

固废基三元胶凝系整体式复合墙板材料的合成与抗弯性能

赵美艳^{1,2}, 张丽², 黄伟²

(1. 皖江工学院 管理学院, 安徽 马鞍山 243031; 2. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 采用矿渣微粉、粉煤灰、脱硫石膏组成固废基三元胶凝系, 结合水泥、聚苯乙烯颗粒和发泡剂, 通过正交试验设计复合材料的配比方案, 制备装配式钢结构住宅整体式复合墙板材料。测试不同因素水平组合下材料的抗压强度、干体积密度、导热系数、吸水率等指标, 以抗压强度和干体积密度为主要优化目标确定最佳配合比。基于优选配合比, 分别采用钢筋和 GFRP 筋 2 种筋材制作开窗洞和未开窗洞墙板试件, 进行抗弯性能测试试验, 通过试件的开裂荷载、极限破坏荷载、混凝土荷载-应变曲线、板内筋材荷载-应变曲线及荷载-变形曲线等参数评估材料的抗弯性能。结果表明: 优选的材料配合比为水胶比 0.4、三元胶凝比 1:1:3、替代水泥率 50%、聚苯颗粒掺量 35%(体积分数), 此时墙板材料的力学、轻质和保温等综合性能良好, 28 d 抗压强度为 11.12 MPa、干体积密度为 973 kg/m³、导热系数为 0.187 W/(m·K)、吸水率为 10.06%; 墙板材料的抗弯性能良好, 钢筋墙板的开裂荷载和极限破坏荷载均高于 GFRP 筋墙板, 且开洞会显著影响这两项荷载指标。

关键词: 装配式钢结构; 复合墙板; 脱硫石膏; 矿渣微粉; 粉煤灰; GFRP 筋; 钢筋; 抗弯性能

中图分类号: TU 502+6 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23159



Synthesis and Bending Resistance of Integral Composite Wallboard Based on Solid Waste Ternary Cementitious System

ZHAO Meiyang^{1,2}, ZHANG Li², HUANG Wei²

(1. School of Management, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 2. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: A solid waste-based ternary cementitious system was formulated using slag micropowder, fly ash, and desulfurization gypsum, which was then combined with cement, polystyrene particles, and a foaming agent. An orthogonal experimental design was employed to prepare integrated composite wall panel materials for prefabricated steel structure residential buildings. The compressive strength, dry volume density, thermal conductivity, and water absorption of the materials under different factor-level combinations were tested. With the compressive strength and dry volume density as the main objectives, the optimal mix proportion for the composite wallboard material was selected. Based on the optimal mix proportion, wall panels reinforced with either steel bars or GFRP bars were fabricated, including specimens with and without window openings. Flexural performance tests were conducted, and

收稿日期: 2023-10-26

基金项目: 安徽高校自然科学基金重大项目(KJ2018ZD006); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2018YF-007)

作者简介: 赵美艳(1993—), 女, 安徽淮北人, 助教, 主要研究方向为绿色建材、工程造价。

通信作者: 黄伟(1963—), 男, 辽宁盘锦人, 教授, 主要研究方向为土木工程材料。

引文格式: 赵美艳, 张丽, 黄伟. 固废基三元胶凝系整体式复合墙板材料的合成与抗弯性能[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(2):198-208.

parameters such as cracking load, ultimate failure load, concrete load-strain curve, reinforcement load-strain curve, and load-deflection curve were analyzed to evaluate the flexural performance of the materials. The results show that the optimal material mix proportion is a water-binder ratio of 0.4, a terpolymer cementation ratio of 1:1:3, a replacement cement ratio of 50%, and a polystyrene particle content of 35% (by volume fraction). At this mix proportion, the wallboard material exhibits excellent comprehensive performance in terms of mechanical properties, lightweight characteristics, and thermal insulation, with a 28-day compressive strength of 11.12 MPa, a dry bulk density of 973 kg/m³, a thermal conductivity of 0.187 W/(m·K), and a water absorption of 10.06%. The wallboard material demonstrates good flexural performance, with steel-reinforced wallboards showing higher cracking and ultimate failure loads compared to GFRP-reinforced wallboards. The presence of openings affects both the cracking and ultimate failure loads of the wallboards.

Keywords: assembled steel structure; composite wallboard; desulphurized gypsum; slag micropowder; fly ash; GFRP bars; steel bars; bending performance

在国家不断推进可持续发展战略的大背景下,建设环境友好型社会对各行各业提出了更高要求。各类新型绿色建筑材料和建筑节能技术相继出现,有力推动了我国绿色建筑发展^[1-2]。装配式钢结构住宅体系作为 1 种新型的住宅结构体系,具有模块化、标准化、自重轻等优点,同时兼具抗震性能好、施工周期短、可回收、综合技术经济指标等优势,是高度契合绿色建筑理念的结构形式。目前,装配式钢结构住宅的框架体系研究已较为成熟,但配套围护结构体系的发展却相对滞后。因此,开展适用于装配式钢结构建筑需要的新型墙体材料研究,对于推动绿色建筑的发展具有重要意义。

装配式钢结构建筑围护体系的发展应以研发轻质高强、保温防火、与建筑同寿命的多功能一体化墙材为目标。该体系在满足建筑功能与节能需求的同时,需注重利用工业固废等地方资源,开发低能耗、低污染的新型墙体材料^[3-5]。矿渣、粉煤灰和脱硫石膏作为冶金电力行业的主要副产品,其资源化利用价值日益凸显^[6-10]。现有研究表明:Guo 等^[11]开发的矿渣-脱硫石膏轻质混凝土显示,在混凝土中复合掺加矿渣、脱硫石膏制备材料,其力学性能优于单独掺加矿渣制备材料的性能;Yasar 等^[12]利用粉煤灰制备 1 种轻质墙体材料,研究发现粉煤灰的掺入不仅能够减轻材料的质量,还能改善材料的保温和力学性能;Shafiq 等^[13]研究发现,粉煤灰的掺入能够显著提高墙体材料的早期和晚期强度;Ma 等^[14]研究发现,石膏混凝土复合墙板具有一定的抗震性能,能够抵抗较低烈度的地震作用,同时兼具较好的经济性;吴蓉^[15]将脱硫石膏、秸秆、聚苯乙烯颗粒按一定比例混合制备出新型墙板材料,结果表明,该材料

不仅质量轻,强度还满足规范要求,适用于建筑隔墙和非承重围护结构;刘晓轩^[16]研究发现,相比于纯脱硫石膏,矿渣微粉-粉煤灰-脱硫石膏固废基三元胶凝系的物理力学性能更好。

