

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-022-10

周期性边界下围岩热湿耦合传递特性 及影响因素研究

张倩 曹晓玲 周旭 冷子瑜

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 为研究周期性边界下围岩热湿耦合传递特性,以相对湿度和温度为驱动势,建立了围岩热湿耦合传递数学模型,并设计正交试验,探究围岩热湿耦合传递特性的影响因素,得到了围岩年平均热湿吸放量及时长的预测公式。研究表明:围岩温湿度呈现季节性变化,围岩内部温湿度幅值存在延迟和衰减,越远离壁面其温湿度幅值越小,峰值温度越低且峰值出现的时间越晚;围岩调温圈厚度逐月增加,从 1 月厚度为 5m 到 12 月扩展至 11m;年温度波幅对围岩吸放热量影响最大,年平均温度对吸放热时长影响最大,年湿度波幅对围岩放湿量影响最大,年平均湿度对围岩吸湿量及吸放湿时长影响最大。

【关键词】 围岩热湿耦合传递;周期性边界;正交试验;热湿吸放量

中图分类号 TU443 文献标志码 A

Study on the Coupled Heat and Moisture Transfer Characteristics and Impact Factors of Surrounding Rock Under Periodic Boundary

Zhang Qian Cao Xiaoling Zhou Xu Leng Ziyu

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

【Abstract】 To study the coupled heat and moisture transfer characteristics of surrounding rock under periodic boundary condition, a mathematical model described the coupled heat and moisture transfer was developed with temperature and relative humidity as the driving potentials. By designing orthogonal experiments, the impact factors of the coupled heat and moisture transfer characteristics were explored, and a prediction formula for the annual average heat and moisture absorption and release and their duration was obtained. The results showed that the temperature and humidity of the surrounding rock show seasonal changes, and the amplitude of temperature and humidity inside the surrounding rock were delayed and attenuated. The surrounding rock control heat circle expanded month by month, and the thickness of the control heat circle expanded from 5m in January to 11m in December. The annual amplitude and annual average of air temperature had the greatest impact on the heat absorption and release of surrounding rock and the duration of heat absorption and release, respectively. The annual fluctuation amplitude of air humidity had the greatest impact on the moisture release of surrounding rock, and the annual average humidity had the greatest impact on the moisture absorption and release duration of surrounding rock.

【Keywords】 coupled heat and moisture transfer; periodic boundary; orthogonal experiment; heat and moisture absorption and release

基金项目:四川省科技计划项目(2021YFG0120);中央高校基本科研项目(2682022CG007)

作者简介:张倩(1998.12-),女,在读硕士研究生,E-mail:zhangq199812@163.com

通信作者:曹晓玲(1984.08-),女,博士,E-mail:xlcao@swjtu.edu.cn

收稿日期:2023-12-10

0 引言

随着我国城市化建设的不断推进,带来了交通堵塞、土地资源匮乏等一系列问题。地下空间具有土地利用率高、冬暖夏凉、节约能源等优势,逐渐成为缓解土地资源供需矛盾的重要载体。近年来我国城市地下空间规模发展迅速,如何实现“低碳”“绿色”发展是地下空间开发的关键。地下空间内部环境具有潮湿、空气品质差等特点^[1],需依靠人工手段加以控制和改善,由于围岩属多孔介质,其内部热湿传递过程十分复杂,因此明确围岩热湿传递特性及热湿蓄放规律是准确计算地下空间空调负荷的关键。

目前国内外学者在围护结构热湿传递方面进行了大量研究,李魁山等^[2]建立了以温度梯度和水蒸汽密度为驱动势的多层墙体一维热湿耦合传递模型,对墙体在室外热湿气候下的温度和水蒸汽密度变化进行研究;韦明^[3]以深埋地下工程中的贴壁式结构和离壁式结构为对象,研究了在室内空气湿度呈年周期性变化的情况下,围护结构内温度和相对湿度的分布;陈友明等^[4]以温度和相对湿度为驱动势,建立并验证了多孔介质墙体热湿耦合迁移模型,分析热湿耦合迁移对长江流域建筑能耗模拟的影响;张华玲^[5]提出了以相对湿度和温度为驱动势的围岩热湿耦合传递模型,通过数值方法得到了围岩温湿度分布和壁面的瞬时热湿吸放量。向楠^[6]以 Whitaker 的 REV 理论为基础建立了地下水电站混凝土围护结构传湿数值模型,拟合出了混凝土围护结构表面吸放湿量的计算方程。相关研究多集中于围岩热湿耦合传递特性,而对年周期性边界下空气温湿度影响的研究不足。

本文以温度和相对湿度为驱动势,建立了一维围岩热湿耦合传递数学模型,求解并验证了模型的正确性,在此基础上重点研究了全年季节性周期边界下围岩热湿耦合传递特性,通过设计正交试验,采用极差分析法,探究了空气年温度波幅、年平均温度、年湿度波幅和年平均湿度对围岩热湿耦合传递特性的影响,并以此为变量,得到了围岩年平均热湿吸放量及时长的预测公式。

1 围岩热湿耦合传递数学模型建立及求解

围岩热湿耦合传递是一个复杂的过程,受围岩的热湿特性和环境等多重因素的影响,其示意图如

图 1 所示。在建立数学模型前,做出以下假设:围岩是连续的、均匀的、各向同性的;围岩中的水蒸气是理想气体,满足理想气体状态方程;围岩的任何一点都存在局部热平衡和湿平衡^[7];本文所研究的围岩处于恒温层内,围岩的热湿仅沿厚度方向传递;不考虑围岩毛细滞后特性的影响。

