 1 Influencing factors and level settings of numerical simulation

影响因素	水平 1 (基准)	水平 2	水平 3	水平 4
埋深	M1	M2	M3	M4
环控温度	T1	T2	T3	T4
气候条件	C1	C2	C3	C4
导热系数	D1	D2	D3	D4
分层厚度	H1	H2	H3	H4

表 2 各因素水平参数说明

Table 2 Parameter description of each factor level

因素	参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
埋深	数值/m	18	22	26	30
环控温度	夏季站厅温度/℃	29	27	25	23
	夏季站台温度/℃	28	26	24	22
	冬季温度/℃	18	16	14	12
	年均温度/℃	4.12	12.65	16.69	22.23
气候条件	年振幅/℃	-20.47	14.88	-11.4	7.48
	相位参数/rad	18.63	15.46	12.13	2.74
导热系数	第I~IV层/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.08/1.35	1.30/1.80	1.60/2.00	1.85/2.25
		/1.08/1.35	/1.30/1.80	/1.60/2.00	/1.85/2.25
分层厚度	第I~IV层厚度/m	10/15/20/35	35/20/15/10	20/35/10/15	15/10/35/20

注：导热系数和分层厚度的四层参数按照从第I层到第IV层的顺序，用斜杠分隔。例如“1.08/1.35/1.08/1.35”依次对应第I、II、III、IV层的导热系数。

2 结果及分析

2.1 各因素对围岩温度场时空分布的影响

为系统比较各因素对围岩温度场的影响差异，本节从时间演化特征与空间分布特征两个维度展开分析。

2.1.1 典型工况围岩温度场分布及时程特征

为建立对围岩温度场时空分布规律的直观认识，

并确定后续时程分析的观测位置，本节选取基准工况进行分析。图 3 (a) 展示了该工况第 20 年末地铁站周围围岩的温度等温线图，图 3 (b) ~ (d) 分别为上部 (a1)、侧向 (b1) 与下部 (c1) 三个方向距壁面 1m、3m、5m、10m 处的 20 年温度时程曲线。

