

湿热环境下低吸水率玻化微珠保温砂浆配合比研究

崔双双¹, 郭晓慧², 罗天凤^{3,4}, 王旭⁵

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 阳光学院 人工智能学院, 福建 福州 350015;
3. 宇旺建工集团有限公司, 福建 福州 350821; 4. 中建旷博(福建)有限公司, 福建 厦门 361006;
5. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为解决东南沿海地区显著的风驱雨(WDR)现象易引起的建筑外墙渗水、墙体材料劣化等问题, 通过两阶段共14组配合比试验, 配制了一种低吸水率的外墙玻化微珠水泥基材料, 研究了其在湿热环境下累计吸水量与吸水后导热系数的变化规律。研究表明: 与混凝土相比, 玻化微珠水泥基材料可以显著降低材料的导热系数、吸水量, 热工性能优异, 玻化微珠保温砌块可以有效提高砌块的热工性能, 但也会降低材料抗压强度。与混凝土相比, 玻化微珠水泥基材料的导热系数、7 d累计吸水量和吸水7 d后导热系数分别为 $0.336 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 185.8 g 和 $0.483 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 分别是混凝土的26.4%、62.4%和30.1%, 吸水7 d后导热系数增大 $0.147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 增幅为混凝土的44.3%。

关键词: 湿热环境; 低吸水率; 玻化微珠水泥基材料; 配合比试验

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0213-06

Study on mix ratio of low water absorption vitrified beads insulating mortar in hydrothermal environment

CUI Shuangshuang¹, GUO Xiaohui², LUO Tianfeng^{3,4}, WANG Xu⁵

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. College of Artificial Intelligence, Yango University, Fuzhou 350015, China;
3. Yuwang Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou 350821, China;
4. China Construction Kuangbo (Fujian) Co., Ltd., Xiamen 361006, China;
5. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to address the significant issue of wind driven rain (WDR) phenomenon in the southeastern coastal areas, which can easily cause water seepage on building exterior walls and deterioration of wall materials, a total of 14 groups of mix proportion tests were carried out in two stages. A low-water-absorption vitrified beads cement-based material for exterior walls was prepared and studies were conducted about the changes in thermal properties such as water absorption rate and thermal conductivity after water absorption in humid and hot environments. Research results indicate that compared with concrete, vitrified beads cement-based materials can significantly reduce the thermal conductivity and water absorption of the material, showing excellent thermal performance. Vitrified beads insulation blocks can effectively improve the thermal performance of blocks, but also reduce the compressive strength of the materials. Compared with ordinary concrete, the thermal conductivity, cumulative water absorption after 7 days, and thermal conductivity after 7 days of water absorption of vitrified microsphere cement-based materials are $0.336 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 185.8 g , and $0.483 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, respectively, which are 26.4%, 62.4%, and 30.1% of those of concrete respectively. After 7 days of water absorption, the thermal conductivity increases by $0.147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, which is 44.3% of that of concrete.

Keywords: hydrothermal environment; low water absorption; vitrified beads cement-based materials; mix ratio test

收稿日期: 2023-12-13

基金项目: 福建省科技厅自然科学基金面上项目(2021J011065); 福建省建设厅科技研究开发项目(2022-K-216, 2022-K-215)

第一作者简介: 崔双双(1983—), 女, 山西翼城人, 副教授, 博士, 研究方向: 钢筋混凝土结构抗震、抗倒塌。

风驱雨(wind driven rain, WDR)是指雨在垂直坠落过程中受水平风力驱动影响而产生斜向飘落的自然现象,它是建筑壁面最重要的水分来源之一,影响着建筑外立面的耐用和湿热性能。东南沿海地区属于典型的热湿气候区,WDR 现象易引起围护结构渗水、墙体材料劣化等问题。

目前,常用的建筑保温材料通常为多孔结构,湿热环境下,多孔材料会吸收一定量的水分,一定程度上会破坏其热工性能,降低其保温隔热能力。大量研究表明^[1],围护结构所使用的保温材料导热系数随着含水率增加而增大。Orosz 等^[2]研究了聚苯乙烯混凝土的湿热性能,结果表明湿度增加时材料导热系数随之增加。江威等^[3]研究表明含水率对保温材料导热系数的影响,当含水率为 4% 时,导热系数增大 1 倍。