当前研究多聚焦固废基材料的力学性能提升,对装配式墙板所需的轻质高强、整体性及保温隔热等综合性能研究不足。固废基三元胶凝系材料具有潜在的胶凝特性,适当添加有助于研发综合性能好的墙体材料。基于此,本文采用工业副产品矿渣微粉、粉煤灰、脱硫石膏组成固废基三元胶凝系,结合水泥、聚苯乙烯颗粒和发泡剂制备整体式复合墙板材料,且对材料的抗弯性能进行研究,以期研发适合于装配式建筑所需的新型墙体材料提供理论参考。

1 试验原料与过程

1.1 试验原料

聚苯乙烯颗粒,经粉碎处理,粒径不超过 5 mm。植物型发泡剂,透明液体,用水将其按质量比 1:50 稀释使用。安徽海螺牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,28 d 抗压、抗折强度分别为 45.0, 8.0 MPa,满足《通用硅酸盐水泥》GB 175—2007 要求。S95 级粒化高炉矿渣微粉(安徽马钢嘉华新型建材有限公司生产);干排 II 级粉煤灰(皖能马鞍山发电有限公司提供),表观密度为 2 200 kg/m³,化学成分如表 1。烟气脱硫石膏(皖能马鞍山发电有限公司提供),化学成分如表 2。中级普通河砂,堆积密度为 1 450 kg/m³,表观密度为 2 560 kg/m³。HRB400 级钢筋(安徽马钢比亚西钢筋焊网有限公司提供);GFRP 筋(海宁安捷创新公司提供),极限拉伸强度为 880 MPa。

表1 矿渣微粉与粉煤灰的化学成分 w/%

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	其他
矿渣微粉	34.18	13.80	15.32	26.60	8.14	0.29	1.67
粉煤灰	52.70	25.80	9.70	3.70	1.20	5.00	1.90

表2 脱硫石膏的化学成分 w/%

CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₃ ·1/2H ₂ O	CaCO ₃	MgO	H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
85~90	1.2	5~8	0.86	10~15	1.2	2.8	0.6

1.2 墙板材料的制备及性能测试

设计表3所示的L₃⁴试验方案,四因素分别为水胶比*A*,即水与总胶凝材料的质量比;三元胶凝比*B*,即固废基三元胶凝系中矿渣微粉、粉煤灰、脱硫石膏的质量比;替代水泥率*C*,即固废基三元胶凝系替代水泥的占比;聚苯掺量*D*,即聚苯乙烯颗粒的体积分数。

表3 制备复合墙体材料的正交试验方案

Tab.3 Orthogonal test plan for preparing compound wall panel materials

水平	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i> /%	<i>D</i> /%
1	0.35	1:1:3	30	15
2	0.40	1:2:2	40	25
3	0.45	1:3:1	50	35

参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080—2016,按照表3所示方案制备9组不同因素水平的拌合物试样,测定轻集料混凝土的坍

落度和扩展度指标。参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019,测定9组轻集料混凝土试样的28 d抗压强度,每组制作3个100 mm×100 mm×100 mm试件用于测试,取其平均值为每组试件的28 d抗压强度。参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》GB/T 11969—2020测定9组混凝土试样的干体积密度和吸水率,每组制作2个100 mm×100 mm×100 mm试件用于测试,取其平均值为每组试件的干体积密度和吸水率。参照《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》GB/T 10294—2008测定9组轻集料混凝土试样的导热系数,每组制作2个300 mm×300 mm×30 mm试件,烘干48 h后进行测定。每组轻集料混凝土对应的流动度和凝结时间分别按照《水泥胶砂流动度测定方法》GB/T 2419—2005和《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080—2016要求测定,待结果符合《轻骨料混凝土应用技术标准》JGJ/T 12—2019的相关规定后再进行墙板抗弯试验。

1.3 墙板抗弯试验

1.3.1 试件设计

考虑到通常住宅建筑的层高与开间特点,装配式钢结构住宅的墙板采用整体式设计,按照钢结构住宅的层高和开间确定墙板尺寸。基于优先的配比,选用钢筋和GFRP筋作为配筋材料,制作开窗洞和未开窗洞的1/2缩尺模型墙板。4种预制复合墙板的代号为YFQB-G-Z, YFQB-F-Z, YFQB-G-K, YFQB-F-K。其中:YFQB表示预制复合墙板;G, F分别表示配筋类型为钢筋和GFRP筋;Z, K分别表示整块墙板和开窗洞墙板。墙板设计参数见表4,试件示意图如图1。

表4 墙板设计参数

Tab.4 Design parameters of the wallboard

墙板编号	墙板尺寸(洞口尺寸)/(mm×mm)	墙板厚度/mm	配筋类型	配筋直径及间距/mm	保护层厚度/mm
YFQB-G-Z	1 500×1 500	100	HRB400	6@180	10
YFQB-F-Z	1 500×1 500	100	GFRP	6@180	10
YFQB-G-K	1 500×1 500(750×750)	100	HRB400	6@180	10
YFQB-F-K	1 500×1 500(750×750)	100	GFRP	6@180	10

1.3.2 加载过程

在抗弯试验过程中,采用100 t拟静力液压伺服加载系统进行加载,采用YHD-100型位移计测量位移,采用TDS-630应变采集仪采集数据。为模拟整体式墙板与钢结构梁柱的四角点安装连接型式,将

墙板平放,四角分别支承在4个支墩上,液压千斤顶施加的竖向荷载通过一级分配梁传递至2个对称放置的二级分配梁,再传递至20 mm厚的方形钢垫板,在钢垫板下面铺设调平砂垫层。墙板抗弯加载示意图如图2,加载区域见图3。

