



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2305539

引用格式:郑伟花, 苏园, 高芸. 寒冷地区复合自保温砌块墙体热湿耦合迁移特性研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(16): 6828-6835.

Zheng Weihua, Su Yuan, Gao Yun. Coupled heat and moisture transmission characteristics of self-insulation block walls in cold regions[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6828-6835.

建筑科学

寒冷地区复合自保温砌块墙体热湿耦合迁移特性研究

郑伟花, 苏园, 高芸

(河北大学建筑工程学院, 保定 071002)

摘 要 为研究自保温砌块墙体的热湿耦合传递规律,将当前主流构造型式的复合自保温砌块墙体与同等厚度的外保温墙体进行对比。以寒冷地区保定市为例,通过数值软件进行模拟计算,分析自然环境下墙体内部的热湿耦合传递过程。模拟结果表明:自保温砌块墙体的保温隔热效果优于外保温墙体。在夏季工况下,墙体湿风险较低,不存在霉菌滋生与冷凝风险。在冬季工况下,自保温砌块墙体内部湿风险均高于外保温墙体。填芯自保温砌块墙体、夹芯自保温砌块墙体、外保温墙体内部相对湿度最大值分别为 73.9%、92.1%、68.6%。其中,夹芯自保温砌块由于空腔的存在降低了墙体的传湿阻力,相对湿度超过 80%,湿积累明显且霉变风险较大,使得墙体长期使用稳定性与保温性能受到影响。因此,填芯自保温砌块具有更好的适用性,有利于减小建筑热湿负荷,降低建筑能耗水平。

关键词 热湿耦合; 自保温砌块; 数值模拟; 寒冷地区

中图分类号 TU111.4;

文献标志码 A

Coupled Heat and Moisture Transmission Characteristics of Self-insulation Block Walls in Cold Regions

ZHENG Wei-hua, SU Yuan, GAO Yun

(College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China)

[Abstract] In order to study the heat and moisture coupling transfer law of self-insulated block wall, the composite self-insulated block wall of the current mainstream construction type was compared with the externally insulated wall of the same thickness. Taking Baoding City, a cold region, as an example, simulation calculations were carried out through numerical software to analyse the heat and moisture coupling transfer process inside the wall under the natural environment. The simulation results show that the thermal insulation effect of the self-insulated block wall is better than that of the externally insulated wall. Under summer conditions, the wall has a low risk of moisture, and there is no risk of mould growth and condensation. In winter conditions, the internal moisture risk of self-insulated block walls is higher than that of externally insulated walls. The maximum values of internal relative humidity of core-filled self-insulating block walls, sandwich self-insulating block walls, and externally insulated walls are 73.9%, 92.1%, and 68.6%, respectively. Due to the existence of cavity inside the sandwich self-insulating block makes its moisture transfer resistance reduced, the moisture accumulation is obvious and the risk of mould is larger, it is difficult to ensure the long-term stability and thermal insulation performance of the wall. The core-filled self-insulating block has better applicability, which is conducive to reducing the heat and humidity load of the building and lowering the energy consumption level of the building.

[Keywords] heat and moisture transfer; self-insulation blocks; numerical simulation; cold regions

随着建筑节能的要求逐渐提高,通过发展外墙保温技术提升墙体的热工性能十分重要。墙体外保温体系是目前最为广泛应用的墙体保温形式。但外保温技术存在两个缺陷,即保温层与建筑寿命

不同且难以避免火灾隐患^[1]。为解决上述缺陷,自保温技术应运而生。混凝土复合自保温砌块墙体是自保温技术常见的构造形式。混凝土复合自保温砌块指的是以混凝土材料作为砌块基层,与保温

收稿日期: 2023-07-22 修订日期: 2024-03-23

基金项目: 河北大学高层次人才引进项目(521000981383)

第一作者: 郑伟花(1978—),女,汉族,河北保定人,博士,副教授。研究方向:围护结构热湿传递。E-mail:zhengweihua1230@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

芯材进行复合,成型后具有良好的热工性能,无需再施加保温层就能达到建筑节能标准的砌块的总称^[2]。自保温砌块中的保温芯材的性能得到充分发挥,实现保温结构一体化,具有耐久性好、防火、施工方便、与建筑同寿命等优点^[3,4]。混凝土复合自保温砌块已经取得了一定的推广与应用。吴聪等^[5]设计了填充秸秆的自保温砌块墙体,平均传热系数为 $0.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。为满足寒冷地区墙体保温需求,隋学敏等^[6]设计了7种混凝土复合自保温砌块的孔型方案,发现三排错孔布置的砌块热工性能最佳,热量主要通过外肋壁传递。因此,目前广泛使用的混凝土复合自保温砌块,通常是以混凝土为基层材料,泡沫聚苯板作为保温填芯材料,采用三排矩形孔交错分布构造形式的填芯型砌块,以及将保温材料将基层完全隔断,通过断热桥连接件,把基层材料和保温夹层进行连接的夹芯型砌块。

