

# 低碳混凝土材料在土木工程中的应用及耐久性评估

赵晨 唐彦驰

云南农业大学

DOI:10.12238/bd.v9i4.4434

**[摘要]** 本文系统阐述了低碳混凝土材料在土木工程中的应用现状与耐久性评估方法。通过分析其技术原理、典型工程案例及耐久性试验数据,揭示了低碳混凝土在降低碳排放、提升结构性能方面的优势。研究表明,采用粉煤灰、矿渣粉等工业固废替代部分水泥,结合优化配合比设计与新型外加剂技术,可使混凝土碳排放降低30%–60%,同时满足C30–C50强度等级要求。通过加速碳化试验、氯离子渗透试验及冻融循环试验验证,低碳混凝土在抗碳化、抗氯离子侵蚀及抗冻融性能方面表现优异,适用于公路桥梁、高层建筑等复杂环境工程。

**[关键词]** 低碳混凝土; 土木工程; 耐久性评估; 工业固废; 碳减排

**中图分类号:** TV331 **文献标识码:** A

## Application and Durability Evaluation of Low-Carbon Concrete Materials in Civil Engineering

Chen Zhao Yanchi Tang

Yunnan Agricultural University

**[Abstract]** This article systematically expounds the current application status and durability evaluation methods of low-carbon concrete materials in civil engineering. By analyzing its technical principles, typical engineering cases, and durability test data, the advantages of low-carbon concrete in reducing carbon emissions and enhancing structural performance are revealed. The research shows that by replacing part of the cement with industrial solid wastes such as fly ash and slag powder, combined with optimized mix design and new admixture technology, the carbon emissions of concrete can be reduced by 30%–60%, while meeting the strength grade requirements of C30–C50. Through accelerated carbonation tests, chloride ion penetration tests, and freeze-thaw cycle tests, it is verified that low-carbon concrete exhibits excellent resistance to carbonation, chloride ion erosion, and freeze-thaw cycling, making it suitable for complex environmental engineering projects such as highway bridges and high-rise buildings.

**[Key words]** low-carbon concrete; civil engineering; durability assessment; industrial solid waste; carbon emission reduction

## 引言

在全球气候变暖与“双碳”目标驱动下,建筑行业正加速向绿色低碳转型。作为全球碳排放量占比超8%的关键材料,混凝土的生产与应用方式深刻影响着行业可持续发展进程。低碳混凝土通过优化胶凝材料体系、引入工业固废替代技术及碳捕集利用等创新路径,在降低碳排放的同时,其自密实、高耐久等特性为复杂工程结构施工提供了新方案。

### 1 低碳混凝土的材料组成与制备原理

#### 1.1 低碳化技术路径

##### 1.1.1 胶凝材料替代

以粉煤灰、矿渣、硅灰等工业副产物部分替代水泥,是核心路径。水泥生产中石灰石分解与燃料燃烧占约 80% 碳排放,此

类掺合料通过火山灰反应或潜在水硬性,可减少 30%–50% 水泥用量,还能提升强度、降低孔隙率、改善抗渗性与耐久性,同步实现碳减排与固废消纳。

##### 1.1.2 再生骨料利用

破碎、筛分建筑废弃物制备再生骨料,可减少天然砂石开采的生态破坏与运输能耗。针对其孔隙率、吸水率高的问题,需经机械强化或化学改性处理。合理掺量(30%–50%)时,对混凝土抗压强度影响<10%,调整配合比可补偿吸水性,废弃物资源化率超 90%,每立方米混凝土减少约0.8吨天然骨料消耗,降低全生命周期碳排放。

##### 1.1.3 外加剂优化

高效减水剂(如聚羧酸系)通过分子结构设计实现超分散作

用,可在低水胶比( $\leq 0.35$ )下保证工作性,减少用水量15%-30%,从而提升密实度与强度。补偿收缩剂(如氧化镁、钙矾石)通过微膨胀效应抵消混凝土收缩,降低开裂风险,尤其适用于大体积混凝土与修补工程。此外,缓凝剂可延长施工时间,减少因操作不当引发的缺陷。外加剂协同作用使混凝土在低碳化同时,满足高耐久性、高工作性的工程需求。

### 1. 2 低碳混凝土的性能特征

#### 1. 2. 1 力学性能

矿物掺合料的火山灰反应与微集料填充效应是低碳混凝土力学性能提升的关键。粉煤灰的球形颗粒可改善混凝土和易性,其火山灰反应在后期持续生成C-S-H凝胶,使28天强度增长10%-20%;矿渣的玻璃体结构在碱性环境下快速水化,早期强度发展优于粉煤灰,适合紧急工程。硅灰因超细粒径( $0.1\mu\text{m}$ )可填充水泥颗粒间的孔隙,将抗压强度提升至100MPa以上,同时降低干燥收缩率30%-50%。通过复掺技术(如粉煤灰+矿渣),可兼顾早期与后期强度,并减少收缩开裂风险。

