

粤汉铁路混凝土组成和微结构特性

宋 奔^{1,2}, 何健辉^{1,2}, 杨 露¹, 王发洲^{1,2}, 胡曙光^{1,2}

(1. 武汉理工大学硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 粤汉铁路已有近百年历史, 为长龄期混凝土性能评价提供了宝贵研究机会。本工作采用 X 射线衍射、热重分析、扫描电子显微镜、能谱仪和 X 射线计算机断层扫描研究了铁路承台、轨枕和桥墩 3 个部位混凝土材料的水化产物相组成与微结构特性。结果表明, 粤汉铁路混凝土轨枕部位的抗压强度高达 110.68 MPa, 电通量为 868 C, 暴露环境显著影响水化产物分布。背散射图像分析方法(BSE/IA)表征显示, 承台、轨枕和桥墩的界面过渡区(ITZ)厚度分别为 50、30 μm 和 40 μm 。此外, 轨枕混凝土的临界孔隙为 0.1 mm^3 , 大孔主导总体孔隙率但未见贯通裂隙, 整体结构致密化。本工作为评估混凝土的长龄期服役性能与高性能水泥材料设计提供参考。

关键词: 粤汉铁路; 混凝土; 微观结构; 界面过渡区; 孔隙结构

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)10-3655-12

网络出版时间: 2026-07-20



自 19 世纪末以来, 铁路建设一直是国家发展和交通运输的关键领域。作为中国最早的现代化铁路之一, 粤汉铁路见证了中国交通事业的蓬勃发展和经济繁荣^[1, 2]。粤汉铁路是一条从广州市到武汉市, 途经广东省、湖南省和湖北省的铁路, 全长 1059.6 km。铁路全线分为 3 段修筑、通车, 北段为湘鄂段(武昌至株洲), 中段为株韶段(株洲至韶关), 南段为广韶段(广州至韶关)。粤汉铁路湘鄂段中武昌徐家棚至长沙段全长 365 km, 于 1913 年 8 月开工, 1918 年 9 月建成通车。1957 年 10 月 15 日, 武汉长江大桥通车后, 京汉铁路和粤汉铁路接轨, 并于 1957 年 11 月 11 日合并为京广铁路, 自此, 武昌徐家棚站被废弃。当年火车货物在此下水, 轮渡到对岸汉口, 再转运京汉铁路, 完成中国南北大通道的运输^[3]。

粤汉铁路在建设过程中, 水泥混凝土材料发挥了关键作用, 被广泛用于轨枕、桥梁、承台等重要结构当中, 仅湘鄂段即建有桥梁 317 座, 其中水泥拱桥达 101 座, 足见其应用规模。据《粤汉铁路株

韶段工程记载汇刊》记载推测, 武汉段铁路工程建设所用水泥应为启新洋灰公司生产的塔牌水泥(时称洋灰), 由广州购物分会采购并交付至徐家棚货仓^[4]。启新洋灰公司是近代中国自办的第一家水泥企业, 截至 1919 年, 其水泥销量占全国水泥总销量的 92.02%。根据德国标准试验方法, 由唐山启新洋灰公司化验室测定, 其 1920 年生产水泥的 28 d 强度为 25.4 MPa, 至 1934 年质量显著提升, 28 d 强度可达 58.64 MPa。此外, 工程记载显示, 粤汉铁路水泥混凝土设计比例按照水泥: 河沙: 石碴分为四种, 分别为 1: 2: 4 (掺钢筋)、1: 2: 4 (不掺钢筋)、1: 3: 6 及 1: 4: 8, 平均单价介于 17.9 元/公方至 12.5 元/公方, 强度等级依次降低。作为 20 世纪初中国铁路工程典范, 其中粤汉铁路株韶段更被誉为当时工程建筑标准最高的线路, 其材料选型为混凝土结构的长期耐久性奠定了坚实基础。

在长达百年时间历程中, 粤汉铁路混凝土材料持续承受复杂自然环境侵蚀。粤汉铁路武汉段地处

收稿日期: 2025-10-16。 修订日期: 2025-11-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52341202, 52172025), 湖北省科技计划项目(2025BCA004)。

第一作者: 宋 奔(2001—), 男, 博士研究生。

通信作者: 杨 露(1985—), 男, 博士, 研究员。

王发洲(1975—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-10-16. Revised date: 2025-11-14.

First author: SONG Ben (2001—), male, Doctoral candidate.

E-mail: 294619@whut.edu.cn

Correspondent author: YANG Lu (1985—), male, Ph.D., Professor.

WANG Fazhou (1975—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yanglu@whut.edu.cn; fzhwang@whut.edu.cn

典型的亚热带湿润季风气候区, 年均气温在 15.8~17.5 °C 波动, 夏季高温, 年均降雨量可达 1269 mm, 且主要集中在 6~8 月^[5], 加之长江水汽蒸腾作用显著, 使得混凝土结构长期处于高湿环境当中, 对其耐久性具有一定影响。长江武汉段水体 pH 值约为 7.92, 呈中性至弱碱性, 并含有 Cl^- (4.66 mg/L)、 SO_4^{2-} (25.98 mg/L) 等侵蚀性离子^[6], 受上游来水与下游顶托影响, 长江武汉段年内水位具有显著季节波动。武汉关站在 1865 年 2 月 4 日出现最低枯水位 10.08 m, 并于 1954 年出现历史最高水位达 29.73 m, 2022 年 8 月 13 日出现历史同期最低水位纪录(17.54 m)。多年枯水期与涨水期波动区间约在

17~30 m, 这种周期性涨落致使混凝土结构反复经历浸泡与干燥循环, 如补充材料图 1 所示。此外, 1964 年汉江出现有记录以来最大洪水, 导致大量泥沙涌入长江。近 70 年来, 武汉段含沙量呈持续下降趋势, 而在三峡工程蓄水后年输沙量减少超过 70%, 但泥沙颗粒有所粗化, 粒径增大超过 46%^[7]。这些粗颗粒会强化对混凝土表面的磨蚀作用。干湿循环、含沙水流与环境碳化的共同作用, 会显著加速结构表层劣化, 导致骨料外露。徐家棚站遗迹混凝土结构持续承受水文、地质与气象条件的长期耦合作用, 出现老化、开裂和损坏等问题, 历经百年时光, 铁路被湮没在不断扩张的城市之中。

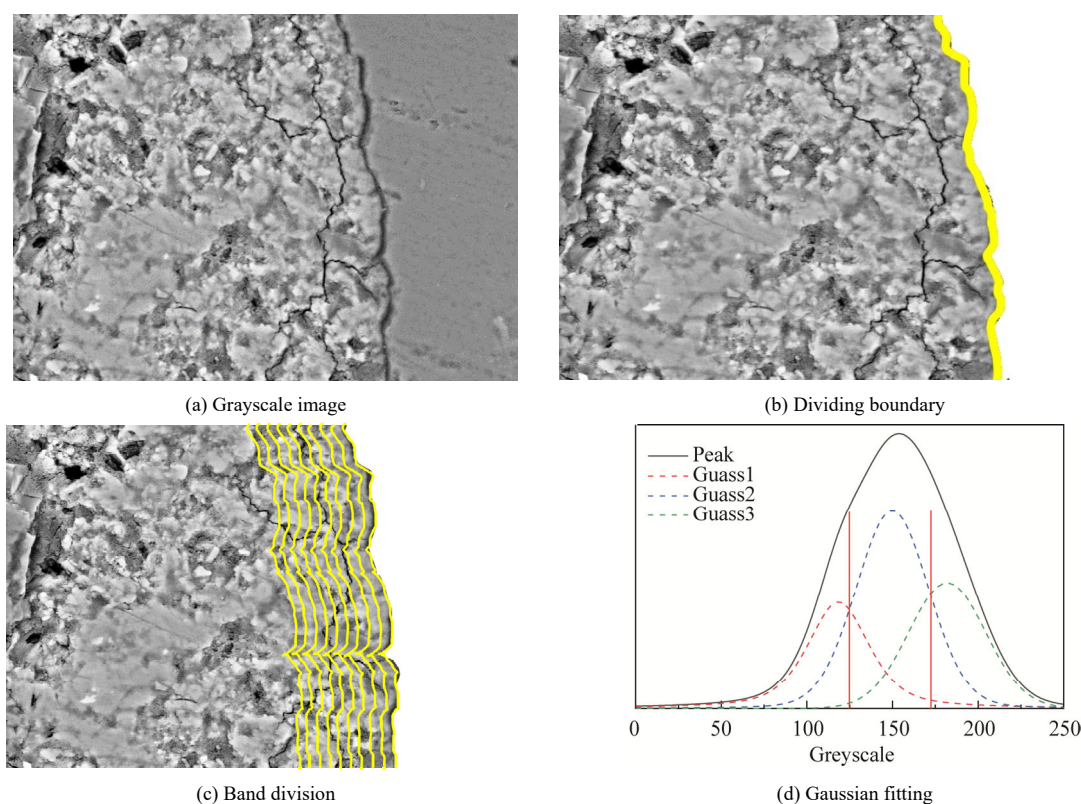


图 1 BSE 图像分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BSE image analysis

