

粉煤灰 - 氧化石墨烯对混凝土性能影响研究

高仁海, 章 翌, 刘道谱, 邱 谦

(武汉光谷建设投资有限公司, 武汉 430000)

摘要: 推广粉煤灰混凝土有助于减少水泥用量, 但其大掺量使用时存在早期强度偏低的问题。为此, 研究单掺或复掺 0.06% 氧化石墨烯 (GO) 与 20%、30%、40% 粉煤灰 (FA) 对混凝土坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、耐磨性能的影响, 并探讨其协同增强机理。结果表明: 单掺 GO 导致坍落度显著减小, 复掺 FA 可补偿坍落度损失, 改善工作性; 单掺 GO 的强度增长集中在 28 d 内, 而单掺 FA 时 28 d 内强度发展缓慢; 复掺 GO 可改善 FA 混凝土早期力学强度发展滞后的缺陷, 其中, 复掺 30% FA 时 28 d 抗压、劈裂抗拉强度分别较基准组提高 10.7%、3.7%, 且复掺 20% FA 的效果优于单掺 GO; 此外, 掺入 GO 与 FA 有助于提升弹性模量与耐磨性, 复掺 30% FA 的效果优于单掺 GO, 复掺 40% FA 时高于普通混凝土。研究成果可为大掺量粉煤灰早期强度混凝土配合比设计提供参考。

关键词: 粉煤灰; 氧化石墨烯; 力学强度; 耐磨性能; 协同机理

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0042-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.007

Research on the Effects of Fly Ash - Graphene Oxide on Concrete Properties

GAO Renhai, ZHANG Yi, LIU Daopu, QIU Qian

(Wuhan Optics Valley Construction Investment Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The promotion of fly ash concrete aids in reducing cement consumption, yet its high-volume application presents challenges with low early strength. To address this, the effects of single or combined addition of 0.06% graphene oxide (GO) with 20%, 30%, or 40% fly ash (FA) on concrete slump, compressive strength, splitting tensile strength, elastic modulus, and abrasion resistance were investigated, alongside exploring their synergistic enhancement mechanisms. Results indicate: - Single GO addition significantly reduces slump, while combined FA addition compensates for slump loss and improves workability; - Strength gains from single GO addition are concentrated within 28 days, whereas single FA addition exhibits slow strength development within this period; The combined addition of GO mitigates the delayed early-stage strength development inherent in FA concrete. Specifically, a 30% FA content yielded 28-day compressive and splitting tensile strengths 10.7% and 3.7% higher than the control group, respectively, with 20% FA demonstrating superior performance to GO alone. Furthermore, the incorporation of both GO and FA contributes to enhanced elastic modulus and abrasion resistance. The effect of 30% FA addition surpasses that of GO alone, while 40% FA addition yields higher values than ordinary concrete. These findings provide valuable reference for the mix design of high-fly-ash-content early-strength concrete.

Key words: fly ash; graphene oxide; mechanical strength; wear resistance; synergistic mechanism

0 引言

水泥作为混凝土的关键组成部分，其高碳排放问题备受关注。采用辅助胶凝材料部分替代水泥，已成为降低水泥用量、促进建筑行业可持续发展的主要路径。粉煤灰是火电厂燃煤废弃物，具有潜在的火山灰活性，适量替代水泥时可提高混凝土性能^[1-2]，使其成为最广泛的辅助胶凝材料。

