

DOI: 10.7672/sgjs2025100033

# 住宅外墙外保温材料性能研究\*

陈峰

(中铁十八局集团北京工程有限公司,北京 100076)

**[摘要]** 外墙保温材料选取的合理性直接影响建筑结构保温性能和建筑能耗,开展外墙保温材料的性能研究对建筑绿色减碳具有重要意义,基于此,对比分析了常见外墙保温材料的构成、热力学性能和优缺点,并对6种常见外墙保温材料的热传导性能进行数值模拟。分析可知:保温材料厚度相同时,保温材料的保温性能由好至差依次为聚氨酯硬质泡沫板、发泡聚苯乙烯泡沫板、玻璃棉、岩棉板、泡沫玻璃板和玻化微珠保温砂浆;保温层外表面温度与保温层厚度呈线性相反关系,保温层厚度会增加结构的保温效果;随着保温层热传导系数的增加,保温层外表面温度增大,在进行保温层选择时,应尽量选取导热系数小的保温材料。

**[关键词]** 外墙;保温材料;热传导;数值模拟

**[中图分类号]** TU767

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)10-0033-06

## Performance Study of Residential External Wall Insulation Materials

CHEN Feng

(China Railway 18th Bureau Group Beijing Engineering Co., Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** The rationality of the selection of external wall thermal insulation materials directly affects the thermal insulation performance of building structures and building energy consumption. It is of great significance to study the performance of external wall thermal insulation materials for building green carbon reduction. Based on this, the composition, thermodynamic performance, advantages and disadvantages of common external wall thermal insulation materials are compared and analyzed, and the heat conduction performance of six common external wall thermal insulation materials is numerically simulated. The analysis shows that when the thickness of thermal insulation materials is the same, the thermal insulation performance of thermal insulation materials from good to poor is polyurethane rigid foam board, foamed polystyrene foam board, glass wool, rock wool board, foam glass board and vitrified microsphere thermal insulation mortar. The outer surface temperature of the insulation layer is linearly inversely related to the thickness of the insulation layer, and the thickness of the insulation layer will increase the insulation effect of the structure. With the increase of the thermal conductivity of the insulation layer, the temperature of the outer surface of the insulation layer increases. When selecting the insulation layer, the insulation material with small thermal conductivity should be selected as far as possible.

**Keywords:** exterior wall; insulation materials; heat conduction; simulation

### 0 引言

随着城市化进程的快速推进,建筑业在社会能耗中所占比重日益增大,在双碳政策的引导下,建

筑施工正朝着绿色建造转型。建筑外墙保温材料选取的合理与否直接关系到建筑物使用阶段的能耗,在这一背景下外墙保温材料的选用和热力学性能研究成为当下研究的重点内容<sup>[1-2]</sup>。相关从业人员、学者等对此开展了研究,并在外墙保温材料的选择和优化方面取得了一系列有效成果<sup>[3-4]</sup>。刘志茂等<sup>[5]</sup>通过现场调研,总结了外墙保温材料在施工

\* 中铁十八局集团北京工程有限公司科研课题(BJGS-YF-2023-DKH-01)

[作者简介] 陈峰,工程师,E-mail:1444078573@qq.com

[收稿日期] 2024-12-10

期和建设期存在的质量问题,并从设计和施工角度提出了外墙保温系统质量提升措施和建议。欧阳的华等<sup>[6]</sup>通过试验测试对比分析了热固性聚苯乙烯保温板(TPS)与传统聚苯乙烯保温板(EPS)的燃烧特性参数,研究表明TPS易燃性好,燃烧无熔融物滴落,可避免二次火灾的发生,对于外墙保温材料的优化提供了新选择。赵晓凯等<sup>[7]</sup>设计了主动式外墙保温系统,通过数值模拟对比分析了被动式保温和主动式保温性能和节能效率,研究表明,主动式外墙保温体系可有效减少建筑外墙供暖能耗,相对节能率可提升30%左右。王晓等<sup>[8]</sup>针对夏热冬冷地区的气候特点,以内外墙T形桥为研究对象,对比分析了翻边热桥构造和不翻边热桥构造条件下单位面积附加热流量和热桥表面最低温度变化特性,结果表明,两种设计方法都能满足节能标准规定,这种情况下外墙可不进行翻边保温。

