

水泥基材料热湿耦合传输性能

闵红光^{1,2}, 张伟平¹, 顾祥林¹

(1. 同济大学 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要: 通过大气环境下水泥基材料热湿耦合传输试验, 考察了温湿度梯度对湿传输、温湿度分布的影响。试验结果表明, 湿传输随着温湿度梯度的增大而加快, 且温度梯度比湿度梯度对湿传输的影响大; 温度梯度比湿度梯度对温度分布的影响大; 温湿度梯度对相对湿度分布的影响都比较大。因此, 在水泥基材料热湿耦合传输过程中, 水泥浆的湿传输比砂浆快, 且应考虑热传输对湿传输的影响, 但湿传输对热传输的影响可以忽略。计算结果表明, 热湿耦合传输模型对水泥基材料具有较好的适用性。

关键词: 水泥基材料; 热湿耦合; 传输性能; 耐久性

中图分类号: TU528.0

文献标志码: A

Transport Performances for Coupled Heat and Moisture in Cement-based Materials

MIN Hongguang^{1,2}, ZHANG Weiping¹, GU Xianglin¹

(1. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Central Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd., MCC Group, Shenzhen 518055, China)

Abstract: By adopting coupled heat and moisture tests in cement-based materials, this paper investigated the effects of temperature and humidity gradients on moisture transport and temperature and humidity distributions. The results reveal that temperature and humidity gradients accelerate moisture transport, and the effect of temperature gradient on moisture transport is more significant than humidity gradient. Moreover, the temperature gradient has a greater effect on temperature distributions than the humidity gradient, and the temperature and humidity gradients have a significant effect on relative humidity distributions. It is, therefore, concluded that during coupled heat and moisture

transport in cement-based materials, the moisture transport of cement paste is faster than that of mortar, and the effect of heat transfer should be considered on moisture transport, while the effect of moisture transport could be neglected on heat transfer. The calculated results show that the coupled heat and moisture transport model has a great applicability to cement-based materials

Keywords: cement-based materials; coupled heat and moisture; transport performances; durability

自然环境下的温湿度具有明显的时变性, 而混凝土结构内部的温湿度也总是随着环境温湿度的变化而不断变化^[1-2]。在温湿度变化环境中, 混凝土结构会受到温湿度应力的作用, 当混凝土承受的温湿度应力超过其抗拉强度时, 混凝土结构就会产生裂缝, 尤其是表面裂缝的产生与湿度变化密切相关。研究表明, 混凝土内部的温湿度场是影响混凝土碳化、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、冻融破坏、钢筋锈蚀等混凝土结构耐久性劣化的重要因素^[3-7]。

多孔介质内部的热湿传输通常是高度耦合的, 两者之间是不等价的并且是相互削弱的, 即热传输对湿传输的影响较大, 而湿传输对热传输的影响较小^[8]。在多孔介质的热湿耦合传输过程中, 水分以液态形式传输到多孔介质表面后汽化, 传输过程符合 Fick 定律^[9]。热湿耦合作用会导致多孔介质内部产生较高的温湿度梯度, 极易引起多孔介质的干燥缺陷。由于不同多孔介质(纤维板、木板、土、岩石、混凝土等)具有不同的吸湿性能, 在不同多孔介质界面之间的湿容量分布是不连续的^[10], 为了准确预测混凝土结构的热物性及耐久性, 有必要对不同水泥基材料(水泥浆和砂浆)的热湿耦合传输性能进行深入研究。

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U22B20125); 广东省重点领域研发计划(2019B111107002)

第一作者: 闵红光, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: minhongguang@163.com

通信作者: 张伟平, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构全寿命设计与维护。

E-mail: weiping_zh@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

论文对大气环境下水泥浆和砂浆的热湿耦合传输性能进行试验研究,考察温湿度梯度对湿传输、温湿度分布的影响;通过数值计算将水泥基材料热湿耦合传输模型的计算结果与试验结果进行对比分析。

1 试验研究

1.1 试件设计与制作

试验所用水泥为海螺牌 42.5 普通硅酸盐水泥(OPC),实测表观密度为 $3\,077\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;细骨料为 ISO 标准砂,实测表观密度为 $2\,620\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;拌合用水为去离子水。设计并浇筑尺寸为 $\varnothing 100\times 70$ (直径 \times 高度,单位 mm,下同)的 5 个水泥浆试件(CP-0-1~5)和 5 个砂浆试件(M-0-1~5),密度分别为 $1\,818$ 和 $2\,113\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,试件的配合比见表 1。依据 ASTM C642-13^[11],测得水泥浆和砂浆试件 28 d 龄期的孔隙率分别为 39.29% 和 26.02%。

