

粉煤灰渣细骨料混凝土强度及耐久性试验研究

马建平

(宁夏理工学院 建筑与环境学院, 石嘴山 753000)

摘要: 为获得粉煤灰渣替代天然河砂后混凝土性能的变化规律, 通过室内试验, 制备与天然河砂相同颗粒级配的粉煤灰渣, 以等体积原则替代天然河砂, 研究粉煤灰渣替代率对混凝土强度及耐久性的影响, 并分析粉煤灰渣与水泥之间强度演变机理。结果表明: 粉煤灰渣替代天然河砂后混凝土的抗压强度、抗折强度随替代率增加呈先增大后减小趋势, 替代率为 50% 时, 混凝土的抗压强度、抗折强度提高最显著; 随粉煤灰渣替代率增长, 混凝土的碳化深度先减小后增大, 替代率为 50% 时碳化深度最小; 掺入粉煤灰渣后降低了混凝土的抗渗性能, 抗渗等级随替代率增加而减小; 粉煤灰渣内部的水分可提高其周边水泥的水化程度, 提高结构致密程度, 水泥与粉煤灰渣表面活性成分水化产生水化硅酸钙, 增强与粉煤灰渣之间的握裹力。

关键词: 粉煤灰渣; 细骨料; 混凝土; 强度; 耐久性

中图分类号: TU521 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0001-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.001

Experimental Study on the Strength and Durability of Fly Ash Slag Fine Aggregate Concrete

MA Jianping

(College of Architecture and Environment, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000, China)

Abstract: In order to obtain the change rule of concrete performance after replacing natural river sand with fly ash slag, through indoor test, prepare fly ash slag with the same particle gradation as natural river sand, replace natural river sand with equal volume principle, study the effect of fly ash slag substitution rate on the strength and durability of concrete, and analyze the mechanism of strength evolution between fly ash slag and cement. The results show that: the compressive strength and flexural strength of concrete after replacing natural river sand by fly ash slag shows a tendency of increasing and then decreasing with the increase of substitution rate, and when the substitution rate is 50%, the compressive strength and flexural strength of concrete are most significantly improved; with the increase of substitution rate of fly ash slag, the carbonation depth of concrete decreases and then increases, and when the substitution rate is 50%, the carbonation depth is the smallest; the impermeability performance of concrete is reduced by the addition of fly ash slag, and the impermeability grade increases with the substitution rate of 50%. Performance, impermeability grade decreases with the increase of substitution rate; Fly ash slag internal moisture can improve the hydration of the cement around it, to improve the degree of structural densification, the cement and fly ash slag surface active ingredient hydration produces hydrated calcium silicate, to enhance and fly ash slag between the grip force.

Key words: fly ash slag; fine aggregate; concrete; strength; durability

材料科学

0 引言

粉煤灰渣为热电厂排出的大颗粒废弃物, 每年排放量约 1.6 亿吨^[1], 由于其颗粒大、活性低, 一直未有合理利用途径; 常规的掩埋、堆积处理方式对自然环境造成严重污染。细颗粒粉煤灰渣粒径分布与混凝土中细骨料相似, 其自身也具有一定的火山灰活性^[2-3], 采用粉煤灰渣替代混凝土中的部分细骨料, 即可实现废弃资源再利用, 也可降低混凝土成本, 具有较好的经济效益和社会效益。

