

文章编号:1007-9629(2024)09-0832-05

SiO₂气凝胶改性复合防火聚苯板的制备及性能

彭月飞*, 杨鹏辉, 杨晨

(三棵树涂料股份有限公司 福建省建筑涂料企业重点实验室, 福建 莆田 351100)

摘要: 构建了聚苯乙烯泡沫颗粒与玻化微珠二级级配模型, 得出聚苯乙烯泡沫颗粒与玻化微珠的最佳粒径比约为 5:2, 体积比约为 100:7. 根据级配模型配制骨料, 采用模压成型工艺制备复合防火聚苯板, 显微结构显示其骨料堆积紧密、有序. 分析了硅酸盐胶凝材料、SiO₂气凝胶及憎水剂对复合防火聚苯板性能的影响. 结果表明: 复合防火聚苯板的阻燃性能及拉拔强度随着硅酸盐胶凝材料掺量的增加而增大; 导热系数和拉拔强度随着 SiO₂气凝胶掺量的增加而降低, 软化系数随着 SiO₂气凝胶掺量的增加而升高; 吸水率随着憎水剂掺量的增加而降低.

关键词: 复合防火聚苯板; 聚苯乙烯泡沫颗粒; SiO₂气凝胶; 燃烧总热值; 级配模型

中图分类号: TQ325.2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.09.008

Preparation and Performance of SiO₂ Aerogel-Modified Composite Fire-Resistant Polystyrene Foam Board

PENG Yuefei*, YANG Penghui, YANG Chen

(Fujian Key Laboratory of Architectural Coating, Skshu Paint Co., Ltd., Putian 351100, China)

Abstract: A binary gradation model of polystyrene foam particles and glass beads was constructed, and the optimal particle size gradation of polystyrene foam particles and glass beads was about 5:2 and the volume ratio was about 100:7. Based on the gradation model, the aggregate was prepared and the composite fire-resistant polystyrene foam boards were fabricated using molding process. The microstructure diagrams revealed that the aggregate stacked up in a dense and well-organized arrangement. An analysis was conducted to investigate the influence of silicate cementitious material, SiO₂ aerogel, and hydrophobic agent on the performance of the composite fire-resistant polystyrene foam board. The results indicate that an increase in the content of silicate cementitious material enhances the fire resistance and tensile strength of the composite fire-resistant polystyrene foam board. Conversely, an increase in SiO₂ aerogel content results in a reduction of thermal conductivity and tensile strength, accompanied by an increase in the softening coefficient. Additionally, the water absorption rate decreases with an increase in the content of the hydrophobic agent.

Key words: fire-resistant composite polystyrene foam board; polystyrene foam particle; SiO₂ aerogel; total calorific value of combustion; gradation model

聚苯板(EPS)具有轻质、保温、隔音、耐候等特性,且价格便宜、施工简便,已广泛应用于建筑的节能保温,至今已有70多年的应用历史^[1-3].然而聚苯板是热塑型材料,防火等级最高只有B1级^[4],耐火

性不足,遇火会收缩、熔化、流淌,火焰蔓延速度快^[5].近几年的数起重大建筑外墙保温火灾都与聚苯板有关^[6-7]。“双碳”政策下,对建筑节能提出了更高的要求,开发高效节能且A级防火的保温材料将

收稿日期:2023-11-02; 修订日期:2024-01-17

基金项目:全国建材行业第二批重大科技攻关揭榜挂帅项目(202201JBGS18-01)

第一作者(通讯作者):彭月飞(1981—),男,河北张家口人,三棵树涂料股份有限公司资深工程师,硕士.E-mail:yuefei27@163.com

成为市场主旋律^[8-9].SiO₂气凝胶是一种多功能的高效保温隔热环保材料,具有独特的低热导率、耐高温、遇火不燃等特性,对建筑节能的发展具有重要意义^[10].

目前匀质A级外墙保温材料主要有岩棉板(带)、复合聚苯板、真空绝热板等^[11-12].复合聚苯板既改善了模塑聚苯板的燃烧性能又保留了其优良的保温隔热性能,而且具有较高的强度,正在被各院企开发、推广、应用^[13-18].本文在传统搅拌型生产工艺基础上进行加压处理(即模压成型工艺),采用憎水型SiO₂气凝胶复配,并根据级配模型优化复配保温芯材,制备了一种低导热、高强度复合防火聚苯板.