选用 DB170-75 型温湿度传感器(图 1a),芯片

表 1 试件的配合比

Tab.1 Mix proportion of specimens

材料	类型	体积质量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		体积分数	
		水泥浆	砂浆	水泥浆	砂浆
水	去离子水	606	363	0.606	0.363
水泥	P·O 42.5	1 212	727	0.394	0.236
细骨料	ISO 标准砂	0	1 023	0	0.391

长 6.4 mm,宽 3.7 mm,厚 2.2 mm,其温度测量范围为 $-40\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度测量范围为 $0\sim 100\%$,精度为 $\pm 1.8\%$ 。为了防止水分渗入温湿度传感器导致其损坏,用防水透气布和防水万能胶将温湿度传感器包裹起来(图 1b)。分别在高度为 20、30、40、50 mm 截面的中心位置处布置一个温湿度传感器,采用 0.16 mm 的细线将防水透气布包裹的温湿度传感器固定在模板上(图 1c)。试件浇筑后,在温度为 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的环境中静置 48 h 后拆模,然后将试件放在标准养护室中养护至 28 d 后取出并进行试验研究。

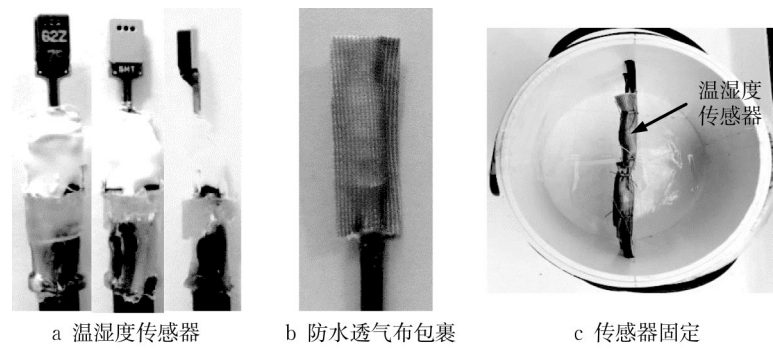


图 1 温湿度传感器及固定

Fig.1 Fixing of temperature and humidity sensors

1.2 热湿耦合传输试验

将水泥浆和砂浆试件的两端均切除 10 mm,切割后试件的尺寸均为 $\varnothing 100\times 50$,温湿度传感器均位于距离试件一侧暴露面 10、20、30、40 mm 处的截面中心位置(图 2)。试件切割后,置于温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 50.0% 的恒温恒湿箱中干燥 40 d,然后在温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 53.5% 的恒温恒湿箱中静置 20 d,以使试件中的温湿度达到平衡状态。干燥完成后,试件的侧面均用防水绝热材料进行包裹,留下两个直径为 100 mm 的切剖面暴露在环境中进行热湿耦合传输试验,从而确保在试件中实现一维热湿传输(图 3)。用分析纯盐晶体和去离子水制作饱和盐溶液,确保其中有 30% 的盐晶体未溶解,溶液体积不超过试验杯体积的一半,以便试验杯中有

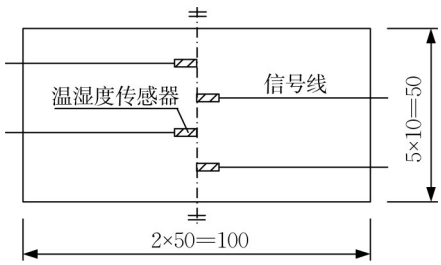


图 2 温湿度传感器布置(单位:mm)

Fig.2 Arrangement of temperature and humidity sensor (unit: mm)

足够的空间形成恒温恒湿环境。分析纯盐种类不同,饱和湿度不同^[12-13],不同温度时饱和盐溶液平衡相对湿度的实测值如图 4 所示。将试件放在试验杯上,并用环氧树脂进行密封(图 5a),在恒温水浴锅周