为加快粉煤灰渣在工程中的应用, 广大学者进行了一系列研究, 董双快等^[4]、卢志平等^[5]采用室内试验, 研究了粉煤灰渣、钢渣、锂渣替代细集料后混凝土的力学性能变化, 获得了不同工业废渣最佳替代砂时用量与替代水泥用量的关系; 温小非等^[6]、王子杰等^[7]研究了粉煤灰替代细骨料后混凝土的性能, 认为替代率不超过 40% 时, 随替代率增加强度增长, 替代率为 50% 时混凝土抗压、劈裂抗拉强度仍满足要求; 艾庆一等^[8]研究了粉煤灰在水泥砂浆中的水化特性, 认为粉煤灰临界替代率为 35%, 替代率大于 35% 后主要表现为微集料效应; 毛明杰等^[9-10]认为粉煤灰作为细骨料可发挥微集料效应, 同时也具备火山灰效应, 可有效提高混凝土强度, 掺量为 35% 时混凝土力学强度、密实程度最佳, 采用粉煤灰骨料制备地聚物混凝土同样具备优异的抗冻性能; 张卉等^[11]根据细骨料粒径区间分布, 采用粉煤灰渣等体积替代对应粒径区间的细骨料, 研究了粉煤灰渣混凝土的强度及抗冻性, 掺入粉煤灰渣后混凝土强度及抗冻性能未见显著损失; 杨晓艳等^[12]通过对湿排粉煤灰渣的活化处理, 进行替代细骨料的应用, 结果表明在一定程度上可提高砂浆的抗压强度; 张日红等^[13]采用粉煤灰与渣土制备人造骨料, 粉煤灰掺量为 50% 时骨料强度最佳, 吸水率最低; 杨泽政等^[14]采用粉煤灰渣替代机制砂, 研究了粉煤灰渣粒度、掺量对砂浆性能的影响, 粒径小于 2.36 mm, 替代率为 10% 时砂浆抗压、抗折分别提高了 15%、7%; 许建疆等^[15]以粉煤灰微珠作为细骨料, 研究其与沙漠砂陶粒对混凝土抗压强度的影响, 得出粉煤灰微珠混凝土呈现骨料断裂破坏, 粉煤灰微珠最佳掺量为 30%。

当前对粉煤灰渣应用的研究成果较少, 对于采用相同颗粒级配粉煤灰渣等体积替代细骨料后混凝土的性能变化规律尚不明确。基于此, 通过室内试验, 将大颗粒粉煤灰渣破碎筛分, 以配制与细骨料相同颗粒级配的粉煤灰渣, 并采用等体积替代原则, 探究粉煤灰渣替代率对混凝土强度及耐久性的影响, 该研究通过减少天然细骨料的使用量, 提高固体废弃物的利用效率, 从而降低环境污染, 具有显著社会价值。

1 试样制备及试验方法

1.1 试验材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 强度等级 C30; 细骨料采用天然河砂, 细度模数 2.86, 为 II 区中砂, 采用筛分法剔除粒径大于 4.75 mm 河砂; 粗骨料为机械压碎碎石, 粒径 5~20 mm, 含泥量不大于 0.9%, 压碎指标 8.2%; 粉煤灰渣采用石嘴山本地热电厂干排粉煤灰渣, 烧失量为 2.91%。

1.2 试验配合比

为研究粉煤灰渣替代天然河砂后混凝土强度及耐久性能的演变规律, 取粉煤灰渣替代中砂体积百分数分别为 20%、35%、50%、65%、80%, 粉煤灰渣混凝土配合设计见表 1。

表 1 粉煤灰渣混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of fly ash slag concrete

编号	粉煤灰渣替代率/%	水灰比	kg/m ³					外加剂
			水泥	粉煤灰渣	中砂	碎石	水量	
F-0		0.5	578		684.0	1 189	289	1.46
F-1	20	0.5	578	108.1	547.2	1 189	289	1.46
F-2	35	0.5	578	189.1	444.6	1 189	289	1.46
F-3	50	0.5	578	270.2	342.0	1 189	289	1.46
F-4	65	0.5	578	351.2	239.4	1 189	289	1.46
F-5	80	0.5	578	432.3	136.8	1 189	289	1.46

1.3 试件制备

称取河砂 1 100 g, 放置于 (105 ± 5) °C 的恒温烘干箱中烘干至恒定重量, 冷却至常温后称取两份 500 g 试样, 采用筛分法获取两份试样, 五种粒径区间河砂的质量百分数结果见表 2。将粉煤灰渣机械破碎后筛分, 按照河砂各粒径区间的质量百分数, 制备与天然河砂相同级配的粉煤灰渣。

