

# 粉煤灰品质和掺量对公路工程用纤维混凝土综合性能的影响

## Effect of Fly Ash Quality and Dosage on the Comprehensive Performance of Fiber Reinforced Concrete for Highway Engineering

甄景新<sup>1,2</sup>

(1. 天地科技股份有限公司, 北京, 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京, 100013)

**摘要:** 为了提高公路工程用纤维混凝土的综合性能, 降低施工成本, 以不同品质的粉煤灰为研究对象, 通过混凝土拌合物工作性能、力学性能、抗氯离子渗透性能以及抗冻性能试验, 探究了不同品质和掺量粉煤灰对纤维混凝土综合性能的影响。结果表明: 掺入 5%~20% 不同品质的粉煤灰后, 纤维混凝土工作性能均得到了不同程度地改善; 随着粉煤灰掺量的增大, 纤维混凝土抗压强度先增大后减小, 电通量逐渐减小, 冻融循环 200 次后的质量损失率先减小后增大, 相对动弹性模量先增大后减小; 粉煤灰的掺入能够有效提高纤维混凝土的力学性能、抗氯离子渗透性能和抗冻性能, 当粉煤灰掺量为 15% 时, 纤维混凝土的力学性能和抗冻性能达到最佳; I 级粉煤灰对纤维混凝土综合性能的改善效果略优于 II 级粉煤灰, 但综合考虑施工质量及成本等因素, 可以考虑采用 II 级粉煤灰代替 I 级粉煤灰。

**关键词:** 粉煤灰; 纤维混凝土; 工作性能; 力学性能; 抗冻性能

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0022-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.005

ZHEN Jingxin<sup>1,2</sup>

(1. Tiandi Technology Co., Ltd, Beijing 100013, China;

2. Middling Coal Mining Research Institute Co., Ltd, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive performance of fiber reinforced concrete for highway engineering and reduce the construction cost, the effects of different quality and amount of fly ash on the comprehensive performance of fiber reinforced concrete were studied by testing the working performance, mechanical properties, chloride penetration resistance and frost resistance of the concrete mix. The results show that the working performance of fiber reinforced concrete is improved by adding 5%~20% fly ash of different quality. With the increase of fly ash content, the compressive strength of fiber reinforced concrete first increases and then decreases, the electric flux gradually decreases, the mass loss after 200 freeze-thaw cycles first decreases and then increases, and the relative dynamic elastic modulus first increases and then decreases. The addition of fly ash can effectively improve the mechanical properties, chloride ion penetration resistance and freeze resistance of fiber reinforced concrete. When the fly ash content is 15%, the mechanical properties and freeze resistance of fiber reinforced concrete reach the best. The improvement effect of Grade I fly ash on the comprehensive performance of fiber reinforced concrete is slightly better than that of grade II fly ash, but considering the factors such as construction quality and cost, we can consider using grade II fly ash instead of grade I fly ash.

**Keywords:** fly ash; fiber reinforced concrete; working performance; mechanical properties; frost resistance

作者简介: 甄景新 (1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工业及民用建筑结构设计。

收稿日期: 2023-08-27

0 引言

随着我国城镇化进程的不断加快, 基础设施建

设的发展也在逐步推进。其中公路工程建设需要用到大量的混凝土材料, 而由于某些地区自然环境较为恶劣、海拔差异较多以及气候复杂多变等因素, 对混凝土结构长期耐久性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。这就需要研究工作性能、力学性能以及耐久性能更好的高性能混凝土, 以满足公路工程建设的需求。

