

# 基于正交试验的热固复合聚苯板配合比设计及机理分析

康鑫睿<sup>1</sup>, 辛守银<sup>1,2</sup>, 朱一丁<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

<sup>2</sup>宁夏保利节能科技有限公司, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年6月19日; 录用日期: 2023年7月10日; 发布日期: 2023年7月20日

## 摘要

为系统性研究配合比对热固复合聚苯板综合性能的影响, 设计了正交试验方案, 采用极差分析法和方差分析法, 通过对热固复合聚苯板的力学-热学性能进行研究, 优选出最优配合比, 并利用SEM等微观分析方法探究了最优配合比试样的力学-热学性能形成机理。结果表明: 在满足其它指标的前提下, 力学-热学性能的最优配合比为 $A_2B_2C_3D_3$ ; EVA掺比为3.0%时, 界面过渡区结合紧密, 热固复合聚苯板力学性能较好; 孔径越小, 孔隙率越高, 对导热系数降低越有利。

## 关键词

最优配合比, 形成机理, 力学性能, 界面过渡区, 热学性能

# Mix Ratio Design and Mechanism Analysis of Thermosetting Composite Polystyrene Board Based on Orthogonal Test

Xinrui Kang<sup>1</sup>, Shouyin Xin<sup>1,2</sup>, Yiding Zhu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Ningxia Poly Energy Saving Technology Co., LTD, Yinchuan Ningxia

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to systematically study the effect of blending ratio on the comprehensive performance of  
\*通讯作者。

文章引用: 康鑫睿, 辛守银, 朱一丁. 基于正交试验的热固复合聚苯板配合比设计及机理分析[J]. 土木工程, 2023, 12(7): 989-998. DOI: 10.12677/hjce.2023.127113

thermosetting composite polystyrene board, an orthogonal test scheme was designed. The range analysis method and variance analysis method were used to study the mechanical-thermal properties of thermosetting composite polystyrene board, and the optimal mix ratio was optimized. The formation mechanism of mechanical-thermal properties of the sample with optimal mix ratio was investigated by SEM and other microscopic analysis methods. The results show that the optimal mix ratio of mechanical-thermal properties is  $A_2B_2C_3D_3$  when other indexes are satisfied. When the EVA blending ratio is 3.0%, the interface transition zone is tightly bound, and the mechanical properties of thermosetting polystyrene composite board are good. The smaller the pore size, the higher the porosity, and the more favorable the reduction of thermal conductivity.

## Keywords

Optimal Mix Ratio, Formation Mechanism, Mechanical Properties, Interfacial Transition Region, Thermal Properties

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国建筑物隔热、保温和防火等需求的不断增高,许多新型建筑防火保温材料逐渐兴起,其中热固复合聚苯板(Thermosetting Composite Polystyrene Foam Insulation Board, TEPS)凭借高耐火、强隔热的效果引起了较多关注[1],传统的聚苯乙烯板、聚氨酯板等高分子聚合物导热系数较小,具备保温隔热的优良性能,但易燃的特性使建筑物存在较大的火灾隐患,而热固复合聚苯板的阻燃性能十分优越,在周围环境高于聚苯乙烯颗粒的燃点时,阻燃剂可形成隔热层使聚苯乙烯颗粒无法燃烧,使 TEPS 具备不易燃的特点,且兼顾传统保温材料强隔热的效果,较大程度提高了建筑材料的安全阈值[2]。刘成健等以 P.O 52.5 水泥掺加 23% 促强减缩剂为基材制备热固复合聚苯板,可大大缩短热固复合聚苯板的脱模时间,早期强度发展十分迅速[3]。惠飞等利用热重分析、阻燃分析等手段研究了改性热固复合聚苯板的耐火性能[4]。赛明泽等通过自主设计的试验进行热固复合聚苯板的吸水率测试,该试验方法所得回归方程相关系数在 0.96 以上,满足试验误差要求,可为后人进行相关研究提供新的测试手段[5]。虽然国内已对 TEPS 有较多研究,但国内对于 TEPS 的研究较为单一,主要集中于针对 TEPS 某方面性能或针对检测方法进行研究,缺乏对 TEPS 配合比的优化及综合性能的系统性研究。