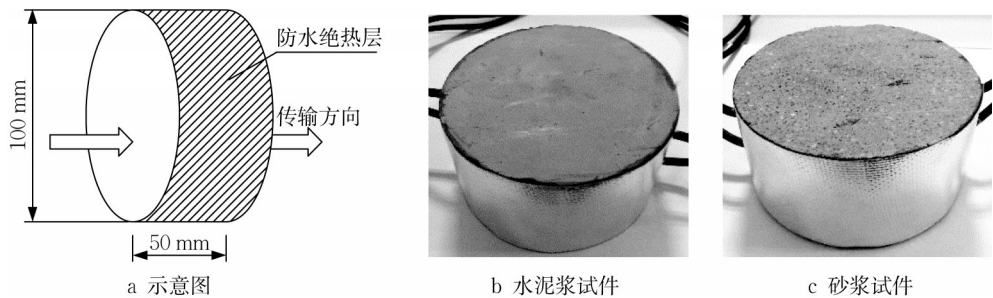


图3 试件密封

Fig.3 Sealing of specimen

围设置绝热层,然后将固定有试件的试验杯放在恒温水浴锅中,最后将它们放入恒温恒湿箱中(图 5b)。这样,可以根据试验研究需要,在试件上下表面分别设定恒定的温湿度条件。

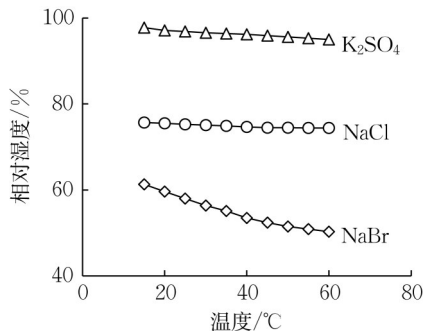


图4 饱和盐溶液平衡相对湿度的实测值

Fig.4 Measured value of equilibrium relative humidity of saturated salt solution

热湿耦合传输试验的试验条件以及不同饱和盐溶液在不同温度下对应的实测相对湿度 H_2 见表 2。试验条件 1、2、3 用于研究湿度梯度(相对湿度差 ΔH 分别为 0、21.2% 和 42.7%)对热传输的影响(温度差 ΔT 均为 20℃);试验条件 2、4、5 用于研究温度梯度(温度差 ΔT 分别为 0、20 和 35℃)对湿传输的影响(可近似认为相对湿度差相同, ΔH 约为 21.0%)。

在试验过程中,将恒温恒湿箱的温湿度分别设定为 20℃和 53.5%(试件顶面环境 T_1, H_1),并用温湿度传感器测量试件内部以及恒温恒湿箱的温湿度;将恒温水浴锅的温度分别设定为不同的值 T_2 (表 2),则在试验杯中就会形成不同的恒温恒湿环境(试件底面环境 T_2, H_2)。试验共进行 35 d,每 7 天对包含试件的试验杯进行称重,以确定试件的湿传输质量。

表2 热湿耦合传输试验条件

Tab.2 Test conditions for coupled heat and moisture transport

试验条件	溶液类型	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$\Delta H/\%$	$H_2/\%$
1	NaBr	20	40	0	53.5
2	NaCl	20	40	21.2	74.7
3	K ₂ SO ₄	20	40	42.7	96.2
4	NaCl	0	20	22.0	75.5
5	NaCl	35	55	20.9	74.4

2 试验结果及分析

2.1 湿传输质量和湿流密度

根据热湿耦合传输试验的实测数据,得到不同温湿度梯度时水泥基材料的湿传输质量和 35 d 的平均湿流密度,如图 6 和图 7 所示。当试验条件相同



图5 热湿耦合传输试验布置

Fig.5 Arrangement of coupled heat and moisture transport test

时,由于水泥浆的孔隙率比砂浆大(约1.5倍),导致水泥浆的湿传输比砂浆快(约1.1~2.3倍)。

由图6a、6b和6c和图7可知,当温度梯度恒定(ΔT 为20℃)时,湿度梯度越大,水泥浆和砂浆的湿传输越快;当 ΔH 从0增加到21.2%和42.7%时,水泥浆35 d的湿传输质量分别增加了8.9倍和12.0倍,而砂浆的湿传输质量则分别增加了12.0倍和19.2倍。由图6b、6d和6e及图7可知,当湿度梯度恒定(ΔH 约为21.0%)时,温度梯度越大,水泥浆和砂浆的湿传输也越快;当 ΔT 从0增加到20℃和35℃时,水泥浆35 d的湿传输质量分别增加了74.2倍和129.1倍,而砂浆的湿传输质量则分别增加了73.4倍和128.8倍。因此,温度梯度比湿度梯度对湿传输的影响大。

由热湿耦合传输模型^[14]和试验结果可知,当水泥基材料两侧温度不同(湿度相同)时,两侧会存在温度梯度,在热传输相同方向上会存在湿传输,导致水泥基材料在温度较低一侧的湿度不断增加,最终在水泥基材料两侧产生了湿度梯度,由于湿度梯度的存在,湿传输会在热传输相反方向上产生。当水泥基材料两侧湿度不同(温度相同)时,两侧会存在湿度梯度,在湿传输相同方向上会存在热传输,导致水泥基材料在湿度较低一侧的温度不断增加,最终在水泥基材料两侧产生了温度梯度,由于温度梯度的存在,在湿传输相反方向上也会存在热传输。因此,热湿传输在水泥基材料中并不是独立存在的,而是互相影响、此消彼长的耦合传输过程。