上述研究成果为本文住宅外保温材料的选用与性能分析提供了理论基础和实践经验,本文在上述研究的基础上,通过文献分析、总结得到了常用外墙保温材料的保温特性,同时通过数值模拟对比分析了不同保温材料的热传导规律,分析了保温材料设计参数对保温材料的性能影响。研究结果可为外墙保温材料的设计和选用提供依据。

## 1 外墙外保温材料构造及特性分析

### 1.1 外墙外保温构造分析

外墙外保温技术在外墙主体结构外侧增设保温材料(见图1),通过这一构造做法,能充分发挥各构造层材料固有的特性和功能。

对现有文献和实践资料进行总结分析,得到外墙外保温构造优缺点如下。

1) 外墙外保温构造措施能有效消除热桥现象,显著提升建筑外墙的防水和气密性能,保证墙体结

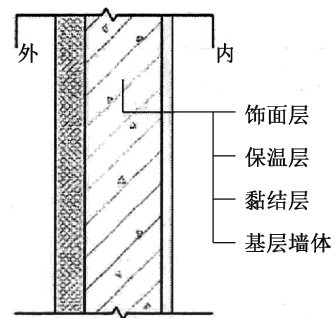


图1 外墙保温材料构造

Fig. 1 Structure of exterior wall insulation materials

构稳固性和耐久性。

2) 外墙外保温能有效保护建筑外墙结构,减少因墙体老化带来的维护成本。

3) 适用于旧墙改造和新建结构外墙,满足不同的建筑需求。

4) 保温隔热性能好,且维护费用低,但对外保温材料的选用要求严格。

5) 外保温材料的环境匹配度要求高,且构造复杂,施工工艺繁琐。

### 1.2 外墙外保温材料特性分析

常见的外墙外保温材料分为有机和无机两类<sup>[9]</sup>。有机外保温材料有聚氨酯硬质泡沫板、聚苯乙烯泡沫板,无机外保温材料有玻璃棉、岩棉、泡沫玻璃,保温材料特点分析如表1所示。

## 2 外墙保温材料传热理论

### 2.1 热传导

墙体内外温差的存在,会使热量由高温地方传向低温地方,在研究外墙保温性能前需先确定保温材料的传热理论和传热参数,进而保证传热计算结果的准确性。

结构热量传导需满足守恒,即温度升高所需能

表1 保温材料特性

Table 1 Characteristics of insulation materials

材料类别	构成	优缺点	物理力学性能
聚氨酯硬质泡沫板(PUR板) <sup>[10]</sup>	以聚酯多元醇、聚酯多元醇和氰酸酯为原材料,添加发泡剂和催化剂等辅助材料,混合后制成实心发泡型两种保温塑料板	导热系数小、质量轻、吸水率小	导热系数0.017~0.025W/(m·K); 燃烧性能不低于B2级
模塑聚苯乙烯泡沫板(EPS板) <sup>[11]</sup>	以聚苯乙烯树脂为原材料,加入外加剂后加热发泡后在模具中按照设计尺寸定性制成的保温板	防水性好、保温性好、成本低、耐高温性能差	导热系数小于0.042W/(m·K); 燃烧性能不低于B2级
玻璃棉 <sup>[12]</sup>	以破碎石英砂、白云石为原材料,添加纯碱、硼等外加剂,高温下拌合后固化制成无机纤维玻璃棉保温板	耐腐蚀性强、质量轻、导热系数差、不能燃烧	导热系数0.030~0.045W/(m·K); 燃烧性能A级
岩棉板 <sup>[13]</sup>	以玄武岩、辉绿岩等天然石材为原材料,添加粉煤灰等外加剂,高温固化后制成的岩棉板	不能燃烧、保温隔热好、憎水性好、导热系数小	导热系数0.038~0.044W/(m·K); 燃烧性能A级
泡沫玻璃板	以废弃玻璃、粉煤灰为原材料,添加发泡剂、表面活性剂,混合后放置在定制模具内,固化后制成泡沫玻璃板	防火防潮、耐腐蚀性强、生产成本低	导热系数0.037~0.050W/(m·K); 燃烧性能A级
玻化微珠保温砂浆	以玻化微珠为原材料,研磨后与水泥、石灰等外加剂混合后制成的无机墙体保温材料	耐久性强	导热系数0.032~0.045W/(m·K); 燃烧性能A级

