

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.06.013

# 聚合物乳液对发泡水泥板的改性研究

王健雁, 刘萍, 唐爱东, 潘春跃

(中南大学 化学化工学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 分别利用石蜡乳液、硅丙乳液和苯丙乳液, 通过浸泡吸附和减压吸附两种不同吸附方式, 对发泡水泥板进行了改性研究。研究发现: 减压吸附比浸泡吸附的吸附效果更好, 并且发泡水泥板乳液吸附率与聚合物乳液中的固体物质量分数正相关。所得实验结果表明, 3种聚合物乳液中, 石蜡乳液对发泡水泥板的体积吸水率影响较大, 经吸附率为2.4%的石蜡乳液改性发泡水泥板的体积吸水率为8.9%, 约降低了40.6%。发泡水泥板吸附硅丙乳液或苯丙乳液有利于抗压强度的提高, 经硅丙乳液吸附改性后, 发泡水泥板的抗压强度上升至0.624 MPa, 约提高了51.4%; 而经苯丙乳液吸附改性后水泥板的抗压强度上升至0.527 MPa, 约提高了27.9%。

**关键词:** 发泡水泥板; 保温隔热; 减压吸附; 乳液改性; 浸泡吸附

**中图分类号:** TU528.042<sup>+</sup>.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2017)06-0072-06

## Effects of Emulsion Modification on Properties of Foamed Cement Boards

WANG Jianyan, LIU Ping, TANG Aidong, PAN Chunyue

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Paraffin emulsion, silicone emulsion and styrene-acrylic emulsion have been used respectively to modify the foamed cement boards by two different ways, namely, immersion adsorption and vacuum adsorption. The results show that the adsorption effect of pressure reduction adsorption is better than that of immersion adsorption, with the adsorption rate of foam cement boards positively related to the mass fraction of solid substance in polymer emulsion. In addition, for the three kinds of emulsion, the paraffin emulsion has a great influence on the volume absorption rate of the foamed cement boards. The volume water absorption of paraffin modified foam cement plates is 8.9%, about 40.6% lower than that of 2.4%. The adsorption of silicone acrylic emulsion or styrene acrylic emulsion on foamed cement boards helps to improve the compressive strength. The compressive strength of the foamed cement boards increases to 0.624 MPa after the modification of the silicone acrylic emulsion, an increase by approximately 51.4%; while after the modification of styrene acrylic emulsion, the compressive strength of the cement boards increases to 0.527 MPa, an increase by approximately 27.9%.

**Keywords:** foamed cement board; thermal insulation; vacuum adsorption; emulsion modification; immersion adsorption

收稿日期: 2017-04-04

基金项目: 中南大学米塔尔创新实验基金资助项目 (MX2016428)

作者简介: 王健雁 (1990-), 男, 四川泸州人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为新型建筑材料,

E-mail: wangs135@163.com

通信作者: 潘春跃 (1963-), 男, 湖南邵阳人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事功能材料方面的教学与研究,

E-mail: panchunyue@csu.edu.cn

## 0 引言

发泡水泥板是一种气孔率大于 90% 的无机保温材料, 即在连续的水泥无机相中均匀分布泡孔结构<sup>[1-2]</sup>。发泡水泥板具有优良的保温隔热性能, 并且阻燃性能达到 A 级不燃, 在越来越注重安全问题的今天, 发泡水泥板在民用建筑、工业保温等领域得到了广泛的应用。但已有研究<sup>[3-6]</sup>表明, 传统的发泡水泥板较脆, 且抗压强度较低, 吸水率较高, 因而需要对传统发泡水泥板的性能进行改进。

将聚合物乳液应用到水泥板中, 利用乳液优异的防水性能以及一定的弹性, 可以对复合发泡水泥板的性能进行改进<sup>[7-11]</sup>。为使制得的复合发泡水泥板性能较好, 需将聚合物乳液均匀地吸附在发泡水泥内部。因此, 如何采用新的工艺, 使聚合物乳液能够均匀地被吸附在发泡水泥板内部, 是一个需要解决的关键问题<sup>[12-15]</sup>。目前, 关于以聚合物乳液与水泥复合制备发泡水泥板的研究报道相对较少。为此, 本文拟开展石蜡乳液 (paraffin emulsion, PE)、硅丙乳液 (silicone-acrylic emulsion, SIAE)、苯丙乳液 (the styrene-acrylic emulsion, STAE) 对水泥的吸附改性及其对发泡水泥板性能影响的研究, 这对指导新型墙体材料的研制具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂及仪器