本文针对 TEPS 力学及热学性能不均衡的问题,基于正交试验的手段开展 TEPS 综合性能的研究,并利用 SEM 分析等手段探究 TEPS 力学-热学性能形成机理,为 TEPS 的生产应用提供理论依据。

## 2. 研究方法

### 2.1. 原材料

水泥: P.O 42.5 级,宁夏赛马水泥股份有限公司生产;聚苯乙烯(Expanded Polystyrene, EPS)颗粒:由银川佰利晟工贸有限公司采用江苏利士德化工有限公司 F-303 型可发性聚苯乙烯生产;发泡剂:高性能复合型发泡剂,日照材元晟泰建材有限公司生产;乙烯-醋酸乙烯共聚物(Ethylene-vinyl Acetate Copolymer, EVA): 328 型,德国瓦克生产;聚羧酸减水剂: VIVID-500 型,上海三瑞高分子材料股份有限公司生产。

## 2.2. 试验方案与试样制备

为了较全面的探究水灰比、发泡剂、EPS 颗粒和 EVA 对 TEPS 的力学及热学性能的影响, 本试验设计采用 4 因素 3 水平的正交试验方案, 不考虑因素间的交互作用, 试验方案如表 1 所示。

**Table 1.** Orthogonal test scheme  
**表 1.** 正交试验方案

掺量水平	影响因素			
	A	B/%	C/mL·g <sup>-1</sup>	D/%
1	0.45	4.15	2	0
2	0.50	6.20	3	1.5
3	0.55	8.30	4	3.0

注: A: 水灰比(用水量为水泥和发泡剂用水量的总和) B: 发泡剂掺比 C: EPS 颗粒掺量 D: EVA 掺比。

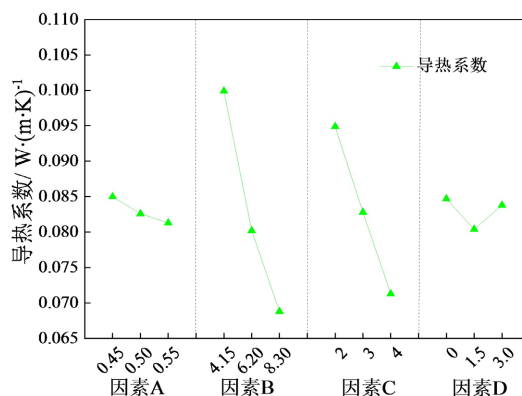
试样的制备以上述材料为原料, 制备水泥浆料, 并按正交试验设计方案添加无机改性材料制备 TEPS 浆料, 采用灌注工艺将 TEPS 浆料灌入聚苯乙烯保温板基板中, 经过养护后制成 TEPS 试样。

力学性能测试采用微机控制保温材料试验机(WDW-50S, 鑫光), 热学性能检测采用导热系数测定仪(CD-DR 3030, 紫微), 样品微观形貌分析采用钨灯丝扫描电子显微镜(EVO18, ZEISS, 德国)。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 导热系数分析

由图 1 可知: 随着发泡剂掺比和 EPS 颗粒掺量的增加, 试样导热系数迅速下降。当发泡剂掺比由 4.15% 提高到 8.30% 时, 导热系数降低 31.1%, 当 EPS 颗粒掺量由 2 mL·g<sup>-1</sup> 增加到 4 mL·g<sup>-1</sup> 时, 导热系数降低 24.9% 导热系数不仅与材料的组成有关, 还与材料的结构、孔隙率等因素密切相关, 在适当的孔径区间内, 材料孔隙率及闭孔率越高, 材料导热系数越低。发泡剂掺比增加, 意味着水泥基材内部泡孔增多, 相同体积内泡孔数量必然增多, 一方面使得泡孔内部空气对流传热和气相热传导降低, 另一方面也使得气固反射面增多, 热量在固相传导路线更曲折, 近而使导热系数降低。EPS 颗粒作为孔隙率超过 90% 的有机材料, 当其堆积密度在 12 kg·m<sup>-3</sup> 时, 其导热系数仅为 0.04 W·(m·K)<sup>-1</sup>。EPS 颗粒掺量增加, 使得热量在固相传导时热传递路径更曲折, 而从 EPS 颗粒内部穿透的阻力更大, 从而阻止了部分热量的传导, 降低了导热系数。