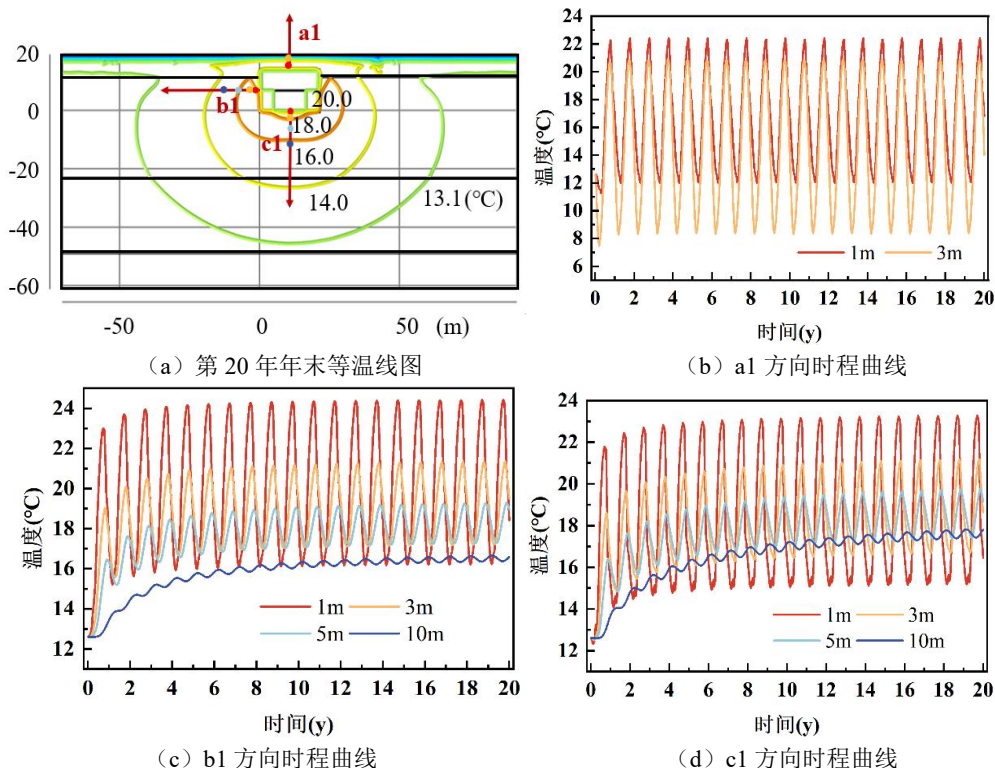


图 3 基准工况围岩温度场分布及时程特征

Fig.3 Temperature field distribution and time history characteristics of surrounding rock under baseline condition

从图3(a)可以看出,围岩温度场呈现显著的空间非均匀性。上部围岩同时受地表气温年周期波动和地铁站内热源的双重影响,等温线密集,温度梯度较大;下部围岩主要受地铁站热源单向传热作用,等温线稀疏,传热影响范围最广;侧向围岩的传热特征介于上部与下部之间。

图3(b)~(d)进一步展示了三个方向不同距离处的温度时程规律。可以看出,距壁面越近,温度波动幅值越大,对边界条件变化的响应越敏感;随着距离增加,波动幅值逐渐衰减,相位滞后愈发明显。以b1方向为例,1m处的年波动幅值达 8.2°C ,3m处降至 4.2°C ,5m处为 2.0°C ,而10m处仅为 0.3°C 。a1和c1方向呈现相似衰减规律,但衰减速率存在差异。

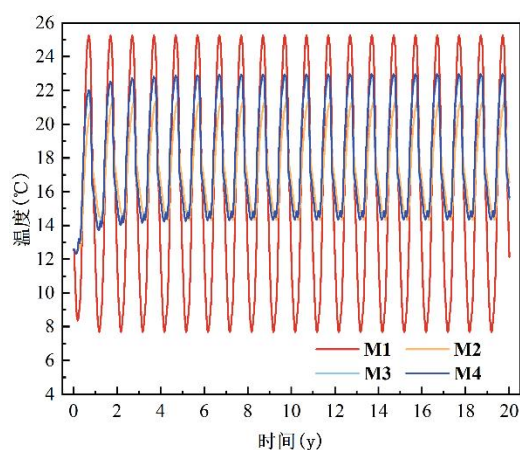
上述结果表明,距壁面1m处位于近壁区,能够最早且最敏感地反映各因素变化对围岩温度场的影响。同时,选取统一的近壁位置作为观测点,可保证不同因素间时程分析结果的可比性,且该位置紧邻衬砌,与隧道热环境的关联最为直接。因此,后续多因素对比分析将统一选取距壁面1m处作为典型观测位置,各因素的具体分析方向根据其响应特征确定。

2.1.2 温度响应的时间演化特征

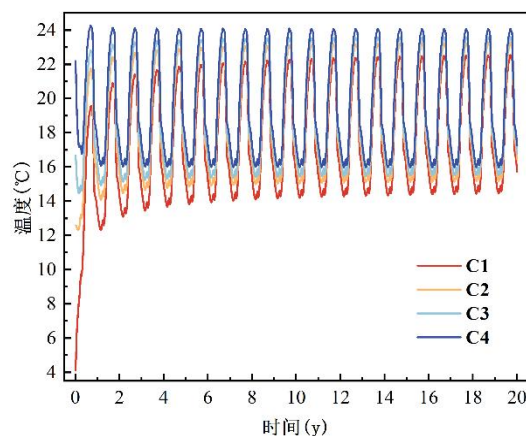
基于2.1.1节的分析,距壁面1m处对各因素变化的响应最为敏感。本节针对五类因素,选取其在a1、b1、c1三个方向中响应最为显著的方向,分析各因素变化时围岩温度的年周期响应特征。图4汇总了五类因素的20年温度时程曲线,各子图所选取的方向已在图题中标注。

