

沥青路面空隙率检测方法及其工程适用性研究

伍辉明

广西交投科技有限公司 广西南宁 530000

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18437

[摘要] 沥青路面空隙率直接影响路面结构的耐久性与使用性能,是衡量混合料施工质量的重要指标。本文以空隙率检测方法为核心,梳理了实验室和现场主要检测手段,包括马歇尔法、碘化银浸渍法、真密度与表观密度法以及核密度法、无损影像法和道路非破坏性技术,对各方法的精度、工程可操作性及适用条件进行系统分析。基于方法特性,提出工程适用性评价指标体系,涵盖精度、施工适应性及经济性,并分析了检测环境、施工条件与人员制度对应用效果的制约因素。研究旨在为路面施工监测提供理论支撑,指导检测方法在工程实践中的选择与优化,提高路面施工质量评价的科学性。

[关键词] 沥青路面; 空隙率; 检测方法; 工程适用性; 评价指标

沥青路面空隙率反映了混合料内部结构的紧密程度,是决定路面承载能力、抗车辙性能及耐久寿命的关键参数。工程实践中,空隙率的不合理控制往往导致裂缝、车辙和剥落等病害发生,给道路养护和使用安全带来挑战。近年来,随着材料技术进步与施工工艺复杂化,对空隙率检测方法提出了更高要求,不同方法在精度、效率与可操作性上存在明显差异。实验室方法能提供较高精度,但施工现场应用受限;现场非破坏性检测技术操作便捷,却可能受到环境与施工条件干扰^[1]。有鉴于此,评价各类检测方法的工程适用性,形成科学、可执行的评价体系,是提高路面施工质量和延长路面寿命的重要手段。

1 沥青路面空隙率概述

沥青路面空隙率是混合料内部骨料与沥青浆体间空隙的比例,它直接决定路面的承载能力、排水性能以及长期耐久性。空隙过小会导致路面密实度过高,温度或荷载变化时容易发生裂缝;空隙过大则降低路面结构强度,使车辙和剥落更易形成。空隙率的合理控制不仅关系到施工质量,也影响路面养护成本和使用寿命。在路面检测中,空隙率是判断施工工艺是否符合设计要求的重要指标,也是混合料设计验证和质量监控的核心参数。

从理论角度看,空隙率受材料性质、施工工艺和环境条件多重因素影响。骨料粒径分布、沥青用量、压实工艺以及施工温度都会在不同程度上改变混合料的内部结构。实际工程中,掌握空隙率的变化规律,有助于预测路面病害发展趋势,并为施工和养护提供依据。随着检测技术的发展,实验室和现场方法不断完善,为空隙率测量提供了多样化手段,但如何在保证精度的同时兼顾施工可操作性,仍是工程应用中需要重点考虑的问题。

2 沥青路面空隙率检测方法

2.1 实验室检测方法

2.1.1 马歇尔法

马歇尔法是评定沥青混合料空隙率最常用的实验室方法,通过标准化制样和压实工艺,测量试件的体积密度与理论最大密度,从而计算总空隙率。该方法操作流程明确,便于在实验室中对不同配合比的混合料进行对比分析,并为设计阶段提供参考。试件在规定温度下压实后,空隙率反映出混合料在施工压实条件下可能达到的密实程度,能够直观反映骨料级配、沥青用量与混合料工作性的关系。尽管马歇尔法在精度上具有一定优势,但其受试件制备和压实环节影响较大,现场条件下的适应性有限。

2.1.2 碘化银浸渍法

碘化银浸渍法是一种通过液体浸透测定混合料空隙率的实验室方法,利用碘化银溶液的渗透特性,将试件内部孔隙充分浸润,再通过重量变化计算空隙比例。该方法能够直接反映混合料的有效空隙结构,对理解骨料排列和沥青浆体包裹状况具有参考价值。试件在处理过程中,液体渗透速度受空隙连通性和孔径分布影响,因此结果能够反映材料内部结构的均匀性和压实效果。相比传统密度法,碘化银浸渍法在微小空隙的识别上更敏感,但操作要求严格,对试件的干燥和浸液时间控制尤为关键。

2.1.3 真密度与表观密度法

真密度与表观密度法通过测量混合料试件在干燥状态下的质量与体积关系,结合骨料和沥青的固体密度计算空隙率^[2]。真密度反映材料本身的密实程度,表观密度则体现混合料整体结构,包括孔隙在内的体积特性。将两者数据结合,可以准确评估总空隙率及空隙分布情况,为混合料设计提供