**Figure 1.** Analysis of influence of each factor on thermal conductivity  
**图 1.** 各因素对导热系数影响分析

随着水灰比的增加, 导热系数也呈不断下降的趋势。当水灰比为 0.45 时, 体系粘度较大, 增大了气泡在浆料中分布的阻力, 使得气泡分布不均匀, 甚至在气泡聚集的部位出现孔连通的情况, 造成试样导热系数偏高; 当水灰比增加至 0.50 时, 体系粘度明显降低, 流动性增加, 气泡在浆料中更容易分散, 从而使导热系数下降; 水灰比继续增大至 0.55 时, 水泥水化更加充分, 浆料流动性继续增大, 另一方面, 未参与反应的自由水填充在水泥体的内部, 随着水分的挥发, 形成了微气孔, 使得热量在微观尺度的传热路径增长[6], 使导热系数进一步降低。

导热系数随着 EVA 掺比的增加呈先下降后上升的趋势。当 EVA 掺比为 1.5% 时, 导热系数最低, 为  $0.0804 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。由于少量的 EVA 并不能改变水泥体的结构, 仅作为填充材料分散在水泥体内, 由于其本身导热系数比水泥体低, 因而会使水泥体的导热系数降低; 当 EVA 掺比达到 3.0% 时, 通过参与水泥水化反应, 提升了试样内部的密实度, 使试样内部孔隙率降低, 导热系数升高。

**Table 2.** Results of variance analysis of thermal conductivity test

**表 2.** 导热系数试验方差分析结果

因素	A	B	C	D	误差
离差平方和	0.00006	0.00448	0.00251	0.00009	0.00024
自由度	2	2	2	2	18
均方	0.00003	0.00224	0.00125	0.00005	1.3E-05
F 值	2.41	168.42	94.21	3.47	
P 值	0.118	0.000	0.000	0.053	
显著性	不显著	**	**	不显著	

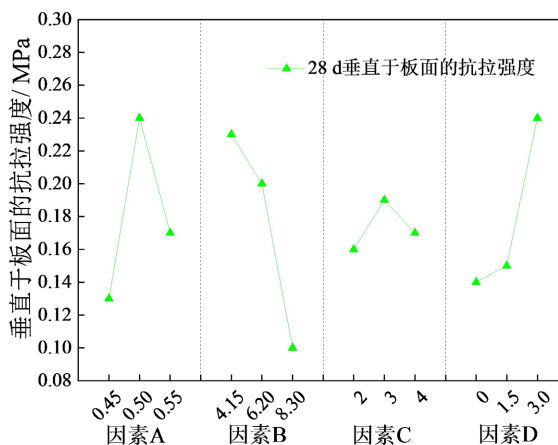
由表 2 可知, 各因素对导热系数显著性由大到小依次为: 因素 B、因素 C、因素 D、因素 A, 这与极差分析结果相同。因素 B 与因素 C 对导热系数极显著相关, 而因素 A 与因素 D 对导热系数相关性不显著。因此, 为综合考虑可操作性、成本等因素, 可以将最优因素组合水平设置为  $A_3B_3C_3D_1$ 。

### 3.2. 垂直于板面的抗拉强度分析

由图 2 可知: 随着水灰比的提高, 垂直于板面的抗拉强度呈先增大后减小的趋势。水灰比为 0.50 时, 垂直于板面的抗拉强度最大为 0.24 MPa。主要原因是水灰比较低时, 用于与水泥的拌合水较少, 水泥分散不均匀, 使得水泥体内部强度强弱不均[7], 极易在强度较弱的部位发生断裂, 造成垂直于板面的抗拉强度较低; 随着水灰比的提高, 水泥分散越来越均匀, 水泥体内部强度均匀, 无明显缺陷, 因此其整体垂直于板面的抗拉强度值明显提升; 但当水灰比继续提高, 多余的自由水形成的微孔, 使水泥体内部产生微应力, 使试样垂直于板面的抗拉强度减弱。

