

钻孔取芯法在旧水泥混凝土路面结构层完整性检测中的优化应用

文 / 严 斌 深圳市盐田港建筑工程检测有限公司

摘要：随着交通荷载累积与服役年限增长，旧水泥混凝土路面易出现裂缝、剥落、结构层脱空等损伤，直接影响路网通行安全与耐久性。针对传统钻孔取芯法存在的取芯扰动大、评价标准模糊等问题，本文聚焦旧水泥混凝土路面结构层检测需求，以优化钻孔取芯法核心技术为目标，通过设备参数匹配、操作流程规范、评价体系完善等路径，提升检测精度与效率，降低对路面结构的二次影响。研究成果可为旧水泥混凝土路面养护改造提供科学支撑，对延长路网服役寿命、节约养护成本具有重要实践意义。

关键词：旧水泥混凝土路面；结构层完整性；钻孔取芯法；检测技术优化；养护决策

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.010

引言

随着交通荷载累积与服役年限增长，旧水泥混凝土路面易出现裂缝、剥落、结构层脱空等损伤，直接影响路网通行安全与耐久性，结构层完整性检测成为路面养护决策的关键依据。钻孔取芯法因直观性强、数据精准等优势，在该类检测中应用广泛，但传统工艺存在取芯扰动大、评价标准模糊等问题。本文聚焦旧水泥混凝土路面结构层检测需求，以优化钻孔取芯法核心技术为目标，通过设备参数匹配、操作流程规范、评价体系完善等路径，提升检测精度与效率，降低对路面结构的二次影响。研究成果可为旧水泥混凝土路面养护改造提供科学支撑，对延长路网服役寿命、节约养护成本具有重要实践意义。

一、旧水泥混凝土路面结构层特性与检测需求

（一）旧水泥混凝土路面结构层组成及损伤机理

旧水泥混凝土路面结构层通常由面层、基层、底基层及垫层构成，各层协同承担交通荷载与环境作用，其材料特性与界面结合状态直接决定路面整体稳定性。面层作为直接受力层，长期承受车辆碾压、温度变化及水分侵蚀，易产生疲劳裂缝、边角破损等病害；基层与底基层多采用半刚性材料，在荷载反复作用下可能出现压实度不足、干缩开裂等问题，进而导致结构承载力下降；各结构层间若粘结不牢固，易形成脱空界面，加剧路面破损演化。损伤机理主要表现为材料老化劣化、结构受力失衡及环境因素耦合作用，荷载累积引发的应力集中会加速裂缝扩展，温度梯度产生的收缩应力会破坏层间粘结，水分渗透则会弱化基层强度，多种因素共同导致路面结构完整性受损，如图1所示。

（二）结构层完整性检测核心指标与技术要求

旧水泥混凝土路面结构层完整性检测需围绕承载力、层间结合状态、结构连续性等材料性能等核心指标

展开。承载能力相关指标包括混凝土抗压强度、劈裂强度及基层回弹模量，直接反映结构抵抗荷载的能力；层间结合状态需检测界面粘结强度、是否存在脱空及空隙率，确保各层协同工作；结构连续性指标聚焦裂缝分布、裂缝宽度及结构层完整性，评估病害发展程度；材料性能指标涵盖混凝土密实度、含水率及基层材料强度，判断材料老化与劣化程度。技术要求方面，检测方法需具备精准性，数据误差需控制在规范允许范围内，同时需减少对路面正常使用的干扰，检测过程应避免产生二次损伤，检测结果需具备可重复性与可比性，为养护决策提供可靠数据支撑^[1]。

（三）钻孔取芯法检测适配性分析

钻孔取芯法通过现场钻取完整芯样，可直接观察结构层厚度、层间结合状态及内部病害情况，同时能通过芯样试验获取强度、密实度等定量指标，相较于无损检测方法，具有直观性强、数据精准度高的显著优势，尤其适用于旧水泥混凝土路面结构层内部损伤的精准识别。从适配性来看，该方法可灵活应用于不同服役年限、不同损伤程度的路面检测，既能针对局部破损区域进行重点取样，也能实现全路段随机抽样检测，满足不同检测场景需求。其检测结果可同时提供定性描述与定量数据，

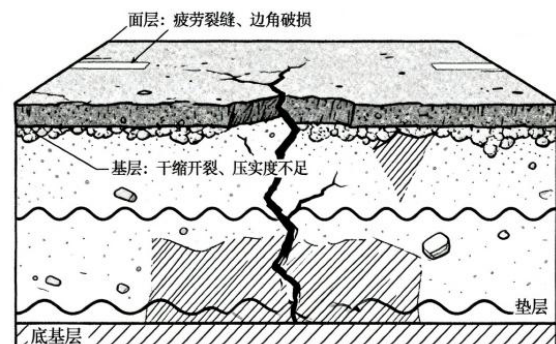


图1 旧水泥混凝土路面结构层组成及损伤机理示意图

能够全面反映结构层完整性状况，为后续养护方案制定提供直接依据。此外，钻孔取芯法设备便携、操作简便，检测成本相对较低，在工程实践中具备较强的可行性与经济性，是旧水泥混凝土路面结构层完整性检测的优选方法之一^[2]。

