

湿热气候条件下砌体结构材料热湿物性 参数对热工计算的影响

罗戴维^{1,2}, 刘加平³

(1. 苏州科技大学 建筑与城规学院, 江苏 苏州 215009; 2. 江苏省建筑碳中和技术工程研究中心, 江苏 苏州 215009;
3. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对湿热气候地区高湿度对砌体结构隔热的不利影响, 利用计算机软件模拟四种不同砌体结构材料热湿物性参数: 导热系数、蒸汽渗透系数和液态水扩散系数在动态热湿环境下的变化, 从而分析热湿物性参数变化对建筑围护结构热工计算的影响程度。结果表明: 在湿热气候条件下, 湿传递对热工计算结果的影响较大, 传热量最多增加 30%; 导热系数变化对传热量影响的幅度在 5%~10%; 蒸汽渗透系数变化对传热量影响在 3% 以下; 液态水渗透系数受室外计算条件影响, 非雨天时, 其值变化对传热量计算不大, 雨天时, 其值变化对传热量影响在 30% 以上。因此, 在湿热气候条件下, 进行砌体结构围护结构的热工计算时, 导热系数应视为材料含湿量的函数计算, 蒸汽渗透系数可按常数计算, 液态水扩散系数需要考虑雨天和非雨天分别进行计算。

关键词: 湿热气候; 砌体结构; 导热系数; 蒸汽渗透系数; 液态水渗透系数; 热工计算

中图分类号: TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0930-10

The influence of thermal and moisture property parameters of masonry structure materials on thermal calculation in hot and humid climate

LUO Daiwei^{1,2}, LIU Jiaoping³

(1. School of Architecture and Regional Planning, Suzhou University of Science and Technology, Jiangsu Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Construction Carbon Neutral Technology, Jiangsu Suzhou 215009, China; 3. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the adverse effect of high humidity on the thermal insulation of the masonry structure in hot and humid climates, this paper uses the computer software to simulate the thermal and moisture physical parameters of four different masonry structural materials: thermal conductivity, coefficient of vapor permeability and liquid diffusivity under dynamic thermal and humid environment changes. Thereby to analyze the influence degree of the change of thermal and moisture physical property parameters on the thermal calculation of the building envelope. The results show that in hot and humid climate conditions, moisture transfer has a greater impact on the thermal calculation results, which will increase the heat transfer by up to 30%. The influence of thermal conductivity change on heat transfer is 5%~10%. The change of vapor permeability coefficient has less than 3% influence on heat transfer. The liquid water permeability coefficient is affected by the outdoor calculation conditions. In non-rainy days, its value change has little effect on the calculation of heat transfer. In rainy days, its value change affects the heat transfer by more than 30%. Therefore, under hot and humid climate conditions, when performing thermal calculations of masonry structure, the thermal conductivity should be calculated as a function of moisture content, and the coefficient of vapor permeability can be calculated as constants. And the liquid water diffusion coefficient needs to be calculated separately considering rainy days and non-rainy days.

Key words: hot and humid climate; masonry structure; thermal conductivity; coefficient of vapor permeability; water vapor permeability; thermal calculation

收稿日期: 2022-05-09

修改稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51590913); 国家青年科学基金项目(51908393)

第一作者: 罗戴维(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事绿色建筑, 建筑热工, 低碳建筑等方向的研究。E-mail: 441322693@qq.com

湿热气候地区气候常年气温高、湿度高、雨量大,然而工程上进行热工计算时往往仅计算纯热状态下,此时材料热物性材料都是定参数。然而高温高湿环境下,大量的湿传递必然会导致建筑材料热物性参数的发生变化,从而导致按照定物性参数分析将无法准确地进行热工计算。

目前,针对建筑围护结构的热湿耦合模型的研究非常多,文献[1-2]使用了水蒸汽压力为湿驱动势的热湿耦合传递模型。文献[3-7]使用相对湿度为湿驱动势的热湿耦合传递模型。这些文章针对不同模型对建筑围护结构传热传质进行了计算分析。然而利用热湿耦合模型进行热工计算时,则不能忽视建筑材料热湿物性参数的取值。目前,国内规范中物性参数采用的是定值,并没有这些物性参数随着湿度变化的数值,且欠缺液态水传递系数的值,现在研究大多采用国外的实验数值。

近年来,研究者们对于建筑材料热湿物性参数对热工计算影响的研究可以大致地分为以下两个方面。一种是通过实验来测量建筑材料的热湿物性参数,从而分析其对热工计算的影响。文献[8]改进了部分浸渍法用于测量液态水传递系数。文献[9]研究了多种建筑材料的静态等温吸湿特性。文献[10]缩短了水蒸气扩散系数的测试时间,提出基于求解瞬态一维质扩散反问题的瞬态测试方法。文献[11]分析了不同板材水蒸气渗透系数在不同湿度条件下的变化规律。文献[12]发现温度、水分含量和体积密度是显著影响绝热材料导热系数的主要因素。其他因素,如厚度、气流速度、压力、老化也会影响热性能。通过实验方法^[8-12]虽然可以准确测量单一建筑材料的热湿物性参数,分析不同因素对建筑材料物性参数的影响,但是目前还无法覆盖所有建筑材料。

另一种常见的分析方法是模拟计算来评价热湿物性参数对建筑围护结构的影响。文献[13]分析了不同含湿量对保温层的导热系数的影响大概在3%,聚苯乙烯泡沫导热系数在不同湿度下的变化不可忽视;文献[14]分析了室外气候对蒸压加气混凝土含湿量的影响,发现慕尼黑的气候变化与稳态计算相比会带来31.6%传热量变化;文献[15]虽然分析了多因素敏感性研究,且考虑了各因素之间的交互作用,但结论将导热系数视为常数处理显然与常识不同,也与他人^[13]的研究结论相反。

