

超高海拔风机塔筒基础底板掺粉煤灰混凝土疲劳特性分析

Fatigue Analysis of Fly Ash Concrete in Ultra-High Altitude Wind Turbine Foundation Base Slabs

张明磊, 许海楠

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 611130)

摘要: 以水泥、低钙或高钙粉煤灰等为原料, 制备超高海拔风机塔筒基础底板中的掺粉煤灰混凝土试件。通过压力试验机、盐冻融-荷载耦合损伤模型及干湿循环试验, 全面分析不同条件下, 掺粉煤灰混凝土的疲劳特性。试验结果表明: 干湿循环中, 低钙粉煤灰混凝土疲劳断口概率显著低于高钙粉煤灰混凝土, 100 次循环后前者较后者降低约 28%。适量低钙粉煤灰可提升抗压强度, 10% 掺量时 28 d 抗压强度较对照组提升约 12%; 盐冻融-荷载耦合循环下, 10% 低钙粉煤灰掺量能显著降低损伤度; 相同荷载等级下, 该掺量混凝土疲劳寿命最长, 较对照组延长约 35%; 证明混凝土中适量掺入低钙粉煤灰可提升其疲劳特性, 高掺量或高钙粉煤灰则会导致性能劣化。

关键词: 超高海拔; 风机塔筒; 基础底板; 掺粉煤灰; 混凝土; 疲劳特性

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0085-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.016

ZHANG Minglei, XU Hainan

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China)

Abstract: Using cement, low-calcium or high-calcium fly ash as raw materials, concrete specimens mixed with fly ash were prepared for the foundation base slab of ultra-high altitude wind turbine towers. The fatigue characteristics of fly ash concrete under various conditions were comprehensively analyzed through pressure testing machines, salt freeze-thaw-load coupling damage models, and dry-wet cycle tests. The test results indicated that in the dry-wet cycle, the fatigue fracture probability of concrete with low-calcium fly ash was markedly lower than that with high-calcium fly ash; after 100 cycles, the former was approximately 28% lower than the latter. An appropriate amount of low-calcium fly ash could enhance the compressive strength; specifically, when the content was 10%, the 28-day compressive strength was approximately 12% higher than that of the control group. Under the salt freeze-thaw-load coupling cycle, a 10% low-calcium fly ash content was found to significantly reduce the damage degree. At the same load level, the concrete with this content exhibited the longest fatigue life, which was about 35% longer than that of the control group. It has been proven that an appropriate amount of low-calcium fly ash mixed into concrete can improve its fatigue characteristics, while a high content or high-calcium fly ash will lead to performance degradation.

Key words: ultra-high altitude; fan tower tube; base plate; blending fly ash; concrete; fatigue characteristics

0 引言

在超高海拔地区, 风机塔筒基础底板的混凝土疲劳性能受到多方面因素的共同影响^[1-2]。混凝土作为风机塔筒基础底板的主要建筑材料, 其疲劳特性

作者简介: 张明磊 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 新能源工程。

收稿日期: 2025-05-14

材料科学

直接关系到基础结构的耐久性与安全性，是影响结构稳定运行的关键因素之一。因此，深入开展超高海拔风机塔筒基础底板混凝土疲劳特性的研究，对于保障风机基础结构安全可靠运行而言，具有至关重要的意义。

国内外学者中，丁小华等^[3]为探究粉煤灰-矿渣基地聚合物的疲劳强度，设计了以粉煤灰与矿渣的质量比以及碱激发剂含量为变量的对照试验，对试样在动载荷作用下的疲劳寿命进行了测试；陈凯^[4]通过室内试验方法，研究了不同配比的粉煤灰热再生沥青混合料在高温、低温、水稳定以及疲劳等方面的性能，并对其路用性能进行了综合评价；马士宾等^[5]将不同掺量的聚丙烯纤维加入到复合掺加粉煤灰和矿粉的高性能混凝土中，通过开展坍落度、抗压强度、抗弯拉强度和抗冲击性能试验，研究了聚丙烯纤维掺量对高性能混凝土工作性、力学强度和抗冲击性能的影响。同时，还通过快速氯离子迁移、干缩和弯曲疲劳试验进行进一步研究；张鹏^[6]使用粉煤灰替代绿色建筑材料中的部分水泥，会改变绿色建筑的疲劳性能，并探究了高掺量粉煤灰对绿色建筑疲劳断裂性能、循环压力疲劳性能、冻融循环疲劳性能等方面的影响。

