

牛粪灰(CMA)混凝土复合保温砌块设计及 墙体传热分析

陈新孝, 韩笛扬

(西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123)

摘要: 牛粪灰(简称 CMA)是一种质纯且成分相对稳定的畜禽养殖废弃物生物质灰。为探讨 CMA 混凝土复合保温砌块热工性能的影响因素, 尝试采用单排孔、双排孔、错位双排孔以及保温材料替代横壁的 CMA 混凝土复合保温砌块, 研究了在不同 CMA 掺量下各保温砌块的热阻值以及组合成墙体后的传热系数。结果表明: 随着 CMA 掺量的增加, 砌块的热阻值随之增大, 墙体的传热系数随之减小; 在相同孔洞率条件下, 砌块纵肋宽度越小, 热阻越大, 墙体传热系数越小; 在砌块内外横壁替换岩棉板和挤塑聚苯乙烯塑料板后, 其保温性能明显提高, 并得到了替换材料厚度与墙体传热系数关系。

关键词: 牛粪灰(CMA); 保温砌块; 热阻; 传热系数

中图分类号: TU531.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0060-09

Design of CMA concrete composite insulation block and wall heat transfer analysis

CHEN Xinxiao, HAN Diyang

(Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: Cattle manure ash (CMA) is a pure, non-toxic and harmful component of biomass ash. In order to study the factors affecting the thermal performance of CMA concrete composite insulation block, single row hole, double row hole, dislocation double row hole and insulation material were used to replace the transverse wall of CMA concrete composite insulation block. The thermal resistance value of each insulation block and the heat transfer coefficient after the composite wall were studied under different CMA content. The results show that with the increase of CMA content, the thermal resistance of the block increases, and the heat transfer coefficient of the wall decreases. Under the same cavity ratio, the smaller the width of the longitudinal rib, the greater the thermal resistance and the smaller the heat transfer coefficient of the wall. After replacing the rock wool board and extruded polystyrene plastic board on the inside and outside transverse walls of the block, the thermal insulation performance is improved obviously, and the relationship between the thickness of the replacement material and the heat transfer coefficient of the wall is obtained.

Key words: cattle manure ash; insulation block; thermal resistance; heat transfer coefficient

对畜禽养殖业废弃物的回收利用, 即从畜禽养殖废弃物中回收有用的资源和能源是近年来研究的热点和难点问题^[1-2], 其中利用畜禽养殖废弃物进行燃烧发电已经成为世界各国发展“低碳经济”的重要途径之一^[3]。研究表明, 畜禽养殖废弃物燃烧后产生的生物质灰分中含有一定量类似于火山灰的成分, 因而能够用于建筑材料的生产^[4]。在我国边远的西北寒区、牧区, 牛粪作为人们日常生活的燃料, 是一种重要的物质资源。牛粪燃

烧后产生了大量的牛粪灰(Cattle Manure Ash, 简称 CMA), 大都倾倒处理, 这不利于资源循环利用且易造成环境危害^[5]。实现 CMA 的工程应用, 能够实现 CMA 的废物再利用, 有效降低水泥用量, 达到绿色环保的目的。研究表明, 利用 CMA 制作的混凝土不但强度有保证, 且导热系数低^[6]。例如, Thomas 等^[7]使用 CMA 替代水泥制作混凝土进行强度测试, 试验结果表明: 混凝土的强度随着 CMA 掺量的增加而降低, 但降低幅度不大且

收稿日期: 2021-08-16

修改稿日期: 2022-10-06

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2020JM-641), 天津市自然科学基金项目(19YFZCSN01140)

第一作者: 陈新孝(1964—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事绿色建筑材料及混凝土耐久性问题研究。E-mail: chenxinxiao@126.com

通信作者: 韩笛扬(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料性能和绿色建筑研究。E-mail: 867337090@qq.com

能达到规定的使用要求, 证明 CMA 是可以用于制作混凝土; Sahin. S 等^[8]在混凝土中使用 5%~30% 的牛粪灰取代水泥, 研究了牛粪灰混凝土的性能, 实验表明牛粪灰混凝土的力学性能良好; 周述光等^[9]测定了牛粪灰(CMA)的火山灰活性, 结果表明 CMA 具有良好的火山灰活性, 验证了 CMA 在一定程度上取代水泥的可行性; 陈均^[10]通过对不同配比和不同掺量的 CMA 混凝土进行了热物理性能试验, 发现了 CMA 能一定程度上降低混凝土导热系数. 但是, CMA 混凝土的强度与导热呈现矛盾关系, 如何在保证 CMA 混凝土的强度的前提下, 提高 CMA 混凝土导热性能, 对寒冷地区建筑材料开发具有现实意义. 鉴于混凝土复合保温砌块作为一种建筑墙体材料具有节能、环保的优点, 已在建筑节能设计中广泛应用^[11]. 我们曾经利用 CMA 混凝土配制出了一种性能优良的自保温混凝土砌块^[12-13], 证明了 CMA 混凝土作为自保温砌块材料的可行性, 但并未对不同砌块结构形式对砌块热工性能产生的影响进行分析. 本文在已有研究成果的基础上, 设计了四种不同结构形式的 CMA 混凝土复合保温砌块, 并通过 COM-SOL 有限元软件分析了不同 CMA 掺量、孔型排布、肋宽以及保温材料使用量对 CMA 混凝土砌块热工性能的影响, 分析出最优的 CMA 混凝土复合砌块形式, 为 CMA 混凝土的工程应用提供技术依据.

1 砌块设计及传热计算

1.1 原材料及相关参数测定

牛粪灰(CMA)混凝土复合保温砌块材料分为实体材料、填充保温材料和替换保温材料. 其中, 实体材料为 CMA 混凝土, 鉴于过高的 CMA 掺量会影响混凝土的力学性能, 本文将 CMA 最大掺量控制为 15%^[14]. 使用等量替代法分别设计了 CMA 掺量为 0%、5%、10% 和 15% 的 CMA 混凝土配合比, 其配合比见表 1.