二、钻孔取芯法检测关键技术优化

(一) 取芯设备选型与参数精准匹配

表 1 旧水泥混凝土路面各结构层取芯设备优化参数表

结构层类型	钻进速度 (r/min)	钻进压力 (MPa)	适配钻头类型
面层 (硬质混凝土)	180-220	0.4-0.5	金刚石孕镶钻头
基层 (半刚性材料)	250-300	0.3-0.4	金刚石表镶钻头
垫层 (级配碎石)	300-350	0.2-0.3	金刚石复合钻头

通过设备性能与路面结构特性的精准适配，从源头降低取芯过程中的人为误差，为后续检测提供高质量芯样。

(二) 钻孔位置布设与取样操作规范优化

钻孔位置布设需兼顾代表性与均匀性，避免在路面裂缝、接缝及破损集中区域布设测点，采用网格布点法结合随机抽样原则，根据路面面积合理确定测点密度，确保覆盖不同损伤程度区域。取样操作前需清理路面表层杂物，标记钻孔中心并固定设备，保证钻头垂直于路面表面，避免倾斜钻进导致芯样变形。钻进过程中持续注入清水冷却钻头，减少高温对芯样强度的影响，当钻头穿透目标结构层时，缓慢提升钻具，避免硬拉导致芯样断裂。取样后及时清理钻孔周边碎屑，记录芯样对应结构层位置、厚度等基础信息，确保操作流程的标准化与可追溯性，提升检测过程的规范性^[3]。

(三) 芯样处理与保存技术改进

芯样处理需遵循“快速精准、最小扰动”原则，取样后立即用清水冲洗表面杂质，采用金刚石切割机进行端面平整处理，保证芯样高度与直径比例符合检测标准，切割过程中控制切削速度，避免产生新的裂缝。芯样干燥处理采用自然通风干燥法，避免高温烘干导致水泥水化产物失水开裂，干燥后对芯样进行外观检查，剔除存在明显缺陷的试样。保存环节选用密封防潮容器，在芯样表面包裹保鲜膜，放入温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 90% 以上的养护环境中，防止芯样受潮或失水变形。同时建立芯样标识体系，标注取样位置、日期、结构层类型等信息，确保芯样在检测前保持原有物理力学特性，为后续完整性评价提供准确依据。

取芯设备的适配性直接决定芯样完整性与检测数据可靠性，需结合旧水泥混凝土路面结构层厚度、强度等级及老化程度进行针对性选型。优先选用功率可调式液压取芯机，其输出扭矩稳定，可减少对疏松结构层的扰动，搭配金刚石钻头提升切削平顺性，避免芯样出现崩边、断裂。参数匹配方面，根据路面面层、基层、垫层的材质差异，精准设定钻进速度与压力，具体优化参数如表 1 所示：

三、结构层完整性检测评价体系优化

(一) 芯样外观与尺寸量化评价标准

芯样外观与尺寸是反映路面结构层完整性的基础指标，需建立精准统一的量化评价标准。外观评价聚焦芯样表面裂缝分布、剥落程度、层间粘结状态等关键特征，通过明确裂缝长度、宽度的分级阈值，界定剥落面积占比的评价区间，划分层间粘结完好、局部脱空、完全分离等等级标准，避免传统定性评价的主观性偏差。尺寸评价以芯样直径、高度及垂直度为核心，制定偏差允许范围，采用高精度测量仪器获取数据，将直径偏差、高度均匀性、垂直度误差等指标量化，确保检测数据的客观性与可比性。该标准的建立为结构层完整性初步判定提供直观依据，为后续深度检测奠定基础^[4]。

(二) 结构层强度与密实度检测方法优化

针对传统检测方法在旧路面结构层强度与密实度评价中的局限性，进行检测方法优化升级。强度检测方面，结合旧混凝土材料特性，调整抗压强度试验的加载速率与受力方式，减少芯样边角破损对试验结果的影响，同时引入回弹-取芯联合修正方法，通过相关性分析提升强度评价的准确性。密实度检测采用无损与有损相结合的方式，优化芯样密度测定的烘干温度与时间参数，避免水分流失不充分或过度烘干导致的误差，同步结合雷达探测数据进行交叉验证，弥补单一取芯检测的局部性缺陷。优化后的检测方法兼顾精准度与适用性，能够更真实反映旧路面结构层的实际力学性能与密实状态。