粉煤灰是燃煤电厂排放的工业废渣，大量堆积

不仅占用土地资源，还会对环境造成污染。混凝土作为现代建筑中广泛使用的结构材料，主要由水泥、水、骨料（如砂、石）按适当比例配制，经硬化后形成具有高强度和耐久性的人造石材，但其生产过程存在能耗高、碳排放量大等问题^[7-9]。将粉煤灰作为混凝土掺合料应用于超高海拔风机塔筒基础底板，实现了粉煤灰的资源化利用，减少了固体废弃物的排放，降低了对环境的负面影响^[10-13]。同时，通过优化粉煤灰掺量提高混凝土性能，减少了水泥等传统建筑材料的使用量^[14-15]，降低了能源消耗和二氧化碳排放，符合可持续发展的理念，对于推动建筑行业绿色转型具有重要意义。

1 掺粉煤灰混凝土疲劳特性分析

1.1 掺粉煤灰混凝土制备

以水泥、低钙或高钙粉煤灰、水、减水剂、C50混凝土为原材料，制备超高海拔风机塔筒基础底板掺粉煤灰混凝土。水泥的用量是 310 kg/m³，粉煤灰的用量是 0~40 kg/m³，水的用量是 160 kg/m³，减水剂用量是水泥用量的 1%。

水泥与粉煤灰的化学构成要素见表 1，粉煤灰的物理属性见表 2。

表 1 主要化学成分														
Table 1 Chemical composition														/%
化学构成要素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	f-CaO
水泥	13.50	5.00	24.00	1.60	4.30	2.20	20.00	17.50	6.00	5.50				
低钙粉煤灰 LCFA	49.00	28.50	7.00	4.80	2.10	0.20					2.80	0.30	0.15	0.50
高钙粉煤灰 HCFA	46.00	20.50	17.00	5.10	2.50	0.10					2.30	0.70	0.25	2.50

表 2 粉煤灰的物理属性								
Table 2 Physical properties of fly ash								
物理属性名称	含水量/%	细度（45μm 筛余）/%	需水量比/%	三氧化硫含量/%	烧失量/%	密度/(g/cm ³)	比表面积/(m ² /kg)	活性指数/%
LCFA	0.3	7.0	97	0.60	5.5	2.25	380	75
HCFA	0.5	8.5	103	0.55	3.5	2.40	420	80

1.2 掺粉煤灰混凝土疲劳特性分析

通过干湿循环加速试验、抗压强度测试试验、盐冻融-荷载耦合损伤试验，全面分析不同条件下，掺粉煤灰混凝土的疲劳特性。

1.2.1 干湿循环加速试验

建立干湿交替环境（温度 50℃烘干 12 h→20℃去离子水浸泡 12 h），循环过程中每 24 h 施加 50 次

脉冲压力，测试 48 h，剖析其在循环压力作用下的疲劳性能。

1.2.2 抗压强度试验

采用微机控制电液伺服压力试验机（量程 3 000 kN，频率范围 0.1~10 Hz）。初始荷载取静载强度的 30%（预压），后按 0.1 的应力比逐阶升高应力，每个应力水平循环 100 次，测试试样的抗压强度。

1.2.3 盐冻融 - 荷载耦合损伤试验

配置环境模拟舱（温度范围 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，盐雾浓度 5% NaCl），实现：冻融循环： $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ （4h） $\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ （4h）为 1 个周期，同步施加轴向交变荷载（应力比 0.5，频率 1 Hz），计算试样的损伤度。

1.2.4 疲劳寿命试验

采用强制式混凝土搅拌机搅拌。搅拌时，先开展 1 min 的干拌操作，之后进行 2 min 的湿拌，促使物料全方位混合均匀，并制成 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 试件。在高频振动台上振动 2 min，使材料充分压实、固化定型，成型后 24 h 脱模，并在室内开展为期 28 d 的标养工作，进行四点弯曲疲劳试验，分析疲劳寿命特性。

2 试验分析

2.1 低钙、高钙粉煤灰的干湿循环测试

以 10% LCFA 掺入量与 10% 高钙粉煤灰（High Calcium Fly Ash, HCFA）掺入量为例，在干湿循环条件下，分析不同类型粉煤灰掺入混凝土后，其疲劳特性，掺粉煤灰混凝土的疲劳断口概率指标分析结果如图 1 所示。

