

氧化石墨烯对高掺量粉煤灰胶凝体系力学性能的影响

杨佳萌¹ 杨光^{1,2} 王子卓¹ 聂舒美¹ 王浩楠¹ 郑雅芳¹

1. 西安欧亚学院人居环境学院 陕西 西安 710065

2. 城市智慧建造陕西省高校工程研究中心 陕西 西安 710065

摘要: 为改善大掺量粉煤灰胶凝材料的力学性能, 本文研究了氧化石墨烯(GO)对高掺量粉煤灰胶凝体系的增强作用。试验固定粉煤灰掺量为40%, 探讨了GO掺量对浆体力学性能与流动度的影响规律。结果表明, 适量GO能显著提升浆体的抗压与抗折强度, 随GO掺量增加呈先增后减。综合各项性能, 推荐GO的适宜掺量为0.05%。

关键词: 氧化石墨烯; 粉煤灰; 抗压强度; 抗折强度

在“双碳”战略与资源循环利用理念的驱动下, 粉煤灰作为辅助性胶凝材料替代部分水泥, 展现出消纳固废与降低碳排放的协同效应, 已成为推动行业可持续发展的关键突破口与研究热点。

粉煤灰的活性显著低于水泥, 大掺量粉煤灰因火山灰活性低, 导致水化诱导期延长、早期水化产物生成量不足^[1], 水化进程迟缓与界面过渡区弱化等问题严重, 材料的力学性能难以满足工程应用的需求。

氧化石墨烯(GO)凭独特结构与丰富的含氧官能团, 为改善高掺量粉煤灰胶凝体系性能提供了新途径^[2]。研究表明, GO可有效促进水化并优化微观结构, 显著提升水泥基材料力学性能^[3]。然而, GO在粉煤灰掺量高达40%的复合体系中的影响规律、最优掺量及作用机制尚不明确。

本研究系统探讨了GO掺量对固定粉煤灰掺量40%的胶凝体系的影响。通过设置0%至0.09%的GO浓度梯度, 分析GO掺量对胶凝材料力学强度与流动度的影响规律。

1 试验原材料及方法

1.1 试验原材料

1.1.1 氧化石墨烯分散液

本文采用深圳穗衡科技有限公司生产的氧化石墨烯分散液, 具体参数见表1。

表1 氧化石墨烯的基本参数

外观	固含量	片层尺寸	氧化程度	官能团
棕褐色液体	≥ 0.5wt%	主要为单层	0.5-5μm	主要含-OH、-COOH等

作者: 杨佳萌(2003-), 女, 西安欧亚学院智能建造专业, 研究方向: 智能建造技术及应用, E-mail: 3186136530@qq.com。

基金项目: 陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202412712033); 西安欧亚学院科研创新团队(2021XJD01); 西安欧亚学院科研平台(2022XJPT01)。

1.1.2 粉煤灰

本文采用一级粉煤灰, 由安徽海螺建材设计研究院有限责任公司提供。其成分见表2。

表2 一级粉煤灰成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	其他
含量(wt%)	52.8	29.5	6.5	3.5	1.5	6.2

1.1.3 普通硅酸盐水泥

本文采用诸城市杨春水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P.O42.5), 基本性能见表3。

表3 普通硅酸盐水泥基本性能

性能指标	安定性	比表面积(m ² /kg)	凝结时间(min)		抗折强度(MPa)		抗压强度(MPa)	
			初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
标准要求	必须合格	≥ 300	≥ 45	≤ 600	≥ 3.5	2 ≥ 6.5	≥ 17.0	≥ 42.5
实测值	合格	358	125	187	5.2	8.0	24.5	48.8

1.1.4 聚羧酸减水剂

本文采用苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸系高性能减水剂。产品为淡黄色或棕红色透明液体, 固含量为40%±2%, 减水率≥30%。

1.1.5 纤维

本文采用上海罗洋新材料科技有限公司生产的聚丙烯(PP)单丝纤维。该纤维为白色束状单丝, 长度为3mm。

1.1.6 标准砂

本文采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的中国ISO标准砂。

1.1.7 水

本文采用自来水。

1.2 配合比设计

为研究氧化石墨烯 (GO) 对高掺量粉煤灰胶凝体系力学性能的影响, 试验固定粉煤灰掺量40%, 以GO掺量为变量, 设置0%、0.01%、0.03%、0.05%、0.07%、0.09% 六个梯度。水胶比为0.3; 聚羧酸减水剂与聚丙烯纤维的掺量分别为胶凝材料质量的1.0%与0.3%; 硅酸钠占粉煤灰质量15%作为激发剂。具体配合比见表4。