表 2 河砂粒径区间表

Table 2 Table of sand particle size range in rivers

粒径范围 /mm	(0.15 ~ 0.30]	(0.30 ~ 0.60]	(0.60 ~ 1.18]	(1.18 ~ 2.36]	(2.36 ~ 4.75]
百分数/%	18.5	17.9	29.6	20.7	13.3

试件制备前，将粉煤灰渣饱水 24 h，然后滤水晾至面干状态；将水泥、粗骨料、河砂加入强制式搅拌机，干拌 1 min；然后加入粉煤灰渣、水、减水剂，搅拌 2 min；将搅拌完成拌合物入模并振捣密实，常温养护 24 h 后拆模，放置于温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 95% 的养护室进行养护 28 d。

1.4 试验方法

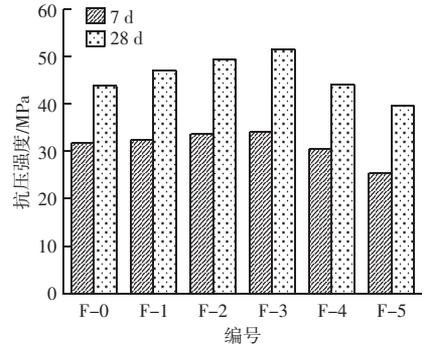
粉煤灰渣混凝土抗压强度、抗折强度试验按照 GB/T50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》中的规定的试验方法进行；耐久性试验按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》中的规定的试验方法进行。

为获得粉煤灰渣混凝土微观形貌，从养护 28 d 的 F-3 组混凝土试件内部采集 1~2 mm 厚度试样，放置于异丙醇溶液中终止其水化反应，取出试样烘干进行扫描电镜试验。

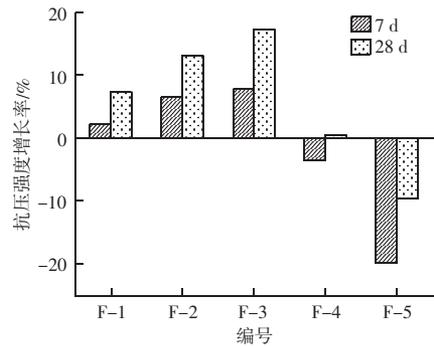
2 试验结果

2.1 抗压强度

由图 1 可知，7 d 龄期时试件抗压强度值排序为 F-3 > F-2 > F-1 > F-0 > F-4 > F-5，混凝土抗压强度随着粉煤灰渣替代率增长呈先增大后减小的趋势；替代率为 50% 时抗压强度最大，相对基准组 F-0 提高了 7.9%，替代率为 65% 时抗压强度略小于基准组，替代率为 80% 时抗压强度相对基准组降低了 19.9%。28 d 龄期的试件抗压强度值排序为 F-3 > F-2 > F-1 > F-4 > F-0 > F-5，替代率为 50% 时抗压强度最大，相对基准组提高了 17.4%；替代率为 65% 时粉煤灰渣混凝土抗压强度略大于基准组，替代率为 80% 时抗压强度相对基准组降低了 9.6%；28 d 龄期抗压强度相比基准组增长率比 7 d 龄期的有所提高。综上分析，采用粉煤灰渣替代天然河砂可行，采用粉煤灰渣等体积替代 50% 天然河砂时混凝土的抗压强度提高最明显，65% 替代率时混凝土强度与基准组基本相同，满足设计强度要求。



(a) 抗压强度



(b) 相对基准组抗压强度增长率

图 1 不同粉煤灰渣替代率混凝土抗压强度结果

Fig. 1 Results of compressive strength of concrete with different substitution rates of fly ash and slag