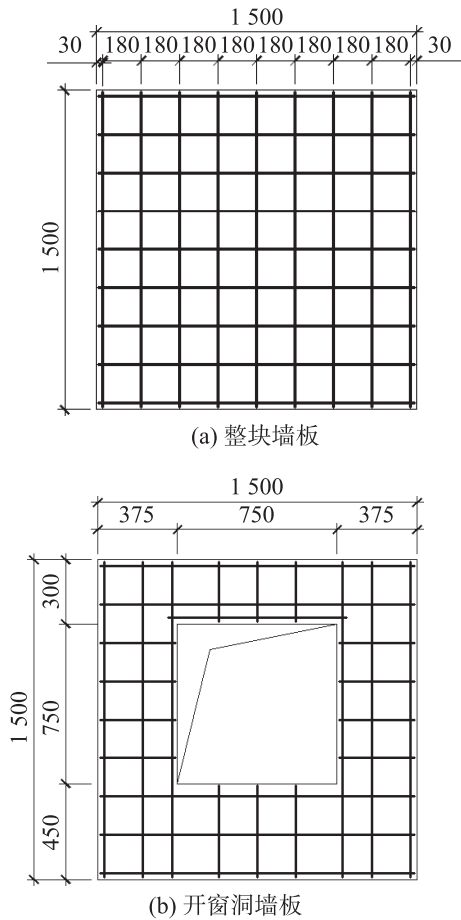


图1 墙板试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wallboard specimen

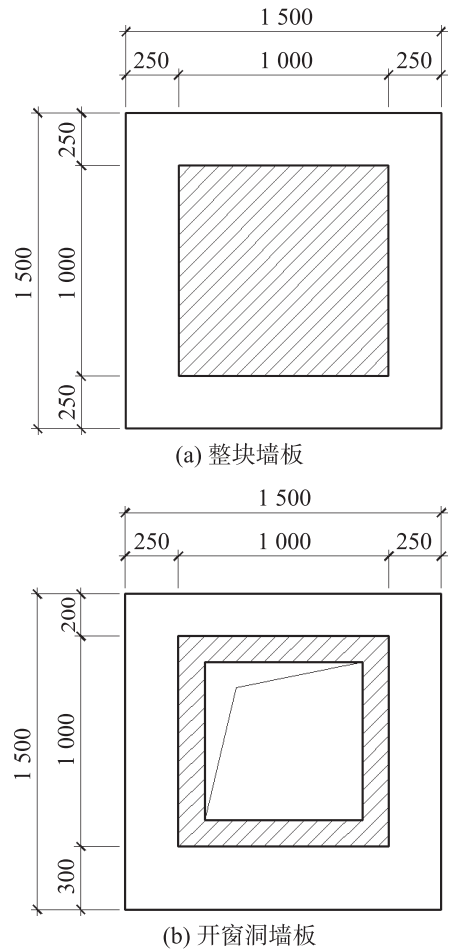


图3 墙板加载区域简图

Fig. 3 Schematic diagram of loading area on wallboard

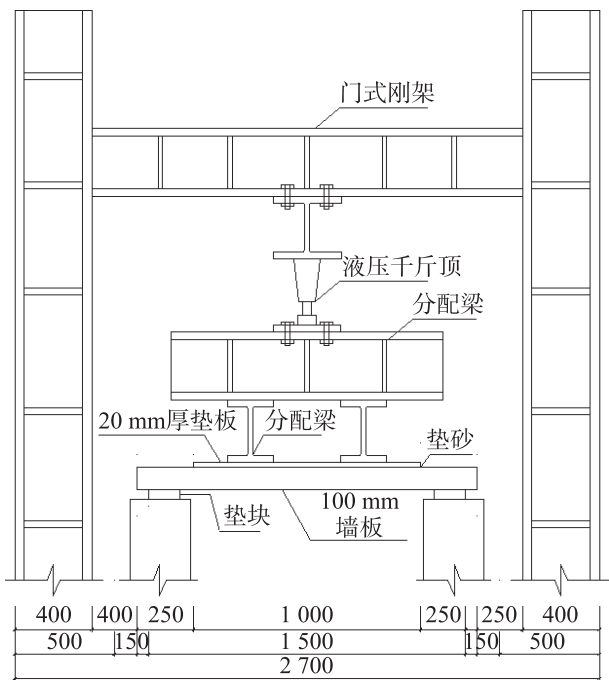


图2 墙板抗弯试验加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading setup for the wallboard bending test

2 正交试验结果与分析

正交试验结果见表 5。根据表 5, 按照 28 d 抗压强度越大越好, 干体积密度越小越好、导热系数越小越好、吸水率越小越好为目标, 对复合墙板材料的性能进行综合评价。其中: K_i 表示水平为 i 时对应的试验结果之和; $k_i=K_i/s$, s 为任一列各水平出现的次数; $R=\max \{k_1, k_2, k_3\} - \min \{k_1, k_2, k_3\}$ 。

2.1 目标组合的优选

正交试验的极差分析结果如表 6。由表 6 可知: 因素 D 在 28 d 抗压强度中是主要因素, 选定水平 1 为优水平; 同理, 因素 A 在干体积密度中是主要因素, 选定水平 2 为相应优水平; 但因素 A 在吸水率中也是主要因素, 选定水平 1 为相应优水平, 根据干体积密度指标的重要性大于吸水率指标, 选定水平 2 为优水平; 因素 B 按导热系数指标要求, 选定水平 1 为优水平; 因素 C 按其在 28 d 抗压强度中的影响稍大, 选定水平 3 为优水平。

表5 正交试验结果

Tab. 5 Results of orthogonal test

试验号	7 d抗压强度/MPa		28 d抗压强度/MPa		干体积密度/(kg/m ³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	吸水率/%
	烘干前	烘干后	烘干前	烘干后			
1 [#]	7.22	9.69	10.51	12.73	1 269	0.220	12.42
2 [#]	7.98	9.60	11.12	13.68	1 205	0.253	13.53
3 [#]	4.75	7.98	9.12	10.26	1 177	0.256	15.47
4 [#]	3.80	4.56	4.94	5.42	1 015	0.244	17.66
5 [#]	6.03	7.98	13.21	9.50	1 174	0.292	15.48
6 [#]	7.17	7.22	8.32	9.41	1 071	0.290	17.74
7 [#]	3.90	5.32	11.88	13.78	1 089	0.215	18.65
8 [#]	4.66	4.94	5.89	6.75	1 052	0.258	18.02
9 [#]	7.74	8.08	11.45	11.78	1 163	0.278	17.84