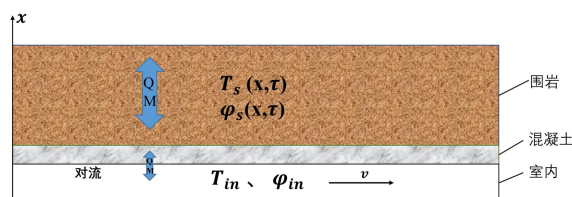


图 1 围岩热湿传递示意图

Fig.1 Schematic of the heat and moisture transfer in surrounding rock

1.1 控制方程

根据国内外学者对湿迁移驱动势的研究,理论上表示湿含量的参数均可作为湿传递的驱动势^[8]。由于本文研究的围岩由多层材料组成,在多层材料交界面处相对湿度是连续的,因此本研究选择相对湿度和温度作为热湿迁移的驱动势,建立围岩热湿耦合传递数学模型。

(1) 湿平衡方程

围岩中的湿组分包括水蒸气和液态水两部分。液态水在毛细力的驱动下以渗透的方式迁移,符合达西定律;水蒸气在水蒸气分压力的驱动下以扩散的形式迁移,符合菲克定律^[9]。根据质量守恒定律,围岩湿平衡方程如下:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = -\nabla(\bar{J}_l + \bar{J}_v) \quad (1)$$

式中: w 为围岩体积含湿量, kg/m^3 ; \bar{J}_l 为液态水迁移量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; \bar{J}_v 为水蒸气迁移量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

根据达西定律和菲克定律,液态水迁移量 \bar{J}_l 和水蒸气迁移量 \bar{J}_v 分别由式(2)、(3)计算:

$$\bar{J}_l = K_l \nabla S = -D_w \xi \nabla \varphi \quad (2)$$

$$\bar{J}_v = -\delta_v \nabla P_v \quad (3)$$

式中: K_l 为液态水传导系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; S 为毛细压力, Pa ; $D_w = -K_l \frac{dS}{dw}$ 为液态水扩散率,

m^2/s ; $\xi = \frac{dw}{d\varphi}$ 代表围岩等温吸湿平衡曲线的斜

率； φ 为材料的相对湿度； δ_v 为水蒸气渗透系数， $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ ； $P_v = \varphi P_{sat}$ 为水蒸气分压力，Pa。

将式 (2)、(3) 代入式 (1)，可得：

$$\xi \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中： $D_\varphi = D_w \xi + \delta_v P_{sat}$ 是由相对湿度梯度引起的传质系数， m^2/s ； $D_T = \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT}$ 是由温度梯度引起的传质系数， $\text{m}^2/(\text{s}\cdot\text{K})$ 。

(2) 热平衡方程

围岩的热传递主要包括固体颗粒间的热传导以及相变潜热。根据能量守恒定律，围岩热平衡方程为：

$$(c_s \rho_s + c_w w) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \left(\lambda \nabla T - L(T) \bar{J}_v \right) \quad (5)$$

式中： ρ_s 为围岩干密度， kg/m^3 ； c_s 为围岩干燥状态下的定压比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； c_w 为液态水的比热容，取 $4200\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； λ 为围岩的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $L(T)$ 为蒸发潜热， J/kg ，可由式 (6) 计算。

$$L(T) = [2500 - 2.4(T - 273.15)] \times 10^3 \quad (6)$$

将式 (3) 代入式 (5) 得：

$$(c_s \rho_s + c_w w) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} + J_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (7)$$

式中： $\lambda_{eff} = \lambda + L(T) \delta_v \varphi \frac{dP_{sat}}{dT}$ 为有效导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $J_\varphi = L(T) \delta_v P_{sat}$ 是由相对湿度梯度引起的传热系数。

(3) 初始条件及边界条件

本文所研究的围岩位于恒温层，一般认为恒温层的温度大致与当地年平均温度相等，参考文献^[10]选取围岩初始温度。地下围岩的湿度较高，围岩的初始相对湿度取 85%。

$$\begin{cases} T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0 \\ \varphi(x, \tau)|_{\tau=0} = \varphi_0 \end{cases} \quad (8)$$

内壁面边界条件为对流边界条件：

$$\begin{cases} \left(-D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_m (\varphi_{in} P_{sat} - \varphi_x P_{sat}) \\ \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} + J_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{x=0} = h \cdot (T_{in} - T_x) \end{cases} \quad (9)$$

远边界位于半无限的深处，其温湿度几乎不受热湿传递的影响，始终保持初始状态，因此为定温

定湿边界：

$$\begin{cases} T_{x \rightarrow \infty} = T_0 \\ \varphi_{x \rightarrow \infty} = \varphi_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： h_m 为表面对流传质系数， s/m ； h 为表面对流传热系数，取 $7.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[3]； in 表示室内； $x=0$ 表示围岩内壁面； $x \rightarrow \infty$ 表示围岩远边界。

对流传质系数 h_m 和对流传热系数 h 满足刘易斯关系式^[11]：

$$h_m = 7.7 \times 10^{-9} \times h \quad (11)$$

1.2 数学模型求解

围岩热湿耦合数学模型是变系数的偏微分方程组，具有高度的非线性和耦合性，难以直接求解，因此采用有限体积法对控制方程进行离散。控制方程离散后可写成矩阵方程的形式：

$$\begin{cases} [A]_{n \times n} [\phi]_{n \times 1} = [C]_{n \times 1} \\ [B]_{n \times n} [T]_{n \times 1} = [D]_{n \times 1} \end{cases} \quad (12)$$