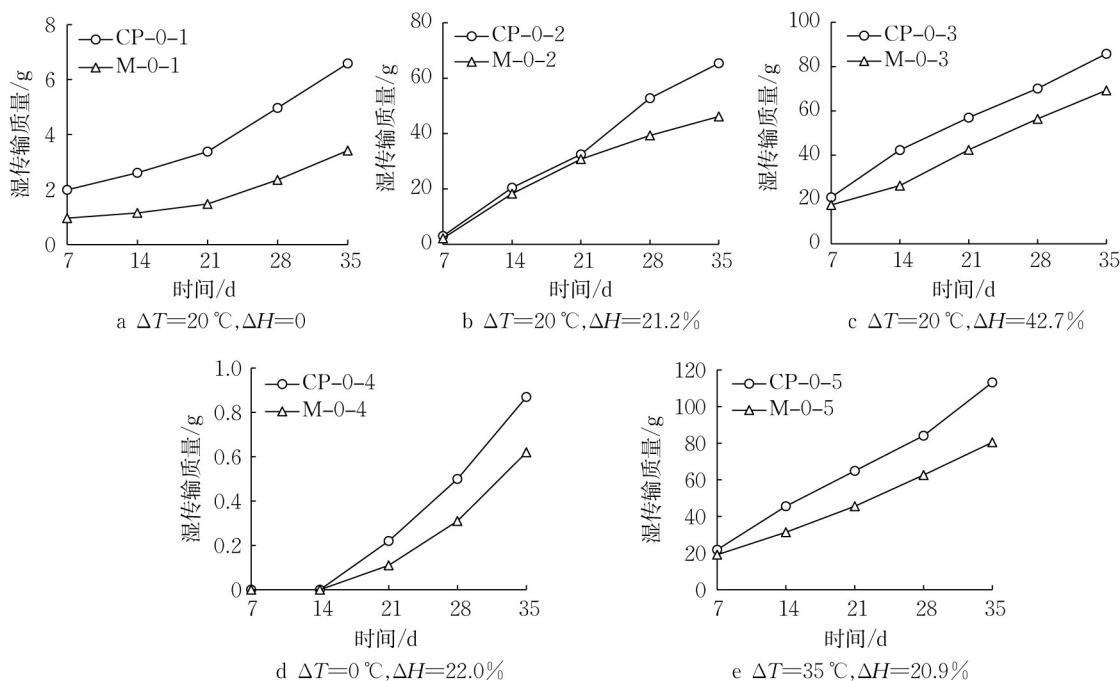


图6 水泥基材料的湿传输质量

Fig.6 Moisture transport mass in cement-based materials

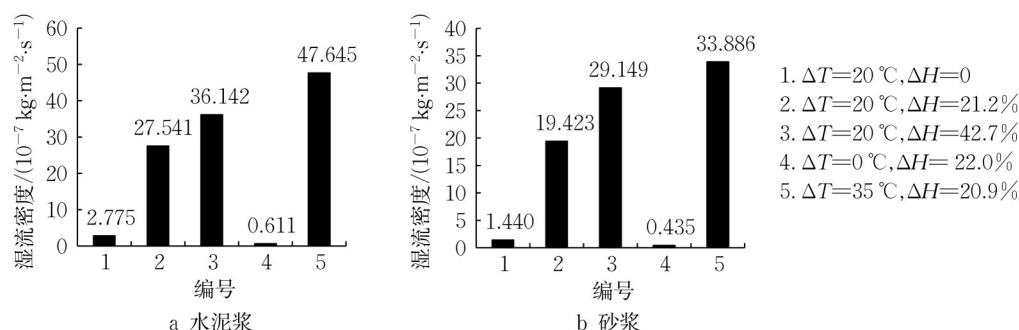


图7 水泥基材料的湿流密度

Fig.7 Moisture flux in cement-based materials

2.2 温湿度分布

根据热湿耦合传输试验的实测数据,得到不同温湿度梯度时水泥基材料的温湿度分布(温湿度稳定时),如图8和图9所示,图中横坐标 x 表示距离试件顶面的深度。

由图8a、8b和8c可知,当温度梯度恒定(ΔT 为20℃)时,随湿度梯度的增加,相同深度处的温度基本没有变化;当 ΔH 从0增加到21.2%和42.7%时,水泥浆的温度增量变化范围在-1.6%~0.3%之间,而砂浆的温度增量变化范围在-2.1%~2.5%之间。由图8b、8d和8e可知,当湿度梯度恒定(ΔH 约为21.0%)时,随着温度梯度的增加,相同深度处的温度明显增加;当 ΔT 从0增加到20℃和35℃时,水泥浆和砂浆的温度增量变化范围在25%~60%之

