

文章编号:1674-2974(2017)01-0143-07

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.01.018

不同水胶比对玻化微珠保温砂浆性能的影响*

龚建清[†],孙凯强

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:研究了当水胶比分别为1.2,1.3,1.4和1.5时,玻化微珠保温砂浆的干燥收缩、抗压强度、抗折强度、干密度、导热系数等性能指标。通过压汞试验和SEM扫描电镜分析,从微观角度进一步揭示了玻化微珠保温砂浆的性能指标随水胶比变化的原因。试验结果表明:玻化微珠保温砂浆的干燥收缩随着水胶比的增大呈现明显增大的趋势;当水胶比一定时,玻化微珠保温砂浆的干燥收缩早期增长速率较快,后期增长速率较慢;当水胶比分别为1.3,1.4和1.5时,玻化微珠保温砂浆的抗压强度、抗折强度、干密度、导热系数与水胶比为1.2时相比均有了较为明显的变化,抗压强度分别下降了13.1%,40.0%和73.8%;抗折强度分别下降了18.8%,35.7%和77.7%;干密度分别减小了8.3%,19.4%和33.3%;导热系数也分别下降了4.6%,11.3%和21.4%。玻化微珠保温砂浆的各项性能随着水胶比的变化,产生了明显的变化。通过压汞试验和SEM分析发现,随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆内部孔隙增多。

关键词:玻化微珠保温砂浆;水胶比;干燥收缩;抗压强度;抗折强度

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Effect of Different Water to Binder Ratio on Performance of Vitrified Microsphere Insulation Mortar

GONG Jianqing[†], SUN Kaiqiang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The drying shrinkage, compressive strength, fracture strength, dry density and thermal conductivity of vitrified microsphere insulation mortar were systematically studied when the water to binder ratio are 1.2, 1.3, 1.4 and 1.5. This study reveals the reason that the performance index of vitrified microsphere insulation mortar depends on the different water to binder ratio by mercury test and SEM scanning electron microscope analysis. The results indicate that the drying shrinkage of the vitrified microsphere insulation mortar increases obviously with the increase of water to binder ratio. When the water to binder ratio is fixed, the growth rate of drying shrinkage of vitrified microsphere insulation mortar is rapid in the early stage but becomes slow in the later stage. When the water to binder ratios are 1.3, 1.4, and 1.5, the compressive strength, flexural strength, dry density and thermal conductivity change obviously compared with those of the vitrified microsphere insulation mortar with the water to binder ratio of 1.2.

* 收稿日期:2016-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278180), National Natural Science Foundation of China(51278180)

作者简介:龚建清(1963—),男,湖南湘乡人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人,E-mail:gongjianqing@hnu.edu.cn

The compressive strength correspondingly decreases by 13.1%, 40.0% and 73.8%, respectively; flexural strength decreases by 18.8%, 35.7%, and 77.7%, respectively; dry density decreases by 8.3%, 19.4%, and 33.3% respectively; and thermal conductivity also decreases by 4.6%, 11.3% and 21.4%, respectively. The structural performance of the vitrified microsphere insulation mortar varies obviously with the change of water to binder ratio. It is also found that the porosity of vitrified microsphere insulation mortar increases with the increase of water to binder ratio by mercury test and SEM analysis.

Key words: vitrified microsphere insulation mortar; water to binder ratio; drying shrinkage; compressive strength; flexural strength

目前,我国建筑能耗在社会总能耗中占很大的比重,因此建筑节能对于我国实现可持续发展是至关重要的。而建筑节能的关键在于提高建筑围护墙体的隔热和保温性能,以减少室内的热量损失,节约能源^[1~3]。外墙外保温体系是提高墙体隔热、保温性能的一项十分有效的措施。目前常用的外墙外保温体系包括以聚苯颗粒和聚苯板等有机保温材料为主的保温体系,和以玻化微珠保温砂浆、膨胀蛭石保温砂浆等无机保温材料为主的保温体系^[4~5]。有机保温材料的保温性能很好,但是其耐久性不好,与建筑结构寿命不同步,耐火性差。特别是 2009 年央视大楼和 2010 年上海浦东两栋教师公寓大楼,由于有机保温材料燃烧,导致火灾事故,给人们的生命财产带来了巨大的损失,让人们对有机保温材料的使用更加谨慎,逐渐开始用无机保温材料替代有机保温材料^[6~7]。

