

沥青混凝土路面压实质量影响因素以及质量提升对策探析

闫慧芹

新疆北方建设集团有限公司 新疆 奎屯 833200

摘要：压实是沥青混凝土路面施工的关键工序，直接决定路面的服役性能与使用寿命。本文系统分析了影响沥青混凝土路面压实质量的核心因素，涵盖材料特性（沥青标号与用量、矿料级配与颗粒形状、混合料温度）、施工工艺（碾压速度与遍数、碾压组合方式、振频与振幅匹配）、环境条件（环境温度、风速、阳光辐射）以及下承层状态等多个维度。在此基础上，从配合比优化、温度全过程管控、智能碾压技术应用及施工精细化管理的角度，提出了系统性的质量提升对策。研究表明，压实质量的改善需要从单一依赖碾压设备转向材料-工艺-环境-管理的协同优化。

关键词：沥青混凝土；路面压实；压实度；温度控制；智能碾压

引言

沥青混凝土路面因其行车舒适、噪音低、维修便捷等优点，广泛应用于各等级公路与城市道路。压实作为沥青路面施工的最后道工序，其质量直接决定了路面的密实度、平整度、抗水损害能力和耐久性。压实不足将导致空隙率偏高，路面在服役过程中易发生水损害、车辙和疲劳开裂等早期破坏，严重影响行车安全和使用寿命。然而，实际工程中压实质量问题仍屡见不鲜，如局部压实度不足、碾压不均匀、温度离析导致的压实差异等，反映出对压实质量影响因素的系统性认知仍不够深入，质量管理仍较多依赖经验。沥青混凝土的压实过程本质上是热混合料在碾压机械作用下，骨料重新排列、沥青胶浆填充空隙、混合料体积压缩至设计密度的复杂物理过程。这一过程受材料自身特性、施工工艺参数、外部环境条件和下承层状况的综合影响，各因素之间还存在复杂的交互作用。例如，适宜的碾压温度下，即使碾压功略有不足也可能达到目标密度；而在低温条件下，即便增加碾压遍数，压实效果仍然有限。因此，提升压实质量必须从系统角度识别关键影响因素及其作用机制，进而制定有针对性的质量管控策略。

1 沥青混凝土压实机理与评价指标

1.1 压实的物理本质与阶段划分

沥青混凝土的压实过程可划分为三个阶段。初始压实阶段，混合料被摊铺后处于松散状态，骨料之间以点接触为主，碾压机械的静载作用使骨料克服摩擦力发生滑动和转动，相互靠拢，混合料密度迅速增加，这一阶段以骨料的重新排列为主。第二阶段为中间压实，随着

骨料间隙减小，粗骨料之间的接触点增多，进一步压缩需要克服更大的结构阻力，此时压实力需克服骨料间的咬合和摩擦，骨料可能发生轻微的破碎和棱角磨损，沥青胶浆被挤压填充至更小的空隙中。第三阶段为终压成型，混合料温度进一步降低，沥青胶浆粘度增大，骨料骨架基本形成，此时碾压作用主要用于消除表面痕迹并获得平整度，进一步增加碾压遍数对密度的贡献已十分有限。理解这一阶段划分的意义在于：不同阶段对碾压参数的需求不同，应动态调整而非一成不变。

1.2 压实质量的主要评价体系

压实质量的核心评价指标为压实度，即现场压实后的干密度与室内标准马歇尔击实试验所得最大理论密度的比值。压实度越高，路面空隙率越小，其抗水侵入能力和抗疲劳性能越优^[1]。然而，压实度作为单一指标存在局限性——它反映的是整体密度水平，却不能表征压实的均匀性。实际工程中，同一检测断面上各点的压实度变异系数往往较大，局部薄弱区的存在足以诱发整体路面的早期损害。因此，现代压实质量评价正在从“仅看平均值”向“兼顾均匀性”转变，引入压实度代表值、极值和变异系数等统计指标。此外，智能压实技术中通过连续检测碾压轮的振动响应来反算路面刚度，实现压实质量的实时、全断面评价，为过程控制提供了更丰富的信息维度。

2 材料特性对沥青混凝土路面压实质量的影响

2.1 沥青性质与用量的作用

沥青粘度决定了压实温度窗口。高标号沥青（如 70 号、90 号）粘度低、易压实，但高温稳定性有所牺牲；

低标号沥青（如 30 号、50 号）抗车辙性好，但粘度高、施工窗口窄。沥青用量影响压实敏感性：适量可润滑骨料、降低摩擦阻力；过少则干涩阻力大，过多则易产生推移、拥包及泛油，且压实密度均呈下降趋势，存在最优用量区间。