间。因此,温度梯度比湿度梯度对温度分布的影响大。

由图9a、9b和9c可知,当温度梯度恒定(ΔT 为20℃)时,随湿度梯度的增加,相对湿度较大一侧(40 mm处)的相对湿度增加并逐渐趋于稳定;当 ΔH 从0增加到21.2%和42.7%时,水泥浆的相对湿度增量约为20%,而砂浆的相对湿度增量约为10%。由图9b、9d和9e可知,当湿度梯度恒定(ΔH 约为21.0%)时,随温度梯度的增加,相对湿度较大一侧(40 mm处)的相对湿度也明显增加;当 ΔT 从0增加到20℃和35℃时,水泥浆的相对湿度增量约为25%,而砂浆的相对湿度增量约为15%。因此,温湿度梯度对相对湿度分布的影响都比较大。

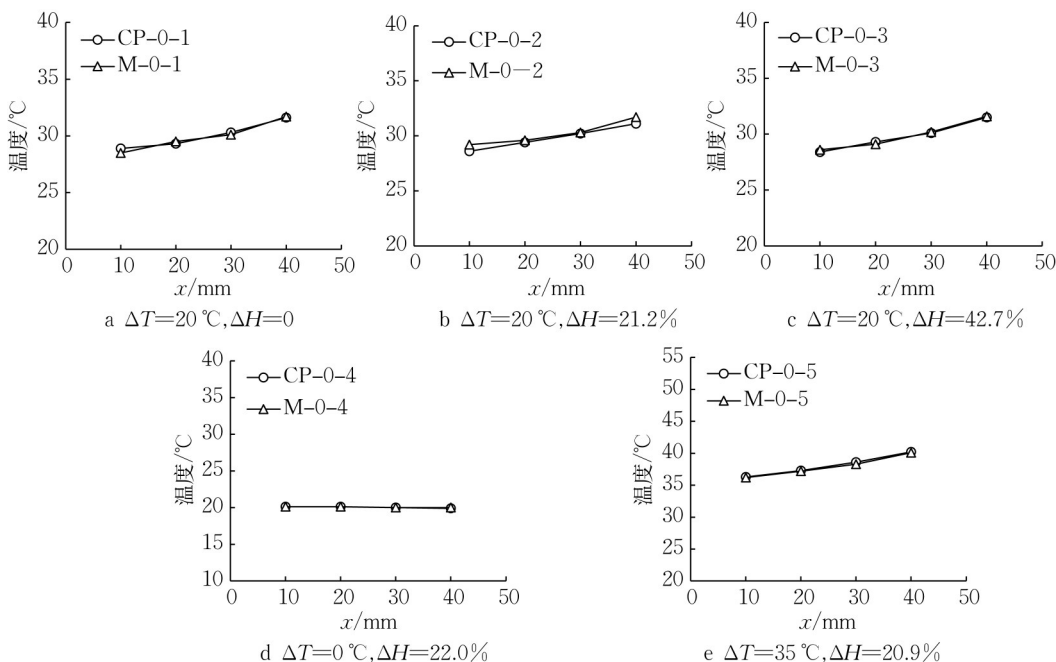


图8 水泥基材料的温度分布

Fig.8 Temperature distributions in cement-based materials

根据 Kelvin 方程、理想气体状态方程以及标准大气压下饱和水蒸气分压力与温度之间的关系^[15],由式(1)可得到不同温湿度梯度时水泥基材料的绝对湿度分布,如图10所示,与相对湿度分布(图9)相比,绝对湿度分布考虑了温度差异的影响。

$$\begin{cases} H_A = \frac{M_w p_s}{RT} H_R \\ p_s = 611e^{\frac{17.08(T-273.15)}{234.18+(T-273.15)}}, T \geq 273.15 \text{ K} \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_A 为绝对湿度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H_R 为相对湿度, %; M_w 为水的摩尔质量, $0.018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; p_s 为饱和水蒸气分压力, Pa; R 为气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T