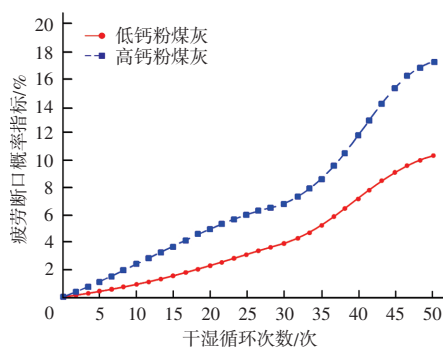


图 1 疲劳断口概率指标分析结果

Fig. 1 Analysis results of fatigue fracture probability index

试验发现，干湿循环引起的毛细吸水 - 脱水过程导致界面过渡区反复收缩膨胀，诱发微裂纹成核。掺 HCFA 试件的增速显著高于 LCFA 试件，因 HCFA 中游离 CaO 含量较高（表 2），易与水分发生体积膨胀反应，加剧界面应力集中。而 LCFA 因其低钙特性（ $\text{CaO} = 7\%$ ）和更高活性 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比（表 2），生成更稳定的水化产物，抑制了界面脱黏。在 100 次干湿循环后，掺 10% LCFA 试件的较 HCFA 试件降低约 28%，验证了其在高湿度交替环境中的耐久性

优势。

2.2 低钙粉煤灰的抗压强度

利用压力试验机分析不同粉煤灰掺量下，计算掺粉煤灰混凝土的抗压强度，分析其疲劳特性。由 2.1 节分析发现，高钙粉煤灰的耐久性较差，故后文均以低钙粉煤灰（LCFA）为例，抗压强度变化情况如图 2 所示。

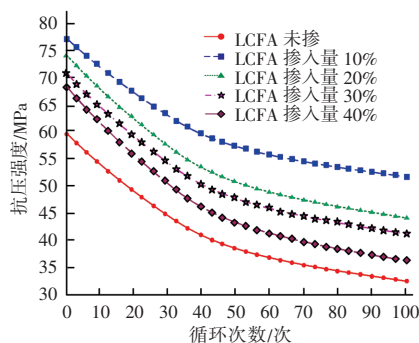


图 2 抗压强度的变化情况

Fig. 2 Shows the variation of compressive strength

试验采用循环式压力试验机施加动态荷载，模拟实际服役中的疲劳应力状态。结果表明，随着循环次数增加，所有试件的抗压强度均呈非线性衰减趋势，表明疲劳荷载导致内部微裂纹扩展及界面过渡区弱化。未掺 LCFA 的对照组试件抗压强度衰减速率最快，而掺入 10% LCFA 的试件表现出最优的抗压强度保持能力，其 28 d 抗压强度较对照组提升约 12%。当 LCFA 掺量超过 20% 时，因火山灰反应不完全及胶凝材料体系密实度下降，抗压强度劣化加剧。此现象可通过疲劳损伤累积理论解释：适量 LCFA 通过填充效应和火山灰效应优化孔隙结构，延缓裂纹萌生；过量掺入则因未反应颗粒形成弱界面，加速损伤累积。

2.3 盐冻融 - 荷载耦合循环作用下的试样损伤度

在盐冻融 - 荷载耦合循环作用下，计算超高海拔风机塔筒基础底板掺粉煤灰混凝土的损伤度，分析其疲劳特性，分析结果如图 3 所示。

在不同荷载等级下，循环次数提升，混凝土均随之提升，说明盐冻融 - 荷载耦合循环作用会不断累积混凝土内部损伤，导致其疲劳劣化。当 LCFA 掺入量相同时，荷载等级越高，掺粉煤灰混凝土的损伤度越大。