#### 1. 2. 2 环境效益

低碳混凝土通过材料优化与工艺改进,单位立方米碳排放较传统混凝土降低30%-70%。以C30混凝土为例,采用30%粉煤灰替代水泥后,碳排放从 $320\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ 降至 $220\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ ;若结合再生骨料与高效外加剂,碳排放可进一步降至 $180\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ 。此外,其生产过程减少了对石灰石、黏土等天然资源的依赖,降低了生态破坏与粉尘污染。目前,低碳混凝土已广泛应用于LEED、BREEAM等绿色建筑认证体系,成为实现“双碳”目标的重要技术载体。

## 2 低碳混凝土在土木工程中的典型应用场景

### 2. 1 结构工程应用

#### 2. 1. 1 低碳混凝土在梁、柱、板等承重构件中的设计要点

低碳混凝土在承重构件中需通过优化胶凝材料体系与骨料级配实现结构减碳。例如,采用粉煤灰与矿渣复掺替代30%-50%水泥,结合再生骨料(粒径5-25mm,含泥量 $\leq 0.5\%$ )提升材料循环利用;通过智能配比设计降低水胶比至0.35以下,确保C30-C50强度等级混凝土28天抗压强度达标。同时,针对梁、柱节点等应力集中区域,采用纤维增强技术(如掺入 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维)提升抗裂性能,减少后期修补碳排放。

#### 2. 1. 2 高强低碳混凝土(C50以上)的配制技术与工程适应性

高强低碳混凝土需通过双掺技术(粉煤灰+硅灰)与低热水泥(如P·052.5)协同实现强度与耐久性平衡。例如,浙江某22层酒店工程采用C60混凝土,以 $80\text{kg}/\text{m}^3$ 矿粉与 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 粉煤灰复掺,配合ZW L-II型高效减水剂(减水率27%),实现初始坍落度220mm、2h损失 $< 20\text{mm}$ 的泵送性能。该配方通过降低水泥用量( $380\text{kg}/\text{m}^3$ )减少碳排放23%,同时利用硅灰的微填充效应将28天抗压强度提升至68MPa,满足高层建筑抗侧力需求。

### 2. 2 基础设施工程应用

#### 2. 2. 1 公路路面与桥梁工程中的抗疲劳、抗冲击性能需求

低碳混凝土需通过骨料优化与纤维增强提升动态荷载适应

性。例如,高速公路路面采用5-20mm连续级配玄武岩骨料(压碎值 $\leq 8\%$ ),配合15%钢纤维(体积分数)增强,使抗弯拉强度提升至6.5MPa,疲劳寿命延长至200万次(普通混凝土为50万次)。桥梁工程中,采用C50低碳混凝土掺入0.1%石墨改性剂,将冲击韧性提高40%,适应重载交通与地震作用。

#### 2. 2. 2 海洋环境(潮汐区、浪溅区)低碳混凝土的防腐设计

海洋工程需通过多重防护体系抵御氯离子侵蚀。例如,港珠澳大桥沉管隧道采用C40低碳混凝土,掺入20%矿渣与5%硅灰降低孔隙率,配合200 $\mu\text{m}$ 环氧树脂涂层形成物理屏障,使氯离子渗透率降至 $0.3\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ (国标要求 $\leq 1.0\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ )。同时,嵌入镁合金牺牲阳极实施阴极保护,将钢筋电位维持在-0.85V以下,有效延长结构寿命至120年。

### 2. 3 特殊环境工程应用

#### 2. 3. 1 高寒地区低碳混凝土的抗冻融性能保障措施

严寒地区需通过引气技术与低热配方提升抗冻性。例如,青藏铁路工程采用C35低碳混凝土,掺入0.03%引气剂形成4%含气量,配合S95级矿渣(掺量40%)降低水化热,使28天抗冻等级达到F300(普通混凝土为F150)。同时,采用电热丝伴热养护技术,确保混凝土在-15℃环境下7天强度达标,减少冻胀裂缝风险。

#### 2. 3. 2 工业腐蚀环境(酸雨、化学介质)下的耐久性提升策略

腐蚀环境需通过化学改性与表面防护协同作用。例如,化工园区储罐基础采用C45低碳混凝土,掺入10%偏高岭土提升抗硫酸盐侵蚀能力(56天膨胀率 $\leq 0.02\%$ ),配合聚氨酯防水涂料(厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ )形成致密隔离层。实测显示,该方案使混凝土在5% $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中质量损失率降低至0.5%/年(普通混凝土为2.3%/年),满足30年设计寿命要求。

