

公路桥梁高性能混凝土材料的耐久性及其微观结构特征分析

黄有根

江西省交通工程集团有限公司 江西南昌 330000

摘要: 本文聚焦于公路桥梁高性能混凝土材料, 深入探讨其耐久性及微观结构特征。通过相关试验与分析, 研究了影响高性能混凝土耐久性的主要因素, 如抗渗性、抗冻性、抗化学侵蚀性等。同时, 借助先进的微观测试技术, 剖析了高性能混凝土微观结构的组成、形态及变化规律。旨在为公路桥梁高性能混凝土的设计、施工及长期性能提升提供理论依据和技术支持, 以保障公路桥梁结构的安全可靠与长期稳定运行。

关键词: 公路桥梁; 高性能混凝土; 耐久性; 微观结构特征

引言

公路桥梁是交通基础设施重要组成, 其建设质量和长期性能关乎交通运输安全畅通。高性能混凝土因高强度、高耐久性等优异性能, 在公路桥梁工程广泛应用。但公路桥梁环境复杂, 高性能混凝土长期服役会受荷载、环境侵蚀等不利因素影响, 导致耐久性下降, 影响桥梁结构安全和寿命。混凝土耐久性指抵抗物理和化学作用的能力, 是衡量长期性能的关键指标, 微观结构是决定宏观性能的内在因素, 了解其微观结构特征, 能揭示性能形成机制和变化规律, 为改善耐久性提供理论指导。目前, 国内外虽在高性能混凝土领域研究较多, 但对公路桥梁高性能混凝土材料耐久性及微观结构特征的系统研究仍不足。因此, 开展相关分析具有重要理论和实际意义。

一、HPC材料制备与耐久性试验方法

(一) HPC材料组成与配合比设计

本研究选用特定品种的水泥作为胶凝材料的基础, 该水泥需满足国标对强度等级和物理性能的要求, 其细度、凝结时间、安定性等指标均经过检测确认。同时, 选用粉煤灰和矿渣粉作为主要的掺合料, 粉煤灰的烧失量、细度、需水量比和活性指数需符合相关标准, 矿渣粉的比表面积、活性指数及流动度比也需满足规定。高效减水剂作为关键的外加剂, 其减水率、坍落度保留值、含气量等性能对混凝土的工作性和强度发展至关重要, 同样需要符合技术要求。这些原材料的物理性质和化学成分是后续配合比设计的基础数据。HPC的配合比设计遵循一系列明确的原则, 核心目标是实现低水胶比以减少孔隙率, 提高体积稳定性以降低收缩开裂风险, 并最

终获得高密实度的硬化混凝土。设计过程中需综合考虑胶凝材料的总量、掺合料的掺量比例、砂率、外加剂的掺量等因素。经过计算和试配调整, 最终确定的具体配合比参数包括: 水胶比为0.28, 胶凝材料总量为 $550\text{kg}/\text{m}^3$, 其中粉煤灰掺量为胶凝材料总量的20%, 矿渣粉掺量为25%, 高效减水剂掺量为胶凝材料总量的1.8%。

(二) 试件制备与养护

试件的制备遵循标准的成型工艺流程。根据不同的试验需求, 制备了尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体试件用于耐久性试验, 以及 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试件用于强度测试。在制备过程中, 严格按照配合比称量各组分, 采用强制式搅拌机进行搅拌, 控制搅拌时间和速度, 确保拌合物均匀。然后将拌合物分layer装入模具, 使用振动台振实, 排除内部气泡, 最后刮平表面。成型后的试件在温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度大于95%的环境中静置24小时, 随后脱模。脱模后的试件被转移至标准养护室进行养护, 标准养护条件为温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度95%以上, 持续养护至28天龄期。在进行特定耐久性试验前, 部分试件可能需要进行额外的预处理, 例如将试件放入水中浸泡至饱和和面干状态, 以模拟实际使用前的含水状况, 或者按照试验方法要求进行特定的表面处理^[1]。