当前对自保温砌块的研究多是围绕热工性能进行展开,而建筑围护结构作为建筑物的重要组成部分,同时也是建筑物热湿负荷的主要来源^[7],自保温砌块热湿耦合传递的研究比较匮乏。罗羽等^[8]、李玮等^[9]研究了多种建筑材料,发现湿传递随热传递的影响不容忽视。近年来,热湿耦合的传递引发的墙体结露问题受到重视,墙体结露影响保温系统的热工性能,并且影响建筑使用寿命。为准确判断出墙体结露情况,陈友明等^[10]在 Luikov^[11]和 Philip等^[12]热湿耦合传递方程的基础上以含湿量和温度为驱动势建立了建筑墙体的一维瞬态热湿耦合传递模型。Melin等^[13]、Lu^[14]建立了多孔介质材料的热湿耦合传递模型。黄建恩等^[15]以墙体内部的蒸气压力为驱动力建立了热湿传递模型,发现墙体相对湿度超过80%温度高于零度时容易发生霉变。

现针对寒冷地区住宅建筑常用的两种混凝土复合自保温砌块,即夹芯自保温砌块与填芯自保温砌块,采用数值模拟法对其热湿耦合性能进行研究,并与外保温墙体的热湿性能进行对比分析。为准确地预测自保温墙体内部热湿分布,降低建筑能耗与湿风险,指导高性能混凝土复合自保温砌块的开发应用提供了基础。

1 热湿传递模型

墙体中的热湿传递非常复杂,为简化模型与方便计算,将采取以下基本假设:墙体内部为均匀连续介质,局部热力学平衡;墙体各层材料之间接触紧密,无接触热阻湿阻;不考虑空气渗透;将湿空气视为理想气体;湿分仅以气液两相存在,忽略结冰冻融现象。

1.1 湿控制方程

根据质量守恒定律、Fick定律、Darcy定律,控制体积内含湿量变化可表示为

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left(\delta_p \nabla P_v + D_l \frac{\partial w}{\partial \varphi} \nabla \varphi \right) \quad (1)$$

$$P_v(\varphi, T) = \varphi P_{\text{sat}}(T) \quad (2)$$

$$P_{\text{sat}}(T) = \exp \left(23.5771 - \frac{4042.39}{T - 37.58} \right) \quad (3)$$

式中: w 为材料的含湿量, kg/m^3 ,可看作相对湿度 φ 的函数; ∇ 为哈密顿算子; t 为时间, s ; P_v 为水蒸气分压, Pa ; T 为温度, K ; P_{sat} 为只与温度相关的饱和水蒸气分压, Pa ; D_l 为液态水扩散系数, m^2/s ; δ_p 为建筑材料的水蒸气渗透系数, s 。

1.2 热控制方程

根据能量守恒定律与 Fourier 导热定律,墙体任一控制体积的热量传递方程为

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [k(\varphi) \nabla T + H_{\text{eva}} \delta_p \nabla P_v] \quad (4)$$

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \rho_{\text{mat}} C_{\text{Pmat}} + w(\varphi) C_{\text{Pw}} \quad (5)$$

式中: ρ 为控制体积的密度, kg/m^3 ; C_p 为控制体积的热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为有效热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $k(\varphi)$ 为与含湿量相关的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ_{mat} 为多孔材料干密度, kg/m^3 ; C_{Pmat} 、 C_{Pw} 分别为建筑材料固体基质的热容与水的热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; H_{eva} 为蒸发潜热, J/kg ; $w(\varphi)$ 为材料的含湿量, kg/m^3 。

1.3 边界条件

将室内外环境视为墙体热湿源,可以得到内外壁面处的热通量与水汽通量,作为求解热湿传递方程的第三类边界条件。

对于室外侧,有

$$q_{\text{out}} = h_{\text{out}} (T_{\text{amb,out}} - T_{\text{s,out}}) \quad (6)$$

$$g_{\text{out}} = \beta_{\text{out}} (P_{\text{Vamb,out}} - P_{\text{Vs,out}}) \quad (7)$$

对于室内侧,有

$$q_{\text{in}} = h_{\text{in}} (T_{\text{amb,in}} - T_{\text{s,in}}) \quad (8)$$

$$g_{\text{in}} = \beta_{\text{in}} (P_{\text{Vamb,in}} - P_{\text{Vs,in}}) \quad (9)$$

式中: g 为壁面水汽通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q 为壁面热通量, W/m^2 ; T 为温度, K ; P_v 为水蒸气分压力, Pa ; h 为表面换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 内外壁面传热系数分别取 $8.72 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $23.26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[16]; β 为壁面传湿系数, s/m ,根据刘易斯关系式,内外壁面传湿系数分别取 1.85×10^{-8} 、 $14 \times 10^{-8} \text{ s}/\text{m}$; 下标 out 为室外侧; 下标 in 为室内侧; 下标 amb 为壁面表面外环境; 下标 s 为壁面表面处环境。

1.4 几何模型与参数

选取寒冷地区的保定市作为典型气候城市,保定市地处河北北部,是典型的寒冷地区城市,一年

中供暖期长达4个月,冬季寒冷对墙体保温性能要求较高,同时由于地处华北平原,夏季较炎热湿润,同时需要兼顾夏季防热。以夹芯自保温砌块墙体与填芯自保温砌块墙体为研究对象,并与同等厚度的外保温墙体对比。室内环境温度为恒定21℃,室内环境相对湿度非采暖期设置为50%,在采暖期由于门窗密闭和生活用水导致室内相对湿度较高设置为70%,室外环境温度与环境湿度来自ASHRAE数据,如图1所示。保温墙体初始温度设置为21℃,初始相对湿度设置为50%。模拟时间从2017年6月15号00:00开始,模拟持续时间一年,共8760h。

