

# 超细复合矿粉改性混凝土性能影响分析

Analysis of the Influence of Ultra Fine Composite Mineral Powder Modified Concrete Performance

杨文

(四川省建设工程质量安全总站, 成都 610047)

**摘要:** 为提高传统混凝土抗氯盐腐蚀性能, 将粉煤灰、高炉矿渣粉、钢渣粉按照 2:5:3 质量比制备超细复合矿粉, 分析不同超细复合矿粉替代水泥掺量对混凝土工作性能、力学强度、抗氯盐腐蚀性能的影响规律。结果表明: 坍落度随着超细复合矿粉掺量的增加而增大, 60 min 坍落度损失随掺量的增加而减小; 抗压、抗折强度随着超细复合矿粉掺量的增加呈先增大后减小趋势, 掺量为 40% 最佳; 氯离子扩散系数随超细复合矿粉掺量的增加而减小, 掺量超过 40% 后降幅不再显著; 随氯盐腐蚀循环增加, 质量损失率变大, 相对动弹性模量减小, 超细复合矿粉替代水泥可提高混凝土抗氯盐腐蚀能力, 掺量为 40% 时抗氯盐腐蚀能力最强。研究成果可完善耐氯盐腐蚀混凝土配合比设计, 为废弃矿物材料工程应用提供参考。

**关键词:** 超细复合矿粉; 混凝土; 强度; 氯盐环境; 腐蚀性

**中图分类号:** TU528.04    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0018-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.004

YANG Wen

(四川省建设工程质量安全总站, 成都 610047, China)

**Abstract:** To improve the resistance of traditional concrete to chloride salt corrosion, ultrafine composite mineral powder was prepared by mixing fly ash, blast furnace slag powder, and steel slag powder in a mass ratio of 2:5:3. The influence of different ultrafine composite mineral powders replacing cement on the workability, mechanical strength, and resistance to chloride salt corrosion of concrete was analyzed. The results showed that the slump increased with the increase of ultrafine composite mineral powder dosage, and the 60 minute slump loss decreased with the increase of dosage; The compressive and flexural strength show a trend of first increasing and then decreasing with the increase of ultrafine composite mineral powder content, and the optimal content is 40%; The diffusion coefficient of chloride ions decreases with the increase of ultrafine composite mineral powder content, and the decrease is no longer significant after the content exceeds 40%; As the chloride corrosion cycle increases, the mass loss rate increases and the relative dynamic elastic modulus decreases. The use of ultrafine composite mineral powder instead of cement can improve the concrete's resistance to chloride corrosion, with the strongest resistance at a dosage of 40%. The research results can improve the mix design of chloride resistant concrete and provide reference for the engineering application of waste mineral materials.

**Key words:** ultra fine composite mineral powder; concrete; strength; chloride environment; corrosion resistance

## 0 引言

我国国土面积幅员辽阔，不同自然环境条件下对混凝土结构的耐久性要求不同，其中，抗氯盐腐蚀性能是混凝土结构耐久性能的重要指标之一。受氯盐侵蚀作用易引起混凝土结构外部保护层剥落，加速内部钢筋的锈蚀<sup>[1-2]</sup>，严重削弱混凝土结构的承载能力。超细矿物材料是由工业副产品（如矿渣粉、钢渣）经过先进粉磨技术而形成的绿色低碳胶凝材料，具有高比表面积和火山灰活性等特点，作为辅助胶凝材料替代水泥可改善混凝土耐久性能<sup>[3]</sup>，也是降低混凝土碳排放及制造成本的有效途径。