采用粉煤灰大比例替代水泥时会引发早期强度发展滞后、长期强度低等缺陷。为改善大掺量粉煤灰混凝土的力学性能，广大学者研究了掺入硅灰、纳米材料等^[3-4]多种途径提高混凝土性能，其中碳基纳米材料氧化石墨烯以其高比表面积和氧化官能团效应，可显著增强混凝土的力学及耐久性能^[5-6]。董健苗等^[7]、施溪溪等^[8]基于微观结构，分析了氧化石墨烯增强水泥基材料力学性能的机理，结果表明氧化石墨烯掺量为 0.1% 时提升力学性能最佳；杨晋荣^[9]研究表明，掺适量氧化石墨烯可增强固废混凝土密实度，提高其力学及耐久性能；刘建邦等^[10]研究了氧化石墨烯对大体积粉煤灰混凝土耐磨性能的影响，结果表明掺量为 0.05% 时混凝土硬度最高；徐朋辉等^[11]采用自制氧化石墨烯，从微观角度分析了其对混凝土力学性能影响规律，结果认为氧化石墨烯改善了混凝土微观密实度，进而提升抗压、抗折强度；李洁^[12]、张建武等^[13]研究氧化石墨烯对掺 50% 粉煤灰水泥基材料的性能影响，结果表明氧化石墨烯可促进早期水化反应，掺量为 0.6% 时混凝土力学强度最高；李东波等^[14]研究了氧化石墨烯与粉煤灰在水泥基材料中的协同作用，力学试验表明二者具有明显的协同优化效应，且复掺效果优于单掺；杨宏宇等^[15]制备不同尺寸的氧化石墨烯，并研究其对粉煤灰地质聚合物力学性能的影响，发现氧化石墨烯会阻碍早期强度发展，但会提高后期力学强度；邱文俊等^[16]研究了氧化石墨烯对高性能矿物细粉混凝土力学性能影响，结构表明掺入氧化石墨烯降低了混凝土坍落度，但增强了力学强度。

综上所述，掺入氧化石墨烯可增强混凝土强度及耐久性能，但对于氧化石墨烯与粉煤灰在协同改善混凝土早期力学强度研究尚不清晰。基于此，开展了单掺或复掺粉煤灰、氧化石墨烯对混凝土工作

性能、力学强度、耐磨性能的影响规律，并分析了二者早期协同增强机理。以期为大掺量粉煤灰混凝土配合比设计提供参考。

1 试验

1.1 原材料

采用天然河砂作为细骨料，最大颗粒粒径为 4.75 mm，细度模数 2.4；采用花岗岩碎石作为粗骨料，最大颗粒粒径为 20 mm；粗、细骨料粒径分布曲线如图 1 所示。选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，表观密度为 3.12 g/cm³；粉煤灰（FA）选用 II 级低钙粉煤灰，表观密度为 2.38 g/cm³，比表面积为 613 m²/kg；水泥、FA 主要化学成分见表 1。粉末状氧化石墨烯（GO），层间厚度为 1.5 nm，平均片层直径为 22 μm，比表面积为 29 760 m²/kg。采用聚羧酸醚基减水剂，拌合水采用自来水。

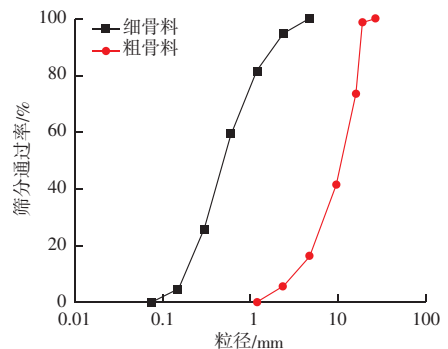


图 1 骨料颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of aggregate

表 1 水泥、FA 主要化学成分

Table 1 Main chemical components of cement and FA /%

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
水泥	62.5	21.5	6.4	2.4	1.2	2.8	0.4
FA	2.6	68.7	21.3	3.8	0.6	0.4	1.3

1.2 配合比设计

为评估 FA、GO 对混凝土性能影响，FA 按照质量分数为 20%、30%、40% 替代水泥；根据既有研究成果，GO 掺量在 0.06%~0.08% 范围时在混凝土中具有较好的分散性，增强混凝土效果显著，设定 GO 掺量为 0.06%；共制备 8 组掺 FA、GO 的混凝土试件，基准组 F00 试件不掺 FA、GO；仅掺 FA 试件减水剂掺量为胶凝材料质量的 0.5%，掺 GO 试件减水剂掺量为胶凝材料质量的 1.5%，水灰比为 0.35。混凝土配合比见表 2。

材料科学

表 2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix proportion / (kg/m³)