(三) 耐久性试验方案

为全面评估所制备HPC的耐久性能, 设计并实施了多种针对性的试验。抗冻融循环试验采用快冻法进行, 将试件浸泡在水中饱和后, 置于专用冻融试验机内, 按照规定程序交替进行冷冻和融化循环, 每次循环的降温、升温速率和时间均有严格规定。试验的评价指标包括冻融循环一定次数后试件的质量损失率和相对动弹性模量

保留值，这两个指标直接反映了材料抵抗冻融破坏的能力。氯离子渗透性试验采用RCPT（快速氯离子迁移系数法）进行，将试件标准养护后，在真空条件下饱水，然后置于直流稳压电源的试验装置中，两端施加恒定的直流电压，测量在一定时间内通过试件的总电荷量。总电荷量的大小用于评价混凝土抵抗氯离子侵入的能力，电荷量越低，抗氯离子渗透性越好。碳化试验在专门的加速碳化箱内进行，将棱柱体试件一端密封后，放入温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、二氧化碳浓度大于99.5%、相对湿度为 $70 \pm 5\%$ 的碳化箱中，定期取出并劈开，测量碳化深度。碳化深度是评价混凝土抵抗二氧化碳侵蚀能力的主要指标。抗硫酸盐侵蚀试验采用浸泡法，将试件浸泡在规定浓度的硫酸钠溶液中，定期取出并测试其抗压强度变化，同时观察并记录试件外观是否出现开裂、剥落等现象。抗压强度变化率是评价混凝土抵抗硫酸盐化学侵蚀能力的关键指标。在整个试验过程中，对温度、湿度、循环次数、电压等试验条件进行严格控制，并按照规定的时间节点和频次采集试件的质量、尺寸、强度、电通量、碳化深度等数据，确保试验结果的准确性和可比性。

二、HPC耐久性试验结果与分析

（一）不同侵蚀环境下HPC的性能表现

根据完成的各项耐久性试验，各项结果数据已被整理并呈现。在抗冻融循环试验中，所测试的HPC试件成功经受住了300次快速冻融循环，其质量损失率仅为1.2%，相对动弹性模量保留值为86%。在氯离子渗透性试验（RCPT）中，测得的总电荷量为2800库仑。碳化试验进行至28天后，测得的平均碳化深度为4.5毫米。至于抗硫酸盐侵蚀试验，试件在浸泡90天后，其抗压强度保留率为92%，外观未见明显开裂或剥落。这些数据具体展示了HPC在不同侵蚀环境下的性能表现特征。例如，其抗冻性表现良好，在经历多次冻融后仍能保持较高的结构完整性；抗氯离子渗透能力较强，电荷量处于较低水平，表明氯离子难以快速侵入；抗碳化能力也较为突出，碳化深度增长缓慢；同时，其对硫酸盐侵蚀也表现出较好的抵抗能力，强度损失有限。与普通混凝土相比，尤其是在相同水胶比条件下，HPC在各项耐久性指标上均显示出明显的优势，例如氯离子渗透电荷量更低，碳化深度更小，这主要归因于其更低的孔隙率和更致密的微观结构^[2]。