量等于热量产生和热量传入之和:

$$\lambda \nabla^2 T + \rho q_i = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

式中:  $\rho$  为密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c$  为材料比热 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ];  $\lambda$  为导热系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ];  $\tau$  为分析时间 ( $\text{h}$ );  $q_i$  为热源密度 [ $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{t})$ ].

## 2.2 热交换

### 1) 对流换热

工程施工时, 固体与流体间的热量传递方式为对流换热, 对流换热过程复杂, 换热量主要由换热系数、导热系数及材料线膨胀系数决定:

$$Q = a_v A (T - T_f) \quad (2)$$

式中:  $a_v$  为热交换系数;  $A$  为面积;  $T$  为固体表面温度;  $T_f$  为流、固物体间接触温度。

### 2) 辐射换热

辐射换热是指物体间通过辐射的方式进行的热量传递方式, 热辐射换热方程采用热流密度表示:

$$q_r = \alpha_r (T - T_a) \quad (3)$$

式中:  $\alpha_r$  表示辐射换热系数;  $T_a$  为环境温度。

## 2.3 热传导方程求解

### 1) 初始条件

为了求解热传导方程(1), 还需确定初始条件和边界条件。初始条件一般为热传导分析的初始时刻, 方程表示如下:

$$T_{\tau=0} = \text{常数} \quad (4)$$

### 2) 边界条件

热传导边界条件主要包括 4 类。

第 1 类边界条件已知物体边界温度, 方程表示如下:

$$T_c = T_0(x, y) \quad (5)$$

式中:  $T_c$  为边界温度;  $T_0(x, y)$  为已知内部温度。

第 2 类边界条件热流密度已知, 方程表达如下:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(t) \quad (6)$$

式中:  $q(t)$  为热流密度;  $n$  为边界法向方向。

第 3 类边界条件假定物体间热流量和物体温度与环境温度之差成正比, 方程表达如下:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta (T - T_a) \quad (7)$$

式中:  $\beta$  为表面散热系数。

第 4 类边界条件为两种不同材料之间接触良好时, 界面满足热流量守恒和温度连续的条件, 方程表达如下:

$$T_1 = T_2$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \quad (8)$$

式中:  $T_1, T_2$  表示两固体接触面的温度。

## 3 数值模拟

对保温装材料来说, 影响其热工性能的主要指标包括墙体的导热系数、比热和热阻等热力学参数, 为分析各种保温材料的热工性能, 通过数值模拟开展保温材料热力学性能模拟研究。根据既有问题总结得到围护墙和保温材料的热力参数如表 2 所示。

### 3.1 保温材料热传导分析

热传导分析时, 混凝土墙尺寸为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 30\text{mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 黏结砂浆尺寸为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 保温层尺寸为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 30\text{mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高)。假设室内温度为  $25^\circ\text{C}$ , 外部温度为  $10^\circ\text{C}$ , 分析稳态状态下各保温层的保温效果。得到各保温材料的热传导结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 在相同热传导和相同厚度条件下, 聚氨酯硬质泡沫板温度由  $10^\circ\text{C}$  上升至  $18.3^\circ\text{C}$ , 发泡聚苯乙烯泡沫板温度上升至  $18.7^\circ\text{C}$ , 玻璃棉温度上升至  $19.4^\circ\text{C}$ , 岩棉板温度上升至  $19.9^\circ\text{C}$ , 泡沫玻璃板温度上升至  $20.2^\circ\text{C}$ , 玻化微珠保温砂浆温度上升