量化依据。该方法操作简便,重复性较高,尤其适合对不同配合比和压实度的混合料进行对比分析。然而,它只能反映整体空隙水平,对孔隙连通性和微细结构识别能力有限,需要与其他检测手段配合使用。

2.2 现场检测方法

2.2.1 核密度法

核密度法是一种典型的现场非破坏性检测技术,通过放射性 γ 射线测量路面材料的密度变化,从而计算空隙率。该方法能够在施工或使用阶段快速获得路面密度信息,操作便捷且重复性良好。测量过程中,仪器发射的射线穿透混合料,根据衰减程度推算体积密度,与设计理论密度对比即可得出空隙率。核密度法对施工温度和材料水分较为敏感,因此在数据解释时需要考虑环境因素对测量结果的影响。由于无需破坏路面结构,它在快速评估压实质量、指导施工调整以及路面维护决策中发挥重要作用。

2.2.2 无损影像法

无损影像法通过X射线、CT扫描或其他成像技术获取混合料内部结构的三维图像,从而分析空隙率及孔隙分布情况。该方法可以清晰地揭示骨料排列、沥青浆体包裹情况以及空隙连通性,为理解材料内部微观结构提供直观依据。与传统密度测量不同,无损影像法不依赖外部液体或破坏性操作,因此能够保留试件原状,重复性好且适合复杂配合比的分析。

表1 常用空隙率检测方法的精度与可靠性指标

方法	精度范围	典型标准差	可重复性说明	适用场景
马歇尔法	$\pm 0.5\%$	0.3-0.5%	高,但受制于制样	实验室设计与材料配比评价
碘化银浸渍法	$\pm 0.7\%$	0.4-0.6%	较高,需严格控制操作	实验室微观空隙分析
真密度与表观密度法	$\pm 0.6\%$	0.3-0.5%	高,重复性好	混合料整体空隙率评价
核密度法	$\pm 1.0\%$	0.6-0.8%	良好,易受环境影响	施工现场快速评估
无损影像法	$\pm 0.8\%$	0.5-0.7%	高,受分辨率限制	微观结构可视化分析
非破坏性检测技术	$\pm 1.2\%$	0.7-1.0%	中等,需结合环境因素	大面积路面施工监测

3.1.2 施工适应性指标

施工适应性指标反映了空隙率检测方法在实际路面施工条件下的可操作性和应用效果。不同方法在现场使用时表现差异明显,实验室方法对施工环境依赖较低,但需要制备试件和专用设备,难以在大面积路段快速实施^[3]。核密度法和非破坏性技术能够在施工过程中直接测量密度,覆盖范围广,数据采集速度快,但受到路面温度、湿度以及材料含水量影响,测量结果存在一定波动。操作人员的技能水平对测量精度和可靠性也有直接影响,高精度方法通常要求较高的专业素养。施工适应性评价有助于工程管理者在保证检测精

操作过程中,图像分辨率、扫描参数和材料密度差异会对结果产生影响,需要在实验设计中充分考虑。

2.2.3 道路非破坏性检测技术

道路非破坏性检测技术利用雷达、超声波和其他传感手段对路面密度和空隙率进行快速评估,无需破坏路面结构。仪器通过发射信号并接收反射波,分析材料的密度分布和内部空隙情况,能够实时监控施工过程的压实效果。该方法适用于大面积路段的快速检测,数据采集效率高,便于施工单位进行即时质量控制。检测结果受到路面温度、湿度及材料特性影响,需要结合施工条件进行合理解读。

3 工程适用性评价指标分析

3.1 工程适用性评价指标体系

3.1.1 精度与可靠性指标

精度反映了方法测量结果与真实空隙率之间的接近程度,而可靠性则体现了在相同条件下重复测量结果的一致性。实验室方法如马歇尔法和真密度测定通常精度较高,但受制于试件制备和操作规范,可靠性可能受人为因素影响。现场非破坏性方法则可以快速覆盖大面积路面,重复性好,但环境因素如温度、湿度及材料状态会对精度产生干扰。通过系统比较各方法的测量误差、标准差以及结果稳定性,可以为工程应用提供量化依据,并指导方法选择与组合使用(如表1)。

度的同时,提高现场操作效率,合理安排施工质量控制流程。

3.1.3 经济性指标

经济性指标衡量空隙率检测方法在工程应用中的成本效益,包括设备投入、操作耗材以及数据处理所需时间和人工成本。实验室方法虽然精度较高,但设备采购和试件制备成本较大,且一次测量覆盖面积有限,使得在大规模施工中投入较高。现场快速检测技术如核密度法和非破坏性方法,初期设备投资可能不低,但能够快速获取大量数据,减少人工重复操作,从整体工程成本角度看具有优势。经济性评价还需要考虑维护和培训成本,高精度方法往往对操作人员培训

