

## 粉煤灰对混凝土性能影响研究综述

班桂萌<sup>1,2</sup>, 郑醒<sup>3</sup>, 胡琴<sup>3</sup>, 罗恩昊<sup>3</sup>, 张金团<sup>1,3,\*</sup>, 罗元铭<sup>2</sup>

1. 广州南洋理工职业学院, 广东 广州, 510000

2. 桂林理工大学, 土木工程学院, 广西 桂林, 541004

3. 贺州学院, 广西 贺州, 542899

**摘要:** 粉煤灰作为工业废弃物于 20 世纪 40 年代首次应用于混凝土中。目前, 粉煤灰混凝土在道路、桥梁、大坝等实际工程中广泛应用, 是工程性能优化的关键材料之一。同时, 是在低碳的国家政策背景下兼顾环境保护和减少碳排放的重要建筑材料之一。本文结合现有研究文献, 针对粉煤灰对混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能的影响进行归纳分析。主要综述了粉煤灰的细度和掺入方式对混凝土的基本工作性能、力学性能和干缩性能影响, 并进一步对抗碳化性能、抗氯离子侵蚀性能、抗冻性能等耐久性能进行分析和总结。最后, 结合目前粉煤灰在混凝土中的使用研究现状, 进一步为其在工程中的更广泛使用提供指导性建议和方向。通过分析总结发现, 粉煤灰对混凝土性能的影响和其细度、掺入方式等因素密切相关。通过细度和配比优化, 粉煤灰在改善混凝土工作性能、力学性能和耐久性能方面凸显重要作用。

**关键词:** 粉煤灰; 混凝土; 工作性能; 力学性能; 耐久性能

## Review of the Impact of Fly Ash on Concrete

Guimeng Ban<sup>1,2</sup>, Xing Zheng<sup>3</sup>, Hu Qin<sup>3</sup>, Enhao Luo<sup>3</sup>, Jintuan Zhang<sup>1,3,\*</sup>, Yuanming Luo<sup>2</sup>

1. Guangzhou Nanyang Polytechnic College, Guangzhou 510000, China

2. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3. Hezhou University, Hezhou 542899, China

**Abstract:** Fly ash was first utilized in concrete in the 1940s as an industrial byproduct. Currently, fly ash concrete is widely applied in practical engineering projects such as roads, bridges, and dams, and has become one of the key materials for enhancing engineering performance. Moreover, it serves as a crucial building material that supports environmental protection and reduces carbon emissions, aligning with national low-carbon policies. This paper reviews and synthesizes existing research on the impact of fly ash on the workability, mechanical properties, and durability of concrete. Specifically, it examines the effects of fly ash fineness and incorporation methods on the fundamental workability, mechanical properties, and shrinkage characteristics of concrete. Additionally, the paper discusses the influence of fly ash on durability aspects such as carbonation resistance, chloride ion corrosion resistance, and freeze-thaw resistance. Finally, based on the current state of research, the paper offers further guidance and direction for the broader application of fly ash in engineering. The analysis reveals that the effect of fly ash on concrete performance is closely linked to factors like its fineness and incorporation method. By optimizing the fineness and mix proportions, fly ash significantly enhances the workability, mechanical properties, and durability of concrete.

**Keywords:** Fly ash; Concrete; Workability; Mechanical properties; Durability

混凝土作为常用的建筑材料，其主要成分之一为水泥，而水泥的生产依赖大量的化石燃料，不仅产生了全球约 7% 的  $\text{CO}_2$  排放量<sup>[1]</sup>，还造成了环境污染加剧。对此，粉煤灰是燃煤电厂产生的典型工业固体废弃物，其全球年产量逾 7 亿吨<sup>[2]</sup>，长期露天堆存不仅侵占土地资源，更易引发扬尘、重金属渗滤及地下水污染等环境问题。自 20 世纪 40 年代起美国首次大规模使用粉煤灰混凝土，用于修复胡佛水坝，而后成为了工程建设关键材料<sup>[3]</sup>。因此，以粉煤灰替代水泥制备混凝土，既能消纳工业固废，又能降低水泥生产的能耗和成本，从而在环保和经济效益方面产生积极影响<sup>[4-5]</sup>，它也将成为解决水泥和粉煤灰行业发展中的问题，实现可持续发展的关键途径之一。

粉煤灰的掺入会显著影响混凝土的微观结构，进而改变其工作性能、力学性能和耐久性能。细度及不同掺入方式也会对混凝土性能影响造成差异。目前，粉煤灰在混凝土中的掺入方式主要分为两种：一是外掺取代部分细骨料；二是内掺作为矿物掺合料取代部分水泥。

粉煤灰在水泥基材料中的作用可归结为形态效应、活性效应、微集料效应和减水效应<sup>[6-9]</sup>。形态效应是指粉煤灰颗粒大多为表面光滑的球形微粒，粒径较细，能够优化颗粒级配，改善混凝土的微观结构。活性效应是指粉煤灰中含有大量的硅铝酸盐活性组分，这些活性成分能够与水泥水化产生的氢氧化钙发生二次水化反应，生成水化硅酸钙和水化铝酸钙等产物，从而提升混凝土的抗压强度、抗拉强度和抗弯拉强度。微集料效应体现为粉煤灰细颗粒对混凝土孔结构的填充改善，不仅提高密实度，增强抗渗性能，同时减少自由水，改善保水性和黏聚性。减水效应源于粉煤灰颗粒的润滑作用，可改变混凝土拌合物的流变性质，减少用水量，提高流动性。

当前，粉煤灰混凝土因其卓越的性能和显著的经济效益，在工程应用中展现出广阔前景，已成为国内外研究的热点领域<sup>[10-17]</sup>。

## 1 粉煤灰对混凝土工作性能影响

### 1.1 粉煤灰细度对混凝土工作性能影响

超细粉煤灰在混凝土中的应用已被多项研究所探讨，研究结果显示其在改善混凝土性能方面具有重要潜力。Ma 等人<sup>[18]</sup>的研究表明，粉煤灰的颗粒形态对流动性有显著影响，尤其是超细粉煤灰。图 1 的粉煤灰 SEM 图表明其颗粒特性在扫描电镜下显示呈球形微珠状占比较高。细小颗粒能够填充水泥颗粒之间的空隙，增加浆体的密度，从而提高流动性。Maeijer 等人<sup>[19]</sup>研究发现，使用  $d_{90} < 4.6 \mu\text{m}$ （即 90% 的颗粒粒径小于 4.6 微米）相比于  $d_{90} < 9.3 \mu\text{m}$  的超细粉煤灰掺入混凝土中使减水剂用量减少，同时相对于基准混凝土的塌落度提升了 58%。这是由于超细颗粒粉煤灰填充了水泥颗粒间隙，释放被束缚的自由水，其球形微粒降低了内摩擦阻力。与此相似，Ravina<sup>[20]</sup>等人的研究也表明，掺入 35%~50% 水泥用量的超细粉煤灰时，其可以分散水泥絮凝结构，释放自由水，这使得混凝土需水量减少 5%~10%。

