

施工过程中摊铺参数对再生沥青路面压实度影响研究

文 / 肖衡广 中交第二航务工程局有限公司

摘要：探究再生沥青路面施工中振捣频率、振动频率及摊铺速度对压实度的影响规律，以解决 RAP 混合料因材料特性导致的压实性能劣化问题。沃尔沃 ABG2280B 摊铺机与 PQI301 无核密度仪，系统测试不同参数组合下的路面相对密度，揭示单因素与多阶段作用机制。结果表明：振捣频率由 5Hz 增至 20Hz 时，相对密度提升 1.28%，但 15Hz 后边际效益下降；振动频率在低频段（0-15Hz）通过打破颗粒静摩擦显著提升密实度（增幅 0.8%），而高频段（>25Hz）因能量耗散与局部松弛效应导致效率降低；摊铺速度超过临界值（2-2.5m/min）时，相对密度下降 0.42%，表明能量作用时间不足。

关键词：振捣频率；压实度；摊铺速度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.020

引言

再生沥青混合料 (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) 因其显著的资源节约与环境保护效益，近年来在道路工程领域得到广泛应用。研究显示，RAP 掺量达 30%-50% 时，可减少 20% 以上的天然集料开采和 15% 的沥青消耗，同时降低 30% 的温室气体排放^[1,2]。然而，RAP 的掺入可能因旧沥青老化、级配变异等因素导致混合料压实性能劣化，进而影响路面结构的长期耐久性^[3,4]。旧沥青在服役过程中发生的氧化聚合反应会显著提高其黏度（针入度降低 40%-60%），导致再生混合料在压实过程中出现黏滞阻力增大、骨料重排困难等现象。此外，RAP 在破碎筛分过程中产生的细料富集（<0.075mm 含量增加 2-3 倍）和粗集料棱角磨损（形状指数下降 15%），进一步破坏了混合料的骨架嵌挤结构。压实度作为沥青路面施工质量的核心指标，直接决定了路面的抗车辙性（空隙率每降低 1%，动稳定度提高 25%）、抗水损害能力（压实度达 96% 时冻融劈裂强度比提高 18%）及疲劳寿命（压实度提升 2% 可使疲劳次数增加 1.5 倍）。当前研究表明^[5]，当 RAP 掺量超过 25% 时，传统振动压实工艺的压实效率下降 30%-40%，且易产生温度离析（表面与内部温差达 15-20℃）。因此，优化摊铺工艺参数（如摊铺温度动态调控、振荡压实技术应用、压实功梯度分配等）以提升再生沥青路面的压实效果，是当前道路工程领域亟待解决的关键问题。压实度作为沥青路面施工质量的核心指标，直接决定了路面的抗车辙性、抗水损害能力及疲劳寿命。因此，优化摊铺工艺参数以提升再生沥青路面的压实效果，是当前道路工程领域亟待解决的关键问题。

现有研究多聚焦于传统沥青混合料的压实机理与工艺优化^[6,7]，而对再生沥青混合料压实特性的系统性探索仍显不足。尽管部分学者针对 RAP 掺量、拌合温度等参数对压实度的影响开展了研究，但关于摊铺过程中振捣频率、振动频率及摊铺速度等动态参数的协同作用机制尚缺乏深入分析。此外，高频振动能量传递效率、临

界速度阈值等关键问题尚未形成统一结论，导致实际施工中参数选择存在经验性与盲目性。

基于此，本研究以 AC-16 型再生沥青混合料为对象，采用沃尔沃 ABG2280B 摊铺机与 PQI301 无核密度仪，系统探究振捣频率、振动频率及摊铺速度对压实度的单因素与多阶段影响规律。通过揭示振动能量输入与材料响应的动态平衡机制，明确各参数的优化阈值及协同匹配策略，旨在为再生沥青路面施工工艺的精细化控制提供理论支撑。