当前，单一粉煤灰、矿渣粉的矿物掺合料应用研究相对成熟，超细复合矿物材料对混凝土性能的影响已成为研究热点。王蓓等<sup>[4]</sup>研究超细矿粉、硅灰、粉煤灰组成复合矿物掺合料对RPC性能影响，结果显示，复合掺合料对RPC强度及耐腐蚀性能提升显著。何翔等<sup>[5]</sup>研究了掺粉煤灰、矿渣、石灰粉、煤矸石粉、大理石粉对高性能混凝土性能影响，掺复合固废粉可提高抗氯离子渗透性能，掺加过量会导致强度及抗渗性降低。汤建华等<sup>[6]</sup>探究了复合矿渣、粉煤灰颗粒粒度对喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀的影响，复合矿粉粒度越细，混凝土抗腐蚀性能越强。张平等<sup>[7]</sup>以机械、化学双重活化技术制备粉煤灰、矿渣粉低碳复合掺合料，复合掺合料混凝土抗水渗透性、抗硫酸盐侵蚀性能较好。马召林等<sup>[8]</sup>基于多元固废制备超细高活性矿物掺合料，锰渣、钢渣、粉煤灰、脱硫石膏质量比为8:3:8:1时具有良好的水化协同作用及火山灰促进作用。张雪丽等<sup>[9]</sup>研究了矿渣-钢渣-锰渣-粉煤灰多元超细掺合料对混凝土性能影响，掺量为30%时可降低含气量，提高密实程度。宋佳佳等<sup>[10]</sup>以粉煤灰、煤系偏高岭土制备复合微粉，研究复合微粉混凝土抗硫酸盐干湿循环性能影响，结果表明，30%复合微粉掺量时混凝土抗硫酸盐等级可达KS150以上。蒋勇等<sup>[11]</sup>以钢渣与矿渣按3:7质量比混合碾磨形成复合矿粉，掺合矿粉后混凝土力学性能略有降低，但孔隙率显著下降。陈平等<sup>[12]</sup>采用多元复合矿粉制备复合水泥基胶凝材料，研究了其抗海水侵蚀性能，复合矿粉可使胶凝材料更加致密，可提高力学及耐腐蚀性能。

卫煜等<sup>[13]</sup>采用超细矿物掺合料制备超高性能混凝土，20%超细矿物掺量时UHPC的水化放热和收缩应变最低，力学性能提升最大。秦哲焕等<sup>[14]</sup>通过粉磨技术制备粉煤灰、矿渣粉超细复合型矿物掺合料，掺超细复合矿物掺合料可提高混凝土强度、抗渗及耐腐蚀性能，大掺量时抗碳化性能显著降低。刘琴梅<sup>[15]</sup>研究了单掺或复掺矿物掺合料对HPC性能影响，超细矿粉与粉煤灰质量比为8:2时改善HPC综合性能最佳。

综上，对于复掺两种及以上超细复合矿物材料可改善混凝土的强度及耐久性，但掺量相对较少，尚不能对固体废弃矿料进行大量利用。为充分利用钢渣、高炉矿渣、粉煤灰等废弃矿物，将钢渣、高炉矿渣经机器磨细，与粉煤灰按照设计比例制备超细复合矿粉材料替代水泥，研究大掺量超细复合矿粉对混凝土和易性、力学性能、抗氯离子渗透性、抗氯盐侵蚀性能的演变规律，以期完善复合矿物材料混凝土配合比设计，为废弃矿物材料的综合利用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥，强度等级C30；粉煤灰采用I级低钙粉煤灰，密度2.46 g/cm<sup>3</sup>，勃氏比表面积1138 m<sup>2</sup>/kg；高炉矿渣、钢渣为铁冶炼废弃物，采用实验室内碾磨机械加工形成超细矿粉。将粉煤灰、高炉矿渣粉、钢渣粉按照2:5:3质量比混合，超细复合矿粉粒径范围为1~10 μm，平均粒径4.73 μm，超细复合矿粉、水泥粒径分布曲线如图1所示。相比于水泥，超细复合矿粉含有更多的二氧化硅，氧化钙含量有所降低，28 d活性指数为106%，主要化学成分见表1。粗骨料采用石灰岩机械碎石，粒径5~26 mm；细骨料采用河砂，细度模数2.26，级配均符合要求。减水剂采用聚羧酸高效减水剂，掺量为胶凝材料的1.2%，拌合水采用自来水。