表 2 保温结构热力参数

Table 2 Thermal parameters of insulation structures

材料种类	厚度 $d$ / mm	弹性模量 $E$ / MPa	泊松比 $\nu$	导热系数 $\lambda$ / [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]	热膨胀系数 $1 \times 10^{-5}$	比热 $c$ / [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]
混凝土	30	20 000	0.20	0.920	1.00	930
黏结砂浆	20	5 300	0.20	0.870	1.20	1 050
聚氨酯硬质泡沫板	30	39	0.25	0.024	5.70	1 460
发泡聚苯乙烯泡沫板	30	12	0.25	0.028	6.00	1 500
玻璃棉	30	100	0.25	0.048	0.85	1 220
岩棉板	30	15	0.25	0.038	1.00	1 340
泡沫玻璃板	30	13	0.20	0.064	0.85	1 200
玻化微珠保温砂浆	30	100	0.20	0.068	1.10	1 050

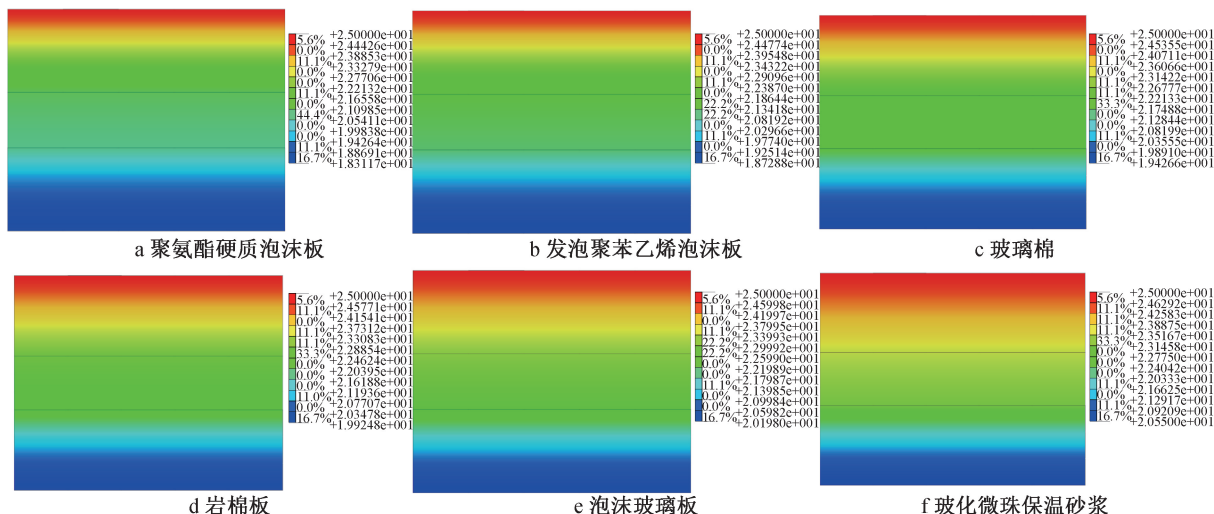


图2 不同保温材料的热传导结果(单位:℃)

Fig.2 Heat conduction results of different insulation materials(unit:℃)

至 20.5℃。上述各保温材料的保温性能由好至差依次为聚氨酯硬质泡沫板、发泡聚苯乙烯泡沫板、玻璃棉、岩棉板、泡沫玻璃板和玻化微珠保温砂浆。

### 3.2 保温层厚度对热传导的影响

进一步分析保温材料厚度对热传导结果的影响,通过数值模拟,分别设置保温层的厚度依次为 20,25,30,35,40mm,分析得到不同厚度下保温层外表面温度,如图 3 所示。

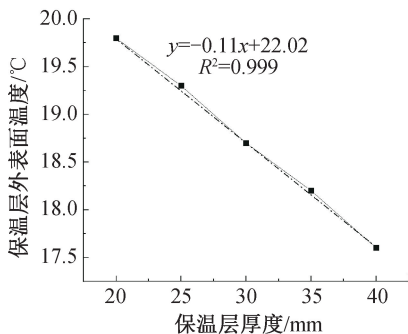


图3 保温层厚度对热传导的影响

Fig.3 Influence of insulation layer thickness on heat conduction

由图 3 可知,20,25,30,35,40mm 条件下保温层外表面热传导后温度分别为 19.8,19.3,18.7,18.2,17.6℃。随着保温层厚度的增加,保温层外表面温度减小,对其进行线性拟合,保温层外表面温度与保温层厚度呈线性相反关系,由此可知,保温层厚度会增加结构的保温效果,寒冷地区保温设计时增加保温层厚度可作为一种有效的提升保温的方法。