纤维混凝土与传统普通混凝土相比, 通常具有抗拉强度高、阻裂性能好以及弯曲韧性强的特点, 得到了广泛的研究及应用<sup>[2-4]</sup>。而粉煤灰作为一种常见的矿物掺合料, 也在混凝土材料中占据十分重要的位置, 粉煤灰加入到混凝土中不仅能够改善混凝土的综合性能, 还能部分替代水泥用量, 达到合理利用资源的目的<sup>[5-9]</sup>。因此, 国内外大量研究者针对纤维和粉煤灰对混凝土性能的影响开展了研究工作, 其中张宝珍等<sup>[10]</sup>将粉煤灰和聚丙烯纤维掺入到混凝土中, 研究了粉煤灰和聚丙烯掺量对混凝土抗压强度以及抗折强度的影响; 蒋威等<sup>[11]</sup>研究了不同长度和掺量的玄武岩纤维对粉煤灰混凝土抗压强度的影响, 并根据试验结果建立了相应的抗压强度拟合模型; 吴群威等<sup>[12]</sup>将粉煤灰掺入到混杂纤维中, 并考察了不同掺量粉煤灰对混杂纤维混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、碳化性能和抗冻性能的影响; 冉星仕<sup>[13]</sup>研究了粉煤灰和聚酯纤维掺量对混凝土抗压强度、抗折强度、抗拉强度以及弹性模量等力学性能的影响。分析调研结果发现, 目前针对双掺粉煤灰和纤维对混凝土性能的影响研究较多<sup>[14]</sup>, 而针对粉煤灰品质和掺量对纤维混凝土性能的影响研究则相对较少<sup>[15]</sup>, 由于某些地区粉煤灰资源供需不平衡, I级粉煤灰资源相对较少, 为了节约施工成本并保障施工质量, 需要采用II级粉煤灰代替掺入。因此, 以不同品质的粉煤灰为研究对象, 考察了不同品质和掺量的粉煤灰对公路工程用纤维混凝土综合性能的影响, 以期为公路工程建设用高性能混凝土的研究和发展提供借鉴。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

试验用水泥为南方水泥有限公司生产的 P·O 52.5 型普通硅酸盐水泥 (比表面积为  $358\text{m}^2/\text{kg}$ , 初凝和终凝时间分别为 189 min 和 258 min, 3 d 和 28 d 抗压强度分别为 35.7 MPa 和 60.9 MPa; 粉煤灰为河南某电厂生产的 I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰, 其综合

性能指标和化学组分见表 1 和表 2。细骨料为细度模数为 3.2 的河砂, 粗骨料连续级配为 5~20 mm 的花岗岩碎石; 外加剂为武汉华轩高新技术有限公司生产的聚羧酸盐型高性能减水剂, 减水率为 33%; 纤维为山东路克复合材料有限公司生产的聚酯纤维 (长度为 6 mm, 直径为 20  $\mu\text{m}$ , 抗拉强度为 885 MPa, 断裂延伸率为 28.3%)。水为自来水。

表 1 粉煤灰综合性能指标

粉煤灰品质	含水率	细度	烧失量	游离氧化钙	28 d 活性指数
I 级	0.11	11.2	2.98	0.10	84.2
II 级	0.32	15.3	3.87	0.58	72.1

表 2 粉煤灰化学组分

粉煤灰品质	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
I 级	51.82	25.51	1.64	7.12	3.51	6.49	3.91
II 级	60.21	15.29	0.09	9.58	2.94	7.81	4.08

### 1.2 混凝土配合比及试件制备

采用等量粉煤灰取代水泥, 探究不同品质和不同掺量粉煤灰对公路工程用纤维混凝土综合性能的影响, 并固定水胶比为 0.33, 砂率为 40%, 减水剂掺量 2%, 混凝土配合比设计见表 3。

表 3 混凝土配合比设计

编号	材料用量 / (kg/m <sup>3</sup> )					粉煤灰		
	水泥	水	纤维	粗骨料	细骨料	I 级 /(kg/m <sup>2</sup> )	II 级 /(kg/m <sup>2</sup> )	掺量 /%
C-0	400	132	0.8	1 023	682	0	0	0
C-1	380	132	0.8	1 023	682	20	0	5
C-2	360	132	0.8	1 023	682	40	0	10
C-3	340	132	0.8	1 023	682	60	0	15
C-4	320	132	0.8	1 023	682	80	0	20
C-5	380	132	0.8	1 023	682	0	20	5
C-6	360	132	0.8	1 023	682	0	40	10
C-7	340	132	0.8	1 023	682	0	60	15
C-8	320	132	0.8	1 023	682	0	80	20