### 1.2 试件制备

采用超细复合矿粉替代水泥量分别为20%、30%、40%、50%、60%，固定水灰比为0.35，试验配合比见表2。按照配合比称取水泥、超细复合矿

## 材料科学

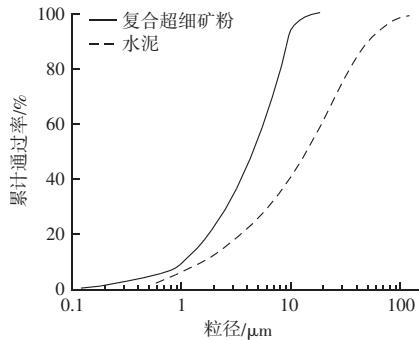


图 1 超细复合矿粉、水泥粒径分布曲线

Fig. 1 Ultrafine composite mineral powder, cement particle size distribution curve

表 1 超细复合矿粉、水泥主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of ultrafine composite mineral powder and cement /%

材料名称	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>
水泥	3.91	7.79	17.14	0.83	65.14	2.13
超细复合矿粉	5.99	15.93	39.61	0.64	32.84	2.76

表 2 试验配合比

Table 2 Experimental mix ratio / (kg/m<sup>3</sup>)

试件	水泥	超细复合矿粉	细骨料	粗骨料	水
X-0	480		764	1 126	168
X-20	384	96	764	1 126	168
X-30	336	144	764	1 126	168
X-40	288	192	764	1 126	168
X-50	240	240	764	1 126	168
X-60	192	288	764	1 126	168

粉、细骨料、粗骨料放入强制式搅拌机中，干搅拌 30 s，然后将水、减水剂倒入搅拌机，搅拌 2 min；之后将混合料倒入模具，放置振捣台振捣 1 min，抹平试件表面浮浆，采用保鲜膜覆盖。试件常温养护 24 h 后拆模，放置标准养护室养护至规定龄期。

### 1.3 试验方法

力学性能试验按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》要求进行，抗压强度试验试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，抗折强度试验试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 600 mm 棱柱体试件，分别进行 7、28 d 养护龄期的力学性能测试。采用 YES-2000 电液伺服万能压力机，试验加载速率为 0.5 kN/s。每种配合比制作 3 个试件，进行 3 组平行试验。

根据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中 RCM 法测定试件氯离子迁移系数，采用 NJ-RCM 型混凝土氯离子扩散系数测定仪，每种配合比制作 3 个试件，进行 3 组平行试验。

制作 10% 质量分数 NaCl 溶液，进行抗氯盐侵蚀性能试验，试验采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 标准立方体试件，在标准养护室养护 28 d 后进行试验。根据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中相关规定，进行 30 次氯盐循环侵蚀试验，每个循环结束测定试件的质量损失率及相对动弹性模量。

## 2 结果与分析

### 2.1 坍落度

由图 2 可以看出，未掺超细复合矿粉的新拌混凝土坍落度为 195 mm，60 min 后坍落度降低至 171 mm，减小了 24 mm；掺入超细复合矿粉后，新拌、60 min 时混凝土坍落度均呈现增大趋势。超细复合矿粉掺量越大，60 min 混凝土坍落度比新拌混凝土降低值越小；超细复合矿粉掺量每增加 20%，60 min 混凝土相比新拌混凝土坍落度分别降低 15、9、8、6、6 mm。可见，掺入超细复合矿粉提高了混凝土和易性，延长了混凝土凝结时间。这是由于超细矿粉中钢渣粉活性较低，变相增加自由水含量，提高流动度，同时也延长混凝土的凝结时间；另一方面，粉煤灰中含有大量玻璃微珠，降低拌合料内部阻力，也可提高混凝土流动性，故大掺量超细复合矿粉具有良好的泵送工作性能。