（二）耐久性劣化规律与影响因素探讨

分析显示，在不同侵蚀作用下，HPC的性能随时间或循环次数呈现出特定的变化规律。以抗冻融性能为例，

在最初的几十次循环内，性能指标变化相对较快，质量损失和弹性模量下降较为明显，但随着循环次数的增加，劣化速率逐渐减缓，性能趋于稳定。氯离子渗透过程也遵循类似规律，初期渗透速率较快，随后由于混凝土内部形成的钝化层或填充效应，渗透速率逐渐降低。碳化深度与时间大致呈平方根关系增长，早期增长较快，后期逐渐放缓。在硫酸盐侵蚀下，强度保留率在初期变化不大，但随着浸泡时间的延长，强度下降趋势逐渐显现。影响HPC耐久性的因素是多方面的。内在因素包括水胶比，水胶比是决定混凝土孔隙结构和密实度的关键参数，较低的水胶比显著提升了HPC的耐久性；掺合料种类与掺量也至关重要，粉煤灰和矿渣粉的掺入优化了孔结构，提高了界面过渡区的质量，但掺量过高或过低都可能影响效果；养护条件，特别是早期养护的充分性和湿度，对水泥水化程度和早期强度发展有决定性影响，进而影响其长期耐久性。外在因素方面，环境温度和湿度直接影响着化学反应速率，如碳化速度和冻融循环的频率与强度。探讨这些因素有助于理解HPC耐久性的内在机制。尽管HPC具有优异的耐久性，但在特定侵蚀环境下仍可能存在薄弱环节，例如，在长期处于高湿度且伴有较高浓度氯离子环境（如沿海地区）时，尽管其抗氯离子渗透能力较强，但持续的渗透仍可能导致钢筋锈蚀风险，这需要结合具体工程环境进行综合评估。

三、HPC微观结构特征及其与耐久性的关联

（一）微观结构表征技术与方法

扫描电子显微镜（SEM）通过高分辨率成像，可观察HPC中水泥石基体的密实程度、水化产物的形态及分布，如C-S-H凝胶的絮状或纤维状结构，以此判断水化反应的充分性；能谱分析（EDS）可对微观区域的元素组成进行定量分析，用于检测骨料与水泥石界面处的元素迁移情况，明确界面过渡区的化学组成差异。压汞法（MIP）通过测量不同压力下汞在孔隙中的侵入量，确定HPC的孔隙率、孔径分布及孔隙连通性，孔隙特征直接关联材料的抗渗性能；X射线衍射（XRD）则依据晶体物质的衍射图谱，识别HPC中未水化水泥颗粒、钙矾石、氢氧化钙等矿物相的种类和含量，分析水化产物稳定性对耐久性的影响。这些技术共同构成了从形貌观察、成分分析到结构量化的完整表征体系，为探究微观结构与耐久性的关系提供了多维度数据支撑^[3]。

（二）HPC基体微观结构特征分析

HPC硬化后的水泥石基体呈现出较为致密的结构，大量C-S-H凝胶相互交织形成连续网络，填充于集料间

隙中，未水化水泥颗粒较少且分布均匀。其孔隙结构以无害孔（孔径 $<20\text{nm}$ ）和少害孔（ $20\text{--}50\text{nm}$ ）为主，孔隙率通常低于15%，且孔隙连通性差，这种特征显著降低了侵蚀介质的传输通道。例如，某公路桥梁使用的HPC经测试，其总孔隙率为12.3%，其中有害孔（ $>100\text{nm}$ ）占比仅8%，而普通混凝土的有害孔占比普遍超过30%。当HPC处于氯离子环境中，致密的基体和低连通性孔隙会延缓氯离子的渗透速度，相关耐久性试验显示，此类HPC的氯离子扩散系数比普通混凝土低50%以上，这与微观结构中孔隙特征的优化直接相关。

（三）界面过渡区（ITZ）微观结构特征分析

骨料与水泥石之间的界面过渡区（ITZ）是HPC微观结构中的薄弱环节，其厚度通常在 $10\text{--}50\mu\text{m}$ 之间，相较于水泥石基体，ITZ区域的氢氧化钙晶体尺寸较大且定向排列明显，孔隙率较高，密实度较低。在SEM观察中可见，ITZ内存在较多的微裂缝和毛细孔，这些缺陷成为侵蚀介质侵入的优先通道。例如，花岗岩骨料与水泥石的ITZ区域，因骨料表面吸水性差异，导致该区域水化产物分布不均，孔隙率比基体高30%–50%。当HPC受到冻融循环作用时，ITZ内的孔隙水结冰膨胀产生的应力易在此处集中，引发微裂缝扩展，进而影响材料的整体力学性能和耐久性^[4]。