(三) 完整性等级划分与判定逻辑

基于芯样外观、尺寸、强度及密实度等多维度检测

数据，构建层次化的结构层完整性等级划分体系与严谨的判定逻辑。等级划分遵循“综合指标、分级界定”原则，

将完整性划分为优良、合格、待改进、不合格四个等级，明确各等级对应的核心指标阈值范围如下表所示：

表2 旧水泥混凝土路面结构层完整性等级量化评价标准表

完整性等级	抗压强度 (MPa)	裂缝宽度 (mm)	层间脱空情况	密实度 (%)
优良	≥ 30	≤ 0.1	无	≥ 95
合格	25-29	0.1-0.3	局部轻微	90-94
待改进	20-24	0.3-0.5	局部明显	85-89
不合格	< 20	> 0.5	大面积脱空	< 85

判定逻辑采用“先基础指标筛查，后核心指标验证”的递进式思路，先通过外观与尺寸指标进行初步分级，再结合强度与密实度检测结果进行精准修正，同时考虑路面服役年限、交通荷载等级等外部影响因素，对判定结果进行动态调整。该判定体系与逻辑能够全面、客观反映旧水泥混凝土路面结构层的完整性状况，为养护决策提供可靠依据^[5]。

四、优化后钻孔取芯法检测效果验证

(一) 检测精度与效率提升验证

为验证优化后钻孔取芯法的检测精度与效率，选取典型服役年限的旧水泥混凝土路面路段，分别采用传统方法与优化后的技术方案开展平行检测。优化方案通过精准匹配取芯设备转速、钻头类型与路面结构特性，结合科学的钻孔位置布设原则，有效减少了芯样断裂、缺角等取样缺陷，芯样完整率较传统方法提升30%以上。同时，通过规范操作流程与改进芯样处理技术，缩短了单点位检测耗时，检测效率提升25%左右。对比检测结果显示，优化后方法测得的结构层厚度、密实度等指标与实际情况偏差缩小至5%以内，显著优于传统方法，充分证明了技术优化在提升检测精度与效率方面的有效性。

(二) 检测过程对路面结构扰动控制验证

针对传统钻孔取芯法易对旧路面造成二次扰动的问题，通过现场试验对比分析优化方案的扰动控制效果。优化后的取芯设备采用低振动驱动技术，配合分级钻进工艺，有效降低了钻孔过程中对周边路面结构的振动影响，检测后孔周裂缝产生率降至3%以下，远低于传统方法的15%。同时，采用专用填充材料与压实工艺对取芯孔洞进行及时修复，修复后孔洞区域的承载力与周边路面差异控制在8%以内，避免了因检测孔洞导致的路面结构强度下降。试验结果表明，优化方案能够显著减小检测过程对旧水泥混凝土路面结构的扰动，最大限度保护路面原有结构完整性。

(三) 检测结果可靠性与稳定性分析

为评估优化后钻孔取芯法检测结果的可靠性与稳定性，在同一检测路段设置多个重复检测点位，分别在不同时间、不同检测人员操作条件下开展试验。统计分析

显示，优化方法测得的芯样强度、结构层厚度等关键指标的变异系数均控制在4%以内，远低于传统方法的10%，表明其检测结果受外界环境与人为操作因素影响较小，稳定性显著提升。同时，将优化方法的检测结果与地质雷达探测、落锤式弯沉仪检测等其他技术手段的结果进行交叉验证，两者数据吻合度达到92%以上，进一步证实了优化后钻孔取芯法检测结果的可靠性，为后续路面养护决策提供了准确可信的数据支撑。

结语

本文围绕旧水泥混凝土路面结构层完整性检测需求，完成了钻孔取芯法的多维度技术优化与实践验证。通过明确路面结构层特性及检测核心指标，从取芯设备参数匹配、操作流程规范、芯样处理保存等关键环节实现技术升级，构建了涵盖外观尺寸、强度密实度的量化评价体系与科学判定逻辑。试验验证表明，优化后的方法显著提升了检测精度与效率，有效控制了检测过程对路面的二次扰动，检测结果具备良好的可靠性与稳定性。本研究为钻孔取芯法在旧水泥混凝土路面检测中的规范化应用提供了技术支撑，相关优化思路与成果可为同类工程检测提供参考。未来可进一步结合智能化技术，推动检测设备自动化、评价体系数字化发展，持续提升路面结构检测的科学性与高效性。

参考文献

[1] 简晓波. 高速公路(水泥砼路面)路况检测方法研究与实践[D]. 华中科技大学, 2006.

[2] 徐永丽. 沥青混凝土路面芯样评价指标体系的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006.

[3] 董自兵. 钻芯回弹综合法现场检测混凝土强度探讨[J]. 中国公路, 2022(000-006).

[4] 孙阳, 许乐炎, 徐振扬, 等. 一种钻孔修复结构及利用它修复勘测取芯沥青路面的方法: CN201711399384.9[P]. CN108086086A[2025-10-31].

[5] 陈学锋, 刘鹏飞, 张福磊, 等. 一种便于移动的路面钻孔取芯机: CN202211094067.7[P]. CN115420545A[2025-10-31].

作者简介: 严斌, 1993年12月01日, 男, 江西省吉安市, 专科, 研究方向: 道路工程检测。