编号	水泥	FA	GO	砂	碎石	水	减水剂
F00	360			710	1 120	126	1.8
F00G	360		2.16	710	1 120	126	5.4
F20	288	72		710	1 120	126	1.8
F20G	288	72	2.16	710	1 120	126	5.4
F30	252	108		710	1 120	126	1.8
F30G	252	108	2.16	710	1 120	126	5.4
F40	216	144		710	1 120	126	1.8
F40G	216	144	2.16	710	1 120	126	5.4

1.3 试件制备及测试方法

1.3.1 试件制备

取 50% 拌合水，加入 GO 和减水剂，采用搅拌机充分搅拌形成 GO 分散液，掺入减水剂可通过静电排斥减少 GO 再团聚。将水泥、FA、骨料投入搅拌机干拌 1 min，加入 50% 拌合水搅拌 3 min，再加入 GO 分散液并高速搅拌 4 min。将搅拌完成的拌合物浇筑至模具内，振捣密实；自然养护 24 h 后脱模，移至温度 (23 ± 1) °C、相对湿度 ≥ 95% 的标准养护室养护至预定龄期。

1.3.2 试验方法

混凝土强度试验包括抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量以及耐磨试验，试验方法参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。

抗压强度、劈裂抗拉强度试验龄期分别为 7、28、90 d，采用尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件。弹性模量试验龄期为 28、90 d，试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm 棱柱体试件。耐磨试验采用龄期为 90 d 混凝土试件，采用尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件，花轮磨头压力为 400 N，转速为 17 r/min，磨损时间为 5 min，测量试件表面磨损率。

2 结果与分析

2.1 坍落度

由图 2 可知，基准组 F00 试件未掺 FA 和 GO，坍落度为 122 mm。仅 FA 的 F20、F30、F40 试件减水剂掺量与 F00 相同，可对比评估 FA 掺量对混凝土工作性能影响；随 FA 掺量增加坍落度逐渐增大，FA 掺量为 20%、30%、40% 的坍落度分别为 150、166、188 mm，相比基准组 F00 试件分别增加 23.0%、

36.1%、54.1%。这表明掺入 FA 可改善新拌混凝土的和易性。FA 的球形颗粒减少了水泥颗粒间的内摩擦，其与氢氧化钙的火山灰反应速度初始缓慢，水分消耗较少，相当于降低了胶凝材料总用水量；FA 还可填充较大水泥颗粒间的空隙，形成更密实、黏聚性更好的拌合物；上述特性增强了新拌混凝土的和易性、减少了泌水，使拌合物更具黏聚性。

由于 GO 具有高比表面积和含氧官能团的特点，掺入 GO 会导致水泥颗粒团聚，并增加需水量，由此导致混凝土坍落度下降；所有掺 GO 的试件减水剂掺量增加至 1.5%，对比评估 GO 与 FA 协同对坍落度影响。仅掺 0.06% GO 的 F00G 试件坍落度降低至 73 mm，与 F00 试件相比降低了 40.2%；掺如 GO 的 F20G、F30G、F40G 试件坍落度分别为 101、118、139 mm，与 F00 试件相比先降低 17.2%、3.3%，后增加 13.9%；掺入 GO 后试件坍落度相比掺入前坍落度分别减小了 32.7%、28.9%、26.1%。上述分析表明，单掺 GO 会显著降低混凝土和易性，复掺 FA 后可补偿坍落度损失，随 FA 掺量增加补充效应显著，两种材料复掺时可优化拌合物的流动性和稳定性，使新拌混凝土工作性能达到最佳平衡。

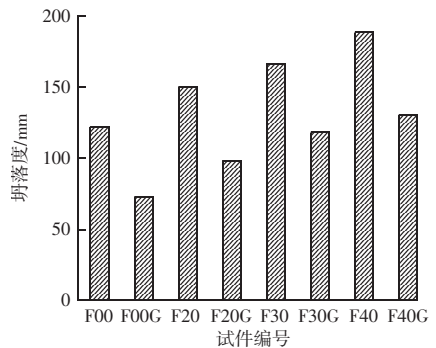


图 2 混凝土拌合物坍落度

Fig. 2 Slump of concrete mixture

2.2 抗压强度

由图 3 可知，未掺 FA 和 GO 的基准组 F00 试件在 7、28、90 d 抗压强度分别为 32.5、37.4、42.4 MPa，掺入 0.06% GO 的 F00G 试件在 7、28、90 d 抗压强度分别达到了 41.3、48.2、49.5 MPa；掺入 GO 混凝土的抗压强度显著提高，相比 F00 试件 7、28、90 d 分别提高了 27.1%、28.9%、16.8%，这凸显了 GO 对混凝土早期强度的增强作用。