寒冷地区常采用的外墙保温系统是EPS(expanded polystyrene board)板外保温系统。由外到内分别是15mm水泥砂浆保护层、60mm EPS板保温层、240mm基层墙体、15mm室内抹面水泥砂浆,几何模型与材料参数如表1和图2所示。根据《自保温混凝土复合砌块》(JG/T 407—2013)中关于砌块规格尺寸的规定,满足寒冷地区墙体保温需求的砌块的规格为390mm(长)×290mm(宽)×190mm(高)。由自保温砌块采用砌筑砂浆砌筑而成的构造实体称为砌体,砌筑砂浆采用无机保温砂浆,灰缝厚度10mm,两种砌块砌体内外表面20mm抹灰砂浆抹面,这样的构造实体称之为自保温砌块墙体。砌块与外保温墙体的基层材料均采用再生轻骨

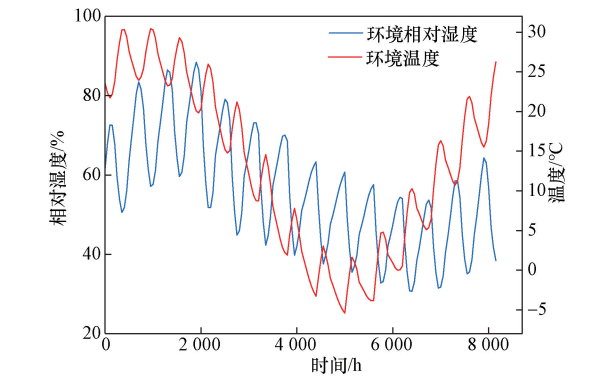


图1 室外气象参数
Fig. 1 Outdoor meteorological parameters

料混凝土。具体构造如图2所示,分析墙体内部温湿度时,选择截面1和截面2作为墙体的主截面。

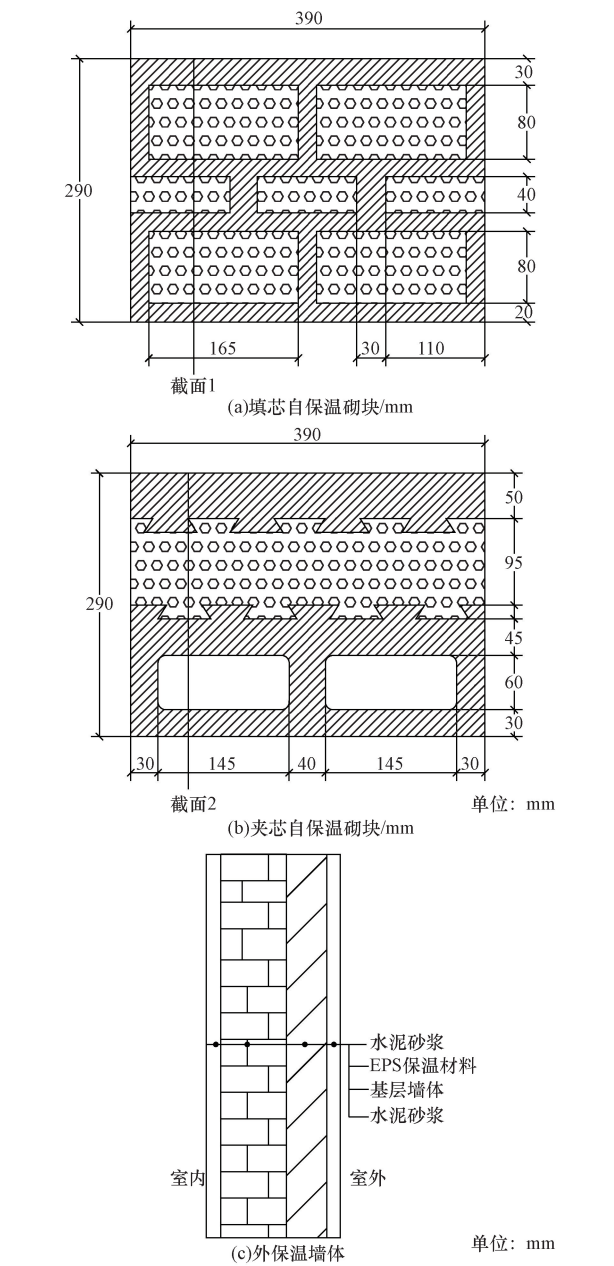


图2 墙体几何构造
Fig. 2 Wall geometry

表1 材料物性参数

Table 1 Relevant material parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	恒压热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	蒸汽渗透 系数/ 10^{-11} s	液态水扩散系数/ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	等温吸附曲线/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
基层	800	0.163	920	2.60	5.06×10^{-9}	$\frac{\varphi}{-0.088\,51\varphi^2+0.094\varphi+0.016\,2}$
水泥砂浆	1\,805	1.230	840	5.46	1.3×10^{-8}	$\frac{\varphi}{-0.052\,62\varphi^2+0.077\,2\varphi+0.010\,11}$
EPS	28	0.035	1\,380	1.10	0	$\frac{\varphi}{-0.527\,72\varphi^2+0.964\,7\varphi+0.070\,86}$
砌筑砂浆	1\,250	0.154	1\,225	3.26	4.8×10^{-9}	$\frac{\varphi}{-0.022\,56\varphi^2+0.025\,4\varphi+0.000\,1}$