从图4(a)可以看到,埋深对上部围岩温度波动的影响十分显著,埋深由18m增至30m时,a1方向1m处年波动幅值从 17.4°C 逐步减小,曲线趋于平缓,表明上覆土层增厚有效衰减了地表温度波的传播。气候条件的影响则体现在围岩温度的整体抬升上。图4(b)中,气候条件由寒冷(C1)向炎热(C4)变化时,c1方向1m处温度曲线整体抬升,且C1工况年波动幅值明显大于C4,反映出年均温和年振幅对围岩温度的双重影响。图4(c)表明,导热系数变化对a1方向1m处的时程影响甚微,各工况年平均温差不足 0.5°C ,其作用主要体现在空间扩散上,详见2.1.3节。分层厚度的影响见图4(d)。b1方向1m处,Case_H1(高热阻

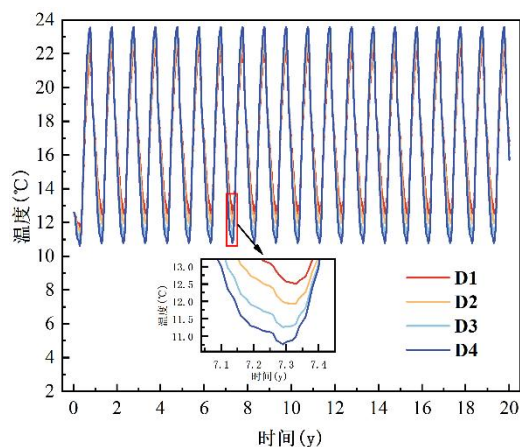
层靠地表)年波动约 8°C ,Case_H3(高热阻层靠地铁站)约 5.5°C ,波动幅值压缩约31%,说明分层结构可有效调制温度波动强度。图4(e)展示了环控温度的影响。环控温度由T4升至T1,b1方向1m处第20年末温差达 4.20°C ,是运营阶段调控围岩热环境最灵活的手段。



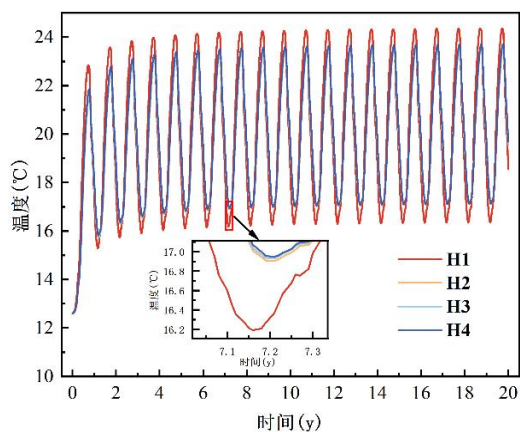
(a) 埋深, a1 方向



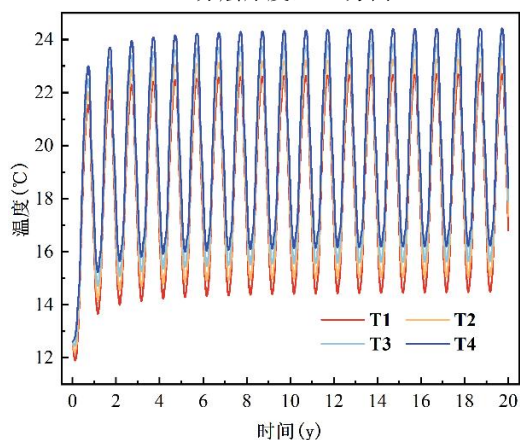
(b) 气候条件, c1 方向



(c) 导热系数, a1 方向



(d) 分层厚度, b1 方向



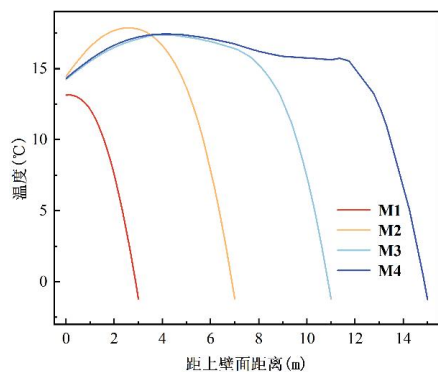
(e) 环控温度, b1 方向

图 4 各因素对围岩不同方向 1 m 处温度时程的影响

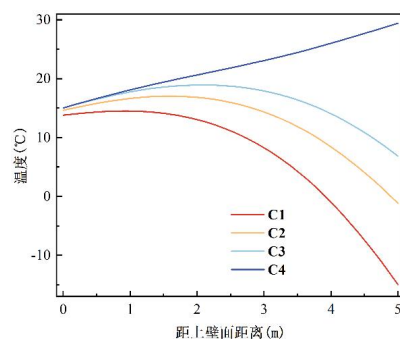
Fig.4 Influence of various factors on temperature time history of surrounding rock at 1 m in different directions