7 d 龄期时, 采用 FA 替代水泥量为 20%、30%、40% 时, 相比基准组 F00 试件抗压强度分别降低了 11.4%、22.5%、34.2%, 这说明掺入 FA 会显著降低混凝土的早期抗压强度, 且 FA 掺量越大降幅值越高; 复掺入 GO 后, 三种 FA 掺量的混凝土试件抗压强度均有所提高。FA 掺量为 20% 的 F20G 试件抗压强度超过基准组试件, 提高了 0.9%, 但 FA 掺量为 30%、40% 的 F30G、F40G 试件的抗压强度虽有所改善, 但仍低于基准组试件, 分别降低了 11.7%、24.3%; 掺 FA 的混凝土试件复掺 GO 后抗压强度约提升 14%, 证明了 GO 对掺 FA 的混凝土早期强度同样具有增强作用。

28 d 龄期时, FA 替代水泥量为 20%、30%、40% 的试件相比基准组 F00, 抗压强度分别降低了 1.9%、10.4%、20.3%; 随养护龄期增长, FA 引起的混凝土抗压强度损失逐渐减小, FA 掺量为 20% 时抗压强度已与基准组相当; 复掺入 GO 的 F20G、F30G 混凝土试件抗压强度已超过基准组, 分别提高了 23.5%、10.7%, 且 F40G 试件仅低于基准组 0.5%。同样, 随养护龄期延长至 28 d, 复掺 GO 对掺 FA 混凝土的抗压强度约提升 24%, 这表明 GO 与 FA 协同效应良好, 可显著提升 7~28 d 龄期抗压强度, 在水泥用量减少 40% 时仍可保证其力学强度, 这得益于 GO 对混凝土微观结构的增强作用。

90 d 龄期时, 掺 20% FA 的 F20 试件抗压强度已超过基准组试件 7.6%, 掺 30% FA 的 F30 试件抗压强度略低于基准组试件 1.9%, 掺 40% FA 的 F40 试件抗压强度相比基准组试件降低了 9.2%。这说明延长养护龄期 FA 的火山灰效应逐渐增强, 经过 90 d 的

水化反应, 掺 30% FA 的混凝土抗压强度可与基准组相当。复掺 GO 后, 掺 FA 的混凝土抗压强度进一步提高, F20G、F30G、F40G 试件相比基准组提高了 22.2%、10.1%、1.7%, 相比仅掺 FA 的混凝土试件抗压强度提升约 12%, 且 F20G 试件抗压强度高出了 F00G 试件。

综上, 采用 FA 部分替代水泥会降低混凝土早期抗压强度, 延长养护龄期抗压强度有所提高; 掺 30% FA 的混凝土抗压强度未有明显损失。复掺 GO 和 FA 可显著提升混凝土早期抗压强度, 28 d 龄期时抗压强度提升幅度最大; 掺 40% FA 的混凝土抗压强度与基准组相当。GO 与 FA 协同效应显著, 掺入 GO 可弥补 FA 引起的早期强度降低, 同时保持了随龄期增长强度增大的趋势。

2.3 劈裂抗拉强度

由图 4 可知, 与抗压强度变化规律相似, 掺 0.06% GO 的 F00G 试件劈裂抗拉强度增大, 相较 F00 试件, 7、28、90 d 分别提高了 28.6%、16.9%、8.9%, 说明 GO 对 7 d 龄期混凝土的劈裂抗拉强度改善最显著。随 FA 替代水泥量增加劈裂抗拉强度逐渐减小。与基准组 F00 试件相比, FA 掺量为 20%、30%、40% 时, 7 d 劈裂抗拉强度分别降低了 14.3%、25.0%、32.5%, 28 d 劈裂抗拉强度分别降低了 6.7%、17.7%、25.5%, 90 d 劈裂抗拉强度分别增加了 2.7%、-5.2%、-12.6%。掺入 FA 混凝土早龄期劈裂抗拉强度减小, 各龄期劈裂抗拉强度降幅高于抗压强度, 表明掺入 FA 对削弱混凝土劈裂抗拉强度更显著。

