

# 建筑材料碳化深度检测技术与耐久性评估关系研究

赵伟

芜湖科欣建设工程检测有限责任公司, 安徽 芜湖 241100

[摘要]在长期服役期间, 建筑材料容易被二氧化碳侵蚀从而引发碳化反应致使碱度下降、钢筋保护性能被削弱, 进而结构耐久性受到严重影响, 而碳化深度是衡量材料劣化程度的重要指标, 精准检测它对寿命预测和性能评估很关键, 常用技术有酚酞显色法、激光雷达扫描、X 射线衍射和智能图像识别等且各有适用范围与精度优势, 量化碳化扩展规律就能构建基于扩散理论的耐久性预测模型, 给建筑结构安全性监测和维护管理提供数据支撑。

[关键词]建筑材料; 碳化深度; 检测技术; 耐久性评估; 寿命预测

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17251

中图分类号: TU375

文献标识码: A

## Research on the Relationship between Carbonization Depth Testing Technology and Durability Evaluation of Building Materials

ZHAO Wei

Wuhu Kexin Construction Engineering Testing Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241100, China

**Abstract:** During long-term service, building materials are easily corroded by carbon dioxide, leading to carbonization reactions and a decrease in alkalinity, weakening of steel protection performance, and serious impact on structural durability. Carbonization depth is an important indicator to measure the degree of material degradation, and accurate detection is crucial for life prediction and performance evaluation. Common technologies include phenolphthalein colorimetric method, laser radar scanning, X-ray diffraction, and intelligent image recognition, each with its own scope of application and accuracy advantages. Quantifying the expansion law of carbonization can construct a durability prediction model based on diffusion theory, providing data support for building structural safety monitoring and maintenance management.

**Keywords:** building materials; depth of carbonization; testing technology; durability assessment; prediction

### 引言

城市建设规模不断扩大使得建筑物服役年限延长, 对材料性能有了更高要求。碳化是影响建筑材料耐久性的关键因素, 常使钢筋锈蚀、结构削弱、制约工程寿命, 是重要隐患, 如何精准掌握碳化发展程度并有效评估其对耐久性的影响, 成了材料性能研究和结构维护的热点课题。多种先进检测手段与碳化深度和寿命预测的关联有望为建筑结构安全管理提供科学支撑。

### 1 建筑材料碳化机理及影响因素

#### 1.1 碳化反应基本原理

建筑材料使用时暴露在大气环境里, 二氧化碳从空气中慢慢渗进混凝土等材料孔隙并和氢氧化钙起化学反应生成碳酸钙且释放出水分, 这使得材料内部碱性慢慢降低, 钢筋所处环境的钝化膜被破坏而容易锈蚀, 这是建筑结构耐久性下降的根源。

碳化过程不只是化学反应的产物, 物理扩散机制也对其有着很大的支配作用, 二氧化碳以气体扩散的方式进到材料内部并顺着孔隙路径转移, 碳化带形成的速度与范围直接受其渗透深度的影响, 材料孔隙率、水胶比越高, 渗透性就越强, 碳化反应也就越剧烈, 结构紧密性在碳化反

应里起着决定性的作用。

碳化过程中 pH 值的变化会直接影响钢筋腐蚀阈值, 尤其 pH 值降到 9 以下时钢筋表面钝化膜被破坏而加速后续锈蚀过程, 并且碳化深度能反映材料的老化程度并直接决定剩余服役寿命长短。

#### 1.2 碳化影响因素分析

碳化发展受环境因素影响十分明显, 尤其是温度、湿度与 CO<sub>2</sub> 浓度的综合作用。环境湿度处于 50%~70% 之间时碳化速率最快, 材料孔隙里水够多能促进化学反应且又没饱和到妨碍气体扩散。高温且通风好的环境有助于 CO<sub>2</sub> 渗透, 碳化进程也会因此加快。

材料自身特性对碳化行为也有重要影响, 水胶比高时材料孔隙率会增大从而使碳化通道更畅通, 矿物掺合料如粉煤灰、矿渣微粉等的掺入会使水化产物组成和孔结构改变, 这对碳化过程或许有促进作用或许有一定抑制作用, 高性能混凝土的使用能有效提高密实性让碳化进程减缓。