2.1.3 温度响应的空间分布特征

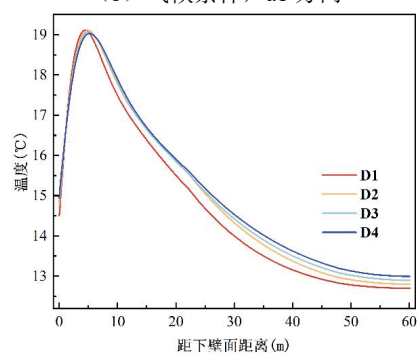
在时间演化分析的基础上, 本节进一步分析各因素对围岩温度空间衰减规律的影响。图 5 汇总了五类因素在其最敏感方向上的第 20 年末温度空间分布曲线。



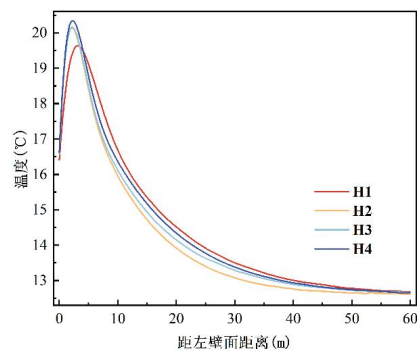
(a) 埋深, a1 方向



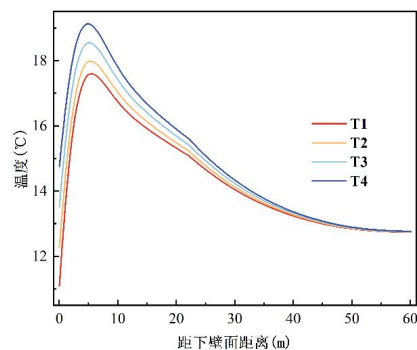
(b) 气候条件, a1 方向



(c) 导热系数, c1 方向



(d) 分层厚度, b1 方向



(e) 环控温度, c1 方向

图 5 不同因素下围岩温度空间分布对比

Fig.5 Comparison of spatial distribution of surrounding rock temperature under different factors

上部围岩对埋深和气候条件变化最为敏感。图5(a)展示了不同埋深下a1方向的温度分布。18m工况与30m工况的曲线分离最为明显,浅埋时近区围岩温度扰动更强,深埋时曲线更为平缓。图5(b)展示了不同气候条件下a1方向的温度分布,随着年均气温从4.1℃升至22.2℃,围岩温度曲线整体显著抬升,近壁区温升尤为突出。这一现象源于上部围岩同时受地表边界与地铁站热源的双重作用,地表温度波在浅埋或暖气候条件下衰减不充分,导致近区温度响应增强。气候影响在向侧向和下部传播过程中逐步衰减,距侧壁5m处C4与C1的温差仅为0.8℃。