学者们针对普通环境下围护结构的热工性能进行大量试验研究。袁伟力^[4]通过在水泥基材料中掺入稻草制备保温砌块发现稻草掺入水泥基中可以降低材料的导热系数,提升砌块的热工性能。贾冠华、王亮^[5]使用膨胀珍珠岩作为水泥基材料的细骨料,制备了具有低导热系数的保温材料。Davraz 等^[6]将泡沫填充至混凝土空心砌块,使用密度为 300 kg/m^3 的泡沫混凝土有效将其热工提高至 4 倍以上。可以看出,针对潮湿环境下如何改善围护结构热工性能的研究较少。

玻化微珠材料表面玻化封闭、内部多孔,具有导热系数小、吸水率低等特点,掺入水泥基材料可以降低材料的导热系数与吸水率,使得以玻化微珠为轻集料的保温砂浆具备良好的保温隔热性能,在建筑材料保温隔热中被寄予厚望。方正^[7]采用玻化微珠,研究了一种新型玻化微珠保温砂浆,发现其可显著改善保温砂浆的工作性能。玻化微珠虽常被用于制备保温砂浆,但针对湿热环境低吸水率保温砂浆制备及其热工性能和力学性能的研究相对较少。

鉴于此,本文基于两阶段试验,研究湿热环境下低吸水率保温砂浆的最优配合比,分析各因素对玻化微珠水泥基材料抗压强度与单位体积吸水率的影响程度,研究了潮湿环境对玻化微珠水泥基材料的累计吸水量等热工性能的影响,并与普通混凝土作对比,为后期制备适用于湿热地区使用的保温砌块奠定基础。

1 湿热环境下玻化微珠水泥基材料配合比确定

1.1 原材料

使用 P · O42.5R 硅酸盐水泥;5 000 目的特级优质粉煤灰;粒径 100 目的石英砂;聚羧酸型高效减水剂,减水效率达 38%。

玻化微珠物理参数:粒径 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$;导热系数 $\leq 0.048 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$;堆积系数 $80 \sim 120 \text{ kg/m}^3$;筒压强度 $\geq 150 \text{ kPa}$;体积漂浮率 $\geq 95\%$;表面玻化率 $\geq 90\%$;吸水率 $\leq 40\%$ 。

1.2 试验方案

选取以抗压强度、导热系数和吸水量作为两阶段试验的评价指标。

玻化微珠水泥基材料的立方体抗压强度试验方法参照 GJG/T70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[8]。试件为 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的立方体,在室温养护 24 h 后脱模,放入养护箱中标准养护 28 d。采用荷载控制,速度为 0.5 kN/s ,试验如图 1 所示。抗压强度可通过式 (1) 得出,每组抗压试验设置 3 个试块,材料的抗压强度取其平均值。



图 1 立方体抗压试验

Fig.1 Cube compression test

$$f_{cu} = \frac{F}{A} \times K \quad (1)$$

式中, f_{cu} 为玻化微珠水泥基材料试件抗压强度,MPa; F 为试件的峰值荷载,N; A 为试件受压面积, mm^2 ; K 为换算系数,取 1.35。

围护结构吸水后其导热系数会增大、热工性能会降低,因此有必要研究潮湿环境下的玻化微珠水泥基材料吸水量随时间的变化规律以及吸水后导热系数的变化。其中,导热系数参照 GB/T10294-2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的

测定》^[9]的方法测定。采用 HFM436 自动导热系数测试仪,每组设置 2 个 300 mm×300 mm×30 mm 的试块,将试块在标准养护室内养护 28 d 后放入烘箱烘干,温度控制在 (60±5)℃,质量恒定后再检测,如图 2 所示。

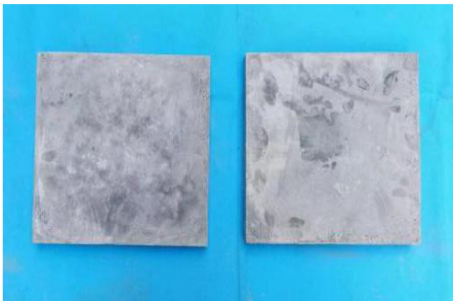


图 2 导热系数测试试块

Fig.2 Thermal conductivity test blocks

试块吸水量按 JGJ/T70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[8]。将试件放入烘箱,温度为 (105±5)℃,时长控制在 (48±0.5) h。然后将试件放入水槽中,浇筑时顶面朝下,底部用垫块撑起,距离水面底 10 mm,试块应完全浸入水中且顶部距离水面不小于 20 mm。浸泡 (48±0.5) h 后取出,用抹布擦干表面的水珠,测量其饱和面干质量,玻化微珠水泥砂浆吸水试验如图 3 所示。单位体积吸水量按式 (2) 计算:

$$\varphi=\frac{m}{\rho V}$$

(2)