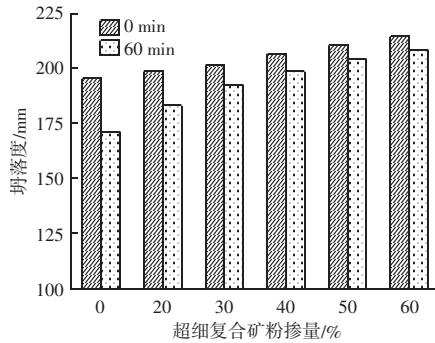


图 2 不同超细复合矿粉掺量混凝土坍落度

Fig. 2 Slump of concrete with different dosage of ultrafine composite mineral powder

### 2.2 力学性能

从图 3 (a) 可以看出，超细复合矿粉掺量小于 40% 时，随着超细复合矿粉掺量增加，7、28 d 抗压强度呈增大趋势；超细复合矿粉替代水泥掺量大于 40% 后，随掺量增加抗压强度呈减小趋势。超细复

合矿粉掺量从20%增加至60%，28 d相比7 d抗压强度分别增长4.6、5.6、6.1、6.6、7.5 MPa；超细复合矿粉掺量为60%时，7 d抗压强度小于X-0组，28 d抗压强度超出X-0组0.9 MPa，说明掺入超细复合矿粉降低混凝土前期抗压强度，需增加混凝土养护龄期，以使混凝土强度充分增长。

由图3 (b) 可以看出，混凝土7、28 d抗折强度同样随超细复合矿粉掺量增加呈先增大后减小趋势，超细复合矿粉掺量为40%时抗折强度最大，但掺量为60%时抗折强度均小于X-0组；超细复合矿粉掺量在20%~40%，28 d曲线斜率大于7 d，说明增大超细复合矿粉掺量降低混凝土前期抗折强度，但显著提高混凝土后期抗折强度。

综上，超细复合矿粉掺量为40%时可获得最佳的抗压强度、抗折强度，掺量为50%时抗压强度、抗折强度仍大于X-0组。这可能是由于超细复合矿粉中含有丰富的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，且材料颗粒粒径相比水泥更小，随着养护龄期的增长，胶凝材料反应更加充分，提高了混凝土结构的致密程度与结构强度；过大超细复合矿粉掺量时，由于水泥胶凝材料的减

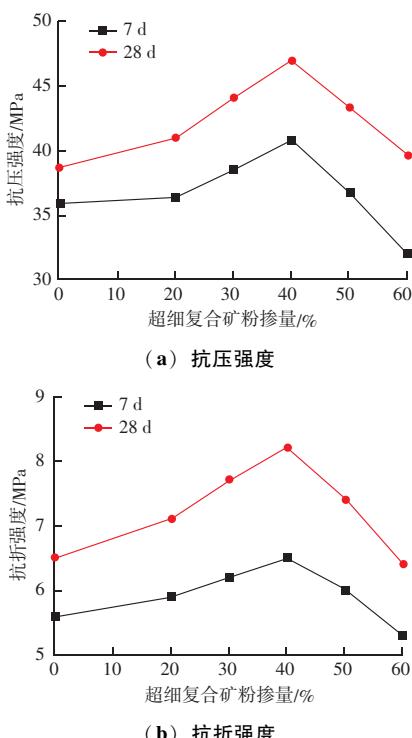


图3 不同超细复合矿粉掺量混凝土力学性能

Fig. 3 Mechanical Properties of Concrete with Different Admixtures of Ultrafine Composite Mineral Powder

小，一方面水化反应不充分，另一方面超细复合矿粉需要更长的水化周期，故表现出强度降低。

### 2.3 氯离子扩散系数

由图4可知，X-0组混凝土的氯离子扩散系数为 $6.47 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ；采用超细复合矿粉替代水泥后，混凝土氯离子扩散系数随超细复合矿粉掺量的增加而减小，相较于X-0组，超细复合矿粉掺量每增加10%，氯离子扩散系数分别降低5.41%、12.06%、21.64%、24.57%、25.66%。可见随超细复合矿粉掺量的增加，氯离子扩散系数降幅不断减小，掺量由40%增加至60%，氯离子扩散系数仅降低 $0.26 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，抗氯离子扩散效果显著降低。这主要由于超细复合矿粉具有更大的比表面积，更小的颗粒粒径，掺量适当时具有更好的微填充效应，提高胶凝体系的堆积密度，使混凝土基体结构致密化，从而提高混凝土的抗氯离子扩散性能；当超细复合矿粉掺量过大时微填充效应减弱，同时水泥胶凝材料的减少抑制水化反应，影响结构的致密性，无法进一步提高混凝土的抗氯离子扩散性能。