为了准确地计算湿热气候条件下的建筑热工性能,本文针对湿热气候地区的气候条件,利用模拟计算的方法对四种不同砌体结构进行了对比

分析,通过比较热湿耦合计算与纯热计算传热量的不同,得出湿热气候条件下砌体结构材料热湿物性参数变化对热工计算的影响程度,确定砌体结构材料热湿物性参数分别是按常数还是变数计算,从而明确湿热气候条件下砌体结构的简化热工计算方法,进而考虑是否需要通过实验来进一步扩展规范的物性参数取值范围,为准确计算湿热气候区建筑传热量提供了理论依据。

1 湿热气候地区围护结构热工计算的理论基础

1.1 围护结构热湿耦合传递模型

本文模拟采用的围护结构热湿耦合传递模型选自文献[13-17],并使用COMSOL软件求解模型,该模型及计算软件经过文献[13-14]和[21-22]的验证分析具有较高的可信度,具体的热湿耦合控制方程如下。

$$\frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial P_c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(-\delta_v P_{sat} \frac{\varphi}{\rho_w R_v T} - \delta_l \right) \frac{\partial P_c}{\partial x} + \left(\delta_v \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$c \rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda^* + r_{12} \delta_v \varphi \frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - r_{12} \delta_v P_{sat} \frac{\varphi}{\rho_w R_v T} \frac{\partial P_c}{\partial x} \right] \quad (2)$$

式中: c 为湿物体的比热, $J/(kg \cdot K)$, $c = c_0 + c_2 u_2$; c_0 为材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; c_2 为水的比热容, $J/(kg \cdot K)$; u_2 为液体的比含湿量, kg/kg ; $u_2 = w/\rho_0$; ρ_0 为材料的密度, kg/m^3 ; w 为墙体材料的含湿量, kg/m^3 ; δ_v 为材料的水蒸气渗透系数, $kg/(m \cdot Pa \cdot s)$; P_v 为水蒸气分压力, Pa ; φ 为相对湿度; T 为空气温度, K ; t 为时间, s ; P_{sat} 为饱和水蒸气压力, Pa ; δ_l 为液态水渗透系数, $kg/(m \cdot Pa \cdot s)$; P_c 为毛细压力 (capillary pressure), Pa ; r_{12} 为蒸发潜热, J/kg ; λ^* 为物体的有效导热系数, $W/(m \cdot K)$, 它表示了通过毛细多孔体中水分和物体本身导热方式的热迁移; R_v 为水蒸气气体常数, $R_v = 462 J/(kg \cdot K)$; ρ_w 为水密度, 值为 $1\,000 kg/m^3$ 。

值得注意的是,目前液态水的计算参数有两种,分别是不同的驱动势产生的。

毛细压力为驱动力的模型,可由达西公式得

$$j_2 = \delta_l \frac{\partial P_c}{\partial x} \quad (3)$$

式中: δ_l 为液态水渗透系数^[21], $kg/(m \cdot Pa \cdot s)$; P_c 为毛细吸附压, Pa ; j_2 为液体迁移量, $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

含湿量为驱动模型,有

$$j_2 = -D_l \rho_0 \frac{\partial U}{\partial x} \quad (4)$$

式中: D_l 为液态水扩散系数^[22], m^2/s ; U 为材料含湿量, kg/kg .

在不考虑重力的情况下两个系数可以相互转换,因此,有

$$D_l = -\frac{\delta_l}{\rho_0} \frac{\partial P_c}{\partial U} \quad (5)$$

式中: 参数含义同前.

1.2 室外气象参数和建筑材料热湿物性参数

近年来,研究者们对室外气象参数变化对建筑材料热湿物性参数的影响分析有很多,文献[23]测试了 8 种建筑材料的随温湿度变化的导热系数,测得结果表明温度对材料导热系数影响较小,增长率从 3.9% 到 22.7%,而相对湿度对材料导热系数影响较大,在 8.2% 到 186.7% 之间;文献[24]采用实验方法对 EPS、XPS、PU 等保温材料的水蒸气渗透系数进行分析发现,水蒸气渗透系数在相对湿度 0%~60% 区间变化比较缓慢,高于 60% 发生突变,随相对湿度增加呈指数形式增加.研究表明室外气象参数仅在高温高湿的条件下才对建筑材料热湿物性参数带来较大影响.本文分析目标为了简化湿热气候条件下的热工计算方法,因此为了排除室外气象参数变化对热工计算的影响,本文选用一天典型的湿热气候数据进行模拟分析.同时为了排除初始条件对热工计算的影响,模拟时长为 30 d.

室外气象参数选自 IWECC (International Weather for Energy Calculations)^[25],该气象数据源自 ASHRAE Research Project 1015. 温度波动范围: 24~33 ℃,湿度波动范围: 59%~94%,详细见图 1,属于典型的湿热气候.

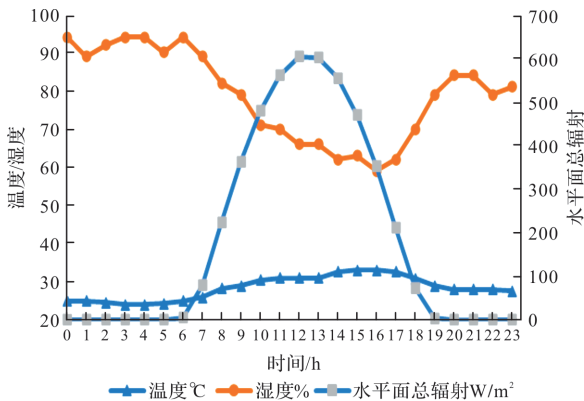


图 1 室外气象参数

Fig. 1 Outdoor meteorological parameters

由于湿热气候条件下,建筑室内一般处于空调工况,所以室内计算参数则保持温度恒定在 26 ℃,相对湿度 60% 的条件下进行.墙体构造选用墙体承重体系中常见的围护结构构造为例: 240 mm 厚砌体墙+8 mm 饰面材料.材料特性选择了四种不同材料,分别采用 HAMSTAD; Benchmark 4^[26]、HAMSTAD; Benchmark 5^[26] 和 IEA Annex 24 Final Report^[27] 中的两种.其中 HAMSTAD 材料物性参数的详细数据参见文献,IEA Annex 24 Final Report 的第一种数据参见文献[28],IEA Annex 24 Final Report 第二种材料物性参数和第一种差异在于材料特性的不同,下面用 A1 和 A2 指代,墙体 A2 详细数据如下表 1:

表 1 墙体 A2 的物性参数

Tab. 1 Physical parameters of wall A2

物性参数	砌体	饰面材料
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 800	1 600
比热容/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	920	840
导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$1.0+0.0058w$	$0.53+0.0031w$
a	16.25	283
b	0.521 6	0.029
c	0.504 6	1.39
d	3.992E-12	1.216E-11
e	3.558E-1	1.011
f	3.047E-8	2.7E-9
g	0.021 71	0.020 4

注: 含湿量 $w=a(1-\ln\varphi/b)^{-1/c}$, kg/m^3 ; 水蒸气渗透系数 $\delta_p=d\exp(e*\varphi)$, s; 液态水扩散系数 $D_l=f\exp(g*w)$, m^2/s . 该文献选用液态水扩散系数,注意转化.

1.3 研究分析工具

由于湿热气候地区复杂多变的气候特征,为了准确分析各个热湿物性参数对围护结构传热传质的影响,本文利用相对误差和方差分析对围护结构热湿耦合模型中热湿物性参数进行分析.

其中相对误差用于直接展示所分析的热湿物性参数和标准值的差异,确切地表示了偏离真值的实际大小.方差分析则通过分析研究不同来源的变异对总变异的贡献大小,从而确定可控因素热湿物性参数对研究结果影响力的大小,广泛应用于生物、化工、建筑等各个领域之中,可有效分析检验因素对实验结果影响的显著性^[29].方差分析中的参数分别为: SS(平方和), df(自由度), MS(均方), F 和 F_{crit} (F 值和 F 临界值), P -value (F 分布的概率).在进行差异显著性判断时,根据 F 值和 P 值进行.方差分析中行的差异源是时间变化所造成的,而列的差异源是由本文所研究

的热湿物性参数的变化所造成的, 模拟步长为 10 min, 总共 30 d 的数据来分析热湿物性参数的变化所带来的影响, 因此方差分析中需要注意列差异源所带来的影响, 显著性水平取 0.05, 后面文章就不再赘叙.

2 湿热气候地区湿传递对墙体传热传质的影响

湿热气候地区气候条件特殊, 常年高温多雨, 相对湿度经常在 80% 以上, 湿传递量远远大于其他气候区. 为了研究极端热湿地区湿传递对围护结构传热的影响, 探讨传统热工计算与热湿耦合计算传热的差异, 本文选用前文所述构造及气候条件来计算考虑热湿耦合传递条件下的围护结构传热量, 以及不考虑湿传递的围护结构传热量, 并将传热量的结果进行相对误差分析和方差分析. 不考虑湿传递的传热模型如式(6).

$$c\rho_0\frac{\partial T}{\partial t}=div(\lambda^*\nabla T)$$
 (6)

分析结果如图 2.

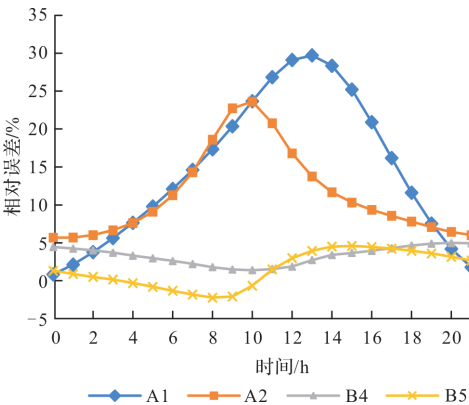


图 2 热湿耦合传递与纯热传递计算传热量的相对误差

Fig. 2 The relative error of the heat-moisture coupled transfer and pure heat transfer calculation

将热湿耦合传递与纯热传递计算传热量进行方差分析, 显著性水平取 0.05, 方差分析结果如表 2 所示.

表 2 热湿耦合传递与纯热传递计算传热量的方差分析
Tab. 2 Variance analysis of heat-moisture coupled transfer and pure heat transfer calculation

材料	F	P-value	F crit
A1	53.512	1.92E-07	4.279 344
A2	406.197 4	4.09E-16	4.279 344
B4	75.316 36	1.03E-08	4.279 344
B5	16.459 89	0.000 488	4.279 344

从上述的研究可以看出不同材料在相同环境下传热传湿有明显不同, 其主要原因在于材料的

含湿量不同, 本文选用四种材料在模拟环境下的平均含湿量如表 3 所示.

表 3 不同材料含湿量
Tab. 3 Moisture content of different materials

材料	砌体平均含湿量 /(kg·m ⁻³)	饰面材料平均含湿量 /(kg·m ⁻³)
A1	17.44	50.56
A2	5.76	43.98
B4	0.72	60.47
B5	3.536	2.919

通过对四种不同材料的墙体来模拟室内向墙体传递的传热量, 对结果进行对比分析. 结果表明当忽略湿传递对传热的影响时, 四种不同材料造成的最大误差分别为 30%、25%、6%、5%, 误差值较大不能忽略, 其中, B4、B5 误差较小的原因在于 B4 砌体材料不吸水, B5 饰面材料不吸水; 对结果的方差分析可以发现, 忽略湿传递对传热量计算结果造成的影响时极显著的. 所以, 在湿热气候地区进行传热计算时, 必须考虑湿传递对传热量的影响, 利用热湿耦合模型进行传热计算.

此外, 为了缓解极端热湿地区室外高湿度对室内热湿环境的影响, 提高围护结构材料的隔湿性能是十分有效的方式. 然而根据对比四种材料可以发现, 提高外墙主体材料或饰面材料的隔湿性能对吸湿能力的影响相当. 因此, 相比于提高外墙主体材料的隔湿性能和饰面材料的隔湿性能将是一个比较经济的做法.

3 湿热气候地区导热系数变化对墙体传热传质的影响

在民用建筑热工设计规范中, 材料导热系数是一个定值, 这个在相对湿度不高时, 结果是可信的. 然而湿热气候地区室外相对湿度长期在 80% 以上, 而材料导热系数会随着湿度的增大而提高, 因此, 导热系数在不断剧烈变化的条件下对围护结构传热传质的影响是个值得研究的问题.