玻化微珠保温砂浆具有防火阻燃性能优良、保温隔热性能好、绿色环保等优点,开始受到人们的重视^[8~9]。玻化微珠保温砂浆主要由玻化微珠轻集料,水泥等胶凝材料,以及可再分散乳胶粉、纤维素醚、聚丙烯纤维、引气剂等外加剂组成^[10~11]。国内外已有学者对玻化微珠保温砂浆进行了一系列的研究。Derek 等^[12]通过试验研究了以膨胀玻化微珠为轻质骨料的轻质砂浆的力学性能。方明晖等^[13]对玻化微珠保温砂浆的热工性能和力学性能进行了研究。周福忠等^[14]对聚苯颗粒—玻化微珠复合保温砂浆的防火性能进行了研究。目前,国内外对玻化微珠保温砂浆的研究主要集中在改变各种外加剂的掺量,来研究其物理、力学、热工及防火性能的变化。而水胶比对玻化微珠保温砂浆性能的影响,却鲜有人研究。由于玻化微珠保温砂浆的各项基本性能随着水胶比的不同有着很大的差异,因此本文对不同水胶比下玻化微珠保温砂浆的各项基本性能作进一步

研究。

1 实 验

1.1 实验材料

硅酸盐水泥为湖南韶峰水泥集团有限公司生产的“韶峰牌”P. O. 42.5 水泥,水泥的化学成分见表 1;玻化微珠由河南信阳华南无机保温建材厂生产,堆积密度为 90~110 kg/m³,导热系数为 0.037 W/(m·K),体积吸水率为 39.5%;有机纤维是山东鲁峰网业公司生产的聚丙烯纤维,弹性模量为 4 800 MPa,断裂伸长率为 19%;可再分散乳胶粉由河北鼎盛孚美科技有限公司生产,平均粒径为 80 μm,固含量为(99±1)%;引气剂选用的是由上海银聰新材料公司生产的十二烷基硫酸钠 k12 引气剂,pH 值为 6.5~7.5,溶于水,微溶于醇;羟丙基甲基纤维素醚(HPMC)由郑州鑫鑫食化生产。

表 1 水泥各化学成分含量(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition content of cement %

wSiO ₂	wAl ₂ O ₃	wMgO	wCaO	wFe ₂ O ₃	wSO ₃	Loss
21.80	5.25	1.33	64.76	2.70	2.12	1.76

1.2 配合比

本文研究不同水胶比对玻化微珠保温砂浆干燥收缩、抗压强度、抗折强度、干密度、导热系数的影响。选取基本配合比:水泥 : 玻化微珠 : 聚丙烯纤维 : 可再分散乳胶粉 : 引气剂 : 纤维素醚 = 1 : 0.65 : 0.003 : 0.01 : 0.001 : 0.007。瞿晓玲等在水胶比为 1.0 的基础上,对玻化微珠保温砂浆收缩进行了研究^[15]。陈晓莉在水胶比为 1.3 的基础上通过正交试验,研究了玻化微珠保温砂浆的性能^[5]。因此本文参考已有研究,选取水胶比为 1.2,

1.3, 1.4 和 1.5 进行试验.