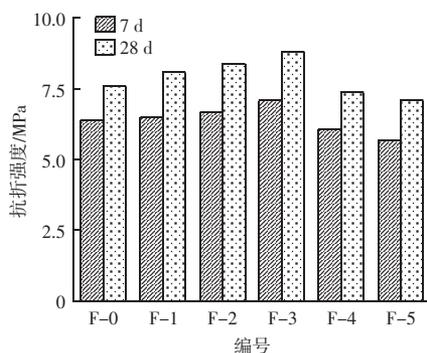
从 7~28 d 龄期混凝土抗压强度增长幅度来看，基准组 F-0 增长为 12.2 MPa，随粉煤灰渣替代率增长混凝土抗压强度增幅呈增大趋势，当粉煤灰渣替代率为 50% 时增幅达到最大为 17.4 MPa，之后抗压强度增幅呈减小趋势，但仍大于基准组。65% 粉煤灰渣替代率时 7 d 龄期抗压强度小于基准组，28 d 龄期强度略大于基准组；80% 粉煤灰渣替代率时 7 d 龄期混凝土抗压强度相比基准组降低了 19.9%，28 d 龄期强度相比基准组降低了 9.6%；说明粉煤灰渣与水泥之间存在一定的水化反应，且水化反应速率较慢，与基准组试件相比需要更长的养护时间来提高混凝土的强度。

2.2 抗折强度

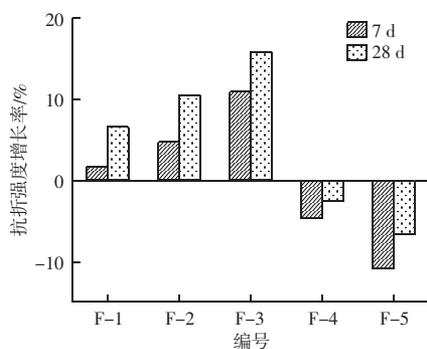
由图 2 可知，粉煤灰渣混凝土抗折强度相比基准组呈先增加后减小趋势，7d 龄期时增长率分别为 1.6%、4.7%、10.9%、-4.9%、-10.9%，28 d 龄期时增长率分别为 6.6%、10.5%、15.8%、-2.6%、-6.6%。由此可见，粉煤灰渣替代率为 20%~50% 时混凝土的抗折强度增长最明显，替代率超过 50%

材料科学

后, 7、28 d 龄期的抗折强度呈明显下降趋势, 且均小于基准组试件。这是由于大比例粉煤灰渣替代天然砂后, 造成混凝土骨料强度整体降低, 粉煤灰渣自身的火山灰性质虽可增强水泥的水化反应作用, 但细骨料自身强度的降低更加明显, 无法通过更加充分水化反应弥补强度的降低。



(a) 抗折强度



(b) 相对基准组抗折强度增长率

图2 不同粉煤灰渣替代率混凝土抗折强度结果

Fig. 2 Results of flexural strength of concrete with different substitution rates of fly ash and slag

2.3 抗碳化性能

由表3可知, 相同粉煤灰渣替代率时, 随着碳化时间的增长, 各组试件的碳化深度均呈现加深趋势。碳化时间相同时, 粉煤灰渣替代率为20%的混凝土试件碳化深度相比基准组 F-0 明显增大, 随粉煤灰渣替代率的增长, 各组试件的碳化深度均呈先减小后增大的趋势, 粉煤灰渣替代率为50%时, 试件碳化深度最小, 其14、28 d 碳化深度均小于基准组。7 d 碳化时间时, F-3 组试件碳化深度相比 F-0 组增加了0.2 mm; 14、28 d 碳化时间时, F-3 组试件碳化深度相比 F-0 组分别减小了0.1、0.2 mm。综合分析认为, 随碳化时间增长, 粉煤灰渣混凝土的养护时间也相应加长, 促使其水化反应更加充分,

粉煤灰渣与水泥浆体界面的过渡区更加密实, 提高了其抗碳化能力; 当粉煤灰渣替代率过高时, 因粉煤灰渣自身特性造成细骨料内部疏松孔隙增多, 劣化了水泥砂浆的性能, 降低了混凝土的抗碳化能力。