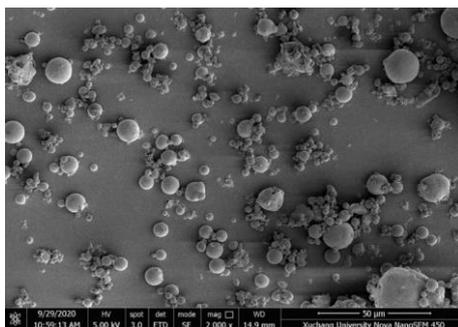


图 1 粉煤灰 SEM 图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Scanning Electron Microscopy (SEM) image of fly ash<sup>[18]</sup>

然而,王玉斌<sup>[21]</sup>等人研究则得出了不同的结论,该研究发现,掺入比表面积 674~1126 m<sup>2</sup>/kg 的超细粉煤灰使混凝土塌落度提升约 4%,但需水量比较原状粉煤灰相比增长了 6%。其原因是细粉煤灰颗粒会因填充效应而释放自由水,但其高比表面积会导致需更多水分润湿表面,导致需水量增加。在粉煤灰的研究中,Reddy 等人<sup>[22]</sup>通过固定石墨烯氧化物掺量与不同粉煤灰替代比设计混凝土,测试塌落度,发现固定石墨烯氧化物的高比表面积会吸附大量自由水,而粉煤灰的能够填充水泥颗粒间的空隙,改善体系的颗粒级配,减少孔隙率,释放被石墨烯氧化物吸附的自由水分。

不同含量细度的粉煤灰对混凝土的流动性影响也有显著差异。图 2 展示了郭辉<sup>[23]</sup>研究不同含量细度下粉煤灰对混凝土塌落度的影响。可以发现随着小于 0.075mm 含量的粉煤灰细度的不断增加,混凝土的塌落度呈现出先增后减的趋势。在细度初期含量提升时,球形玻璃态颗粒的形态效应得以增强,显著改善了混凝土的流动性,导致塌落度由 40 mm 提升至 55 mm。然而,当粉煤灰的细度过高时,其比表面积急剧增大,进而导致在固定水量条件下,浆体变得干涩,从而影响混凝土的流动性。Wu<sup>[24]</sup>研究发现,均粒径为 18.8 μm 的粉煤灰使砂浆流动扩展值提升了约 15.7%,而均粒径为 2.8 μm 的超细粉煤灰则提升了约 37.6%。

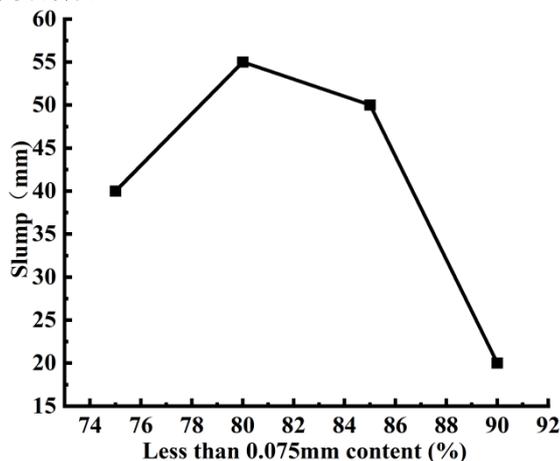


图 2 不同含量细度粉煤灰对混凝土塌落度影响<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Influence of different fly ash contents on the slump of concrete<sup>[23]</sup>

## 1.2 粉煤灰掺入方式对混凝土工作性能影响

粉煤灰的掺入方式主要包括内掺,外掺和与其他矿物掺合料复合掺入。聚焦掺入方式对流动性的差异化影响,不同学者通过多角度研究揭示了其关键规律。图 3 展示了研究文献中的不同粉煤灰掺入方式对混凝土塌落度的影响<sup>[25, 26]</sup>。从图上看无论是内掺还是外掺,粉煤灰掺量对于塌落度影响都是呈现先增后降的趋势,但是粉煤灰内掺取代水泥时,塌落度在 20% 达到峰值,当对于外掺取代细骨料时,塌落度在 30% 达到峰值,外掺粉煤灰取代率远高于内掺水泥对混凝土塌落度峰值的影响,并且在 15%~30% 的掺量下,外掺粉煤灰混凝土的塌落度都优于内掺。这是因为外掺粉煤灰取代砂,本身具有粗糙、吸水的特性,而粉煤灰颗粒光滑,能填入砂子的空隙,释放出自由水;内掺时因粉煤灰比水泥更细,掺入后颗粒总表面积变大,导致需水量增大,而水泥含量又相对减少,导致早期水化反应变慢,浆体变黏,流动性变差<sup>[27-28]</sup>。余斌等人<sup>[29]</sup>研究了粉煤灰对再生粗集料混凝土的流动性。他们发现内掺粉煤灰时,在 20% 和 40% 掺量下混凝土塌落度相对基准组不断下降,外掺粉煤灰时,在 30% 掺量下相对基准组混凝土塌落度下降,但在 50% 掺量下混凝土塌落度提升。

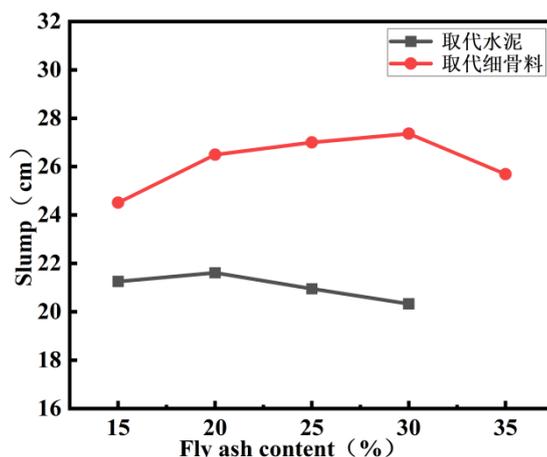


图 3 不同掺入方式等量粉煤灰对混凝土塌落度影响<sup>[25, 26]</sup>

Fig. 3 Effect of different incorporation methods of equal amounts of fly ash on concrete slump<sup>[25, 26]</sup>