2 模型验证

为验证上述热湿耦合传递数学模型的准确性,应利用实验数据进行检验。根据 *Hygrothermal Performance of Building Components and Building elements: Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation* (BS EN15026:2007)^[17] 提供的相关实验数据与热湿耦合传递的细节,来验证模型的正确性。利用标准实验中的数据与模型在相同情况下的模拟结果对比。标准中实验对象为可视为半无限大结构的混凝土墙壁。墙体宽度为 20 m,墙体初始温度为 20 ℃,初始相对湿度为 50%。在 $t = 0$ s 时在内边界上施加温度为 30 ℃,相对湿度为 95% 的第一类边界条件,在外边界上保持初始温湿度不变,上下界面绝热绝湿,热通量和壁面水汽通量均为 0,可简化为一维结构进行模拟。模拟所需相关参数参阅此标准。图 3、图 4 分别为在 7、30、365 d 模型仿真结果和试验数据的对比。

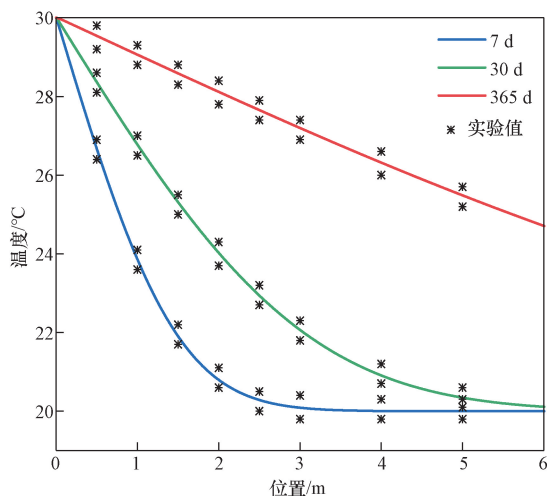


图 3 7、30、365 d 的温度对比

Fig. 3 Comparison of temperature after 7, 30, 365 d

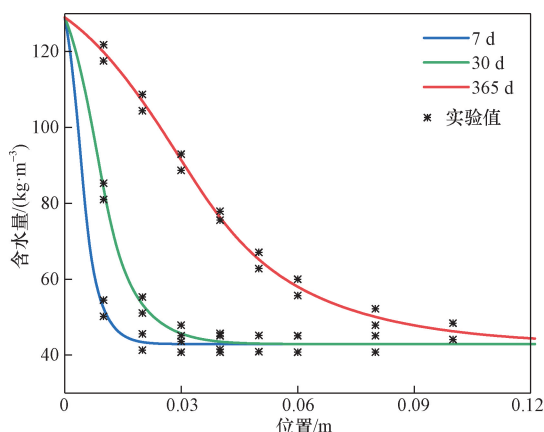


图 4 7、30、365 d 的含水量对比

Fig. 4 Comparison of water content after 7, 30, 365 d

从图 3 和图 4 中可以看出,模型计算处的温度场与相对湿度场和试验结果基本吻合,两者间的最大误差不超过 1%,说明构建的模型能正确地模拟墙体内部的热湿耦合传递过程。

3 模拟结果分析

夹芯自保温砌块和填充自保温砌块的热湿传递不同于材质均匀的自保温砌块,由于内部孔洞与芯材的存在,传热过程复杂。分别对冬季工况与夏季工况下墙体的热湿传递进行分析。

3.1 传热分析

分别对复合混凝土自保温砌块墙体和外保温墙体进行为期一年的数值模拟,两种墙体室内壁面处的热流密度随着时间变化关系如图 5 所示。在初始阶段,由于壁面温度受环境温度影响变化剧烈,热流密度变化也较为剧烈。在经过约 50 h 的换热过后,两种保温系统的内壁面热流密度随着时间的变化开始进行类似正弦波的变化。填充自保温砌块墙体与夹芯自保温砌块墙体的内壁面处热流密度变化曲线基本相同,夹芯自保温砌块墙体处最大平均热流密度为 1.77 W/m²,最小平均热流密度为 -5.17 W/m²,变化幅度为 6.94 W/m²。填充自保温砌块墙体处最大平均热流密度为 1.74 W/m²,最小平均热流密度为 -5.29 W/m²,变化幅度为 7.03 W/m²。外保温墙体内壁面处最大平均热流密度为 2.3 W/m²,最小平均热流密度为 -7.46 W/m²,变化幅度为 9.76 W/m²。复合自保温砌块墙体内壁面热流密度明显小于外保温墙体,从内壁面热流密度变化幅度可以分析出,两种复合自保温砌块墙体受环境温度变化影响比外保温墙体小,具有更好的保温隔热作用,可以使室内温度变化保持在一个较小的幅度内,减轻了建筑热负荷,降低了建筑能耗。