1.3 测试方法

1.3.1 干燥收缩

玻化微珠保温砂浆的干燥收缩测试参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》. 每个配合比成型 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 的试件. 首先准备好 40 mm×40 mm×160 mm 两端带孔的三联试模, 安装收缩测头. 然后将拌合好的砂浆浇入试模中, 放置到振动台上, 振动 1 min, 成型后, 立刻将试件带模放入标准养护室中, 7 d 以后拆模. 拆模后立即将试件放入温度为(20±2)°C、相对湿度为(60±5)% 的恒温恒湿室中, 并在 4 h 后测量试块的初始长度. 于 7 d, 14 d, 21 d, 28 d, 56 d, 90 d 后测量试块的变形读数. 玻化微珠保温砂浆的干缩率按式(1)计算^[16], 收缩试验用 SP-175 型比长仪.

$$\omega = \frac{L_0 - L_t}{L - L_d} \quad (1)$$

式中: ω 为玻化微珠保温砂浆的干缩率; L_0 为试样成型后 7 d 的测量长度, 即初始长度, mm; L 为试块的长度即 160 mm; L_d 为 2 个测头埋入试块长度之和, 即 20 mm; L_t 为相应时间为 t (7 d, 14 d, 21 d, 28 d, 56 d 和 90 d) 时试块的测量长度, mm.

1.3.2 抗压强度、抗折强度

抗压强度、抗折强度的测定方法主要参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999), 首先制成 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件进行抗折试验, 然后将得到的半棱柱体试件进行抗压强度测试^[17].

1.3.3 千密度

玻化微珠保温砂浆干密度的测定参照《无机硬质绝热制品试验方法: 密度、含水率及吸水率》(GB/T 5486.2—2001) 进行, 首先成型 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体试件, 然后将试件置于干燥箱中烘干至恒重, 并以恒温 3 h 后, 试件先后 2 次所测得的质量变化率小于 0.2% 作为判定的标准. 试件的干密度按式(2)计算, 精确到 1 kg/m³, 取 6 个试件测试结果的平均值为玻化微珠保温砂浆的最终干密度值^[18].

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} \times 10^{-6}. \quad (2)$$

式中: ρ_0 为干密度, kg/m³, 精确至 1 kg/m³; m_0 为试件烘干后的质量, g; V 为试件的体积, mm³.

1.3.4 导热系数

玻化微珠保温砂浆的导热系数测定参照《绝热材料稳态热阻及有关特性测定: 防护热板法》(GB/T 10294—2008) 进行, 制作尺寸为 300 mm×300 mm×30 mm 的试件. 在常温下养护 3 d, 然后放入标准养护室中养护至 28 d, 再将试样放入干燥箱中将其烘干至恒重. 导热系数的测定使用的是 CD-DR3030 型导热系数测定仪^[19].

1.3.5 孔隙率

首先用锤子和镊子从养护 28 d 的试件上获得 3 块蚕豆大小颗粒的样品, 然后将样品放入玻璃管中, 最后一起放入压汞仪中进行孔隙率测试, 试验采用的是 PoreMaster-60 全自动型压汞仪.

2 结果和讨论

2.1 水胶比对玻化微珠保温砂浆干燥收缩的影响

图 1 表示不同水胶比对玻化微珠保温砂浆干燥收缩的影响. 当水胶比为 1.2 时, 玻化微珠保温砂浆在 7 d, 14 d, 21 d, 28 d, 56 d 和 90 d 的干缩率分别为 0.043 4%, 0.067 8%, 0.082 1%, 0.086 2%, 0.089 3% 和 0.091 2%. 可以看出, 其干燥收缩前期增长得比较快, 随着时间的推移, 增长得越来越慢, 到了第 90 d, 干燥收缩增长得已经十分缓慢了. 这主要是由胶凝材料早期的水化不充分, 基体内部的毛细孔水、吸附水及层间水含量较多、水分蒸发较快所导致. 随着龄期的增长, 基体内水分逐渐变少, 水分蒸发变慢而导致基体收缩变平缓. 当水胶比分别为