王力久等人<sup>[30]</sup>对比研究了粉煤灰和矿渣对混凝土工作性能的影响,发现矿渣对混凝土塌落度损失的影响大于粉煤灰。具体而言,矿渣在相同掺量下比粉煤灰更显著地降低了塌落度,因其较高的需水量和快速水化反应导致流动性丧失更快,而粉煤灰凭借球形颗粒和慢反应特性保持了较好的流动性。Wang 等人<sup>[31]</sup>研究探讨了粉煤灰与矿渣复合掺入对自密实砂浆工作性能的影响。结果表明,粉煤灰的球形颗粒通过润滑作用显著降低骨料间摩擦,15%–30%的粉煤灰替代率使砂浆流动度提升9%–40%。当矿渣替代率为25%–50%时,30%粉煤灰与1.2%聚羧酸高效减水剂协同作用可达最优平衡流动性与稳定性。对比分析王力久等人<sup>[30]</sup>可以发现,矿渣和粉煤灰复掺可明显改善单掺矿渣时混凝土流动性。Mehta 等人<sup>[32]</sup>得到了相似的结论,矿渣和粉煤灰复掺可改善混凝土和易性,增大混凝土流动度,减少塌落度和扩展度损失,并且通过防止混凝土中的粗骨料和水泥浆分层改进混凝土的抗离析性,确保混凝土的均匀性。

综上所述,粉煤灰对混凝土工作性能的影响已受到广泛关注,当前研究主要集中在粉煤灰细度和掺入方式对混凝土工作性能的影响。超细粉煤灰通过填充和润滑作用改善流动性,但需水量可能增加;不同粒径粉煤灰对流动性的影响差异显著,超细粉煤灰的填充和润滑效应优于大粒径粉煤灰。外掺粉煤灰可提升流动性,而内掺则可能导致需水量增大。然而,对于粉煤灰与其他矿物掺合料复合掺入时的协同作用机制分析较少,特别是其在不同环境条件下对混凝土工作性能的长期影响更是鲜有提及,有待于进一步的研究。

## 2 粉煤灰对混凝土力学性能影响

### 2.1 粉煤灰细度对混凝土力学性能影响

Maeijer 等人<sup>[19]</sup>发现,使用25%超细粉煤灰替代水泥时,28 d 抗压强度与基准组基本持平,更为重要的是91 d 抗压强度相较于基准组提升约7.8%,这一趋势表明超细粉煤灰不仅能保持混凝土早期强度,还能促进后期强度持续发展。相比之下,朱星等人<sup>[26]</sup>的研究表明,当采用普通粉煤灰替代水泥时,粉煤灰替代率为30%的混凝土其28 d 抗压强度为与基准组相比,仅达到基准强度的74.2%。其机制差异在于普通粉煤灰早期活性较低,主要发挥物理填充作用,稀释了水泥水化产物,导致早期强度下降。进一步地,王群等人<sup>[33]</sup>分析了超细粉煤灰粒径和掺量对混凝土抗压强度、劈裂强度的影响,研究结果表明,使用3.4 μm 超细粉煤灰以30%掺量掺入混凝土时,微珠填充效应和级配优化显著提升了混凝土的密实性。此时,60 d 抗压强度达到最优值较基准组提高约15%,劈裂抗拉强度较基准组提高约107%。这是由于细粒径增加反应接触面积,加速二次水化,提升了胶凝效率和强度。

图 4 展示了不同比表面积的粉煤灰对混凝土 28 d 抗压强度的影响。Yazici 等人<sup>[34]</sup>将比表面积分别为 2351、3849、5239  $\text{cm}^2/\text{g}$  的三种不同细度粉煤灰以不同掺量掺入混凝土中,发现当粉煤灰比表面积达到 5239  $\text{cm}^2/\text{g}$  且掺量为 5% 时,混凝土的抗压强度最佳。而 Akmalaiuly 等人<sup>[35]</sup>利用机械活化技术处理比表面积从 3710  $\text{cm}^2/\text{g}$  提升至 6450  $\text{cm}^2/\text{g}$ ,使其颗粒形貌棱角化,释放深层活性,掺量在 10% 的时候混凝土强度最优。

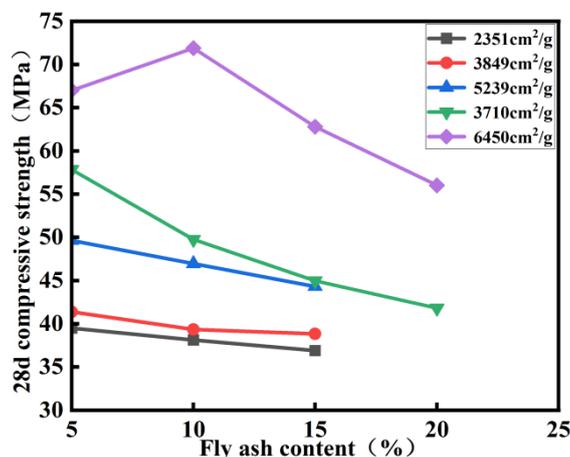


图 4 不同比表面积粉煤灰对混凝土强度影响<sup>[34, 35]</sup>

Fig. 4 Effect of fly ash with varying specific surface areas on the strength of concrete<sup>[34, 35]</sup>

值得注意的是,Haustein 等人<sup>[36]</sup>使用粒径小于 200  $\mu\text{m}$  的粉煤灰替代 1.3% 的水泥,发现在 90 d 时混凝土的抗压强度提高 11.8%。在扫描电子显微镜下分析显示,针对粒径较小的粉煤灰微珠(如图 5 a 所示),水泥水化产物在颗粒表面形成了更为紧密的覆盖层,并与周围的凝胶结构结合,显著减少了内部的空隙。而对于粒径较大的粉煤灰微珠(见图 5 b),由于其水化反应较为缓慢,因此在其内部结构中存在较多的孔隙。对比朱星等人<sup>[26]</sup>,两者虽研究方法不同,但在细度对力学性能影响的认识上相呼应,粉煤灰细度对其活性与填充增强效果具有益,粒径越小,填充与活性效果越显著,混凝土强度提升越明显。