材料早期组织结构的形成被施工和养护质量决定性地影响, 浇筑后养护要是不充分, 表面会快速失水, 微裂纹和毛细孔通道就会形成, 这给二氧化碳早期渗透提供了方便, 而且结构构造里保护层厚度不足的话, 碳化也更容易

易到达钢筋区域，这会让腐蚀风险增大，结构寿命缩短。

## 2 碳化深度检测技术分类与比较

### 2.1 物理化学方法

目前，物理化学检测法是碳化深度初级检测手段里应用最广的，酚酞试剂喷洒法操作简单、成本低，因此在实验室和施工现场被广泛运用，检测的时候，把试剂喷在混凝土新鲜断面上，靠颜色变化来判断碳化与未碳化区域的界限，一般来说，紫红色意味着未碳化，失色或者灰白色表明已碳化，直观识别性挺好。

从混凝土构件取样在实验室用标准溶液测定 pH 值的酸碱滴定法能判断碳化区域与非碳化区域界限，它比酚酞喷洒法精度更高，可弥补酚酞喷洒法在识别模糊区域的不足，碳化深度界面有争议时适合用它验证分析，但它操作流程麻烦，包含溶液配制、滴定反应、数值比对等环节，对试剂纯度、环境温度、操作规范要求都高，在施工现场难以大规模推广。

物理化学类检测手段门槛相对低且操作原理简单，但在实际应用时仍有一定局限性，在复杂结构和大体构件里，滴定法高效检测能力不足且检测结果易受人为判断误差、试剂浓度波动、材料含水率等因素影响而产生偏差，在实际工程里该方法更多作为参考手段与无损检测或者智能算法辅助技术一起使用，以使碳化深度判断更全面准确。

### 2.2 无损检测技术

ChatGPT 说：

无损检测技术有着对结构实体无损伤、检测效率高的特性，在役结构碳化监测中逐渐占据重要地位，而超声波法通过分析声波在混凝土里的传播速度和衰减状况，间接推断材料的密实程度与劣化程度，能有效捕捉碳化引发的物理性能变化，适用于大范围初筛和趋势分析。

碳化后的混凝土其孔隙里离子迁移能力下降且电导率发生变化，电阻率测量法就是利用这一特性来推断混凝土的碳化程度，潮湿环境下以及外露构件的检测尤其适用该方法；雷达探测技术靠发射高频电磁波来获取混凝土内部结构层次和界面反射信息，在识别碳化层厚度、裂缝位置以及保护层损伤等方面优势明显，在桥梁、隧道等复杂结构中的表现很突出。

X 射线衍射技术作为高精度检测手段，能深入识别混凝土里碳酸钙的形成状况以及物相演变，给碳化机制分析予以微观数据支撑，但这种技术一般要依靠大型设备和专业操作，检测成本高、周期长，受现场环境约束大，在一般工程项目里难以批量使用，更多是用在实验研究和重要结构检测上。

### 2.3 图像处理与智能算法辅助检测

人工智能和计算机视觉技术迅猛发展，碳化深度检测里图像处理与智能算法的应用也越来越成熟，高清摄像设备用来获取混凝土断面图像，再结合图像边缘识别、颜色

分割、灰度分析等图像处理技术就能快速区分碳化区域和未碳化区域，深度学习模型（像卷积神经网络 CNN）被引入后，在大数据训练的基础上能自动识别碳化特征，减少了人为干预造成的误差且提升了检测的客观性与一致性。

碳化表面特征不仅能被图像识别系统分类，而且图像识别系统还能结合像素深度信息、灰度分布特征生成碳化深度等值图谱，部分系统支持三维建模，通过结构光或者激光扫描获取构件断面空间形态从而实现碳化区域立体可视化展示，这种方法在大规模结构体的连续监测任务里特别适用，能快速处理大量图像数据，在复杂环境下也能保持较高的识别准确率和检测效率。

在此基础上，图像识别系统要是和无人机、智能机器人等巡检平台集成起来，就能实现高空、狭窄、危险区域的非接触式图像采集与自动判读，而借助边缘计算设备进行现场数据预处理、云端模型推理平台完成识别与诊断，这样就能达成碳化检测流程全过程自动化、智能化、可视化，极大提升建筑结构健康评估的科技含量和实际可操作性。