表 1 CMA 混凝土配合比
Tab. 1 Mix ratio of CMA concrete

CMA 掺量/%	水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	CMA/(kg·m ⁻³)
0	175	398	566	1 261	0
5	175	378.10	581.53	1 340.65	19.90
10	175	358.20	572.83	1 320.69	39.80
15	175	338.30	564.15	1 300.60	59.70

制作不同配合比的 CMA 混凝土试件, 试件尺寸为 Φ200 mm×400 mm, 内留 Φ40 mm 圆孔, 如图 1(a)所示. 使用 HR-4A 型混凝土热物理参数测定仪测定其导热系数, 如图 1(b)所示.



图 1 CMA 混凝土导热系数试验
Fig. 1 Thermal conductivity test of CMA concrete

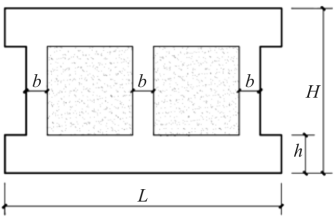
经测定, 不同掺量下 CMA 混凝土导热系数见表 2 所示, 其他材料导热系数可依据 GB50176—2016《民用建筑热工设计规范》规定取值.

表 2 材料导热系数
Tab. 2 Thermal conductivity of material

墙体组成	材料	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]
砌块实体部分	基准混凝土	1.573 9
	5%CMA 混凝土	1.565 5
	10%CMA 混凝土	1.552 4
	15%CMA 混凝土	1.524 1
砌块内保温部分	聚苯乙烯泡沫塑料	0.039
砌块外横壁替换部分	岩棉板	0.041
砌块内横壁替换部分	挤塑聚苯乙烯泡沫板	0.030
灰缝	水泥砂浆	0.93

1.2 砌块设计

参照 JGT 407—2013《自保温混凝土复合砌块》标准, 本文设计的 CMA 混凝土复合保温砌块外观尺寸为 390 mm×240 mm×190 mm, 孔洞率为 45%, 孔型设计采用了单排孔、双排孔和错位双排孔的孔型, 分别定义为 S1、S2 和 S3 型. 砌块实体材料采用 CMA 混凝土, 保温填充材料采用聚苯乙烯泡沫塑料. 为考虑墙体实际应用, 设计砌块 S4, 外横壁采用一定厚度的岩棉板作为替代, 内横壁采用一定厚度的挤塑聚苯乙烯泡沫塑料板作为替代.



(a) 单排孔砌块模型 S1

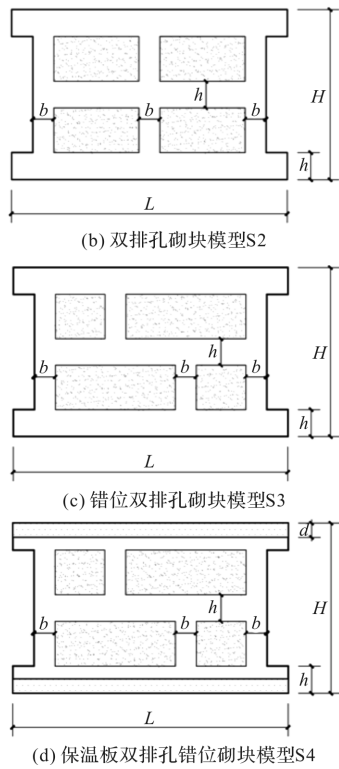


图 2 复合保温砌块设计

Fig. 2 Structure of composite insulation block

为研究相同孔洞率(45%)下不同纵肋宽度 b 和横壁宽度 h 对砌块及墙体传热系数的影响,将纵肋宽度 b 最小值限定为 20 mm,并选择了 20 mm、25 mm、30 mm、35 mm 和 40 mm 五种纵肋宽度进行分析,设计砌块的编号和尺寸见表 3 所示。

表 3 砌块编号和尺寸

Tab. 3 Block numbering and dimensions

砌块类型	b/mm	h/mm
S1-1	20	61.01
S1-2	25	58.42
S1-3	30	55.60
S1-4	35	52.50
S1-5	40	49.09
S2-1、S3-1、S4-1	20	41.72
S2-2、S3-2、S4-2	25	40.00
S2-3、S3-3、S4-3	30	38.11
S2-4、S3-4、S4-4	35	36.04
S2-5、S3-5、S4-5	40	33.75

1.3 分析方法

用 COMSOL 有限元软件对 CMA 混凝土复合砌块及墙体进行稳态传热仿真分析,其过程如下:

(1) 确定砌块及墙体尺寸. 以 S2-3 和 SW2-3 为例,设计砌块及墙体三维模型的结构和尺寸如图 3 所示(以 S2-3 和 SW2-3 为例);

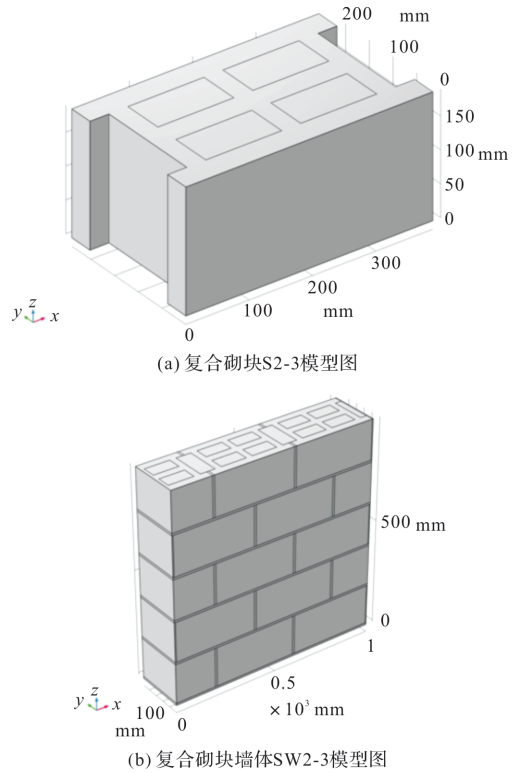


图 3 砌块及墙体三维模型

Fig. 3 3D model of block and wall

(2) 定义材料属性. 按试验数据及相关规范定义材料属性,其中,砌块墙横向砌块连接处孔洞内部材料定义为空气,使用 COMSOL 自带材料库中的空气属性;