随着发泡剂掺比的提升, 试样垂直于板面的抗拉强度逐渐下降, 且幅度越来越大。主要是因为发泡剂增多, 水泥体内气孔数增多, 孔间壁厚越来越薄, 孔壁破损形成通孔的概率增大, 垂直于板面的抗拉强度主要由孔间壁来支撑[8], 壁厚越薄, 垂直于板面的抗拉强度越低。

试样垂直于板面的抗拉强度随着 EPS 颗粒掺量的提升呈现先增大后减小的趋势, 主要原因是 EPS 颗粒抗拉强度相对较高, 且具有较高的弹性模量, 随着其掺比的提升, 试样整体抗拉强度也有所提升, 但随着掺比的进一步提升, 包裹 EPS 颗粒的水泥层越来越薄, 甚至会出现不能完全包裹的情况, 这使得 EPS 颗粒之间的抗拉力出现大幅度下降[9], 进而使试样整体垂直于板面的抗拉强度降低。



**Figure 2.** Analysis of the influence of various factors on the tensile strength perpendicular to the plate surface

**图 2.** 各因素对垂直于板面的抗拉强度影响分析

随着 EVA 掺比的提升, 试样垂直于板面的抗拉强度得到有效提升, 且在掺比为 3.0% 时提升幅度最大。主要原因是 EVA 的掺入一方面使水泥体在水化过程中逐渐形成致密的网状结构体, 使水泥体本身的强度得以提升; 另一方面也增强了水泥体与 EPS 颗粒间的粘结力, 促使试样在受到外部荷载时水泥体和 EPS 颗粒协同发挥作用。当 EVA 掺比为 1.5% 时, 在部分部位可形成网状结构, 但不足以使整体形成致密的网状结构体, 所以强度增长不大; 随着掺比的进一步提升, 其作用得到充分发挥, 使试样整体垂直于板面的抗拉强度得到大幅提升。

**Table 3.** Results of variance analysis of tensile strength test perpendicular to plate surface

**表 3.** 垂直于板面的抗拉强度试验方差分析结果

因素	A	B	C	D	误差
离差平方和	0.05	0.08	0.00	0.06	0.02
自由度	2	2	2	2	18
均方	0.03	0.04	0.00	0.03	0.000985
F 值	27.32	41.79	2.27	29.26	
P 值	3.52E-06	1.72E-07	0.132	2.21E-06	
显著性	**	**	不显著	**	

由表 3 可知, 水灰比、发泡剂掺比、EVA 掺比均对垂直于板样的抗拉强度极显著相关, EPS 颗粒掺量与垂直于板面的抗拉强度相关性不显著, 显著性由大到小顺序为: 发泡剂掺比、水灰比、EVA 掺比、EPS 颗粒掺量。为取得较高的垂直于板面的抗拉强度值, 只需要确定发泡剂掺比、水灰比和 EVA 掺比, 在综合考虑可操作性、成本等因素后, 确定 EPS 颗粒掺量即可。

### 3.3. 压折比分析

由图 3 可知: 随着水灰比的提升, 试样抗折强度与抗压强度的趋势是相同的, 均为先上升后下降的趋势, 压折比变化幅度较小。主要是因为水灰比为 0.45 时, 由于拌合用水较少, 水泥得不到充分水化, 影响了试样抗折强度的发挥; 当水灰比增加到 0.50 时, 水泥浆料分散均匀, 水泥得到充分水化, 使得试样抗折强度

得到明显提升；当水灰比继续增加到 0.55 时，多余的拌合水未参与水化反应，成为自由水填充在试样内部，并最终形成气孔，降低了试样的抗折强度。其机理与变化幅度与抗压强度相近，因此压折比变化幅度较小。

发泡剂掺比对试样抗压强度与抗折强度影响趋势也相近，均随着发泡剂掺比的提升而下降，但抗压强度下降幅度更明显，因此造成试样压折比不断下降。这主要是因为随着发泡剂掺比的提升，孔隙率不断提高，气孔壁厚也越来越薄，其强度也大幅下降，由于试样初始抗压强度较高，孔壁变薄时其下降幅度更大，因此压折比随发泡剂掺比的提升而下降。

