

# 固废基胶凝材料砂浆的配合比设计研究

Concrete Preparation and Performance Study of Solid Waste – based Cementitious Materials and  
Multi – component Cementitious Mortars

李 研，宋少民

(北京建筑大学，未来城市设计高精尖创新中心，北京 100044)

**摘要：**为了砂浆产业的低碳和可持续发展，文中研究固废基胶凝材料和用粉煤灰替代部分固废基胶凝材料的二元胶凝组分砂浆配合比设计的规律和关键参数，通过控制胶凝材料和水的用量研究 M10~M50 不同强度等级的砂浆性能。结果表明：胶凝材料和水的用量都对砂浆稠度和抗压强度有影响，胶凝材料对砂浆的影响比水的影响更为显著；胶凝材料用量不能过低，用水量不得过高，否则会出现明显的泌水。粉煤灰替代率对砂浆稠度和抗压强度影响显著，替代率增加，稠度增加，抗压强度有所下降，对砂浆早期强度有显著负面影响；当胶凝材料用量较低，粉煤灰替代率达 50% 时，早期强度过低，不具有技术可行性。总体上看，基于固废基胶凝材料的二元胶凝组分制备砂浆技术经济性更好。研究结果可为明确固废基胶凝材料砂浆配合比设计的技术要点，为固废基胶凝材料砂浆后期工程应用提供数据支撑。

**关键词：**砂浆；固废基胶凝材料；二元胶凝组分；配合比；稠度；抗压强度

**中图分类号：**TU528      **文献标志码：**A      **文章编号：**1005–8249 (2025) 06–0007–06

**DOI:**10.19860/j.cnki.issn1005–8249.2025.06.002

LI Shao, SONG Shaomin

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, High – End Innovation Center for Future  
Urban Design, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To promote low – carbon and sustainable development in the mortar industry, this study investigates the design principles and key parameters for binary cementitious mortar mix proportions using solid waste – based cementitious materials and a dual – component cementitious system where fly ash replaces solid waste – based cementitious materials. Mortar with strength grades ranging from M10 to M50 was prepared and tested by controlling cementitious material dosage and water content. The results showed that both cementitious material dosage and water content influence mortar consistency and compressive strength, with cementitious material dosage exerting a more significant effect than water content. During mortar preparation, cementitious material dosage must not be excessively low, and water content must not be excessively high, otherwise pronounced bleeding will occur. The fly ash replacement rate significantly affects mortar consistency and compressive strength. Increasing replacement rate enhances consistency but reduces compressive strength, exerting a pronounced negative effect on early – stage strength. When cementitious material content is low and fly ash replacement reaches 50%, early strength becomes excessively low,

## 材料科学

rendering the mixture technically unfeasible. Overall, the technology for preparing mortar using solid waste – based cementitious materials with a binary cementitious component demonstrates superior economic viability. These findings provide key technical insights for optimizing the mix design of solid waste – based cementitious mortar and offer data support for its future engineering applications.

**Key words:** mortar; solid waste – based cementitious materials; binary cementitious components; mix ratio; consistency; compressive strength

## 0 引言

随着“双碳”目标的推进，水泥生产行业作为CO<sub>2</sub>排放行业之一，迫切需要向绿色低碳方向发展。水泥作为混凝土最常用的无机胶凝材料，每生产1 t水泥熟料约排放0.85~0.90 t二氧化碳，其碳排放占到混凝土原料碳排放总量的90%<sup>[1-2]</sup>。因此，寻找水泥的替代品，减少水泥在混凝土中的用量是实现混凝土绿色低碳发展的方式之一。