近年来, 受长江水位持续下降影响, 武昌粤汉铁路徐家棚车站混凝土遗迹得以显露, 为研究其百年混凝土的组成及微观结构特性提供宝贵契机。本研究通过对粤汉铁路遗迹进行野外取样与实验室测试, 采用 X 射线衍射(XRD)、热重分析(TG)、扫描电子显微镜(SEM)、背散射电子成像(BSE)与 X 射线计算机断层扫描(X-CT)等方法系统分析其关键组成、性能与微观结构特征, 为维护和保护历史建筑提供科学依据, 同时也为现代水泥基材料的耐久性设计提供参考。

1 实验

1.1 材料及样品制备

1) 样品采集, 野外采样工作于长江枯水期(2022 年 9 月)在湖北省武汉市武昌区临江大道 725 号(原粤汉铁路徐家棚车站遗址段)进行, 该遗址为粤汉铁路早期典型结构遗存, 保存完好, 具有较高代表性。根据结构特征与保存状况, 选取桥墩、承台和轨枕 3 个典型部位进行采样。由于桥墩、承台处建筑结构体积较大, 不具备取芯

条件, 因此, 采用人工敲击方式从外表获取典型混凝土块体样品, 轨枕部位采用切割取芯方式获得。样品采集完成后编号并密封保存, 于实验室环境进行干燥、研磨及分样处理, 确保满足后续物相分析及微观表征测试要求。采样位置与遗址现场情况见补充材料图 2, 展示长江枯水期粤汉铁路徐家棚车站桥墩、承台及轨枕取样部位的实际分布及取样现场。

2) 抗压强度与抗氯离子渗透性能测试试件制备, 选择轨枕样品进行测试, 材料经钻芯切割后, 制备为 $\phi 100 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ 与 $\phi 100 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件, 如补充材料图 3 所示。

3) 微观测试样品制备, 从轨枕、桥墩、承台 3 个部位的混凝土样品中取样, 分离出部分砂浆, 并去除较大颗粒后置于无水乙醇中终止水化。随后, 将样品置于 40°C 的真空干燥箱中烘干, 并使用研钵研磨至所有粉末全部通过 $75 \mu\text{m}$ 方孔筛。

4) 背散射样品制备, 选取烘干样品进行预打磨, 获得平整的新鲜断面, 随后使用 VM-3000S 型真空冷镶嵌机进行树脂镶嵌, 并利用 MW-Ecomet250 自动磨抛机(美国 BUEHLER)对预打磨面进一步处理。打磨过程依次使用 240、800、1200 目和 2500 目金刚石砂纸, 最终通过抛光布及配套抛光液进行精细抛光, 抛光粒径依次为 9.00 、 $3.00 \mu\text{m}$ 和 $0.25 \mu\text{m}$ 。

1.2 测试方法

1.2.1 宏观性能

1) 抗压强度测试, 使用 DY-208JFZ 全自动水泥压力机(中国无锡建仪)参照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行, 加载速率为 0.4 MPa/s 。测试样品为钻芯切割后的 $\phi 100 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ 圆柱体轨枕试件, 测试三组样品后取平均值。

2) 抗氯离子渗透性能测试, 使用 DTL-6 型氯离子电通量测定仪(中国华通)参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》, 采用电通量法测定混凝土试件的电通量。测试样品为 3 组钻芯切割后的 $\phi 100 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$ 圆柱体试件, 见补充材料图 3。

1.2.2 微观性能

1) XRD 分析, 样品在 Empyrean X 射线衍射仪(荷兰 PANalytical 公司制造)上进行测量, 使用铜靶 X 射线源, 工作电压 40 kV , 电流 40 mA , 扫描角度为 $5^\circ \sim 70^\circ$, 步长 0.01° , 扫描速率 $2^\circ/\text{min}$ 。将

10% (质量分数)的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与样品混合作为内标, 使用 HighScore Plus 4.8 软件进行 Rietveld 精修, 精修结果以加权残差值(R_{wp})低于 10 为标准^[8]。

2) TG 分析, 使用 STA 449F3 综合热分析仪(德国 NETZSCH)对样品进行 TG 测试, 温度范围从室温升至 1000°C , 升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$, 保护气体为氮气, 流速为 $20 \text{ mL}/\text{min}$ 。

3) 扫描电子显微镜-能谱(SEM-EDS)分析, 使用 Quanta FEG450 环境扫描电子显微镜(美国 FEI)进行微观形貌观察、界面过渡区(ITZ)背散射电子图像(BSE)分析及骨料附近的元素面扫描(EDS)。BSE 分析选用经超声波清洗和干燥处理的抛光样品。测试前对样品表面镀铂, 以增强测试面的导电性。SEM 和 BSE 的加速电压分别为 15 kV 和 20 kV , 工作距离为 10 mm 。为保证 BSE 图像分析一致性, 每个样品拍摄 30 张照片, 放大倍率为 800 倍, 并保持图像对比度和亮度一致。

针对 BSE 图像, 通过以下图像分析(IA)步骤(见图 1)进行定量分析, 以表征孔隙(Pores, 包括裂纹)、反应产物相(HP)、未反应产物相(UHP)与骨料距离的关系:

骨料边界指定。由于 BSE 图像中骨料和水化产物之间的灰度接近, 且骨料形状不规则, 采用人工指定骨料与水泥浆的界面(见图 1b)。

条带划分。采用“concentric expansion”方法, 在距离骨料表面 $100 \mu\text{m}$ 范围内划分 10 条宽度为 $10 \mu\text{m}$ 的连续等距条带(见图 1c), 并提取其灰度分布直方图(见图 2), 表征物相随骨料表面距离的变化特性^[9, 10]。

物相识别。利用 PeakFit 软件, 通过三条高斯曲线模型分割 Pores、HP 和 UHP (见图 1d)。高斯曲线从左到右依次对应 Pores、HP 和 UHP。两相邻物相的阈值边界定义为两相邻高斯曲线的交点。例如, 第一与第二高斯曲线的交点为 Pores 的阈值上限, 第二与第三高斯曲线的交点为 HP 的上限, UHP 的范围为 HP 上限至最大值 250。

定量分析。基于上述物相识别方法, 利用 PeakFit 计算每条条带内各物相的相对含量, 针对每一距离位置, 计算 30 个条带目标相平均值与标准差 σ 并进行分析, 标准差计算如下式 1 所示。该方法参考了前期研究工作^[11-13]。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{30}} \quad (1)$$

其中: X 为目标相含量; $\bar{X}$ 为目标相平均值。

4) X-CT 分析, 采用 Xradia 510 Versa 高分辨率三维 X 射线显微系统(德国 ZEISS), 系统由 X 射线光源、旋转台和探测器组成。测试时, 通过 X 射线

透射试样形成二维投影图像, 扫描电压设置为 80 kV, 功率为 7 W, 切片图像分辨率最高可达 0.4 $\mu\text{m}/\text{像素}$ 。经仪器内置算法重构为三维图像。