根据表 3 混凝土配合比, 分别制备不同尺寸的混凝土试件, 其中力学性能和抗氯离子渗透性能测定试验用混凝土试件的尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm (力学性能测定试验共 30 组、抗氯离子渗透性能测定试验共 10 组, 每组均制备 5 块试件); 抗冻性能测定试验用混凝土试件的尺寸为 115 mm×115 mm×500 mm (共 10 组, 每组制备 5 块试件), 试件制备完成以后将其在标准条件下进行养护, 最后再根据相关标准测定其性能。

材料科学

1.3 试验方法

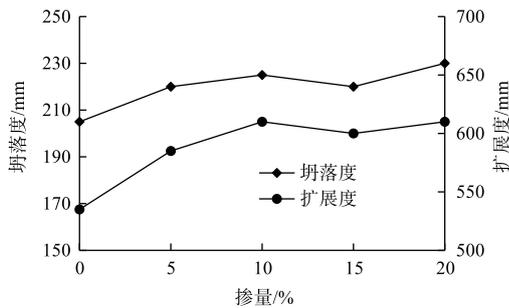
参照国家标准 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能测试方法》中的相关规定，以坍落度和扩展度为评价指标，测定不同混凝土拌合物的工作性能。

参照国家标准 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的相关规定，以抗压强度为评价指标，测定不同混凝土试件的力学性能，以电通量为评价指标，测定不同混凝土试件的抗氯离子渗透性能，以质量损失率和相对动弹性模量为评价指标，测定不同混凝土试件的抗冻性能。

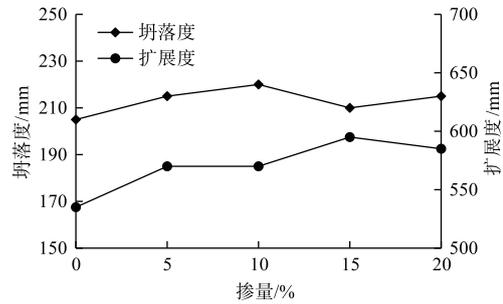
2 试验分析

2.1 粉煤灰品质和掺量对混凝土工作性能的影响

由图 1 可以看出，粉煤灰的掺入能够在一定程度上提高混凝土拌合物的坍落度和扩展度。未掺入粉煤灰的混凝土坍落度和扩展度分别为 205 mm 和 535 mm，掺入 5%~20% I 级粉煤灰后混凝土坍落度可以增大至 220~230 mm，扩展度增大至 585~610 mm，坍落度最大增幅可以达到 12.2%，扩展度最大增幅则可以达到 14.0%。而掺入 5%~20%的 II 级粉煤灰后混凝土坍落度可以增大至 210~220 mm，扩展度则可以增大至 570~595 mm，坍落度最大增幅为 7.3%，扩展度最大增幅则为 11.2%。由此可知，不同品质和不同掺量的粉煤灰均能有效改善混凝土工作性能，这是由于粉煤灰颗粒形状为圆球形，并且其表面较为光滑，掺入到混凝土中能够有效改善材料的微级配，从而起到改善混凝土工作性能的作用，并且 I 级粉煤灰对混凝土工作性能的改善效果略微优于 II 级粉煤灰。



(a) I 级粉煤灰



(b) II 级粉煤灰

图 1 I、II 级粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响  
Fig. 1 Effect of I and II grade fly ash content on the workability of concrete