随着 EPS 颗粒掺量的提高，试样抗折强度逐渐下降。这是由于 EPS 颗粒具有较低的强度和较高的弹性模量，当 EPS 颗粒掺量较低时，由于 EPS 颗粒强度与水泥体强度相差较大，其在水泥体内部类似泡孔的作用，会明显降低试样的抗折强度，试样压折比变化较大；随着 EPS 颗粒掺量的提高，颗粒间隙也越来越小，这时 EPS 颗粒弹性模量所起的作用逐步得到突显，使试样弹性性能增加，抗折强度下降幅度降低[10]，试样压折比也明显下降。

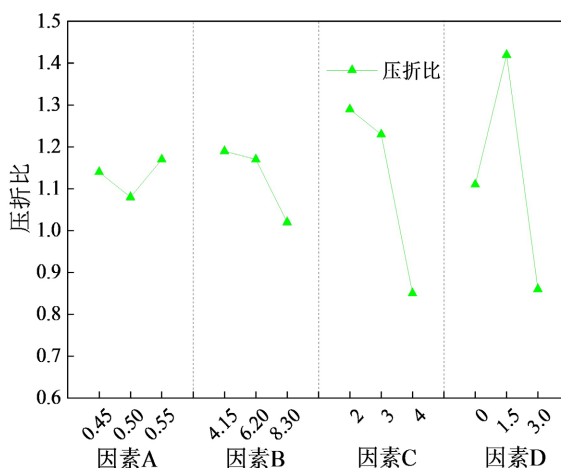


Figure 3. Analysis of the influence of various factors on folding ratio

图 3. 各因素对压折比的影响分析

随着 EVA 掺比的提高，抗折强度先下降后上升，压折比则先上升后下降。当 EVA 掺比为 1.5% 时，试样压折比最高为 1.42；当 EVA 掺比为 3.0% 时，试样压折比达到最低值 0.86。主要原因是当 EVA 掺比较小时，不能充分参与水化反应，在试样内部主要起填充作用，降低了试样抗折强度，由于抗压强度变化不大，试样压折比上升；随着掺比提升，一方面可以充分参与水泥水化，填充各水化产物间的缝隙，同时，水化过程中所形成的高聚物包裹在各水化产物表面，使各水化产物间的刚性接触变为柔性接触，增强了内部柔韧性和变形能力，进一步促进了水化产物的发育[11]；另一方面，EVA 的掺入可以增强水泥与 EPS 颗粒的界面粘结力。因此，试样抗折强度明显提升，压折比随之下降。

Table 4. Results of variance analysis of compression ratio test

表 4. 压折比试验方差分析结果

因素	A	B	C	D	误差
离差平方和	0.04	0.15	1.02	1.43	2.77
自由度	2	2	2	2	18

Continued

均方	0.02	0.08	0.51	0.71	0.1541
F 值	0.12	0.50	3.32	4.64	
P 值	0.892	0.615	0.0591	0.0238	
显著性	不显著	不显著	不显著	*	

由表 4 可知, EVA 掺比与压折比具有显著相关性, 水灰比、发泡剂掺比、EPS 颗粒掺量与压折比相关性不显著。显著性由大到小顺序为: EVA 掺比、EPS 颗粒掺量、发泡剂掺比、水灰比。该结论与极差分析结果一致。

### 3.4. 配合比优选

以垂直于板面的抗拉强度、压折比和导热系数为关键控制指标, 确定具有显著相关性的最优因素水平组合, 结合成本、可操作性等因素, 以其它技术指标满足 JG/T 536-2017 中 G 型 050 级规定的要求, 并在力学性能满足要求的前提下导热系数最低为原则, 最终优选出的最优配合比为  $A_2B_2C_3D_3$ 。

### 3.5. 力学性能机理分析

相关文献表明, EPS 颗粒与水泥基材料之间界面过渡区的结合情况对 TEPS 力学性能影响较大[12], 为观察 EPS 颗粒与水泥基材料的界面过渡区的结合情况, 对最优配合比试样进行扫描电镜分析, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 试样中 EPS 颗粒与水泥基材界面过渡区结合紧密, 无微孔、裂缝等缺陷存在, 这是除水泥基体本身强度外 TEPS 力学性能得到提升的主要原因。分析其机理主要由以下几个方面:

1) 界面过渡区的紧密结合使 EPS 颗粒与水泥浆体充分接触, 增大了 EPS 颗粒与水泥浆体相对运动时的摩擦力, 使得 EPS 颗粒在水泥浆体中受到的浮力与阻力达到平衡, EPS 颗粒在水泥浆体中分散更均匀。当受到外部荷载时, 不会因局部强度偏低而造成试样整体强度下降, 从而提升了 TEPS 的力学性能。

2) EPS 颗粒抗压强度较小而弹性模量较大, 由于水泥基材料属于脆性材料, 在外部荷载作用下, 水泥基材与 EPS 颗粒变形会出现不一致的情况。当水泥基材与 EPS 颗粒紧密结合时, 这种情况会出现明显的改善, 尤其在 EPS 颗粒掺量较大时, 包裹 EPS 颗粒的水泥基材变薄, 由于与 EPS 表面结合紧密, 水泥基材会随着 EPS 颗粒的弹性形变而产生较大的变形, 从而使 TEPS 试样柔韧性增强。

3) EPS 颗粒作为正圆球体, 被水泥基材紧密包裹时, 会形成“拱效应”, 即当某一点受到某一方向的荷载时, 该点会将荷载沿球体界面均匀向周围传递, 将点受力转化成面受力, 避免了集中受力[13], 从而显著提高 TEPS 试样的承载能力。

4) EVA 的掺入使水泥水化过程中产生的有机聚合物包裹在水化产物表面, 成为了连接水化产物与 EPS 颗粒之间的桥梁, 避免了有机和无机材料接触所产生的界面相容性问题, 使水化产物与 EPS 颗粒表面充分接触; 另一方面, 由于 EVA 水溶性良好, 使得水分更易于在 EPS 颗粒表面附着, 从而使 EPS 颗粒表面的水泥水化更充分, 强度更高。

### 3.6. 热学性能机理分析

材料的热学性能不仅与材料本身的性质有关, 也与材料内部孔隙率、孔径分布和孔结构有关[14], 为分析最优配合比试样热学性能的机理, 对 EPS 颗粒进行 SEM 分析如图 5、图 6 所示, 采用 ImageJ 对水泥基材的泡孔进行二值化和孔结构分析, 如图 7、图 8 所示。

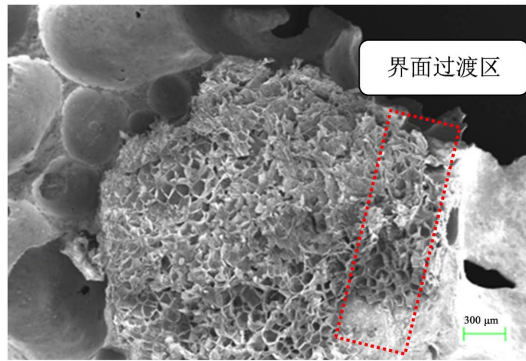


Figure 4. SEM image of interfacial transition zone  
图 4. 界面过渡区 SEM 图片

材料内部传热方式有固相传导、气相传导、辐射和对流四种形式，材料内部总传热计算公式如(1)所示：

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (1)$$

其中  $\lambda$ 、 $\lambda_s$ 、 $\lambda_g$ 、 $\lambda_r$ 、 $\lambda_c$  分别表示材料总传热、材料内部固相传导、气相(首选空气)传导、辐射和对流传热 [15]。当泡孔直径小于 4 mm 时，对流传导可以忽略不计 [16]，由于 EPS 内部泡孔和水泥基材内部泡孔均直径均小于 4 mm，故只需要考虑传导和辐射的影响。