### 2.4 各技术适用性评估

在实际工程里要选择碳化检测技术需综合考虑工程规模、结构类型、检测目标、经济条件等因素，若为初步筛查或者教学演示则酚酞试剂喷洒法这种简单方法可用，其成本低效率高能快速得到碳化范围基本信息，而对于对耐久性要求高或者服役年限长的结构要获取详细数据便更多依靠雷达成像、X 射线衍射或者图像识别这种高精度技术了。

物理化学法和部分超声波检测操作复杂度低、技术门槛不高且设备便携，从操作复杂度与适用人群角度看，施工现场的一线检测人员常用这两种方法，而图像识别、X 衍射以及电磁成像类方法存在算法训练、仪器调试、结果分析等情况，需要有专业背景的技术人员来操作，科研单位、检测机构或者对结构安全性要求特别高的重点工程适合用这些方法。

未来，碳化检测会朝着多技术融合与智能集成的方向发展，常规构件能用低成本快速技术周期性初筛而异常数据或关键节点则需用精密仪器进一步复核，物联网、边缘计算和人工智能相结合构建基于实时监测和预测分析能让建筑材料耐久性风险实现动态感知与智能调控的全生命周期碳化管理体系。

## 3 碳化深度与建筑材料耐久性关系分析

### 3.1 碳化深度与钢筋锈蚀界限关系

混凝土结构中钢筋的耐久性直接受到碳化深度扩展的威胁，一般来说，钢筋保护层处于碱性环境（pH 值在 12.5）时能形成稳定的钝化膜从而抑制钢筋生锈，要是碳化深度达到或者超过保护层厚度，pH 值降到 9 以下，钝化膜就会被破坏，钢筋暴露在侵蚀环境里，很快发生氧化反应，形成锈蚀层。

钢筋锈蚀会使其截面尺寸被削弱且锈胀作用对混凝土产生劈裂应力,从而引发裂缝扩展、保护层剥落,导致结构承载力和耐久性明显下降。尤其在湿润-干燥交替或者 CO<sub>2</sub> 浓度较高的工业大气环境中,碳化速率提升,钢筋会提前发生腐蚀,如表 1 所示。

表 1 不同碳化深度与保护层厚度的对比关系直接决定结构的安全等级

项目	保护层厚度 /mm	实测碳化深度 /mm	是否达到腐蚀风险
混凝土柱构件 A	25	22	否
混凝土梁构件 B	30	32	是
墙体板块构件 C	20	20	临界

可见,碳化深度一旦逼近甚至超过保护层厚度,构件就会处于高风险锈蚀状态,这需要引起重视且维护干预措施也得跟上。

### 3.2 材料寿命预测模型构建

在碳化过程的研究里,人们广泛运用 Fick 第一扩散定律来描述 CO<sub>2</sub> 于混凝土中的扩散行为且碳化深度 X(t) 常跟时间 t 的平方根成正比,表达式为:

$$X(t) = K \cdot \sqrt{t}$$

碳化系数为 K,它和环境、材料密实度、水胶比等因素有着紧密联系,这一模型能用来预测碳化扩展的趋势还能预计到达钢筋的时间。

现场碳化深度监测数据与模型参数拟合一下就能反推出材料的剩余耐久年限,就像结构龄期 10 年时实测碳化深度 15mm,若给定预测碳化速率,大概 16 年时碳化就会穿透 25mm 的保护层,得在这之前安排防护加固或者表面处理。K = 5mm/√年 进一步,结构服役期健康监测系可嵌入该模型以实现动态预测与风险预警功能,利用传感器持续采集的碳化相关环境数据(温湿度、CO<sub>2</sub> 浓度)实时调整碳化速率系数从而实现更精准的寿命估算。

### 3.3 耐久性评估体系中的碳化指标权重分析

综合耐久性评估体系里,碳化深度这一指标可量化且能直观反映材料老化程度,评估价值较高,和氯离子侵蚀、冻融破坏等其他影响因素比起来,碳化影响更普遍且在城市常态环境下也更易发生。

各类指标可通过构建多因素综合评价模型(像 AHP 法、模糊综合评价法之类的)被赋权分析,就拿典型混凝土结构耐久性指标体系来说,碳化深度、氯离子含量、渗透系数以及冻融损伤指数的权重比可能分别为 0.35、0.30、0.20、0.15,整体评估时碳化深度的主导地位从中得以反映。