表6 极差分析结果

Tab. 6 Range analysis results

指标	结果	因素				指标之和	因素主次	较优方案
		A	B	C	D			
28 d抗压强度/MPa	K ₁	30.75	27.33	24.72	35.17	86.44	DCAB	A ₁ B ₂ C ₃ D ₁
	K ₂	26.47	30.22	27.51	31.32			
	K ₃	29.22	28.89	34.21	19.95			
	R	1.43	0.96	3.16	5.07			
干体积密度/(kg/m ³)	K ₁	3 651	3 373	3 392	3 606	10 215	ADBC	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃
	K ₂	3 260	3 431	3 383	3 365			
	K ₃	3 304	3 411	3 440	3 244			
	R	130.33	19.33	19.00	120.67			
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	K ₁	0.729	0.679	0.769	0.791	2.306	BADBC	A ₁ B ₁ C ₃ D ₂ /D ₃
	K ₂	0.827	0.803	0.776	0.759			
	K ₃	0.752	0.826	0.763	0.758			
	R	0.033	0.049	0.005	0.011			
吸水率/%	K ₁	41.42	48.73	48.18	45.74	146.80	ADBC	A ₁ B ₂ C ₁ D ₁
	K ₂	50.88	47.03	49.03	49.92			
	K ₃	54.51	51.05	49.60	51.15			
	R	4.36	1.34	0.47	1.80			

综上,确定复合墙板材料因素水平的目标组合为A₂B₁C₃D₁,即水胶比为0.4,三元胶凝比为1:1:3,替代水泥率为50%,聚苯体积掺量为15%。目标组合下墙板材料的性能指标见表7。

综上还可看出:随着聚苯颗粒掺量的增加,材料的干体积密度和导热系数均呈逐渐降低的趋势。因此,为进一步降低材料的密度且提高材料的保温性能,对目标组合材料开展聚苯颗粒掺量单因素影响

试验。取聚苯颗粒掺量(体积分数)为15%,25%,35%,其他材料组成不变。试验结果如表8。

表7 目标组合下墙板材料的性能指标

Tab. 7 Performance indicators of wall panel materials under target combination

组合	28 d抗压强度/MPa	干体积密度/(kg/m ³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	吸水率/%
A ₂ B ₁ C ₃ D ₁	22.77	1 284	0.230	8.51

表8 不同聚苯颗粒掺量的试验结果

Tab. 8 Experimental results of different dosages of polystyrene particles

φ(聚苯)/%	28 d抗压强度/MPa	28 d烘干后抗压强度/MPa	干体积密度/(kg/m ³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	吸水率/%
15	22.77	23.94	1 284	0.230	8.51
25	16.02	16.82	1 178	0.212	8.99
35	11.12	12.11	973	0.187	10.06

分析表8可知:相比于聚苯颗粒掺量15%的材料(体积分数,下同),掺量35%材料的28 d抗压强度下降了51.16%,但仍达11.12 MPa,远大于《建筑用轻质隔墙条板》GB/T 23451—2009中墙板抗压强

度的要求(抗压强度≥3.5 MPa),且材料的干体积密度下降了24.22%,导热系数降低了18.70%,表现出更好的轻质和隔热性能。

基于装配式钢结构住宅对整体式复合墙板轻质、

高强、保温、隔热的综合性能要求, 综上所述认为, 聚苯颗粒的体积分数以 35% 为适宜掺量, 复合墙板材料的优选组合为 $A_2B_1C_3D_3$, 具体配合比为水胶比 0.4, 三元胶凝比 1:1:3、替代水泥率 50%、聚苯颗粒体积分数 35%。该配比下制备的复合墙板材料表现出优异的综合性能: 28 d 抗压强度为 11.12 MPa、干体积密度为 973 kg/m^3 、导热系数为 $0.187 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 、吸水率为 10.06%。

2.2 强度形成的机理

矿渣微粉、粉煤灰与脱硫石膏协同作用机理可从组分反应角度行分析。矿渣微粉的主要成分为 SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 和 Al_2O_3 ; 粉煤灰的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ; 脱硫石膏的主要成分为 $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。矿渣微粉作为活性掺和料具有物理效应(微集料效应)和化学效应(火山灰效应), 但矿渣微粉单独存放时的活性较低且水化速度较慢。脱硫石膏具有较高的细度, 可与水泥、矿渣微粉等混合材料充分接触, 且与矿渣微粉复合后会发生明显的化学反应; 此外, 脱硫石膏不仅起到硫酸盐激发剂的作用, 还能消耗体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 并与新生成的水化铝酸钙以及 Al_2O_3 生成钙矾石 (AFt) 和结构稳定的 C—S—H 凝胶, 这些产物交织、复合, 且填充至复合胶凝材料的结构空隙中, 使材料的结构更致密, 从而显著提高复合材料的总体强度。粉煤灰的活性效应, 即火山灰效应, 主要体现在碱性环境下, 粉煤灰中的活性成分 SiO_2 和 Al_2O_3 与水泥及石灰的水化产物在水溶液中发生反应, 生成水化硅酸钙和水化铝酸钙。随后, 这些产物与石膏发生硫酸盐激发反应, 生成水化硫铝酸钙 (AFt)。这一系列反应不仅提高了复合材料的强度, 还增强了其密实度^[17-18]。此外, 复合材料中还含有 CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 K^+ , Na^+ 等可溶性盐类有利杂质, 其中 CaCO_3 可改善复合材料的性能, 且杂质 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水泥中 CaO 水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可共同形成碱性激发剂, 提高胶凝体系的液相碱度, 从而有利于结构的稳定^[19]。由此表明, 矿渣微粉、粉煤灰和脱硫石膏固废基三元胶凝系的相互作用主要体现在矿渣微粉和粉煤灰分别与脱硫石膏反应的协同叠加效应。这种协同作用显著提升了固废基三元胶凝体系的整体强度及其他性能, 使其优于单一组分单独掺入时的效果。

3 抗弯试验结果与分析

抗弯试验过程中, 墙板的开裂荷载和极限破坏荷载如表 9, 其破坏形态如图 4。

表 9 墙板的开裂荷载与极限破坏荷载

Tab. 9 Cracking and ultimate failure loads of the wall

墙板编号	开裂荷载/(kN/m ²)	极限破坏荷载/(kN/m ²)
YFQB-G-Z	14	54
YFQB-F-Z	10	33
YFQB-G-K	12	50
YFQB-F-K	7	30