式中, φ 为单位体积吸水量, L/m³; m 为试件吸收水的质量, kg; ρ 为水的密度, kg/L; V 为试块体积, m³。

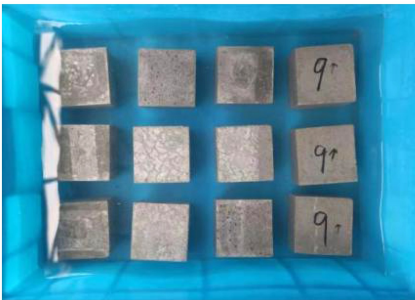


图 3 立方体吸水试验

Fig.3 Cube water absorption test

1.3 玻化微珠体积掺量对材料的抗压强度及导热系数的影响

由预实验初步确定水泥基配合比:水胶比:0.4;砂胶比:0.2;胶凝材料: $w_{\text{粉煤灰}}=30\%$ 、 $w_{\text{水泥}}=$

70%;在此基础上,设计 5 组不同玻化微珠体积掺量(分别为胶凝材料体积分数的 0%,20%,40%,60%,80%)的配合比。最后基于抗压强度与导热系数,确定玻化微珠体积掺量的合理取值范围。

1.3.1 玻化微珠掺量对抗压强度的影响

根据试验结果,绘制了玻化微珠掺量与立方体抗压强度的关系曲线,如图 4 所示。可以看出,随着玻化微珠掺量的增加水泥基材料强度显著降低,这是由于玻化微珠筒压强度较低、力学性能差,掺入玻化微珠会导致水泥基材料的强度减小;过量玻化微珠的掺入会导致细骨料之间平均水泥浆量减少,水泥浆黏结强度不足,导致强度降低,玻化微珠掺量为 80%时,试块时有破碎的现象。

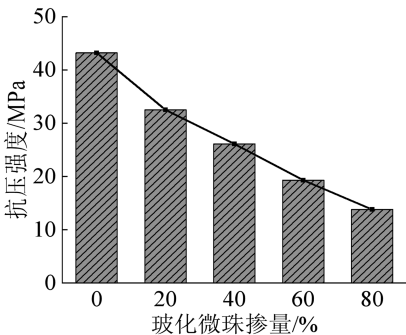


图 4 玻化微珠掺量对抗压强度的影响

Fig.4 Effect of vitrified beads on compressive strength

1.3.2 玻化微珠掺量对导热系数的影响

根据试验结果,绘制了玻化微珠掺量与材料导热系数的关系曲线,如图 5 所示。可以看出,随着玻化微珠掺量的增加材料导热系数显著降低,这是因为玻化微珠颗粒表面玻化形成封闭气孔,孔内气体的导热和对流换热与水泥基的导热相比可以忽略不计,故其掺入可以降低材料的平均导热系数;玻化微珠与水泥浆体相比导热系数较小,掺入后在水泥基材料中随机分布,导致热量通过材料传递时,大部分会绕过玻化微珠,从而延长了热量传递路径,降低了导热系数^[10]。

此外,玻化微珠掺量超过 60%后,材料的导热系数降幅变缓。造成这种现象的原因是:玻化微珠生产经过高温处理,其表面玻化形成封闭的空间,所以具有较低的导热系数,但当玻化微珠掺量增加时,搅拌过程中的摩擦会导致其表面破坏,降低其工作性能。

1.4 基于正交试验的玻化微珠保温砂浆配合比
水泥基材料受水侵蚀时,抗压强度与热工性

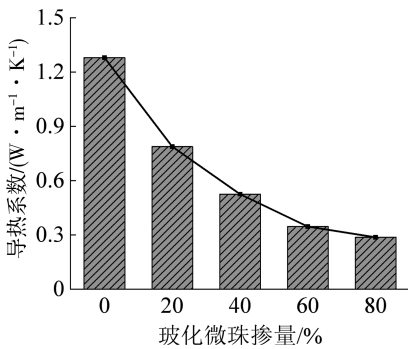


图 5 玻化微珠掺量对导热系数影响

Fig.5 Effect of content of vitrified beads on thermal conductivity

能均会降低,湿热环境下材料更容易受到影响,降低材料的吸水率有利于保持材料热工性能的稳定性。东南沿海地区气候潮湿多雨,外墙更容易受到环境影响,有必要对材料吸水率进行控制。