实验用主要原材料见表 1, 实验仪器见表 2。

表 1 实验原材料

Table 1 Experimental raw materials

材料名称	型号或规格	生产厂家
水泥	P·O-42.5	湖南南方宁乡水泥有限公司
聚羧酸减水剂	MH-JS-101	湖南铭煌科技发展有限公司
PP 纤维	3~12 mm	长沙正德建材科技有限公司
硅丙乳液	有效成分质量分数为 45%	广州市中矿化工有限公司
苯丙乳液	有效成分质量分数为 48.5%	广州市中矿化工有限公司
石蜡乳液	有效成分质量分数为 35%	抚顺文爱新科技有限公司
双氧水	有效成分质量分数为 27.5%	市售
稳泡剂	有效成分质量分数为 10%	自制

表 2 实验仪器

Table 2 Experimental instruments

仪器名称	型号	生产厂家
万能试验机	DBSL-30t	Transcell Technology Inc.
导热系数仪	DRCD-3030	天津美特斯试验机厂
鼓风干燥箱	DGF-5AB	天津市泰斯特仪器公司
电子天平	CP124C	奥豪斯仪器 (上海) 有限公司
胶砂搅拌机	NJ-160a	北京龙辰伟业仪器设备有限公司
布氏漏斗	80 mm	江苏顺和教学仪器有限公司

### 1.2 表征与测试方法

#### 1.2.1 干密度的测定

根据 GB/T 5486—2008《无机硬质绝热制品试验方法》中的要求计算试件的干密度。

#### 1.2.2 聚合物乳液吸附率的测定

1) 随机取 3 块样品, 并且将样品加工成规格为 300 mm × 300 mm × 30 mm 的试件。

2) 将试件置干燥箱内, 缓慢升温至 (110 ± 5) °C, 烘干至恒定质量, 然后移至干燥器中冷却至室温。恒定质量的判定依据为恒温 3 h 前后 2 次称量的质量变化率小于总质量的 0.2%。称取试件自然状态下的质量, 记为  $G_1$ 。

3) 将吸附聚合物乳液后的试件置于干燥箱内, 缓慢升温至 (110 ± 5) °C, 烘干至恒定质量, 然后移至干燥器中冷却至室温。恒定质量的判定依据为恒温 3 h 前后 2 次称量的质量变化率小于总质量的 0.2%。称取试件自然状态下的质量, 记为  $G_2$ 。

4) 根据公式 (1) 计算试件的吸附率  $\rho$ :

$$\rho = (G_1 - G_2) \div G_1 \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.3 抗压强度的测定

根据 GB/T 5486—2008《无机硬质绝热制品试验方法》中的要求测定试件的抗压强度。

#### 1.2.4 体积吸水率的测定

根据 GB/T 5486—2008《无机硬质绝热制品试验方法》中的要求测定并计算试件的体积吸水率。

### 1.3 聚合物乳液吸附改性发泡水泥板的制备

#### 1.3.1 发泡水泥板的制备

本实验采用自制稳泡剂, 并以工业双氧水为发泡剂, 且添加憎水剂来改性水泥发泡板。具体操作如下: 在胶砂搅拌机中, 将普通硅酸盐 425 水泥 1 kg、聚羧酸减水剂 0.01 kg、稳泡剂 0.01 kg 混合, 室温下搅拌 1 min; 加入 37 °C 的水 0.47 kg, 继续搅拌 2 min。搅拌均匀后, 加入 0.052 kg 双氧水, 搅拌 8 s 后迅速将物料倒入模具中静置发泡, 室温养护 24 h, 脱模。切割, 自然养护 28 d, 待用。