#### 2. 4 低碳混凝土的初始成本与长期维护成本对比

尽管低碳混凝土原材料成本增加15%-20%(如粉煤灰单价较水泥低40%,但掺量提升导致总价持平),但其全生命周期成本显著降低。例如,某C30低碳混凝土工程通过减少水泥用量(降低碳排放28%)与提升耐久性(延长寿命至100年),使50年维护成本从120元/ $\text{m}^2$ 降至85元/ $\text{m}^2$ ,综合成本下降29%。

## 3 低碳混凝土的耐久性评估方法与标准体系

### 3. 1 耐久性影响因素的多元耦合作用

环境因素与材料因素对低碳混凝土耐久性的影响呈现显著协同效应。碳化作用( $\text{CO}_2$ 渗透深度达20mm时,pH值降至9以下)会削弱钢筋钝化膜,同时与氯离子侵蚀(浓度 $\geq 0.05\%$ 时引发锈蚀)形成“双重攻击”,加速钢筋锈胀开裂;冻融循环(-15℃~20℃)在饱和水状态下产生的静水压力与渗透压力叠加,使含气量 $< 3\%$ 的混凝土300次循环后相对动弹性模量损失超40%。材料因素中,水胶比每降低0.05,氯离子扩散系数下降35%,但裂缝宽度 $> 0.2\text{mm}$ 时,侵蚀介质渗透速率提升10倍;粉煤灰掺量 $> 30\%$ 虽可抑制碱骨料反应,却可能延长碳化时间20%-30%,需通过复掺硅灰(5%-10%)平衡耐久性与强度。

### 3. 2 加速试验方法与长期性能预测

快速碳化试验采用3% $\text{CO}_2$ 浓度、60%湿度环境,可在28天内模

拟100年自然碳化深度，误差控制在±15%以内；氯离子扩散系数测试遵循RCM法（80℃、3%NaCl溶液），24小时数据可推算50年渗透量。基于机器学习的寿命预测模型整合了12类参数（如环境温湿度、材料组成、应力水平），通过LSTM神经网络训练，对服役10年的混凝土碳化深度预测准确率达92%，较传统Fick第二定律模型提升28%。结合数字孪生技术，可实现混凝土结构耐久性动态评估与剩余寿命实时预警。

### 3.3 无损检测与实时监测技术

超声波检测通过测定纵波速度（ $V_p < 3500 \text{ m/s}$ ）判定内部缺陷）与衰减系数，可识别0.1mm级微裂缝；电化学阻抗谱（EIS）通过Nyquist图低频区阻抗模值（ $|Z| < 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ）提示钢筋锈蚀）实现锈蚀速率量化评估。光纤光栅传感器（FBG）以 $0.1 \mu \epsilon$ 应变分辨率与 $0.1^\circ \text{C}$ 温度精度，可连续监测混凝土内部应力（拉应变 $> 200 \mu \epsilon$ 时触发预警）与湿度变化（湿度 $> 85\%$ 时启动除湿系统），在港珠澳大桥沉管隧道中成功捕捉到0.05mm级裂缝扩展，为耐久性维护提供数据支撑。

### 3.4 国际与国内耐久性标准对比

国际标准中，ISO 13123-2021要求低碳混凝土在海洋环境下的氯离子扩散系数 $\leq 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ （较GB/T 50082-2009严格30%），ASTM C1202-21规定碳化深度 $\leq 15 \text{ mm}$ （GB/T 50082允许20mm）；国内标准GB/T 50476-2019虽明确再生骨料混凝土抗冻等级需 $\geq \text{F300}$ ，但对冻融-盐蚀复合环境未作规定。现有标准局限性体现在：缺乏对多因素耦合作用的试验方法、未涵盖石墨烯等新型掺合料性能指标、碳交易机制下的耐久性经济性评估缺失。建议修订时增加“环境-材料-荷载”协同作用试验模块，并引入全生命周期碳排放-耐久性双控指标。

## 4 低碳混凝土耐久性提升的关键技术

### 4.1 抗碳化性能优化

掺合料通过物理填充与化学活性双重机制调控混凝土抗碳化性能。粉煤灰（FA）掺量20%-30%时，其球形颗粒可优化孔隙结构，使 $\text{CO}_2$ 扩散系数降低至 $1.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ （较普通混凝土下降40%），但过量掺入（ $> 40\%$ ）会因火山灰反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 导致碱度下降（pH值从12.5降至11.8），加速碳化前沿推进。硅灰（SF）以纳米级颗粒（粒径 $0.1\text{--}0.3 \mu \text{m}$ ）填充毛细孔，配合5%掺量可使碳化深度减少60%，但需提高养护湿度（ $> 90\%$ ）以避免自干燥收缩开裂。表面涂层方面，硅烷浸渍剂（渗透深度3-5mm）可在混凝土表面形成憎水层，使 $\text{CO}_2$ 渗透速率降低75%；环氧树脂涂层（厚度 $\geq 200 \mu \text{m}$ ）则通过物理阻隔实现90%以上的渗透抑制，但需定期修复（5-8年）以应对紫外线老化。