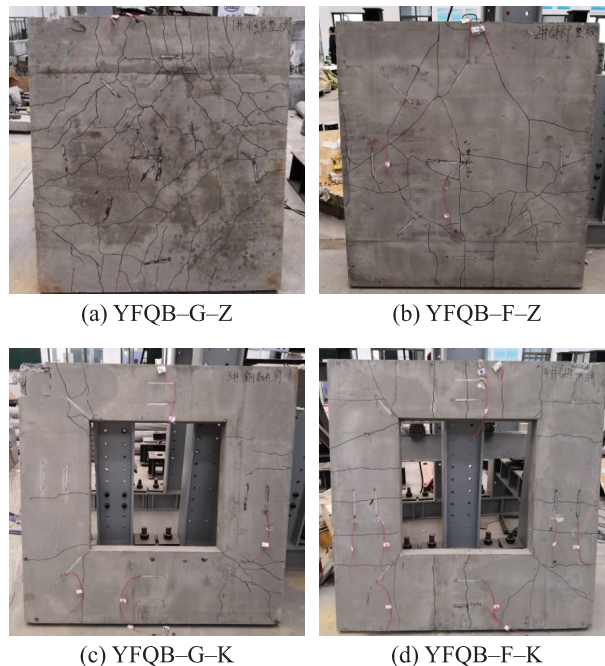


图4 墙板破坏形态

Fig. 4 Failure pattern of the wall panels

在试验加载初期, YFQB-G-Z 墙板各测点变形与荷载大致呈线性关系, 挠度较小, 墙板处于弹性工作阶段; 荷载加载至 14 kN/m^2 时, 在墙板四边跨中底部出现几道垂直于板边的细小裂缝, 墙板荷载与变形依然呈成线性关系; 荷载继续增加, 板四边裂缝数不断增加, 早期裂缝逐渐向板跨内扩展, 缝宽增大; 当板底裂缝向板跨内扩展至一定值时, 裂缝扩展方向呈 45° 转折, 与邻边向板跨内扩展的裂缝发生连通, 墙板荷载变形曲线开始出现比较明显的拐点; 加载至 54 kN/m^2 时, 板底的网状裂缝呈现如图 4(a) 的分布形态, 整个板变形如锅底状, 墙板达到极限破坏状态。

YFQB-F-Z 墙板加载初期, 荷载变形曲线近似为线性关系; 加载至 10 kN/m^2 时, 四边墙板跨中开始出现数条细裂缝; 待荷载加载至 17 kN/m^2 时, 裂缝宽度增大, 部分相交宽裂缝的测点混凝土应变片开始出现断裂, 不能采集测试数据; 随荷载继续增加, 裂缝增加数相对 YFQB-G-Z 墙板较少, 但缝宽发展较快, 不断有测点混凝土应变片断裂退出, 但墙板荷载变形曲线曲率很小; 加载至 33 kN/m^2 , 伴随着筋材

黏结破坏发出的响声,墙板达到极限破坏状态,板底的网状裂缝呈如图 4(b) 的分布形态。

对于 YFQB-G-Z 和 YFQB-F-Z 墙板,后者脆性破坏特征明显,破坏较突然,前者则表现出较好的延性;后者裂缝分布规律不如前者,开裂荷载和极限破坏荷载均较前者低。这是由于 GFRP 筋的弹性模量仅为钢筋的 1/4~1/5,表面较钢筋光滑,在没有特别锚固措施时,其与混凝土黏结较钢筋差,更易发生黏结破坏,筋材与混凝土产生相对滑移。开窗洞墙板的破坏规律与同筋材整板类似,但由于墙板开孔较大, YFQB-F-Z 和 YFQB-F-K 均在窗洞四角处出现应力集中,板四边均出现多道垂直于板边的贯穿裂缝,两者裂缝分布规律相似,极限破坏荷载与开裂荷载的比值相对整板更低。

3.1 混凝土荷载-应变曲线

板底混凝土测点应变片布置如图 5。对于整板,选择测点 h_8 及测点 h_4 进行分析;对于开窗洞墙板,选择测点 h_1 及测点 h_2 进行分析,混凝土的荷载-应变曲线如图 6。

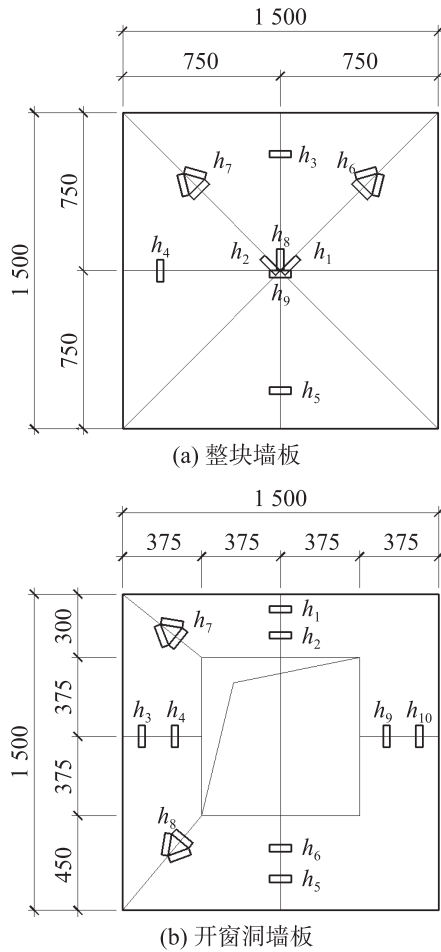


图5 混凝土应变测点分布 mm

Fig. 5 Distribution of the strain measuring points of concrete mm

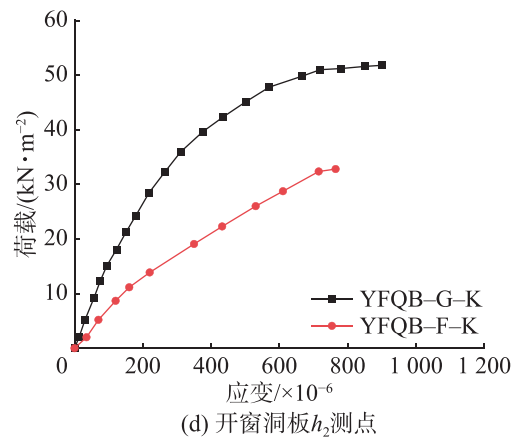
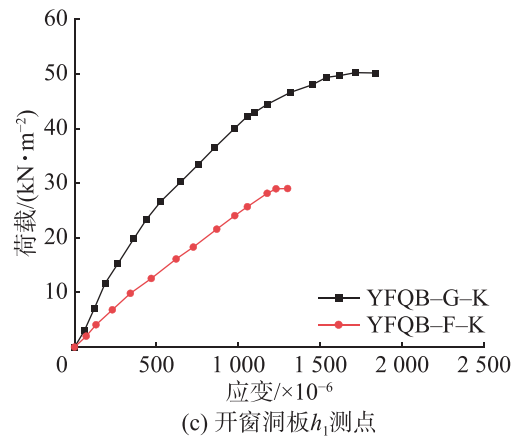
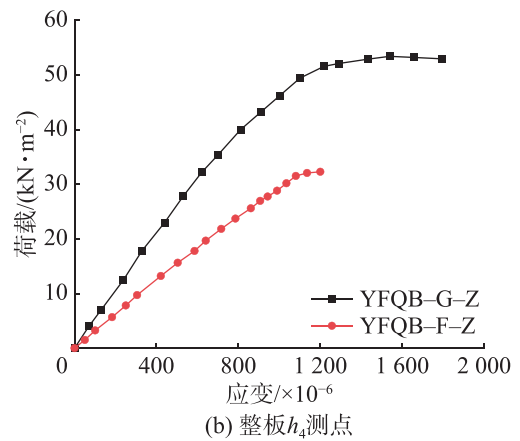
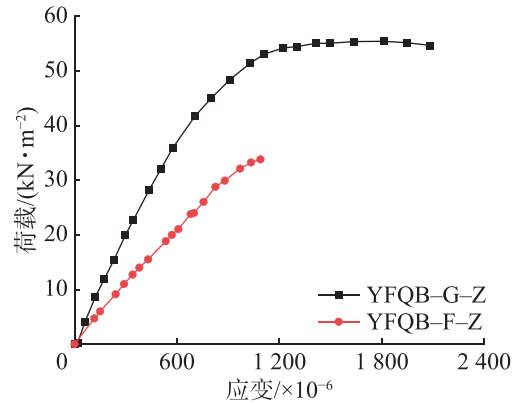