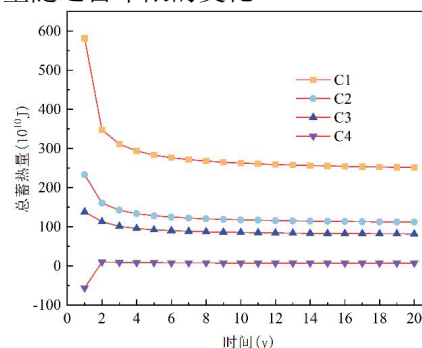
下部围岩对导热系数变化最为敏感。图5(c)展示了不同导热系数下c1方向的温度分布。随着导热系数增大,温度分布曲线分离度明显增加,不同导热系数组合下距壁面不同距离处的最大温差可达约2℃。下部传热范围由40.98m扩大至51.05m,增幅达24.57%,显著大于侧向的10.28%。这一现象源于下部围岩传热路径较长,导热系数的提高有效减小了热量传播阻力,使热量能够影响更远区域。侧向围岩对各因素的响应介于上部与下部之间。埋深变化时侧向曲线整体接近,因其远离地表温度波主要传播路径;导热系数增大时侧向传热范围增幅(10.3%)明显小于下部;分层厚度变化时侧向曲线分离度相对明显,如图5(d)所示,Case_H2年变化范围较大,表明厚度分配通过改变各方向等效热阻影响温度衰减过程。环控温度对下部围岩的空间分布也有一定影响。图5(e)展示了不同环控温度下c1方向的温度分布。随着环控温度降低,围岩温度曲线整体下移,但曲线形状和衰减趋势基本一致,表明环控温度主要改变温度水平,对热量扩散范围的影响相对有限。

综合来看,上部围岩受边界条件(埋深、气候)主导,下部围岩受介质属性(导热系数)主导,侧向围岩介于两者之间且对分层厚度更为敏感。这一差异本质上源于各方向距地表边界和内部热源的相对位置不同,以及传热路径长度的差异。

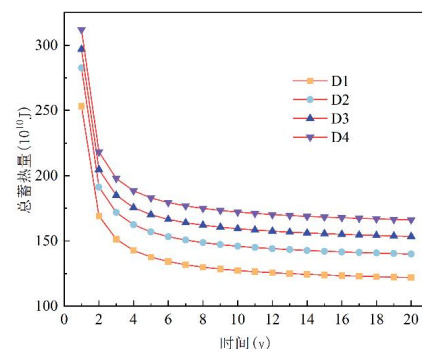
2.2 各因素对围岩年累计换热量的影响

年累计换热量反映了围岩与地铁站之间全年热交换的净值,是评估围岩蓄热能力与热负荷的关键指标。本节通过对壁面热流密度进行年度时间积分,分析各因素对系统总蓄热量的影响。各工况下

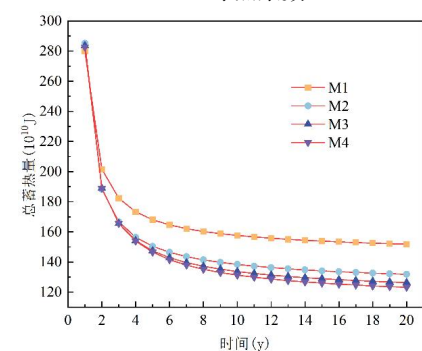
系统年累计换热量均呈前期变化快、后期趋于收敛的演化规律,但不同因素对蓄热量级与收敛速率的影响存在显著差异。图6汇总了各因素下系统年累计换热量随运营年限的变化。



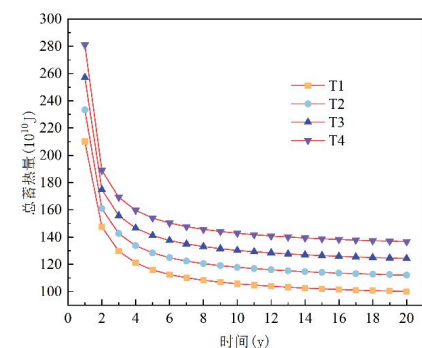
(a) 气候条件



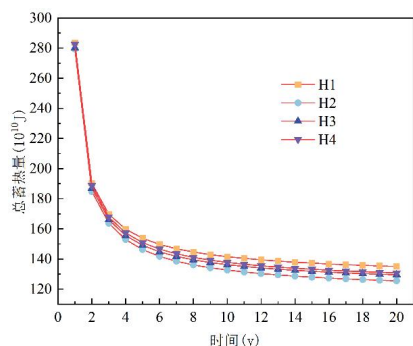
(b) 导热系数



(c) 埋深



(d) 环控温度



(c) 分层厚度

图 6 各因素对系统年累计换热量随运营年限变化的影响

Fig.6 Influence of various factors on annual cumulative heat transfer of the system with operating years