#### 1.3.2 工艺流程

聚合物乳液改性发泡水泥板的工艺流程见图 1。

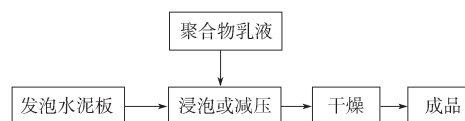


图 1 聚合物乳液改性发泡水泥板的工艺流程

Fig. 1 Technological process of foaming cement boards modified by polymer emulsion

#### 1.3.3 浸泡吸附

在 1 000 mL 烧杯中, 将一定固含量的有机物乳

液和一定量的水,在室温下搅拌 20 min,有机物乳液和水混合均匀,没有分层现象。将预制的发泡水泥板试件和一铁块用橡皮筋系在一起,放入乳液中,完全浸泡吸附。30 min 后取出,置于烘箱中干燥,使聚合物固化成膜。

#### 1.3.4 减压吸附

聚合物乳液复合发泡水泥板的减压吸附工艺流程如下:搭建好图 2 所示装置,将发泡水泥板试件放在布氏漏斗内,空隙处用滤纸填上。在 1 000 mL 烧杯中,将一定固含量的有机物乳液和一定量的水在室温下搅拌 20 min,有机物乳液和水混合均匀,没有分层现象。将搅拌均匀的有机物乳液倒入布氏漏斗,打开真空泵抽滤,重复 3 次;将试件取出置于烘箱中干燥,使聚合物固化成膜。

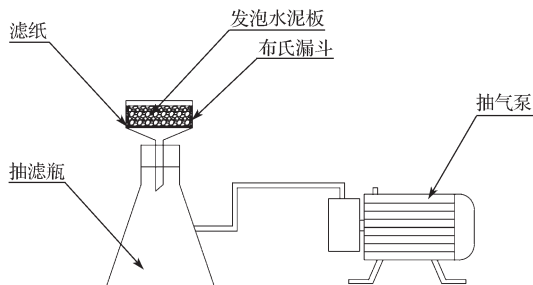


图 2 减压吸附装置图

Fig. 2 Vacuum adsorption device diagram

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附工艺对吸附率的影响

在浸泡条件下进行乳液吸附时,乳液在发泡水泥板表面和内部吸附不均匀,因此本文改进了吸附方法,采用减压吸附(见图 2)的方法,利用抽气泵使抽滤瓶中的压强降低,达到快速吸附乳液的目的。在固体物质量分数为 40% 的条件下,以两种吸附方式进行对比试验,所得吸附率结果对比见图 3。

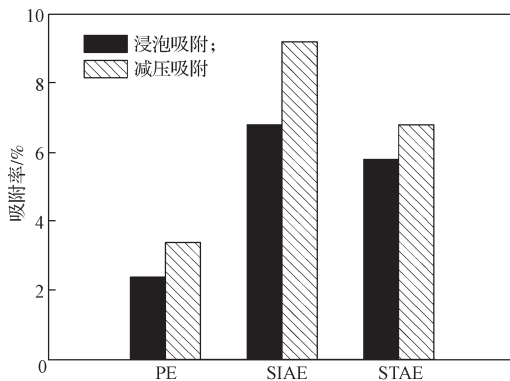


图 3 不同吸附方式下的乳液吸附率

Fig. 3 Adsorption rate of emulsion under different adsorption methods

由图 3 可以得知,以常规的浸泡吸附方式处理发泡水泥板试件 1 h 后,测得 PE 的吸附率约为 2.4%;而改变吸附工艺后,即以减压吸附方式处理发泡水泥板试件 3 次后的 PE 吸附率约为 3.4%,相比常规浸泡的约提高了 41.7%。

由图 3 还可以得知,以常规浸泡吸附方式处理发泡水泥板试件 1 h 后,测得 SIAE 的吸附率约为 6.8%;而以减压吸附处理发泡水泥板试件 3 次后,SIAE 的吸附率约为 9.2%,相比常规浸泡的约提高了 35.3%。

常规浸泡吸附方式处理发泡水泥板试件 1 h 后,测得 STAE 的吸附率约为 5.8%;而以减压吸附处理发泡水泥板试件 3 次后,STAE 的吸附率约为 6.8%,相比常规浸泡的约提高了 17.2%。