图6 混凝土的荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curve of the concrete

由图 6 可知: 对于钢筋墙板和 GFRP 筋墙板, 板底混凝土均处于受拉状态, 但测点荷载-应变曲线变化趋势不同。其中, 钢筋墙板荷载与应变加载初期近似呈线性关系, 随荷载的增大, 关系曲线出现明显拐点, 应变增加速度逐渐减缓, 至破坏前荷载-应变曲线近乎水平, 延性破坏特征明显。GFRP 筋墙板加载初期, 荷载与应变亦近似呈线性关系, 但应变增幅明显快于钢筋墙板, 且随荷载的增加, 应变增加的趋势特征几乎不变, 至拐点出现, 随即便发生破坏。比较同筋材整板与开窗洞板测点混凝土荷载-应变曲线可发现, 两者荷载-应变曲线变化趋势相似, 即墙板开孔对其受拉测点荷载-应变曲线影响很小。

3.2 配筋荷载-应变曲线

在墙板板底和板面布设配筋网片, 每层配筋网片应变测点布置如图 7, 测点编号相同。对于整板, 选取板底与板面两层配筋网片上的测点 g_1, g_2 进行分析。对于开窗洞墙板, 选取板底与板面两层配筋网片上的测点 g_7, g_4 进行分析。配筋的荷载-应变曲线如图 8。

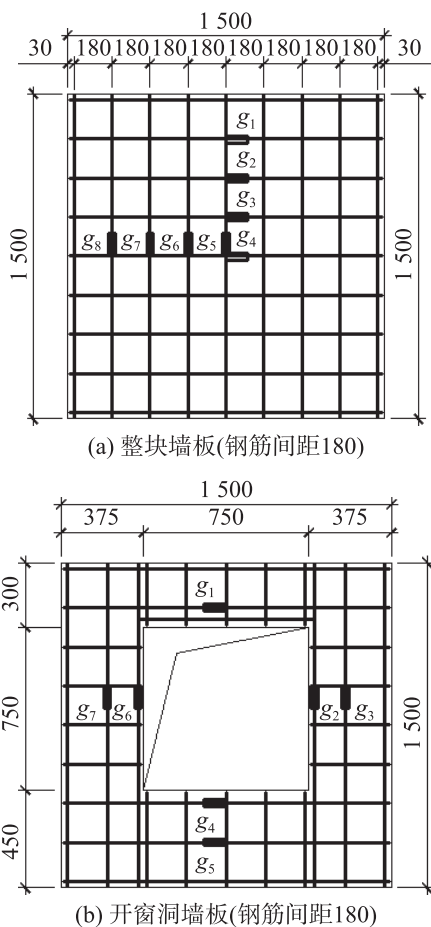


图7 配筋应变测点分布 mm

Fig. 7 Distribution of the strain measuring points of the reinforcement mm

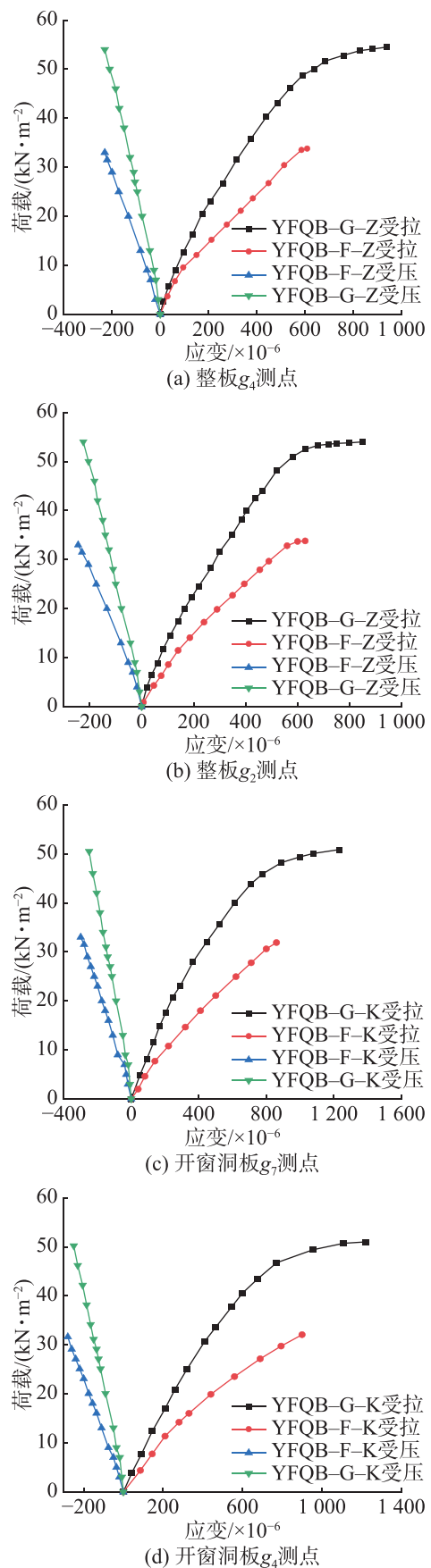


图8 配筋的荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curve of the reinforcement