表3 不同碳化时间粉煤灰渣混凝土碳化深度

Table 3 Carbonation depth of fly ash concrete with different carbonization times

时间/d	F-0	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
7	9.9	10.6	10.4	10.1	10.8	11.7
14	11.2	11.8	11.5	11.1	11.9	12.9
28	16.2	17.7	17.1	16.0	17.5	18.4

2.4 抗水渗透性能

由图3可知, 养护龄期为7 d时, 各组试件抗渗等级随着粉煤灰渣替代率的增加呈减小趋势, F-0、F-1 组试件抗渗压力值大于8.0 MPa, 达到 P8 抗渗等级的要求; 其余各组试件抗渗等级均小于8.0 MPa, 不满足 P8 抗渗等级的要求。养护龄期为28 d时, 各组试件抗渗等级相比7 d 龄期有显著增长, 但抗渗等级仍随着粉煤灰渣替代率的增加而不断减小; 粉煤灰渣替代率不超过50%的试件抗渗等级大于8.0 MPa, 满足 P8 抗渗等级的要求; 粉煤灰渣替代率为20%时, F-1 组试件抗渗等级相比 F-0 组降低了4.1%, 当粉煤灰渣替代率为50%时, F-3 组试件抗渗等级相比 F-0 组降低了13.4%, 可见粉煤灰渣替代率增长对混凝土的抗渗等级影响明显; F-2 组试件抗渗等级相比 F-1 组降低了4.3%, F-5 组试件抗渗等级相比 F-4 组降低了11.5%, 可见粉煤灰渣替代率越大, 抗渗等级下降速度越明显。混凝土的抗渗性能与水胶比、孔隙率有密切关系, 水胶比增加会提高混凝土内部

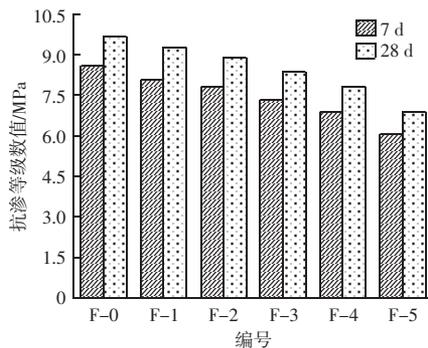


图3 不同粉煤灰渣替代率混凝土抗渗等级图

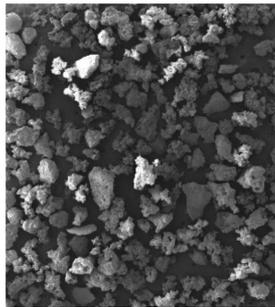
Fig. 3 Concrete impermeability grade diagram with different substitution rates of coal ash and slag

孔隙率,进而降低其抗渗等级,试验中对粉煤灰渣采取了预湿吸水饱和,加入粉煤灰渣后变相提高了混凝土的水胶比,故粉煤灰渣混凝土抗渗性能降低;另一方面粉煤灰渣本身为疏松多孔材料,其自身火山灰效应及携带水分虽可提高混凝土的水化反应程度,增加混凝土的密实性,但也在一定程度上增大了混凝土的孔隙率,导致抗渗等级降低。

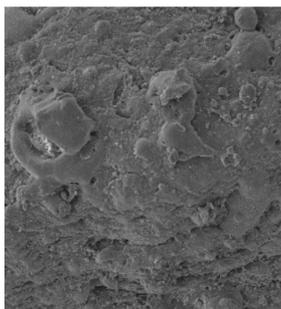
3 微观试验结果

3.1 粉煤灰渣微观形貌

由图 4 (a) 可知,粉煤灰渣颗粒极不规则,多数为棱角形颗粒,呈现开孔状态,少见球形颗粒;粉煤灰渣的形状特点使其具备较好的吸水性,固定水灰比条件下会降低混凝土的和易性,抑制混凝土的流动,减小混凝土的坍落度;因此对粉煤灰渣预湿饱水,是保证混凝土和易性的有效措施。由图 4 (b) 可知,粉煤灰渣表面吸附着一层粉煤灰颗粒,由于粉煤灰与粉煤灰渣表面的吸附结合,使得粉煤灰颗粒在水泥砂浆中不能自由移动,抑制了粉煤灰的润滑作用,但粉煤灰的火山灰活性有助于提高混凝土的性能。