1 试验

1.1 主要原料

聚苯乙烯泡沫颗粒来自台湾见龙机构,密度4~6 kg/m³;中空玻化微珠(VM),型号HL20,来自信阳华豫矿业;SiO₂气凝胶,型号AG-Paste,来自深圳中凝科技;5044乳胶粉来自德国瓦克;硅酸盐溶液来自西安通鑫,为硅酸锂/硅酸钾混合溶液,固含量27%(质量分数,文中涉及的含量及掺量等除特别说明外均为质量分数);憎水剂,型号Seal80,来自诺力昂特种化学;增稠剂,型号KMC—2010,来自上海惠广精细化工;水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,来自海螺集团;水为自来水.

1.2 样品制备

1.2.1 保温芯材级配模型及配比

合理的粒径级配,可以降低骨料间的空隙率及体系的比表面积,进而减少胶凝材料的用量,同时保证体系有较好的和易性及物理强度.

根据晶格的球体面心立方最紧密堆积模型^[19],

对复合保温板的保温芯材作如下简化:(1)聚苯乙烯泡沫颗粒为大小一致的球体;(2)聚苯乙烯泡沫颗粒按面心立方最紧密堆积;(3)玻化微珠作为小球体,紧密有序地填充于聚苯乙烯泡沫颗粒空隙间.

二级级配模型见图1,其中深灰色大球代表聚苯乙烯泡沫颗粒,浅灰色小球代表玻化微珠.

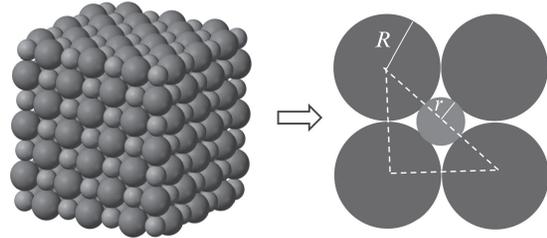


图1 二级级配模型

Fig. 1 Binary gradation model

模型中聚苯乙烯泡沫颗粒半径 R 与玻化微珠半径 r 之间的关系为:

$$(2R + 2r)^2 = 2 \times (2R)^2 \quad (1)$$

$$r = (\sqrt{2} - 1)R \approx 0.4R \quad (2)$$

根据模型优化保温芯材级配,得到:聚苯乙烯泡沫颗粒与玻化微珠的最佳粒径比约为5:2,体积比约为100:7.

1.2.2 产品制备

采用模压成型工艺,按照配比(见表1),依次将聚苯乙烯泡沫颗粒、玻化微珠、气凝胶颗粒加入搅拌锅中,在转速100 r/min下搅拌1 min,然后将硅酸盐溶液及各种助剂组成的混合浆料加入搅拌锅中,在500 r/min下搅拌5 min,直至形成匀质浆料.将搅拌均匀的混合料倒入成型模具中,压缩至初始体积的60%后定型,放入恒温箱内于50℃下养护7 d,脱模成型.

表1 复合聚苯板的配比

Table 1 Mix proportion of composite polystyrene foam board

EPS particle	Hollow vitrified microsphere	SiO ₂ aerogel	Silicate solution	Emulsion powder	Hydrophobic agent	Thickening agent	Cement	Water
25	161	3	720	10	1.5	2	0.5	77

Unit: kg/m³

1.3 主要仪器和设备

测试所使用的万能试验机型号为UTM5504,来自深圳三思纵横;体视显微镜型号为SZX10,来自日本奥林巴斯;导热系数测试仪型号为HFM446,来自德国耐驰;热值测试仪型号为JR-RZ-C,来自沈阳紫微;小型自动搅拌机型号为DA-TBS30-DAM4,来自昆山德斯威精密机械.