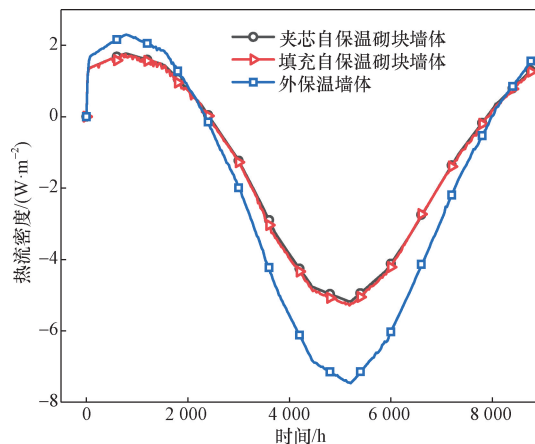


图 5 内壁面平均热流密度

Fig. 5 Heat flux density at the inner wall

在冬季工况下,在模拟进行到第 213 天保定市日平均气温达到最低时,保温系统内部 3 个主截面的温度分布如图 6 所示。由于填芯自保温砌块与夹芯自保温砌块由基层材料与保温材料复合而成,墙体内部材料分布并不均匀,因此墙体内壁面到外壁面温度的下降拐点与外保温墙体不同。外保温墙体的保温层直接阻碍了外部低温对室内侧墙体的影响,因此外保温墙体靠近室外侧的墙体温度明显高于两种自保温墙体。两种自保温墙体的温度分布整体相同,靠近室外侧受冬季低温影响,温度处于零下时有凝结结冰风险。由于在相同厚度墙体情况下复合自保温砌块可以布置更多的保温材料,相较于外保温墙体,复合自保温砌块的保温性能更好热阻更大,在靠近室内侧,内壁面附近的温度明显高于外保温墙体,减轻了室外低温对室内热环境的影响。

在夏季工况下,在模拟进行到第 36 天保定市日平均气温达到最高时,此时保温系统内部温度变化如图 7 所示。3 种保温墙体内部温度从室外到室内

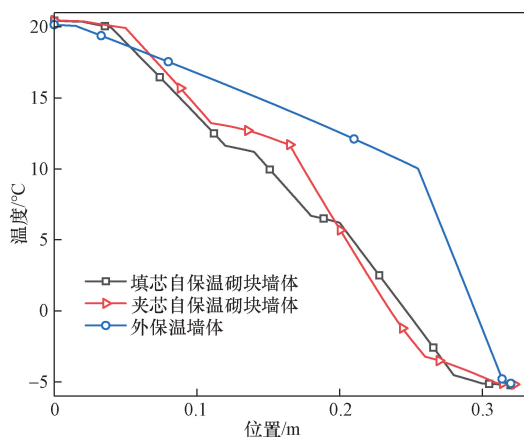


图 6 冬季工况下墙体内部温度

Fig. 6 Internal temperature of the wall in winter

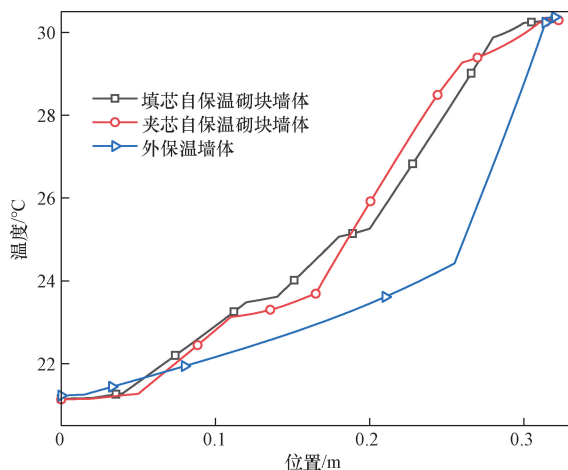


图 7 夏季工况下墙体内部温度

Fig. 7 The internal temperature of the wall in summer

都呈现下降趋势,外壁面处的温度主要受室外环境影响。填芯自保温砌块墙体和夹芯自保温砌块墙体内外壁面处的温度都低于外保温墙体,减轻了室外高温环境对室内的影响。夏季保温墙体内部的温度梯度为 27.2 K/m ,冬季采暖季保温墙体内部温度梯度为 75.8 K/m ,热量传递驱动势温度梯度的降低,使得墙体传热量减少,寒冷地区冬季墙体热负荷远大于夏季。

3.2 传湿分析

3 种保温墙体内壁面处平均水汽通量随时间变化如图 8 所示。填芯自保温砌块墙体,夹芯自保温砌块墙体,外保温墙体内壁面最大水汽通量分别为 9.33×10^{-7} 、 11.65×10^{-7} 、 $9.53 \times 10^{-7}\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,内壁面最小水汽通量分别为 -7.3×10^{-7} 、 -9.06×10^{-7} 、 $-7.9 \times 10^{-7}\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水汽通量变化幅度分别为 16.63×10^{-7} 、 20.71×10^{-7} 、 $17.43 \times 10^{-7}\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,填芯自保温砌块墙体与外保温墙体隔湿效果接近,均优于夹芯自保温砌块墙体。夹芯自保温砌块墙体内壁面处水汽通量变化幅度比填芯自保温砌块墙体和外保温墙体分别高出 19.7% 和 15.8%。填芯自保温砌块墙体和外保温墙体拥有更大的水蒸气渗透阻力,环境中的水分难以透过墙体进行传递,减轻了室内的湿负荷,有利于室内湿度保持相对稳定的湿度环境。