复掺 GO 显著改善了掺 FA 混凝土试件的劈裂抗拉强度。与基准组 F00 试件相比, 7 d 龄期时 F20G 试件劈裂抗拉强度超过基准组 4.2%, 但 F30G、F40G 试件分别低于基准组 9.4%、18.5%; 28 d 龄期时 F20G、F30G 试件劈裂抗拉强度分别超过基准组 10.8%、3.7%, F40G 试件低于基准组 2.2%; 90 d 龄期 F20G、F30G、F40G 试件的劈裂抗拉强度均超过基准组试件, 分别提高了 13.1%、7.6%、1.7%, F20G 的劈裂抗拉强度同样高于 F00G 试。这表明, 复掺 GO 对掺 FA 混凝土的力学性能具有显著增强作用。28 d 龄期时掺 30% FA 的混凝土力学强度超过基准组, 掺 40% FA 的混凝土力学强度仅略小于基准

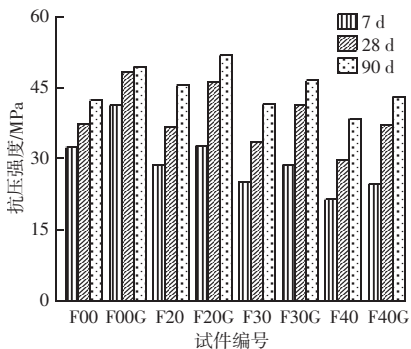


图 3 不同配合比混凝土抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of concrete with different mix proportions

材料科学

组, 延长养护龄期均可超过基准组; GO 与 FA 等辅助性胶凝材料结合使用效果显著, 可减小混凝土材料中传统水泥的用量。

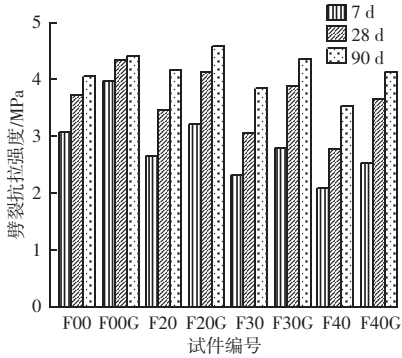


图4 不同配合比混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 4 Splitting tensile strength of concrete with different mix ratios

2.4 弹性模量

由图5可知, 基准组 F00 试件 28、90 d 弹性模量分别为 31.6、36.2 GPa; 掺入 0.06% GO 的 F00G 试件弹性模量增幅最显著, 较 F00 试件 28、90 d 分别提升 33.5%、16.3%。这是由于 GO 可促进水化产物 C-S-H 凝胶生成, 并抑制基体微裂缝产生, 降低了基体孔隙率, 使弹性模量增大。混凝土弹性模量随 FA 掺量增加而减小。28 d 龄期时, F20 试件弹性模量超出 F00 试件 6.0%, F30、F40 试件弹性模量相比 F00 试件分别降低了 3.8%、13.6%; 养护龄期至 90 d 时, F20、F30、F40 试件的弹性模量均超过基准组; 这由于 FA 的长期水化作用消耗了强度低的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 并额外生成了强度更高的 C-S-H 凝胶, 提高了混凝土基体密实度和强度。复掺 GO 的 F20G、F30G、F40G 试件, 28 d 龄期时弹性模量均超过了基准组 F00 试件, 分别提高了 21.5%、16.1%、