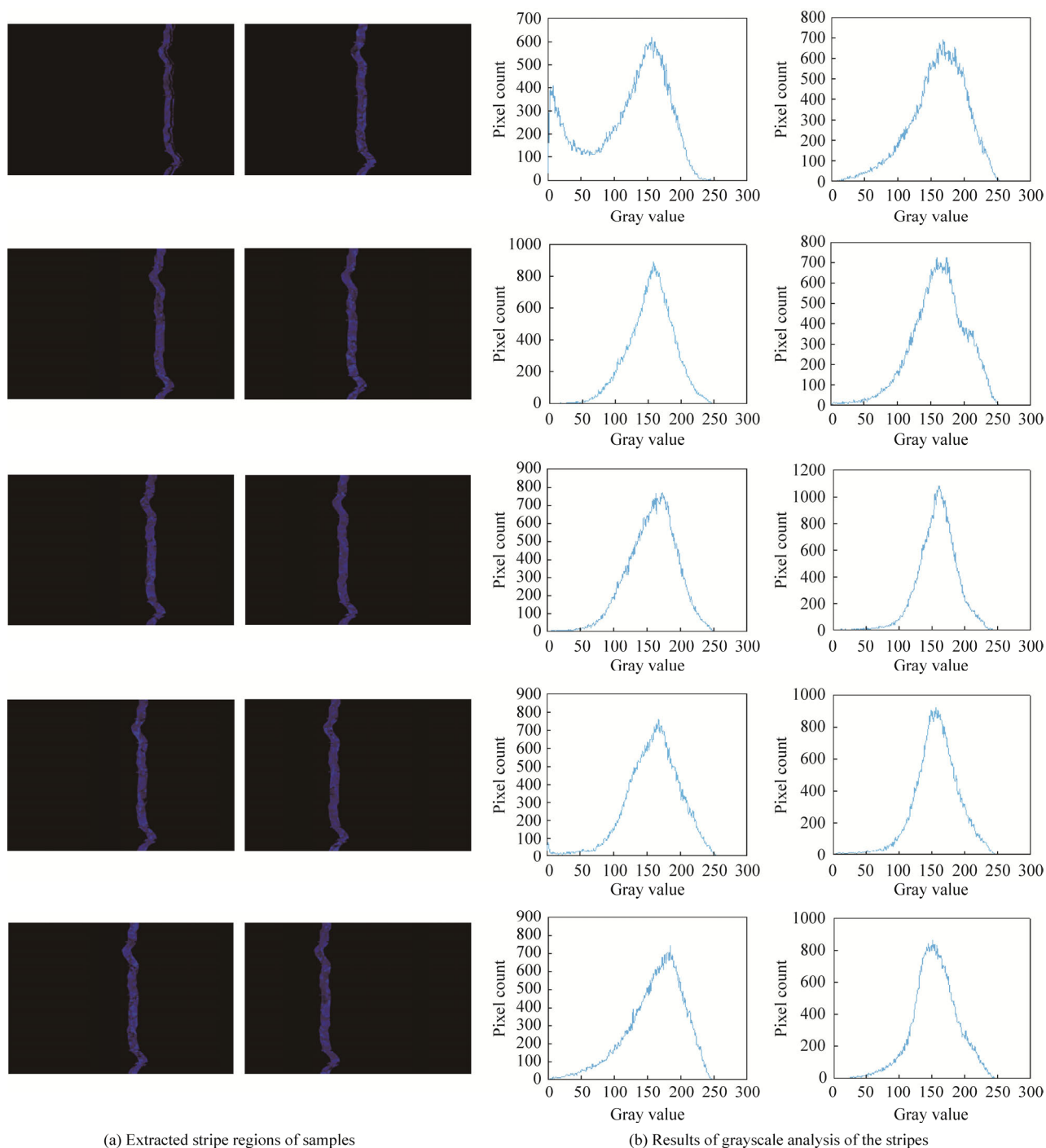


图2 BSE 图像“条带法”分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of “Stripe method” analysis in BSE images

2 结果与讨论

2.1 抗压强度与电通量

图3为轨枕抗压载荷测试结果, 从宏观破坏环

态看, 试样在受压至极限荷载时并未出现贯通劈裂, 而以局部压碎为主, 表明其内部结构在受力过程中应力传递均匀。为消除尺寸效应对测试结果的影响, 参考 GB/T 50081—2019, 以 0.95 的强度换

算系数对实验数据进行归一化, 结果见下表 1。轨枕混凝土的平均抗压强度达到 110.68 MPa, 远超现代普通强度等级混凝土(C50~C60)的典型范围, 说明轨枕混凝土材料在长期服役中依然保持优异的力学稳定性。

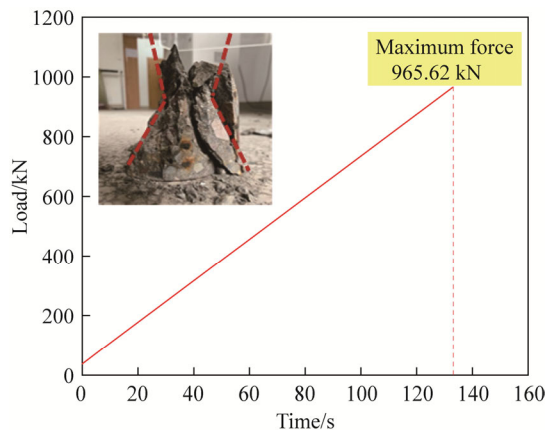


图 3 轨枕混凝土材料抗压载荷

Fig. 3 Compressive load of sleeper concrete

表 1 轨枕混凝土材料抗压强度

Table 1 Compressive strength (σ) of sleeper concrete σ/MPa

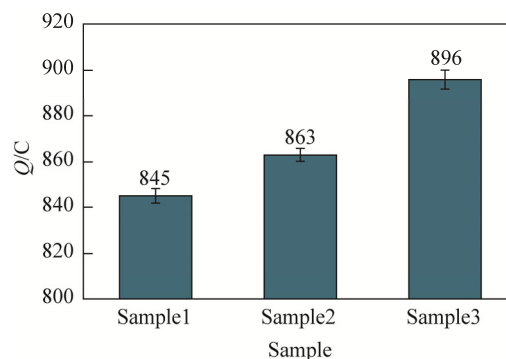
Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean value
105.10	116.86	110.08	110.68

图 4 为轨枕混凝土电通量测试结果, 3 组试件的电通量分别为 845、863 C 和 896 C。依据 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》规定, 抗氯离子渗透性达到了 Q-IV 等级, 该结果表明轨枕混凝土内部离子迁移受阻, 孔隙连通性极低, 反映出较佳的抗氯离子渗透能力。

2.2 产物组成

为进一步探究粤汉铁路混凝土不同部位的物质组成, 本工作分别从承台(C1)、轨枕(G1)和桥墩(Q1) 3 个部位取样, 获得 3 组测试样品, 测试结果见图 5 与表 2。在近百年的持续水化作用下, 试样中仅存在少量的硅酸盐矿相(C_3S 、 C_2S), 而 C_4AF 与 C_3A 已水化完全。同时, 暴露在空气中的混凝土发生碳化反应, 在 C1 和 Q1 样品中观测到较强的 CaCO_3 衍射峰强度, 定量结果显示其质量分数均超过 20%, 其中 Q1 样品中氢氧化钙(CH)含量仅为

0.56%, 表明承台与桥墩部位的混凝土碳化程度严重。通过钻芯取样获取的轨枕样品 G1 并未出现明显碳化反应, 其中 CaCO_3 质量分数为 6.33%, 这主要归因于长江水位覆盖, 轨枕样品长期埋置于铁路基床内部, 处于较封闭环境, 碳化反应受限。



Q is charge passed.

