

沥青冷再生中铣刨机转子转速对混合料均匀性影响研究

文传铠

海南省交通规划勘察设计院有限公司 海南 海口 570100

【摘要】：沥青冷再生技术作为一种高效、环保的路面修复方法，在道路养护工程中得到广泛应用。铣刨机转子转速是影响混合料均匀性的关键因素之一，直接关系到再生混合料的性能和工程质量。本文系统综述了沥青冷再生中铣刨机转子转速对混合料均匀性的影响机制、试验方法、工程案例及优化策略。首先分析了转子转速与剪切力、搅拌效果、材料破碎程度的关系，探讨了转速对混合料级配、沥青裹覆率、空隙率等均匀性指标的影响规律。结合国内外典型工程案例，总结了不同转速下的施工效果及适用条件。最后，针对现有研究的不足，提出了未来研究方向，包括智能化转速控制、多参数协同优化及新型转子设计等，以期沥青冷再生技术的进一步发展提供理论参考和实践指导。

【关键词】：沥青冷再生；铣刨机；转子转速；混合料均匀性；剪切力

DOI:10.12417/2705-0998.25.16.006

引言

随着我国公路交通量的快速增长和路面老化问题的日益突出，沥青路面的维修与养护任务愈发繁重。沥青冷再生技术因其能够有效利用废旧沥青混合料、降低能源消耗和环境污染，成为当前道路养护领域的研究热点和发展趋势。铣刨机作为沥青冷再生施工的核心设备，其转子转速直接影响铣削效果、材料破碎程度及混合料均匀性，进而决定再生路面的性能和使用寿命。铣刨机转子转速通过改变剪切力和搅拌强度，对混合料的级配分布、沥青裹覆均匀性、空隙率等关键指标产生显著影响。转速过高可能导致材料过度破碎，细集料含量增加，影响混合料的力学性能；转速过低则可能造成剪切不充分，沥青与集料裹覆不均匀，降低混合料的稳定性。因此，深入研究转子转速对混合料均匀性的影响机制，优化转速参数，对于提高沥青冷再生施工质量和工程效益具有重要意义。

1 铣刨机转子转速对混合料均匀性的影响机制

1.1 剪切力与材料破碎程度

铣刨机转子通过高速旋转的刀头对旧沥青路面进行切削和破碎，转子转速直接决定了刀头的线速度和剪切力大小。当转速增加时，刀头与材料的接触频率和冲击能量增大，剪切力增强，能够更有效地将旧沥青混合料破碎成细小颗粒。例如PM312铣刨机的转子转速可在97-121 rpm之间调整，高转速下的切削力更强，适合处理坚硬或厚层路面材料。过度提高转速可能导致材料过度破碎，产生过多的细集料和粉尘。细集料含量过高会增加混合料的比表面积，导致沥青用量不足，影响裹覆效果和耐久性。此外，过度破碎还可能破坏集料的棱角性，降低混合料的内摩擦角，影响其高温稳定性。因此，需根据材料特性和施工要求合理选择转速，平衡剪切力与材料破碎程度。

1.2 搅拌效果与沥青裹覆均匀性

转子转速不仅影响材料的破碎效果，还通过搅拌作用影响

沥青与集料的裹覆均匀性。在冷再生过程中，铣刨机同时完成铣削、破碎、添加再生剂（如泡沫沥青、乳化沥青）和拌和等工序。转速较高时，刀头的搅拌频率增加，能够促进再生剂与集料的充分混合，提高沥青裹覆的均匀性。例如，徐工XCL300P泡沫沥青冷再生厂拌设备通过分级搅拌技术和乳化沥青分级喷洒技术，结合可调转速的转子，有效提升了混合料的沥青裹覆均匀性。过高的转速可能导致混合料在拌和过程中产生离析现象。由于离心力的作用，粗集料倾向于向外侧移动，而细集料和沥青则集中在中心区域，形成级配不均匀和沥青分布不均。此外，高转速下的强剪切力可能破坏乳化沥青的乳液结构，导致破乳速度加快，影响其与集料的粘结性能。因此，需通过试验确定最佳转速范围，确保搅拌效果与沥青裹覆均匀性的平衡。