材料科学

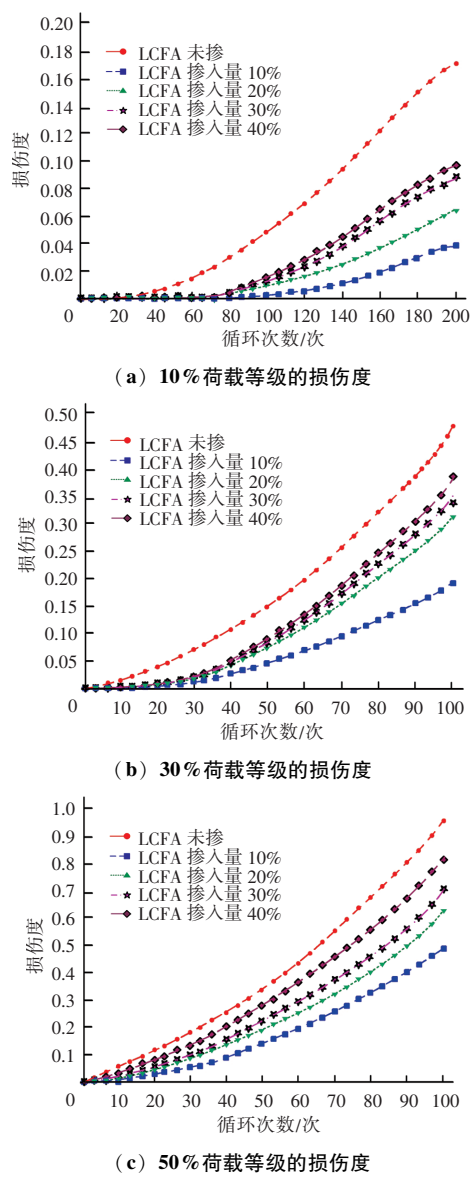


图3 不同荷载等级的损伤度分析结果

Fig. 3 The damage degree analysis results of different load grades

10% 荷载等级下, 循环次数低于 80 次时, 不同 LCFA 掺入量的混凝土损伤度基本相同, 均在 0 左右, 当循环次数大于 80 次时, 掺入 10%~40% LCFA 的混凝土损伤度开始缓慢增长, 且 LCFA 掺入量越多, 掺粉煤灰混凝土损伤度越大。未掺粉煤灰的混凝土损伤度增长速度最快, 且损伤度最大, 说明适量掺入 LCFA 能够延缓混凝土在低荷载等级盐冻融 - 荷载耦合作用下的疲劳损伤发展, 提升其疲劳性能。

30% 荷载等级下, 循环次数低于 20 次时, 不同 LCFA 掺入量的混凝土损伤度基本相同, 均在 0 左右, 当循环次数大于 20 次时, LCFA 掺入量为 10%~

20% 的混凝土, 损伤度开始增长, 增长速度略快于 10% 荷载等级。同样, 未掺粉煤灰的混凝土损伤度增长最快, 损伤度最大, 进一步说明合适的粉煤灰掺量能在中荷载等级作用下, 改善混凝土的抗疲劳性能。

50% 荷载等级下, LCFA 掺入量为 0~40% 的混凝土损伤度均随循环次数的增加而快速提升, 且 10% LCFA 掺入量的混凝土损伤度最小, 说明在高荷载等级下, 掺入适量粉煤灰仍能显著提升混凝土的抗疲劳能力。

综合分析, 在盐冻融 - 荷载耦合循环作用下, 掺入 10% LCFA 的掺入量, 可显著改善超高海拔风机塔筒基础底板混凝土的疲劳特性。

2.4 掺粉煤灰混凝土的疲劳寿命

以未掺 LCFA 与 10% LCFA 掺量的混凝土为例, 分析掺粉煤灰混凝土的疲劳寿命, 分析结果如图 4 所示。

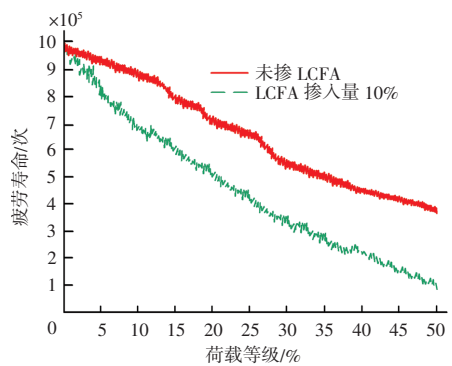


图4 疲劳寿命分析结果

Fig. 4 Fatigue life analysis results

随着荷载等级的提升, 0 和 10% LCFA 掺入量的混凝土, 疲劳寿命均随之降低, 说明超高海拔风机塔筒基础底板中, 无论是掺粉煤灰还是未掺粉煤灰的混凝土, 承受的荷载等级越高, 其能承受的循环次数就越少, 疲劳寿命越短。在相同荷载等级下, 10% LCFA 掺入量的混凝土疲劳寿命明显高于未掺 LCFA 的混凝土, 说明掺入 LCFA 可以有效增强混凝土的抗疲劳性能, 延长其疲劳寿命。