(3) 设置物理场. 单独砌块采用固体传热物理场,墙体采用固体与流体传热物理场,并在砌块连接处的孔洞处考虑空气的不等温流动. 砌块和墙体的内表面与外表面采用对流热通量边界条件,其余表面采用绝热缘边界,参照 GB50176—2016《民用建筑热工设计规范》,外表面温度采用陕西省冬季室外计算平均温度,内表面温度采用采暖房间计算温度,内外表面换热系数参照冬季典型工况围护结构取值,热工性能设计参数见表 4;

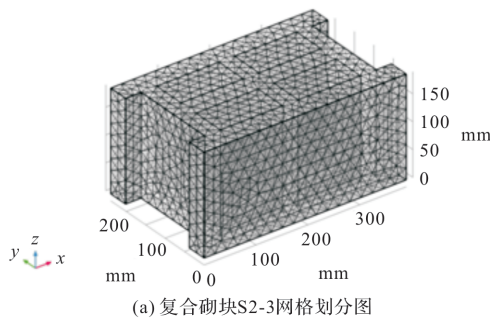
表 4 砌块墙热工性能设计参数

Tab. 4 Design parameters of thermal performance of

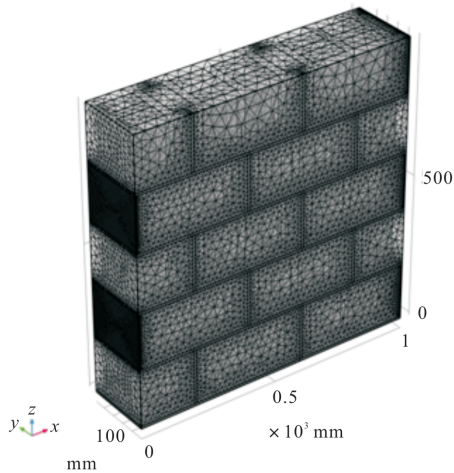
block walls			
外表面计 算温度/ $^{\circ}\text{C}$	内表面计 算温度/ $^{\circ}\text{C}$	外表面换热 系数/ $[\text{W} \cdot$ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$	内表面换热 系数/ $[\text{W} \cdot$ $(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$
-6.6	18	23	8.7

(4) 网格划分. 使用物理场控制网格序列构建网格,网格划分如图 4 所示;

(5) 稳态计算. 根据计算得到的热流密度云图,得出平均热流密度 q ,为模拟双热流计法墙体



(a) 复合砌块S2-3网格划分图



(b) 复合砌块墙体SW2-3网格划分图

图 4 砌块及墙体模型网格划分示意图

Fig. 4 Sketch map of block and wall model

导热实验, q 采用内表面和外表面平均热流密度均值^[15]. 复合保温砌块及其组合墙体的导热系数 λ 按式(1)计算, 热阻值 R 按式(2)计算, 传热系数 K 按式(3)计算.

$$\lambda = \frac{q\delta}{t_1 - t_2} \tag{1}$$

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \tag{2}$$

$$K = \frac{1}{R_i + R + R_e} \tag{3}$$

式中: λ 为复合保温砌块整体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q 为内表面和外表面平均热流密度均值, W/m^2 ; δ 为砌块和砌块墙厚度, m ; K 为砌块墙的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_1, t_2 为内、外表面温度; R 为复合保温砌块热阻; R_i, R_e 分别为内、外表面换热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, 根据 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》的规定, $R_i = 0.11 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, $R_e = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

2 结果分析与讨论

2.1 孔型对砌块热阻值影响

分析单独砌块时, 采用的热传导方程如下式(4). 在分析单个砌块内部热流分布时使用固体稳态导热研究方法, 不考虑材料密度 ρ 、热容 C_p 和

速度场 u 影响. 在分析墙体热流分布时, 由于砌块横向连接处为空气, 因而采用固体与流体传热接口与层流接口耦合构建物理场, 其原理为通过式(5)Navier Stokes 方程得到空气流动速度场 u , 代入到传热方程(4), 考虑空气密度 ρ 、热容 C_p 影响, 实现流体传热与固体传热的单向耦合计算^[16-18].

$$\rho C_p u \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q \tag{4}$$

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \mu \nabla u + F \tag{5}$$

式中: ∇ 为梯度算子; ∇T 为温度梯度; Q 为热源, W/m^3 ; u 为速度矢量, m/s ; C_p 为恒压热容, $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$; ρ 为密度, kg/m^3 ; F 为单位体积流体受的外力, N ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

取 S1-3、S2-3、S3-3 砌块进行热阻值对比, 其中实体材料为 5% CMA 掺量的 CMA 混凝土, 结果如表 5 所示.

表 5 不同孔型砌块热工参数

Tab. 5 Thermal parameters of different hole blocks

砌块 编号	内侧平均 热流密度	外侧平均 热流密度	内侧平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	外侧平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	热阻/ [($\text{m}^2 \cdot \text{K}$) $\cdot \text{W}^{-1}$]
	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$			
S1-3	40.995	40.69	13.38	-4.85	0.446
S2-3	40.348	39.489	13.65	-4.95	0.466
S3-3	39.633	38.064	13.85	-5.03	0.486

由表 5 可知, 错位双排孔砌块内外侧平均热流密度最小, 内侧平均温度最大, 外侧平均温度最小, 热阻值最大, 因而保温性能最好. 双排孔砌块的热阻较单排孔砌块增加了 4.5%; 错位双排孔砌块热阻较双排孔砌块增大了 9.0%.