近年来，国内外非常重视固体废弃物资源化利用工作，结合“双碳”背景，利用硅铝质工业固体废弃物为原料制备碱激发胶凝材料<sup>[3-4]</sup>、低熟料胶凝材料<sup>[5]</sup>、全固废胶凝材料<sup>[6]</sup>替代或部分替代水泥被众多学者关注，固废基胶凝材料逐渐进入大众视野。Zhang等<sup>[7]</sup>通过调整原材料的钙硅比，利用低活性转炉渣制备出28 d抗压强度53.4 MPa的固废基胶凝材料。Zhu等<sup>[9]</sup>利用超细矿渣微粉替代部分矿渣，制备出28 d抗压强度44.9 MPa的复合胶凝材料。李琳琳等<sup>[10]</sup>利用矿渣制备固废基胶凝材料代替水泥，制备出28 d抗压强度达到59.1 MPa的低碳混凝土。崔孝炜等<sup>[11]</sup>利用矿渣、转炉渣和脱硫石膏制备胶凝材料代替水泥，尾矿废石为骨料，制备出7 d大于60 MPa的全固废混凝土。李树峰等<sup>[11]</sup>以粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、电石渣为主要原料，在室温条件下采用固体碱激发剂制备了地聚物干粉砂浆，M10等级砌筑砂浆的28 d抗压强度达到15.9 MPa，保水性和稠度均符合现行规范要求。研究表明，通过多固废协同制备胶凝材料能够达到与水泥相同的性能，价格低

廉的固废可以替代普通硅酸盐水泥制备砂浆，在解决工业固废的同时，显著提高了经济效益。

近年来，随着理论丰富和技术水平的提高，以钢渣、矿渣和脱硫石膏等固废为主要原料的固废基胶凝材料得到较快发展，固废基胶凝体系稳定性大幅提高，广泛应用于矿井充填<sup>[12-13]</sup>、路基工程<sup>[14-15]</sup>、混凝土砌块<sup>[16-17]</sup>等领域。然而，由于缺乏固废基胶凝材料在混凝土生产中的大数据基础和质量保障的数据追踪，及控制体系和行业标准以上的标准化体系，且固废基胶凝材料与传统的通用硅酸盐水泥相比存在较大差异和波动，国内各混凝土企业还对固废基胶凝材料在各种建筑结构上的应用存在标准和技术领域推广的制约，导致固废基胶凝材料在混凝土领域未得到广泛的应用。为推动固废基胶凝材料在砂浆领域的应用，利用固废基胶凝材料制备不同强度等级砂浆，通过考察砂浆和易性和力学性能，确定固废基胶凝材料胶凝组分中的组成和用量，明确砂浆配合比设计的技术要点，为固废基胶凝材料砂浆后期工程应用提供数据支撑。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用胶凝材料包括固废基胶凝材料和粉煤灰。其中固废基胶凝材料由某公司生产，由钢渣、矿渣、脱硫石膏按一定比例配制而成，固废基胶凝材料主要性能指标和固废基胶凝材料化学组成见表1。粉煤灰采用Ⅱ级粉煤灰，细度18.5%，需水量比90%。细骨料为铁尾矿机制砂，细度模数2.9，属于Ⅱ区中

表1 固废基胶凝材料的主要性能指标和化学组成

Table 1 Key Performance indicators and chemical composition of solid waste – based cementitious materials

比表面积 /(m <sup>2</sup> /kg)	性能指标						化学组成/%										
	凝结时间 /min		抗压强度 /MPa		抗折强度 /MPa		体积 安定性	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d											
433	230	390	23.0	48.9	5.1	9.0	合格	42.10	15.60	6.97	6.61	5.88	0.25	0.44	0.70	2.17	19.04

砂, 表观密度为  $2.73 \text{ g/cm}^3$ , MB 值 0.25, 堆积密度为  $1595 \text{ kg/m}^3$ , 颗粒级配见表 2。外加剂为聚羧酸高性能减水剂, 减水率为 20%。水为自来水。

表 2 细骨料的颗粒级配

Table 2 Particle size distribution of fine aggregate

筛余指标	过筛孔通过率/%						
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm	底
分计筛余	2.6	12.1	18.4	24.9	20.3	12.4	9.3
累计筛余	3	15	33	58	78	90	100

## 1.2 试验方法

砂浆稠度及抗压强度按 JGJ/T 70—2009 测定, 砂浆成型方法应根据稠度而确定。当稠度大于  $50 \text{ mm}$  时, 宜采用人工插捣成型; 当稠度小于  $50 \text{ mm}$  时, 宜采用振动台振实成型。抗压强度采用  $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$  立方体试件, 标准养护 28 d。