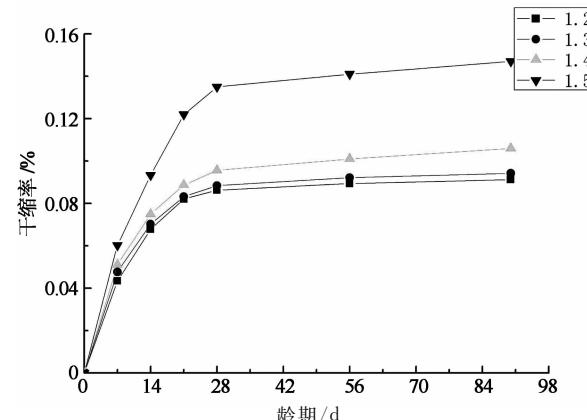


图 1 水胶比对玻化微珠保温砂浆干燥收缩的影响

Fig. 1 Effect of water to binder ratio on drying shrinkage of vitrified microsphere insulation mortar

1.3, 1.4 和 1.5 时, 其 90 d 干缩率相比水胶比为 1.2 时, 分别增长了 3.3%, 16.2% 和 61.2%. 可以看出, 随着水胶比的增加, 玻化微珠保温砂浆的干燥收缩有了明显的增加. 这是因为随着水胶比的增加, 玻化微珠保温砂浆内部的含水量变得更高, 因此将其置于干燥的环境中后, 其散失的水分也越多, 故而收缩越大.

2.2 水胶比对玻化微珠保温砂浆抗压强度、抗折强度的影响

图 2 表示不同水胶比对玻化微珠保温砂浆抗压强度、抗折强度的影响.

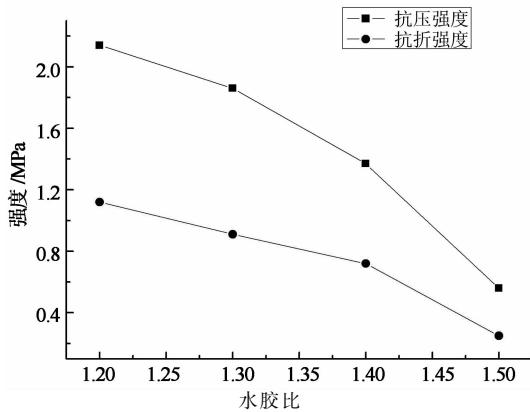


图 2 水胶比对玻化微珠保温砂浆抗压强度、抗折强度的影响

Fig. 2 Effect of water to binder ratio on compressive strength and fracture strength of vitrified microsphere insulation mortar

当玻化微珠保温砂浆的水胶比为 1.2, 1.3, 1.4 和 1.5 时, 其抗压强度分别为 2.14 MPa, 1.86 MPa, 1.37 MPa 和 0.56 MPa; 抗折强度分别为 1.12 MPa, 0.91 MPa, 0.72 MPa 和 0.25 MPa. 其他组与水胶比为 1.2 组相比, 抗压强度分别降低了 13.1%, 40.0% 和 73.8%; 抗折强度分别降低了 18.8%, 35.7% 和 77.7%. 由此可知, 随着水胶比的增大, 玻化微珠保温砂浆的抗压强度和抗折强度均呈现下降的趋势. 这是因为随着水胶比的增大, 在玻化微珠保温砂浆的凝结硬化过程中, 水分的散失增多, 从而在其内部留下的孔隙也变多, 故而导致其抗压强度和抗折强度均降低^[20-21]. 当玻化微珠保温砂浆的水胶比达到 1.5 时, 其抗压强度、抗折强度有了更加明显的减小.

2.3 水胶比对玻化微珠保温砂浆干密度的影响

图 3 表示不同水胶比对玻化微珠保温砂浆干密

度的影响. 当玻化微珠保温砂浆的水胶比为 1.2, 1.3, 1.4 和 1.5 时, 其干密度分别对应为 387 kg/m³, 355 kg/m³, 312 kg/m³ 和 258 kg/m³. 水胶比为 1.3, 1.4 和 1.5 的玻化微珠保温砂浆, 与水胶比为 1.2 的保温砂浆相比, 其干密度分别减小了 8.3%, 19.4% 和 33.3%. 可以看出, 随着水胶比的增大, 玻化微珠保温砂浆的干密度呈现下降的趋势.