从计算得到的模型热流密度云如图 5, 可以清晰看到砌块模型各部位的传热能力. 由图可见实体材料中热流密度明显大于保温材料, 热流主要通过实体材料传递. 其中, 实体材料中纵肋中热流密度较大, 横壁热流密度较小, 热流主要通过纵肋传递.

对比砌块 S1 和 S2, 由于 S1 砌块无横肋, 热量主要在纵肋中纵向传递, 而 S2 砌块由于有横肋存在, 纵肋中热量往横肋中分散传递, 部分降低了热流传导效率, 提高了砌块的热阻; 对比砌块 S2 和 S3, S3 中由于中间纵肋错位使得中间纵肋热量难以纵向传递, 更多地需要通过横肋往另一条纵肋传递, 传热路径增大, 对比砌块 S2 更降低了热流传导效率^[19], 但由于中部纵肋的错位, 使得热量集中于边缘纵肋中传播, 从热流密度云图中

可看出,砌块 S3 最大热流密度达到 273 W/m^2 ,集中于左右侧纵肋.

2.2 孔型对墙体传热系数影响

为分析孔型对墙体传热系数的影响,取 S1-3、S2-3、S3-3 砌块模型进行组合形成墙体模型 SW1-3、SW2-3、SW3-3 进行传热系数对比,分析结果如表 6 所示.

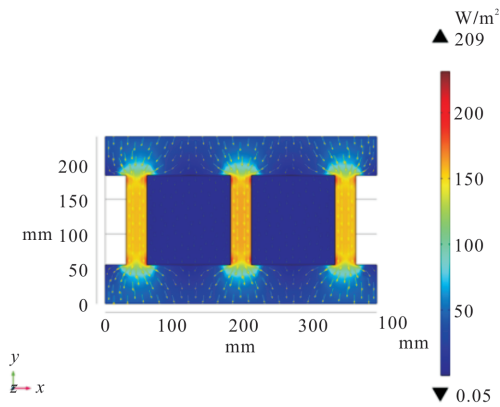
表 6 不同孔型砌块墙体热工参数

Tab. 6 Thermal parameters of block walls with different holes

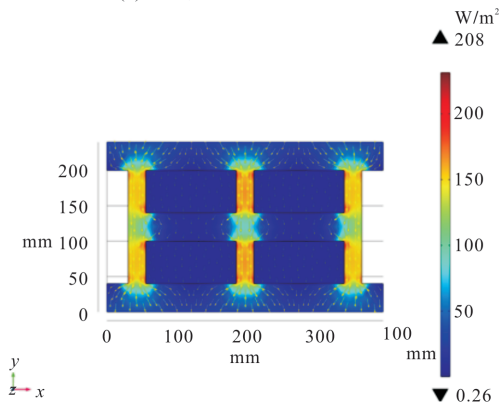
墙体 编号	内侧平均 热流密度	外侧平均 热流密度	内侧 平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	外侧 平均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	传热系数
	$/(W \cdot m^{-2})$	$/(W \cdot m^{-2})$			$/(W \cdot m^{-2})/(W \cdot m^{-2})$
SW1-3	43.595	43.621	13.02	-4.72	1.769
SW2-3	43.317	42.873	13.19	-4.78	1.737
SW3-3	42.705	41.659	13.35	-4.84	1.696

由表 6 可见,错位双排孔砌块墙体内外侧平均热流密度最小,内侧平均温度最大,外侧平均温度最小,传热系数值最小,因而保温性能最好.双排孔砌块墙体的传热系数较单排孔砌块墙体传热系数减小了 1.8% ;错位双排孔砌块墙体传热系数较双排孔砌块墙体减小了 2.4% .

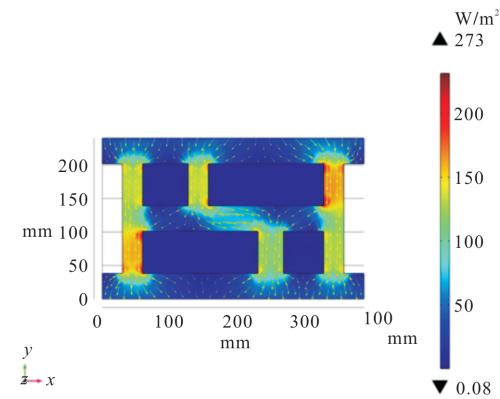
从组合墙体热流密度云图可以分析墙体各部位传热能力,由图 6 可明显看出,砌块纵肋对应的墙体表面热流密度较大,说明热流主要通过墙体中砌块纵肋对应的表面传入^[20-22].空气和保温材料的热流密度在靠近砌块横壁处较大,在靠近砌块纵肋处的热流密度较小,热流主要通过砌块横壁传递到保温材料和空气中.