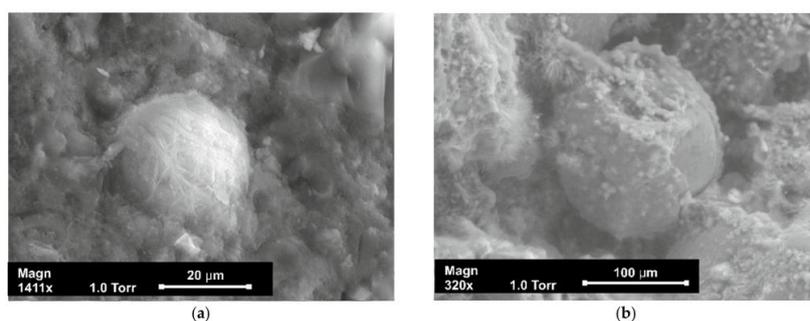


图 5 粉煤灰混凝土的内部间隙微观图像<sup>[36]</sup>

Fig. 5 Microscopic image of internal porosity in fly ash concrete<sup>[36]</sup>

## 2.2 粉煤灰掺入方式对混凝土力学性能影响

现有研究表明,不同的粉煤灰掺入方式对混凝土的力学性能影响表现出差异。图 6 展示了粉煤灰不同掺入方式对混凝土 28 d 抗压强度的影响<sup>[37-42]</sup>。从图上看粉煤灰内掺混凝土时,抗压强度随着掺量增加而显著下降;对于粉煤灰外掺混凝土时,抗压强度在合适的掺量范围内会随着掺量的增加而增大,但超出一定的掺量时可能会引起强度的下降。对于内掺粉煤灰来说,这是因为粉煤灰的水

化反应较慢,尤其在早期阶段,其水化程度低,导致单位体积混凝土中水化产物减少,从而影响抗压强度的增长;对于外掺粉煤灰来说,粉煤灰的微细颗粒能够填充骨料之间的空隙,提高混凝土的密实性,从而提升抗压强度<sup>[43,44]</sup>。胡玉珊等人<sup>[45]</sup>在研究中发现,粉煤灰的掺入方式对再生混凝土的抗压强度有显著影响。其研究表明,粉煤灰内掺会导致再生混凝土抗压强度明显降低,相比之下,粉煤灰外掺法是最有效的掺入方式,用粉煤灰代替 30%的砂可使再生混凝土抗压强度提高 20%。这是由于外掺法可通过优化骨料级配提升密实度,而内掺法因胶凝材料活性降低导致水化反应不充分。对比文献<sup>[25,28]</sup>可见,粉煤灰外掺法在兼顾工作性能与后期强度方面呈现出协同增效的优势,为粉煤灰混凝土的工程应用提供了更加可靠的工艺路径。

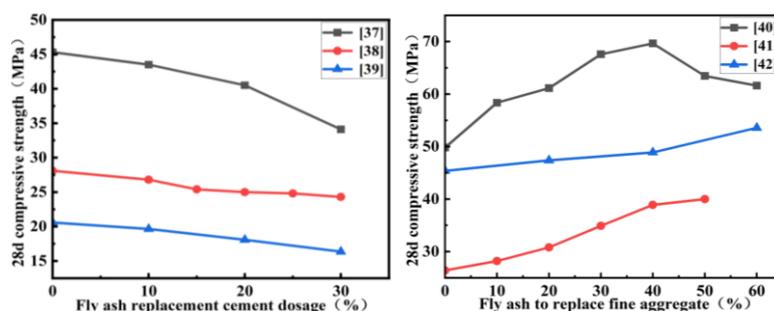


图 6 粉煤灰不同掺入方式对混凝土强度影响<sup>[37-42]</sup>

Fig. 6 Effects of different fly ash incorporation methods on concrete strength<sup>[37-42]</sup>

值得注意的是,粉煤灰在单掺体系与复掺体系存在显著性能差异。Qu 等人<sup>[46]</sup>的研究表明,单掺粉煤灰或单掺矿渣的混凝土发现早期强度普遍降低,当 28 d 时掺粉煤灰的混凝土抗压强度接近基准组混凝土,而掺矿渣的混凝土 28 d 抗压强度反而较基准混凝土更高。刘华<sup>[47]</sup>在研究时发现,同时掺入粉煤灰和矿渣的混凝土抗压强度高于单掺的混凝土,且在后期强度增长上表现更为显著。这可能与粉煤灰和矿渣之间的协同作用有关,矿渣能够提高粉煤灰的活性,促进早期化学反应,同时粉煤灰的火山灰效应也能进一步增强混凝土的后期强度发展。张鸣等人<sup>[48]</sup>的研究发现,粉煤灰和矿渣复掺时,混凝土的早期抗压强度显著优于单掺粉煤灰或矿渣粉,这是由于二者通过复掺降低孔隙率,提高密实度,从而提升了早期与后期的强度性能。在此基础上,任付学<sup>[49]</sup>试验发现,在固定粉煤灰掺量下,矿渣掺量增加使 28 d 抗压强度先升后降,存在最佳掺量;与之相反,当矿渣掺量固定时,粉煤灰掺量增加则持续降低强度。据此,他提出配合比计算公式,试配出 C30 混凝土(水泥 184 kg/m<sup>3</sup>,粉煤灰与矿渣各 60 kg/m<sup>3</sup>,塌落度 180 mm),将理论应用于实践,为粉煤灰和矿渣复掺混凝土设计提供了依据。

Uzbaş 等人<sup>[50]</sup>的研究了粉煤灰掺量为 5%、10%、15%和 20%的条件下混凝土的 7、28、90 d 抗压强度,发现在三个龄期条件下,粉煤灰掺入初期降低混凝土抗压强度,但后期显著提升强度,尤其是 10%掺量时效果最佳。作者通过扫描电镜分析出现其原因,由于粉煤灰通过填充孔隙、促进火山灰反应生成水化硅酸钙、减少氢氧化钙含量,改善了微观结构,从而增强了混凝土的抗压强度。与上述结论不同的是,胡玉珊等人<sup>[45]</sup>认为粉煤灰内掺会导致再生混凝土抗压强度明显降低的结论不同,其原因可能有两方面:一是粉煤灰对普通混凝土和再生混凝土增益效果的区别。二是骨料级配的影响,粉煤灰内掺后的骨料的级配可能没有得到优化,导致混凝土内部孔隙率增加,抗压强度下降。

综上所述,等量粉煤灰对混凝土力学性能的影响研究主要集中于粉煤灰细度和掺入方式两个方

面。研究表明,超细粉煤灰能够通过填充效应和火山灰反应显著提升混凝土的后期强度,而普通粉煤灰则可能因活性较低导致早期强度下降。此外,粉煤灰的掺入方式对混凝土力学性能也有显著影响,外掺法相比内掺法更能有效提升混凝土的抗压强度。值得注意的是,粉煤灰与矿渣等其他矿物掺合料复掺时,往往能发挥协同作用,弥补单掺粉煤灰对早期强度的不利影响,显著提升混凝土的综合力学性能。因此,粉煤灰与其他矿物掺合料复掺是当前及未来混凝土性能研究的重要方向。