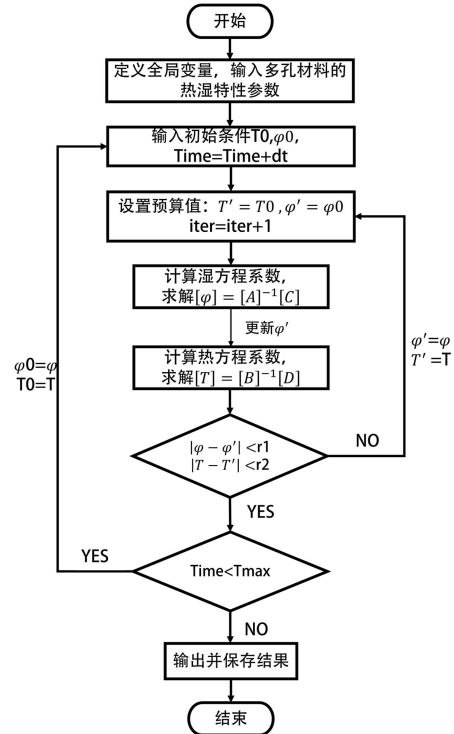


图 2 模型求解流程图

Fig.2 Flowchart of model solving

采用 MATLAB 编程求解控制方程，图 2 为求解程序的流程图。在进行每一时层计算时，由于方程组系数矩阵与未知量有关，在计算该时刻各节点温湿度前，需要更新系数矩阵。在本文中将上一时

刻的温湿度作为该时刻的预算值, 带入系数矩阵中将非线性方程组转化为线性方程组。进行迭代计算至前后两次迭代计算的温湿度差值达到所需的计算精度, 当前迭代步的计算值即为该时刻的计算值。再重复上述步骤进行下一时刻温湿度的计算。

1.3 模型验证

为验证上述数学模型及计算程序的准确性, 与多层材料对流传热传质边界的案例 HAMSTAD5 进行验证。HAMSTAD5 中的研究对象是由 365mm 砖+15mm 砂浆+40mm 保温层组成的墙体, 墙体的初始温湿度为 25°C 和 60%。室内外空气温度分别为 20°C 和 0°C, 相对湿度分别为 60% 和 80%。室内侧对流传热系数为 8W/(m²·K), 对流传质系数为 5.9×10⁻⁸s/m; 室外侧对流传热传质系数为 25W/(m²·K) 和 1.84×10⁻⁷s/m。各层材料热湿物性参数可参考文献[12]。该实例给出了 60 天后墙体内部相对湿度和含湿量的分布。

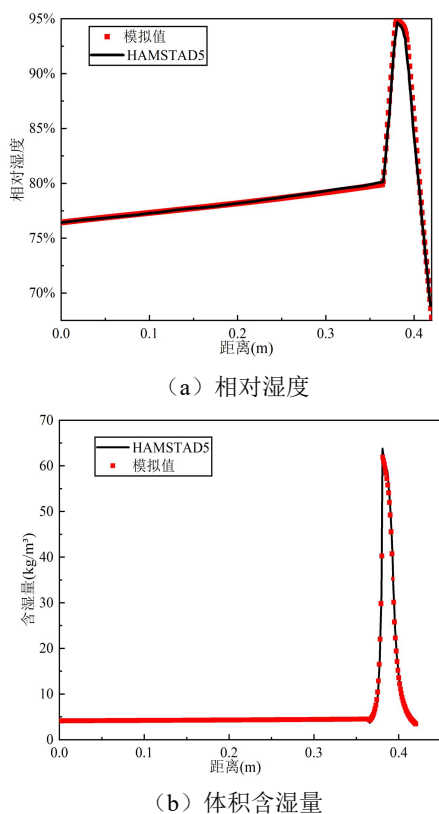


图 3 与 HAMSTAD5 案例验证

Fig.3 Validation with HAMSTAD5 case

将 HAMSTAD5 实例给出的墙体相对湿度分布和含湿量分布与本文模拟得出的计算结果进行对比, 如图 3 所示, 二者数据吻合性较好。

2 周期性边界围岩热湿耦合传递特性

为明确当室内侧空气温湿度呈现全年季节性周期变化时, 围岩的热湿迁移特性和热湿吸放规律, 可将全年空气温湿度随时间的变化拟合成正弦函数, 如式 (13)、式 (14) 所示, 对该工况下围岩的热湿耦合传递过程进行为期一年的模拟, 结果如图 4 所示。

$$T_{in} = 7 \sin(7.1725 \times 10^{-4} \tau + 6250) + 18 + 273.15 \quad (13)$$

$$\phi_{in} = 0.14 \sin(7.1725 \times 10^{-4} \tau + 6250) + 0.5 \quad (14)$$

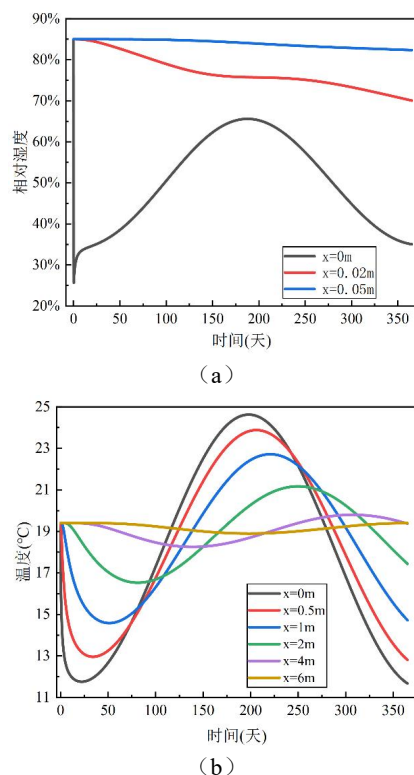


图 4 空气温湿度周期性波动工况下围岩温湿度图

Fig.4 Variation of temperature and humidity of surrounding rock under periodic boundary