可见,在固体物质量分数相同的条件下,减压吸附方式的乳液吸附率相对较高,且减压吸附方式更节省时间,所以乳液改性复合发泡水泥中应优先采用减压吸附处理工艺。

### 2.2 聚合物乳液固含量对吸附率的影响

实验过程中发现,改变吸附工艺后,乳液的吸附速率较快,在短时间内即可被大量吸附,且吸附时间对吸附率的影响不大,表明乳液在发泡水泥板中的吸附率主要决定于乳液中的固体物质量分数。图 4 所示为不同固体物质量分数下发泡水泥板对 3 种聚合物乳液的饱和吸附率曲线。

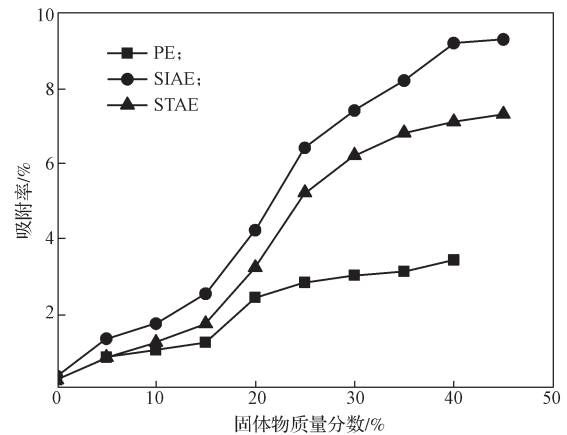


图 4 不同固体物质量分数的乳液吸附率

Fig. 4 Adsorption rates of emulsion with different solid mass fraction

由图 4 可知,饱和乳液吸附率与乳液中的固体物质量分数成正比。开始阶段,3 种乳液的吸附率随固体物质量分数的增加缓慢增大,这是因为固体物质量分数较低,可吸附的乳液分子较少;而当乳液中固体物质量分数超过 15% 后,随着固体物质量分数的进一步增加,饱和乳液吸附率增加较快;而当 PE 乳液中固体物质量分数超过 20%、SIAE、STAE 乳液中固



体物质量分数超过 25% 后, 随着固体物质量分数的继续升高, 发泡水泥板的孔隙逐渐被填满, 乳液的吸附率增加速度变慢。

相对而言, 3 种乳液中, PE 的吸附率随固体物质量分数增加的变化趋势较 SIAE、STAE 的小。在相同固体物质量分数下, 3 种乳液在发泡水泥板中的吸附率由大到小依次为 SIAE、STAE、PE。

### 2.3 聚合物乳液吸附对吸水率的影响

分别使用固体物质量分数为 20% 的石蜡乳液、硅丙乳液和苯丙乳液对发泡水泥板进行改性, 所得各复合发泡水泥板的性能指数见表 3。

表 3 发泡水泥板各项性能数据

Table 3 Performance data of foamed cement boards

名称	密度 / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	抗压强度 / MPa	体积吸水率 / %
普通发泡水泥板	220	0.412	15.0
PE 改性发泡水泥板	250	0.424	8.9
SIAE 改性发泡水泥板	267	0.624	14.5
STAE 改性发泡水泥板	260	0.527	14.7

分析表 3 中的数据可以得知: 改性前, 自制的发泡水泥板的体积吸水率约为 15.0%, 而发泡水泥板的行业标准为体积吸水率低于 10%; 经石蜡乳液 (PE) 吸附改性后的发泡水泥板的体积吸水率为 8.9%, 相较于自制发泡水泥板的约降低了 40.6%; 而硅丙乳液和苯丙乳液对发泡水泥板的体积吸水率的改善效果不明显。因此, 选择石蜡乳液做不同吸附率发泡水泥板的憎水改性实验, 所得体积吸水率随石蜡乳液吸附率的变化曲线如图 5 所示。