表4 配合比

组号	氧化石墨烯 (%)	粉煤灰 (%)	普通硅酸盐水泥 (%)	硅酸钠 (%)	纤维 (%)	水胶比
1	0	40	60	15	0.3	0.3
2	0.01	40	60	15	0.3	0.3
3	0.03	40	60	15	0.3	0.3
4	0.05	40	60	15	0.3	0.3
5	0.07	40	60	15	0.3	0.3
6	0.09	40	60	15	0.3	0.3

1.3 实验方法

1.3.1 流动度

本试验依据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T2419-2005) 严格进行, 采用截锥圆模, 规格为上口内径Φ70mm±0.5mm, 下口内径Φ100mm±0.5mm, 高度60mm±0.5mm, 通过标准频率与高度的机械振动, 使水泥胶砂在自重作用下沿水平方向自由扩展, 满足规范要求^[4]。

1.3.2 抗折强度

采用40mm×40mm×160mm的棱柱体试件, 参照《水泥胶砂强度检验方法 (ISO法)》(GB/T17671-2021) 进行抗折强度测试, 试件于20° C、95%湿度养护24h后拆模, 转入标准养护室分别养护至3d、7d、14d和28d进行测试。

以 (50±10) N/s的速率加载至试件断裂, 记录破坏荷载并计算抗折强度。

$$R_f = \frac{1.5 \times F_f \times L}{b^3}$$

1.3.3 抗压强度

本试验依据《水泥胶砂强度检验方法 (ISO法)》(GB/T 17671-2021), 采用抗折试验后的六个半截棱柱体作为试件。以 (2400±200) N/s的速率加载直至试件破坏, 记录破坏荷载 (F_c)。抗压强度 (R_c) 按下式计算:

$$R_c = F_c / 1600 \text{ (MPa)}$$

在本试验中, 受压面积 = 40mm×40mm = 1600mm²。

2 实验结果与分析

2.1 流动度结果与分析

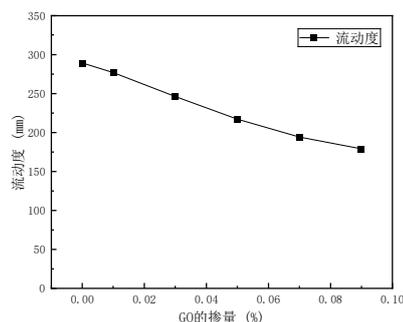


图1 GO掺量与流动度的关系

根据图1, 随着GO掺量从0%递增至0.09%, 流动度持续降低, 在掺量为0%~0.03%时, 流动度下降速率较快, 在掺量为0.03%~0.09%区间, 下降速率有所减缓。这归因于GO表面富含羟基、羧基等强亲水性官能团。当GO分散于水泥浆体中时, 其表面官能团会吸附大量自由水分子, 形成牢固的水化膜^[5], 导致体系中自由水减少, 粘度增大, 从而流动度下降。

2.2 抗折强度结果与分析

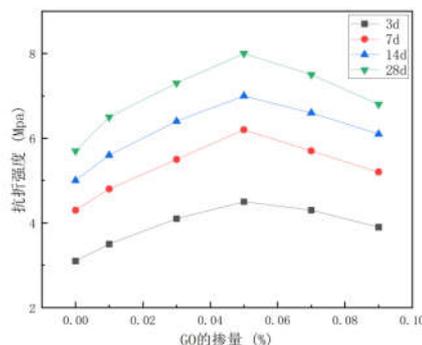


图2 GO掺量与抗折强度的关系

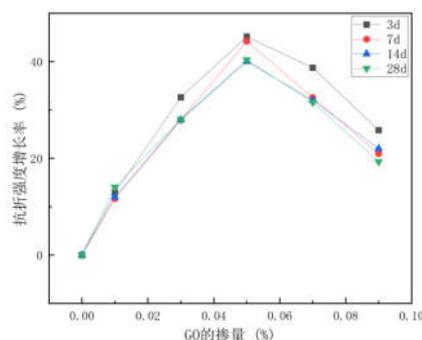


图3 GO掺量与抗折强度增强率的关系

图2可知, 各龄期下胶凝体系抗折强度随GO掺量呈先增后减的趋势, 且随龄期增长抗折强度稳定提高, 但其增长率在后期趋于平缓。当GO掺量为0.05%时, 抗折强度达到最优值。