### 3.3 导热系数对热传导的影响

分析保温材料导热系数对热传导结果的影响,

通过数值模拟,分别设置保温层的导热系数依次为 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8W/(m·K),分析得到不同热传导数值下保温层外表面温度,如图 4 所示。

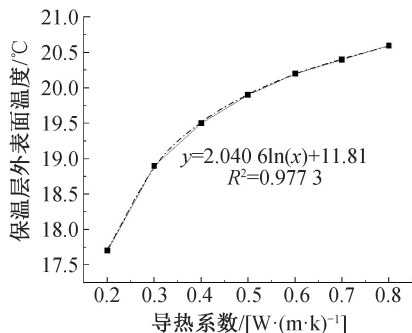


图4 保温层导热系数对热传导的影响

Fig.4 Influence of thermal conductivity of insulation layer on heat conduction

由图 4 可知,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8W/(m·K) 条件下保温层外表面温度依次为 17.7,18.9,19.5,19.9,20.2,20.4,20.6℃。随着保温层热传导系数的增加,保温层外表面温度增大,对其进行拟合,保温层外表面温度与保温层热传导系数呈对数正相关,所以在进行保温层选择时,应尽量选取导热系数小的保温材料,实现墙体外保温的保温效果。

## 4 外墙保温质量保证措施

### 4.1 热胀冷缩引起的裂缝控制

外墙保温材料由于昼夜温差和季节变化会产生热胀冷缩和湿胀干缩问题,由表 2 可知,聚氨酯硬质泡沫板、发泡聚苯乙烯泡沫板的热膨胀系数大于其他保温类材料,上述两类保温板的变形量远大于

其他保温材料,这会使墙、板缝交界处和板界面处产生很大的变形应力。同时温差变化对保温材料开裂有影响,根据现有工程实践和文献资料,总结得到以下几种裂缝控制措施。

#### 1) 应力释放

外保温材料与邻近构造层间弹性模量匹配,且线膨胀系数尽量贴近,减少因温差引起的变形差,且保温材料应保持一定的韧性,可实现变形应力的部分释放,此外在保温层制作时可掺入适量的纤维改变应力传递路径,降低应力集中发生的概率。

#### 2) 保温材料抗裂优化

保温材料生产时,开展保温材料配合比优化,根据既有资料可知,通过添加补偿剂,在微裂缝生成后通过自身膨胀反应填充裂缝通道;添加纤维材料抵抗保温材料的抗拉能力<sup>[14]</sup>;加入释水材料延缓温度变化速率,上述研究成果可为保温材料配制提供思路。

#### 3) 提升保温材料施工质量

保温材料施工质量是建筑结构运维期减少裂缝数量的根基,保温材料施工质量越好,则后期无裂缝的可靠性越高,在施工时要做到保温结构各层平整,黏结砂浆黏结性能可靠,保温材料本身抗腐蚀性性能好,形成可靠的外墙保温体系。

### 4.2 外保温构造保温性能优化

根据地区气候特点,开展外保温结构设计优化可提升建筑整体保温性能。

#### 1) 女儿墙保温构造

结构设计时,易忽略悬挑结构对结构保温性能的影响,工程设计应根据无热桥设计原则,对女儿墙内、外和交界面进行优化设计,且女儿墙相较外墙应适当增加保温层厚度。

#### 2) 屋面保温构造

在屋面板上部依次布置保温层和防水层,根据保温层位置的差异分为倒置式和正置式2种,如图5所示。

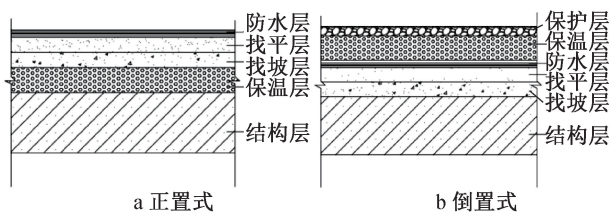


图5 屋面保温层构造

Fig. 5 Structure of roof insulation layer

实践表明,倒置式平屋面保温层能有效实现温度波的衰减,其保温隔热效果更好,且可有效实现

结构防水,由于屋面要承受雨水的侵袭,所以对于屋面结构来说应选择吸水率低的EPS保温板或XPS保温板。

#### 3) 墙体阴阳角保温设计

墙体阴阳角处易产生应力集中,使用时易产生开裂现象,所以在结构设计时保温层内可添加适量的纤维材料制造复合保温材料,增加墙角的抗裂能力,且可适当增加保温材料厚度,提升墙角保温能力。