结合图 4、图 5,综合考虑玻化微珠掺量对水泥基材料抗压强度和导热系数的影响,将玻化微珠的掺量控制在 50%~70% 范围内。导热系数变化幅度较小,故正交试验不再考虑导热系数的影响。综上,设计了水胶比(A)、粉煤灰(B)、砂胶比(C)及玻化微珠体积掺量(D)4 个因素对玻化微珠水泥基材料抗压强度与单位体积吸水率的影响,每个因素设计 3 个水平。因素和水平见表 1。正交试验结果见表 2。

| 表 1 正交试验因素及水平 | | | | |
|---|-------|-----|-----|-----|
| Tab.1 Factors and levels of orthogonal test | | | | |
| 水平 | 因素 | | | |
| | A | B/% | C | D/% |
| 1 | 0.375 | 20 | 0.0 | 50 |
| 2 | 0.400 | 30 | 0.1 | 60 |
| 3 | 0.425 | 40 | 0.2 | 70 |

各因素对试验结果的影响程度可以通过极差 R 值的大小来反映, R 值越大说明该因素对试验结果的影响越大,按由大到小的顺序排列可以得到不同因素对抗压强度、单位体积吸水率影响的主次顺序及其重要程度。以因素 A 为例,阐述极差的计算方法。

计算因素 A 各水平下的抗压强度值之和 K_{11} 、 K_{21} 、 K_{31} ,然后计算平均抗压强度值 $\overline{K_1}$ 、 $\overline{K_2}$ 、 $\overline{K_3}$,极值为平均值最大值与最小值之间的差值。其他

因素对抗压强度、单位体积吸水量影响的极差分析方法相同,极差分析结果见表 3。

| 表 2 正交试验结果 | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-----|-----|-----|---------------|--------------------------|
| Tab.2 Orthogonal test results | | | | | | |
| 序号 | 因素 | | | | 28 d 抗压强度/MPa | 吸水量/(L·m ⁻³) |
| | A | B/% | C | D/% | | |
| 1 | 0.375 | 20 | 0.0 | 50 | 26.1 | 218 |
| 2 | 0.375 | 30 | 0.1 | 60 | 20.3 | 162 |
| 3 | 0.375 | 40 | 0.2 | 70 | 15.8 | 143 |
| 4 | 0.400 | 20 | 0.1 | 70 | 17.5 | 150 |
| 5 | 0.400 | 30 | 0.2 | 50 | 21.2 | 199 |
| 6 | 0.400 | 40 | 0.0 | 60 | 17.9 | 165 |
| 7 | 0.425 | 20 | 0.2 | 60 | 16.3 | 183 |
| 8 | 0.425 | 30 | 0.0 | 70 | 17.4 | 174 |
| 9 | 0.425 | 40 | 0.1 | 50 | 21.4 | 215 |

| 表 3 极差分析表 | | | | | | |
|--------------------------|----|------------------|------------------|------------------|-------|---|
| Tab.3 Range analysis | | | | | | |
| 项目 | 因素 | $\overline{K_1}$ | $\overline{K_2}$ | $\overline{K_3}$ | R_j | 因素主次 |
| 28 d 抗压强度/MPa | A | 20.7 | 18.9 | 18.3 | 2.4 | D>C>A>B 最优配合比 A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ |
| | B | 20.0 | 19.6 | 18.4 | 1.6 | |
| | C | 20.5 | 19.7 | 17.5 | 3.0 | |
| | D | 22.9 | 18.2 | 16.9 | 6.0 | |
| 吸水量/(L·m ⁻³) | A | 174.3 | 171.3 | 190.7 | 19.4 | D>A>C>B 最优配合比 A ₂ B ₃ C ₃ D ₃ |
| | B | 183.7 | 178.3 | 174.3 | 9.4 | |
| | C | 185.7 | 175.7 | 175.0 | 10.7 | |
| | D | 210.7 | 170.0 | 155.7 | 55.0 | |