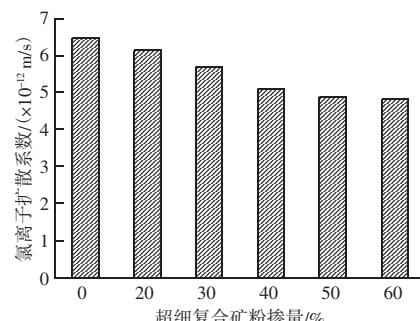


图4 不同超细复合矿粉掺量混凝土氯离子扩散系数

Fig. 4 Chloride diffusion coefficient of concrete with different dosages of ultrafine composite mineral powder

### 2.4 抗氯盐侵蚀

为研究超细复合矿粉替代水泥后混凝土的抗氯盐侵蚀性能，以超细复合矿粉替代水泥掺量为20%、40%、60%，研究超细复合矿粉掺量对混凝土抗氯盐侵蚀性能的影响规律。

#### 2.4.1 质量损失率

图5为超细复合矿粉混凝土经过30次氯盐侵蚀循环的质量损失率结果。无超细复合矿粉的X-0组质量损失率最大，为6.94%，其在0~6次腐蚀循环内质量损失显著减小，之后随着循环次数增加质量损失率逐步加快，腐蚀循环大于15次后质量开始减

## 材料科学

小。采用超细复合矿粉替代水泥后，腐蚀循环在 15 次以内时质量损失率相对平稳，腐蚀循环大于 15 次后质量损失率逐步加快。超细复合矿粉掺量为 20%、40%、60% 时，30 次氯盐腐蚀循环下混凝土的质量损失率分别为 3.83%、1.96%、4.48%，超细复合矿粉掺量为 40% 时质量损失率最小。超细复合矿粉混凝土相对最密实，抗氯盐侵蚀性能最佳。究其原因，一方面，掺入超细复合矿粉提高了混凝土结构密实程度，降低了氯盐侵入结构内部的通道，减缓了侵蚀作用；另一方面，超细复合矿粉与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生二次水化反应，生成水化铝酸钙可与氯离子产生结合反应，抑制氯离子的侵蚀破坏。

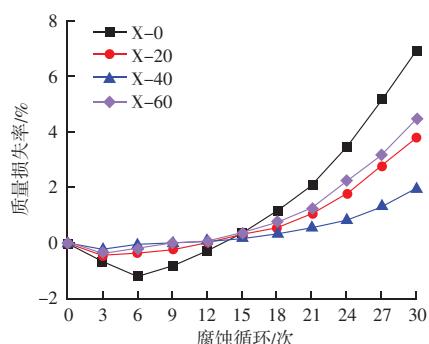


图 5 不同腐蚀循环超细复合矿粉混凝土质量损失率  
Fig. 5 Mass loss rate of ultrafine composite mineral powder concrete with different corrosion cycles

### 2.4.2 相对动弹性模量

由图 6 可以看出，随腐蚀循环增加，超细复合矿粉混凝土受到氯盐侵蚀的损伤也逐渐增大，混凝土相对动弹性模量下降幅度不断增大。未掺复合超细矿粉时，混凝土在 30 次腐蚀循环时相对动弹性模量为 72.0%，在 0~30 次腐蚀循环内相对动弹性模量显著小于掺超细复合矿粉的混凝土；超细复合矿粉