首先对砌体结构 A2 导热系数按变物性计算时, 墙体内外表面温度、材料含湿量和内表面传热量变化如图 3、图 4、图 5 所示.

此时, 砌体结构 A2 导热系数按变物性取值时, 材料含湿量从 0% 到 99% 时, 导热系数的变化范围: 砖: 100% ~ 106.72%; 抹灰: 100% ~ 233.6%. 可以看出在模拟条件下, 抹灰由于易于吸湿的关系出现了返潮, 而砖体浮动不大, 符合湿热气候地区高湿情况的特征, 尤其和长三角地

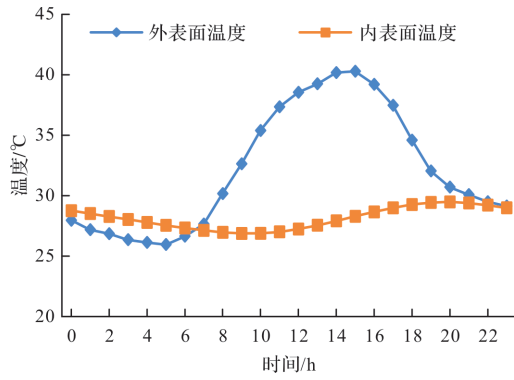


图 3 砌体结构 A2 内外表面温度(导热系数为变量)

Fig. 3 Masonry structure A2 surface temperature (thermal conductivity is a variable)

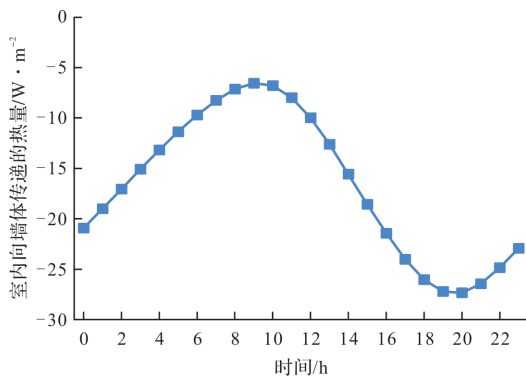


图 4 砌体结构 A2 内表面传热量(导热系数为变量)

Fig. 4 Heat transfer on inner surface of masonry structure A2 (thermal conductivity is variable)

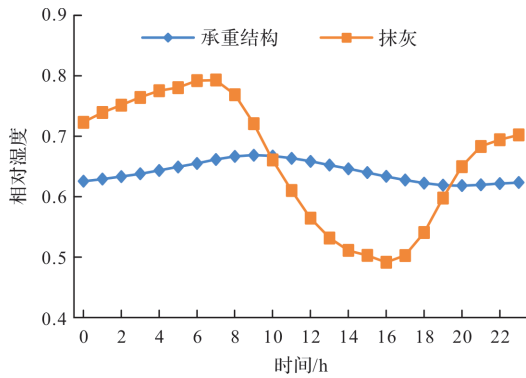


图 5 砌体结构 A2 材料湿度变化

Fig. 5 Humidity change of masonry structure A2

区梅雨季节的特征较为吻合,砌体结构 A2 可以反映出湿热气候地区的墙体传热传质情况。

接着,将导热系数分别按定值和变值计算,计算出四种砌体结构内表面传热量的相对误差(以变物性取值的结果为标准)如图 6 所示。

方差分析(表 4):

将导热系数为定值计算出的传热量结果与上述结果进行方差分析,显著性水平取 0.05,方差分析结果如下。

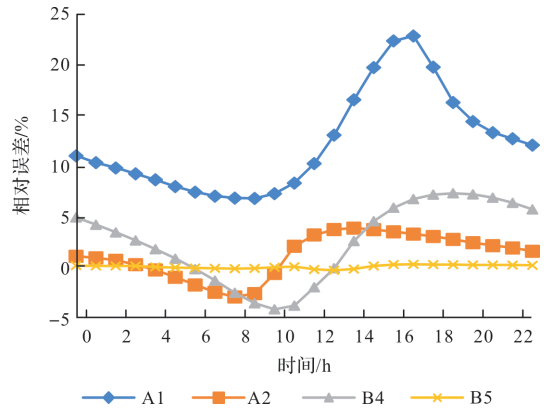


图 6 内表面传热量相对误差

Fig. 6 Relative error of heat transfer on inner surface

表 4 内表面传热量方差分析

Tab. 4 Variance analysis of heat transfer on internal surface

材料	<i>F</i>	<i>P</i> -value	<i>F</i> crit
A1	332.687 7	3.57E-15	4.279 344
A2	16.142 37	0.000 538	4.279 344
B4	15.210 82	0.000 721	4.279 344
B5	8.870 802	0.006 723	4.279 344

为了对比误差来源,现在分析四种砌体结构材料含湿量从 0 到 99% 时,导热系数的增量如表 5。

表 5 材料导热系数变化表

Tab. 5 Variation in thermal conductivity of materials

材料	砌体导热系数/%	饰面导热系数/%
A1	36.8	397.7
A2	6.72	133.6
B4	4.22	289.2
B5	0	26.8

从结果上来看,导热系数对传热量的影响与它本身的性能有关:当材料导热系数随湿度变化较大时,其对传热量的影响较大,在砌体 A1 变化范围超过 30% 时,其对传热量的影响将超过 10%。而当砌体 A2、B4 材料导热系数随湿度变化在 6% 左右,引起的传热量变化在 4% 左右, B5 由于资料没有给出砌体材料导热系数随湿度变化的值,所以基本无变化;同时通过方差分析可以发现导热系数变化对传热量的影响是极显著的。因此在极端热湿地区研究建筑围护机构的传热传质时,导热系数的值需按变物性取值。

4 水蒸气渗透系数的取值分析

由于砌体材料 A1 水蒸气渗透系数是定值, B4、B5 变化不大,这里只对 A2 进行分析, A2 水

蒸气渗透系数的变化如表 6 所示.