(a) 粉煤灰渣颗粒形态



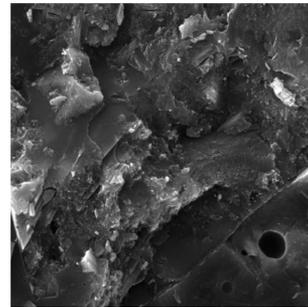
(b) 粉煤灰渣颗粒表面

图 4 粉煤灰渣微观形貌图像

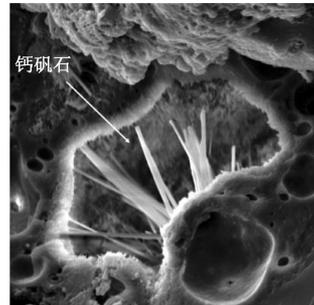
Fig. 4 Microscopic morphology image of fine coal ash residue

3.2 粉煤灰渣混凝土微观形貌

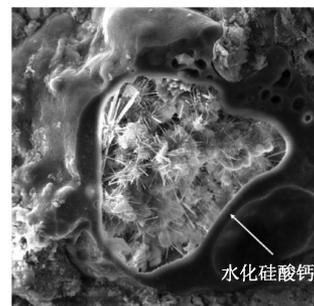
由图 5 (a) 中知,水泥浆均匀分布在粉煤灰渣周边,经过 28 d 水化反应,粉煤灰渣周围水泥浆水化充分,结构致密。图 5 (b)~(c) 中显示粉煤灰渣内部存在一定孔隙,细小水泥颗粒进入大颗粒的粉煤灰渣内部,经过水化反应生成针棒状的钙矾石、簇状水化硅酸钙充填了粉煤灰渣自身孔隙,一定程度上弥补了大颗粒粉煤灰渣疏松多孔的缺陷;水泥水化氢氧化钙可与粉煤灰渣二次水化反应,在粉煤灰渣表面生成水化硅酸钙,粉煤灰渣内部与外部的的水化产物共同提高了混凝土结构的强度。图 5 (d) 显示粉煤灰渣与水泥浆之间的接触面呈现凹凸不平形态,经过水化反应两者接触面紧密握裹,粉煤灰渣携带水分使水化反应更加充分,进一步提高了两者之间的握裹力,采用一定量的粉煤灰渣替代河砂后可从物理和化学两个方面提高混凝土的强度。



(a) 粉煤灰渣周围致密水泥浆

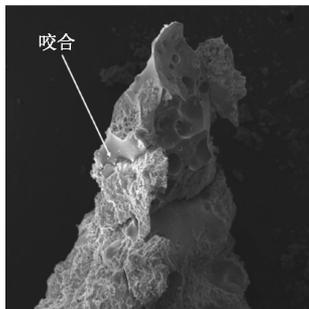


(b) 水化钙矾石



(c) 粉煤灰渣孔隙中水化硅酸钙

材料科学



(d) 粉煤灰渣水泥接触面形态

图5 F-3组28d扫描电镜图像

Fig. 5 Scanning electron microscopy images of F-3 group at 28 days

4 结论

通过制备粉煤灰渣细骨料, 研究粉煤灰渣替代河砂对混凝土强度及耐久性能的影响, 得到以下结论:

(1) 粉煤灰渣替代率不大于50%时可提高混凝土的抗压强度; 粉煤灰渣混凝土28d抗压强度增长幅度明显大于7d, 粉煤灰渣混凝土相比未掺粉煤灰渣的混凝土需要更长的养护时间。