2.2 粉煤灰品质和掺量对混凝土力学性能的影响

由图 2 可以看出，随着两种不同品质粉煤灰掺量逐渐增大，养护不同时间的混凝土抗压强度值基本上呈现出“先增大后减小”的趋势。在相同掺量下，I 级粉煤灰对混凝土抗压强度的增大幅度略微大于 II 级粉煤灰。当粉煤灰掺量为 15% 时，养护不同时间后混凝土抗压强度值均可以达到最大值，其中掺入 I 级粉煤灰时，混凝土养护 3、7 和 28 d 的抗压强度值分别为 54.3、62.8 和 74.1 MPa，与未掺粉煤灰的混凝土试件相比，抗压强度分别增大了 8.1%、9.6% 和 8.7%；而掺入 II 级粉煤灰时，混凝土养护 3、7 和 28 d 的抗压强度值分别为 52.3、61.5 和 71.8 MPa，与未掺粉煤灰的混凝土试件相比，抗压强度分别增大了 4.2%、7.3% 和 5.3%。再继续增大粉煤灰掺量至 20% 时，混凝土试件抗压强度值均出现明显下降。这是由于混凝土中掺入适量的粉煤灰能够有效改善其内部孔隙结构，并能略微增大水泥材料的活性，从而使混凝土强度有所增大；而当粉煤灰掺量过大时，较多的粉煤灰颗粒吸收水分后形成水膜会降低胶凝材料之间的黏聚力，从而使混凝土强度有所降低。因此，从混凝土结构的抗压强度角度考虑，推荐粉煤灰最佳掺量为 15%。

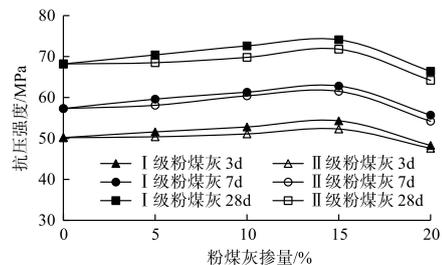


图 2 I、II 级粉煤灰掺量对混凝土力学性能的影响  
Fig. 2 Effect of I and II grade fly ash content on mechanical properties of concrete

### 2.3 粉煤灰品质和掺量对混凝土抗氯离子渗透性能的影响

混凝土抗氯离子渗透性能的影响试验混凝土试件的养护时间均为 28 d。由图 3 结果可以看出, 随着两种不同品质粉煤灰掺量逐渐增大, 混凝土电通量均呈现出逐渐减小的趋势, 即粉煤灰掺入使混凝土抗氯离子渗透性能有所增强。这是由于粉煤灰颗粒具有一定的火山灰效应, 能够消耗掉微小孔隙中的水分, 从而提高混凝土结构密实度; 并且水泥水化产物可以与粉煤灰产生反应, 使水化产物数量有所增多, 能够固定和包裹更多的氯离子, 从而提高了混凝土的抗氯离子渗透性能。当两种粉煤灰掺量在 5%~20% 之间时, 混凝土电通量在 832~915C 之间, 参照行业标准 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》中的规定, 混凝土抗氯离子渗透等级均可以达到 Q-IV 级, 从而可以满足行业标准 JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》中混凝土的电通量 $\leq 1000\text{C}$  的规定。

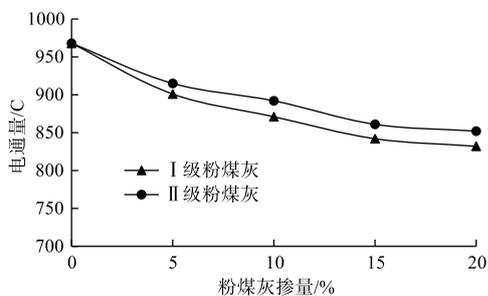


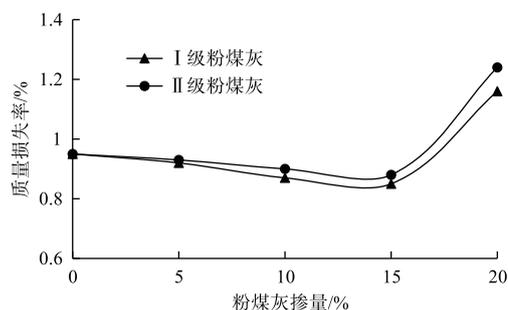
图 3 I、II 级粉煤灰掺量对混凝土抗氯离子渗透性能的影响  
Fig. 3 Effect of I and II grade fly ash content on chloride ion penetration resistance of concrete