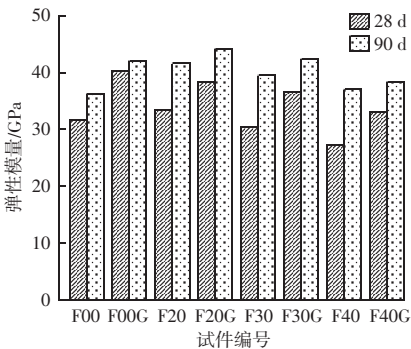


图5 不同配合比混凝土弹性模量

Fig. 5 Elastic modulus of concrete with different mix proportions

5.1%; 90 d 龄期时 F20G、F30G 的弹性模量高出 F00G 试件。表明 FA 与 GO 复合后协同提高了混凝土弹性模量, 这源于 GO 加速了 FA 和水泥的早期水化驱动, 其高比表面积和官能团促进了与水化产物的强化学键合, 有效桥接微裂缝并增强硬化混凝土的结构完整性, 使弹性模量显著提高。

2.5 耐磨性能

由图6可知, 不掺 FA 和 GO 的基准组 F00 试件表面磨损率为 5.1%, 与 F00 试件相比, 掺入 0.06% GO 的 F00G 试件表面磨损率显著降低, 磨损率为 3.7%, 相比 F00 试件降低了 35.3%。FA 掺量为 20%、30% 时, 混凝土试件磨损率分别为 4.3%、4.9%, 均小于基准组; 结果表明, 当 FA 掺量增加至 40% 时, 混凝土磨损率超过基准组。掺入 20%~30% FA 可提高混凝土耐磨性能, 这源于 FA 的微集料效应, 可填充混凝土基体中微小孔隙, 提高基体密实程度, 而难以被磨损。另外, FA 消耗强度较低的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体, 生成强度更高的 C-S-H 凝胶, 可进一步增强耐磨性能。复掺 FA 和 GO 的混凝土试件耐磨性能进一步增强。F20G、F30G、F40G 试件表面磨损率相比基准组 F00 试件分别降低了 39.2%、29.4%、19.6%; F20G、F30G 的磨损率低于 F00G 试件分别为 0.6%、0.1%。这是由于 GO 促进了早期水化反应, 并与 FA 的长期火山灰效应协同作用, 生成更高密度的 C-S-(A)-H 晶体填充孔隙, 提高了混凝土的整体密度和耐磨性能。

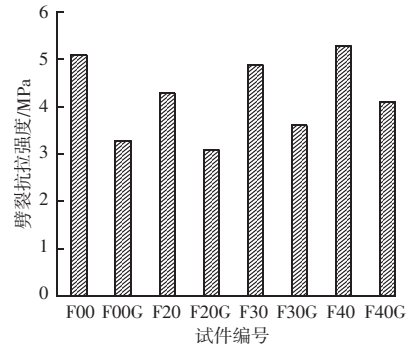


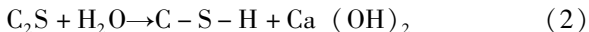
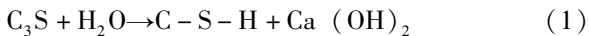
图6 不同配合比混凝土耐磨性能

Fig. 6 Abrasion resistance of concrete with different mix ratios

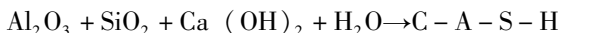
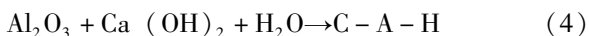
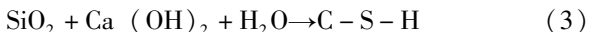
2.6 FA 和 GO 协同影响分析

普通混凝土的水化反应在拌和后立即开始, 主要为水泥中的硅酸三钙 (C_3S) 和硅酸二钙 (C_2S) 与水反应生成水化硅酸钙 (C-S-H), 反应式见式

(1)、(2), 该水化反应速度很快, 使混凝土的早期强度快速增长。普通混凝土通常在 28 d 达到其大部分强度, 此后水泥水化反应速率显著降低, 前述试验 28 d 抗压强度为 90 d 的 88.2%; 由于水化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 自身强度较低, 缺乏额外活性成分使其转变成 C-S-H, 导致混凝土 28 d 后强度发展缓慢。