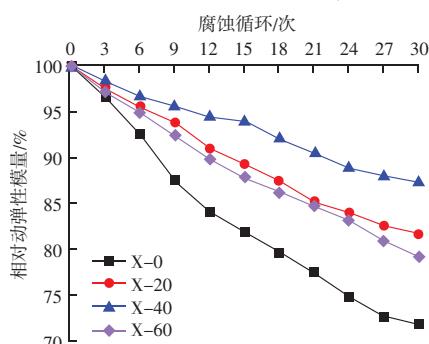


图 6 不同腐蚀循环超细复合矿粉混凝土相对动弹性模量  
Fig. 6 Relative dynamic elastic modulus of ultrafine composite mineral powder concrete with different corrosion cycles

掺量为 20%、40%、60% 时，混凝土在 30 次腐蚀循环时相对动弹性模量分别为 81.8%、87.3%、79.2%；在 0~30 次腐蚀循环内，掺量为 20%、60% 组相对动弹性模量相差不大，显著优于 X-0 组，掺量为 40% 组相对动弹性模量显著高于 X-20、X-60 组，这说明超细复合矿粉掺量为 40% 时混凝土的抗变形能力最强。

### 3 结论

为提高废弃矿物材料的利用效率，采用高炉矿渣粉、钢渣粉、粉煤灰制备超细复合矿粉，研究大掺量超细复合矿粉对混凝土力学及抗氯盐腐蚀性能的影响规律，得出以下结论：

(1) 掺入超细复合矿粉可提高混凝土坍落度，延长凝结时间，混凝土坍落度随超细复合矿粉掺量的增加而增大，60 min 坍落度损失量随超细复合矿粉替代量的增加而减小，超细复合矿粉混凝土具有良好的工作性能。

(2) 混凝土抗压、抗折强度随超细复合矿粉掺量的增加呈先增大后减小趋势，超细复合矿粉掺量为 40% 时力学性能最佳；掺入超细复合矿粉降低了混凝土早期力学性能，但可提升混凝土后期力学性能，超细复合矿粉掺量为 50% 时力学性能优于普通混凝土。

(3) 混凝土的氯离子扩散系数随超细复合矿粉掺量的增加而减小，氯离子扩散系数降低幅值随掺量增加而减小，掺量大于 40% 后降幅不再显著。

(4) 随着氯盐腐蚀循环次数增加，超细复合矿粉混凝土质量损失率不断增大，相对动弹性模量不断减小，超细复合矿粉掺量为 40% 时抗氯盐腐蚀性能最佳，掺量为 20%、60% 时抗氯盐腐蚀性能相当。

### 参 考 文 献

- [1] 王会. 海水环境下矿渣再生混凝土的劣化规律研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 71~74.
- [2] 李钟, 邹挺. 氯盐环境下粉煤灰对混凝土中钢筋的损伤度影响测试 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 81~87.
- [3] 朱国军, 秦哲焕, 谷亚军, 等. 超细复合矿物掺合料在实体混凝土结构中的应用评价 [J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44 (11): 26~30.

(下转第 59 页)

- [3] 周冲, 黄玮, 王兆军, 等. 黄河冲积平原区软土地基快速液压夯加固参数试验研究 [J]. 铁道建筑, 2025, 65 (1): 142–146.
- [4] 崔宇寒, 顾东明, 余海兵, 等. 降雨开挖诱发顺层岩质滑坡稳定性与堆积特征 [J]. 人民长江, 2024, 55 (9): 156–164.
- [5] 刘畅, 季凡凡, 郑刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (3): 447–456.
- [6] 姚亚辉, 薛晓辉, 张玉洁, 等. 开挖条件下土质边坡稳定性影响试验研究 [J]. 科技通报, 2015, 31 (9): 103–106.
- [7] 安海堂, 余会明, 张卫强. 土质边坡开挖试验及其数值模拟研究 [J]. 人民长江, 2016, 47 (19): 48–52, 82.
- [8] 马文成. 不同降雨条件下高填方边坡稳定性的数值模拟分析 [J]. 价值工程, 2025, 44 (5): 19–21.
- [9] 涂美义, 袁世宇, 陈江军, 等. 不同降雨工况下的矿山修复工程