2.2 矿料级配与颗粒特征

级配类型影响可压实性与密实度。骨架密实型级配（如 SMA）依赖粗骨料嵌挤和细料填充，压实功需求大但成型稳定性好；悬浮密实型级配（如 AC）流动性好、易压实，但高温稳定性相对不足。最大公称粒径增大，骨料接触点间距及摩擦力增加，压实难度上升。粒形与纹理同样关键：立方体状、粗糙集料内摩擦角大，需更大压实功但嵌挤稳定；针片状及光滑卵石虽易压实，但成型后稳定性不足。

2.3 混合料温度的时空衰减特性

温度是压实质量的最敏感因素。混合料出料后温度持续下降，受运距、覆盖条件、气温及摊铺散热影响（薄层降温尤快）。碾压温度须高于最低阈值（普通沥青不低于 135℃，改性沥青不低于 150℃），以保证沥青低粘度、骨料可滑移^[2]。一旦低于阈值，沥青粘度骤升致“硬化”，增加碾压功难以提升密度，甚至导致骨料破碎。温度离析尤为危险，易造成同一断面压实效果悬殊，损害路面整体均匀性。

3 施工工艺参数对沥青混凝土路面压实质量的影响

3.1 碾压速度与碾压遍数

碾压速度影响压实作用时长：过快时能量传递不足，骨料未能重排即已通过，压实度不足；过慢虽利于压实，但降低效率，且易致过压（沥青上浮、细集料溢出，影响构造深度）。合理速度通常为 2~5km/h，需据混合料类型、层厚及设备综合确定。碾压遍数存在最佳区间，前几遍密度增益最大，后期增量递减直至趋零；无效碾压反而引起骨料破碎和胶浆上浮。施工中应通过试验段确定达到目标压实度的最低有效遍数，而非机械执行固定数值。

3.2 碾压组合方式与设备选型

碾压分为初压、复压、终压三阶段。初压以双钢轮压路机静压或弱振，获取平整度和初始密实；复压是压实核心，宜用振动压路机与轮胎压路机配合，发挥振动重排与揉搓封闭空隙的协同作用；终压用双钢轮静压消除轮迹^[3]。设备选型须兼顾客层厚度：浅层（3~5cm）选用轻型振动压路机，厚层（>8cm）需大型设备以保证振动能量直达层底。

3.3 振动频率与振幅的匹配

频率决定冲击次数，振幅决定单次冲击能量。高频低幅适用于薄层及细粒式混合料，可密集冲击而不破坏骨料；低频高幅适用于厚层及粗粒式混合料，大振幅能穿透厚层、克服深层摩擦阻力。匹配须考虑混合料阻尼特性——改性沥青粘度大、能量衰减快，需更高振幅穿透；普通沥青则对频率更敏感。常见误区是长期使用出厂默认参数而不按工况调整，易导致压实不足或面层骨料过度破碎。

4 环境条件与下承层状态对沥青混凝土路面压实质量的影响

4.1 环境温度与风速的作用

环境温度通过影响混合料在碾压过程中的温度保持能力间接作用于压实质量。高温季节施工时，混合料降温速率慢，碾压有效时间充裕，压实质量相对容易保证。低温季节或夜间施工时，混合料表面与空气温差大，热量散失加速，尤其是薄层铺筑时，可能在数分钟内温度即降至碾压下限以下。此时即使碾压设备性能优良，也难以获得理想的密实度。风速的影响常被忽视但不可小觑——3 级以上的风即可明显加速混合料表面的对流散热，使表面形成“硬壳”而内部尚热，这种表里温差导致碾压时表层开裂或推移。阳光辐射则对摊铺面产生不均匀加热效应，向阳面和背阴面的混合料温度差异可能达到 10℃以上，造成同断面压实度不均匀。

4.2 下承层表面状况与刚度

下承层的表面状态对沥青面层的压实效果具有显著影响。当下承层为旧沥青路面或水泥混凝土路面时，若表面粗糙度不足或未洒布粘层油，新铺层与下承层之间的粘结力弱，碾压时面层混合料可能产生滑移，影响压实功的有效传递。下承层的刚度同样重要——基层刚度不足时，碾压荷载使基层产生弹性变形，部分能量被基层吸收而未能用于面层混合料的颗粒重排，导致面层实际获得的压实功小于名义压实功。对于柔性基层或软弱土基路段，需要适当增加碾压遍数或采用大吨位压路机予以补偿。此外，下承层的不平整会在摊铺面层时形成厚度变异，薄层区域散热快、压实困难，厚层区域则压实能量衰减大，两者均不利于压实均匀性。