图 4 轨枕混凝土抗氯离子渗透性能

Fig. 4 Chloride ion penetration resistance of sleeper concrete

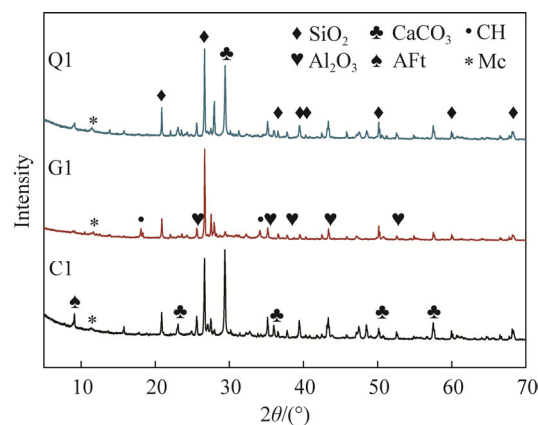


图 5 粤汉铁路混凝土 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of the Yuehan Railway concrete

图 6 为对应混凝土样品的 TG/DTG 曲线。其中, 50~200 °C 区间失重峰对应 C-S-H 凝胶与 AFt/AFm 的失水过程。轨枕样品质量损失现象相比于承台和桥墩并不显著, 在约 150 °C 附近出现微弱的额外质量损失峰, 可能与 AFm、单碳酸盐(Mc, monocarboaluminate)的分解有关^[14]。在长期服役过程中, 混凝土体系内部分 AFm 发生碳酸化取代反应形成碳铝酸盐, 但由于其微量存在, XRD 谱中特征峰并不显著,

表 2 粤汉铁路混凝土主要物相定量分析结果

Table 2 Quantitative analysis results of the main mineral phases in the Yuehan Railway concrete

w/%

Sample	C_3S	C_2S	CaCO_3	AFt	CH	SiO_2	Mc	Amorphous	R_{wp}
C1	1.56	2.56	25.78	4.00		11.00	0.67	50.22	6.71
G1	0.89	1.33	6.33	1.33	4.56	17.78	3.00	47.22	8.61
Q1	2.22	3.22	21.13	3.78	0.56	13.67	2.22	40.00	8.19

w is mass fraction; CH is calcium hydroxide; Mc is monocarboaluminate.

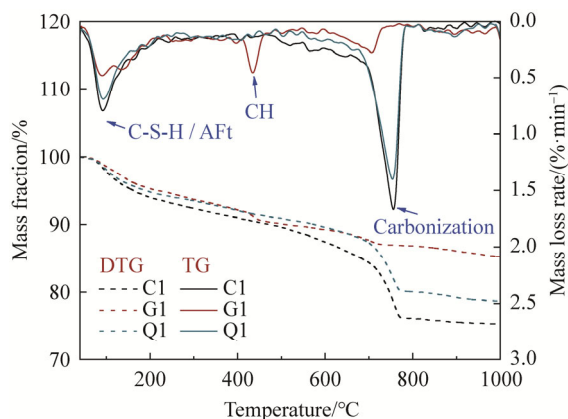


图6 粤汉铁路混凝土 TG/DTG 曲线

Fig. 6 TG/DTG curves of the Yuehan Railway concrete

Rietveld 定量分析显示样品中存在约 0.67%~3.00% (质量分数) 的 Mc 相。400~500 °C 区间对应 CH 的脱水分解过程, 除轨枕样品外, 承台与桥墩部位基本未出现失重现象, 同时, 注意到 650~800 °C 区间内承台与桥墩部位的 CaCO_3 明显分解, 表明承台与桥墩部分的碳化反应程度较为严重。

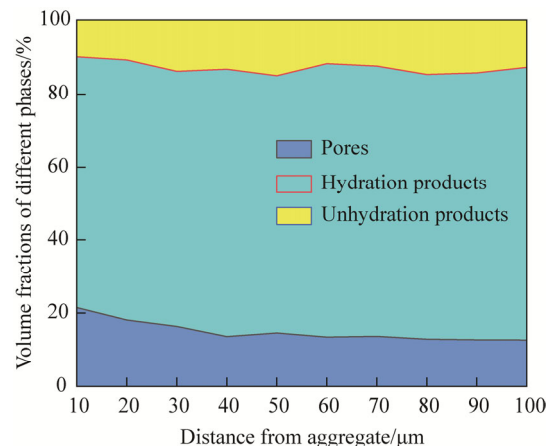
2.3 界面过渡区

基于 BSE/IA 法^[15], 首先对粤汉铁路承台、轨枕和桥墩部位混凝土材料中骨料-浆体界面区(ITZ)的特性进行分析, 计算距离骨料 100 μm 范围内孔隙相(Pores)、水化产物(HP)和未水化颗粒(UHP)的体积分数, 以揭示界面区域的微观结构特征(见图 7)。整体趋势表明, 3 个部位混凝土在距骨料表面的孔隙体积分数均呈现显著的梯度变化。孔隙含量在骨料邻近区域达到最大值, 并随距离的增加快速下降, 随后趋于稳定, 这与既有结论一致^[11, 16]。其中, 承台部位混凝土距骨料 10 μm 处的孔隙率为 21.49%, 而在 50 μm 处降至 13.66%, 轨枕与桥墩混凝土在骨料附近孔隙体积分数相近, 并在 0~40 μm 范围内下降至 17% 左右。水化产物体积分数在靠近骨料处偏低, 在远离骨料区域逐步升高并最终进入稳定平台, 反映出浆体结构由疏松向致密的过渡过程。未水化颗粒的体积分数则表现出一定波动性, 主要归因于其绝对含量较低, 容易受到 BSE/IA 阈值分割误差的影响。

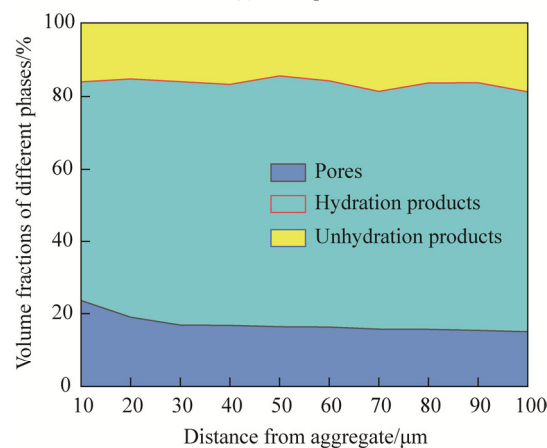
混凝土材料微观结构的组成复杂, 具有较大的离散性, 为评估基于 BSE 图像计算所得物相体积分数的离散程度, 确保后续梯度分析的数据可靠性, 采用“变异系数”(Coefficient of variation, C.V.) 评估距骨料表面相同距离的条带内, 同一物相体积分数的横向波动程度。变异系数的计算公式如式(2)所示。

$$\text{C.V.} = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (2)$$

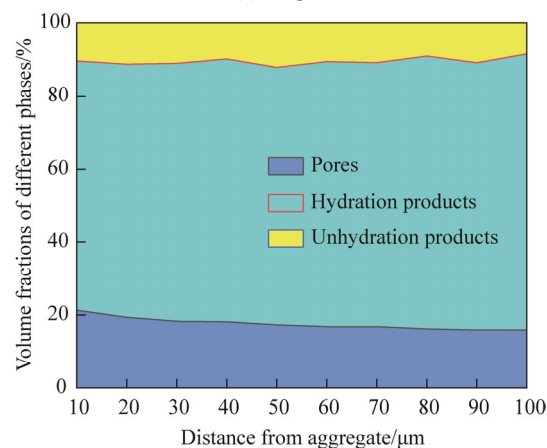
其中: σ 代表标准差; $\bar{X}$ 代表平均值。



(a) Pile cap



(b) Sleeper



(c) Bridge pier

图7 不同部位混凝土材料各相体积分数与骨料表面距离的关系

Fig. 7 Relationship between volume fraction of phases and distance from aggregate surface in concrete materials from different sections