- [10] 吴能. 不同降雨持续时间条件下土质边坡的稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30 (12): 30–33.
- [11] 蔡汉杰. 公路工程高边坡开挖稳定性研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (21): 126–128.
- [12] 张军文. 软土边坡开挖变形特征与临界破坏范围数值模拟 [J]. 能源与节能, 2023 (7): 156–160.
- [13] 魏芸, 赵娟. 软土边坡稳定分析时土体强度参数的取法分析 [J]. 港工技术, 2017, 54 (5): 33–34.
- [14] 张雷. 软土边坡支护技术及其应用分析 [J]. 四川水泥, 2024 (9): 109–111.
- [15] 王梓轩. 强风化砾岩区取土场开挖前后边坡稳定性研究 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21 (1): 160–163.

(上接第 6 页)

- [6] 熊辉霞, 张谦, 李岩, 等. 粉煤灰和硅灰掺料对高性能混凝土氯离子扩散影响 [J]. 混凝土, 2021 (7): 95–97.
- [7] 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] LUAN C Q, WU Z M, HAN F N, et al. The effects of calcium content of fly ash on hydration and microstructure of ultra - high performance concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137735.
- [9] WANG Z W, GUO M L, LIU C L, et al. Chloride binding behavior and pore structure characteristics of low - calcium high - strength cement pastes [J]. Materials, 2024, 17 (13): 3129.
- [10] 胡勤, 李猛, 刘京, 等. 粉煤灰钙含量对 MPC-UHPC 水化及力学性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (7): 95–102.

- [11] 李建华, 邓强, 赵中军, 等. 低钙粉煤灰玻璃体含量对强度发展的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2201–2209.
- [12] 黄煌煌, 陈铁锋, 高小建. CO<sub>2</sub>矿化改性高钙粉煤灰对水泥砂浆力学性能和微结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (5): 1889–1896.
- [13] 董红娟, 熊青青, 王晨阳, 等. 高低钙粉煤灰协同钙基固废制备复合胶凝材料性能研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43 (4): 326–330, 352.
- [14] 周建伟, 余保英, 程宝军. 不同细度粉煤灰复掺对高强混凝土力学性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 75–78.
- [15] 成高立, 李晓光, 王攀奇, 等. 石灰石粉-粉煤灰细度变化对水泥基胶凝材料体系水化动力学的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (7): 2337–2343.

(上接第 22 页)

- [4] 王蓓, 王彦. 矿物掺合料在活性粉末混凝土 (RPC) 中应用研究 [J]. 混凝土, 2024 (10): 167–170, 177.
- [5] 何翔, 乔险涛, 喻鹏, 等. 工业固废粉末对自密实高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4017–4026.
- [6] 汤建华, 贾飞, 潘慧敏, 等. 矿物掺合料粒度分布对喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 混凝土, 2022 (6): 61–66.
- [7] 张平, 陈旭, 李绍纯, 等. 绿色低碳型高性能混凝土的制备及其性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (9): 155–158.
- [8] 马召林, 明阳, 李文俊, 等. 多元固废协同制备超细高活性矿物掺合料及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1824–1833.
- [9] 张雪丽, 侯付闯. 多元复合超细掺合料制备混凝土内部结构研究 [J]. 混凝土, 2023 (10): 116–119.

- [10] 宋佳佳, 杜红秀. CMK 复合微粉对混凝土耐蚀性及阻抗谱特性的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2023, 54 (6): 1127–1133.
- [11] 蒋勇, 廖斌, 王小均, 等. 钢渣复合矿粉对不同养护条件下混凝土性能的影响 [J]. 金属矿山, 2024 (5): 311–317.
- [12] 陈平, 夏海洋, 胡成, 等. 多元固废基复合胶凝材料的硬化特征与抗蚀性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (3): 24–28.
- [13] 卫煜, 陈平, 明阳, 等. 复合超细高活性矿物掺合料对 UHPC 水化和收缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (2): 461–468.
- [14] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66–69, 79.
- [15] 刘琴梅. 矿物掺合料对 C55 高性能混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (3): 97–100.