图3说明抗折强度增强率随GO掺量的变化趋势。在掺量为0%~0.05%, 增强率快速上升, 3d和28d的增强率

分别达到45.2%和40.4%。GO对早期抗折强度的提升效果甚至优于后期,这可能与GO在水泥水化初期发挥的桥梁和阻裂作用密切相关。

当GO掺量超过0.05%,增强率开始明显下降。掺量为0.09%时,28d增强率已降至22.1%。这种现象可能是GO的团聚效应,适量GO能够阻止裂纹扩展来提升材料的断裂韧性;过量则团聚成应力集中点,加速裂纹扩展,降低材料的抗折性能。

2.3 抗压强度结果与分析

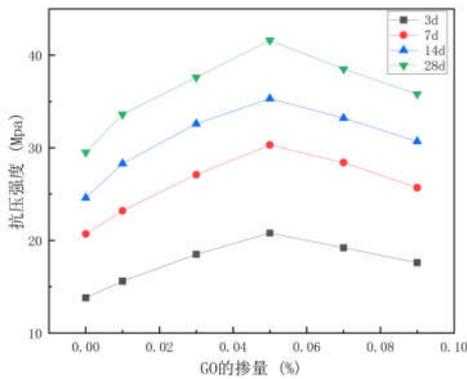


图4 GO掺量与抗压强度的关系

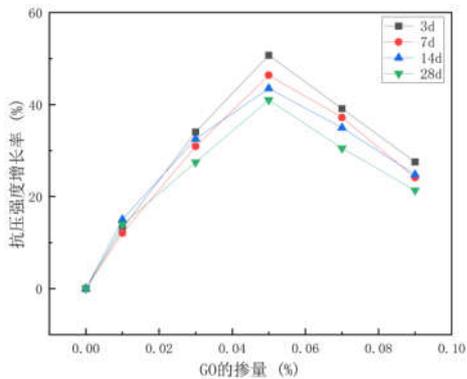


图5 GO掺量与抗压强度增强率的关系

由图4可以看出,0.05%GO掺量下各龄期抗压强度达到峰值。其3d和28d抗压强度较基准组分别提升了50.7%和41.0%,增强效果极为显著。各掺量组抗压强度随养护

龄期持续增长,表明28天内水化反应不断推进,结构持续密实。

根据图5,GO掺量在0%-0.05%时,抗压强度增强率快速上升,各龄期增强幅度均超25%,早期(3d)尤为突出。表明GO可加速早期水化并促进后期强度发展。GO掺量超过0.05%后增强率回落,0.09%时28d增强率已低于20%。

胶凝材料的抗压强度先增后降归因于GO表面含氧官能团能促进水化,优化水化产物界面结构,增强粘结,提升宏观力学性能^[6];过量后GO团聚形成缺陷,破坏均匀性,导致抗压强度下降。

3 结论

适量掺入GO可提升胶凝材料的抗压与抗折强度,其增强效果随掺量增加呈先增强后减弱趋势。同时,GO的掺入会显著降低浆体流动度,主要因其表面亲水官能团吸附自由水,导致粘度增大、工作性下降。适量GO还可促进水泥水化,优化水化产物界面结构,从而改善宏观力学性能。

参考文献

- [1]杜森.大掺量粉煤灰混凝土的水化特性及性能提升机制研究[D].哈尔滨工业大学,2020.
- [2]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(06):240-243.
- [3]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(03):446-454.
- [4]刘晨,颜碧兰,王昕,等.《水泥胶砂流动度测定方法》GB/T2419修订简介[J].施工技术,2004,(08):64-65.
- [5]程志海,杨森,袁小亚.石墨烯及其衍生物掺配水泥基材料研究进展[J].复合材料学报,2021,38(02):339-360.
- [6]方暑庭.氧化石墨烯协同硅灰和粉煤灰增强水泥基材料性能研究[D].广州大学,2024.