### 3 粉煤灰对混凝土耐久性能影响

#### 3.1 粉煤灰对混凝土干缩性能的影响

Chindaprasirt 等人<sup>[51]</sup>的研究发现,粉煤灰的细度对其在砂浆中的干燥收缩性能具有显著影响。研究表明,粉煤灰的掺入可以有效降低砂浆的干燥收缩,尤其是细粉煤灰的掺入,降低率最高达 28.2%,其效果最为显著。这是因为粉煤灰的加入降低了砂浆的水胶比,减少了水分的蒸发。然而,粗粉煤灰的干燥收缩降低效果相对较差,仅降低 13.7%,主要由于其较大的颗粒表面和不规则形状,导致较高的水胶比,从而增加了水分含量。Saha 等人<sup>[52]</sup>的研究也得出了类似的结论,粉煤灰颗粒的细度和球形结构不仅提高了混凝土的密实度,还减少了毛细孔隙的生成,从而进一步降低了干缩效应。这是由于粉煤灰的掺入通过降低水化反应速率,减少氢氧化钙的生成,进而减缓水分蒸发,抑制了干缩的发生。进一步地,Nath 等人<sup>[53]</sup>研究了调整水胶比和总胶凝材料含量下的高掺量粉煤灰对混凝土干缩性能的影响,如图 7 a 所示,为原配比下不同掺量粉煤灰随着龄期的增长对混凝土干燥收缩的影响,图 7 b 为优化配比后的对比结果。可以看出在未调整配合比时使用 40% 的粉煤灰高掺量会导致干缩应变显著恶化,尤其在前期干缩增速最快;而对于优化配比后的干缩显著降低,前期和后期的干缩率也相对较低。

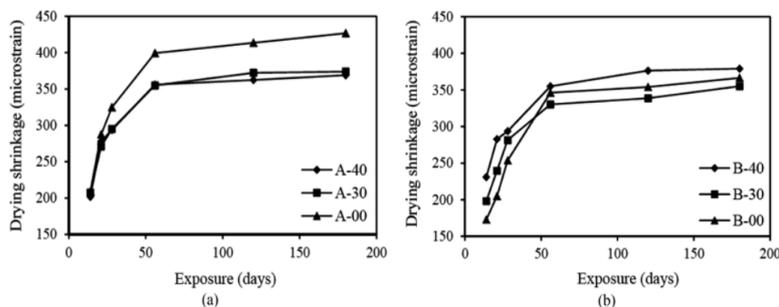


图 7 粉煤灰对混凝土干燥收缩影响<sup>[53]</sup>

Fig. 7 Effect of fly ash on drying shrinkage of concrete<sup>[53]</sup>

在此基础上,Klemczak 等人<sup>[54]</sup>的研究进一步研究了高掺量粉煤灰和矿渣复掺对自密实混凝土干缩性能的显著影响。研究结果表明,掺入高比例粉煤灰和矿渣可以显著降低混凝土的干缩性,主要原因在于这些掺合料能够改善水泥水化过程,减少水化热的释放,并细化混凝土的孔隙结构,从而提高混凝土的抗裂性和稳定性。Khatib 和 Altoubat 等人<sup>[55,56]</sup>取得了与之相似的结论。此外,Wang 等人<sup>[57]</sup>研究发现当粉煤灰、矿渣粉和钢渣粉按 1:1:2 的比例混合时,混凝土的干缩率最小。这是由于复合矿物掺合料可以通过调整颗粒级配,改善混凝土的孔隙结构,减少毛细孔的连通性,从而降低干缩率。复合矿物掺合料的协同作用可以提高混凝土的早期强度,同时在后期通过粉煤灰的水化作用进一步填充内部孔隙,减少自由水的蒸发,从而降低干缩率。

#### 3.2 粉煤灰对混凝土抗碳化性能影响

Khunthongkeaw 等人<sup>[58]</sup>发现粉煤灰掺量与混凝土抗碳化能力的有关,如图 8 所示各类型粉煤灰在 0%~30% 低掺量的混凝土表现出的碳化系数增长较为平稳,随着 30%~50% 的高掺量下碳化系数迅

速增长。这可能是粉煤灰掺入过量时, 可能导致水胶比增加, 混凝土的孔隙率增大, 从而降低抗碳化性能。薛鲁阳等人<sup>[59]</sup>得出了相似的结论, 随着粉煤灰掺量高达 35% 时, 混凝土各龄期碳化深度增大, 抗碳化能力减弱。李兆恒等人<sup>[60]</sup>发现在高  $\text{CO}_2$  浓度、高温和中等湿度环境下, 粉煤灰的抗碳化效果会受到一定限制。Feng 等人<sup>[61]</sup>发现当粉煤灰与矿渣的质量比为 1:1 时, 混凝土的碳化深度最浅, 抗碳化性能最佳。双掺粉煤灰和矿渣对工程地质聚合物混凝土的抗碳化能力有积极的影响。通过改善混凝土的微观结构和增强其密实性, 从而提高抗碳化性能。Das 等人<sup>[62]</sup>研究表明, 粉煤灰的细度越高, 混凝土的抗碳化能力越强。这是由于细度更高的粉煤灰颗粒较小, 能够更有效地填充混凝土中的毛细孔隙。这显著提高了混凝土的密实度, 降低了孔隙率, 从而减少了二氧化碳向混凝土内部的扩散路径, 减缓了碳化进程。

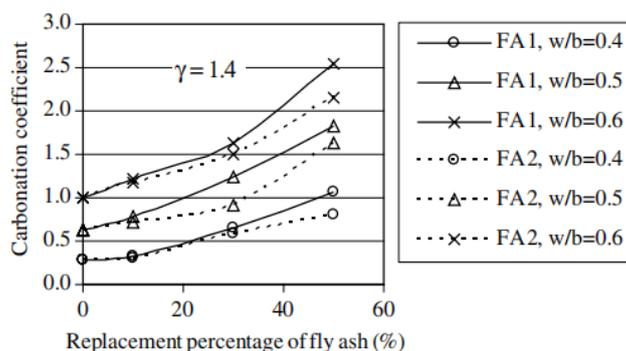


图 8 粉煤灰对混凝土抗碳化性能影响<sup>[58]</sup>

Fig. 8 Effect of fly ash on the carbonation resistance of concrete<sup>[58]</sup>