一、研究内容

(一) 再生沥青路面

摊铺的再生沥青路面为 AC-20，RAP 掺量为 45%。采用 90# 道路石油沥青，合成级配如图 1 所示。

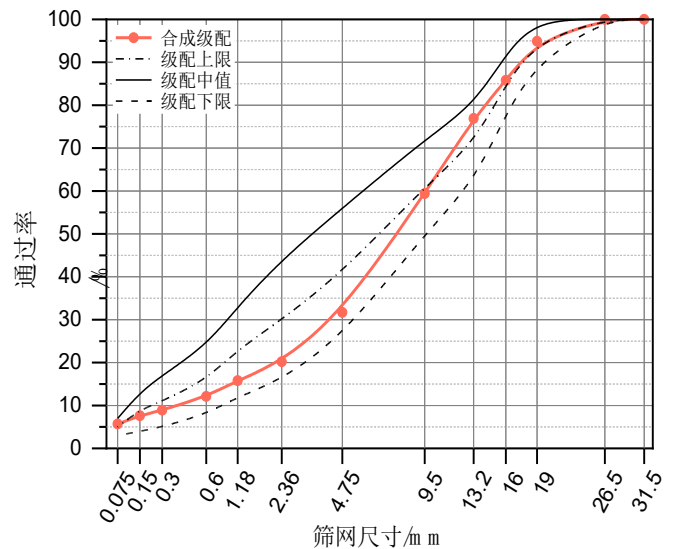


图 1 AC-16 再生沥青混合料合成级配

(二) 测试方法

摊铺机为沃尔沃 ABG2280B 摊铺机，分别研究振捣频率、振动频率和摊铺速度对摊铺机压实度的影响。使用 PQI301 型无核密度仪测试路面压实度。

(三) 研究方法

本研究的技术路线图如图2所示。本研究针对再生沥青路面施工过程中摊铺参数对压实度的影响展开系统性试验分析，技术路线设计如下：首先，固定振动频率与摊铺速度，以振捣频率为单一变量（5Hz、10Hz、15Hz、20Hz），探究振捣频率对压实度的影响；之后，保持摊铺速度恒定，以振动频率为单一变量（0Hz、

8Hz、15Hz、25Hz、33Hz、42Hz、47Hz），分析振动频率对压实度的影响；最后，固定振捣频率及振动频率，以摊铺速度为唯一变量（1m/min、2m/min、3m/min），研究摊铺速度对路面压实度的影响。通过分析试验数据，探究摊铺机参数对沥青路面压实度的影响，并根据试验结果给出推荐的摊铺机参数。

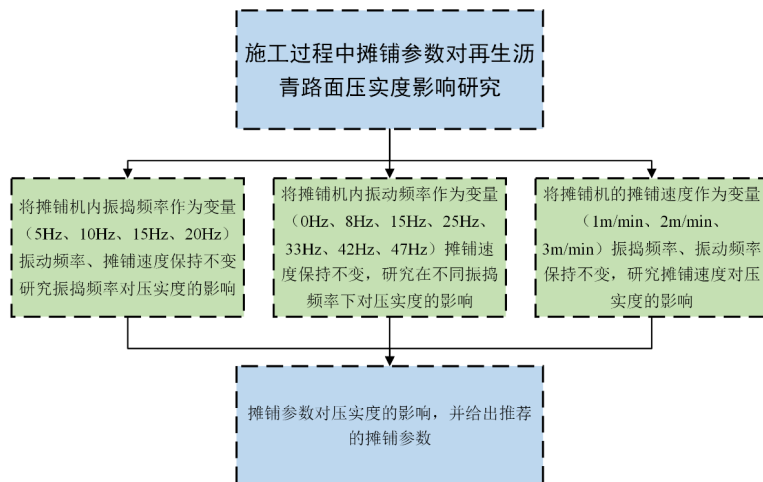


图2 技术路线图

二、结果与讨论

(一) 振捣频率对压实度的影响

固定摊铺机的摊铺速度、振动频率等参数研究振捣频率对再生沥青路面压实度的影响，试验结果如图3所示。随着振捣频率的增加路面压实度也逐渐增加，呈现显著的正相关。表明振动能力的增强可有效提升材料的压实性能。当振捣频率为5Hz时，相对密度为2654.4；随着捣鼓频率上升为10Hz，相对密度为2660.3增加0.2%。随着捣鼓频率进一步提高至15Hz，相对密度为2676.9，相较于5Hz振捣频率，相对密度增加0.8%。当捣鼓速率为20Hz时，相对密度最大为2688.3，相较于5Hz捣鼓频率增加0.12%。测试结果表明，调整捣鼓频率可以有效提高路面压实度。