由表 3 可知,随着 4 种因素掺量的增加,抗压强度降低,玻化微珠掺量对立立方体抗压强度影响最为显著。强度降低的原因是:玻化微珠不仅筒压强度低,掺量增加还会降低颗粒间浆体厚度,所以显著降低了抗压强度。水胶比增大时,水泥基材料内部疏松、黏结强度减少,从而降低了抗压强度。粉煤灰的活性比水泥低,水化反应强度不足,导致抗压强度降低。砂胶比增大降低了颗粒间浆体,另一方面由于玻化微珠强度低,石英砂未能发挥其性能,从而降低了材料的抗压强度。

玻化微珠对水泥基材料单位体积吸水量的影响也最为明显,但随着玻化微珠掺量增加吸水量

减小的幅度也减少,这是因为玻化微珠表面玻化形成封闭的空间,有效降低材料吸水量。玻化微珠掺量增加,搅拌时摩擦会导致其表面破坏,降低了闭孔率,从而导致吸水量降幅减小。水胶比增加,材料吸水量先减小再增大,这是因为水泥基体在水化过程中需要的水总量是固定的,过量的水会导致自由水增多而形成微孔间隙、密实度减小,从而导致材料吸水量增大。砂胶比的增大吸水量总体上减小,细骨料可以填充材料内部孔隙,增加材料的密实性、降低吸水量。增加粉煤灰掺量会导致吸水量逐渐减小,这是因为粉煤灰颗粒较小且活性低,可以填充到材料内部孔隙,减少材料中的微孔,增加材料密实性、降低吸水量。对抗压强度的影响程度: $D>C>A>B$ 。对单位体积吸水率影响程度: $D>B>C>A$ 。

1.5 优选配合比确定

考虑材料在实际工程中的应用,在保证玻化微珠水泥基材料能够实现较低吸水率的前提下,要确保其有较好的力学性能。从表 3 的试验结果可知,抗压强度的最佳方案 $A_1B_1C_1D_1$;吸水量的最佳方案为 $A_2B_3C_3D_3$ 。但抗压强度最优方案在吸水方面表现的较差,而吸水量表现最优的方案在抗压强度上表现的也不尽人意。综合考虑玻化微珠水泥基材料的抗压强度及吸水量表现,可以发现 $A_1B_2C_2D_2$,即第二组综合性能最优,配合比为: $A:0.375;C:0.1;B:30%;D:60\%$ 。材料性能:抗压强度为 20.3 MPa,吸水量为 162 L/m^3 。

2 湿热环境对玻化微珠导热系数的影响

将尺寸为 $300\text{ mm}\times300\text{ mm}\times30\text{ mm}$ 的试件放烘箱烘至恒重(温度: $(65\pm5)\text{ }^\circ\text{C}$),然后放入标准养护室(空气湿度:90%;温度: $(20\pm2)\text{ }^\circ\text{C}$),每 24 h 测量其吸水量,将两块试件吸水量的平均值作为吸水量,连续测量 7 d,测定其对应的导热系数,试验图片见图 6、图 7。将普通混凝土设对比组,分析湿热环境下与玻化微珠水泥基材料热工性能的差异,普通混凝土试件的配合比见表 4。

表 4 普通混凝土试件配合比

| Tab.4 Mix proportion of ordinary concrete specimens | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|--|
| 原料 | 水泥 | 石英砂 | 碎石 | 粉煤灰 | 水 | 减水剂 | |
| 含量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 286 | 571 | 931 | 69 | 134 | 8.57 | |



图 6 导热系数测试试块烘干

Fig.6 Drying of test block for thermal conductivity test

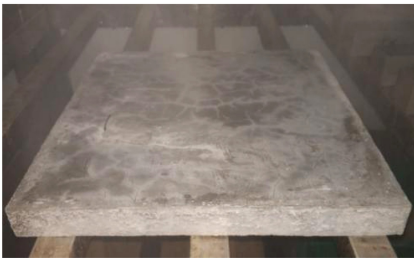


图 7 标准养护室下吸水量试验

Fig.7 Water absorption test in standard curing room

2.1 玻化微珠水泥基材料的累计吸水量与吸水速度试验

玻化微珠水泥基材料与普通混凝土试块在标准养护室内 7 d 吸水量的变化曲线如图 8 所示。可以看出,随着在标养室内吸水时间的增加,累计吸水量不断增大,但玻化微珠水泥基材料的累计吸水量小于混凝土。玻化微珠水泥基材料后期吸水量较小,第 7 d 吸水量 8.2 g,为混凝土的 48.3%。玻化微珠水泥基材料 7 d 累计吸水量 185.8 g,为混凝土累计吸水量的 62.4%。