(2) 粉煤灰渣替代率为20%~50%时混凝土的抗折强度增长最明显, 替代率超过50%后, 7、28d抗折强度呈下降趋势, 且均小于基准组。

(3) 相同粉煤灰渣替代率时, 随着碳化时间的增长, 各组试件的碳化深度均呈现加深趋势; 碳化时间相同时, 随粉煤灰渣替代率的增长, 各组试件的碳化深度均呈先减小后增大的趋势, 粉煤灰渣替代率为50%时试件碳化深度最小, 其14、28d碳化深度均小于基准组。

(4) 采用粉煤灰渣替代细骨料河砂可明显降低混凝土的抗渗性, 随替代率的增加混凝土的抗渗等级呈明显下降; 增加粉煤灰渣混凝土的养护龄期可提高其抗渗性能, 粉煤灰渣替代率不超过50%时, 28d龄期混凝土的抗渗等级满足P8要求。

(5) 饱水后的粉煤灰渣可为水泥的水化反应提供水分, 使粉煤灰渣周边水泥的水化反应更加充分, 提高混凝土内部结构的致密程度; 水泥水化产物氢氧化钙可以与粉煤灰渣表面活性成分进一步反应生产水化硅酸钙, 粉煤灰渣内部水化反应产生钙矾石,

提高了粉煤灰渣自身强度; 粉煤灰渣表面不规则形状提高了与水泥浆之间的握裹力, 对提高混凝土强度具有促进作用。

参 考 文 献

- [1] 张志明, 桂联政, 廖达琛, 等. 燃煤电厂粉煤灰高值化利用研究进展 [J]. 能源环境保护, 2023, 37 (4): 1-11.
- [2] 卢前明, 张元馨, 匡招杰, 等. 燃煤电厂炉底灰水化活性激发试验研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (6): 101-107.
- [3] 兰天翔. 达茂旗热源厂混排灰渣综合利用试验研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
- [4] 董双快, 吴福飞, 王红, 等. 工业废渣替代砂浆细集料的可行性研究 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2020, 38 (2): 101-107.
- [5] 卢志平, 毕晶晶, 冯凌. 钢渣-粉煤灰水泥土搅拌桩力学性能研究 [J]. 当代化工, 2022, 51 (8): 1786-1789.
- [6] 温小非, 吴庆, 王波, 等. 粉煤灰替代细骨料的混凝土性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2016 (9): 19-23.
- [7] 王子杰, 石旅铭, 马也, 等. 高温后粉煤灰细骨料混凝土力学性能试验研究 [J]. 宁夏大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (1): 56-61.
- [8] 艾庆一, 黄博文, 陈浩旭. 粉煤灰活性骨料在砂浆中的水化特性研究 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (3): 50-54.
- [9] 毛明杰, 韩鹏飞, 杨秋宁, 等. 基于正交试验粉煤灰细骨料混凝土抗压强度研究 [J]. 混凝土, 2019 (9): 88-91.
- [10] 毛明杰, 李瑞文, 杨秋宁, 等. 冻融作用下粉煤灰地聚物混凝土性能劣化研究 [J]. 非金属矿, 2020, 43 (2): 48-50.
- [11] 张卉, 潘慧敏, 石雨轩, 等. 粉煤灰渣替代细骨料对砂浆混凝土强度及抗冻性影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (2): 433-440, 449.
- [12] 杨晓艳, 陈云, 马世洪, 等. 湿排粉煤灰渣在预拌砂浆中的应用 [J]. 粉煤灰综合利用, 2010 (1): 28-30.
- [13] 张日红, 明维, 万文豪, 等. 高强粉煤灰-渣土人造骨料的制备与微结构表征 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (8): 2819-2827, 2835.
- [14] 杨泽政, 赵庆新, 周美茹. 预处理低质粉煤灰渣对砂浆使用性能和微观结构的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43 (8): 70-74, 85.
- [15] 许建疆, 何明胜, 郭军林, 等. 粉煤灰微珠-沙漠砂陶粒混凝土正交试验研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45 (5): 83-88.