当使用 FA 替代部分水泥掺入混凝土时, 其水化过程及最终形成的微观结构与普通混凝土存在一定差异。FA 主要化学成分为活性 SiO_2 和 Al_2O_3 。由于 FA 颗粒大多呈惰性, 在新拌混凝土基体中以充当填料为主; 随水泥水化反应持续进行, 生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 数量不断增长, 混凝土的 pH 值不断增大, 当混凝土中碱性环境达到一定程度后 FA 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 此火山灰初期反应缓慢, 7 d 以后有所增强。FA 中活性成分与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应如式 (3) ~ (5) 所示。由于该火山灰反应产生的二次水化产物细化了微观结构, 并在更长的时期内促进强度发展, 使得掺 FA 混凝土的长期强度有可能超过普通混凝土。



掺入 GO 并不改变水泥与 FA 的主要化学反应, 但 GO 在混凝土微观结构内参与不同的键合相互作用, 与水化产物形成化学键以增强混凝土微观结构^[12-13]。当复掺 GO 和 FA 时, GO 的高比表面积使其能够有效地吸附在 FA 颗粒上; 随水泥水化反应产生 C-S-H 晶体并释放 Ca^{2+} 离子, 当混凝土基体中 Ca^{2+} 离子浓度不断增加, 吸附在 FA 颗粒上的 GO 纳米颗粒开始与 C-S-H 结构中的 Ca^{2+} 离子形成共价键。这种键合促进了 FA 颗粒附近 C-S-H 晶体的生长, 使得 C-S-H 晶体能够持续附着在 GO 表面并与相邻的 GO 片层相互作用, 该过程使 FA 表面附近形成高密度 Ca^{2+} 区^[14]; 由于 FA 颗粒周围更高的 Ca^{2+} 离子浓度, 加速了 FA 的二次水化反应。相比之下, 未掺 GO 的 FA 混凝土遵循传统的二次水化过程, FA 颗粒周围可用的 Ca^{2+} 离子较少, 导致形成的额外 C-S-H 晶体相对有限; 因此, GO 掺入提高了 FA

的二次水化程度, 由此增强混凝土的整体力学强度。

3 结论

探讨了粉煤灰 (FA)、氧化石墨烯 (GO) 对混凝土强度性能的影响, 研究了单掺或复掺 FA、GO 时混凝土工作性能、力学强度、耐 FA 磨性能的变化规律, 得出以下结论:

(1) GO 具有高比表面积和含氧官能团的特点, 单掺会显著降低混凝土坍落度; FA 的球形颗粒形态和低火山灰效应, 会提高混凝土坍落度; 二者复掺展现出良好的协同性, 可改善混凝土的工作性能。

(2) 单掺 FA 混凝土 7、28 d 抗压、劈裂抗拉强度增长缓慢, 均低于基准组试件, 90 d 力学强度得到显著增长; 复掺 0.06% GO 可提高粉煤灰混凝土早期强度, FA 掺量为 20%、30% 的混凝土 28 d 抗压强度分别提高了 23.5%、10.7%, 劈裂抗拉强度强度分别提高了 10.8%、3.7%; GO 可改善 FA 混凝土的力学性能, 复掺 20% FA 时混凝土力学强度优于单掺 GO, 复掺 40% FA 时 90 d 力学强度大于基准组。

(3) 单掺 GO 可改善混凝土弹性模量以及耐磨性能, 复掺 20%~30% FA 时可提高混凝土弹性模量和耐磨性能, 且复掺 40% FA 时混凝土弹性模量和耐磨性能仍高于基准组。

(4) FA 的火山灰效应缓慢, 需待混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 数量达到一定程度方可进行水化反应, 掺入 GO 并不改变 FA 的水化反应机理, 但其可吸附在 FA 颗粒表面, 并在 FA 颗粒周围形成高浓度 Ca^{2+} 区域, 进而加速 FA 二次水化反应, 提高混凝土早期强度。

参 考 文 献

- [1] 刘超群, 朱泽文, 代力, 等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.
- [2] 张兴龙. 高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 49-53.
- [3] 常洪雷, 李晨聪, 王晓龙, 等. 复合矿物掺合料对砂浆自修复性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 62-68.
- [4] 张丽, 李彦贺, 周能源, 等. 纳米 SiO_2 、纳米 TiO_2 和纳米 CaCO_3 对水泥基材料早期性能的影响 [J]. 混凝土, 2023, (10): 106-110, 115.