## 1.3 试验配合比

(1) 固废基胶凝材料砂浆配合比见表 3。固定用水量, 改变固废基胶凝材料用量 ( $150 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ ), 用水量控制在  $210 \sim 270 \text{ kg/m}^3$ , 减水剂掺量为 1.65%, 制备 M10~M50 强度等级砂浆, 研究固废基胶凝材料用量对砂浆稠度及抗压强度的影响。

表 3 固废基胶凝材料 M10~M50 砂浆性能  
Table 3 Properties of solid waste-based cementitious mortars M10~M50

组别	固废基胶材 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	水 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	W/B	稠度 $/\text{mm}$	抗压强度/MPa		组别	固废基胶料 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	水 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	W/B	稠度 $/\text{mm}$	抗压强度/MPa	
					7 d	28 d						7 d	28 d
SW-1	150	270	1.80	70	2.6	11.6	SW-23	290	270	0.93	70	16.2	32.0
SW-2	170	270	1.59	66	2.3	9.8	SW-24	320	210	0.66	47	21.2	39.1
SW-3	190	270	1.42	74	2.1	10.5	SW-25	330	210	0.64	50	21.3	36.4
SW-4	200	270	1.35	71	3.0	17.6	SW-26	340	210	0.62	32	18.6	42.2
SW-5	210	270	1.29	57	3.4	15.7	SW-27	350	210	0.60	29	30.6	50.8
SW-6	220	270	1.23	60	4.1	20.8	SW-28	350	220	0.63	41	31.6	51.0
SW-7	230	270	1.17	63	5.2	22.8	SW-29	350	230	0.66	54	30.3	47.3
SW-8	230	270	1.17	83	7.0	25.0	SW-30	350	240	0.69	59	30.5	46.6
SW-9	240	270	1.13	90	9.0	26.2	SW-31	350	250	0.71	81	25.5	45.5
SW-10	250	270	1.08	79	8.7	29.2	SW-32	350	260	0.74	85	23.0	46.0
SW-11	260	280	1.08	91	10.0	28.1	SW-33	350	270	0.78	87	20.5	44.0
SW-12	260	290	1.12	100	11.1	28.1	SW-34	370	260	0.70	97	22.2	48.4
SW-13	260	270	1.04	87	13.8	30.5	SW-35	380	260	0.68	102	28.1	49.4
SW-14	260	230	0.88	38	6.5	32.3	SW-36	380	270	0.71	108	27.9	47.1
SW-15	270	230	0.85	33	10.5	34.1	SW-37	390	260	0.67	94	31.6	50.4
SW-16	270	270	1.00	69	12.1	36.4	SW-38	400	280	0.70	99	32.6	42.1
SW-17	280	230	0.82	40	18.1	39.0	SW-39	400	240	0.60	77	34.7	53.9
SW-18	280	270	0.96	71	13.7	39.9	SW-40	400	260	0.65	96	35.0	50.0
SW-19	290	210	0.72	24	16.5	40.3	SW-41	400	270	0.68	102	35.2	50.7
SW-20	290	230	0.79	47	14.4	41.2	SW-42	400	210	0.53	36	36.4	54.0
SW-21	290	250	0.86	58	17.6	41.8	SW-43	400	220	0.55	50	29.5	54.0
SW-22	290	260	0.90	67	17.6	34.3							

表 4 二元胶凝组分砂浆性能  
Table 4 Performance of mortars with binary cementitious components