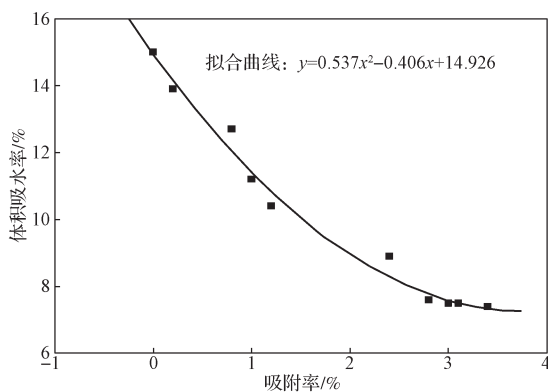


图 5 体积吸水率随石蜡乳液吸附率的变化曲线

Fig. 5 Curves of adsorption rate of water absorption with paraffin emulsion

由图 5 可以得知, 传统发泡水泥板的体积吸水率较大, 高达 15.0%。这是因为其结构疏松多孔, 孔隙率较高, 体积吸水率较大。但石蜡乳液可以在发泡水泥孔隙上固化成膜, 使发泡水泥板的结构更为致密, 并且石蜡具有极强的疏水性能, 在发泡水泥板表面形

成防水层后, 水分子难以渗入, 从而降低了发泡水泥板的吸水率。当乳液的吸附率达到 3.4% 时, 改性发泡水泥板的体积吸水率降至 7.5%。之后, 随着吸附率的进一步增大, 发泡水泥板的体积吸水率下降趋缓。这可能是因为发泡水泥板本身固有的多孔特性导致体积吸水率再难以下降。因此, 使用固体物质量分数为 20% 的石蜡乳液改性发泡水泥板较为合适, 此时乳液的吸附率达 2.4%, 发泡水泥板的体积吸水率降至 8.9%。

### 2.4 聚合物乳液对发泡水泥板抗压强度的影响

有机乳液采用直接浸泡吸附在发泡水泥板上的方法, 在发泡水泥板表面形成膜结构, 增大其抗压强度, 所得各复合发泡水泥板的应力-应变曲线检测结果如图 6 所示。

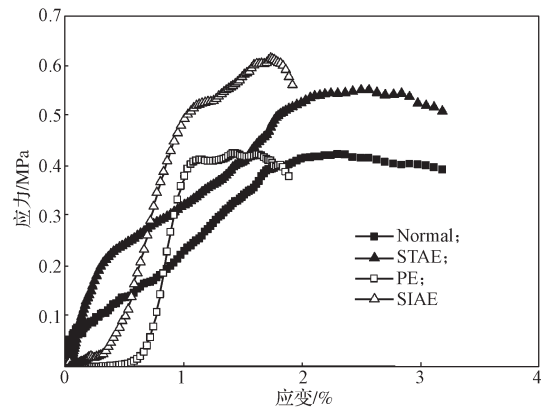


图 6 乳液改性发泡水泥板的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of foamed cement boards modified by emulsion

如表 3 所示, 未改性发泡水泥板的抗压强度仅为 0.412 MPa, 而经硅丙乳液吸附改性后, 其抗压强度显著上升至 0.624 MPa, 约提高了 51.4% (见图 6); 经苯丙乳液吸附改性后, 复合水泥板的抗压强度上升至 0.527 MPa, 约提高了 27.9% (图 6); 而石蜡乳液对抗压强度的影响不明显。这是因为苯丙乳液或者硅丙乳液紧密黏附在水泥泡孔表面, 其分子链拥有良好的韧性和强度, 对发泡水泥板起到了明显的增强作用; 此外, 发泡水泥板放置时间久了之后会出现微裂纹, 在受到外力作用时, 微裂纹会成为应力集中点, 从而降低发泡水泥板的抗压强度, 苯丙乳液或者硅丙乳液的分子可以填补发泡水泥板的微裂纹从而提高其抗压强度。

苯丙乳液和硅丙乳液对发泡水泥板的抗压强度增强效果比较明显。但是在市场上苯丙乳液约为 6 000 元/t, 硅丙乳液成本约为 8 000 元/t, 从成本上考虑, 应选择苯丙乳液做不同吸附率发泡水泥板的改性。发泡水泥板抗压强度随着苯丙乳液吸附率变