在冬季工况下,室内水分通过墙体向室外环境中传递,但是墙体基层材料与保温材料热湿性能不同,水分难以透过保温材料,在两种材料交界面处常发生湿积累甚至产生冷凝水。当墙体表面或内部相对湿度超过 100% 时会出现凝结露现象,墙体内部相对湿度长期高于环境相对湿度时产生湿积累会出现液态水,相对湿度长期超过 80% 时,容易产生霉变。图 9 为冬季工况墙体相对湿度分布,室内侧墙体相对湿度主要受室内环境湿度影响,3 种保温墙体内外壁面处的相对湿度,均未超过 100% ,

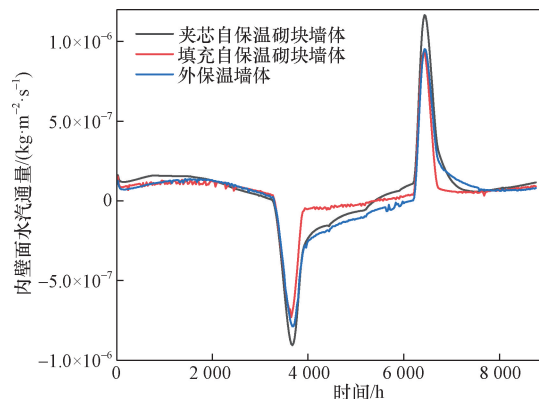


图 8 内壁面水汽通量

Fig. 8 Water vapor flux at the inner wall

3种保温墙体表面不会出现结露现象。填芯自保温砌块墙体、夹芯自保温墙体和外保温墙体内部的相对湿度最大值分别为73.9%、92.1%、68.6%,分别位于靠近室内一侧保温填芯中心处、保温夹芯层与室内侧基层材料交界面处即距离内壁面0.15 m处、外保温墙体保温层中心处。填芯自保温砌块墙体与外保温墙体内部相对湿度由内到外呈现下降趋势,填芯自保温墙体最大相对湿度仅比外保温墙体高5.3%,两种墙体隔湿效果接近,并且最大相对湿度均低于100%,墙体内部没有冷凝风险,同时相对湿度也未超过80%,没有霉菌滋生风险。但是,夹芯自保温砌块墙体在保温夹芯层附近产生了明显的湿积累,最大相对湿度接近100%,并且高于80%具有较高的墙体内部冷凝与霉变风险,影响墙体使用寿命,降低保温性能进而增加建筑能耗。

在夏季工况下,室内温湿度低于室外环境温度,水分透过保温外墙由从室外向室内传递。夏季墙体内部相对湿度如图10所示,可以看出,3种保温墙体内部相对湿度由室外高湿侧到室内低湿侧呈现下降趋势,墙体最高相对湿度在墙体外表面附近

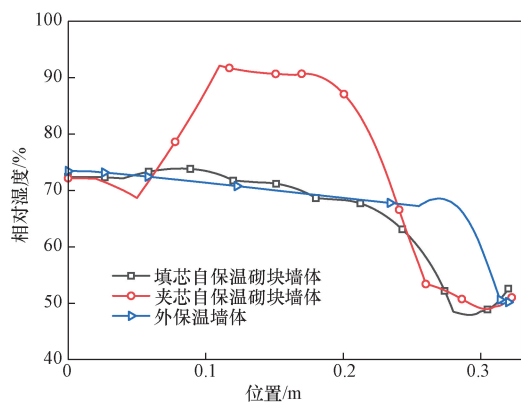


图9 冬季墙体内部相对湿度

Fig. 9 Relative humidity inside the wall in winter

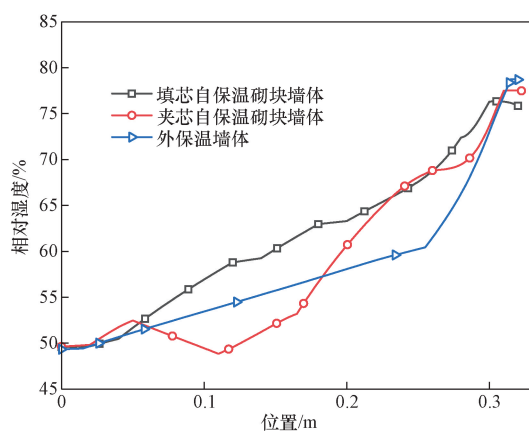


图10 夏季墙体内部相对湿度

Fig. 10 Relative humidity inside the wall in summer

且接近室外环境相对湿度。根据墙体内部相对湿度分布对比可以得到,填芯自保温砌块墙体、夹芯自保温砌块墙体和外保温墙体的平均相对湿度为61.35%、58.8%、58.3%,墙体内部相对湿度均低于室外环境相对湿度并且低于80%,湿积累风险较低且不会产生霉菌。可以得出,夏季工况墙体水分来源主要是室外环境,虽然夏季室外温湿度较高,但是保温墙体湿积累风险较低,不存在冷凝与霉变风险。