组别	固废基胶材 /(kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰 /(kg/m <sup>3</sup> )	水 /(kg/m <sup>3</sup> )	减水剂 /%	W/B	稠度 /mm	抗压强度/MPa		组别	固废基胶材 /(kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰 /(kg/m <sup>3</sup> )	水 /(kg/m <sup>3</sup> )	减水剂 /%	W/B	稠度 /mm	抗压强度/MPa	
							7 d	28 d								7 d	28 d
SWF-1	234	26 (10%)	280	1	1.08	77	7.0	22.8	SWF-18	266	114 (30%)	210	2.4	0.55	66	6.9	41.9
SWF-2	208	52 (20%)	280		1.08	66	3.1	18.9	SWF-19	228	152 (40%)	210	2.2	0.55	87	4.7	36.6
SWF-3	182	78 (30%)	280		1.08	80	1.9	16.2	SWF-20	304	76 (20%)	280	1.3	0.74	94	6.6	36.3
SWF-4	130	130 (50%)	280		1.08	86	0.5	8.6	SWF-21	266	114 (30%)	280		0.74	67	4.9	29.6
SWF-5	234	26 (10%)	270	1.65	1.04	70	8.4	24.7	SWF-22	228	152 (40%)	280		0.74	68	3.8	26.7
SWF-6	208	52 (20%)	270	1.65	1.04	60	4.0	20.7	SWF-23	304	76 (20%)	270	1.3	0.71	87	6.6	37.6
SWF-7	182	78 (30%)	270	1.65	1.04	75	2.3	17.9	SWF-24	266	114 (30%)	270		0.71	62	4.9	33.1
SWF-8	130	130 (50%)	270	1.65	1.04	80	0.7	10.3	SWF-25	228	152 (40%)	270		0.71	64	3.8	28.5
SWF-9	261	29 (10%)	270	1.65	0.93	82	10.6	33.4	SWF-26	320	80 (20%)	210	3.1	0.53	50	7.7	41.4
SWF-10	232	58 (20%)	270	1.65	0.93	104	4.3	25.7	SWF-27	280	120 (30%)	210	2.0	0.53	54	6.4	37.8
SWF-11	203	87 (30%)	270	1.65	0.93	99	2.8	23.1	SWF-28	240	160 (40%)	210	2.0	0.53	50	5.4	42.2
SWF-12	145	145 (50%)	270	1.65	0.93	111	1.1	17.1	SWF-29	320	80 (20%)	280	2.0	0.70	112	6.1	32.2
SWF-13	261	29 (10%)	260	1.65	0.90	79	10.6	30.8	SWF-30	280	120 (30%)	280		0.70	79	5.8	33.2
SWF-14	232	58 (20%)	260	1.65	0.90	100	4.3	24.0	SWF-31	240	160 (40%)	280		0.70	90	4.3	32.0
SWF-15	203	87 (30%)	260	1.65	0.90	94	2.8	22.0	SWF-32	320	80 (20%)	270	2.0	0.68	105	6.1	36.9
SWF-16	145	145 (50%)	260	1.65	0.90	102	1.1	15.5	SWF-33	280	120 (30%)	270		0.68	74	5.8	34.7
SWF-17	304	76 (20%)	210	2.4	0.55	67	7.2	39.7	SWF-34	240	160 (40%)	270		0.68	80	4.3	33.2

注: 括号内数据为粉煤灰替代率。

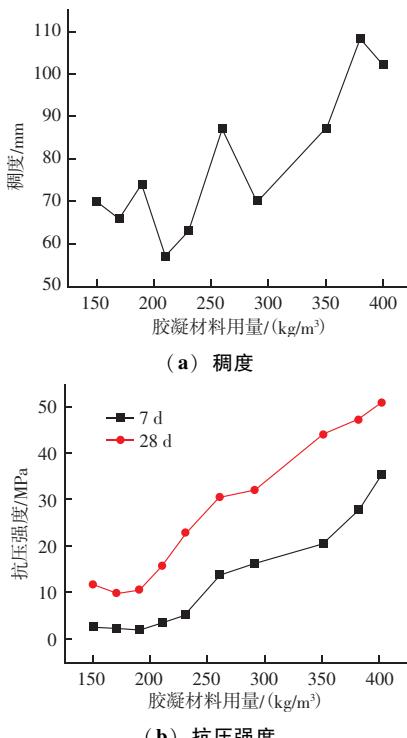


图 1 不同固废基胶凝材料用量的 M10 ~ M50 稠度与砂浆抗压强度

Fig. 1 Compressive strength and consistency of M10 ~ M50 mortars with different solid waste - based cementitious materials