图 4 通过 S-N 曲线 (应力 - 寿命曲线) 量化了不同 LCFA 掺量对混凝土疲劳寿命的影响。试验采用三点弯曲疲劳试验法, 定义疲劳寿命为试件断裂时的循环次数。结果表明, 疲劳寿命与应力水平呈幂函数关系。掺 10% LCFA 试件在相同应力水平下的

疲劳寿命较对照组延长约 35%，归因于粉煤灰对裂缝尖端应力集中的钝化效应。此外，LCFA 的二次水化反应生成 C-S-H 凝胶，填充毛细孔隙并优化水化产物分布，从而延缓疲劳裂纹的跨尺度扩展。当应力水平超过临界阈值（如 50% 极限强度）时，材料进入低周疲劳区，疲劳寿命急剧下降，但 LCFA 的掺入仍显著提升其耐受性。

3 结论

超高海拔地区风机塔筒基础底板所处环境较为恶劣，其结构的安全性，直接受混凝土的疲劳特性影响。为此，研究掺粉煤灰混凝土疲劳特性分析方法，得到以下结论：

- （1）相同干湿循环次数下，掺入 LCFA 的混凝土疲劳断口概率较小，可提升混凝土抗疲劳性能。
- （2）循环作用下，10% LCFA 为最佳掺入量，可显著提升混凝土在循环作用下的抗压强度保持能力，即提升其抗疲劳性能。
- （3）盐冻融 - 荷载耦合循环会累积混凝土内部损伤，增加其损伤度，掺入 10% LCFA 的混凝土损伤度最小，即有效改善混凝土的疲劳特性。成果可运用于超高海拔地区风机塔筒基础底板。

参 考 文 献

[1] 许新勇, 许文杰, 张程, 等. 基于界面数据交换的风电基础流固耦合损伤机理研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31 (5): 1125-1139.

[2] 高翔, 郭宏超, 郭品彰, 等. 矩形钢管混凝土束风机塔筒风振特性研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44 (2): 98-107.

[3] 丁小华, 杨雨清, 朱晓寒, 等. 基于粉煤灰 - 矿渣地聚合物的

露天矿筑路材料疲劳性能研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40 (4): 809-817.

[4] 陈凯. 不同配比下粉煤灰热再生沥青混合料的路用性能评价研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2018, (5): 89-92.

[5] 马士宾, 徐文斌, 许艳伟, 等. 聚丙烯纤维高性能混凝土路用性能研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (10): 26-30.

[6] 张鹏. 高掺量粉煤灰对绿色建筑疲劳性能影响测试 [J]. 煤化工, 2023, 51 (2): 66-69, 100.

[7] 段国伟, 林双良. 混凝土抗硫酸盐腐蚀剂制备与性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 84-89.

[8] 卜娜蕊, 刘睿, 方炜, 等. 建筑用粉煤灰再生混凝土的力学性能和抗冻性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (5): 5223-5229.

[9] 李伟, 孙海燕, 赵杨, 等. 氯化铵加速侵蚀下混凝土性能劣化及微观机理影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 11-16.

[10] 莫黎, 魏留明, 周强, 等. 不同养护制度下粉煤灰混凝土压缩冻融损伤演化 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (7): 101-104.

[11] 邵善庆, 龚爱民, 王福来, 等. 盐侵冻融作用下非饱和掺碱粉煤灰混凝土损伤研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (2): 222-230.

[12] 张启懿, 邹春霞, 郭晓松, 等. NaOH 改善粉煤灰混凝土微结构及抗风蚀 - 冻融耐久性能 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2024, 54 (4): 131-140.

[13] 贺雄飞, 陈亚豪, 张新东, 等. 超细粉煤灰形态对超高性能混凝土 (UHPC) 性能和结构的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38 (增刊 1): 249-253.

[14] 陈祥花, 劳国威, 郑述芳, 等. 粉煤灰掺量对全再生粗骨料自密实混凝土工作性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 531-539.

[15] 董必钦, 张泉, 刘源涛, 等. 硫酸铝对高掺量流化床粉煤灰基泡沫混凝土性能的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38 (20): 174-181.