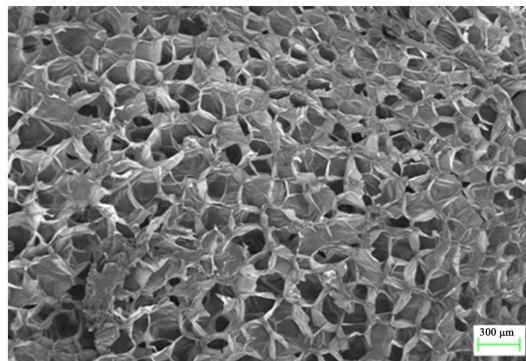


Figure 5. SEM image of EPS particle cross-section  
图 5. EPS 颗粒截面 SEM 图片

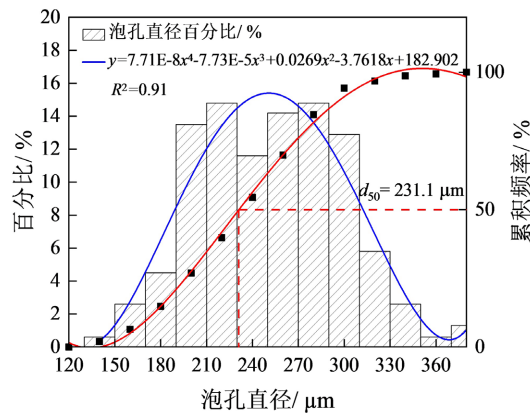


Figure 6. Pore diameter distribution of EPS particles  
图 6. EPS 颗粒泡孔直径分布图



由于 EPS 颗粒内部孔隙率达 90% 以上, 因此在试样中可以近似看作气孔来分析。对于含有空腔结构的物体, 热量在传递到空腔结构外表面时, 一部分热量沿空腔外表面绕过空腔结构传递, 从而增加了热传递路径; 另一部分热量通过空腔内空气传递, 由于空气的热导率较低, 会造成热传递速度减慢[17]。相比于相互连通的孔, 热量经过封闭的孔所传递的路径更加曲折, 热传导速度更慢。因此, 孔隙率越高, 材料的导热系数越低[18], 闭孔率越高, 材料的导热系数越低[19]。

在孔隙率相同的情况下, 孔径较小时, 气孔数量增多, 气孔中的气体少, 气体分子在气孔内的运动受到限制, 气相传热  $\lambda_g$  较小, 固相传热  $\lambda_s$  和辐射传热  $\lambda_r$  为主要导热方式。由于空气的热导率很低, 相当于在材料中均匀分布了很多的隔热层。而气孔数量的增多导致内部气孔壁表面积增加, 即增加了固体反射面, 从而使辐射传热的效率降低。

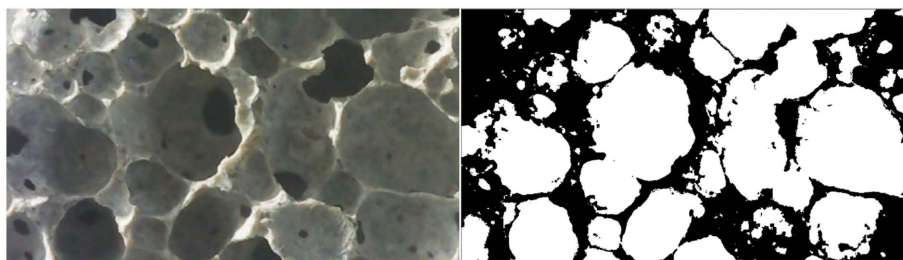


Figure 7. Sample hole section and pictures after binarization  
图 7. 试样孔截面及二值化后图片

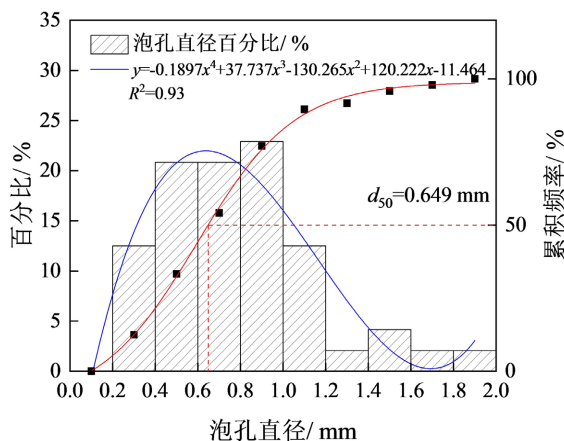


Figure 8. Sample pore diameter distribution diagram  
图 8. 试样泡孔直径分布图

水灰比为 0.50 时, 水泥浆体粘度适中, 气孔可以在浆液中均匀分散, 当孔隙率较低时, 破泡或并泡情况较少。随着孔隙率的增加, 水泥浆液中气孔数量增多, 孔壁变薄, 在搅拌过程中出现少量破泡、并泡现象, 使得平均孔径有所增加。随着平均孔径增大, 内部气体增多, 气体分子在气孔内的运动加快, 对流换热  $\lambda_g$  有所增大。但由于试样内部孔隙率明显增加, 材料的导热系数仍得到进一步降低[20]。因此, 泡孔直径越小、孔隙率越高, 对导热系数降低越有利。