固废基胶凝材料因粉磨而含有大量的细粉，填充了机制砂的孔隙，增加了砂子包裹层厚度，减少了内摩擦。

固废基胶凝材料砂浆的 28 d 抗压强度基本随固

废基胶凝材料用量增加而增长。M10 ~ M50 强度等级砂浆中，固废基胶凝材料用量是决定砂浆抗压强度的首要因素。固废基胶凝材料用量在 150 ~ 260 kg/m<sup>3</sup>，抗压强度由 11.6 MPa 增至 30.5 MPa，增幅较大；固废基胶凝材料用量在 260 ~ 350 kg/m<sup>3</sup>，抗压强度继续增长至 44.0 MPa，增幅趋缓；固废基胶凝材料用量 350 ~ 400 kg/m<sup>3</sup>，抗压强度由 44.0 MPa 增至 50.7 MPa，增幅仅 6.7 MPa，说明继续增加胶凝材料用量并不经济，可以通过引入适量粉煤灰替代部分固废基胶凝材料，在保证强度的同时降低胶凝材料成本。

经过对试验数据的综合分析，提出了固废基胶凝材料砂浆关键参数的范围，见表 5。

表 5 固废基胶凝材料砂浆关键参数 / (kg/m<sup>3</sup>)  
Table 5 Key parameters of solid waste - based cementitious mortar

强度等级	胶材用量范围	用水量范围
M10	150 ~ 210	250 ~ 270
M20	220 ~ 260	270 ~ 290
M30	260 ~ 330	210 ~ 270
M40	340 ~ 400	210 ~ 280
M50	380 ~ 400	210 ~ 260

## 2.2.2 二元胶凝材料砂浆

由图 2 可知，稠度方面，随着粉煤灰掺量由 10% 增至 50%，砂浆稠度整体升高。粉煤灰的球形颗粒形态效应和粉煤灰密度小导致的胶凝材料体积增大，起到较好的润滑作用，从而提高了浆体流动性。

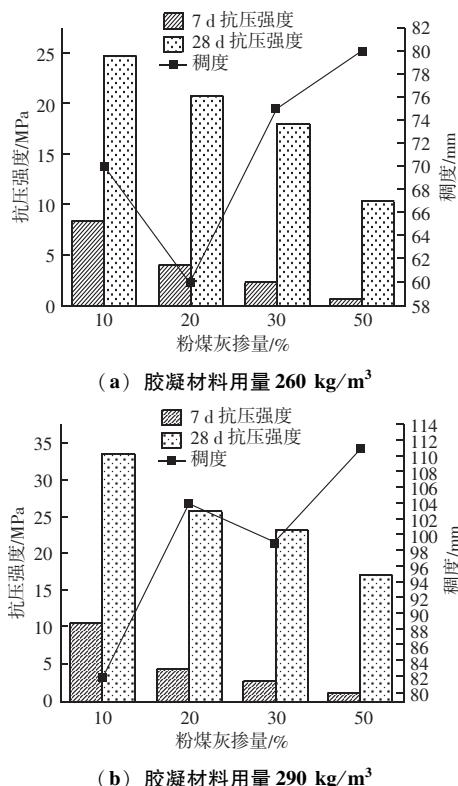


Fig. 2 Consistency and compressive strength of mortar with binary cementitious components

用水量为  $270 \text{ kg/m}^3$ ，胶凝材料用量分别为  $260 \text{ kg/m}^3$  和  $290 \text{ kg/m}^3$  时，砂浆  $28 \text{ d}$  抗压强度随粉煤灰掺量增加而下降。胶凝材料用量为  $260 \text{ kg/m}^3$  时，砂浆  $28 \text{ d}$  抗压强度由  $24.7 \text{ MPa}$  (粉煤灰掺量为  $10\%$ ) 下降至  $10.3 \text{ MPa}$  (粉煤灰掺量为  $50\%$ )；胶凝材料用量为  $290 \text{ kg/m}^3$  时，抗压强度由  $33.4 \text{ MPa}$  (粉煤灰掺量为  $10\%$ ) 降至  $17.1 \text{ MPa}$  (粉煤灰掺量为  $50\%$ )，降幅略缓，体现了粉煤灰借助固废基胶凝材料体系中矿渣、钢渣在水化过程中释放出的  $\text{Ca(OH)}_2$  与碱性离子，以及脱硫石膏同时提供  $\text{SO}_4^{2-}$ ，三者共同构成“碱-硫酸盐”激发体系，为后期强度提供了保障。需要注意的是，胶凝材料用量低于  $290 \text{ kg/m}^3$ 、粉煤灰掺量为  $50\%$  时，砂浆  $7 \text{ d}$  抗压强度显著降低，抗压强度甚至降低至  $0.5 \sim 1.1 \text{ MPa}$ 。原因是粉煤灰虽然后期能与  $\text{Ca(OH)}_2$  发生二次水化反应，但早期几乎不参与反应，只起到物理填充作用；当其掺量高达  $50\%$ ，严重稀释了固废基胶凝材料的早期活性组分。因此在胶凝材料用量较低时，粉煤灰掺量不宜超过  $40\%$ ，否则不具有工程应用的可行性。