5 质量提升对策与系统化管理

5.1 配合比优化与温度窗口设计

配合比设计阶段不应仅关注体积指标满足规范要求，还应评价混合料的压实敏感性。建议在配合比验证中增加不同温度下的击实试验，绘制“温度-密度”关

系曲线,明确该配合比的压实温度下限和最佳压实温度范围。对于改性沥青或高粘度沥青,应通过旋转压实试验确定其压实能量指数和压实速率指数,作为配合比设计是否合理的重要判据。集料级配设计时,在满足骨架要求的前提下,适当增加中间粒径(2.36~4.75mm)含量有助于改善混合料的内摩擦特性,降低压实阻力。沥青用量的选择应在满足膜厚要求的基础上,取目标空隙率对应用量的偏上限,以增加混合料的润滑性和可压实性,但同时需通过抗推移试验验证其稳定性。

5.2 施工全过程温度管控体系

针对温度对压实质量的决定性影响,应建立从拌和到碾压的全链条温度管控体系。出料温度应采用红外测温仪逐车检测,确保在设定范围之内,超出上限或下限的混合料应予废弃。运输环节采用双层篷布覆盖并配以保温棉,减少长途运输中的热量损失。摊铺环节应缩短运料车待卸时间,摊铺机速度控制在2~3m/min,使碾压工作面长度合理,避免因等待时间过长导致混合料降温。碾压段长度应根据环境温度和风力动态调整——高温季节可适当加长(30~50m),低温季节则缩短至15~20m,确保碾压在温度窗口内完成。在碾压作业面,应配置手持式红外测温仪持续监测混合料表面和内部温度,以颜色标识区分“可压区”“临界区”和“禁压区”,指导现场碾压作业的起止时机。

5.3 智能碾压与数字化质量控制

传统压实质量控制依赖事后检测,发现问题时为时已晚。智能碾压技术通过在压路机上集成高精度定位系统(GPS/北斗)和振动响应传感器,实现了压实质量的实时连续监测。其原理在于:随着混合料被压实,其刚度逐渐增大,压路机振动轮与路面相互作用产生的加速度响应也相应变化。通过建立加速度幅值与压实度之间的标定关系,可以生成全断面的压实度分布云图,识别欠压区和过压区,实时引导操作手调整碾压速度或遍数^[4]。智能碾压系统的另一重要功能是“压实历史记录”——每一遍碾压的轨迹、速度和振动状态均被记录,施工管理人员可以追溯每个网格点经受的碾压次数和能量输入,实现压实质量的精准评价和过程控制。此外,基于红外热成像的连续温度监测可与智能碾压数据融合,形成“温度-压实度”关联图谱,为优化施工参数提供数据支撑。

5.4 精细化管理与人员技能提升

技术手段的效能最终取决于管理水平和人员素质。压实质量的提升需要建立涵盖试验检测、施工操作、质量管理和技术监督的多级责任体系。压路机操作手的技能和经验在压实质量控制中占据重要地位——熟练的操作手能够根据混合料的目测状态和压路机的振动反馈,实时调整速度、切换振动模式,这种“手感”和“眼力”在突发工况下往往比固定的施工参数表更为可靠。因此,应重视操作手的定期培训和技能考核,建立持证上岗制度。质量管理方面,应坚持“试验段先行”原则,每种配合比和压实设备组合在正式施工前必须经试验段验证,确定最优碾压参数组合,而非盲目沿用以往工程经验。最后,建立压实质量的信息化反馈机制,现场检测数据实时上传至管理平台,形成“检测-分析-调整”的快速闭环,将质量问题消除在萌芽阶段。

6 结语

沥青混凝土路面的压实质量受材料特性、施工工艺、环境条件和下承层状态的协同影响,各因素之间存在复杂的交互效应。本文系统梳理了各影响因素的作用机理,明确了温度是压实质量的“第一控制要素”,碾压工艺是“核心执行环节”,而配合比则为压实提供了“内在可能性”。质量提升的根本出路在于从“经验驱动”走向“数据驱动”的精细化管理——通过温度全过程管控守住压实底线,通过智能碾压技术实现过程精准控制,通过人员培训和管理体系建设夯实质量基础。未来,随着5G、物联网和人工智能技术在道路施工领域的持续渗透,压实质量的控制有望进一步迈向实时化、在线化和智能化,实现从“事后检验合格”到“过程保证合格”的根本转变。

参考文献

- [1] 张登良,王哲人,沙庆林. 沥青路面压实技术现状与发展趋势[J]. 中国公路学报,2023,36(7):1-14.
- [2] 黄晓明,赵永利,高英. 沥青混合料压实特性评价方法研究[J]. 建筑材料学报,2022,25(3):455-462.
- [3] 孙立军,刘黎萍,田小革. 沥青路面施工温度离析及其对压实质量的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(12):1715-1723.
- [4] 杨军,刘建勋,王鹏. 智能压实技术的发展与工程应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2024,41(2):12-19.