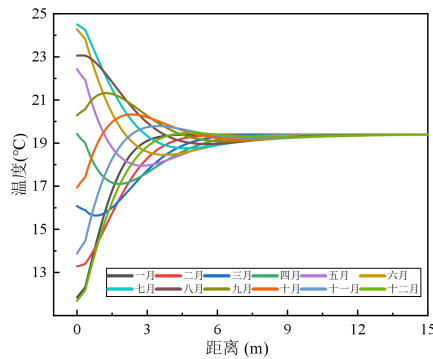
图 4 (a)、(b) 分别表示了围岩不同深度处温度和相对湿度随时间的变化, 可以看出受空气温湿度季节性变化的影响, 围岩温湿度也呈现季节性变化。由于围岩壁面温湿度受空气温湿度变化的影响最大, 因此围岩壁面温湿度波动幅度最大, 且越靠近壁面, 温湿度波幅越大。由于初期空气的相对湿度和温度过低, 围岩壁面水蒸气分压力远大于空气, 使得围岩壁面向空气大量传湿, 壁面相对湿度迅速下降。随着围岩和空气热湿交换的进行, 壁面

相对湿度开始回升, 在 190 天附近壁面相对湿度出现峰值, 围岩内部相对湿度则呈现缓慢波动下降的趋势。根据表 1 可知, 围岩内部温度幅值存在延迟和衰减, 越远离壁面其温湿度幅值越小, 峰值温度越低且峰值出现的时间越晚。

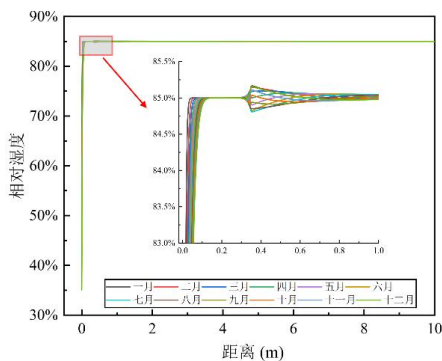
表 1 不同深度处围岩温度波幅及位置

Table 1 the amplitude of temperature and its position in surrounding rock at different depths

位置	$x=0m$	$x=0.5m$	$x=1m$	$x=2m$	$x=4m$
温度波幅/ $^{\circ}C$	12.88	10.92	8.14	4.64	1.55
峰值温度/ $^{\circ}C$	24.63	23.88	22.72	21.17	19.8
峰值时间/天	198	207	220	249	312



(a)



(b)

图 5 逐月围岩温湿度分布图

Fig.5 Monthly distribution of surrounding rock temperature and humidity

分析围岩温湿度分布的逐月变化以更好的说明围岩热湿传递特性的季节性变化。根据图 5 (a), 1-7 月围岩壁面温度呈逐月上升趋势, 从初始温度上升到 24.5 $^{\circ}C$, 而 7 月后, 随着空气温度下降, 围

岩壁面温度也开始下降, 至 12 月下降到 11.7 $^{\circ}C$ 。1、2 月份围岩温度随距离逐渐增加; 而在 3-8 月份, 围岩内部温度出现谷值, 且谷值温度和谷值位置均逐月增加; 从 9 月份开始, 空气温度逐渐降低, 围岩内部温度出现峰值, 随着时间增加, 峰值逐渐减小且向远离壁面移动。整体上看, 围岩调温圈厚度逐月增加, 从 1 月厚度为 5m, 到 12 月扩展至 11m。图 5 (b) 描述了围岩相对湿度分布的逐月变化。整体上空气温湿度季节性变化对围岩相对湿度分布的影响不大, 仅在 0.35m 处两种材料水蒸气渗透系数和液态水传导系数不同, 使得围岩相对湿度分布有所差别, 当空气温度低于围岩初始温度的月份, 该处相对湿度呈现峰值, 反之则呈现谷值, 这是因为围岩内部湿分主要以水蒸气扩散的形式从高温端向低温端迁移。由于在 7 月份 0.35m 处的围岩温度最大, 所以该处 7 月份相对湿度最低, 而 1 月份该处温度最低, 因此 1 月份该处相对湿度最大。同时空气温湿度对围岩相对湿度的影响范围逐月增加。

3 围岩热湿传递影响因素研究

在本节研究室内侧空气温湿度呈全年季节性周期变化时, 影响围岩热湿耦合传递的外部因素, 拟选取空气年温度波幅、空气年平均温度、空气年湿度波幅以及空气年平均湿度这 4 个典型的空气参数进行研究。为确保在研究其中一种影响因素时, 排除其他因素的干扰, 同时大大减少工作量, 本文采用正交试验法来设计模拟工况, 分析讨论上述四种因素对围岩热湿吸放量及时长的影响程度。

3.1 正交试验设计

本节正交试验选择空气年温度波幅、空气年平均温度、空气年湿度波幅以及空气年平均湿度作为四个因素。根据《人民防空地下室设计规范》^[10] 中的规定平时使用时室内温湿度分别维持在 16 $^{\circ}C$ -28 $^{\circ}C$ 、30%-80%, 战时室内温湿度则分别维持在 16 $^{\circ}C$ -30 $^{\circ}C$ 、30%-80%; 《地下建筑暖通空调设计手册》^[13]关于地下建筑洞室内空气温湿度推荐值分别为 14 $^{\circ}C$ -30 $^{\circ}C$ 、30%-75%; 同时相关文献中也提到地下水电站场内冬季温、湿度分别维持在 10-20 $^{\circ}C$ 、40-60%, 夏季温、湿分别维持为 26-30 $^{\circ}C$ 、70-80%^[14]; 西安某人防工程室内温湿度分别维持在 15 $^{\circ}C$ -25.5 $^{\circ}C$ 、50%-85%; 地下商城的室内温湿