为温度, K。

3 数值计算

基于水泥基材料的特性,提出以下基本假定:将水泥基材料看作多孔介质,且在宏观上是连续、均匀和各向同性;水泥基材料热湿耦合传输性能的主要影响因素是水蒸气和液态水,将水蒸气看作理想气体。

基于 Luikov 模型^[16],可得水泥基材料的热湿耦合传输模型为^[14]

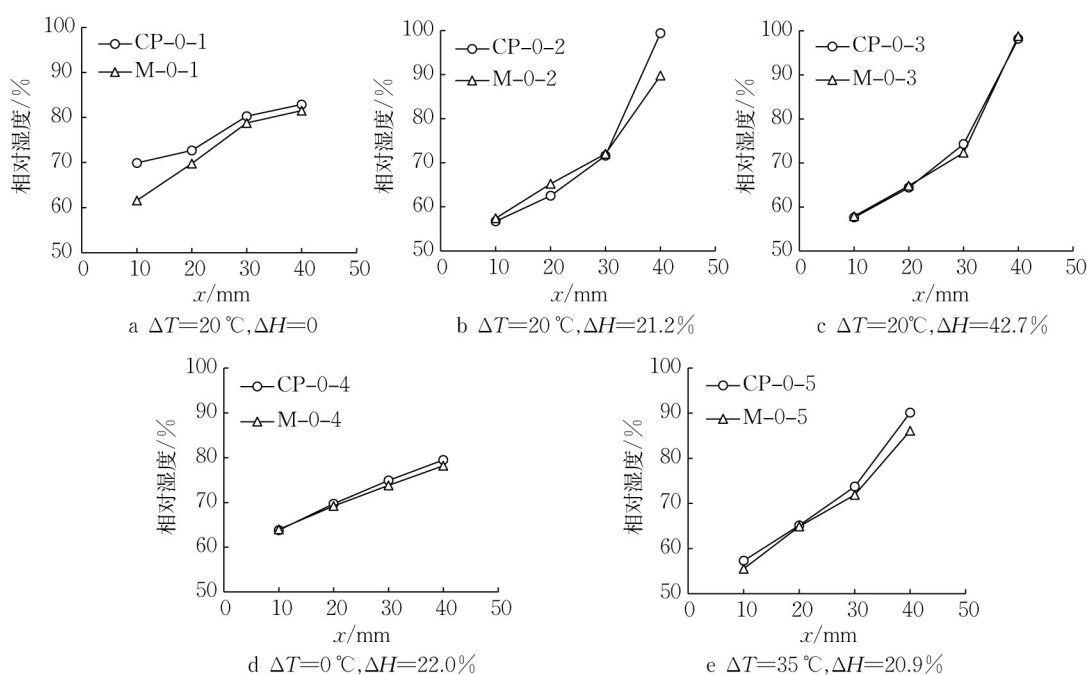


图9 水泥基材料的相对湿度分布

Fig.9 Relative humidity distributions in cement-based materials

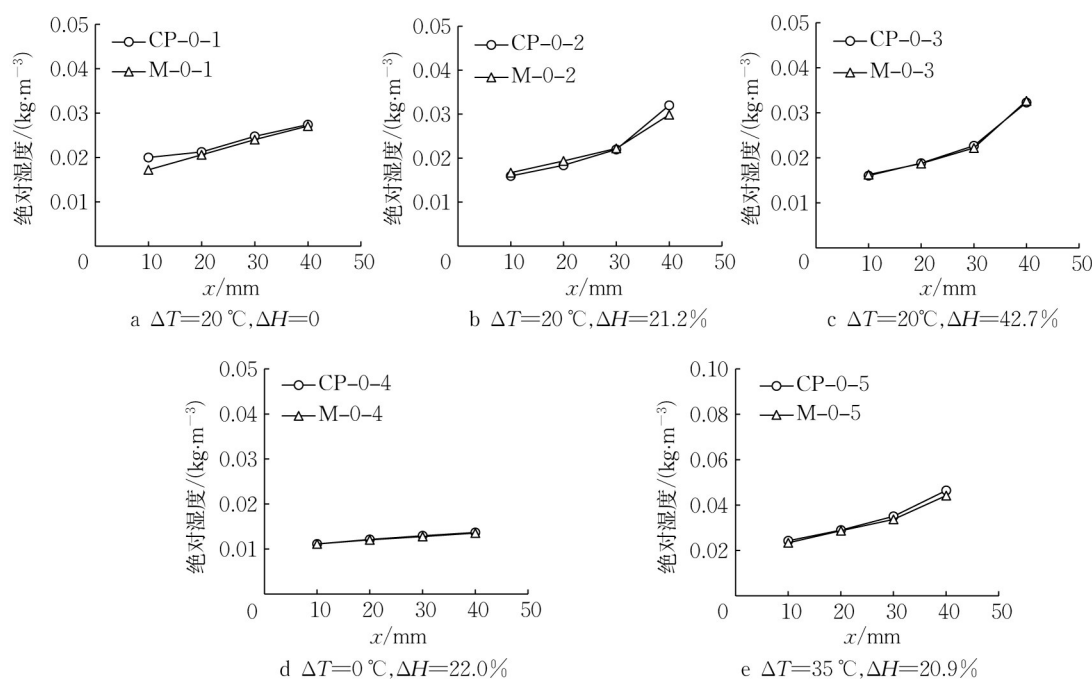


图10 水泥基材料的绝对湿度分布

Fig.10 Absolute humidity distributions in cement-based materials

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho c_m \kappa h_v \frac{\partial H_R}{\partial t} \\ \rho c_m \frac{\partial H_R}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 H_R}{\partial x^2} + D_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为温度, K; H_R 为相对湿度, %; t 为时间, s; x 为距水泥基材料表面的距离, m; λ 为水泥基材料的

导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; D_m 为水泥基材料的湿传输系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; κ 为水的相变系数; h_v 为水的汽化潜热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; ρ 为水泥基材料的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; c_p 为水泥基材料的比定压热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; c_m 为水泥基材料的比湿容, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; δ 为水泥基材料的热梯度系数, K^{-1} 。