2 结果与讨论

2.1 微观结构分析

采用模压成型工艺制得的最优级配下复合聚苯板的显微结构见图2.由图2可以看出:玻化微珠紧密有序地填充于聚苯乙烯泡沫颗粒空隙,与设计模型相匹配;SiO₂气凝胶均匀分散于复合聚苯板体系中;硅酸锂/硅

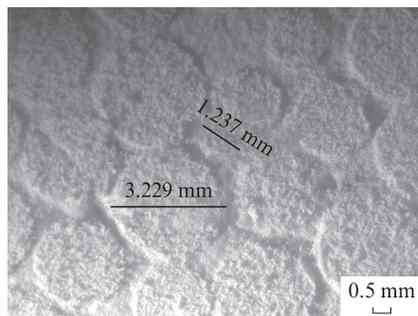


图2 复合聚苯板的显微结构

Fig. 2 Microscopic structure of composite polystyrene foam board

酸钾混合液和乳胶粉组合成的胶凝材料紧密包覆保温芯材并形成蜂窝状骨架.这种结构既能够提升复合聚苯板的物理强度及韧性,又能够提高其阻燃性能.

2.2 硅酸盐掺量对复合聚苯板燃烧性能及拉拔强度的影响

阻燃性能和强度是外墙保温材料两个核心指标,直接关系到建筑施工和使用的安全,特别是关系到外保温系统的着火、开裂、脱落3大顽疾.对不同硅酸盐掺量 $w(\text{silicate})$ 下复合聚苯板进行燃烧总热值及拉拔强度检测,来验证硅酸盐掺量对复合聚苯板阻燃性能及安全性能的影响,结果见图3.

由图3可见:复合聚苯板的燃烧总热值随着硅酸盐掺量的增加而降低,其拉拔强度随着硅酸盐掺量的增加而增大.燃烧总热值主要与复合聚苯板中无机物含量有关,无机物含量越多材料放热越少.当硅

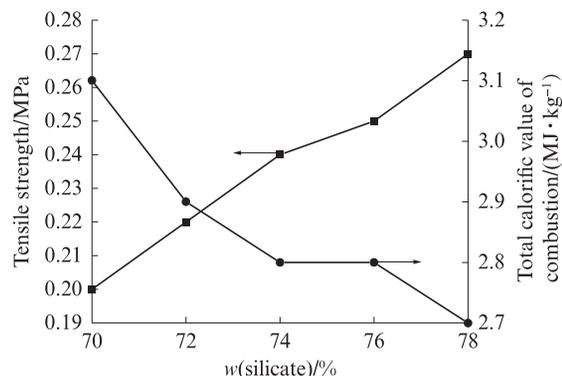


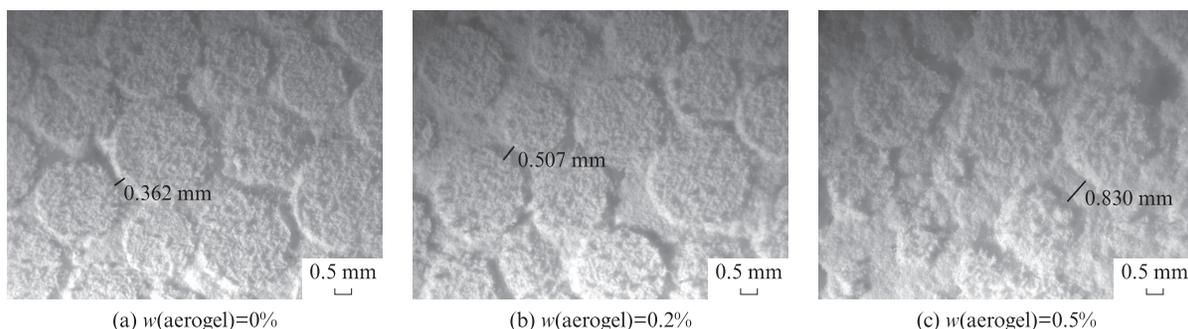
图3 硅酸盐掺量对复合聚苯板燃烧性能和拉拔强度的影响

Fig. 3 Effect of silicate use level on combustion performance and tensile strength of composite polystyrene foam board

酸盐掺量为72%时,复合聚苯板的燃烧总热值为2.9 MJ/kg,其燃烧性能满足GB 8624—2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》中燃烧性能A2级要求,即燃烧总热值 ≤ 3.0 MJ/kg,此时复合聚苯板的拉拔强度达到0.22 MPa.

2.3 SiO₂气凝胶掺量对复合聚苯板导热系数及拉拔强度的影响

导热系数的高低决定了复合聚苯板保温性能的好坏.SiO₂气凝胶是密度最小的无机固体,具有极低的导热系数,但强度很低.SiO₂气凝胶掺量 $w(\text{aerogel})$ 对复合聚苯板微观结构的影响见图4,对其导热系数及拉拔强度的影响见图5.