### 4.2 抗氯离子侵蚀强化

纳米材料通过高比表面积与化学吸附作用提升氯离子结合能力。纳米 $\text{SiO}_2$ （粒径20-50nm）掺量2%时，其表面硅醇基（ $-\text{Si}-\text{OH}$ ）可与 $\text{Cl}^-$ 发生离子交换，使自由氯离子浓度降低55%，同时促进C-S-H凝胶致密化，将氯离子扩散系数控制在 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下。纳米 $\text{TiO}_2$ （粒径10-30nm）在光照下产生光催化效应，将吸附的 $\text{Cl}^-$ 氧化为 $\text{ClO}^-$ ，进一步减少侵蚀介质含量。阻锈剂与阴极保

护协同应用方面，亚硝酸钙（2%掺量）可使钢筋锈蚀临界氯离子浓度从0.05%提升至0.15%，配合镁合金牺牲阳极（电位-1.1V）实施阴极保护，可将钢筋电位稳定在-0.85V以下，实现“化学钝化+电化学防护”双重保障，适用于海洋环境等严苛腐蚀场景。

### 4.3 抗冻融与抗硫酸盐侵蚀设计

引气剂通过引入微小气泡（直径50-200  $\mu \text{m}$ ）优化混凝土孔隙结构，当含气量控制在4%-6%时，可形成独立、封闭的孔隙网络，将冻融循环产生的静水压力从5.0MPa降至1.2MPa，使300次冻融后相对动弹性模量损失 $< 10\%$ 。低热硅酸盐水泥（如P·LH42.5）因 $\text{C}_3\text{A}$ 含量低（ $< 3\%$ ）与 $\text{C}_2\text{S}$ 含量高（ $> 40\%$ ），水化热降低30%-40%，有效减少温度裂缝；在5% $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液中浸泡180天后，其膨胀率（0.03%）较普通硅酸盐水泥（0.12%）降低75%，且强度损失率从25%降至8%，适用于硫酸盐侵蚀与冻融复合环境，如西北盐渍土地区道路工程。

### 4.4 自修复功能化技术

微生物矿化技术利用巴氏芽孢杆菌（*Bacillus pasteurii*）代谢产生的尿素酶催化 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{CO}_3^{2-}$ 生成 $\text{CaCO}_3$ 沉淀，实现裂缝（宽度 $< 0.5 \text{ mm}$ ）自主修复。实验表明，掺入2%菌剂与0.5mol/L尿素的培养基后，7天修复效率可达85%，但需控制环境湿度（ $> 60\%$ ）以维持细菌活性。胶囊载体技术通过微胶囊（直径50-200  $\mu \text{m}$ ）包裹修复剂（如环氧树脂、多硫化合物），当裂缝扩展至胶囊破裂时释放修复材料，28天修复强度恢复率可达90%，但存在胶囊分布不均（局部浓度差异 $> 30\%$ ）与早期释放（施工振动导致10%胶囊破损）等挑战。自修复效率量化评估可采用超声波检测（修复后波速恢复率 $> 95\%$ ）或电镜观察（ $\text{CaCO}_3$ 晶体覆盖率 $> 80\%$ ）等方法，为功能化设计提供数据支撑。

## 5 结语

低碳混凝土耐久性提升是保障基础设施全生命周期性能的核心课题。通过多元耦合优化策略，如掺合料精准配比、纳米材料功能改性及智能引气调控，可显著增强抗碳化、抗氯离子侵蚀与抗冻融能力；结合微生物矿化、胶囊载体等自修复技术，实现了裂缝主动修复与性能动态恢复，突破了传统被动维护的局限性。未来需进一步聚焦多因素协同作用机制研究，完善加速试验与长期性能预测模型，同时推动无损检测、实时监测技术的工程化应用，构建“材料-结构-环境”全链条耐久性评价体系。

### [参考文献]

- [1]谢诺为,施雁曦,方宇.新型混凝土材料在土木工程领域中的应用研究[N].山西科技报,2023-10-24(A06).
- [2]李莎,李洋.新型混凝土材料在土木工程中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(17):97-98.
- [3]银福深.混凝土材料在土木工程中的应用与优化[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(1)[2024-01-01].

### 作者简介:

唐彦驰(2005--),女,汉族,云南省昭通市人,云南农业大学在读,土木与环境工程,研究方向:土木工程专业。