由图 8 可知:在竖向荷载的作用下,钢筋墙板、GFRP 筋墙板的板底配筋处于受拉状态,2 种筋材墙板测点受拉荷载-应变呈不同变化趋势,变化特征与其受拉测点混凝土荷载-应变曲线相似;板面配筋处于受压状态,2 种筋材墙板受压测点荷载-应变的变化规律相同,均近似线性增长,但 GFRP 筋墙板的应变增幅大于钢筋墙板。比较同种筋材整板与开窗洞板测点配筋的荷载-应变曲线同样可发现,墙板开孔对受拉、受压筋材测点荷载-应变曲线的影响亦较小。

3.3 荷载-变形曲线

墙板变形测点布置如图 9,均布置于板底。对于整板,选取测点 f_1 及测点 f_2 进行分析;对于开窗洞墙板,选取测点 f_3 及测点 f_5 进行分析。墙板荷载-变形曲线如图 10。由图 10 可看出,钢筋墙板和 GFRP 筋墙板的荷载-变形曲线与其受拉混凝土荷载-应变曲线相似,墙板开孔几乎不影响墙板测点荷载-应变的变化趋势。

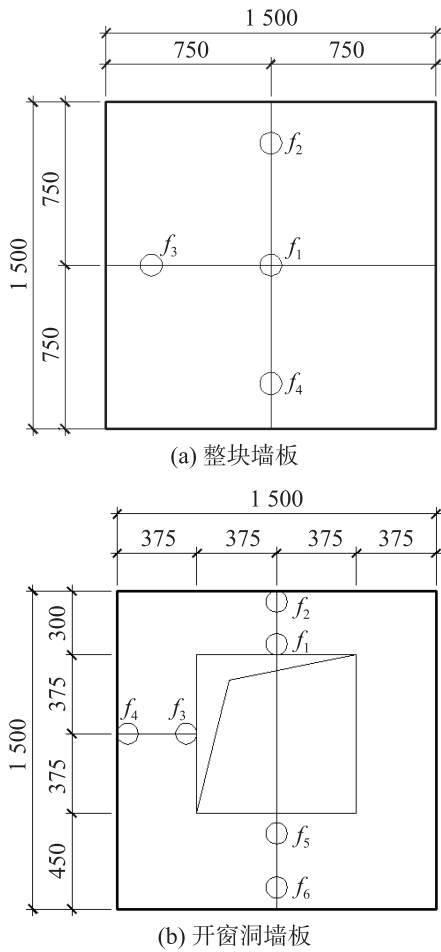


图9 墙板变形测点分布 mm
Fig. 9 Distribution of the deformation measuring points mm

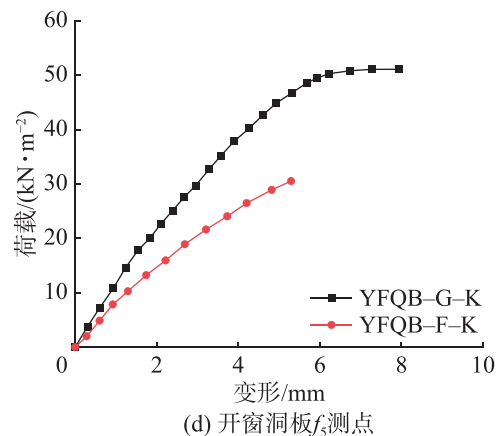
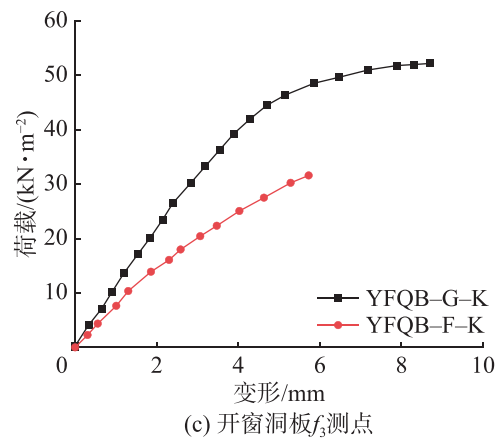
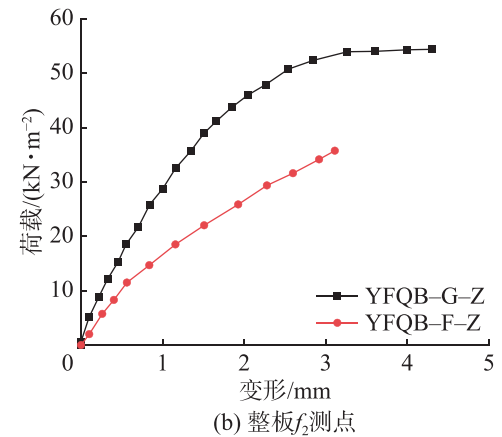
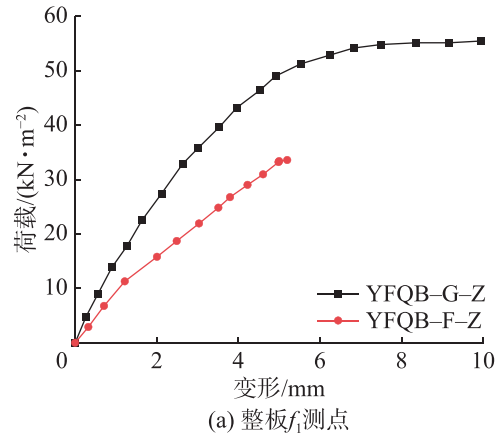


图10 墙板荷载-变形曲线
Fig. 10 Load-deformation curve of the wallboard

参照《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012, 安徽省区域建筑 100 m 处的最大风荷载约 2.31 kN/m^2 。由上述分析可看出: 2 种筋材的整板与开窗洞墙板的极限破坏荷载均大于该指标, 2 种筋材墙板均能抵抗该区域 100 m 以下建筑风荷载的作用, 均可用于高层钢结构住宅围护体系。此外, GFRP 筋墙板的开裂荷载与极限破坏荷载均低于钢筋墙板, 但采用 GFRP 筋替代钢筋会一定程度上降低墙板整体质量, 且 GFRP 筋不存在钢筋的锈蚀问题, 具有较好的耐久性。因此, 认为 GFRP 筋墙板应用前景较好。

4 结论

基于矿渣微粉-粉煤灰-脱硫石膏固废基三元胶凝系, 制备适用于装配式钢结构住宅的围护墙板材料, 探讨制备材料的优选配比和抗弯性能, 得到以下主要结论:

1) 优选配合比为水胶比 0.4、三元胶凝比 1:1:3、替代水泥率 50%、聚苯乙烯颗粒体积分数 35%。此条件下的墙板材料 28 d 立方体抗压强度达 11.12 MPa 、干体积密度为 973 kg/m^3 、导热系数为 $0.187 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、吸水率为 10.06%, 墙板抗压强度远大于《建筑用轻质隔墙条板》GB/T 23451—2023 中的规定要求 (抗压强度 $\geq 3.5 \text{ MPa}$), 且表现出更好的轻质、隔热性能。

2) 对于钢筋墙板和 GFRP 筋墙板, 后者开裂荷载和极限破坏荷载均较前者低, 且脆性破坏特征明显, 破坏比较突然, 前者表现出较好的延性; 开窗洞对墙板承载能力有影响, 其极限破坏荷载与开裂荷载的比值较整板更低; 墙板开孔几乎不影响其受载特性, 但对板底破坏后的裂缝分布形态有影响。整体墙板中钢筋墙板裂缝分布均匀、裂缝多而密, 而 GFRP 筋墙板裂缝分布欠均匀、裂缝少且疏, 2 种筋材开窗洞墙板板底的裂缝分布形态相似。

3) 2 种筋材的整板与开窗洞墙板均能抵抗安徽区域 100 m 以下建筑风荷载的作用, 墙板抗弯性能良好, 且具有轻质、高强、保温和隔热等良好的综合性能, 均可用于该地区装配式钢结构住宅围护体系。

参考文献:

[1] 杨海彬. 关于绿色环保型建材与绿色住宅建筑发展探讨 [J]. 中国住宅设施, 2020(3):21-22.
YANG H B. Discussion on the development of green environmental protection building materials and green residential buildings[J]. China Housing Facilities, 2020(3):21-22.

[2] 王磊. 绿色环保型建材与绿色住宅建筑的发展研究 [J].

四川建材, 2021, 47(10):40-41.
WANG L. Research on the development of green building materials and green residential buildings[J]. Sichuan Building Materials, 2021, 47(10):40-41.

[3] 苗纪奎, 胡蓝皓, 鲍建光, 等. 钢结构装配式住宅配套外墙板的研究进展 [J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(2): 95-102.
MIAO J K, HU L H, BAO J G, et al. Research progress of exterior wallboard of steel structure assembling residence[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(2): 95-102.

[4] 郑建敏, 张正庭, 王亚斯, 等. 钢结构住宅建筑外围护结构系统的研究与应用 [J]. 建筑施工, 2019, 41(10): 1824-1825,1840.
ZHENG J M, ZHANG Z T, WANG Y S, et al. Research and application of steel structure residential building peripheral enclosure system[J]. Building Construction, 2019, 41(10): 1824-1825,1840.

[5] 郑海棠. 新型墙体材料的应用及发展 [J]. 科技创新与应用, 2019, 9(4):26-27,31.
ZHENG H T. Application and development of new wall materials[J]. Technology Innovation and Application, 2019, 9(4):26-27,31.

[6] YANG Q G, WANG H H, ZENG L Y, et al. Properties of high-content micro-steel fiber self-compacting concrete incorporating fly ash and slag powder performance study[J]. Construction Materials, 2023, 3(4):558-575.

[7] GUO R N, CHEN Q Y, HUANG H, et al. Carbonation curing of industrial solid waste-based aerated concretes[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2019, 9(2): 433-443.

[8] NI K, ZHONG S Y, SHI Y X, et al. The strength and microstructure of high content FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 584/585/586:1514-1518.

[9] 项飞鹏, 陈锡炯, 刘春红, 等. 火电脱硫石膏资源化利用研究进展 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48(6):25-30.
XIANG F P, CHEN X J, LIU C H, et al. Research status on resource utilization of power plant desulfurization gypsum[J]. New Building Materials, 2021, 48(6):25-30.

[10] 王波, 文华. 矿渣-粉煤灰地聚物注浆材料的制备及性能优化研究 [J]. 金属矿山, 2023(3):274-278.
WANG B, WEN H. Research on preparation and performance optimization of slag-fly ash geopolymer grouting material[J]. Metal Mine, 2023(3):274-278.

[11] GUO X L, SHI H S. Influence of thermally treated flue gas desulfurization (FGD) gypsum on performance of the slag powder concrete[J]. Journal of Wuhan University of

- Technology-Mater Sci Ed, 2013, 28(6):1122-1127.
- [12] YASAR E, ATIS C D, KILIC A, et al. Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(15):2267-2270.
- [13] SHAFIGH P, NOMELI M A, ALENGARAM U J, et al. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135:148-157.
- [14] MA S C, JIANG N. Experimental investigation on the seismic behavior of a new-type composite interior wallboard[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(12): 5085-5095.
- [15] 吴蓉. 脱硫石膏-秸秆-聚苯颗粒新型墙板的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(7):97-99.
- WU R. Experiment on mechanical properties for a new wall-panel composed of FGD gypsum, crop straw and polystyrene particle[J]. *New Building Materials*, 2016, 43(7):97-99.
- [16] 刘晓轩. 粉煤灰-矿渣微粉-脱硫石膏三元胶凝体系的物理力学性能研究[J]. *粉煤灰*, 2016, 28(6):1-4.
- LIU X X. Study of physical and mechanical properties of fly ash-slag powder-FGD gypsum cementitious system[J]. *Coal Ash*, 2016, 28(6):1-4.
- [17] 桂佑杰. 水泥-脱硫石膏-粉煤灰复合胶凝材料力学性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- GUI Y J. Study on the Mechanical Properties of Cement-Desulfurized Gypsum-Fly Ash Composite Cementitious Materials[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [18] 张明朗, 贺雄飞, 洪侨亨, 等. 矿渣微粉-粉煤灰-硅灰基惰性同步注浆材料的制备及其性能优化[J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(9):50-57.
- ZHANG M L, HE X F, HONG Q H, et al. Preparation and performance optimization of slag micropowder-fly ash-silica fume-based inert synchronous grouting material[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(9):50-57.
- [19] 王浩, 王晓佳, 桂峰, 等. 高炉矿渣资源化利用现状及展望[J]. *化工矿物与加工*, 2021, 50(11):48-53.
- WANG H, WANG X J, GUI F, et al. The status and prospect of blast furnace slag resource utilization[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2021, 50(11):48-53.

责任编辑: 何莉