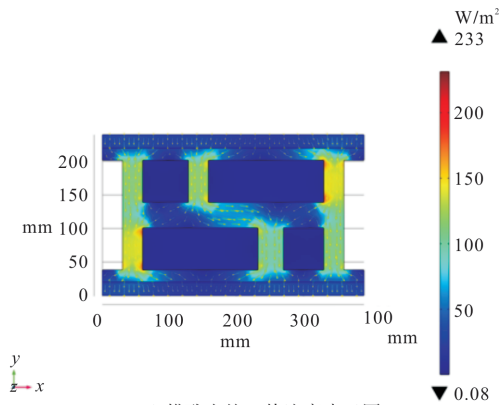
(a) 单排孔砌块S1热流密度云图



(b) 双排孔砌块S2热流密度云图



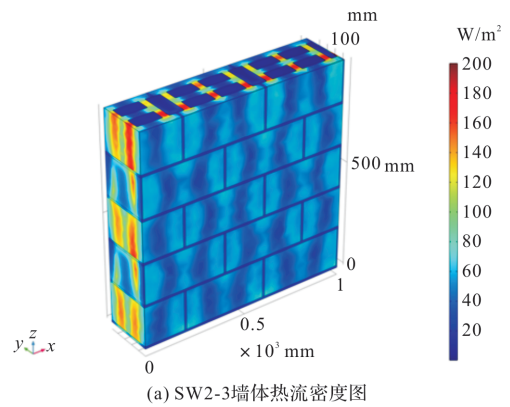
(c) 双排孔砌块S3热流密度云图



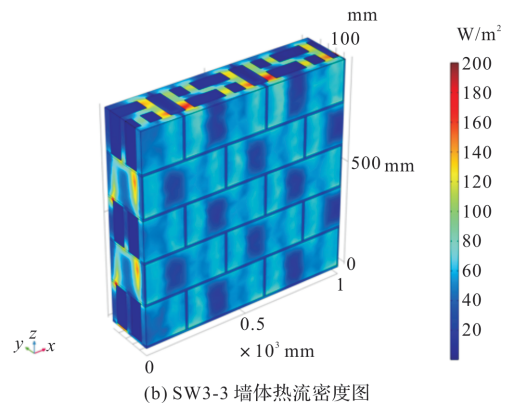
(d) 双排孔砌块S4热流密度云图

图 5 砌块热流密度云图

Fig. 5 Cloud chart of block heat flux



(a) SW2-3墙体热流密度图



(b) SW3-3墙体热流密度图

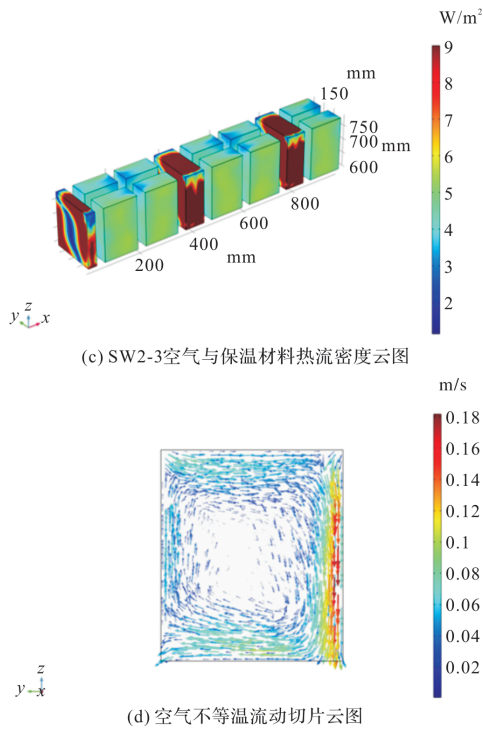


图 6 墙体热流密度云图
Fig. 6 Cloud chart of wall heat flux

从空气与保温材料热流密度云图可见, 保温材料热流密度分布较为均匀, 靠近砌块中间部位的保温材料热流密度较其他位置小, 而空气的热流密度较不均匀, 在中间部位热流密度最小, 其原因可参照空气不等温流动图. 从空气不等流动图中可以看到空气主要靠壁进行循环流动, 中间部分空气流动较少, 对流传热随砌块壁进行传递. 由空气与保温材料热流密度云图可看出空气热流密度虽较保温材料高, 但较砌块实体材料部位而言热流密度非常微小, 因此, 在砌块连接处仍可达到保温需求^[23].

2.3 CMA 掺量对砌块热阻的影响

为研究 CMA 掺量 k 对单个砌块热阻的影响, 取 0%、5%、10% 和 15% 的 CMA 掺量下混凝土导热系数的实验值, 导入各砌块模型中, 采用 COMSOL 计算砌块模型的内外侧热流密度以及内外表面的平均温度, 通过式(1)和式(2)得到单个砌块的热阻值, 具体数值见表 7.

表 7 不同 CMA 掺量下砌块热阻

Tab. 7 Thermal resistance of block with different CMA content				
	S1-1 热阻	S2-1 热阻	S3-1 热阻	S4-1 热阻
$k/\%$	$/[(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}]$	$/[(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}]$	$/[(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}]$	$/[(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}]$
0	0.566	0.597	0.615	1.805
5	0.569	0.600	0.618	1.807
10	0.573	0.605	0.623	1.811
15	0.583	0.615	0.633	1.822

由表 7 可以看出, 随砌块实体材料所用混凝土 CMA 掺量的增加, 砌块热阻呈上升趋势, 在 15% 时达到最大值. 在图 7 中, Δk 为 CMA 混凝土砌块较基准混凝土砌块 CMA 掺量增加值, ΔR 为 CMA 混凝土砌块较基准混凝土砌块热阻增加值. 由图 7 可知, 随 CMA 掺量增加, 砌块热阻增加值上升, 各类型砌块热阻增加值相差也更加明显, 其中 S3-1 热阻增加值最大, 说明 CMA 掺量对错位双排孔砌块热阻影响最大, 且各砌块热阻增加值在掺量由 10% 上升到 15% 时最大, 最大上升幅度为 1.61%. 由上述分析可得, 掺入 15% 的 CMA 对提高砌块保温能力的效果最为明显.

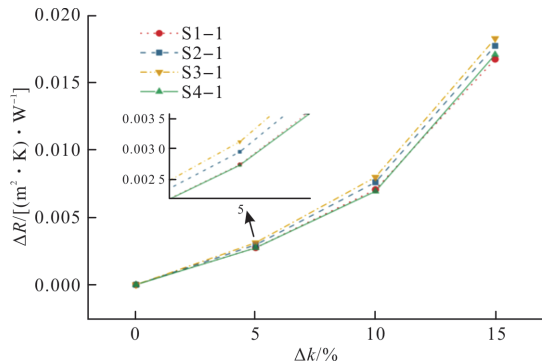


图 7 掺量增加值对热阻增加值的影响
Fig. 7 Effect of admixture increment on thermal resistance increment

2.4 CMA 掺量对墙体传热系数影响

为研究 CMA 掺量 k 对砌块墙体传热系数的影响, 取 0%、5%、10% 和 15% 的 CMA 掺量下混凝土的导热系数导入各砌块墙体模型中, 采用 COMSOL 计算墙体模型的内外侧热流密度以及内外表面的平均温度, 通过式(1)和式(2)得到墙体整体的传热系数值, 具体数值见表 8.