表 6 砌体结构 A2 水蒸气渗透系数的变化范围
Tab. 6 Variation range of water vapor permeability coefficient of masonry structure A2

相对湿度/%	承重材料	装饰材料
	kg/(m·s·Pa)	kg/(m·s·Pa)
0	3.992E-12	1.216E-11
99	5.678E-12	3.308E-11
相对增量/%	42.2	172.1

由于水蒸气渗透系数对围护结构传湿的影响较大, 因此本文对传热量和传湿量分别进行了比较, 当水蒸气渗透系数按变系数取值时, 围护结构传递的热量和湿量如图 7 和图 8 所示:

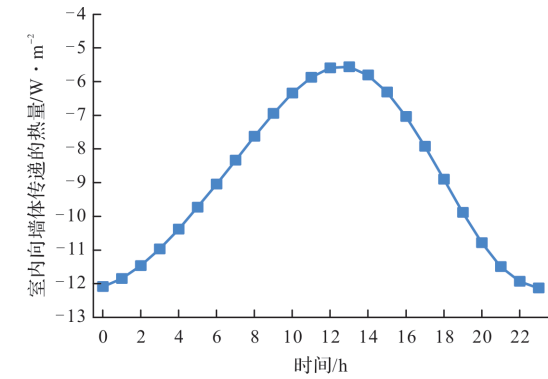


图 7 内表面传热量(水蒸气渗透系数为变量)
Fig. 7 Internal surface heat transfer(water vapor permeability coefficient as variable)

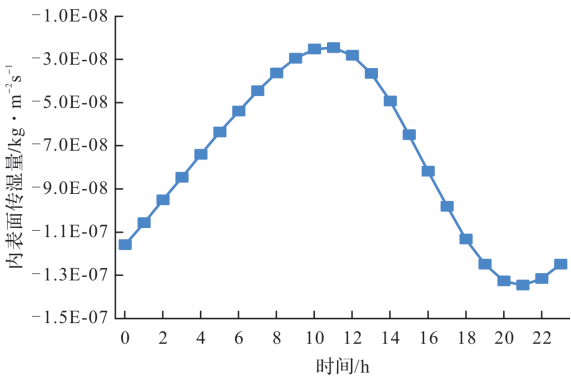


图 8 内表面传湿量(水蒸气渗透系数为变量)
Fig. 8 Moisture transfer on inner surface(water vapor permeability coefficient as variable)

和水蒸气渗透系数为常数进行对比时, 传热量和传湿量相对误差如图 9 和图 10.

从误差分析可以看出, 水蒸气渗透系数的变化对传热量的计算影响很小, 只有不到 1%, 而对传湿量计算影响较大, 最大可能造成 9% 左右的误差.

方差分析(表 7):

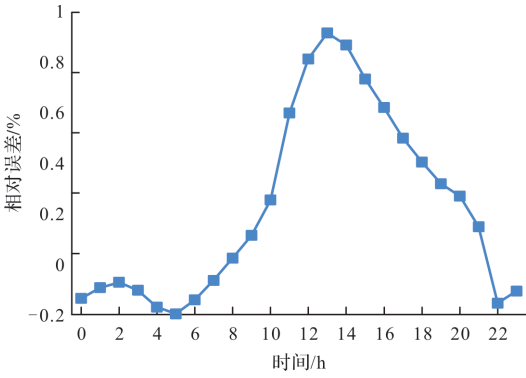


图 9 内表面传热量相对误差
Fig. 9 Relative error of heat transfer on inner surface

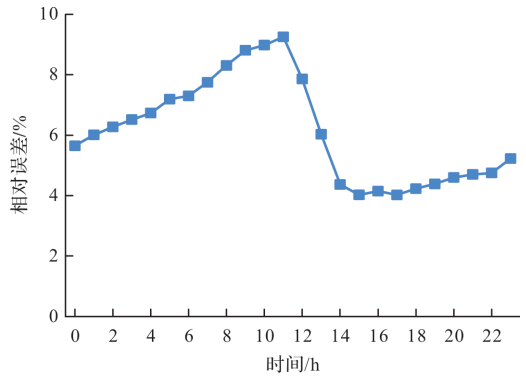


图 10 内表面传湿量相对误差
Fig. 10 Relative error of moisture transmission on the inner surface

表 7 内表面传热传湿量方差分析
Tab. 7 Variance analysis of heat and moisture transfer on internal surface

	<i>F</i>	<i>P</i> -value	<i>F</i> crit
传热量	43.353 65	1.02E-06	4.279 344
传湿量	164.049 8	5.95E-12	4.279 344

从结果上来看, $F > F_{0.05}$, $P < 0.1$, 所检验的因素对观察值影响极显著. 此外, 传湿量的 F 值远大于传热量的 F 值, 而传湿量的 P 值远小于传热量的 P 值, 水蒸气渗透系数的变化对传湿量的影响更为显著.

从上面的分析可以发现, 当水蒸气渗透系数变化范围达到 42% 时, 水蒸气渗透系数对围护结构的传热影响在 1% 以下, 传质影响在 8% 左右, 水蒸气渗透系数变化对传质引起的差异较大, 对传热引起的差异太小可以忽略不计. 同时方差分析也表明了水蒸气渗透系数的变化对传湿量影响要远大于传热量计算. 因此在湿热气候区进行围护结构热工计算时, 水蒸气渗透系数可以按规范取定值; 只有当侧重于传湿计算时, 水蒸气渗透系数才需按变物性计算.

5 液态水渗透系数的取值分析

液态水渗透系数随湿度变化十分明显,当相对湿度从0%变化到99%时,液态水渗透系数变化

的数量级大约有 10^{-5} ,本文选用比较具有代表性的结构A2和B5进行对比,分析不同资料来源的材料的差异性,液态水渗透系数从0%到99%的变化范围,具体如表8所示.