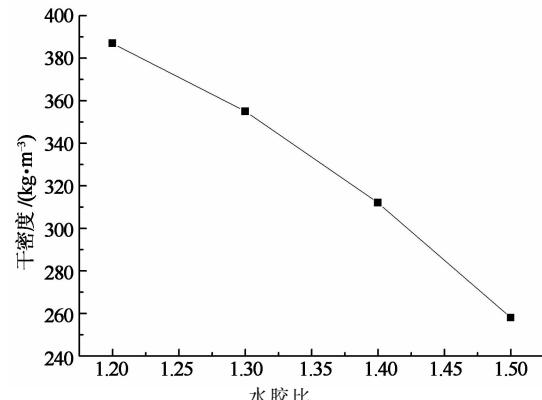


图 3 水胶比对玻化微珠保温砂浆干密度的影响
Fig. 3 Effect of water to binder ratio on dry density of vitrified microsphere insulation mortar

这是因为随着水胶比的增加, 在玻化微珠保温砂浆的凝结硬化过程中, 水分的散失变多, 其质量减小也增多, 因此在玻化微珠保温砂浆内部留下了更多的孔隙, 故而导致其干密度降低^[22].

2.4 水胶比对玻化微珠保温砂浆导热系数的影响

图 4 表示不同水胶比对玻化微珠保温砂浆导热系数的影响. 当玻化微珠保温砂浆的水胶比为 1.2, 1.3, 1.4 和 1.5 时, 其导热系数分别为 0.0917 W/(m·K), 0.0875 W/(m·K), 0.0813 W/(m·K), 0.0721 W/(m·K). 另外 3 组与水胶比为 1.2 的玻化微珠保温砂浆相比, 其导热系数分别下降了 4.6%, 11.3% 和

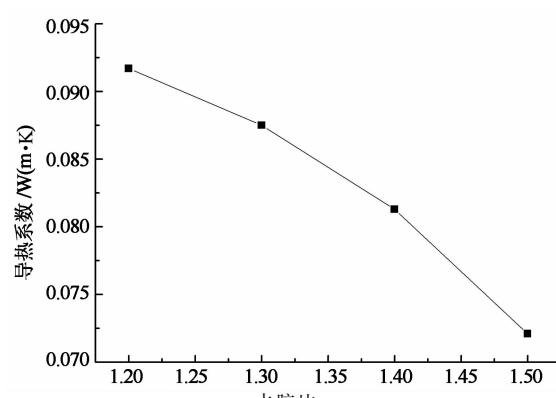


图 4 水胶比对玻化微珠保温砂浆导热系数的影响
Fig. 4 Effect of water to binder ratio on thermal conductivity of vitrified microsphere insulation mortar

21.4%。由此可以看出,随着玻化微珠保温砂浆水胶比的增大,其导热系数呈现下降的趋势。这是由于水胶比的增加,使玻化微珠保温砂浆在凝结硬化后,其内部的孔隙大量增加。而气体的导热系数要明显低于固体^[23],故而随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的导热系数呈现下降的趋势。

2.5 水胶比对28 d玻化微珠保温砂浆孔隙率的影响

从表2可以看出,随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的孔隙率逐渐增大。这是因为水胶比增大时,玻化微珠保温砂浆内部残留的水分增多,因此其在干燥环境下,失去的水分也增多,从而导致孔隙率随水胶比增大而增大。所以水胶比变大时,其失水量也变大,故而干燥收缩增大。并且随着水胶比的增大,孔隙率也会相应增大,故保温砂浆的强度会下降;热量在固体材料中的传递是通过原子的热振动实现的,而孔隙中气体的传热是通过气体分子之间的碰撞实现的。由于玻化微珠保温砂浆是气固两相的混合物,其综合传热主要是这2种传热行为共同作用的结果。保温砂浆中孔隙率越大,热量就愈加频