图 8 为各部位混凝土中物相体积分数计算结果, 水化产物体积分数的变异系数低于 30%, 表明

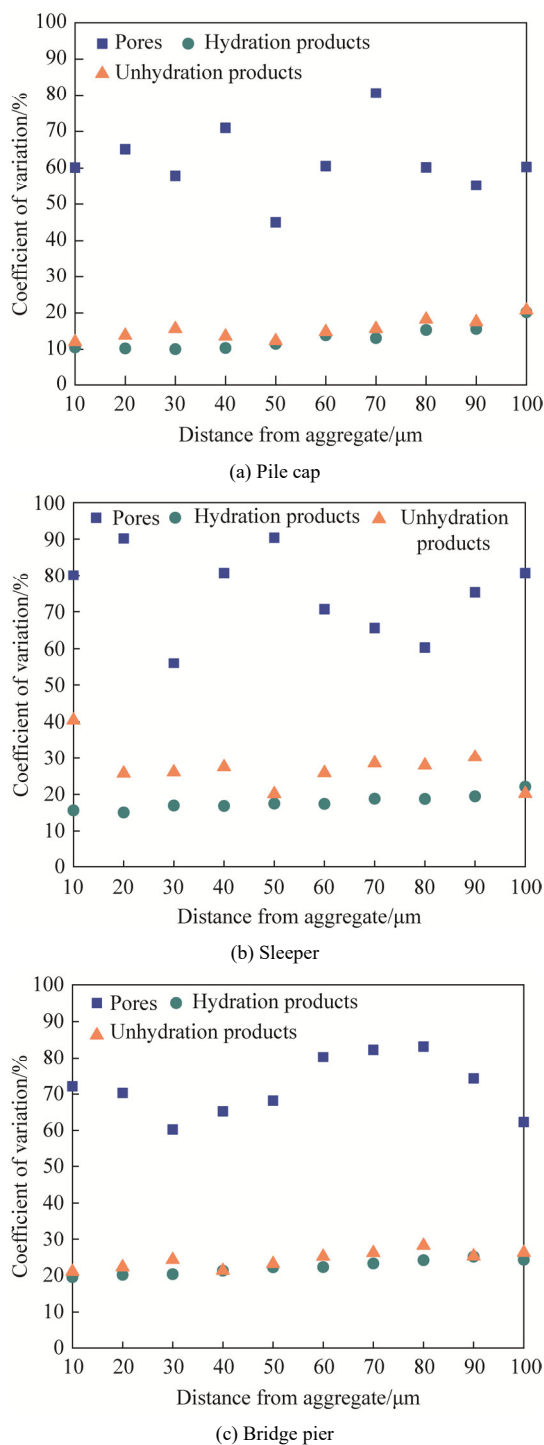


图 8 不同部位混凝土材料各相体积分数与骨料表面距离的变异系数

Fig. 8 Coefficient of variation of phase volume fraction with distance from aggregate surface in concrete materials from different sections

该物相在相同距离的不同空间位置上离散程度较低, 其体积分数的统计平均值能够较好地代表整体情况。未水化颗粒的变异系数与水化产物相似, 部分低于 30%, 但整体波动性更大。需要指出的是, 孔隙相的变异系数普遍高于 50%, 这归因于其相对

含量较低, 且受微观裂纹等局部缺陷影响, 导致其体积分数置信度较低。

综上所述, 考虑到水化产物数据的置信度以及未水化颗粒和孔隙数据的固有局限影响, 本工作将主要依据水化产物(HP)的分布梯度划分界面过渡区范围。采用差异系数统计表征水化产物与未水化产物的变化(见图 9), 计算公式如式(3)所示。

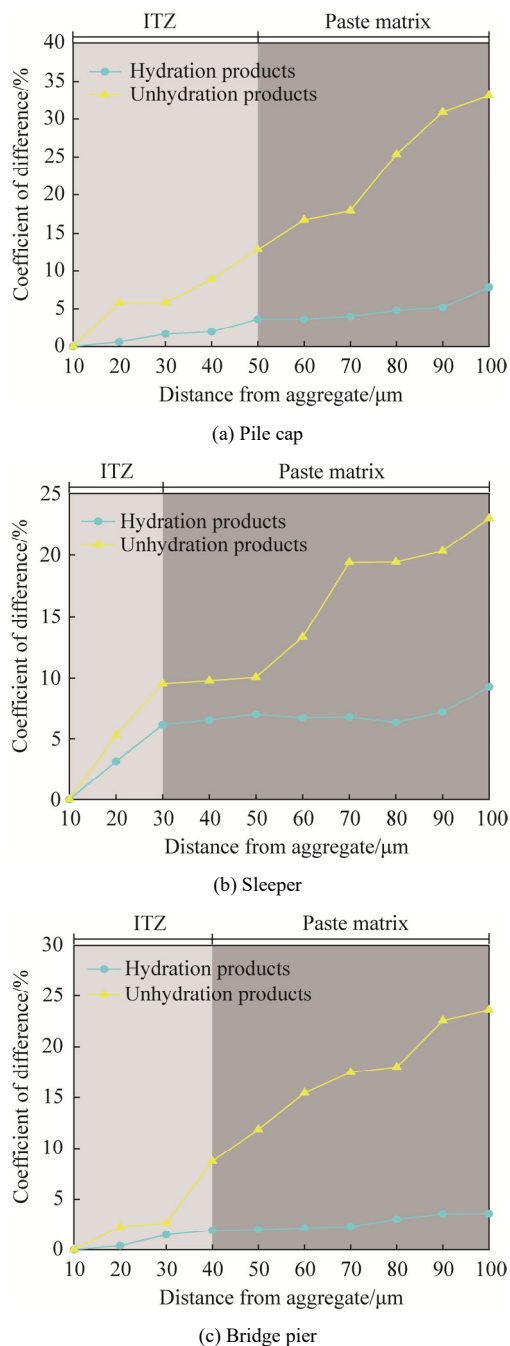


图 9 不同部位混凝土材料各相体积分数与骨料表面距离的差异系数

Fig. 9 Coefficient of difference of phase volume fraction with distance from aggregate surface in concrete materials from different sections

$$D_u = \frac{|U_n - U_{n+1}|}{U_0} \quad (3)$$

其中： D_u 为差异系数； U_0 表示第 1 个条带中各相的体积分数； U_n 为第 n 个条带中各相的体积分数。

结果表明，未水化颗粒的差异系数随距离增加而持续增长，并未出现明显的平台期。XRD 定量结果说明，在超长龄期水化过程中，水泥矿相已基本水化完全，残余未水化颗粒含量较低。局部少量的残余颗粒可能导致较高的数据离散性，使未水化颗粒的差异系数变化无法有效反映 ITZ 向水泥浆体的过渡，因此不适用于作为划分 ITZ 的边界判据。

相比之下，水化产物的差异系数则呈现出更为清晰的规律。由于骨料壁面效应存在，导致 ITZ 局部水灰比提高，堆积疏松^[17, 18]，促使早期水化产物快速生成但空间分布不均，随骨料距离增加，远离骨料的基体区域水化充分，浆体结构趋于致

密，水化产物体积分数逐渐稳定，形成明显的平台区^[19]。如轨枕部位反应产物相的差异系数在距骨料 10~30 μm 范围内迅速增加，随后在远离骨料区域内稳定，波动变化幅度较小，反映出靠近骨料表面的浆体微观结构与远离骨料区域的显著差异，表现出明显的界面特征。因此，将轨枕混凝土材料 ITZ 的边界定义为 30 μm ，同理，桥墩和承台混凝土材料也出现了反应产物相分布边界的变化，分别在距骨料 40 μm 和 50 μm 范围内表现出界面特征。

2.4 微结构特性

图 10 为粤汉铁路轨枕样品的背散射电子图像及对应的 EDS 元素分布图，用以揭示长龄期混凝土中界面过渡区及水化产物的空间分布特征。从 BSE 图像可见，砂石(Si 富集区)与水泥浆体之间形成明显的界面带，其灰度略低，显示该区域为 Ca 富集、孔隙率较高的过渡层。浆体中分布均匀的亮灰色相主要对应 C-S-H 凝胶及部分氢氧化钙晶体。