图4 SiO₂气凝胶掺量对复合聚苯板微观结构的影响Fig. 4 Effect of SiO₂ aerogel use level on structure of microscopic composite polystyrene foam board

由图4可见,随着SiO₂气凝胶掺量的增加,骨料间孔隙增多、间隙增大,骨料间更加离散,体系密实度降低.由图5可见,随着SiO₂气凝胶掺量的增加,复合聚苯板的导热系数和拉拔强度下降.SiO₂气凝胶粒径为50 μm 左右,呈粉体状,填充于保温芯材的空隙中.由于其强度低且具有一定的憎水性,因此与硅酸盐胶凝材料的黏合度较差,可视为体系中具有保温性能的灰分.当SiO₂气凝胶掺量小于0.2%时,SiO₂

气凝胶所起作用以填充体系的空隙为主,复合聚苯板的拉拔强度随着SiO₂气凝胶掺量的增加而缓慢下降;当SiO₂气凝胶掺量大于0.2%时,SiO₂气凝胶开始影响胶凝材料形成的骨架,此后复合聚苯板的拉拔强度随着SiO₂气凝胶掺量的增加快速降低.SiO₂气凝胶对复合聚苯板的保温性能的影响近似于线性关系.当SiO₂气凝胶掺量为0.2%时,复合聚苯板的拉拔强度为0.20 MPa,导热系数可达0.49 W/(m·

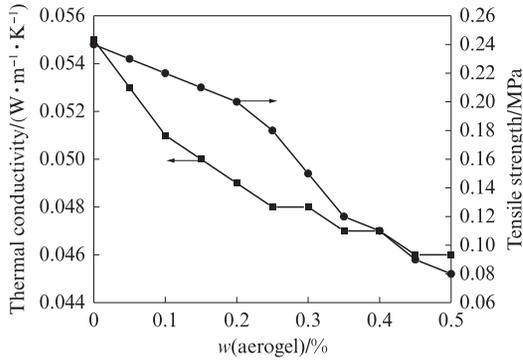


图5 SiO₂气凝胶掺量对复合聚苯板导热系数和拉拔强度的影响

Fig. 5 Effect of SiO₂ aerogel use level on thermal conductivity and tensile strength of composite polystyrene foam board

K),满足JG/T 536—2017《热固复合聚苯乙烯泡沫保温板》中050级(导热系数 ≤ 0.050 W/(m·K)、材料垂直于板面方向抗拉强度 ≥ 0.10 MPa)的要求。

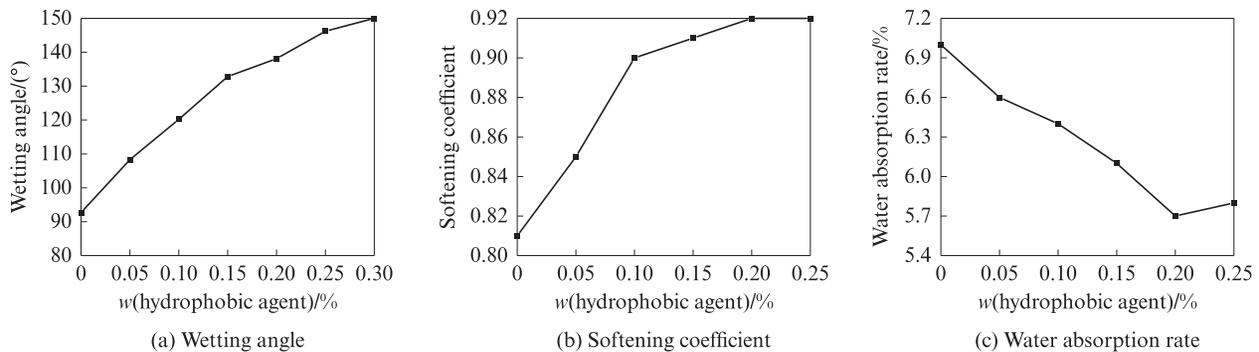


图6 憎水剂掺量对复合聚苯板憎水性能的影响

Fig. 6 Effect of hydrophobic agent use level on water repellent property of composite polystyrene foam board