### 3.3 粉煤灰对混凝土抗氯离子渗透性能影响

Saha 等人<sup>[52]</sup>指出, 20%-30% 的粉煤灰掺量可以提高混凝土抗氯离子渗透性能, 超过此范围可能因早期强度不足和孔隙结构变化导致渗透性能下降。Wang 等人<sup>[63]</sup>研究发现粉煤灰掺量在 10% 和 20% 的混凝土 (CF10、CF20) 如图 9 所示, 电荷通过量显著低于纯水泥混凝土 (CF0), 抗氯离子渗透性能显著提升。郭自利等人<sup>[64]</sup>研究发现, 单掺粉煤灰的混凝土抗氯离子渗透性能与养护龄期密切相关。初期混凝土的抗氯离子渗透性能下降, 随后回升。在高掺量粉煤灰和长养护期下, 混凝土抗氯离子渗透性能改善更为显著。这是由于粉煤灰水化反应较慢, 其火山灰活性效应需要更长时间才能显现。何林海等人<sup>[65]</sup>研究发现, 粉煤灰和矿粉复掺可以提高混凝土抗氯离子渗透性能。复掺材料通过填充效应和火山灰效应提高了混凝土的密实性, 从而增强了抗渗性能。Wang 等人<sup>[66]</sup>得出相似结论, 认为粉煤灰和矿渣粉复掺显著提高了混凝土的抗氯离子渗透性能, 尤其在粉煤灰和矿渣粉各掺入 25% 和较长养护时间下, 氯离子迁移系数最低。

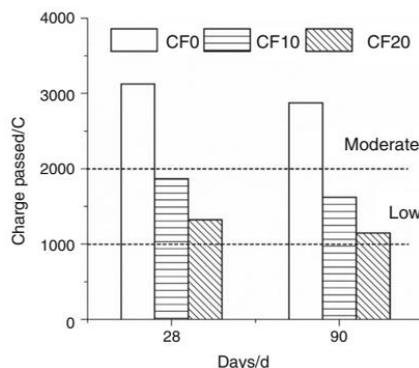


图 9 粉煤灰对混凝土抗氯离子渗透性能影响<sup>[63]</sup>

Fig. 9 Effect of fly ash on concrete's resistance to chloride ion penetration<sup>[63]</sup>

### 3.4 粉煤灰对混凝土抗冻性能影响

王苏然等人<sup>[67]</sup>研究发现,粉煤灰掺量为 10%~20%时,可显著提升混凝土抗冻性,这是由于粉煤灰通过孔隙填充与火山灰反应生成水化硅酸钙凝胶优化微观结构,抑制冻融循环中的冰晶膨胀破坏及水分渗透路径。李三等人<sup>[68]</sup>研究发现在单掺条件下,钢渣、矿渣和粉煤灰均能提升地聚合物混凝土抗冻性,如图 10 所示,展示了基准组(P)及掺入粉煤灰(F)、钢渣(G)、矿渣(K)的地聚合物混凝土在冻融循环中的剥蚀量变化。其中基准组剥蚀量最大,钢渣和矿渣组的抗冻性能显著优于粉煤灰组。秦力等人<sup>[69]</sup>通过改变粉煤灰和矿渣的复掺量,探究了其对混凝土抗冻性的影响。当保持掺合料总量不变时,随着粉煤灰掺量减少和矿渣掺量增加,混凝土的抗冻性能逐渐降低,表现为冻融循环后质量损失率增大和相对动弹性模量下降幅度增加;而掺合料总量从 40%增至 50%时,混凝土的抗冻性整体提升,这得益于二次水化产物增多形成的更致密凝胶结构。刘清等人<sup>[70]</sup>研究发现当矿粉掺量为 30%、粉煤灰掺量为 10%时,自密实混凝土的抗冻性能最佳。

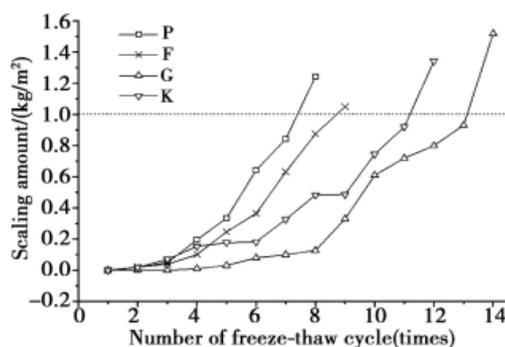


图 10 不同矿物掺合料对混凝土抗冻性能影响<sup>[68]</sup>

Fig. 10 Effects of different mineral admixtures on frost resistance of concrete<sup>[68]</sup>

综上所述,粉煤灰作为一种高效矿物掺合料,在改善混凝土耐久性能方面展现出多重优势:通过细度和配比优化,可显著抑制干缩和氯离子渗透,合理掺量下也有助于提升抗碳化、抗冻融性能。然而,不同掺量、粒径及复合体系所带来的早期与长期性能差异,提示我们在实际应用中需综合考虑养护条件、环境暴露类型和工程需求,才能实现最佳的经济与生态效益。未来研究应进一步量化各类二次水化反应产物在孔隙结构演变中的作用机理,并结合现场大体积结构的长期监测数据,构建更加精确的粉煤灰混凝土耐久性预测模型,从而为粉煤灰在工程中的更广泛使用提供理论技术支持。

## 4 结论与展望

本文分析了粉煤灰在混凝土中的应用现状,进一步探究了粉煤灰细度及掺入方式对混凝土工作性能、力学性能、耐久性能的影响,并进行了系统综述和分析。得到如下结论:

(1) 粉煤灰对混凝土的工作性能产生显著影响。在同等掺量下,随着细度的增加,混凝土坍落度呈现先增后减的趋势。对于不同掺入方式而言,在同等掺量下,外掺粉煤灰显著提升混凝土流动性和稳定性,内掺粉煤灰增加混凝土需水量并降低早期流动性,粉煤灰和矿渣等其他掺合料复合掺加通过协同作用显著优化工混凝土作性能;

(2) 不同粒径、掺入方式的粉煤灰对混凝土的力学性能影响不同。在同等掺量下,随着粒径增加,混凝土力学性能显著下降。同时,外掺粉煤灰显著提升混凝土抗压强度,内掺粉煤灰因早期活性低导致混凝土强度降低。多种矿物掺合料和粉煤灰复合掺加下,对混凝土抗压强度的提升效果显

著高于单独掺加粉煤灰体系;

(3) 通过细度和配比优化, 适量粉煤灰的使用显著提升混凝土耐久性, 包括干缩性能、抗碳化性能、氯离子渗透性能和抗冻性能。主要表现为降低混凝土干燥收缩率, 碳化系数, 减少氯离子渗透系数, 改善冻融循环下的剥蚀量变化。