表8 液态水渗透系数的变化范围

Tab. 8 Variation range of liquid water permeability coefficient

相对湿度/%	A2 砌体材料 kg/(m·s·Pa)	A2 装饰材料 kg/(m·s·Pa)	B5 砌体材料 kg/(m·s·Pa)	B5 装饰材料 kg/(m·s·Pa)
0	9.006 6E-18	2.600 3E-17	2.241 1E-16	2.963 3E-18
99	2.551 5E-13	8.723 0E-12	3.035 1E-13	1.466 6E-12

液态水渗透系数随湿度的增长变化明显,然而传统热湿计算中,常常忽略液态水的影响,热工规范里也并没有液态水渗透系数的取值,因此研究围护结构液态水传递对传热传湿的影响将十分重要.分析结果如图11所示.

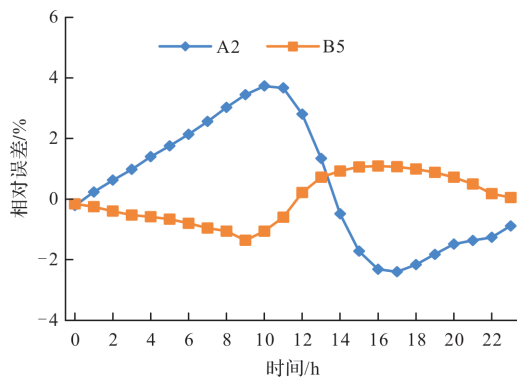


图11 内表面传热量相对误差(液态水渗透系数为变量)

Fig. 11 Relative error of internal surface heat transfer(liquid water permeability coefficient as variable)

通过相对误差分析可以看出,忽略液态水渗透系数的计算对传热量计算影响较小,A2差异只有3%左右,B5基本没有影响;但是液态水渗透系数随湿度的增长对传湿量计算影响较大,平均误差50%以上.此外,由于B5在12点时考虑液态水渗透系数时数值接近0,会导致相对误差变得极大,因此这里采用传湿量作为对比参考,如图12、13所示.

传热量和传湿量的方差分析,如表9和表10所示.

表9 内表面传热量方差分析

Tab. 9 Variance analysis of of heat transfer on inner surface

	F	P-value	F crit
A2	0.596 681	0.447 713	4.279 344
B5	1.605 987	0.217 738	4.279 344

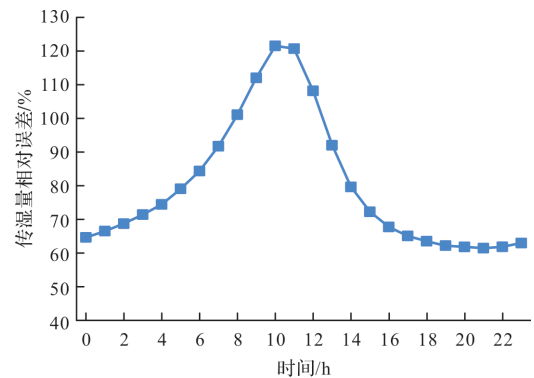


图12 A2内表面传湿量相对误差(液态水渗透系数为变量)

Fig. 12 Relative error of moisture transfer on the A2 inner surface(liquid water permeability coefficient as variable)

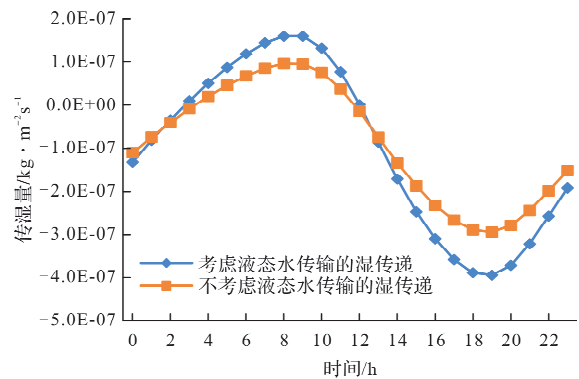


图13 砌体B5内表面传湿量(液态水渗透系数为变量)

Fig. 13 Moisture transfer capacity on B5 inner surface (liquid water permeability coefficient as variable)

表10 内表面传湿量方差分析

Tab. 10 Variance analysis of moisture transfer on internal surface

	F	P-value	F crit
A2	207.676 1	5.28E-13	4.279 344
B5	31.570 24	8.36E-05	4.279 344

从分析结果中可以看出,液态水渗透系数对传热的影响较小, $F < F_{0.05}$, $P > 0.1$,通过方差分析发现差异性不显著.然而液态水传输对传湿量

影响很大, $F > F_{0.05}$, $P < 0.01$, 通过方差分析发现差异性极显著。

此外, 由于降雨对液态水传输具有较大影响, 因此加入降雨的模拟计算。模拟模型选用文献[19], 室外参数如图14、15所示。

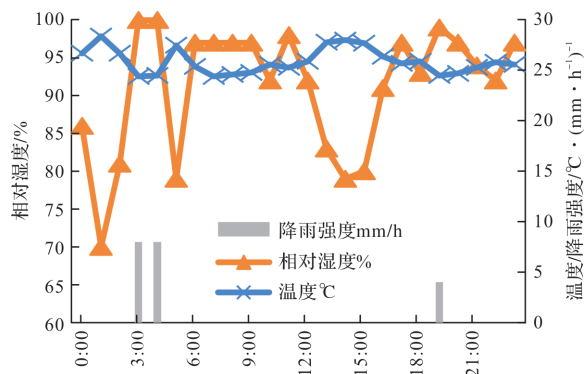


图14 雨天室外参数

Fig. 14 Outdoor parameters in rainy weather

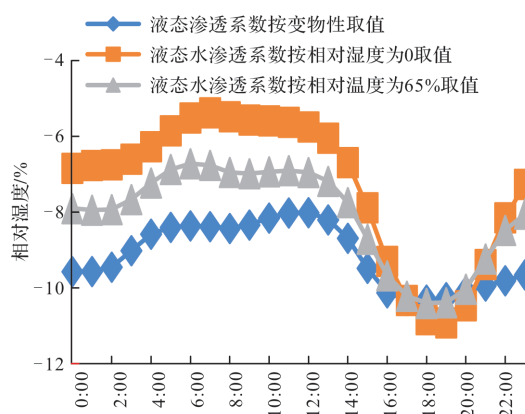


图15 雨天室内传热量

Fig. 15 Indoor heat transfer in rainy days

通过对雨天的模拟发现, 液态水渗透系数按相对湿度为0取值与按相对湿度为65%取值的全天传热量的误差在20.1%和11.5%, 最大误差出现在7点附近, 为35.9%和19.3%。当相对湿度大于95%后, 液态水渗透系数的取值变化对传热量的影响较大。