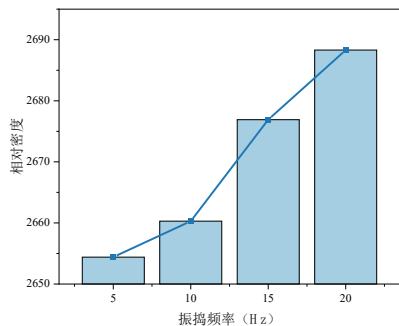


图3 振捣频率对压实度的影响

(二) 振动频率对压实度的影响

振动频率对压实度的影响如图4所示。当振捣频率为5Hz时，振动频率从0Hz增加至8Hz时，相对密度显著增加由2623.6增加至2645.8，表明初始振动能量的引入能有效打破颗粒间静摩擦，促进接触重构。当振动频率继续增加至15Hz时，相对密度增幅较小，说明该阶

段颗粒重排趋于稳定，振动能量输入与颗粒惯性阻力达到动态平衡。当振动频率由15Hz增加至25Hz时，相对密度出现下降，这可能源于高频振动引发颗粒弹性振荡，导致已密实结构产生局部松弛。当频率超过25Hz后，密度呈现缓慢恢复趋势但增幅较小。表明高频段(>25Hz)能量利用效率显著降低。此现象与振动波传播特性密切相关——高频振动的短波长特征可能导致能量在表层耗散，难以有效传递至材料深层。

当振捣频率为10Hz时，振捣频率的增加使得初始相对密度相较于5Hz振捣频率显著增加。随着振动频率由0Hz增加至8Hz，相对密度由2638.5显著增加至2650.3。表明增加初始振动能量可以有效增加再生沥青路面压实度。在8Hz-15Hz区间内，相对密度出现轻微回落，这是由于振动能量与颗粒惯性阻力的动态平衡，或局部弹性振荡引发的微观松弛效应。当振动频率超过15Hz后，密度恢复逐渐上升的趋势15-25Hz阶段增幅为0.14%，25-33Hz阶段增幅减缓至0.05%，而33-42Hz区间密度增速显著提高，增幅为0.21%。当振动频率进一步提高至47Hz，密度达到峰值但增幅较小。说明高频段(>42Hz)能量耗散增加或颗粒重排接近极限状态。

当捣鼓频率为15Hz时，振动频率对材料相对密度的影响呈现多阶段非线性响应特征。当振动频率从0Hz提升至47Hz时，相对密度由2663.3递增至2672，整体增幅为0.33%（8.7个单位），表明振动能量输入可有效改善压实性能，但其效率随频率变化呈现显著差异。在0-15Hz低频段，相对密度增速显著；在15-25Hz中频段，密度增速减缓；25-33Hz区间相对密度减少；33-42Hz区间相对密度微增；而42-47Hz区间相对

密度增幅回升,表明高频振动可能通过增强颗粒碰撞动能,促进细观孔隙填充。

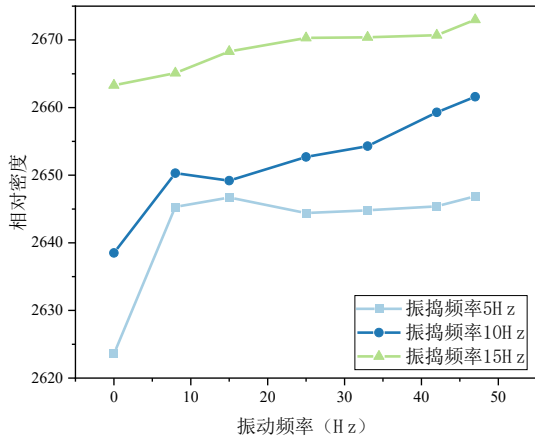


图4 振动频率对压实度的影响

(三) 摊铺速度对压实度的影响

在振动频率固定为40Hz、振捣频率为10Hz的情况下,摊铺速度对再生沥青路面压实度的影响如图5所示。摊铺速度对材料相对密度的影响呈现显著的负相关性。当摊铺速度从1 m/min提升至3 m/min时,相对密度由2676.7逐步下降至2665.5,整体降幅达0.42%,表明摊铺速度的增大会削弱振动能量的有效作用时间,导致压实性能劣化。摊铺速度由1 m/min增至2 m/min时,相对密度下降0.17%;随着速度的继续增加至3m/min,降幅扩大至0.25% (6.7个单位),反映高速工况下能量输入与材料响应时间的矛盾加剧,在1m/min低速工况下,相对密度达峰值2676.7,表明该条件下振动能量输入与材料响应时间达到最优匹配。然而,随着速度提升,密度衰减速率呈非线性特征(2m/min-3 m/min阶段降幅加速),暗示存在临界速度阈值(约2-2.5m/min),超过该阈值后密实效率将急剧下降。此现象与振动压实理论中的“能量-时间积分准则”一致——当外部输入能量无法补偿因速度提升导致的时间积分损失时,系统将偏离最优压实状态。