3 结论

(1)借鉴晶体最紧密堆积模型对复合聚苯板建模,得出保温芯材最佳级配:聚苯乙烯泡沫颗粒与玻化微珠的粒径比约为5:2,体积比约为100:7.从显微结构可知,采用模压成型工艺制得的复合聚苯板,玻化微珠紧密填充于聚苯乙烯泡沫颗粒空隙, SiO₂气凝胶均匀分散于体系中。

(2)复合聚苯板的阻燃性能及拉拔强度随着硅酸盐掺量的增加而增强,当硅酸盐掺量达到72%时,复合聚苯板燃烧总热值为2.9 MJ/kg,符合GB 8624—2012标准中A2级燃烧性能指标,此时拉拔强度为0.22 MPa。

(3)随着SiO₂气凝胶掺量的增加,复合聚苯板的导热系数和拉拔强度随之下降.当SiO₂气凝胶掺量为0.2%时达到最佳状态,此时复合聚苯板的拉拔强度为0.20 MPa,导热系数可达0.49 W/(m·K),达到

2.4 憎水剂对复合聚苯板憎水性能的影响

聚苯板材料的耐水性直接关系到外墙保温系统的耐候性和耐久性.吸水率和软化系数是材料耐水性的2个重要指标.憎水剂掺量对复合聚苯板憎水性能的影响如图6所示。

由图6可见,随着憎水剂掺量的增加,复合聚苯板的润湿角增大,软化系数升高,吸水率降低.憎水剂增大了体系的润湿角,也提高了组分间的憎水性能,进而降低了体系间的黏合度.当憎水剂掺量为0.15%时,体系处于临界平衡点,复合聚苯板的软化系数为0.91,吸水率为6.1%,满足JG/T 536—2017标准中050级(软化系数 ≥ 0.70 、体积吸水率 $\leq 10\%$)的要求.在临界点前,随着憎水剂的掺入,复合聚苯板的憎水性能快速提高;过临界点后,材料在憎水剂的作用下黏合度下降,体系内的微缝隙增多,导致复合聚苯板的软化系数降低、吸水率升高。

JG/T 536—2017标准中050级的要求。

(4)随着憎水剂掺量的增加,复合聚苯板的软化系数升高,吸水率降低.当憎水剂掺量为0.15%时,体系处于临界平衡点,此时复合聚苯板的软化系数为0.91,吸水率为6.1%,满足JG/T 536—2017标准中050级的要求。

(5)采用聚苯乙烯泡沫颗粒和玻化微珠为主芯材复配SiO₂气凝胶,以硅酸盐为主要胶凝材料制备的A级复合聚苯板具有很好的阻燃性能、力学性能和憎水耐久性能.该研究对于A级新型外墙保温复合材料的推广使用,特别是SiO₂气凝胶应用领域的拓展,有着重要借鉴意义。

参考文献:

[1] 陈春丽.建筑外墙外保温聚苯板生产研发进展[J].合成树脂及塑料,2023,40(3):83-86.