通过对液态水渗透系数的研究可以发现, 液态水渗透系数是否按变物性取值取决于室外计算参数。当相对湿度最大值小于95%时, 液态水渗透系数的值随湿度的变化十分明显, 大约有 10^{-5} 的数量级, 然而其值的变化对围护结构传热量的影响不大, 平均只有2%左右, 但是对传湿量的影响十分显著, 最大会造成大概80%的相对误差。因此在相对湿度小于95%, 液态水渗透系数在单纯的热湿耦合传热计算可以按定值取值。如果在围护结构热工计算中需要准确地计算出传湿量, 则液态水渗透系数需按变物性取值。

当室外计算条件为降雨时, 相对湿度大于95%, 此时传热量会受到湿传递的巨大影响, 无论传热传湿计算, 液态水渗透系数都必须按变物性取值。

6 结论

本文为了探索湿热气候区的热工计算方法, 通过计算机模拟计算的方法, 对比分析了湿传递、导热系数、水蒸气渗透系数和液态水渗透系数对围护结构传热传质计算的影响, 总结出在湿热气候地区进行热工计算的基本原则, 具体如下:

(1) 湿传递对传热的影响很大, 当围护结构隔湿性能较差时, 湿传递最大可以带来30%左右的传热量误差, 因此在湿热气候地区进行热工计算时, 最好采用热湿耦合模型进行计算;

(2) 导热系数的变化对传热量的影响在5%~10%左右, 数值较大不能忽略, 因此在湿热气候地区进行热工计算时, 导热系数需按变物性取值;

(3) 蒸汽渗透系数的值虽然受材料含水量的影响较大, 但是否按变物性来计算传热时对围护结构总传热量的影响都不大, 在1%左右, 因此在湿热气候地区单纯研究围护结构的传热时, 蒸汽渗透系数可以按定值取值, 推荐蒸汽渗透系数按《民用建筑热工设计规范》取值;

(4) 液态水渗透系数的取值受室外计算条件影响巨大, 当相对湿度小于95%, 即非雨季时, 液态水渗透系数可以按定值取值, 此时最大误差仅2%左右; 当相对湿度大于95%, 在雨季时, 液态水渗透系数必须按变物性取值;

(5) 蒸汽渗透系数和液态水渗透系数对传湿量的影响相对较大, 在如果热工设计中涉及到围护结构构造的传质分析, 则两者需按变物性取值;

(6) 对四种不同砌体结构材料研究发现: 分别提高外墙主体结构材料和饰面材料的隔湿性能对吸湿能力的影响相当, 而饰面材料由于厚度和材料问题提升起来更加经济, 因此提高饰面材料的隔湿性能是性价比较高的隔湿方法。

参考文献 References

- [1] HOU X D, LIU F S, WANG S J. Coupled heat and moisture transfer in hollow concrete block wall filled with compressed straw bricks[J]. Energy and Buildings, 2017, 135(1): 74-84.
- [2] KONG F H, ZHANG Q L. Effect of heat and mass coupled transfer combined with freezing process on building exterior envelope[J]. Energy and Buildings,

- 2013,62(7):486-495.
- [3] 卢阳巧. 寒冷地区建筑墙体热湿及空气渗透耦合传递特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
LU Yangqiao. Study on the characteristics of coupled heat air and moisture transfer in building walls in cold area [D]. Xuzhou: China Mining University,2020.
- [4] 鲍洋. 多孔介质建筑墙体热湿耦合迁移数值模拟研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
BAO Yang. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer in porous building walls [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [5] TOMÁŠ Krejčí, JAROSLAV Kruis, MICHAL Šejnoha, et al. Numerical analysis of coupled heat and moisture transport in masonry [J]. Computers & Mathematics with Applications, 2017,74(7):229-248.
- [6] MIN H G, ZHANG W P, ROBERT C. Coupled heat and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143,(7):607-620.
- [7] ŠKERGET L, TADEU A, RAVNIK J. BEM numerical simulation of coupled heat, air and moisture flow through a multilayered porous solid [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, 74 (1): 24-33.
- [8] 王可. 多孔建筑材料毛细吸水系数测试方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学,2020.
WANG Ke. A study of the test methods for capillary water absorption coefficient of porous building materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2020.
- [9] 张威宁,高岩,蔺新星. 多孔建筑材料静态吸湿特性研究[J]. 建筑科学,2019,35(4):60-65.
ZHANG Weining, GAO Yan, LIN Xinxing. Study on static hygroscopic properties of porous building materials[J]. Build Science,2019,35(4):60-65.
- [10] 易思阳,金虹庆,范利武. 多孔建筑材料水蒸气扩散系数的瞬态测试方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(1):16-20,26.
YI Siyang, JIN Hongqing, FAN Liwu. Transient determination of water vapor diffusion coefficient of porous building materials[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science) ,2016,50(1):16-20, 26.
- [11] MOHAMED Said Abbas, FIONN McGregor, ANTONIN Fabbri, et al. Effect of moisture content on hygrothermal properties: Comparison between pith and hemp shiv composites and other construction materials [J]. Construction and Building Materials, 2022(340), 127731.
- [12] LE Duonghung ANHABC Zoltán Pásztoryc. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials [J]. Journal of Building Engineering,2021(44):102604.
- [13] MAATOUK Khoukhi, AHMED Hassan, SHAIMAA Abdelbaqi. The impact of employing insulation with variant thermal conductivity on the thermal performance of buildings in the extremely hot climate[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019,16(12):100562.
- [14] ANDRÉ D. Trindade, GUILHERME B. A. Coelho, FERNANDO M. A. Henriques. Influence of the climatic conditions on the hygrothermal performance of autoclaved aerated concrete masonry walls[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33(1): 101578.
- [15] 郭兴国,刘英,罗鸿韬,等. 热湿气候地区墙体热湿耦合迁移模型热湿物性参数灵敏度分析[J]. 建筑科学, 2019,35(4):66-69.
GUO Xiuguo, LIU Ying, LUO Hongtao. Sensitivity analysis of hygrothermal parameters moisture transfer model for walls subjected to in hot a coupled heat and humid climate[J]. Build Science,2019,35(4):66-69.
- [16] TOMÁŠ Krejčí, JAROSLAV Kruis, MICHAL Šejnoha, et al. Numerical analysis of coupled heat and moisture transport in masonry[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2017, 74(1):229-248.
- [17] MIN H G, ZHANG W P, ROBERT C. Coupled heat and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment[J]. Construction and Building Materials, 2017,143(7):607-620.
- [18] ŠKERGET L, TADEU A, RAVNIK J. BEM numerical simulation of coupled heat, air and moisture flow through a multilayered porous solid [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, 74 (1): 24-33.
- [19] 罗戴维,刘加平,刘大龙. 极端热湿地区围护结构热湿耦合传递模型[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(4):36-41.
LUO Daiwei, LIU Jiaping, LIU Dalong. Coupled heat and moisture transfer model of building envelope in extreme heat moisture climate area[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40 (4): 36-41.
- [20] 罗戴维,刘加平,刘大龙,等. 极端热湿地区湿驱动势的选择对热湿耦合模型计算的影响[J]. 建筑科学,2018,34(2):100-105.
LUO Daiwei, LIU Jiaping, LIU Dalong, et al. Effect of moisture potential on calculation of heat and moisture transfer in extreme heat-moisture climate area[J]. Build Science, 2018,34(2): 100-105.
- [21] HARTWIG M. Künz, KURT Kiessl. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 40(10):159-167.