通过对试验数据的综合分析，提出了二元胶凝组分砂浆关键参数的范围，见表 6。

表 6 二元胶凝组分砂浆关键参数  
Table 6 Key parameters of mortar with binary cementitious components

强度等级	胶材用量 / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	用水量 / ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	粉煤灰替代率 / %
M10	250 ~ 270	270 ~ 280	10 ~ 30
M15	260 ~ 290	260 ~ 280	10 ~ 30
M20	260 ~ 380	260 ~ 280	10 ~ 40
M30	380 ~ 400	210 ~ 280	20 ~ 40

### 3 结论

通过试验研究固废基胶凝材料和用粉煤灰替代部分固废基胶凝材料的二元胶凝组分砂浆配合比设计的规律和关键参数；通过控制胶凝材料和水的用量研究 M10 ~ M50 不同强度等级的砂浆性能，得到以下主要结论：

(1) 固废基胶凝材料砂浆和基于固废基胶凝材料的二元胶凝组分砂浆配合比设计中，用水量一定时，随着胶凝材料用量的增加，砂浆抗压强度随之增加；胶凝材料用量一定时，随着用水量的增加，砂浆抗压强度随之降低。

(2) 固废基胶凝材料用量不能过低，用水量不得过高，否则会影响砂浆拌合物流动性能，出现明显的泌水。胶凝材料用量及用水量都对砂浆的稠度和抗压强度有影响，但胶凝材料用量对砂浆的影响比用水量的影响更为显著。

(3) 固废基胶凝材料砂浆能够满足各强度等级要求，但全部使用固废基胶凝材料不够经济。

(4) 二元胶凝组分固废基胶凝材料砂浆同样可以满足各个强度等级的要求，随着粉煤灰替代率的提高，相较于固废基胶凝材料砂浆，经济性得到显著的改善。但胶凝材料用量低于  $290 \text{ kg/m}^3$ 、粉煤灰掺量提升至  $50\%$  时，砂浆  $7 \text{ d}$  抗压强度显著降低。因此在胶凝材料用量较低时，粉煤灰掺量不宜超过  $40\%$ ，否则不具有工程应用的技术可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 韩建国, 阎培渝. 绿色混凝土的研究和应用现状及发展趋势 [J]. 混凝土世界, 2016 (6): 34 ~ 42.
- [2] 张晋, 马晓, 安建晔, 等. 低碳混凝土的评价与实现路径探讨 [J]. 混凝土世界, 2023 (11): 88 ~ 91. (下转第 28 页)