繁地从固体向气体、气体向固体来回切换,这样就大大降低了其热传导速率,因此其导热系数随着水胶比的增大而降低^[24-25];随着水胶比增大,保温砂浆孔隙率增大,固体含量减少,因此其干密度减小。

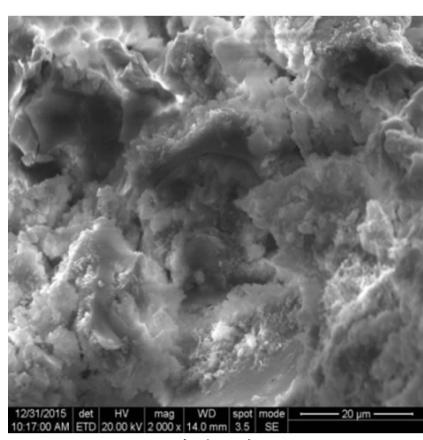
表2 水胶比对28 d玻化微珠保温砂浆孔隙率的影响

Tab. 2 Effect of water to binder ratio on porosity of 28 d vitrified microsphere insulation mortar

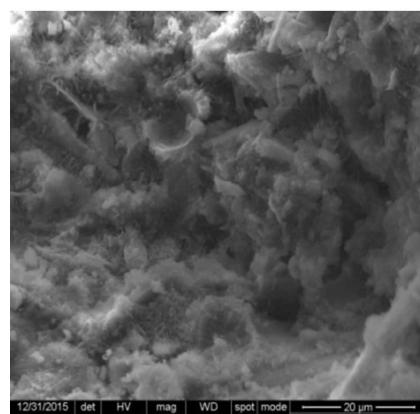
水胶比	1.2	1.3	1.4	1.5
孔隙率/%	34.12	35.73	37.90	42.31

2.6 SEM分析

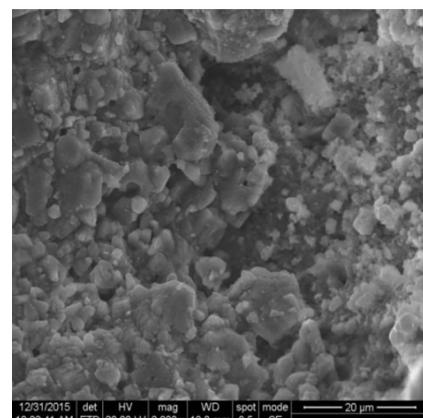
图5为不同水胶比下玻化微珠保温砂浆的28 d SEM图。从图5(a)可以看出,当水胶比为1.2时,玻化微珠保温砂浆内部结构比较密实,晶粒间的孔隙也相对较少。从图5(b)中可以看出,当水胶比为1.3时,玻化微珠保温砂浆内部仍然较为密实,但孔隙量相对水胶比为1.2时有所增多。从图5(c)中可看出,当水胶比为1.4时,晶体间的孔隙有了明显的增加。从图5(d)中可以看出,水胶比为1.5时,晶体



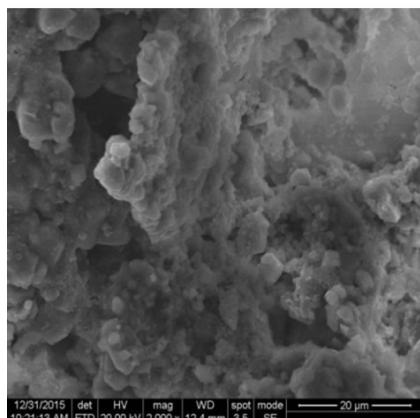
(a) 水胶比为 1.2



(b) 水胶比为 1.3



(c) 水胶比为 1.4



(d) 水胶比为 1.5

图5 不同水胶比下玻化微珠保温砂浆的28 d SEM图

Fig. 5 The 28 d SEM under different water to binder ratio of vitrified microsphere insulation mortar

间出现了大量的孔隙,且孔隙尺寸明显变大。因为干燥收缩,抗压强度、抗折强度、干密度、导热系数都与玻化微珠保温砂浆内部密实度有直接的关系。因此随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的干燥收缩增大,抗压强度、抗折强度、干密度以及导热系数均减小。