#### 4. 结论

- 1) 热固复合聚苯板的导热系数随发泡剂掺比和 EPS 颗粒掺量的增大而降低, 当发泡剂掺比为 8.30%、

EPS 颗粒掺量为  $4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  时, 导热系数取达到了极小值  $0.0599 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。

2) 发泡剂掺比越大, 试样内部孔隙率越大, 垂直于板面的抗拉强度越小; EVA 的掺入可以提升试样结构的致密性, 从而使垂直于板面的抗拉强度得到提升; 少量 EVA 的掺入会导致试样抗折强度下降, 促使压折比上升, 当 EVA 掺比达到 3.0% 时, 试样抗折强度得到迅速增大, 从而使压折比降低。

3) 通过 SEM 和孔结构分析, 阐明了热固复合聚苯板力学热学性能机理。EPS 颗粒与水泥基材的界面过渡区结合越紧密, 试样力学性能越高; 试样的导热系数会随孔隙率的增高和泡孔直径的减小而降低。

## 基金项目

宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC03080)。

## 参考文献

- [1] 惠飞. 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(S1): 283-285.
- [2] 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.
- [3] 刘成健, 张振秋, 葛仲熙, 等. 促强减缩剂在热固复合聚苯板中的应用研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(10): 77-81.
- [4] 惠飞, 丛波, 江黎丽, 等. 无机水合物掺杂热固复合聚苯板的燃烧性能[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(10): 1412-1414.
- [5] 赛明泽, 王林. 热固复合聚苯板吸水率快速测试方法及其影响因素分析[J]. 建材发展导向, 2021, 19(8): 110-112.
- [6] 杨奉源. 泡沫混凝土性能的影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.
- [7] 孙庆丰. 超低密度泡沫混凝土的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [8] 兰明章, 代丹丹, 陈智丰, 等. 超轻发泡水泥保温板孔结构与性能关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 518-524.
- [9] 胡国峰. 高比强 EPS 轻质混凝土的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2020.
- [10] 杨飞, 孙晓敏. EPS 掺量对混凝土力学和保温隔热性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(6): 117-120+143.
- [11] 宁懿彭, 许金余, 王志航, 等. VAE 乳胶粉改性砂浆耐久性能研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(2): 106-111.
- [12] Wong, H.S. and Buenfeld, N.R. (2006) Euclidean Distance Mapping for Computing Microstructural Gradients at Interfaces in Composite Materials. *Cement and Concrete Research*, **36**, 1091-1097. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.003>
- [13] 袁骥. 基于泡沫颗粒改性的 EPS 混凝土设计制备与性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [14] 康升荣, 程宝军, 麻鹏飞, 等. 石墨改性 EPS 颗粒对超轻泡沫混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(7): 5-9.
- [15] Glicksman, L.R. and Torpey, M. (1989) Factors Governing Heat Transfer through Closed Cell Foam Insulation. *Journal of Thermal Insulation*, **12**, 257-269. <https://doi.org/10.1177/109719638901200403>
- [16] Mills, N.J. (1993) Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. *Polymer*, **34**, 2237-2237. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(93\)90758-3](https://doi.org/10.1016/0032-3861(93)90758-3)
- [17] 柴丽娟, 李珠, 霍英涛, 等. 玻化微珠级配对玻化微珠保温混凝土性能的影响[J]. 中国科技论文, 2015, 10(13): 1507-1510.
- [18] 刁雨同. 泡沫混凝土气孔结构与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [19] 李克亮, 邢朝燕, 陈爱玖, 等. 页岩陶粒泡沫混凝土性能与保温机理研究[J]. 混凝土, 2017(12): 75-78+86.
- [20] 胡新萍, 李翔宇, 韩保清, 等. 泡沫混凝土的导热系数和强度研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2940-2945.