## 材料科学

- [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 丁沙. 过硫磷石膏矿渣水泥混凝土抗海盐侵蚀性能及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [4] MARTINS P, DIANE G, ROBERT L. An investigation into the use of manufactured sand as a 100% replacement for fine aggregate in concrete [J]. Materials, 2016, 9 (6): 440.
- [5] JOHN D B, GLENN M. The effects of particle shape on the yielding behaviour of crushable sand [J]. Soils and Foundations, 2020, 60 (2): 520–532.
- [6] BLISETT R S, ROWSON N A. A review of the multi-component utilization of coal fly ash [J]. Fuel, 2012, 97: 1–23.
- [7] 赵彬宇, 赵志曼, 全思臣, 等. 矿物掺和料对磷建筑石膏砂浆强度的影响 [J]. 非金属矿, 2019, 42 (6): 45–48.
- [8] WANG S. Application of solid ash based catalysts in heterogeneous catalysis [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42 (19): 7055–7063.
- [9] KRISHNYA S, HERTH C, ELAKNESWARAN Y. Modeling of hydration products and strength development for high-volume fly ash binders [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126228.
- [10] 吴凯, 施惠生, 徐玲琳, 等. 矿物掺合料调控界面过渡区微结构对混凝土力学性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45 (5): 623–630.
- [11] HANG Y. A binder of phosphogypsum – ground granulated blast furnace slag – ordinary portland cement [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2011, 26 (3): 548–551.
- [12] TANGADAGI R B, MANJUNATHA M, DINESH S, et al. Role of mineral admixtures on strength and durability of high strength self compacting concrete: An experimental study [J]. Materialia, 2021, 18: 101144.
- [13] 李永鑫. 含钢渣粉掺合料的水泥混凝土组成、结构与性能的研究 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003.
- [14] 孙家瑛, 黄成华. 矿渣钢渣复合超量替代水泥的高性能混凝土性能研究 [J]. 建筑石膏与胶凝材料, 2004 (7): 13–15.
- [15] 刘业金, 周长顺. 钢渣粉 – 偏高岭土再生混凝土力学性能及微观结构的研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (2): 133–138, 157.
- [16] CELIK K, MERAL C, PETEK G A, et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder [J]. Cement and Concrete Composites, 2015 (56), 59–72.
- [17] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [18] 中华人民共和国建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(上接第 11 页)

- [3] 罗晓洪, 张世俊, 郭荣鑫, 等. 电石渣替代水泥作碱激发剂对过硫磷石膏胶凝材料性能和微观结构的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37 (增刊2): 298–304.
- [4] 乔龙腾, 宋志峰. 碱激发粉煤灰基胶凝材料的水化过程及力学性能 [J]. 金属矿山, 2023 (11): 179–185.
- [5] 李胜辉, 郭斌, 温震江, 等. 矿渣基胶凝材料开发和充填体强度与流变特性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41 (10): 40–43.
- [6] 李鑫, 杜惠惠, 倪文, 等. KR 脱硫渣碱激发矿渣的配比优化及水化特性 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (1): 170–179.
- [7] ZHANG W, HAO X S, WEI C, et al. Activation of lowactivity calcium silicate in converter steelmaking slag based on synergy of multiple solid wastes in cementitious material [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128925.
- [8] ZHU C F, TAN H B, DU C, et al. Enhancement of ultrafine slag on compressive strength of solid waste-based cementitious materials: Towards low carbon emissions [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 63: 105475.
- [9] 李琳琳, 李晓阳, 苏兴文, 等. 钢渣制备高强度人工鱼礁混凝土 [J]. 金属矿山, 2012 (3): 158–162.
- [10] 崔孝炜, 倪文, 任超. 钢渣矿渣基全固废胶凝材料的水化反应机理 [J]. 材料研究学报, 2017, 31 (9): 687–694.
- [11] 李树峰, 邓凯, 阎胜利, 等. 多元固废地聚物干粉砂浆制备与性能研究 [J]. 建筑技术, 2025, 56 (1): 117–121.
- [12] 汤畅. 含精炼渣全固废胶凝材料协同超细尾砂制备胶结充填材料 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [13] 张艳佳, 汤畅, 刘生玉, 等. 精炼渣基矿山充填胶凝材料制备及水化机理 [J]. 金属矿山, 2022 (6): 230–236.
- [14] 王应富, 张树光, 黄啸, 等. 磷石膏 – 钢渣 – 矿渣固化低液限粉质黏土力学性能及耐久性能研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (增刊1): 12–23.
- [15] 肖杰, 刘财壮, 刘志勇, 等. CFB 灰 – 钢渣粉 – 矿渣 – 脱硫石膏全固废公路下伏采空区注浆材料特性研究 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (6): 193–206.
- [16] 曹文斌, 刘明亮, 廖国伟, 等. 多元固废基胶凝材料制备高强路面砖试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (7): 142–145.
- [17] 高健, 王晓磊, 李军, 等. 高炉矿渣制备免烧砖强度的试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (11): 165–168.