材料科学

- [6] 王英, 王颖洁, 朱美春, 等. 低掺量粉煤灰基地聚合物胶凝材料性能试验研究 [J]. 上海师范大学学报 (自然科学版), 2022, 51 (4): 550-555.
- [7] 卞立波, 董申, 陶志. 碱激发矿渣/粉煤灰多孔混凝土基本性能试验研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (增刊2): 1299-1303.
- [8] 陈广升. 碱激发粉煤灰-高炉矿渣粉固化铸造废砂用作路基填料研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 117-122.
- [9] 夏冬桃, 吴晨, 崔凯, 等. 粉煤灰和硅灰取代率对碱矿渣混凝土力学性能影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2024, 59 (5): 1113-1122.
- [10] 孙大全, 顾泽宇, 孙硕, 等. 碱激发粉煤灰-硅灰地质聚合物的性能及表征 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (5): 1533-1539.
- [11] 李海清, 刘小强, 王仁智, 等. 硅灰对矿渣基地聚合物宏观性能及反应过程的影响 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (7): 68-77.
- [12] 刘小强, 李海清, 王仁智, 等. 硅灰对偏高岭土基地聚合物力学性能及气孔结构的影响机理 [J]. 公路, 2025, 70 (5): 324-330.
- [13] 毕超豪, 赖华铭, 张耿斌, 等. 地聚物混凝土-玻璃纤维增强复合材料筋界面黏结行为为的梁式试验研究 [J]. 工业建筑, 2024, 54 (6): 46-53.
- [14] 张延年, 郭晓钰, 王广林, 等. 玻璃纤维混凝土抗折性能及弯曲韧性试验研究 [J]. 混凝土, 2024, (1): 1-5.
- [15] 崔祎菲, 屈士皓, 张鹏. 海水海砂碱激发混凝土与 FRP 筋的黏结性能 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51 (11): 2750-2762.

(上接第 47 页)

- [5] 王璇, 王淑娟. 氧化石墨烯再生混凝土的制备及耐久性能的研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (7): 7181-7188.
- [6] 何欣, 刘长江. 氧化石墨烯在水泥基材料中的应用研究综述 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (4): 55-58.
- [7] 董健苗, 庄佳桥, 赵翠华, 等. 氧化石墨烯对水泥基材料力学性能的影响及分子动力学模拟 [J]. 桂林理工大学学报, 2024, 44 (3): 446-454.
- [8] 施溪溪, 孙广俊. 氧化石墨烯对水泥基材料力学性能的影响研究 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (1): 47-50.
- [9] 杨晋荣. 氧化石墨烯对固废混凝土工程性能影响研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024, (10): 59-62, 80.
- [10] 刘建邦, 汪洋. 氧化石墨烯对 HVFA 混凝土力学和耐磨性能的影响 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2020, 52 (5): 693-699.
- [11] 徐朋辉, 李相国, 刘卓霖, 等. 氧化石墨烯对粉煤灰水泥的水化和力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35 (12): 4066-4069.
- [12] 李洁. 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰混凝土改性机理研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [13] 张建武, 汪潇, 李志新, 等. 氧化石墨烯对高掺量粉煤灰水泥基材料性能的影响及机理 [J]. 化工新型材料, 2021, 49 (6): 240-243.
- [14] 李东波, 张鸿驰, 刘春燕, 等. 氧化石墨烯与粉煤灰增强水泥基材料的协同机理及其抗压性能尺寸效应 [J]. 应用力学学报, 2021, 38 (5): 1869-1876.
- [15] 杨宏宇, 胡鑫, 郑云西, 等. 氧化石墨烯对粉煤灰地质聚合物力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2022, (1): 88-91.
- [16] 邱文俊, 罗旗帜, 吴玉友, 等. 氧化石墨烯对大掺量矿物细粉超高性能混凝土力学性能的影响 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2020, 38 (2): 5-10.