综上, 尽管针对粉煤灰在混凝土材料中的应用已开展诸多相关研究, 并形成了部分共识。但由于粉煤灰细度、掺量、掺入方式及环境条件等多因素的复合影响, 其对混凝土性能的影响机理和规律仍需探究和完善。为进一步推动粉煤灰的规模化、标准化使用, 粉煤灰与其他矿物掺合料的协同作用机制需要进一步的深入研究, 特别是协同作用下在不同环境中的混凝土长期服役性能研究, 以为工程应用提供更可靠的理论和技术支持。粉煤灰的大规模应用有助于改善混凝土的工作和服役性能并积极推动低碳建材发展。未来研究应聚焦其微观反应机制, 开发多源固废复掺体系, 实现粉煤灰基多种类固废协同掺合料的性能优化与资源循环利用。

## 参考文献

- [1] 刘玉花. 智能技术在绿色建筑施工中的应用[J]. 工程与建设, 2024, 38(04): 936-937.
- [2] 汪喜和, 王诗元, 花超, 等. 矿物废渣碳化封存 CO<sub>2</sub> 研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(4): 1-32.
- [3] 孟上九, 张华瑞, 王淼, 等. 吹填砂粉煤灰复合土力学特性试验[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(01): 132-138.
- [4] 赵志发, 胡勇, 许束光. 火电厂灰分选效率与环境保护的平衡研究[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(01): 66-68.
- [5] 曹馨, 吴明暄, 刘畅, 等. 基于复杂系统优化的京津冀产业共生空间化管理与效益评估[J]. 管理科学学报, 2025, 28(04): 32-46.
- [6] 顾炳伟, 王景正, 龚致远, 等. 超高性能混凝土早期收缩性能的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(02): 11-17.
- [7] 张保伟. 粉煤灰与剑麻纤维复合对膨胀土物理力学特性的影响研究[J]. 当代化工, 2024, 53(12): 2827-2830.
- [8] 崔宏瑞, 孟祥瑞, 程详, 等. 水玻璃-膨胀剂-粉煤灰水泥基复合注浆材料研发与试验[J]. 中国矿业, 1-11.
- [9] 闫瑞, 田承宇. 碾压混凝土中粉煤灰的极限掺量性能研究[J]. 湖南水利水电, 2024, (06): 31-34.
- [10] Chandio S A, Memon B A, Oad M, et al. Effect of fly ash on the compressive strength of green concrete[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2020, 10(3): 5728-5731.
- [11] Lizcano-Cabeza J A, Ávila-Ascanio L F, Rós-Reyes C A, et al. Effect of the fusion and aging process in the synthesis of zeotypes from fly ash[J]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2015 (74): 213-225.
- [12] Czop M, Łażniewska-Piekarczyk B, Kajda-Szcześniak M. Evaluation of the immobilization of fly ash from the incineration of municipal waste in cement mortar incorporating nanomaterials—a case study[J]. Energies, 2022, 15(23): 9050.
- [13] Prakash R, Thenmozhi R, Raman S N, et al. Fibre reinforced concrete containing waste coconut shell aggregate, fly ash and polypropylene fibre[J]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2020 (94): 33-42.
- [14] Sun J, Shen X, Tan G, et al. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136: 565-580.
- [15] Muthaiyan U M, Thirumalai S. Studies on the properties of pervious fly ash-cement concrete as a pavement material[J]. Cogent Engineering, 2017, 4(1): 1318802.
- [16] Khan I, Castel A, Gilbert R I. Effects of Fly Ash on Early-Age Properties and Cracking of Concrete[J]. ACI Materials Journal, 2017, 114(4): 673-681.
- [17] Bach D T, Hoang V L, Nguyen N B. Pelletized fly ash aggregates use for making eco-friendly concrete[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 869(3): 032028.
- [18] Ma J, Zhang H, Wang D, et al. Rheological properties of cement paste containing ground fly ash based on particle morphology analysis[J]. Crystals, 2022, 12(4): 524.
- [19] De Maeijer P K, Craeye B, Snellings R, et al. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120493.
- [20] Ravina D, Mehta P K. Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 1986, 16(2): 227-238.