度则维持在 18.7°C-26.3°C、42.1%-70.6%^[15]。综上所述, 地下建筑室内全年温湿度多维持在 10°C-30°C 和 30%-85%, 据此对上述四个影响因素进行水平选择, 各因素水平的选择如表 2 所示。

表 2 因素水平表

Table 2 The table of factors and levels

水平	影响因素			
	A 空气年温度波幅/°C	B 空气年平均温度/°C	C 空气年湿度波幅/%	D 空气年平均湿度/%
1	14	18	28	50
2	16	19	32	54
3	18	20	36	58
4	20	21	40	62

根据正交表和因子水平表的要求, 本文正交试验选择 L16 (45) 的正交表, 共进行 16 组工况的仿真模拟, 每组正交试验的参数详见表 3。每组工况空气温湿度均可表示成如式 (15) 和式 (16), 确保每组工况除上述四个因素外其他参数均不变。

$$T_{air} = \frac{A}{2} \sin(7.17 \times 10^{-4} \tau + 6250) + B + 273.15 \quad (15)$$

$$\varphi_{air} = \frac{C}{2} \sin(7.17 \times 10^{-4} \tau + 6250) + D \quad (16)$$

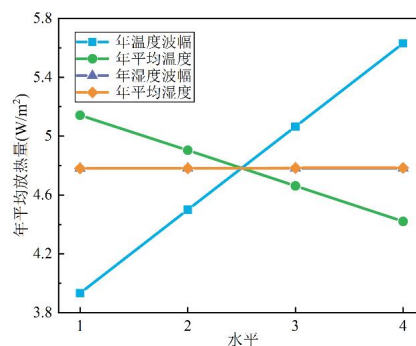
表 3 正交试验工况参数表

Table 3 The table of orthogonal experimental working condition parameter

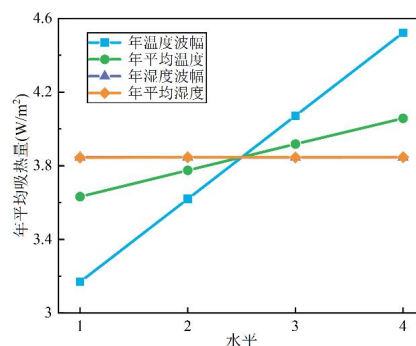
工况	年温度波幅/°C	年平均温度/°C	年湿度波幅/%	年平均湿度/%
1	14(1)	18(1)	28(1)	50(1)
2	14(1)	19(2)	32(2)	54(2)
3	14(1)	20(3)	36(3)	58(3)
4	14(1)	21(4)	40(4)	62(4)
5	16(2)	18(1)	32(2)	58(3)
6	16(2)	19(2)	28(1)	62(4)
7	16(2)	20(3)	40(4)	50(1)
8	16(2)	21(4)	36(3)	54(2)
9	18(3)	18(1)	36(3)	62(4)
10	18(3)	19(2)	40(4)	58(3)
11	18(3)	20(3)	28(1)	54(2)
12	18(3)	21(4)	32(2)	50(1)
13	20(4)	18(1)	40(4)	54(2)
14	20(4)	19(2)	36(3)	50(1)
15	20(4)	20(3)	32(2)	62(4)
16	20(4)	21(4)	28(1)	58(3)

3.2 极差分析

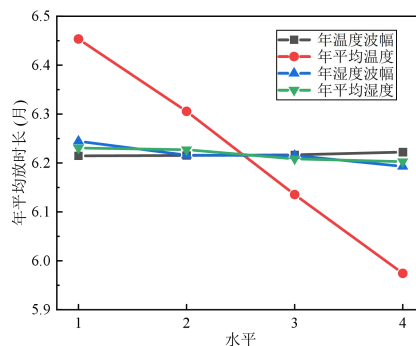
(1) 对吸放热的影响分析



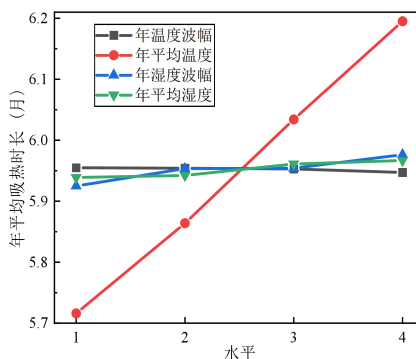
(a)



(b)



(c)



(d)

图 6 不同因素对围岩吸放热量及时长的影响

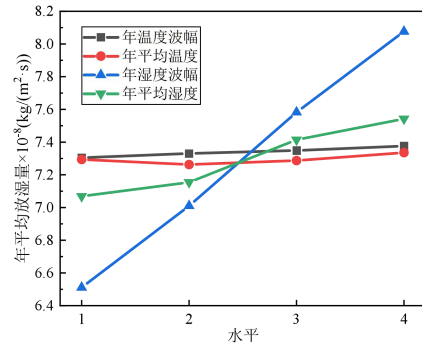
Fig.6 the different impact factors on the heat absorption and release and their duration in surrounding rock