3 结 论

1) 随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的干燥收缩呈现增大的趋势。且当水胶比一定时,其干燥收缩早期增长速率较快,后期增长速率较慢。

2) 随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的抗压强度、抗折强度均呈现减小的趋势。水胶比为 1.3, 1.4 和 1.5 的保温砂浆,与水胶比为 1.2 的保温砂浆相比,其抗压强度分别下降了 13.1%, 40.0% 和 73.8%; 抗折强度分别下降了 18.8%, 35.7% 和 77.7%。

3) 随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的干密度呈现减小的趋势。水胶比为 1.3, 1.4 和 1.5 的 3 组,与水胶比为 1.2 的组相比,其干密度分别减小了 8.3%, 19.4% 和 33.3%。

4) 随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆的导热系数呈现减小的趋势。另外 3 组与水胶比为 1.2 的组相比,其导热系数分别下降了 4.6%, 11.3% 和 21.4%。

5) 随着水胶比的增大,玻化微珠保温砂浆内部的孔隙率逐渐增加。

6) 本文从不同水胶比出发,对玻化微珠保温砂浆的性能进行研究。结果表明,水胶比对玻化微珠保温砂浆的性能影响较大。因此在配制玻化微珠保温砂浆时,应根据想要得到的性能指标,选择合适的水胶比。

参考文献

- [1] YAN X, ZHE M. Evaluation of residential energy-saving buildings based on grey relational analysis method[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(4): 3149–3153.
- [2] XU L, LIU J, PEI J, et al. Building energy saving potential in Hot Summer and Cold Winter (HSCW) Zone, China—Influence of building energy efficiency standards and implications [J]. Energy Policy, 2013, 57: 253–262.
- [3] 龚光彩, 蔡立群, 王平, 等. 建筑围护结构节能设计烟分析及 CO₂ 排放研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(1): 109–114.
- [4] GONG Guang-cai, CAI Li-qun, WANG Ping, et al. Research on the exergy and CO₂ emissions of the energy-saving design of building envelope[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(1): 109–114. (In Chinese)
- [5] HONG T Z. A close look at the China design standard for energy efficiency of public building[J]. Energy and Building, 2009, 41(4): 426–435.
- [6] 陈晓莉, 吕渊. 玻化微珠保温砂浆配合比的正交试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(2): 49–51.
- [7] CHEN Xiao-li, LV Yuan. The study about the orthogonal test of mix ratio of vitrified microsphere insulation mortar[J]. Concrete and Cement Products, 2012(2): 49–51. (In Chinese)
- [8] GABBAR H A, MUSHARAVATI F, POKHAREL S. System approach for building energy conservation[J]. Energy Procedia, 2014, 62: 666–675.
- [9] FAYEZ A, FIROZ A, IFTEKHAR K, et al. Effect of climates and building materials on house wall thermal performance[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 661–666.
- [10] BENMANSOUR N, AGOUDJIL B, GHERABLI A, et al. Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building[J]. Energy & Buildings, 2014, 81: 98–104.
- [11] ZHANG W Y, MOHAMED Z, YUKIO H. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49(12): 500–510.
- [12] NGUYEN Q, JIANG L H, LIU J P, et al. Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete[J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(4): 67–74.
- [13] LAI J Y, ZHANG L F, QIAN X Q, et al. Influence of superplasticizers on early age drying shrinkage of cement paste with the same consistency[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2014, 29(6): 1201–1207.
- [14] DEREK K, VIVEK B. Mechanical properties and size effects in lightweight mortars containing expanded perlite aggregate [J]. Materials and Structures, 2011, 44(4): 735–748.
- [15] 方明晖, 毛金萍, 朱蓬莱, 等. 玻化微珠对无机轻集料保温砂浆性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2010, 37(2): 24–28.
- [16] FANG Ming-hui, MAO Jin-ping, ZHU Peng-lai, et al. Influence of glazed hollow bead on the performance of inorganic lightweight aggregate thermal insulation mortar [J]. New Building Materials, 2010, 37(2): 24–28. (In Chinese)
- [17] 周福忠, 彭家惠, 康苏芳, 等. 聚苯颗粒-玻化微珠复合防火保温砂浆的研究 [J]. 非金属矿, 2013, 36(6): 39–41.