由表 8 可以看出, 随 CMA 掺量的增加, 墙体传热系数降低, 在 15% 时达到最小值. 在图 8 中, Δk 为 CMA 砌块墙体较基准砌块墙体 CMA 掺量增加值, ΔK 为 CMA 砌块墙体较基准砌块墙体传热系数减小值, 随 CMA 掺量增加, 墙体传热系数减小值增大, 经分析可得各砌块墙体传热系数的减小在掺量由 10% 增加到 15% 时最为明显. 其中, SW1-1 传热系数降幅最大, 达到 1.12%, 且 CMA 掺量对横壁使用替换材料的砌块墙体影响最小, 当 CMA 掺量为 0%~5% 时对普通双排孔砌块墙体影响最大, 掺量为 10%~15% 时对单排孔砌块影响最大. 从图 8 可以看出, CMA 掺量为 15% 的 CMA 对提高砌块墙体保温能力的效果最为明显.

表8 不同CMA掺量墙体传热系数

Tab. 8 Heat transfer coefficient of wall with different CMA content

$k/\%$	SW1-1 传热系数 /[W · (m ² · K) ⁻¹]	SW2-1 传热系数 /[W · (m ² · K) ⁻¹]	SW3-1 传热系数 /[W · (m ² · K) ⁻¹]	SW4-1 传热系数 /[W · (m ² · K) ⁻¹]
0	1.534	1.484	1.464	0.806
5	1.529	1.478	1.459	0.804
10	1.522	1.471	1.452	0.802
15	1.505	1.455	1.436	0.798

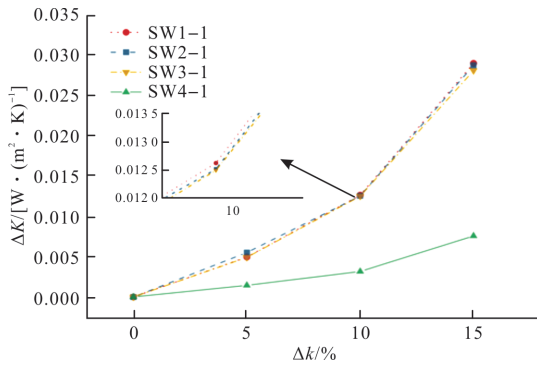


图8 掺量增加值对传热系数减小值影响

Fig. 8 Influence of the increasing value of mixing amount on the decreasing value of heat transfer coefficient

2.5 砌块纵肋宽度对热阻值的影响

为探讨砌块相同孔洞率条件下纵肋宽度对单一砌块热阻值的影响,选用CMA掺量为5%的砌块S1、S2、S3和S4,对纵肋宽度不同的单一砌块进行热阻分析,分析结果见图9。

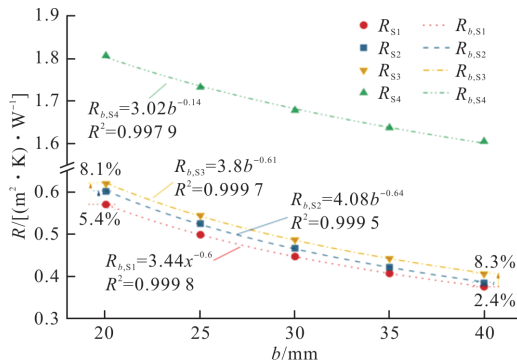


图9 砌块纵肋宽度对热阻的影响

Fig. 9 Influence of rib width of block on thermal resistance

由图9可以看出,随砌块纵肋宽度的增加,热阻值逐渐减小,其中,砌块S1热阻由0.569 m² · K/W降低到0.375 m² · K/W,降低了51.7%。砌块S2热阻由0.60 m² · K/W降低到0.384 m² · K/W,降低了36.0%。砌块S3热阻由0.618 m² · K/W降低到0.406 m² · K/W,降低了34.3%。砌块S4热阻由1.822 m² · K/W降低到1.617 m² · K/W,降低了11.3%。对比砌块S1和S2,随砌块纵肋宽度减小,两者热阻差值逐渐减小,由0.031 m² · K/W减小到0.009 m² · K/W,而对比砌块S2和S3,随纵肋宽度减小,两者热阻差值逐

渐增大,由0.018 m² · K/W增大到0.021 m² · K/W。

通过对试验数据进行拟合,可得到纵肋宽度对不同砌块的热阻值影响公式如下。

$$R_{b,S1} = 3.435b^{-0.6}, R^2 = 1 \quad (6)$$

$$R_{b,S2} = 4.083b^{-0.639}, R^2 = 0.99948 \quad (7)$$

$$R_{b,S3} = 3.803b^{-0.606}, R^2 = 0.99965 \quad (8)$$

$$R_{b,S4} = 3.0184b^{-0.142}, R^2 = 0.99788 \quad (9)$$

式中: $R_{b,S1}$, $R_{b,S2}$, $R_{b,S3}$, $R_{b,S4}$ 分别为砌块S1、S2、S3和S4的热阻, m² · K/W。 b 为砌块纵肋宽度, mm。

2.6 砌块纵肋宽度对墙体传热系数影响

考虑到CMA掺量为15%时复合保温砌块热阻最大,因而采用15% CMA掺量的SW1、SW2、SW3和SW4型墙体作为模型,用COMSOL计算墙体的内外热流密度以及内外表面的平均温度,通过式(1)、式(2)和式(3)得到墙体的传热系数值,结果见图10所示。