### 2.4 粉煤灰品质和掺量对混凝土抗冻性能的影响

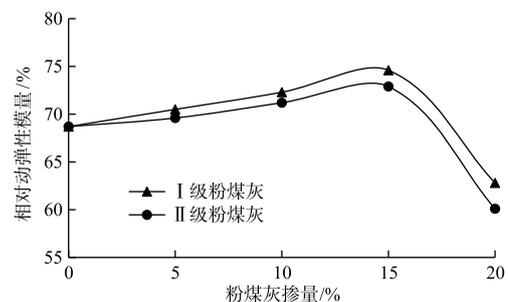
由图 4 (a) 可以看出, 随着两种不同品质粉煤灰掺量的逐渐增大, 混凝土经过 200 次冻融循环后质量损失率均呈现出“先减小后增大”的趋势, 混凝土经过冻融循环后质量损失率越大, 说明其抗冻性能就越差。当 I 级粉煤灰和 I 级粉煤灰掺量为 15% 时, 混凝土质量损失率可以达到最小, 分别为 0.85% 和 0.88%, 与未掺入粉煤灰时的 0.95% 相比, 质量损失率分别减小了 0.10% 和 0.07%; 当 I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰掺量增大至 20% 时, 混凝土经过冻融循环后质量损失率则明显增大, 分别可达到 1.16% 和 1.24%, 与未掺入粉煤灰时的 0.95% 相比, 质量损失率分别增大了 0.21% 和 0.29%。

由图 4 (b) 可以看出, 随着两种不同品质粉煤

灰掺量逐渐增大, 混凝土经过 200 次冻融循环后相对动弹性模量均呈现出“先增大后减小”的趋势, 混凝土经过冻融循环后相对动弹性模量越小, 说明其抗冻性能就越差。当 I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰掺量为 15% 时, 混凝土相对动弹性模量均可以达到最大, 分别为 74.6% 和 72.9%, 与未掺入粉煤灰时的 68.7% 相比, 相对动弹性模量分别增大了 5.9% 和 4.2%; 当 I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰掺量增大至 20% 时, 混凝土相对动弹性模量则迅速减小, 分别为 62.8% 和 60.1%, 混凝土抗冻性能变得较差。



(a) 质量损失率



(b) 相对动弹性模量

图 4 粉煤灰品质和掺量对混凝土抗冻性能的影响  
Fig. 4 Effect of fly ash quality and content on freezing resistance of concrete

试验结果分析认为, 适量地掺粉煤灰能够有效改善混凝土抗冻性能 (I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰的效果相差不大), 而当粉煤灰掺量过大时, 则会对抗冻性能产生负面影响。这是由于适量的粉煤灰能够有效提高混凝土密实度, 降低孔隙率, 从而冻融循环过程中能够有效防止较多的水分进入到混凝土内部, 降低冻融损害程度, 提高混凝土抗冻性能; 而当粉煤灰掺量较大时, 就会使混凝土中胶凝材料之间黏聚力有所降低, 使其结构变得较为疏松, 在冻融循环过程中会有较多的水分渗透进来, 加剧冻融损害程度, 从而使混凝土抗冻性能有所减弱。从混

## 材料科学

凝土抗冻性能角度考虑, 粉煤灰的最佳掺量为 15%。

### 3 结论

(1) 纤维混凝土中掺入 5%~20% 的粉煤灰均能不同程度改善纤维混凝土拌合物的工作性能, 并且 I 级粉煤灰对混凝土工作性能的改善效果略微优于 II 级粉煤灰。