气候条件对年蓄热量的影响最为显著。如图 6 (a) 所示, 以第 20 年蓄热量计, 寒冷地区 (C1) 较炎热地区 (C4) 高出约 6.9 倍, 量级差异远大于其他因素。这说明寒冷地区围岩长期净蓄热效应更为突出, 设计时需预留更充分的蓄热容量。导热系数与埋深的影响幅度次之。图 6 (b) 显示, 导热系数由 D1 增至 D4 时, 第 20 年蓄热量增幅 36.4%。更强的导热能力使热量在更大范围内向围岩传递, 同时使蓄热量向稳定值的收敛更缓。图 6 (c) 表明, 埋深由 18 m 增至 30 m 时, 第 20 年蓄热量降低约 18.9%, 表明增大埋深延长了围岩与地表的热交换路径, 围岩背景温度提升更快, 导致年度净蓄热量衰减更明显。环控温度与分层厚度的影响相对温和。环控温度降低使隧道年蓄热量年际衰减率从 T1 的 47.6% 增至 T4 的 53.3%, 如图 6 (d) 所示, 系统更快趋近较低蓄热水平。分层厚度变化主要改变长期稳定水平, Case_H2 第 20 年蓄热量较 Case_H1 降低约 7.1%, 如图 6 (e) 所示。

3 结论

本文基于地铁站分层围岩三维瞬态传热模型, 通过控制变量法分析五类关键因素对围岩传热的影响, 主要结论如下:

(1) 五类因素按作用机制可分为两类: 环控温度与气候条件主要通过改变边界温度输入, 影响围岩整体温度水平; 埋深、导热系数与分层厚度则主要通过改变传热路径与扩散能力, 影响热扰动的空间衰减特征。量化分析表明, 环控温度由 T4 升至 T1 时 b1 方向 1 m 处温升 4.20℃, 年均气温由 4.1℃升至 22.2℃时 c1 方向 1m 处温度显著升高;

埋深由 18m 增至 30m 使年蓄热量降低 18.9%; 导热系数增大使下部传热范围扩大 24.6%; 分层厚度变化可将 b1 方向 1m 处温度年波动幅值由 8℃压缩至 5.5℃。

(2) 各因素对不同方位围岩的影响存在显著敏感性差异。上部围岩受埋深影响最为显著, 浅埋条件下 a1 方向 1m 处年波动幅值达 17.4℃; 下部围岩受导热系数影响最为突出, c1 方向传热范围增幅达 24.6%, 显著高于侧向的 10.3%; 侧向围岩受分层厚度和环控温度影响相对明显, b1 方向 1m 处环控温差达 4.20℃, 分层厚度变化使波动幅值压缩约 31%。该差异受各方向与地表边界及内部热源相对位置不同的影响。

(3) 气候条件对围岩年蓄热量影响最为显著, 寒冷地区年蓄热量较炎热地区高出约 6.9 倍, 其次为导热系数与埋深。环控温度对围岩整体温度水平的调节最为直接, 是运营阶段最灵活的控制手段。气候条件与埋深共同决定围岩长期蓄热的累积程度, 导热系数则主导热扰动的空间扩散范围。

本文存在以下不足: 使用的室外气象数据源于 EnergyPlus 官网查找到的 2005 年典型气象年数据, 未能充分反映近年来全球变暖背景下的气候特征; 量化数据只适用于本文模型, 尚未进行普适化推广。未来工作可基于较新年份的气象数据, 对量化结果进行无量纲整理, 以期提高推广结果的普适性。

参考文献:

- [1] 李晓昭,熊志勇,乔恒君,等.地铁隧道围岩传热规律的监测分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):105-110.
- [2] Zhao P, Li X, Liu J, et al. Monitoring and analysis of the subway tunnel wall temperature and surrounding rock/soil heat absorption ratio[J]. Building and Environment, 2021,194:107657.
- [3] Ampofo F, Maidment G, Missenden J. Underground railway environment in the UK Part 2: Investigation of heat load[J]. Applied Thermal Engineering, 2004,24(5-6): 633-645.
- [4] Zhao P, Li X, Zhang D, et al. A simplified method to determine the comprehensive heat transfer quantity in subway tunnels[J]. Energy and Buildings, 2021,247: 111090.