图 6 描述了各因素每个水平下围岩年平均吸放热量的平均值。根据图 6 (a) 可以看出四个因素中仅有年平均温度与围岩年平均放热量成反比关系, 年温度波幅、年湿度波幅和年平均湿度均与围岩放热量成正比。说明空气年平均温度越高, 围岩放热量越小, 而年温度波幅、年湿度波幅和年平均湿度越大, 围岩放热量越大。出现上述现象的原因主要是年温度波幅越大, 一年内空气的最低温度越低, 空气与围岩间的温差越大, 促进了围岩向空气中放热; 空气年平均温度越高, 围岩内水分的蒸发量越大, 由于相变过程围岩温度下降, 使得围岩与空气间的温差减小, 导致围岩放热量减小。A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 1.69687、0.72133、0.00088 及 0.00268W/m², 因此可知因素 A 即年温度波幅对围岩年平均放热量影响最大。根据图 6 (b) 可以仅有年湿度波幅与围岩年平均吸热量成反比关系, 年温度波幅、年平均温度和年平均湿度均与围岩吸热量成正比。这是因为年温度波幅越大, 一年内空气的最高温度越高, 空气与围岩间的温差越大, 促进了围岩从空气中吸热; 空气年平均温度越高, 围岩内水分的蒸发量越大, 由于相变过程围岩温度下降, 从而增加了围岩的吸热能量。A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 1.35339、0.42512、0.00023 及 0.00231W/m²。与温度参数相比, 湿度参数对围岩吸放热量的影响较小, 四种因素的重要程度按年温度波幅、年平均温度、年平均湿度、年湿度波幅的顺序依次减弱, 且对围岩放热的影响大于围岩吸热。

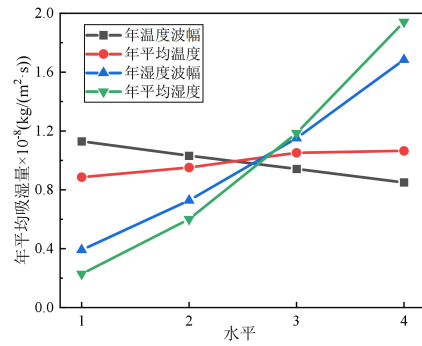
图 6 (c)、(d) 描述了各因素每个水平下围岩年平均吸放热时长的平均值, 对于围岩放热时长, 仅有年温度波幅与其成正比关系, 年平均温度、年湿度波幅和年平均湿度均与其成反比。说明空气年温度波幅越大, 围岩放热时长越长, 而年平均温度、年湿度波幅和年平均湿度越大, 围岩放热时长越短。反之, 年温度波幅与围岩吸热时长成反比关系, 年平均温度、年湿度波幅和年平均湿度均与围岩吸热时长成正比。上述四个影响因素与围岩吸放热时长均近似呈线性关系。对围岩吸放热时长而言, A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 0.2292、14.3748、1.5414 及 0.8334 天。即年平均温度对围岩吸放热时长的影响最大, 四种因素的重要程度按年平均温度、年湿度波幅、年平均湿度、年温度波幅

幅的顺序依次减弱。

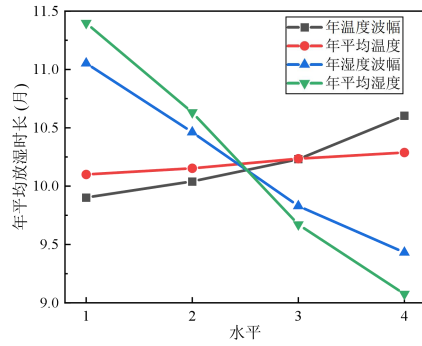
(2) 对吸放湿的影响分析



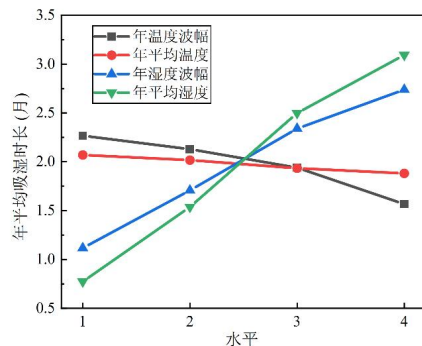
(a)



(b)



(c)



(d)

图 7 不同因素对围岩吸放湿量及时长的影响

Fig.7 The different impact factors on the moisture absorption and release and their duration in surrounding rock

图 7 描述了在不同因素、不同水平下围岩年平均放湿量和吸湿量。根据图 7 (a) 可以看出四个因素均与围岩年平均放湿量成正比关系且近似呈线性相关, 即围岩年平均放湿量随着上述四个因素的增大而增大。出现上述现象的原因主要是年湿度波幅越大, 一年内空气的最低相对湿度越低, 空气与围岩间的湿度差越大, 促进了围岩向空气中放湿。A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 0.07095、0.07272、1.5655 及 $0.47321 \times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。说明因素 C 即年湿度波幅对围岩年平均放湿量的影响最大。四种因素的重要程度按年湿度波幅、年平均湿度、年平均温度、年温度波幅的顺序依次减弱。由图 7 (b) 可以得出四个因素中仅有年温度波幅与围岩年平均吸湿量成反比关系, 年平均温度、年湿度波幅和年平均湿度均与围岩吸湿量成正比。A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 0.27999、0.17887、1.29277 及 $1.71249 \times 10^{-8} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。说明因素 D 即年平均湿度对围岩年平均吸湿量的影响最大。四种因素的重要程度按年平均湿度、年湿度波幅、年温度波幅、年平均温度的顺序依次减弱。与湿度参数相比, 温度参数对围岩吸放湿量的影响较小, 且对围岩吸湿的影响大于围岩放湿。