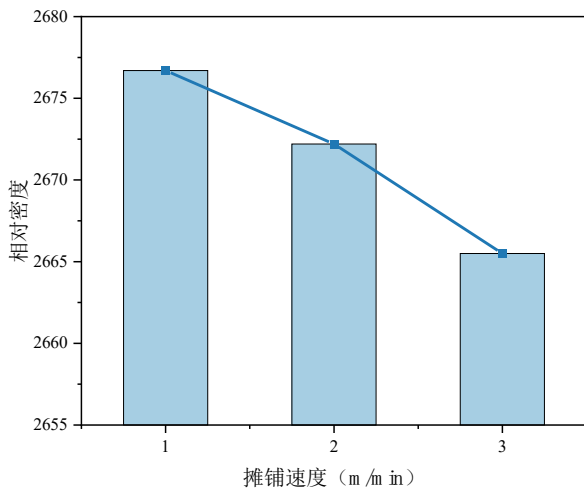


图5 摊铺速度对压实度的影响

结语

本研究系统分析了振捣频率、振动频率及摊铺速度对再生沥青路面压实度的影响,主要结论总结如下:

(1) 振捣频率与压实度的关系。振捣频率的增加显著提升路面压实度。当振捣频率从5Hz增至20Hz时,相对密度由2654.4提高至2688.3,增幅达1.28%。其中,15Hz至20Hz区间增幅趋缓,表明存在最佳振捣频率阈值(约15-20Hz),过高频率可能导致能量边际效益下降。

(2) 振动频率的阶段性的影响。振动频率对压实度的影响呈现非线性特征:低频段(0-15 Hz):振动能量有效打破颗粒间静摩擦,显著提升密实度(增幅约0.8%)。高频段(>25Hz):能量耗散加剧,表层振动波难以传递至深层,导致密度下降或增速趋缓。临界频率(约25Hz):超过此值后,弹性振荡引发局部结构松弛,需避免高频段的过度使用。

(3) 摊铺速度的负相关性。摊铺速度与压实度呈显著负相关。速度由1 m/min增至3 m/min时,相对密度下降0.42%,表明高速工况下振动能量作用时间不足。临界速度阈值约为2-2.5 m/min,超过此阈值后密实效率急剧降低,建议施工中优先采用低速(≤2m/min)以优化压实效果。

(4) 工程应用建议。实际施工中,可通过以下参数组合提升再生沥青路面压实质量:振捣频率:15-20Hz;振动频率:8-15Hz(低频段优先);摊铺速度:≤2 m/min。

本研究结果为再生沥青路面施工参数优化提供了理论依据,未来可进一步探究多参数交互作用及长期路用性能验证。

参考文献

- [1] 编辑部中国公路学报. 中国筑路机械学术研究综述·2018[J]. 中国公路学报, 2018, 31(06): 1-164.
- [2] 编辑部中国公路学报. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [3] 编辑部中国公路学报. 中国路面工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(03): 1-81.
- [4] 冯新军, 张喆, 赵梦龙, 等. 一种掺再生剂和RAP的沥青混合料配合比设计新方法[J]. 中外公路, 2018, 38(02): 242-247.
- [5] 左锋, 叶奋, 宋卿卿. RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(04): 1403-1410.
- [6] 黄琪琳, 田维安. 市政道路沥青路面加铺再生施工技术[J]. 四川建材, 2019, 45(01): 151-152.
- [7] 郭木强, 申铁军. 高速公路沥青路面预防性养护新技术分析[J]. 四川建材, 2022, 48(08): 146-147.

作者简介: 肖衡广, 1988年9月1日, 男, 湖南衡阳, 大学本科, 工程师, 从事路桥工程专业。