- ZHOU Fu-zhong, PENG Jia-hui, KANG Su-fang, *et al.* Study on polystyrene particles-vitrified small ball composite fireproofing and thermal insulating mortar[J]. Non Metallic Ore, 2013,36(6):39–41. (In Chinese)
- [15] 瞿晓玲, 赵旭光. 组分对玻化微珠保温砂浆干燥收缩的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2015,33(2):283–287.
- QU Xiao-ling, ZHAO Xu-guang. Component effect on drying shrinkage of glazed hollow bead thermal insulation mortar[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015,33(2):283–287. (In Chinese)
- [16] JCJ/T 70—2009 建筑砂浆基本性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009: 16–17.
- JCJ/T 70—2009 Test method for basic performance of building mortar[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009:16–17. (In Chinese)
- [17] GB/T 17671—1999 水泥胶砂强度检验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1999: 8–9.
- GB/T 17671—1999 Test method for strength of cement mortar[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 8–9. (In Chinese)
- [18] GB/T 5486.3—2001 无机硬质绝热制品试验方法:密度、含水率及吸水率[S]. 北京:中国标准出版社, 2001:13.
- GB/T 5486.3—2001 Test methods for inorganic rigid thermal insulation: density, moisture content and water absorption [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001:13. (In Chinese)
- [19] GB/T 10294—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性测定:防护热板法[S]. 北京:中国标准出版社, 2009:9.
- GB/T 10294—2008 Thermal insulation—determination of steady-state thermal resistance and related properties—guard-ed hot plate apparatus[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 9. (In Chinese)
- [20] 贺智敏, 柳俊哲. 粉煤灰和引气剂对玻化微珠保温砂浆性能的影响[J]. 工业建筑, 2010,40(3):102–106.
- HE Zhi-min, LIU Jun-zhe. Influence of fly ash and air entraining agent on performance of thermal insulating mortar blended with vitrified microsphere [J]. Industrial Buildings, 2010,40(3):102–106. (In Chinese)
- [21] 陈连发, 陈悦, 李龙, 等. 高性能轻集料混凝土的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(10): 2822–2828.
- CHEN Lian-fa, CHEN Yue, LI Long, *et al.* Mechanical property of high performance lightweight aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015,34(10): 2822–2828. (In Chinese)
- [22] 李珠, 李贊婷. 玻化微珠保温砂浆配合比研究及机理分析[J]. 新型建筑材料, 2011,38 (2) : 46–48.
- LI Zhu, LI Yun-ting. Experiment on mix proportion of glazed hollow beads insulating mortar and its mechanism analysis [J]. New Building Materials, 2011,38(2):46–48. (In Chinese)
- [23] 肖建庄, 宋志文, 张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. 建筑材料学报, 2010,13(1) : 17–21.
- XIAO Jian-zhuang, SONG Zhi-wen, ZHANG feng. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J] Journal of Building Materials, 2010,13(1):17–21. (In Chinese)
- [24] 龚建清, 张婵娟. 玻化微珠保温砂浆导热系数模型研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2014,41(6):99–105.
- GONG Jian-qing, ZHANG Chan-tao. Study of the thermal conductivity model of hollow beads insulating mortar[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2014,41(6): 99–105. (In Chinese)
- [25] 朱明, 王方刚, 张旭龙, 等. 泡沫混凝土孔结构与导热性能的关系研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013,35(3):20–25.
- ZHU Ming, WANG Fang-gang, ZHANG Xu-long, *et al.* Research on the relationship between pore structure and thermal conductivity of foamed concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(3):20–25. (In Chinese)