要求严格, 而操作简便的方法在长期使用中成本更可控。通过系统分析各方法的经济投入与产出效果, 可以为工程项目在施工监控中选择最合理、最可持续的检测手段提供依据。

3.2 不同检测方法适用性分析

3.2.1 实验室方法的工程局限

实验室空隙率检测方法在混合料设计和理论分析中具有较高精度, 但在工程应用中存在一定局限。试件制备要求严

格, 需要控制骨料级配、沥青含量及压实工艺, 操作不规范容易导致测量偏差。测量结果反映的是标准化条件下的空隙率, 难以完全反映施工现场复杂环境下的实际密实情况。实验室方法对设备和环境要求高, 数据获取周期长, 不适合大面积路段的快速监控。此外, 操作人员的经验水平直接影响实验结果的稳定性和可重复性(如表2)。

表2 实验室空隙率检测方法的工程局限

试验方法	方法	精度优势	适用性	操作要求	限制说明
马歇尔法	高	高	低	中等	需制备标准试件, 难以现场快速应用
碘化银浸渍法	中	高	低	高	操作繁琐对环境敏感, 适合微观分析
真密度与表观密度法	中	高	低	中	无法显示孔隙连通性

3.2.2 现场方法的适用条件

现场空隙率检测方法在施工过程监控中具有不可替代的价值, 但其适用性受多种因素制约。了解各方法的现场适用

条件, 有助于工程管理者在施工监控中合理安排检测方案, 实现精度、效率和可操作性的平衡。下表3为常用现场检测方法在不同施工条件下的适用性, 便于直观比较方法特点。

表3 现场空隙率检测方法适用条件

方法	适用场景	环境影响	操作难度
核密度法	高温、干燥条件较敏感	中等	单点快速测量
无损影像法	对温度、湿度敏感	高	小面积扫描
道路非破坏性检测技术	信号受路面结构及水分影响	中	中等

3.3 影响工程适用性的关键因素

施工环境是影响空隙率检测方法工程适用性的首要因素。路面温度、湿度以及材料水分状态会直接改变测量信号的衰减或渗透速度, 对核密度法和非破坏性技术的精度产生明显影响。在高温或高湿环境下, 测量结果可能偏低或偏高, 需要结合施工条件进行修正。理解环境对不同检测手段的干扰规律, 是确保现场测量可靠性的重要前提。

施工条件和路面状态同样制约检测方法的应用范围。新铺路面、半硬化路面或养护路面, 其密实度和表面特性差异显著, 操作人员在测量时必须根据路面状况选择合适的方法和参数。大型施工项目中, 大面积快速测量和高精度局部分析往往需要结合使用不同检测手段, 以兼顾速度和准确性。施工条件的复杂性要求工程管理者灵活调整检测方案, 避免单一方法造成数据偏差。

人员素质和制度保障是工程适用性评价中不可忽视的因素。高精度方法对操作技能要求高, 仪器校准、数据记录和分析过程都依赖熟练人员完成。制度完善的质量控制体系能够规范检测流程, 保证数据可比性和可靠性。通过培训和制度约束, 操作误差可以显著降低, 使检测方法在复杂工程条件下发挥应有作用, 同时为施工质量监控提供持续支持。

4 结论

通过建立精度、施工适应性和经济性指标体系, 可以对各方法进行系统评估, 为工程项目选择适用检测手段提供量化依据。工程实践表明, 不同方法的组合使用能够弥补单一方法的局限, 实现精确度与效率的平衡。在施工质量控制中, 将理论分析与现场测量结合, 能够有效指导施工过程、优化压实工艺, 并为路面长期性能评估提供科学支撑。对空隙率检测方法的全面理解和合理应用, 是提升路面耐久性、降低养护成本和保障道路使用安全的关键。

[参考文献]

- [1] 张苛, 谢玲儿, 张争奇. 沥青路面现场施工质量检测与评价方法探讨[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 604-611.
- [2] 崔立龙, 凌天清, 曾凡贵, 等. 基于探地雷达的密级配覆水沥青层的空隙率检测[J]. 材料导报, 2021, 35(4): 92-98.
- [3] 凌天清, 崔立龙, 张意, 等. 考虑沥青层表面细观构造的探地雷达空隙率检测研究[J]. 材料导报, 2021, 35(24): 24081-24087.