CHEN Chunli. Development of polystyrene insulation plate for

- building's exterior wall[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40(3):83-86.(in Chinese)
- [2] 朱毅. 建筑外墙外保温技术特点、系统概述[C]//建筑科技与管理学术交流会. 北京:[s.n.], 2016:137-138.
ZHU Yi. Building exterior insulation technology features, system overview [C]//Proceedings of the Conference on Building Technology and Management. Beijing:[s.n.], 2016:137-138.(in Chinese)
- [3] 胡验君, 苏振国, 杨金龙. 建筑外墙外保温材料的研究与应用[J]. 材料导报, 2012, 26(增刊2):290-294.
HU Yanjun, SU Zhenguo, YANG Jinlong. Research status and application of external wall thermal insulation materials [J]. Materials Review, 2012, 26(Suppl 2):290-294.(in Chinese)
- [4] 中国轻工业联合会. 绝热用模塑聚苯乙烯泡沫塑料(EPS):GB/T 10801.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
China National Light Industry Council. Moulded polystyrene foam for thermal insulation(EPS):GB/T 10801.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- [5] 张清林, 韩伟平, 王俊胜, 等. 聚合物基建筑保温材料的热行为及燃烧行为[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6):1077-1083.
ZHANG Qinglin, HAN Weiping, WANG Junsheng, et al. Thermal behavior and combustion behavior of polymer-based thermal insulation materials for buildings[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):1077-1083.(in Chinese)
- [6] 王述超, 郑文豫. 改性聚苯板外墙外保温系统的保温隔热性试验研究[J]. 节能技术, 2020, 38(2):178-181.
WANG Shuchao, ZHENG Wenyu. Experimental study on thermal insulation of modified polystyrene board exterior wall insulation system[J]. Energy Conservation Technology, 2020, 38(2):178-181.(in Chinese)
- [7] 殷明, 赵敏. 阻燃硅质聚苯板在屋面工程中的应用[J]. 中国建筑防水, 2016(23):33-36.
YIN Ming, ZHAO Min. Application of flame retardant silica polystyrene board in roof engineering [J]. China Building Waterproofing, 2016(23):33-36.(in Chinese)
- [8] 陈向国. 建筑节能助力“碳达峰、碳中和”[J]. 节能与环保, 2021(7):26-28.
CHEN Xiangguo. Building energy efficiency for “carbon peaking and carbon neutrality”[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021(7):26-28.(in Chinese)
- [9] 惠飞, 江黎丽, 张轶楠, 等. 碱式硫酸镁晶须复合聚苯板性能研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(11):1552-1555.
HUI Fei, JIANG Lili, ZHANG Yinan, et al. Study on properties of magnesium sulfate whisker composite polystyrene plate[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(11):1552-1555.(in Chinese)
- [10] 刘维海, 夏晨康, 张鑫源, 等. 液-液溶剂置换法制备超疏水SiO₂气凝胶[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6):2233-2241.
LIU Weihai, XIA Chenkang, ZHANG Xinyuan, et al. Preparation of superhydrophobic SiO₂ aerogel by liquid-liquid solvent replacement method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(6):2233-2241.(in Chinese)
- [11] 王功振, 王洪飞, 付茂强. 表观密度对聚合聚苯板燃烧性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(3):100-103.
WANG Gongzhen, WANG Hongfei, FU Maoqiang. Effect of apparent density on combustion properties of polymerized polystyrene board [J]. New Building Materials, 2023, 50(3):100-103.(in Chinese)
- [12] 陈春, 钱春香, 陈惠苏, 等. 水泥基保温材料导热系数的模型研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3):348-351.
CHEN Chun, QIAN Chunxiang, CHEN Huisu, et al. Model study of thermal conductivity of cement based thermal insulation materials [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3):348-351.(in Chinese)
- [13] 慧飞. 碱式硫酸镁晶须复合聚苯板的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(增刊1):283-285.
HUI Fei. Study on preparation and performance of MgSO₄ whisker composite polystyrene plate [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(Suppl 1):283-285.(in Chinese)
- [14] 王华. 改性聚苯板外墙外保温系统的隔热性能分析[J]. 当代化工, 2019, 48(8):1690-1694, 1774.
WANG Hua. Analysis on the heat insulation performance of external thermal insulation system with modified polystyrene board [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(8):1690-1694, 1774.(in Chinese)
- [15] 王彬, 徐长春, 陈刚, 等. 聚合聚苯板燃烧热值测定的试验研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(1):129-132, 136.
WANG Bin, XU Changchun, CHEN Gang, et al. Test method analysis on the heat of combustion of AEPS [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2020, 48(1):129-132, 136.(in Chinese)
- [16] 刘玉章, 张君, 王家赫, 等. 建筑外墙外保温做法对结构安全性影响分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1300-1306.
LIU Yuzhang, ZHANG Jun, WANG Jiahe, et al. Analysis on influence of external thermal insulation on structural safety [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1300-1306.(in Chinese)
- [17] 马一平, 王琼琼, 付杰, 等. 水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制拓展[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):327-338.
MA Yiping, WANG Qiongqiong, FU Jie, et al. Expansion of early warning mechanism for plastic shrinkage cracking of cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):327-338.(in Chinese)
- [18] 王震, 王新杰, 朱平华, 等. 基于力学性能的吸附砂浆界限含量分析[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):483-491.
WANG Zhen, WANG Xinjie, ZHU Pinghua, et al. Limit content analysis of adhesion mortar based on mechanical properties [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):483-491.(in Chinese)
- [19] 胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 3版. 上海:上海交通大学出版社, 2010:37-69.
HU Gengxiang, CAI Xun, RONG Yonghua. Fundamentals of materials science [M]. 3rd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010:37-69.(in Chinese)