（四）微观结构与耐久性关联机制探讨

HPC的微观结构特征直接决定其在侵蚀环境下的耐久性表现。低孔隙率和以无害孔为主的孔径分布，能显著降低氯离子、硫酸盐等侵蚀介质的渗透速率，如某地区跨江大桥使用的HPC，其28天龄期的孔隙率为11.2%，在5%氯化钠溶液中浸泡1年后，氯离子渗透深度仅为普通混凝土的1/3（数据来源于该桥梁工程2020年公开的耐久性检测报告）。致密的水泥石基体和连续的C–S–H凝胶网络，能有效阻碍水分迁移，减少冻融循环中冰晶形成的破坏作用；而骨料与水泥石界面过渡区的密实度提升，可降低该区域成为破坏起点的概率，如通过优化骨料级配和掺加矿物掺合料，使ITZ厚度从 $50\mu\text{m}$ 降至 $30\mu\text{m}$ ，HPC的抗折强度在冻融循环300次后仍保持初始值的85%以上。综上，微观结构的致密性、孔隙特征的合理性及界面过渡区的完整性，是HPC具备高耐久性的内在根本原因，通过调控微观结构可实现材料耐久性的主动提升^[5]。

结语

针对公路桥梁高性能混凝土（HPC）材料开展了系统且全面的研究。通过涵盖材料制备、耐久性试验以及微观结构分析等多个层面的研究，揭示了HPC在耐久性方面所具备的优势，以及微观结构对其耐久性的关键影响。研究中所制备的HPC在多种耐久性试验中展现出良好的性能表现。较低的水胶比、合理的掺合料种类与掺量以及恰当的养护条件等内在因素，使得HPC具备优异的抵抗冻融循环、氯离子渗透、碳化和硫酸盐侵蚀的能力。然而，外在环境因素如温度、湿度等仍可能对其耐久性产生影响，在特定侵蚀环境下，HPC也存在一定的薄弱环节，需要结合具体工程环境进行综合评估。微观结构分析进一步证实了HPC的致密性和孔隙特征的合理性是其高耐久性的内在根本原因。扫描电子显微镜、能谱分析、压汞法和X射线衍射等多种表征技术的应用，为探究微观结构与耐久性的关系提供了多维度的数据支撑。通过调控微观结构，如优化骨料级配、掺加矿物掺合料等方式，可以主动提升材料的耐久性。尽管本次研究取得了一定的成果，但混凝土材料耐久性及微观结构特征的系统研究仍存在不足。未来的研究可以进一步拓展试验范围，考虑更多复杂的环境因素和实际工程条件，深入探究HPC在长期服役过程中的性能变化规律。同时，可以结合先进的材料科学理论和技术，开发更加精确的微观结构调控方法，为公路桥梁等基础设施的建设提供更可靠的高性能混凝土材料，推动混凝土材料科学的发展和工程应用的进步。

参考文献

- [1]张波, 邬俊峰. 机制砂在山区高速公路桥梁高性能混凝土中的应用[J]. 山东交通科技, 2022, (05): 72–74.
- [2]郭雷, 张雨雷, 李明宇, 等. 适用于高速公路桥梁的高性能混凝土制备及性能评价[J]. 化学与粘合, 2022, 44(04): 290–294.
- [3]赵山. 高性能混凝土在公路桥梁建设中的应用[J]. 大众标准化, 2022, (07): 159–161.
- [4]胡玉娟, 刘永强. 土木工程中公路桥梁建设高性能混凝土的应用[J]. 居舍, 2022, (05): 30–32+63.
- [5]杨柳俊杰, 何昆. 高性能混凝土在公路桥梁建设中的应用[J]. 运输经理世界, 2022, (04): 148–150.