- [21] 王玉斌, 尹韶宁, 潘 栋, 等. 超细粉煤灰特性及其在混凝土中的应用研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (04): 96-100.
- [22] Reddy P, Prasad D R. Synergetic Effect of Graphene Oxide and Fly Ash on Workability, Mechanical and Microstructural Properties of High-strength Concrete[J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2022, 16(3).
- [23] 郭辉. 粉煤灰细度对水泥混凝土性能影响研究[J]. 山东工业技术, 2017, (12): 101-102.
- [24] Li G, Wu X. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(6): 1128-1134.
- [25] Yin S, Yan Z, Chen X, et al. Effect of fly-ash as fine aggregate on the workability and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16.
- [26] 朱 星, 姜荣斌, 肖乐平, 等. 粉煤灰掺比对砂浆混凝土性能影响及硬化机理研究[J]. 粘接, 2025, 52(1): 71-73+81.
- [27] 吴 辩. 农村公路水泥混凝土路面日常养护研究[J]. 运输经理世界, 2022, (36): 132-134.
- [28] 杨元林. 高速公路混凝土掺用粉煤灰技术研究[J]. 云南水力发电, 2024, 40 (S1): 52-57.
- [29] 余 斌, 熊进刚, 扶名福, 等. 粉煤灰再生粗集料混凝土基本性能研究[J]. 混凝土, 2008(9): 67-69.
- [30] 王立久, 董晶亮, 谷 鑫. 不同矿物掺合料对混凝土早期强度和工作性能影响的研究[J]. 混凝土, 2013(4): 1-3.
- [31] Wang Y, Liu Z, Takasu K, et al. A study on the workability of self-compacting mortar with blast furnace slag as sand replacement supplemented by fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2025, 465: 140252.
- [32] Mehta A, Siddique R, Ozbakkaloglu T, et al. Fly ash and ground granulated blast furnace slag-based alkali-activated concrete: Mechanical, transport and microstructural properties[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119548.
- [33] 王 群, 关宏洁, 严心娥. 超细粉煤灰粒径和掺量对混凝土力学性能的影响研究[J]. 粉煤灰综合用, 2018(5): 50-53.
- [34] ŞEMSI YAZICI, HASAN ŞAHAN AREL. Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete[J]. Sadhana: Academy Proceedings in Engineering Science, 2012, 37(3): 389-403.
- [35] Akmalaiuly K, Berdikul N, Pundienė I, et al. The effect of mechanical activation of fly ash on cement-based materials hydration and hardened state properties[J]. Materials, 2023, 16(8): 2959.
- [36] Hausteina E, Kuryłowicz-Cudowska Aleksandra. Effect of Particle Size of Fly Ash Microspheres (FAMs) on the Selected Properties of Concrete[J]. Minerals, 2022, 12(7): 847-847.
- [37] 李楠楠, 盛倩倩. 超细粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 砖瓦, 2024, (11): 85-87.
- [38] 张巧伟, 安晓燕, 杨 涛, 等. 不同掺量粉煤灰替代水泥对混凝土性能的影响[J]. 建材发展导向, 2024, 22 (23): 5-7.
- [39] Joshi R. Effect on compressive strength of concrete by partial replacement of cement with fly ash[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017, 4(2): 315-318.
- [40] Zhang D, Zhu T, Yang Q, et al. Role of fly ash as fine aggregate replacement in the properties of concrete: A comprehensive study of rheological, mechanical, and microstructural properties[J]. Construction and Building Materials, 2025, 458: 139599.
- [41] Siddique R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete[J]. Cement and Concrete research, 2003, 33(4): 539-547.
- [42] Zhang D, Zhang S, Yang Q. Effect of replacing fine aggregate with fly Ash on the performance of Mortar[J]. Materials, 2023, 16(12): 4292.
- [43] 窦 智, 张 萌, 王泽平, 等. 沙漠砂地聚物砂浆的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (07): 54-59.
- [44] 袁继峰, 火 亮, 肖德鑫, 等. 矿物掺合料改性再生混凝土性能试验研究[J]. 市政技术, 2020, 38 (03): 272-276.
- [45] 胡玉珊, 邢振贤. 粉煤灰掺入方式对再生混凝土强度的影响[J]. 新型建筑材料, 2003(5): 26-27.
- [46] Qu Z, Liu Z, Si R, et al. Effect of various fly ash and ground granulated blast furnace slag content on concrete properties: experiments and modelling[J]. Materials, 2022, 15(9): 3016.
- [47] 刘 华. 掺粉煤灰、矿渣混凝土的性能及配制方法研究[J]. 绿色环保建材, 2019(9): 4+6.
- [48] 张 鸣, 王付鸣, 叶 坤, 等. 粉煤灰和矿渣粉对水下不分散混凝土性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(08): 2611-2616.
- [49] 任付学. 掺粉煤灰和矿渣混凝土的性能及配制方法研究[J]. 砖瓦, 2024(7): 95-97.
- [50] Uzbaş B, Aydın A C. Analysis of fly ash concrete with scanning electron microscopy and X-ray diffraction[J]. Advances

- in Science and Technology. Research Journal, 2019, 13(4): 100-110.
- [51] Chindaprasirt P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 34(7): 1087-1092.
- [52] Ashish K S. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete[J]. Sustainable Environment Research, 2018, 28(1): 25-31.
- [53] Nath P, Sarker P K. Effect of mixture proportions on the drying shrinkage and permeation properties of high strength concrete containing class F fly ash[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17: 1437-1445.
- [54] Klemczak B, Gołaszewski J, Smolana A, et al. Shrinkage behaviour of self-compacting concrete with a high volume of fly ash and slag experimental tests and analytical assessment[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132608.
- [55] Khatib J M. Performance of self-compacting concrete containing fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2007, 22(9): 1963-1971.
- [56] Altoubat S, Junaid M T, Leblouba M, et al. Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 79: 9-20.
- [57] Wang P, Xie M, Liu L. Study on Early Shrinkage and Mechanical Properties of Concrete with Various Cementitious Materials[J]. Buildings, 2022, 12(10): 1543.
- [58] Khunthongkeaw J, Tangtermsirikul S, Leelawat T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2005, 20(9): 744-753.
- [59] 薛鲁阳, 郝巧趁, 张伟康, 等. 不同因素对混凝土抗碳化性能的影响实验[J]. 水泥工程, 2021(5): 9-12.
- [60] 李兆恒, 杨永民, 蔡杰龙, 等. 不同环境因素对混凝土碳化深度的影响规律研究[J]. 人民珠江, 2017, 38(1): 21-24.
- [61] Feng H, Wen J, Shao Q, et al. Carbonation resistance of fly ash/slag based engineering geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138471.
- [62] Das B B, Pandey S P. Influence of Fineness of Fly Ash on the Carbonation and Electrical Conductivity of Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(9): 1365-1368.
- [63] Wang X, Yuan J, Wei P, et al. Effects of fly ash microspheres on sulfate erosion resistance and chlorion penetration resistance in concrete[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 139: 3395-3403.
- [64] 郭自利, 康迎杰, 祝小靓, 等. 粉煤灰和表面防护剂对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 混凝土, 2024(7): 1-3+10.
- [65] 何林海, 曹 阳, 王朝晖, 等. 粉煤灰和矿粉提高混凝土抗氯离子渗透性能的研究[J]. 工业建筑, 2016, 667: 672.
- [66] Wang C, Wang Y, Meng Z. Resistance to Chloride Ion Permeability of Concrete Mixed with Fly Ash, Slag Powder, and Silica Fume[J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2020, 44(1): 67-72.
- [67] 王苏然, 杜 曦, 陈有亮, 等. 不同粉煤灰掺量的混凝土抗冻融性能研究[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(5): 493-499.
- [68] 李 三, 彭小芹, 苟 菁, 等. 矿物掺合料对地聚合物抗冻性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(10): 1711-1715.
- [69] 秦 力, 丁婧楠, 朱劲松. 高掺量粉煤灰和矿渣高强混凝土抗渗性和抗冻性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (06): 133-139.
- [70] 刘 清, 张 萌, 韩 霞, 等. 粉煤灰和矿粉对自密实混凝土抗冻性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2016(10): 84-86+94.

**基金项目:** 研究工作获得广西住房和城乡建设厅科学技术计划(研发类 2024 年度)、广东省教育厅重点领域专项项目(编号: 2023ZDX3106)、广西高校青年教师科研能力培育计划(项目编号: 2025KY0792)以及国家级大学生创新创业训练计划(项目编号: 202411838006、202411838034、S202411838154、S202411838155)等资助。谨向所有支持单位及资助机构致以诚挚谢忱。

<sup>1</sup> **第 1 作者:** 班桂萌, 2002.05, 硕士研究生在读, 主要研究固体废弃物的资源化利用。E-mail: 2653077854@qq.com。

\* **通讯作者:** 张金团, 1982, 05, 教授、高级工程师, 主要研究绿色建筑材料, E-mail: zhangjt@hzxy.edu.cn。