图 7 (c)、(d) 描述了各因素每个水平下围岩年平均吸放湿时长的平均值, 对于围岩放湿时长, 年温度波幅和年平均温度与其成正比关系, 年湿度波幅和年平均湿度与其成反比。即空气年温度波幅越大、年平均温度越高, 围岩放湿时长越长, 而年湿度波幅和年平均湿度越大, 围岩放湿时长越短。反之, 年温度波幅和年平均温度与围岩吸湿时长成反比关系, 年湿度波幅和年平均湿度与围岩吸湿时长成正比。上述四个影响因素与围岩吸放湿时长均近似呈线性关系。对围岩吸放湿时长而言, A、B、C、D 四个影响因素所对应的极差分别为 21、5.6457、48.6459、69.6459 天。即年平均湿度对围岩吸放湿时长的影响最大, 四种因素的重要程度按年平均湿度、年湿度波幅、年温度波幅、年平均温度的顺序依次减弱。

3.3 公式拟合

根据 3.2 节的分析可知, 空气年温度波幅、空气年平均温度、空气年湿度波幅以及空气年平均湿度四个因素与围岩年平均热湿吸放量及围岩热湿吸放时长均近似呈线性关系, 因此以线性关系为出

发点, 设空气年温度波幅、空气年平均温度、空气年湿度波幅以及空气年平均湿度分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , 以上四个因素为自变量, 采用多元线性回归, 拟合围岩年平均热湿吸放量和年热湿吸放时长的预测公式。

(1) 吸放热量及时长:

年平均放热量 ($R^2=1$):

$$Q_r = 4.65076 + 0.28278x_1 - 0.24058x_2 + 0.00419x_3 + 0.02509x_4 \quad (17)$$

年平均吸热量 ($R^2=0.999$):

$$Q_a = -2.76438 + 0.2256x_1 + 0.14183x_2 - 0.00228x_3 + 0.01715x_4 \quad (18)$$

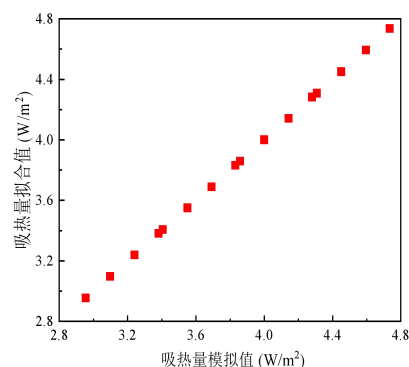
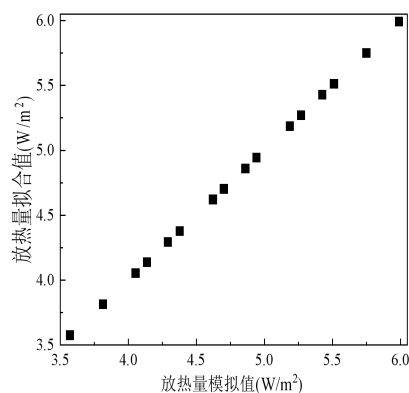
放热时长 ($R^2=0.985$):

$$\tau_{r1} = 6916.3 + 0.875x_1 - 115.75x_2 - 278.75x_3 - 183.75x_4 \quad (19)$$

吸热时长 ($R^2=0.985$):

$$\tau_{a1} = 1845.7 - 0.875x_1 + 115.75x_2 + 278.75x_3 + 183.75x_4 \quad (20)$$

围岩吸放热量及吸放热时长的预测公式如式 (17) - (20) 所示, 图 8 表示了实际值和拟合值的对比, 可以看出采用上述四个公式预测围岩吸放热特性是可行的。



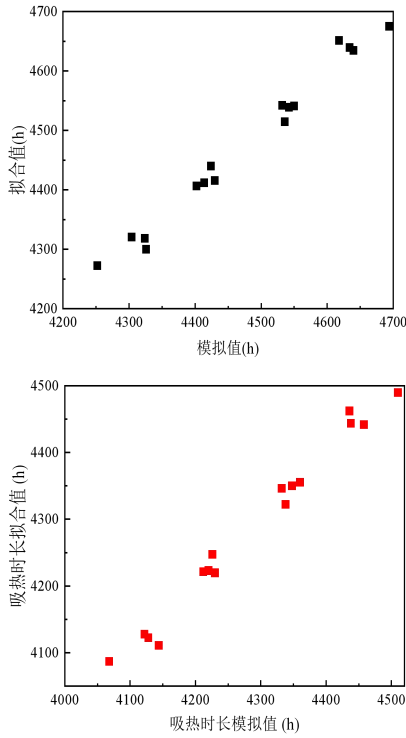


图 8 围岩吸放热量及时长模拟值和拟合值对比
Fig.8 Comparison between simulated and fitted values on the heat absorption and release and their duration in surrounding rock

(2) 吸放湿量及时长:

年平均放湿量 ($R^2=0.968$):

$$M_r = -0.92399 + 0.00783x_1 + 0.03747x_2 + 13.73521x_3 + 4.76154x_4 \quad (21)$$

年平均吸湿量 ($R^2=0.95$):

$$M_a = -10.40323 - 0.01905x_1 + 0.00257x_2 + 10.75247x_3 + 14.30338x_4 \quad (22)$$

放湿时长 ($R^2=0.92$):

$$\tau_{r2} = 17852.9 + 4.65x_1 + 39x_2 - 9895x_3 - 14265x_4 \quad (23)$$

吸湿时长 ($R^2=0.92$):

$$\tau_{a2} = -9090.9 - 4.65x_1 - 39x_2 + 9895x_3 + 14265x_4 \quad (24)$$

围岩吸放湿量及吸放湿时长的预测公式如式 (21) - (22) 所示, 图 9 表示了实际值和拟合值的对比, 可以看出采用上述四个公式预测围岩吸放湿特性是合理的。