### 5 结语

1) 对比分析了6种常见外墙保温材料的构成、热力学性能和优缺点,可为外墙保温材料的选取提供直观结果。

2) 通过数值模拟可知,保温材料厚度相同时,保温材料的保温性能由好至差依次为聚氨酯硬质泡沫板、发泡聚苯乙烯泡沫板、玻璃棉、岩棉板、泡沫玻璃板和玻化微珠保温砂浆。

3) 保温层外表面温度与保温层厚度呈线性相反关系,保温层厚度会增加结构的保温效果;随着保温层热传导系数的增加,保温层外表面温度增大,在进行保温层选择时,应尽量选取导热系数小的保温材料。上述研究成果可为外墙保温材料的选用提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 陈红兵,薛闪闪,李德英,等.既有居住建筑外墙保温厚度优化及减排效益分析[J].科学技术与工程,2022,22(13):5374-5380.  
CHEN H B, XUE S S, LI D Y, et al. Optimization of exterior wall insulation thickness and emission reduction benefit analysis for existing residential buildings [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(13): 5374-5380.
- [2] 轩莉,何东亮,余海洋,等.装配式建筑保温一体化预制外墙防水技术[J].建筑结构,2022,52(S2):1636-1639.  
XUAN L, HE D L, YU H Y, et al. Waterproof technology of prefabricated external walls with integrated insulation for prefabricated buildings [J]. Building structure, 2022, 52(S2): 1636-1639.
- [3] 彭佳斌,温晓东,田稳苓,等.蒸压砂加气保温板外墙外保温系统试验研究及有限元模型分析[J].建筑结构,2021,51(14):124-134.  
PENG J B, WEN X D, TIAN W L, et al. Experimental research and finite element model analysis of autoclaved sand aerated insulation board external wall insulation system [J]. Building structure, 2021, 51(14): 124-134.
- [4] 赵红晓.风荷载作用下上海地区外墙外保温系统性能研究[J].力学季刊,2021,42(2):379-387.  
ZHAO H X. Performance study of external wall insulation systems under wind load in Shanghai [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2021, 42(2): 379-387.