化曲线如图7所示。

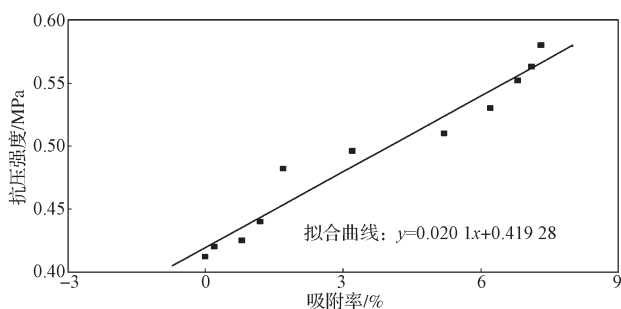


图7 抗压强度-苯丙乳液吸附率变化曲线

Fig. 7 Variation curves of compressive strength with styrene acrylic emulsion

由图7可以得知,发泡水泥板的抗压强度随着苯丙乳液吸附率的增大而加大,吸附率越大,增强效果越明显。

### 3 结论

本文采用石蜡乳液、硅丙乳液、苯丙乳液对发泡水泥板进行了吸附改性,并且在乳液固体物质量分数一定的情况下,研究并分析了以不同吸附方法对改性发泡水泥板中乳液吸附率的影响,以及不同的乳液固体物质量分数对发泡水泥板乳液吸附率的影响,然后对改性发泡板的力学性能以及吸水率等进行了测试和分析,得到如下主要结果:

1) 与普通的浸泡吸附相比,减压吸附能在更短的时间内达到更好的吸附效果。实验发现,相较于浸泡吸附,减压吸附时石蜡乳液(PE)的吸附率约提高了41.7%;硅丙乳液(SIAE)的吸附率约提高了35.3%。苯丙乳液(STAE)的吸附率约提高了17.2%。

2) 发泡水泥板的乳液吸附率与乳液中固体物质量分数正相关。随着乳液中固体物质量分数的增大,开始阶段,乳液吸附率增加较慢;至一定阶段,即固体物质量分数超过15%后,随着其进一步增加,饱和和乳液的吸附率增加较快;一定阶段后,随着固体物质量分数的升高,乳液的吸附率增加速度又变慢。

3) 经石蜡乳液(PE)吸附改性的发泡水泥板的体积吸水率为8.9%,约降低了40.6%;硅丙乳液和苯丙乳液对发泡水泥板的体积吸水率无明显影响。使用固体物质量分数为20%的石蜡乳液改性发泡水泥板较合适,此时乳液吸附率达2.4%,而发泡水泥板的体积吸水率降至8.9%。

4) 对使用乳液改性后的发泡水泥板的力学性能测试结果表明,未改性发泡水泥板的抗压强度仅为0.412 MPa,而经硅丙乳液吸附改性后,其抗压强度

显著上升,为0.624 MPa,约提高了51.4%;经苯丙乳液吸附改性水泥板的抗压强度上升至0.527 MPa,约提高了27.9%;而石蜡乳液对水泥板抗压强度的影响不明显。

通过与传统的发泡水泥板性能对比可知,本实验制备的改性发泡水泥板具有力学性能优异、抗压强度较高、体积吸水率较低等优点。但是文中侧重使用单一型的聚合物改性发泡水泥板,以提高其某一方面的性能。因此,采用复合型的聚合物乳液改性发泡水泥板,得到吸附率高、吸水率低、力学性能兼具的改性发泡水泥板,并将其推广到工业化生产中,是下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 许跃庭. 复合发泡水泥板在外墙保温系统中的应用[J]. 低碳世界, 2016(19): 135-136.  
XU Yueting. Application of Composite Foamed Cement Boards in Exterior Wall Thermal Insulation System[J]. Low Carbon World, 2016(19): 135-136.
- [2] ANG C N, WANG Y C. The Effect of Water Movement on Specific Heat of Gypsum Plasterboard in Heat Transfer Analysis Under Natural Fire Exposure[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(7): 505-515.
- [3] 薛黎明. 有机无机复合保温板及其应用技术研究[J]. 新型建筑材料, 2016(1): 68-71, 75.  
XUE Liming. The OIC Thermal Insulating Panel and It's Application Technology Research[J]. New Building Materials, 2016(1): 68-71, 75.
- [4] 陈海彬. 化学发泡泡沫混凝土孔结构的调控研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2015.  
CHEN Haibin. The Regulation of Pore Structure of Foamed Concrete by Chemical Foaming [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2015.
- [5] 刁桂芝, 刘光华, 王志新. 几种新型外墙外保温材料介绍及应用[J]. 能源与节能, 2014(11): 76-78, 107.  
DIAO Guizhi, LIU Guanghua, WANG Zhixin. Introduction and Application of Several New Exterior Thermal Insulation Materials of External[J]. Energy and Energy Conservation, 2014(11): 76-78, 107.
- [6] 高会. 改性脲醛树脂/水泥复合发泡保温材料的制备与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
GAO Hui. Preparation and Research of Thermal Insulation Foamed Material by Modified Urea-formaldehyde/Cement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] OTHUMAN M A, WANG Y C. Elevated-Temperature Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete[J].

- Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 705-716.
- [8] 徐 峰. 外墙保温隔热新材料与新技术研究[J]. 新型建筑材料, 2013(12): 52-57.  
XU Feng. The Research for New Material and New Technology of Exterior Walls Thermal Insulation[J]. New Building Materials, 2013 (12): 52-57.
- [9] THOMAS G. Thermal Properties of Gypsum Plasterboard at High Temperatures[J]. Fire and Materials, 2002, 26(1): 37-45.
- [10] 王武祥, 张磊蕾, 王爱军, 等. 水泥基发泡混凝土的生产与应用[J]. 墙材革新与建筑节能, 2012(4): 33-38.  
WANG Wuxiang, ZHANG Leilei, WANG Aijun, et al. The Production and Application of Cement Foamed Concrete[J]. Wall Materials Innovation and Building Energy Saving, 2012(4): 33-38.
- [11] 曾 理, 孙林柱. 复合陶粒混凝土砌块自保温墙体的热工性能分析[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(6): 61-65.  
ZENG Li, SUN Linzhu. Thermal Performance Analysis on Insulation Wall Made of Composite Ceramic Concrete Block[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(6): 61-65.
- [12] 丁 益, 任启芳, 闻 超. 发泡混凝土研制进展[J]. 混凝土, 2011(10): 13-15, 19.  
DING Yi, REN Qifang, WEN Chao. Progress of Research on Foam Concrete[J]. Concrete, 2011(10): 13-15, 19.
- [13] 王永亮. 无机保温材料在外墙外保温体系中的应用与研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.  
WANG Yongliang. Application and Research on Inorganic Insulation Material in Exterior Thermal Insulation System [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [14] 李中原, 唐福永. 发泡混凝土的性能与应用[J]. 河南建材, 2010(1): 39-40.  
LI Zhongyuan, TANG Fuyong. Properties and Applications of Foamed Concrete[J]. Henan Building Materials, 2010(1): 39-40.
- [15] 黄文凯, 王小凡. 高层建筑节能设计探讨[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(3): 15-17.  
HUANG Wenkai, WANG Xiaofan. Discussion on the Design of Energy-Saving High-Rise Buildings[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(3): 15-17.
- [16] 王剑平. 关于建筑节能检测方法的探讨[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(2): 14-16.  
WANG Jianping. Analysis of Detection Method for Buildings Energy Conservation[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(2): 14-16.
- [17] 董晓楠. 水泥基有机-无机复合外墙保温材料的研究[D]. 济南: 济南大学, 2014.  
DONG Xiaonan. Study on Cement-Based Organic-Inorganic Composite Thermal Insulation Materials for Exterior Wall[D]. Jinan: Jinan University, 2014.
- [18] 徐建军, 刘宏亮, 钱中秋, 等. 改善复合发泡水泥板性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2013(2): 38-40, 46.  
XU Jianjun, LIU Hongliang, QIAN Zhongqiu, et al. Study on Improved Properties of Composite Foam Cement Boards[J]. New Building Materials, 2013(2): 38-40, 46.
- [19] 刘 凯. 复合建筑阻燃保温材料的研究与性能表征[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.  
LIU Kai. Research and Performance Characterization of Flame Retardant and Heat Insulation Materials for Composite Buildings[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.

(责任编辑: 廖友媛)