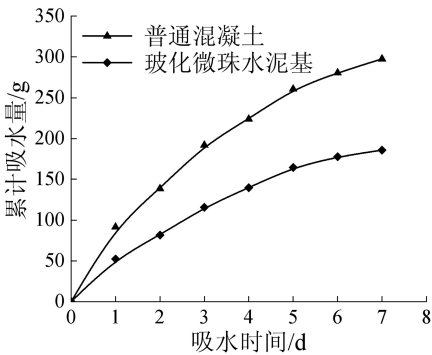


图 8 试块累计吸水量

Fig.8 Accumulated water absorption of test block

2.2 湿热环境下玻化微珠水泥基材料导热系数

玻化微珠水泥基材料与普通混凝土试块在标准养护室内吸水后导热系数的变化曲线如图 9 所

示。可以看出,未吸水时玻化微珠水泥基材料导热系数为 $0.336 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,是混凝土的 26.4%。随着吸水时间增加,材料的导热系数增大,这是因为水的导热系数大于空气的导热系数,吸水后填充了材料内部的微孔,故导热系数增大。7 d 吸水后:玻化微珠水泥基材料导热系数增大 $0.147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,增幅为混凝土 44.3%;玻化微珠水泥基材料导热系数为 $0.483 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,仅是混凝土的 30.1%。

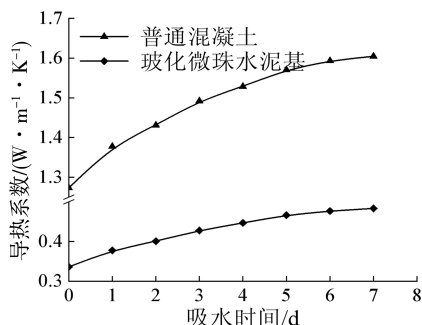


图 9 吸水后导热系数的变化

Fig.9 Change of thermal conductivity after water absorption

由此可见,玻化微珠水泥基材料吸水后仍具有较低的导热系数,受湿热环境影响较小,在湿热环境下热工性能优异,适用于制备潮湿环境下使用的保温砌块。

3 结论

1)通过两阶段配合比试验,制备了一种低吸水率保温玻化微珠水泥基砂浆,得到了它的最优配合比:水胶比:0.375;砂胶比 0.1;粉煤灰掺量:30%;玻化微珠掺量:60%。通过极差探究了各因素对玻化微珠水泥基材料抗压强度与单位体积吸水率的影响程度。

2)玻化微珠水泥基材料的吸水速度与累计吸水量远小于普通混凝土,7 d 累计吸水量仅为混凝土的 63.9%。未吸水时,玻化微珠水泥基材料的导热系数是混凝土的 26.39%;吸水 7 d 后导热系数为混凝土的 30.1%,潮湿环境下仍具有优异的热工性能。玻化微珠水泥基材料可以有效降低潮湿环境对材料导热系数的影响,适用于制备湿热地区使用的保温砌块。

参考文献:

- [1] 杨金龙,米海惠,苏振国,等. 含水率对建筑外墙保温材料导热性能的影响[J]. 建筑材料学报,2017,20(6):986-990.
- [2] OROSZ M, NAGY B, TÓTH E. Hygrothermal behavior of ultra-lightweight polystyrene concrete[J]. Pollack Periodica, 2017,12(2):53-66.
- [3] 江威,刘倩,曲军辉. 保温材料自然气候模拟条件下导热系数的研究[J]. 绿色环保建材,2020(9):1-2.
- [4] 袁伟力. 稻草-混凝土复合自保温砌块综合性能研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [5] 王亮. 气凝胶膨胀珍珠岩保温材料的研究及其建筑能耗分析[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [6] DAVRAZ M, KORU M, AKDAG A E. Numerical and experimental investigation of the effect of foam concrete as filler on design thermal conductivity of lightweight masonry block[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019,137(6):1867-1875.
- [7] 方正. 保温砂浆的湿热性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法:GB/T 10294—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [10] 郭宇菲. 自保温隔热混凝土力学性能与导热系数试验研究[J]. 安徽建筑,2019,26(1):172-173,184.

(责任编辑:陈雯)