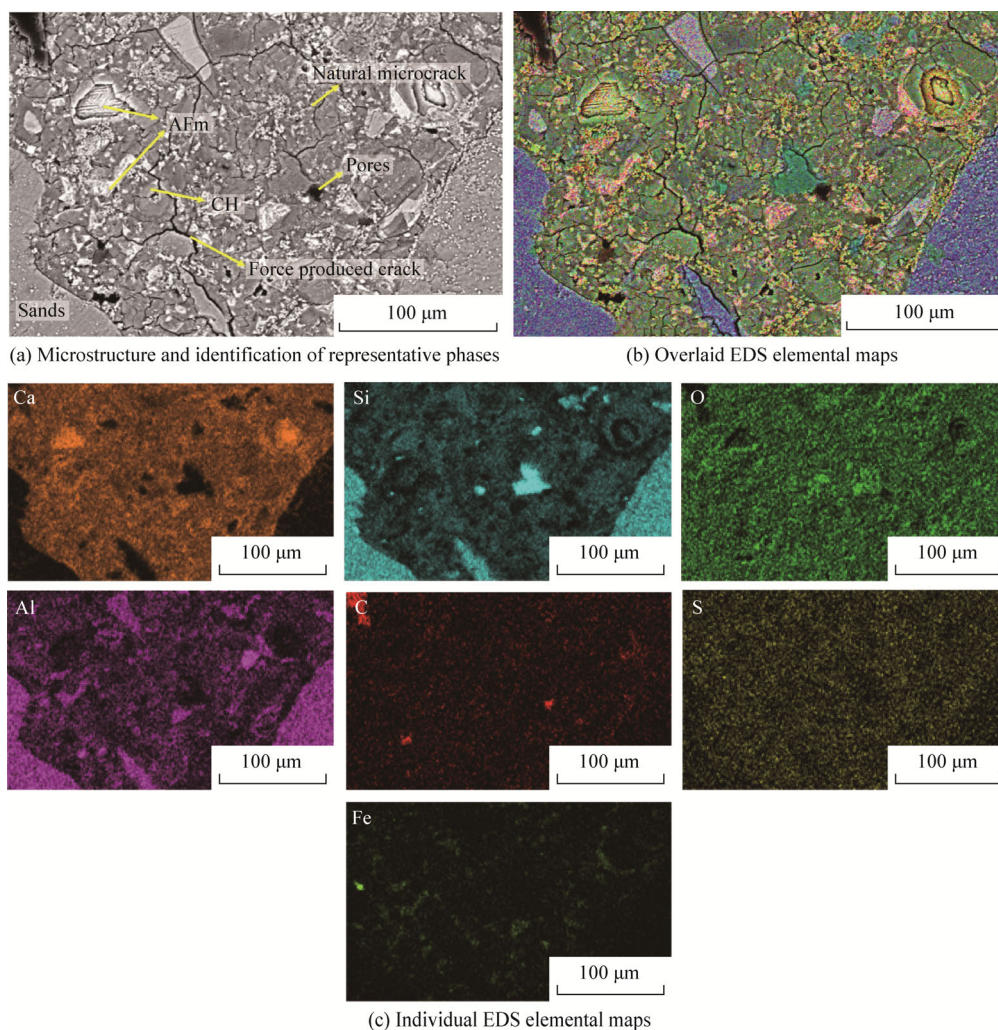


图 10 轨枕背散射与元素分布图

Fig. 10 Backscatter and elemental distribution maps of the sleeper

EDS 元素图进一步揭示了不同元素在显微尺度上的分布特征。Ca、Al 和 S 元素在浆体区内局部共富集,说明存在 AFm/AFt 等钙铝酸盐相。值得注意的是, C 元素信号在骨料-浆体界面处显著增强,结合 Ca 的高强度分布与 XRD 测试结果可知,有碳酸盐产物生成。这表明在长时间环境暴露下, AFm/AFt 相经历了部分碳酸化取代反应,形成了更为稳定的碳铝酸盐结构。而 Si 元素主要集中于骨料区,并在浆体中呈弥散分布,代表 C-S-H 凝胶长期稳定存在。Fe 元素含量较低,源于水泥熟料中的铁相或矿物掺合料,仅在个别水化残留相中检测到,说明体系内铁相未发生显著迁移。

此外,图中显示了因固化过程或长期服役中的应力集中引发的自然微裂纹,以及在骨料边界处可见的局部微裂纹和细小孔隙,微裂纹为水分或腐蚀介质提供了渗透路径,对混凝土耐久性构成威胁^[20, 21]。孔隙是混凝土内部结构中的另一薄弱点,在水泥浆体中较为显著,其分布加剧了微裂纹的扩展^[22],表明 ITZ 仍是混凝土结构中的薄弱区域。但综合来看,轨枕混凝土的 ITZ 虽存在一定孔隙与微裂纹,但整体结构表现出显著的化学稳定性。图 11 为承台、轨枕和桥墩 3 个部位的扫描电镜照片,以展示混凝土样品的局部显微特征。承台部位观察到大量针棒状钙矾石和片状的水化产物;与承台类似,桥墩中也含有大量的钙矾石和氢氧化钙,呈现出由针状和片状水化产物构成的复杂结构;而轨枕部位以大量的 C-S-H 凝胶为主,整体微观结构致密。AFm 相的碳酸化产物与 C-S-H 凝胶共同形成的致密结构,有效阻碍有害离子迁移,从而保障轨枕混凝土的抗氯离子渗透性能。

2.5 X-CT

图 12 为粤汉铁路百年混凝土轨枕样品的三维 X 射线计算机断层扫描(X-CT)结果及其孔隙体积分布特征。图 12a 为 40 mm×40 mm×40 mm 立方体样品的三维重构图,红色区域代表识别出的孔隙空间。样品内部孔隙分布较为离散,以若干大孔为主并伴随众多细微毛细孔,孔径跨度较大,局部孔隙呈连通状态。整体孔隙形态以不规则多面体为主,且未观察到明显的连续贯通性裂隙,表明轨枕混凝土仍保持较好的整体致密性和结构完整性。图 12b 为孔隙体积与数量的统计关系。红色曲线为孔隙数量随体积变化的分布,蓝色曲线为累积孔体积。结果表明,大部分孔隙体积集中在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ mm}^3$ 范围内,小孔数量众多但总体积贡献

较小,当孔体积大于 0.1 mm^3 时,单个孔隙的体积占据了绝对优势,累积体积分布曲线出现陡升,说明孔隙体系主要由大量微细孔(毛细孔和凝胶孔)与少量大尺寸气孔或界面空洞构成。孔体积分布的累积曲线在孔体积约 0.1 mm^3 处出现明显拐点,因此本研究将 0.1 mm^3 定义为轨枕部位混凝土的临界孔隙体积。该部分孔隙是主要的储水或劣化扩散通道,对混凝土的耐久性与稳定性具有重要影响^[23]。

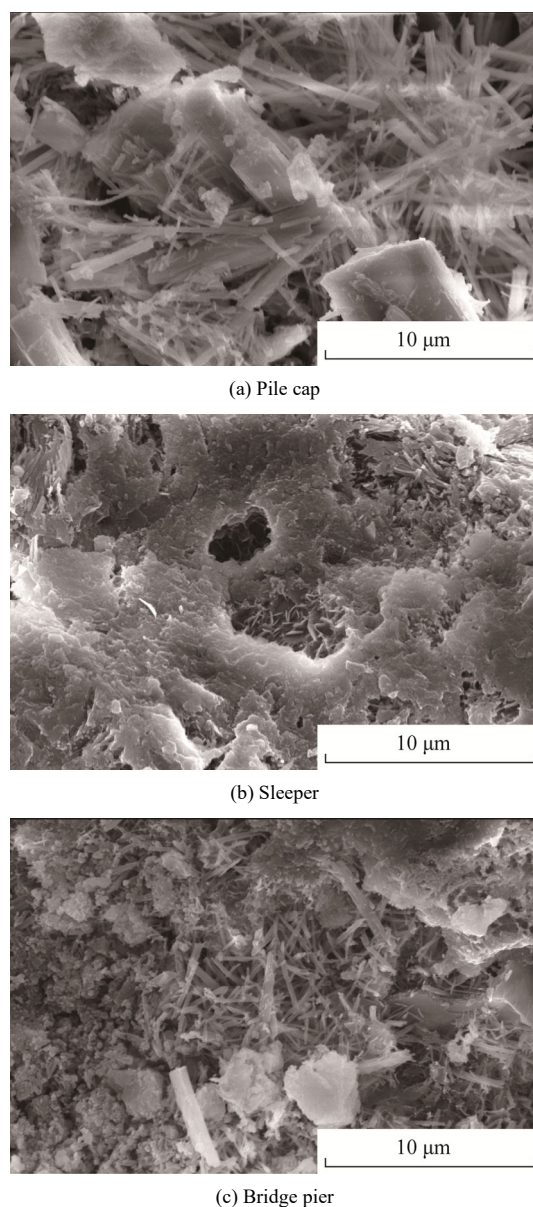


图 11 不同部位混凝土 SEM 照片

Fig. 11 SEM images of concrete from different sections

综合 BSE-EDS 结果与 X-CT 分析可知,轨枕混凝土的微结构经历了显著的长期致密化过程。早期孔隙体系中较大的连通孔在长期碳化与水化反应下逐渐被 C-S-H 凝胶及碳铝酸盐类产物填充,使