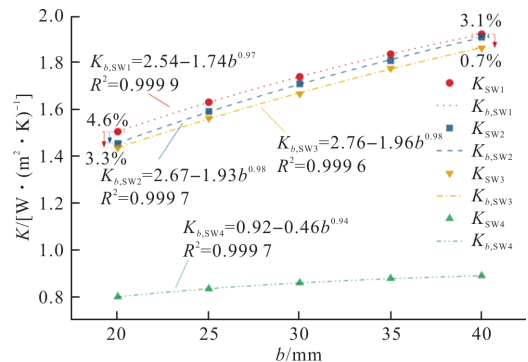


图10 砌块纵肋宽度对墙体传热系数影响

Fig. 10 Influence of block rib width on heat transfer coefficient of wall

由图10可见,随砌块纵肋宽度的增加,墙体传热系数增加,墙体SW1传热系数由1.505 W/(m² · K)增加到1.923 W/(m² · K),增加了21.7%。墙体SW2传热系数由1.455 W/(m² · K)增加到1.910 W/(m² · K),增加了31.3%。墙体SW3传热系数由1.436 W/(m² · K)增加到1.864 W/(m² · K),增加了29.8%。墙体SW4由于砌块横壁部分为聚苯乙烯和岩棉保温材料,砌块纵肋厚度对传热系数最小,由0.798 W/(m² · K)增加到0.888 W/(m² · K),增加了11.3%。对比墙体SW1和SW2,随砌块纵肋

宽度减小, 墙体传热系数差值逐渐减小, 由 $0.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.013 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 而对比墙体 SW2 和 SW3, 随纵肋宽度减小, 热阻差值逐渐增大, 由 $0.019 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 增大到 $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

通过对试验数据进行拟合, 得到纵肋宽度对单排孔、普通双排孔和错位双排孔砌块热阻值影响公式如下。

$$K_{b,SW1} = 2.547 - 1.737b^{0.974}, R^2 = 0.999\ 99 \quad (9)$$

$$K_{b,SW2} = 2.668 - 1.931b^{0.977}, R^2 = 0.999\ 71 \quad (10)$$

$$K_{b,SW3} = 2.758 - 1.955b^{0.981}, R^2 = 0.999\ 62 \quad (11)$$

$$K_{b,SW4} = 0.921 - 0.463b^{0.936}, R^2 = 0.999\ 72 \quad (12)$$

式中: $K_{b,SW1}$, $K_{b,SW2}$, $K_{b,SW3}$, $K_{b,SW4}$ 分别为墙体 SW1、SW2、SW3 和 SW4 的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 b 为砌块纵肋宽度, mm。

2.7 复合砌块横壁替代材料厚度对墙体传热系数影响

采用纵肋宽度为 20 mm 的砌块墙体 SW4-1, 砌块实体材料采用 15% 掺量的 CMA 混凝土。将内外替代材料厚度定为 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm 时, 得到传热系数如图 11 所示。

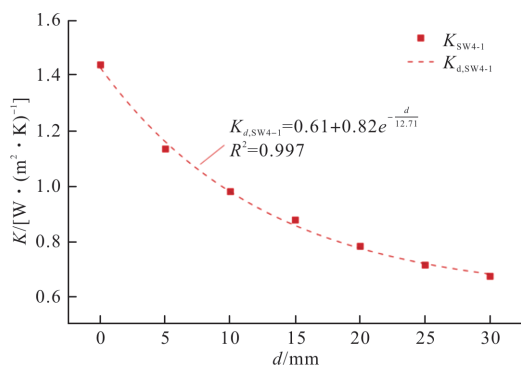


图 11 砌块横壁替代材料厚度与墙体传热系数关系

Fig. 11 Relationship between the thickness of the transverse wall substitute material and the heat transfer coefficient of the wall

由图 11 可见, 随砌块横壁替代材料的厚度增加墙体传热系数明显减小, 由 $1.436 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 下降到 $0.674 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 下降幅度为 45.5%。且厚度为 0 mm 增加到 5 mm 时下降幅度最大, 由 $1.436 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 下降到 $1.133 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 下降幅度为 21.1%。

通过对试验数据进行拟合, 得到横壁替代材料厚度与墙体传热系数的关系式为

$$K_{d,SW4-1} = 0.605 + 0.821e^{-\frac{d}{12.705}} \quad (13)$$

式中: $K_{d,SW4-1}$ 为墙体 SW4-1 的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 d 为横壁替代材料的厚度, mm。式(13) $R^2 = 0.996\ 95$ 。

3 结论

(1)通过对不同孔型的砌块以及墙体进行热工

性能分析发现, 错位双排孔砌块及其组合而成的墙体保温隔热能力均较其他孔型好;

(2)在相同孔洞率条件下, 当砌块纵肋宽度减小时, 砌块热阻值增大, 墙体的传热系数随之减小;

(3)随着 CMA 掺量的增加, 复合保温砌块的热阻值随之增大, 墙体传热系数减小, 不同结构形式的砌块在 15% 掺量时热阻值均达到最大, 墙体传热系数均达到最小。在掺量从 10% 增加到 15% 时, 不同结构形式砌块及墙体的热阻和传热系数改变最为明显, 热阻增幅最大, 达到 1.61%; 传热系数降幅最大, 达到 1.12%;

(4)随着砌块两侧横壁替代材料厚度增加, 墙体传热系数减小, 且随替代材料厚度增加, 下降幅度逐渐减小, 并通过 COMSOL 数值模拟计算, 得到了横壁替代材料厚度与墙体传热系数的关系式。