(2) 随着粉煤灰掺量逐渐增大, 纤维混凝土抗压强度呈现出“先增大后减小”的趋势, 当粉煤灰掺量为 15% 时, 养护不同时间后的混凝土抗压强度均可以达到最大, 同样是 I 级粉煤灰对抗压强度的提升幅度略大于 II 级粉煤灰。

(3) 粉煤灰掺量越大, 纤维混凝土电通量就越小。粉煤灰掺入能够有效增强混凝土抗氯离子渗透性能, 当粉煤灰掺量在 5%~20% 之间时, 混凝土抗氯离子渗透等级均可以达到 Q-IV 级。

(4) 随着粉煤灰掺量逐渐增大, 纤维混凝土试件在冻融循环 200 次后质量损失率呈现出“先减小后增大”的趋势, 而相对动弹性模量则呈现出“先增大后减小”的趋势。当粉煤灰掺量为 15% 时, 混凝土试件质量损失率最小, 相对动弹性模量最大, 混凝土抗冻性能达到最佳, I 级粉煤灰和 II 级粉煤灰对纤维混凝土抗冻性能的提升效果相差不大。

(5) 粉煤灰掺入能够不同程度改善纤维混凝土工作性能、力学性能、抗氯离子渗透性能和抗冻性能, 综合考虑各种因素, 推荐粉煤灰最佳掺量为 15%, 并且在 I 级粉煤灰资源有限的情况下, 可以考虑使用 II 级粉煤灰代替。

### 参 考 文 献

[1] 贾昌栋. 公路桥梁施工中高性能混凝土的应用 [J]. 黑龙

江交通科技, 2019, 42 (10): 101-102.

- [2] 马立荣. 合成纤维与钢纤维对超高性能混凝土的影响研究 [J]. 合成纤维, 2022, 51 (12): 74-77.
- [3] 贾超, 齐鑫. 复合纤维对严寒地区混凝土抗冻性能的影响研究 [J]. 当代化工, 2021, 50 (5): 1035-1038.
- [4] 孔庆华, 范志伟. 纤维混凝土耐久性能研究现状与展望 [J]. 合成纤维, 2023, 52 (8): 84-87, 90.
- [5] 张小卫, 申宏栋, 刘济广, 等. 大掺量粉煤灰对高架桥混凝土路面断裂性能影响试验研究 [J]. 粘接, 2023, 50 (8): 162-165.
- [6] 张磊, 刘海龙, 林海, 等. 一种固定远场法向位移的水泥环弹塑性应力解 [J]. 非常规油气, 2022, 9 (4): 107-113.
- [7] 刘广斌, 常山. 粉煤灰掺量对纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 38 (4): 64-68, 97.
- [8] 李艳丽. 基于规划求解的水泥粉煤灰混合料配合比设计方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 90-93, 101.
- [9] 陈杰彬, 杨浩, 魏学斌, 等. 偏高岭土-矿渣地聚合物固井水泥浆体系研究 [J]. 非常规油气, 2022, 9 (2): 106-111.
- [10] 张宝珍, 王章琼, 谢哲, 等. 粉煤灰和聚丙烯纤维制备高强度砟的力学性能 [J]. 武汉工程大学学报, 2023, 45 (1): 115-118.
- [11] 蒋威, 杜磊, 刘鑫, 等. 玄武岩纤维增强粉煤灰混凝土抗压强度性能研究 [J]. 混凝土, 2023 (5): 56-60.
- [12] 吴群威, 赵娣. 粉煤灰对混杂纤维混凝土力学与耐久性能的影响分析 [J]. 当代化工, 2023, 52 (2): 273-276.
- [13] 冉星仕. 双掺粉煤灰和聚酯纤维对混凝土力学性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (6): 121-124.
- [14] 孙培华, 许天航. 混杂纤维粉煤灰轻骨料混凝土力学与耐久性能试验研究 [J]. 化学与粘合, 2023, 45 (2): 101-104, 123.
- [15] 王俊杰. 粉煤灰和矿渣粉在云南省高速公路工程混凝土中的应用研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.