综上所述,寒冷地区保温墙体冬季工况下的墙体热负荷高于夏季工况,并且冬季保温墙体内部湿风险较高,容易产生湿积累并发生霉变。两种自保温砌块墙体的保温隔热效果均优于同等厚度的外保温墙体。其中,填芯自保温砌块墙体隔湿效果与外保温墙体接近,湿积累风险低,没有霉菌与冷凝风险。但是夹芯自保温砌块墙体在冬季工况下墙体内部会产生严重湿积累,冷凝与霉变风险较高。

4 湿积累分析

根据以上分析,冬季工况下夹芯自保温砌块墙体内部会产生严重湿积累。应对夹芯自保温砌块墙体湿积累原因进行分析,并针对湿积累原因采取适当的防潮措施。

在冬季工况下,寒冷地区室外处于低温低湿环境而室内环境高温高湿,室内水蒸气压力大于室外,湿分由内向外传递。图11为夹芯自保温砌块墙体内部水蒸气压力分布,饱和蒸汽压力与水蒸气分压力的变化趋势相似,但变化幅度不同,饱和水蒸气压力仅受温度影响,而水蒸气分压力除了受温度影响外还受到水蒸气含量的影响。从内壁面到距壁面0.15 m处,饱和水蒸气压力下降了880 Pa而水蒸气分压力仅仅下降335 Pa,水蒸气分压力降幅

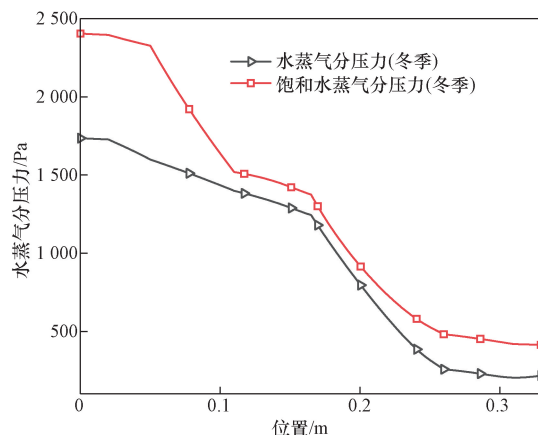


图11 墙体内部水蒸气分压力分布

Fig. 11 Water vapor partial pressure distribution inside the wall

大于饱和水蒸气压力降幅,使得相对湿度也持续下降。这是由于室内水分透过内壁面向墙体内部迁移积累,夹芯自保温砌块的空腔使得水分更加轻易透过墙体,且由于保温夹芯层阻断了水蒸气向室外发散,使得夹芯自保温砌块保温夹芯靠近室内侧积累了较多的水分,导致保温墙体内部相对湿度大于室内相对湿度,并在保温层与基层材料界面处达到最大,最大相对湿度达到 92.1%,保温层平均相对湿度达到 80.4%。

夹芯自保温砌块保温层与基层界面处,即湿积累处的饱和水蒸气分压力以及水蒸气分压力随时间变化的曲线如图 12 所示,由此可以分析出该处相对湿度变化过程。建筑材料热湿传递过程中热量传递的速度远大于水分的传递速度,水分的传递相较于热量传递具有一定的滞后性,由于该处温度受室内外环境温度所影响,饱和水蒸气分压力呈先下降后上升趋势。而由于室内水蒸气持续向该处传递积累,水分含量升高导致水蒸气分压力上升,饱和水蒸气分压力与水蒸气分压力曲线逐渐靠近,因此冬季工况下该处相对湿度持续上升。

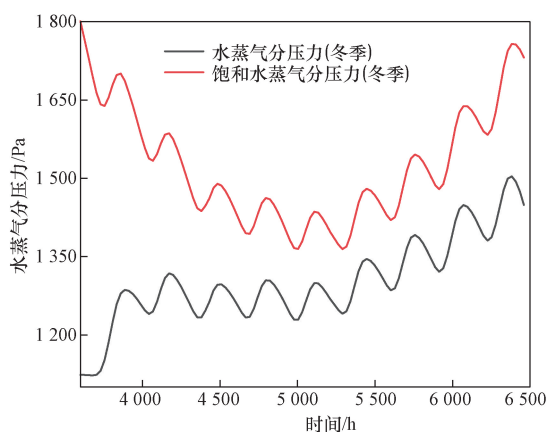


图 12 湿积累处的水蒸气压力

Fig. 12 Water vapor pressure at the site of wet accumulation

分析可知,冬季工况下夹芯自保温砌块空腔的存在,使自保温砌块墙体整体的蒸汽渗透阻降低,且由于室内相对湿度较高,室内水分较为容易透过墙体并在保温材料与基层材料界面处聚集,导致墙体整体相对湿度较高。针对以上原因采取相应措施来降低夹芯自保温砌块墙体的相对湿度。

5 结论

以寒冷地区典型气候城市保定市为例,研究由两种不同类型的混凝土复合自保温砌块砌筑而成的保温墙体,在实际气候条件下的热湿耦合传递特性,并与同等厚度的外保温墙体进行对比,得到以