对式(2)进行数值计算,各参数取值如下:导热系数 λ 由导热系数细观模型^[17]计算,得到水泥浆和砂浆的导热系数分别为0.692和1.350 W·m⁻¹·K⁻¹;湿传输系数 D_m 由 $\frac{1}{D_m} = -\frac{1}{J_i} \frac{\partial H_{Ri}}{\partial x}$ 计算^[18], J_i 为等温情况下的湿流密度(kg·m⁻²·s⁻¹),得到水泥浆和砂浆的湿传输系数分别为 2.007×10^{-7} 和 1.868×10^{-7} kg·m⁻¹·s⁻¹;水的汽化潜热 h_v 由 $h_v = [2501 - 2.289(T - 273.15) - 1.448 \times 10^{-3}(T - 273.15)^2] \times 10^3$ ^[19] 计算;热梯度系数 δ 由 $\delta = \frac{1}{\partial T / \partial x} \left(\frac{J_n}{J_i} \frac{\partial H_{Ri}}{\partial x} - \frac{\partial H_{Rn}}{\partial x} \right)$ 计

算^[18], J_i 为等温情况下的湿流密度(kg·m⁻²·s⁻¹), J_n 为非等温情况下的湿流密度(kg·m⁻²·s⁻¹),得到水泥浆和砂浆的热梯度系数分别为2.677和2.443 K⁻¹;水的相变系数 κ 取0.1;水泥浆和砂浆的密度分别为1 818和2 113 kg·m⁻³;水泥浆和砂浆的比定压热容分别为1 743和1 257 J·kg⁻¹·K⁻¹^[20];比湿容 c_m 取0.1 kg·kg⁻¹。

图11和图12分别给出了水泥基材料在温度差为20℃、相对湿度差为21.2%的环境下温度和绝对湿度计算值与实测值的对比(温湿度稳定时),两者之间吻合得较好,表明热湿耦合传输模型能够较好地模拟水泥基材料中的热湿耦合传输。

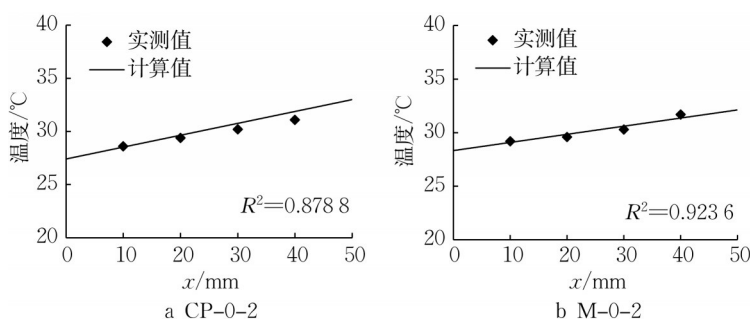


图11 水泥基材料的温度计算值和实测值对比

Fig.11 Comparison of calculated and measured temperature of cement-based materials