参考文献 References

- [1] 陈新孝, 周述光, 王有熙, 等. 牛粪灰(CMA)颗粒尺寸对水泥浆流变性的影响试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(6): 804-813.
CHEN Xinxiao, ZHOU Shuguang, WANG Youxi, et al. Experimental research on effect of particle size of CMA to cement slurry rheological properties[J]. J. of the Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(6): 804-813.
- [2] 朱建春. 陕西农业废弃物资源化利用问题研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHU Jianchun. Study on resource utilization of agricultural wastes in Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [3] 冀文文, 李静一, 尚中博, 等. 生物灰综合利用的研究进展[J]. 河南大学学报, 2017, 47(4): 453-463.
JI Wenwen, LI Jingyi, SHANG Zhongfu, et al. Research progress on comprehensive utilization of biological ash[J]. Journal of the Henan University, 2017, 47(4): 453-463.
- [4] CHEN Xinxiao, ZHOU Shuguang, ZHANG Haiyu. Alkali silicate reaction of cement mortar with cattle manure ash[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 722-733.
- [5] 刘一明. 强化监管切实提高畜禽养殖粪污资源化利用水平——两部委解读《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》[J]. 中国食品, 2020(15): 20-22.
LIU Yiming. Strengthen supervision and effectively improve the utilization of livestock and poultry breeding waste resources: Two ministries and commissions interpret the notice on further clarifying the requirements of returning livestock and poultry manure to land and strengthening the supervision of breeding pollution[J]. Chinese Food, 2020(15): 20-22.
- [6] VASSILEV S V, BAXTER D, ANDERSEN L K, et al.

- An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2: Potential utilization, technological and ecological advantages and challenges[J]. *Fuel*, 2013, 105(3): 19-39.
- [7] THOMAS, PERCIVAL R. Beef cattle feedlot waste ash recycling in cement mortar and concrete[C]//Proceedings of the 1997 13th International Conference on Solid Waste Technology and Management. Philadelphia, PA, USA: Widener Univ School Eng; 1997: 261-265.
- [8] Sirri Sahin, Bahar Kocaman, Ibrahim Orung, et al. Replacing cattle manure ash as cement into concrete[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2006, 6(13): 2840-2842.
- [9] ZHOU Shuguang, ZHANG Xun'an, CHEN Xinxiao. Pozzolanic activity of feedlot biomass (cattle manure) ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 493-498.
- [10] 陈均. 牛粪灰(CMA)混凝土热物理性能试验研究[D]. 西安: 西京学院, 2021.
CHEN Jun. Experimental study on thermal physical properties of cattle manure ash (CMA) concrete[D]. Xi'an: Xijing University, 2021.
- [11] 何昱. 新型建筑墙体材料及建筑节能保温技术研究[J]. *陶瓷*, 2020(7): 75-77.
HE Yu. Study on new building wall material and building energy saving and insulation technology[J]. *Ceramics*, 2020(7): 75-77.
- [12] 陈新孝, 周述光. BODA对混凝土砌块抗压强度的影响试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 42(6): 790-794.
CHEN Xinxiao, ZHOU Shuguang. Experimental study on influence of BODA on compressive strength of concrete block[J]. *Journal of the Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2010, 42(6): 790-794.
- [13] 周述光, 陈新孝. 严寒地区自保温砌块的研制[J]. *新型建筑材料*, 2009(4): 34-37.
ZHOU Shuguang, CHEN Xinxiao. Development of self-insulation block in severe cold area[J]. *New Building Materials*, 2009(4): 34-37.
- [14] ZHOU Shuguang, TANG Wenhui, XU Peng, et al. Effect of cattle manure ash on strength, workability and water permeability of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 84.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法: GB/T 10295—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
AQSIQ. Steady-state thermal resistance and related properties of thermal insulation materials & Heat flow meter method: GB/T 10295—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [16] 张国永, 王立, 刘亚辉, 等. 烧结复合保温砌块热工性能数值模拟研究[J]. *新型建筑材料*, 2016(11): 39-41.
ZHANG Guoyong, WANG Li, LIU Yahui, et al. Numerical simulation of thermal performance of sintered composite insulation block[J]. *New Building Materials*, 2016(11): 39-41.
- [17] 谢思源, 刘伟军, 宋恺芸. COMSOL仿真测定多层复合板导热系数的可靠性验证[J]. *产业与科技论坛*, 2020, 19(4): 47-49.
XIE Siyuan, LIU Weijun, SONG Kaiyun. Verification of reliability of simulation measurement of thermal conductivity of multilayer composite plates by COMSOL software[J]. *Industry and Technology Forum*, 2020, 19(4): 47-49.
- [18] 丁杨, 周双喜, 黄神恩, 等. 基于COMSOL三维仿真测定复合材料导热系数[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(9): 112-113, 116.
DING Yang, ZHOU Shuangxi, HUANG Shen, et al. Thermal conductivity of composite materials was measured based on COMSOL 3D simulation[J]. *Sensors and Microsystems*, 2018, 37(9): 112-113, 116.
- [19] 苏宇峰, 梁世英. 高孔洞率复合保温砌块设计及热工性能影响因素[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(5): 754-760.
SU Yufeng, LIANG Shiyong. Design and influence factors of thermal performance of composite insulation block with high porosity[J]. *Journal of Building Materials*. 2018, 21(5): 754-760.
- [20] 王庆轩, 石云兴, 屈铁军, 等. 自保温砌块墙体在夏热冬冷地区的传热性能研究[J]. *施工技术*, 2014, 43(24): 19-23.
WANG Qingxun, SHI Yunxing, QU Tiejun, et al. Study on heat transfer performance of self-insulation block wall in hot summer and cold winter area[J]. *Construction Technique*, 2014, 43(24): 19-23.
- [21] HU Z, HE W, JI J, et al. A review on the application of Trombe wall system in buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70: 976-987.
- [22] 周晓群, 刘凡, 丁晓燕. 内嵌秸秆板复合墙体热工性能测试及性能优化[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(5): 58-62.
ZHOU Xiaoqun, LIU Fan, DING Xiaoyan. Thermal performance test and performance optimization of composite wall with inlaid straw board[J]. *New Building Materials*, 2020, 47(5): 58-62.
- [23] 王禹. 装配式混凝土空气夹层外墙板传热性能研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
WANG Yu. Study on heat transfer performance of prefabricated concrete air sandwich wall panels[D]. Fuxing: Liaoning Technical University, 2019.

(编辑 沈 波)