- [5] 刘志茂,叶智武,吴自敏,等.寒冷地区超低能耗建筑外墙保温系统质量问题处置[J].施工技术(中英文),2023,52(16):149-153.  
LIU Z M, YE Z W, WU Z M, et al. Treatment of quality problems in external wall insulation systems for ultra-low energy buildings in cold regions[J]. Construction technology, 2023, 52(16): 149-153.
- [6] 欧阳的华,晏皓昱,郭志勇,等.外墙热固性聚苯乙烯保温板的火灾燃烧特性[J].塑料,2023,52(4):137-142.  
OUYANG D H, YAN H Y, GUO Z Y, et al. Fire combustion characteristics of thermosetting polystyrene insulation boards for external walls[J]. Plastics, 2023, 52(4): 137-142.
- [7] 赵晓凯,赵树兴,张江铭,等.主动式外墙外保温系统节能性研究[J].建筑科学,2022,38(2):202-208.  
ZHAO X K, ZHAO S X, ZHANG J M, et al. Study on the energy saving performance of active external wall insulation systems[J]. Building science, 2022, 38(2): 202-208.
- [8] 王晓,南艳丽,冯雅,等.夏热冬冷地区外墙内保温热桥处理做法探讨[J].建筑科学,2021,37(2):109-112,120.  
WANG X, NAN Y L, FENG Y, et al. Discussion on thermal bridge treatment for internal wall insulation in hot summer and cold winter regions[J]. Building science, 2021, 37(2): 109-112, 120.
- [9] 万长剑.高层建筑外墙保温系统防火措施研究[J].中国建筑装饰装修,2024(3):105-107.  
WAN C J. Study on fire protection measures for external wall insulation systems of high-rise buildings[J]. Interior architecture of China, 2024(3): 105-107.
- [10] 张强,张卓,杨威,等.结构型阻燃聚氨酯硬质泡沫研究进展[J].化工新型材料,2019,47(9):211-214.  
ZHANG Q, ZHANG Z, YANG W, et al. Research progress on structural flame-retardant rigid polyurethane foams[J]. New chemical materials, 2019, 47(9): 211-214.
- [11] 路国忠,马占雄,丁秀娟,等.提高模塑聚苯板燃烧性能的技术研究[J].墙材革新与建筑节能,2016(2):60-63.  
LU G Z, MA Z X, DING X J, et al. Technical research on improving the combustion performance of molded polystyrene boards[J]. Construction wall innovation & building energy-saving, 2016(2): 60-63.
- [12] 郭云雷.建筑外墙保温防火的材料选择及防火对策[J].中国建筑装饰装修,2024(3):93-95.  
GUO Y L. Material selection and fire prevention measures for building exterior wall insulation systems[J]. Interior architecture of China, 2024(3): 93-95.
- [13] 杨效田,王彩龙,刘俊艳,等.六水合氯化钙基相变材料对岩棉保温板储能和保温性能的影响[J].兰州理工大学学报,2024,50(1):27-34.  
YANG X T, WANG C L, LIU J Y, et al. Effect of calcium chloride hexahydrate-based phase change material on the energy storage and insulation performance of rock wool insulation boards[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2024, 50(1): 27-34.
- [14] 潘源良.用于建筑外墙外保温结构的岩棉复合板的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.  
PAN Y L. Study on rock wool composite boards for external wall insulation structures in buildings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

### (上接第26页)

- [3] 李帅,许伟群,娄学谦.潮间带地区海上风电高桩承台斜桩吊打关键技术[J].施工技术(中英文),2022,51(18):117-121.  
LI S, XU W Q, LOU X Q. Key technology for offshore wind power high pile cap inclined pile driving in intertidal zone[J]. Construction technology, 2022, 51(18): 117-121.
- [4] 姚博强,李贝,吕雪源,等.基于BIM技术的装配式混凝土风电塔架深化设计[J].施工技术,2019,48(10):5-7.  
YAO B Q, LI B, LÜ X Y, et al. Deepening design of fabricated concrete wind power tower based on BIM technology[J]. Construction technology, 2019, 48(10): 5-7.
- [5] 陈利.基于BIM的装配式混凝土风电塔筒安装与控制方法研究[D].重庆:重庆大学,2022.  
CHEN L. Research on installation and control method of assembled concrete wind turbine tower based on BIM[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [6] 魏巍.2种钢管混凝土格构式风电塔架节点受力性能对比分析[J].科技创新与应用,2024,14(31):54-58.  
WEI W. Comparative analysis of mechanical properties of two kinds of concrete-filled steel tubular lattice wind turbine tower joints[J]. Technology innovation and application, 2024, 14(31): 54-58.
- [7] 李万润,范科友,杜永峰.基于最不利塔顶位移相图法的风电塔筒动力屈曲研究[J].振动与冲击,2023,42(23):8-20.  
LI W R, FAN K Y, DU Y F. Dynamic buckling of wind turbine tower based on most unfavorable tower top displacement phase diagram method[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(23): 8-20.
- [8] 马志文,梁慧丽.极端动力荷载下的风力发电塔筒生产法兰内倾度控制技术[J].机械设计与制造工程,2023,52(5):117-121.  
MA Z W, LIANG H L. Control technology for flange inclination in wind turbine tower production under extreme dynamic load[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2023, 52(5): 117-121.
- [9] 刘荣,孙醒阳,叶恒达.大直径组合风电塔柱受力性能研究[J].结构工程师,2023,39(1):39-45.  
LIU R, SUN X Y, YE H D. Study on mechanical performance of large diameter composite supporting tower for wind turbines[J]. Structural engineers, 2023, 39(1): 39-45.