结构维护策略制定时,常将碳化指标用作结构巡检优先级排序依据,碳化深度大的区域需优先进行表面阻碳涂层加固、喷洒碳化抑制剂等修复措施,以保证钢筋处于安全的碱性环境、延缓材料性能退化并提升全寿命周期里结构的可靠性和经济性。

## 4 碳化深度监测在耐久性管理中的实践意义

### 4.1 在役结构评估中的应用价值

在役建筑结构长期服役时易受环境因素影响,碳化作为最常见的劣化机制之一持续威胁结构性能,定期开展碳化深度检测能及时掌握混凝土保护层碳化扩展状态并明确是否逼近钢筋层,防止钢筋腐蚀导致结构破坏。

检测数据能让维护策略更具针对性,促使维护从“计划式”变为“状态式”,碳化深度没超警戒值时,表面密封、阻碳涂层这类经济型修复措施就能用上以延缓碳化发展,检测结果超保护层厚度了就得马上安排局部修补或者结构加固,防止钢筋锈蚀带来安全隐患。

若把碳化监测归入建筑资产管理系统,工程全生命周期内的经济性就能得到提升,因能精准掌握劣化趋势、合理安排养护周期和投入资源,避免盲目维修和过度干预,提升资源配置效率,使结构安全性与经济性统一起来。

### 4.2 与耐久性标准的融合路径

当前建筑耐久性设计大多以经验规范作基础而实际环境和服役状态的数据支持却很缺乏,碳化深度监测有力地补足了这一短板,碳化检测结果建议纳入《混凝土结构耐久性设计规范》《建筑结构检测标准》等国家或行业标准中作为强制验收或者定期评估的指标。

碳化允许深度、安全预警限值、加固干预阈值等技术参数被量化界定后结构安全评价就有了可操作性依据,设定不同服役年限阶段的碳化深度控制指标,像服役 10 年碳化深度不超 15mm、服役 20 年不超 22mm 之类的便可当作验收和检测的评价标准。

将碳化监测数据的记录制度化并利用历年检测数据构建数据库,就能对结构健康状况进行长期追踪和趋势分析,从而为政策制定、规范修订和行业标准完善提供支撑以提高建筑耐久性管理的系统性与科学性。

### 4.3 未来发展方向展望

建筑信息化和智能化水平提高使碳化深度监测向着自动化和数字化方向发展,未来能在关键结构部位设置智能传感器网络以实时监测混凝土湿度、温度、CO<sub>2</sub> 浓度等影响碳化的因子,且边缘计算可及时推算碳化进展从而构建在线预警机制。

碳化监测数据的远程采集与云端管理将通过物联网技术的应用得以实现,大量监测数据上传之后能借助大数据分析挖掘出碳化发展的区域规律、季节性趋势等,从而为不同地区、不同结构形式的碳化控制提供精准模型和决策依据。

多源检测手段的融合建模成为发展重点,将图像识别、X 射线、电阻率和传感器数据相结合构建多模态碳化分析模型以提高预测精度和鲁棒性,利用人工智能技术进行建模训练就能实现个性化、结构级别的碳化寿命预测,这有助于建筑行业迈向更高质量、更长寿命的目标。

## 5 结语

准确检测建筑材料的碳化深度对评估其耐久性能很重要且是保障建筑结构安全、延长服役寿命的关键,系统梳理碳化机理、分析检测技术、构建寿命预测模型、探讨在实际管理中的应用价值就能早期识别碳化过程并动态控制它,以后将碳化监测技术和智能化手段深度融合、完善标准体系建设,使碳化评估常态化、科学化,为建筑结构全生命周期维护提供有力的技术支撑和理论指导。

### [参考文献]

[1] 湓文豪. 渗透结晶材料强化再生骨料混凝土性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[2] 顾立龙. 青岛地区砖砌体历史建筑粘结修复材料研究[D]. 山东: 青岛理工大学, 2024.

[3] 刘皓翔. 带缺陷开挖骨料混凝土抗碳化耐久性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

[4] 薛晓. 利用 BIM 进行建筑材料耐久性与稳定性分析的技术[J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(11): 76-78.

[5] 吕秀文. 全再生碳化强化粗/细骨料混凝土耐久性研究[D]. 河南: 河南理工大学, 2023.

作者简介: 赵伟(1986.10—), 毕业院校: 大连理工大学, 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 芜湖科欣建设工程检测有限责任公司, 职务: 结构室主任, 职称级别: 中级。