得宏观贯通孔减少, 孔径分布向细化方向演化, 确保轨枕混凝土在长龄期服役后仍具有良好抗渗性能的微观基础。

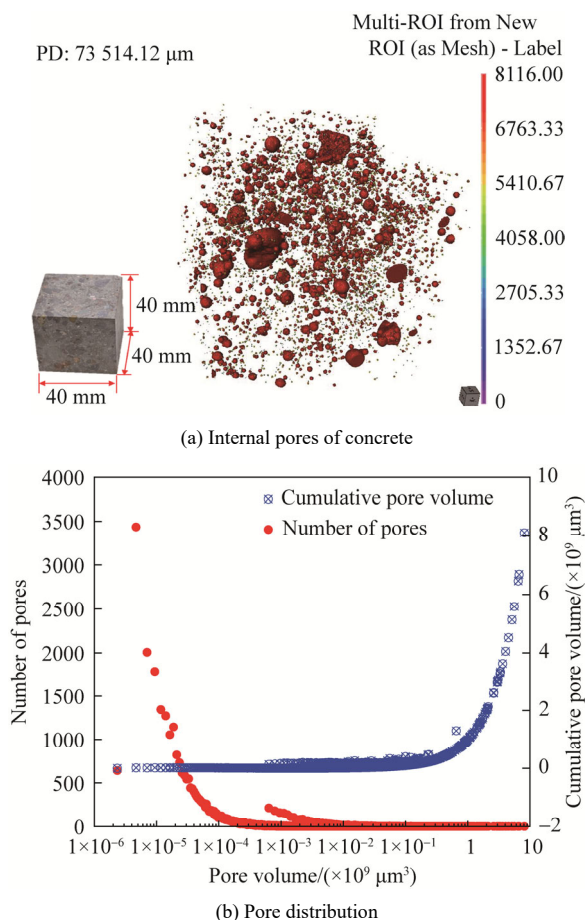


图 12 轨枕混凝土 X-CT 图像及孔隙体积分布特征

Fig. 12 X-CT images and pore volume distribution of the sleeper concrete

3 水泥材料设计思考

本工作取材于粤汉铁路轨枕、承台、桥墩 3 个部位的混凝土, 所处服役环境具有明显差异, 其中, 桥墩部位受到持续的侵蚀冲刷作用。而在后期, 承台、桥墩部位长期暴露于空气当中, 发生了明显的碳化反应。现代铁路、桥梁等工程建设常面临恶劣环境挑战, 因此, 提升水泥材料的耐久性能成为长龄期混凝土工程研究应用的关键。XRD 定量结果显示, 粤汉铁路混凝土中的水泥熟料矿相在百年龄期中得到充分水化, 其中, C_3A 与 C_4AF 已反应完全。轨枕试样的抗压强度与电通量测试结果表明, 其具备优异的力学性能与抗侵蚀性能。水泥熟料矿相的充分水化与致密的微观结构为混凝土的耐久性能提供保障, 普通硅酸盐水泥中常见 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 和 C_4AF 4 种熟料矿相, 使水泥工作性能、水化产

物中晶体[AFt、AFm、 $Ca(OH)_2$]和凝胶(C-S-H 等)比例处于相对合适的范围, 但面临更高耐久性能工程需求, 水泥矿相组成需做出进一步优化。通过提高抗蚀矿相含量, 增强矿物活性, 研究其对胶凝性能和耐久性的影响机理, 将有助于延长结构服役寿命, 确保工程安全。

界面过渡区是混凝土结构的薄弱环节, 其孔隙率与裂纹的形成对材料的耐久性和力学性能具有重要影响。轨枕、桥墩、承台混凝土在接近骨料部位的孔隙率最高, 容易造成整体结构损伤开裂, 因此, 可通过优化水化产物组成与分布, 改性骨料表面黏结特性, 降低界面过渡区孔隙, 以提高混凝土的服役性能。此外, 混凝土材料的长期性能与其微观结构的演变过程密切相关, 但长龄期服役的混凝土工程性能数据较为稀缺, 后续应考虑构建长龄期混凝土材料性能数据库, 并通过多尺度数值模拟, 预测混凝土在长期环境作用下的力学性能及耐久性的发展与衰减过程, 降低实际工程的试验成本, 验证材料设计的可靠性。

4 结论

本工作通过多种测试手段研究粤汉铁路混凝土的产物组成、结构分布及微观形貌, 主要结论如下:

- 1) 粤汉铁路混凝土在长期服役及自然环境侵蚀下, 依然保持良好的力学性能与耐久性能, 轨枕部位的平均抗压强度达到 110.68 MPa, 平均电通量为 868 C, 抗氯离子渗透性达到 Q-IV 等级。
- 2) 粤汉铁路混凝土的承台、轨枕及桥墩部位由于暴露环境的不同, 其碳化程度存在显著差异。其中, 承台和桥墩部位的碳化较为严重, 但 AFt 和 C-S-H 凝胶等水化产物含量相较于轨枕部位更高。
- 3) 基于背散射电子显微镜及图像分析技术对粤汉铁路混凝土的界面过渡区进行评估, 承台、轨枕及桥墩部位的界面过渡区厚度分别约为 50、30 μm 和 40 μm , 且界面过渡区具有更高的孔隙率。
- 4) X-CT 结果表明轨枕混凝土的临界孔隙体积为 0.1 mm^3 , 超过临界孔隙体积的大孔隙主导混凝土整体结构的孔隙率。

附加材料:

本文的补充材料见网络版(<https://link.cnki.net/urlid/11.2310.tq.20260720.1414.002>)。

参考文献:

- [1] 张卫东. 粤汉铁路与近代区域经济社会变迁[J]. 河北学刊, 2018, 38(5): 82–89.
ZHANG Weidong. Hebei Acad J, 2018, 38(5): 82–89.
- [2] 韩叙, 赵丽元. 铁路遗产适应性再生模式的量化比选研究——以粤汉铁路武汉段为例[C] //中国城市规划学会. 面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集(09城市文化遗产保护). 中国建筑工业出版社, 2021: 878–890.
- [3] 梁婕. 缩影百年: 从粤汉铁路到武广高铁[J]. 铁道知识, 2010(1): 28–30.
LIANG Jie. Railw Knowl, 2010(1): 28–30.
- [4] 庞广仪. 粤汉铁路早期历史研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
PANG Guangyi. A research on early phase history of guangzhou-Wuhan railroad [D]. Suzhou: Soochow University, 2009.
- [5] 车旭恒, 朱君君, 张立维, 等. 武汉市极端降雨与气候因子的响应研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 319–326.
CHE Xuheng, ZHU Junjun, ZHANG Liwei, et al. J South Cent Minzu Univ Nat Sci Ed, 2025, 44(3): 319–326.
- [6] 薛武申, 孙兵, 刘培青. 长江源区水质分析与长江武汉段水质对比[J]. 安全与环境工程, 2005, 12(1): 17–20.
XUE Wushen, SUN Bing, LIU Peiqing. Saf Environ Eng, 2005, 12(1): 17–20.
- [7] GE H, ZHU L L, MAO B. Evolution of tidal reaches of the Yangtze River related to reduced non-uniform sediment after the impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. Catena, 2025, 260: 109462.
- [8] ÁLVAREZ-PINAZO G, CUESTA A, GARCÍA-MATÉ M, et al. Rietveld quantitative phase analysis of Yeelime-containing cements[J]. Cem Concr Res, 2012, 42(7): 960–971.
- [9] GAO Y, DE SCHUTTER G, YE G, et al. Porosity characterization of ITZ in cementitious composites: Concentric expansion and overflow criterion[J]. Constr Build Mater, 2013, 38: 1051–1057.
- [10] FANG G H, ZHANG M Z. The evolution of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete[J]. Cem Concr Res, 2020, 129: 105963.
- [11] 谢逸帆. EPSC复合材界面过渡区的依时演化规律和碳化侵蚀机制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
XIE Yifan. The evolution and carbonation of ITZ in excess-sulfate phosphogypsum slag cement based composite [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [12] 邱晨. 混凝土界面过渡区的定量表征及弹性性能[D]. 南京: 东南大学, 2012.
QIU Chen. Quantitative characterization and elastic properties of interfacial transition zone of concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [13] 韩云阁. 砂浆界面过渡区定量表征及弹性性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
HAN Yunge. Quantitative characterization and elastic properties of interfacial transition zone in mortar [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [14] ZAJAC M, ROSSBERG A, LE SAOUT G, et al. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements[J]. Cem Concr Compos, 2014, 46: 99–108.
- [15] HU C L, MA H Y. Statistical analysis of backscattered electron image of hydrated cement paste[J]. Adv Cem Res, 2016, 28(7): 469–474.
- [16] GAO X, PENG Z S, TONG L Y, et al. Effect of global aggregate distribution on interfacial transition zones in cement-based materials: An analytical-numerical study[J]. Constr Build Mater, 2025, 458: 138278.
- [17] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete[J]. Adv Cem Based Mater, 1995, 2(1): 30–38.
- [18] GAO X, LIU Q F, CAI Y X, et al. A new model for investigating the formation of interfacial transition zone in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2025, 187: 107675.
- [19] 高轩, 刘清风. 水泥浆-骨料界面过渡区微观特征的数值研究[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(12): 1180–1189.
GAO Xuan, LIU Qingfeng. J Build Mater, 2025, 28(12): 1180–1189.
- [20] MAC M J, YIO M H N, DESBOIS G, et al. 3D imaging techniques for characterising microcracks in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2021, 140: 106309.
- [21] WANG K, ZHENG M M, YAN S C, et al. Study on the influence mechanism of calcium carbonate particles on mechanical properties of microcrack cement[J]. Constr Build Mater, 2024, 411: 134563.
- [22] PASWAN R, DAS S. Elucidating the evolution of pore structure, microstructural damage, and micromechanical response in cement pastes containing microencapsulated phase change materials under freeze-thaw conditions[J]. Cem Concr Compos, 2024, 154: 105743.
- [23] YANG Z X, DONG S L, ZHANG Y. Particle packing optimization and pore structure assessment of ternary cementitious system based on X-ray computed tomography and mercury intrusion porosimetry[J]. Constr Build Mater, 2024, 413: 134913.

作者贡献声明:

宋奔: 数据管理、分析/综合数据并推导结论、撰写初稿、绘制图表
何健辉: 调查研究、软件使用、验证、分析/综合数据并推导结论
杨露: 论文构思、设计研究方法和实验方案、审阅与修订
王发洲: 论文构思、提供资源、获取资助、项目管理、监督指导
胡曙光: 监督指导、提供资源、获取资助

Composition and Microstructure Characteristics of Concretes from the Yuehan Railway

SONG Ben^{1,2}, HE Jianhui^{1,2}, YANG Lu¹, WANG Fazhou^{1,2}, HU Shuguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Extended Abstract

Introduction Since the late nineteenth century, railway construction has been a key driver of national development in China. The Yuehan Railway is one of the earliest modern railways in the country, playing an important role in advancing transportation

infrastructure and regional economic growth. Over the past century, the concrete structures of the Yuehan Railway have been exposed to complex environmental actions, including high humidity, seasonal fluctuations in the Yangtze River water level, chemical ions, and sediment-induced abrasion. These factors have collectively accelerated surface deterioration and microstructural degradation. Recent decreases in river water levels have revealed the concrete remains of Xujia Peng Station, providing a rare opportunity to examine century-old concrete. This study conducts field sampling and laboratory analyses to characterize the composition and microstructure evolution of the relic concrete. Techniques including X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TG), scanning electron microscopy (SEM), backscattered electron imaging (BSE), and X-ray computed tomography (X-CT) are employed. The findings offer scientific support for the preservation of historic constructions and provide reference insights for durability design in cement materials.

Methods Concrete samples were collected during the dry season from the exposed remains of the Xujia Peng Station section of the Yuehan Railway. Representative fragments were obtained from pile caps and bridge piers *via* manual chiseling, while intact cores were extracted from sleeper components. After drying and surface preparation, samples were processed for mechanical testing and microstructural analysis. Compressive strength and chloride ion penetration resistance were measured on $\phi 100 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ and $\phi 100 \text{ mm} \times h 50 \text{ mm}$ cylindrical specimens, respectively. Phase assemblages were quantified using (XRD) with Rietveld refinement, complemented by thermogravimetric analysis. Microstructural morphology, ITZ distribution, and elemental composition were examined *via* (SEM), backscattered electron imaging with image analysis (BSE/IA), and energy dispersive spectroscopy (EDS). Three-dimensional pore architecture was evaluated using high-resolution X-CT, enabling quantitative pore size distribution.

Results and discussion The sleeper concrete exhibited exceptional long-term stability, with an average compressive strength of 110.68 MPa and an electrical charge passed of 868 C, corresponding to a Q-IV chloride resistance grade. XRD and TG/DTG analyses revealed nearly complete hydration of clinker phases after nearly a century of service. C_3A and C_4AF were fully consumed, and only trace amounts of C_3S and C_2S remained. Due to prolonged exposure to air, pile cap and pier samples showed severe carbonation, with CaCO_3 mass fractions exceeding 20% and minimal portlandite. By contrast, sleeper samples exhibited limited carbonation. Quantitative BSE/IA demonstrated clear ITZ gradients in all samples. The ITZ thicknesses for pile cap, sleeper, and pier concretes were approximately 50, 30 μm , and 40 μm , respectively. ITZ regions consistently exhibited elevated porosity and reduced hydration product content near aggregate surfaces. The gradient of hydration product volume fraction stabilized beyond the ITZ boundary, indicating a distinct microstructural transition from porous interface zones to dense bulk matrix. SEM/EDS analyses revealed dense C-S-H gel, AFt/AFm products, localized carbonate phases, and well-preserved matrix integrity in the sleeper samples. While microcracks existed near aggregate boundaries, the overall matrix remained chemically stable. X-CT imaging showed a predominantly disconnected pore system consisting of fine capillary pores and a small number of large voids. The critical pore volume of the sleeper concrete was 0.1 mm^3 , above which macropores dominated total porosity but did not form continuous pathways.

Conclusions This study provides a comprehensive microstructural and performance assessment of century-old Yuehan Railway concrete. Sleeper concrete retained high compressive strength (110.68 MPa) and low chloride permeability (868 C), demonstrating excellent durability after nearly 100 years of service. Pile cap and pier concretes underwent significant carbonation, while sleeper concrete exhibited limited carbonation due to environmental shielding. ITZ thicknesses were approximately 50 μm (pile cap), 30 μm (sleeper), and 40 μm (pier), with higher porosity and microstructural heterogeneity compared to bulk matrix. X-CT analysis identified a critical pore volume of 0.1 mm^3 , indicating that large isolated pores govern overall porosity without forming permeable networks. Overall, the Yuehan Railway concrete demonstrates outstanding long-term mechanical and durability properties, offering valuable insights for cementitious material design.

Key words Yuehan railway; concrete; microstructure; interface transition zone; pore structure