- [5] Liu W, Liang S, Huang Q, et al. Estimation of thermal hazards in surrounding rock of subway tunnel under dual periodic temperature boundaries: a case study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(44):67063-67075.
- [6] Song H, Chen Q. Dimensionless analysis of soil temperature field of shallow subway tunnel[J]. *Energy and Buildings*, 2022,259:111900.
- [7] Song H, Li J, Yu Y, et al. Research on the influence of subway tunnel depth on heat storage characteristics of the surrounding soil mass[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(17):9534.
- [8] ZHU J H, ZHANG H Y, MA G, et al. Ground temperature distribution and evolution of Lanzhou subway in the Chinese Loess Plateau[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023,43:102803.
- [9] 王丽慧,张嫻,杜志萍,等.地铁隧道围岩土体蓄放热特性各影响因素显著性研究[J].*制冷学报*,2019,40(4):135-143.
- [10] Wang L, Zou X, Tao H, et al. Experimental study on evolution characteristics of the heat storage of surrounding soil in subway tunnels[J]. *Procedia Engineering*, 2017,205:2728-2735.
- [11] Wang L, Zuo H, Kong M, et al. Study on the evolution characteristics of temperature and heat storage of the soil surrounding the tunnel with years[J]. *Energy and Buildings*, 2022,257:111804.
- [12] Sun T, Luo Z, Chay T. An analytical model to predict the temperature in subway-tunnels by coupling thermal mass and ventilation[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,44:102564.
- [13] Zhang Y, Li X. Response-surface-model based on influencing factor analysis of subway tunnel temperature[J]. *Building and Environment*, 2019,160:106140.
- [14] Zhang Y, Li X. Monitoring and analysis of subway tunnel thermal environment: A case study in Guangzhou, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,55:102057.
- [15] Liu Z, Li R, Shi L. Multilayer quasi-three-dimensional model for the heat transfer inside the borehole wall of a vertical ground heat exchanger[J]. *Geothermics*, 2020,83:101711.
- [16] Raymond J, Lamarche L. Simulation of thermal response tests in a layered subsurface[J]. *Applied Energy*, 2013, 109:293-301.
- [17] Shi Z, Zhang C, Cai C, et al. Comparative analysis of ground thermal conductivity and thermal resistance of borehole heat exchanger in different geological layered sequence[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024,84:108541.
- [18] Jia L, Lu L, Cui P, et al. A novel study on influence of ground surface boundary conditions on thermal performance of vertical U-shaped ground heat exchanger[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024,100:105022.
- [19] Boban L, Soldo V, Fujii H. Investigation of heat pump performance in heterogeneous ground[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020,211:112736.
- [20] Jin T, Jiang F, Liu S, et al. Interannual thermal behavior of multilayer soil surrounding subway stations across climate zones under multiple periodic thermal boundaries[J]. *Energy*, 2026:141059.
- [21] Cleall P J, Muñoz-Criollo J J, Rees S W. Analytical solutions for ground temperature profiles and stored energy using meteorological data[J]. *Transport in Porous Media*, 2015,106(1):181-199.
- [22] Jiang W, Wang J, Yu B. Hybrid data-mechanism-driven model of the unsteady soil temperature field for long-buried crude oil pipelines with non-isothermal batch transportation[J]. *Energy*, 2024,292:130354.
- [23] Yuan Yanping, Gao Xiangkui, Wu Hongwei, et al. Coupled cooling method and application of latent heat thermal energy storage combined with pre-cooling of envelope: Method and model development[J]. *Energy*, 2017,119:817-833.
- [24] Yang B, Yang C, Ni L, et al. Field experiment on influence of cold protection technologies on thermal environment of subway station in severe cold region[J]. *Building and Environment*, 2022,216:109055.
- [25] Ji Y, Wang W, Fan Y, et al. Coupling effect between tunnel lining heat exchanger and subway thermal environment[J]. *Renewable Energy*, 2023,217:119165.