下结论。

(1) 两种复合自保温砌块墙体在冬夏两种工况下的保温隔热效果接近,均优于同等墙体厚度的外保温墙体,有利于减轻热负荷,降低建筑能耗。但是,填芯自保温砌块墙体隔湿效果优于夹芯自保温砌块墙体,减轻了室内的湿负荷,有利于室内保持相对稳定的湿度环境。因此,综合来看填芯自保温砌块性能更佳。

(2) 夏季工况下保温墙体内部湿风险较低,不存在霉菌滋生与冷凝风险。但在冬季工况下,两种复合自保温墙体内部的湿风险均高于外保温墙体。填芯自保温砌块墙体、夹芯自保温砌块墙体、外保温墙体内部相对湿度的最大值分别为 73.9%、92.1%、68.6%。夹芯自保温砌块墙体湿积累明显,且具有较高的霉变风险,使用寿命和保温性能难以保证。

(3) 夹芯自保温砌块的保温夹层虽然隔断了热桥,但在由于空腔的存在降低了墙体的传湿阻力,冬季墙体内部产生了较为严重湿积累,室内相对湿度较高时不宜采用带空腔的夹芯自保温砌块。对于含有空腔的夹芯自保温砌块,应该对空腔大小与空腔位置进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 蒋金梁, 颜晓强, 曹云中, 等. 保温结构一体化技术在夏热冬冷地区的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 156-168.
Jiang Jinling, Yan Xiaoqiang, Cao Yunzhong, et al. Research on the application of integrated technology of thermal insulation structure in hot summer and cold winter regions[J]. New Building Materials, 2020, 47(10): 156-168.
- [2] Li F L, Chen G L, Zhang Y Y, et al. Fundamental properties and thermal transferability of masonry built by autoclaved aerated concrete self-insulation blocks[J]. Materials, 2020, 13(7): 1680.
- [3] Yun T S, Jeong Y J, Han T S, et al. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes[J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 125-132.
- [4] Qu X L, Zhao X G. Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 525-516.
- [5] 吴聪, 刘福胜, 范军, 等. 工字型自保温混凝土夹心秸秆砌块墙体热工性能研究[J]. 混凝土, 2015(6): 127-130.
Wu Cong, Liu Fusheng, Fan Jun, et al. Research on the heat transfer performance of I-shaped self-insulation concrete block wall filling with compressed blocks of straw[J]. Concrete, 2015(6): 127-130.
- [6] 隋学敏, 龚书宽, 徐彪, 等. 混凝土复合自保温砌块热工性能研究与优化设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 87-96.
Sui Xuemin, Gong Shukuan, Xu Biao, et al. Thermal performance research and optimal design of concrete self-insulation compound block[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2022, 39

- (1): 87-96.
- [7] 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.
- Wei Ming, Wang Bo, Liu Shunbo. Coupled heat and moisture transfer simulation of deep underground envelopes based on COMSOL[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5729-5736.
- [8] 罗羽, 谢东, 周曦, 等. 多孔介质墙体热湿传递实验测试研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8414-8420.
- Luo Yu, Xie Dong, Zhou Xi, et al. Experimental test of heat and moisture transfer law of porous media wall[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(19): 8414-8420.
- [9] 李玮, 刘芳, 陈宝明. 多层墙体内部湿迁移对传热的影响[J]. 建筑科学, 2017, 33(8): 117-122.
- Li Wei, Liu Fang, Chen Baoming. Effects of moisture transfer on heat transmission of multilayer wall[J]. Building Science, 2017, 33(8): 117-122.
- [10] 陈友明, 董文强, 鲍洋, 等. 两种建筑围护结构动态热湿耦合传递模型对比与验证[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(11): 133-140.
- Chen Youming, Dong Wenqiang, Bao Yang, et al. Comparisons and validation of two dynamic models for coupled heat and moisture transfer in building envelopes[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2020, 47(11): 133-140.
- [11] Luikov A V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies [M]. Oxford: Pergamon, 1966: 75-99.
- [12] Philip J R, Devries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222-232.
- [13] Melin C B, Hagertoft C E, Holl K, et al. Simulations of moisture gradients in wood subjected to changes in relative humidity and temperature due to climate change[J]. Geosciences, 2018, 8(10): 378.
- [14] Lu X S. Modelling of heat and moisture transfer in buildings (I): model program [J]. Energy and Buildings, 2002, 34(10): 1033-1043.
- [15] 黄建恩, 吕恒林, 冯伟, 等. 蒸压加气混凝土砌块墙体热湿耦合传递特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 88-94.
- Huang Jianen, Lü Henglin, Feng Wei, et al. Coupled heat and moisture transmission characteristics of autoclaved aerated concrete block wall[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 88-94.
- [16] 刘艳峰, 刘加平. 建筑外壁面换热系数分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2008, 40(3): 407-412.
- Liu Yanfeng, Liu Jiaping. Analysis of heat transfer coefficient of building exterior wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(3): 407-412.
- [17] The Standards Policy and Strategy Committee. Hygrothermal performance of building components and building elements: assessment of moisture transfer by numerical simulation; BS EN15026: 2007[S]. London: BSI, 2007.