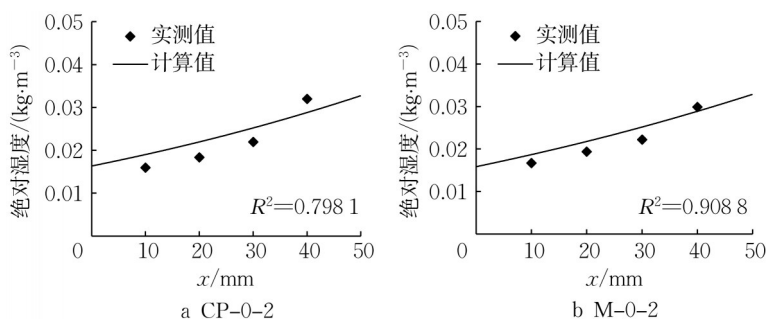


图12 水泥基材料的绝对湿度计算值和实测值对比

Fig.12 Comparison of calculated and measured absolute humidity of cement-based materials

4 结论

随着温湿度梯度的增加,水泥基材料中的湿传输加快,且温度梯度对湿传输的影响比湿度梯度的影响大;温度梯度对温度分布的影响较大,而湿度梯度对温度分布的影响较小;温湿度梯度对相对湿度分布的影响都较大。

在水泥基材料热湿耦合传输过程中,水泥浆的湿传输比砂浆快(约1.1~2.3倍,配合比不同,结果

可能不同),且应考虑热传输对湿传输的影响,但湿传输对热传输的影响可以忽略。

水泥基材料热湿耦合传输模型可以较好地预测水泥基材料中的热湿耦合传输,为混凝土的碳化、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀以及钢筋锈蚀的预测提供依据。

作者贡献声明:

闵红光:试验设计,数据分析,论文写作与修改。

张伟平:项目构思,论文修改。

顾祥林:提出论文修改建议。

参考文献:

- [1] LIU P, YU Z W, GUO F Q, *et al.* Temperature response in concrete under natural environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98(11): 713.
- [2] LIU P, SONG L, YU Z W. Quantitative moisture model of interior concrete in structures exposed to natural weather [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102(1): 76.
- [3] 李康宗. 混凝土中热湿耦合传输试验及数值模拟研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- LI Kangzong. Study on thermal and wet coupling transmission test and numerical simulation in concrete [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.
- [4] JIANG C, FANG J, CHEN J Y, *et al.* Modeling the instantaneous phase composition of cement pastes under elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 130: 105987.
- [5] GU X L, DONG Z, YUAN Q, *et al.* Corrosion of stirrups under different relative humidity conditions in concrete exposed to chloride environment [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(1): 4019329.
- [6] MIN H G, ZHANG W P, GU X L. Effects of load damage on moisture transport and relative humidity response in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169(4): 59.
- [7] ZHANG W P, MIN H G, GU X L. Temperature response and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123(10): 290.
- [8] HU S T, LI X Q, LIU G D, *et al.* Cross-effect of heat and mass transfer of Luikov equation: measurement and analysis [J]. *Drying Technology*, 1999, 17(9): 1859.
- [9] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous material under temperature gradients [J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1957, 38(2): 222.
- [10] QIN M H, BELARBI R, AÏT-MOKHTAR A, *et al.* Coupled heat and moisture transfer in multi-layer building materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 967.
- [11] ASTM Committee C09. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete: ASTM C642-13 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [12] WEXLER A, HASEGAWA S. Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0° to 50° C [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1954, 53(1): 19.
- [13] GREENSPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards A (Physics and Chemistry)*, 1977, 81A(1): 89.
- [14] LUIKOV A B, MIKHAILOV Y A. Theory of energy and mass transfer [M]. Oxford: Pergamon Press, 1965.
- [15] KÜNZEL H M. Simultaneous heat and moisture transport in building components: one-and two-dimensional calculation using simple parameters [R]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 1995.
- [16] LUIKOV A B. Heat and mass transfer in capillary porous bodies [M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [17] ZHANG W P, MIN H G, GU X L, *et al.* Mesoscale model for thermal conductivity of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98(11): 8.
- [18] MIN H G, ZHANG W P, GU X L, *et al.* Coupled heat and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 143(7): 607.
- [19] 陈卓, 周萍, 梅炽. 传递过程原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- CHEN Zhuo, ZHOU Ping, MEI Chi. Principle of transport processes [M]. Changsha: Central South University Press, 2011.
- [20] 中华人民共和国国家能源局. 水工混凝土结构设计规范: DL/T 5057—2009 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- National Energy Administration of the People's Republic of China. Design specification for hydraulic concrete structures: DL/T 5057—2009 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.