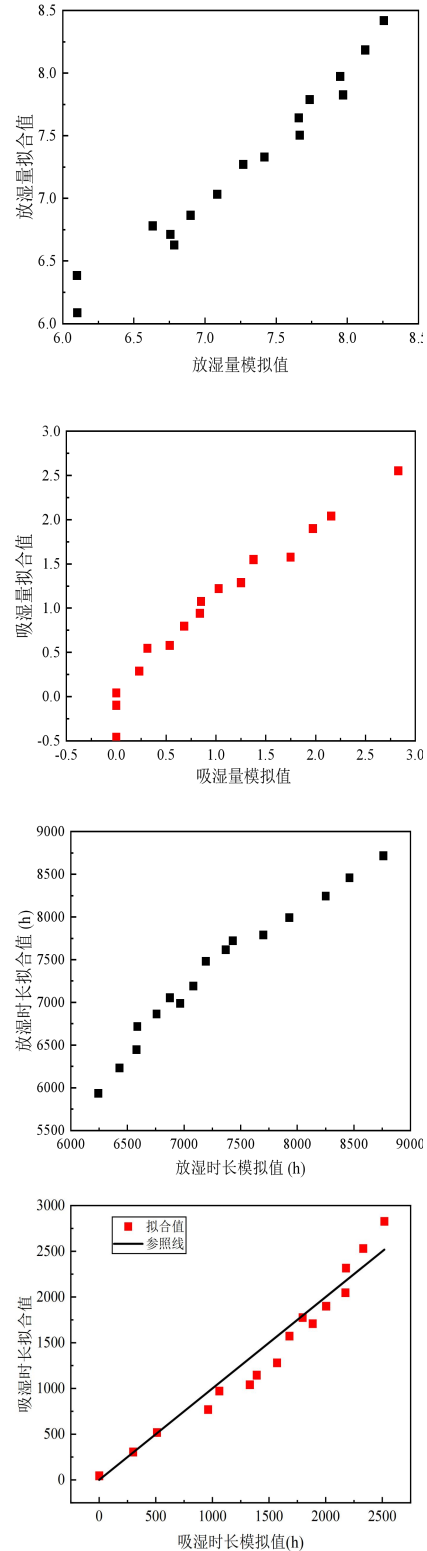


图 9 围岩吸放湿量及时长模拟值和拟合值对比
Fig.9 Comparison between simulated and fitted values on the moisture absorption and release and their duration in surrounding rock

4 结论

基于围岩热湿耦合传递数学模型,针对周期性边界下围岩热湿耦合传递特性及影响因素进行研究,并以空气年温度波幅、空气年平均温度、空气年湿度波幅以及空气年平均湿度为自变量得到围岩热湿吸放量和时长的预测公式。本文主要得出以下结论:

(1) 围岩温湿度也呈现季节性变化,围岩壁面温湿度波动幅度最大,且越靠近壁面,温湿度波动幅越大;围岩内部温度幅值存在延迟和衰减,越远离壁面其温度幅值越小,峰值温度越低且峰值出现的时间越晚;围岩调温圈厚度逐月增加,从1月厚度为5m,到12月扩展至11m;空气温湿度的季节性变化对围岩相对湿度分布的影响不大。

(2) 年温度波幅对围岩吸放热量影响最大,年平均温度对吸放热时长影响最大,年湿度波幅对围岩放湿量影响最大,年平均湿度对围岩吸湿量及吸放湿时长影响最大。

参考文献:

- [1] 罗婧,张炜,胡志平.浅析城市地下空间室内环境特点及设计思路:以西安赛格国际购物中心为例[J].地学前缘,2019,26(3):147-153.
- [2] 李魁山,高军,张旭.周期性边界条件下多层墙体内热湿耦合迁移[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(6):814-818.
- [3] 韦明,汪波,刘顺波.基于COMSOL软件的深埋地下工程围护结构热湿耦合传递模拟[J].科学技术与工程,2020,20(14):5729-5736.
- [4] 陈友明,鲍洋,董文强,等.热湿耦合迁移对长江流域建筑能耗模拟的影响[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):67-72.
- [5] 张华玲,刘朝,刘方,等.地下洞室多孔墙体热湿传递的数值模拟[J].暖通空调,2006,36(12):9-13,21.
- [6] 向楠.地下水电站围护结构表面吸放湿量的测定方法研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [7] Yingying Wang, Ying Fan, Dengjia Wang, et al. The effect of moisture transfer on the inner surface thermal performance and the thermal transmittance of the roof-wall corner building node in high-temperature and high-humidity areas[J]. Journal of Building Engineering, 2021,44.
- [8] 张华玲.水电站地下厂房热湿环境研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [9] Yingying Wang, Yu Tian, Zejiao Zhao, et al., Effect of moisture transfer on heat transfer through exterior corners of cooled buildings in hot and humid areas[J]. Journal of Building Engineering, 2021,43.
- [10] GB 50038-2005,人民防空地下室设计规范[S].北京:中国计划出版社,2005.
- [11] Xiangwei Liu, Youming Chen, Hua Ge, et al., Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China[J]. Energy and Buildings, 2015,93:259-268.
- [12] AWMvan Schijndel, S Goesten, HL Schellen. Simulating the complete HAMSTAD benchmark using a single model implemented in Comsol[J]. Energy Procedia, 2017,132:429-434.
- [13] 《地下建筑暖通空调设计手册》编写组.地下建筑暖通空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [14] 刘希臣.地下水电站热湿环境形成机理及节能调控策略[D].重庆:重庆大学,2014.
- [15] 续昊.西安市地下建筑的热湿环境现状研究[D].西安:西安工程大学,2016.