- [22] LI Qinru, RAO Jiwu, Paul Fazio. Development of HAM tool for building envelope analysis[J]. Building and Environment, 2009, 44(5):1065-1073.
- [23] WANG Yingying, ZHANG Sudan, WANG Dengjia, et al. Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials[J]. Energy and Built Environment, 2021, 38(5): 122-130.
- [24] 于水,张旭,李魁山. 新型建筑墙体保温材料热湿物性参数研究[C]//2010年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集. 南京:东南大学出版社 2010:212-218.
YU Shui, ZHANG Xu, LI Kuishan. The research of hygrothermal parameters of new envelop insulation materials [C]//Proceedings of the International Academic Conference on Built Environment Science and Technology. Nanjing: Southeast University Press 2010: 212-218.
- [25] National Weather Data Center[EB/OL]. [2022-04-30]. <https://energyplus.net/weather-region/InternationalWeatherforEnergyCalculationsIWECEfile>[EB/OL].
- [26] HAGENTOFT C E. HAMSTAD-Final report; methodology of HAM-modeling, Report R-02;8 [R]. Gothenburg: Department of Building Physics, Chalmers university of Technology, 2002, 8-50
- [27] KUMARAN M. IEA Annex 24 Final Report, Vol. 3, Task 3: Material properties[M]. Leuven:IEA, Acco Leuven, 1996, 14-132.
- [28] 刘向伟. 夏热冬冷地区建筑墙体热、空气、湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
LIU Xiangwei. Investigation of the coupled heat, air and moisture transport in building walls in hot summer and cold winter zone [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [29] 张哲,辛苗,张正金,等. 固体推进剂储存老化力学性能双因素方差分析[J]. 爆破器材, 2022, 51(1):29-34.
ZHANG Zhe, XIN Miao, ZHANG Zhengjin et al. Double-factor variance analysis on mechanical behaviors of a solid propellant during aging[J]. Explosive Materials, 2022, 51(1):29-34

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 929 页)

- [16] QABANY A A, SOGA K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8):992-1001.
- [17] HALE S E, JENSEN J, JAKOB L, et al. Short-term effect of the soil amendments activated carbon, biochar, and ferric oxyhydroxide on bacteria and invertebrates[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(15): 8674-8683.
- [18] DUAN Jinming, WILSON Francis, NIGEL Graham, et al. Adsorption of humic acid by powdered activated carbon in saline water conditions [J]. Desalination, 2003, 151(1):53-66.
- [19] 巴能军,周志伟,董俊,等. 助滤和再生粉末活性炭吸附技术用于工业废水深度处理[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 71-74.
BA Nengjun, ZHOU Zhiwei, DONG Jun, et al. Application of assisted filtration and recycled powder activated carbon adsorption technology in the in-depth treatment of industrial wastewater[J]. Water Supply and Drainage, 2017, 53(2):71-74.
- [20] 赵振业,章诗芳,孙伟,等. 粉末活性炭吸附性能对比研究[J]. 水处理技术, 2005(8):18-20.
ZHAO ZhenYe, ZHANG Shifang, SUN Wei, et al. Comparative study on adsorption properties of powdered activated carbon[J]. Water Treatment Technology, 2005(8): 18-20.
- [21] 彭勤,冯清鹏,孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1048-1055.
PENG Jie, FENG Qingpeng, SUN Yicheng. Effect of temperature on microbial induced calcium carbonate deposition in sand reinforcement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 40(6):1048-1055.
- [22] 方祥位,申春妮,楚剑,等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (10): 2773-2779.
FANG Xiangwei, SHEN Chunni, CHU Jian, et al. Experimental study on microbial deposition of calcium carbonate solidified coral sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10):2773-2779.
- [23] 郑俊杰,吴超传,宋杨,等. MICP 胶结钙质砂的强度试验及强度离散性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020 (2):1-7.
ZHENG Junjie, WU Chuanchao, Song Yang, et al. Strength test and strength dispersion study of MICP cemented calcareous sand [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020(2):1-7.

(编辑 吴海西 沈 波)