1.3 转速对级配均匀性的影响

级配均匀性是衡量混合料质量的重要指标之一，直接影响路面的强度、耐久性和抗滑性能。转子转速通过控制材料的破碎程度和搅拌效果，对级配均匀性产生显著影响。研究表明，适当提高转速可增加细集料的含量，使级配曲线更接近设计要求。例如，在G346随县双河段泡沫沥青冷再生工程中，通过调整转子转速和刀头数量，使再生混合料的级配符合Sup12.5的范围要求，提高了路面的整体性能。转速过高可能导致级配偏细，细集料含量超过设计值，增加混合料的空隙率和吸水性，降低其水稳定性。相反，转速过低则可能使粗集料破碎不足，级配偏粗，影响混合料的压实效果和力学性能。因此，需根据旧料特性和再生混合料设计要求，优化转子转速，确保级配均匀性满足工程需求。

1.4 空隙率与转速的关系

空隙率是反映混合料密实程度的关键指标，对路面的抗渗性、耐久性和力学性能具有重要影响。转子转速通过影响材料的破碎程度、搅拌效果和压实特性，间接影响混合料的空隙率。

在冷再生施工中,适当提高转速可增加材料的破碎程度和细集料含量,提高混合料的密实度,降低空隙率。例如,在海南儋州省道 S308 美洋线泡沫沥青冷再生试验段中,通过优化转子转速和拌和工艺,使再生混合料的芯样密实度达到设计要求,空隙率显著降低。过高的转速可能导致材料过度破碎和离析,增加混合料的空隙率。此外,高转速下的强剪切力可能使集料表面的沥青膜变薄,降低集料间的粘结力,进一步影响混合料的密实度。因此,需综合考虑材料特性、施工工艺和设备参数,合理选择转子转速,以获得最佳的空隙率和力学性能。

2 试验方法与结果分析

2.1 室内模拟试验

室内模拟试验是研究转子转速对混合料均匀性影响的常用方法。通过使用小型卧式混合机或冷再生试验台,模拟铣刨机的铣削和拌和过程,分析不同转速下的混合料性能变化。例如,某研究通过调整混合机转子转速(40-80 r/min),研究了转速对再生混合料级配、沥青裹覆率和空隙率的影响。结果表明,转速为 60 r/min 时,混合料的级配均匀性最佳,沥青裹覆率达到 90%以上,空隙率控制在 5%以内。室内试验还可结合图像处理技术和颗粒分析方法,定量评估混合料的均匀性。例如,通过对混合料试样进行 CT 扫描或筛分分析,可获得集料颗粒的分布特征和级配曲线,进而分析转速对均匀性的影响。此外,利用布氏粘度计等设备测试沥青的粘度变化,可间接反映转速对沥青裹覆效果的影响。

2.2 现场试验与检测

现场试验是验证室内试验结果和优化施工参数的重要手段。在实际工程中,通过调整铣刨机转子转速,采集不同工况下的混合料样品,进行性能检测和均匀性评估。例如,在广西国省干线乳化沥青冷再生工程中,采用维特根 W380 CR 冷再生机,通过调整转子转速(110-160 r/min)和铣刨深度,分析不同转速下的混合料均匀性和施工效果。结果表明,当转速为 130 r/min 时,混合料的级配均匀性最佳,沥青裹覆率达到 85%以上,路面取芯完整密实。现场检测方法包括钻芯取样、筛分试验、马歇尔试验、车辙试验等。钻芯取样可直观观察混合料的密实度和裹覆情况;筛分试验用于分析级配均匀性;马歇尔试验和车辙试验则评估混合料的强度、稳定性和高温性能。此外,利用智能传感器和物联网技术实时监测施工过程中的转速、温度、湿度等参数,可实现对混合料均匀性的动态控制。

2.3 数值模拟与优化

数值模拟技术为研究转子转速对混合料均匀性的影响提供了新的手段。通过建立铣刨机转子的三维模型,结合离散元法(DEM)或计算流体力学(CFD),模拟刀头与材料的相互作用过程,分析不同转速下的剪切力分布、颗粒运动轨迹和混合料均匀性。例如,某研究利用 DEM 模拟了不同转子转速下

的集料破碎和混合过程,发现转速为 120 r/min 时,集料颗粒的分布最均匀,剪切力分布较为合理。数值模拟还可用于优化转子设计和转速参数。通过调整刀头数量、排列方式和转速,分析其对剪切力、搅拌效果和材料均匀性的影响,为设备改进和施工方案优化提供依据。例如,宝马格 MPH122-2 冷再生机通过优化转子刀头数量(206 个)和转速范围(110-160 r/min),显著提高了混合料的均匀性和施工效率。

3 工程案例分

3.1 案例一:海南儋州省道 S308 美洋线泡沫沥青冷再生试验段

3.1.1 工程概况

海南儋州省道 S308 美洋线采用连续式泡沫沥青厂拌设备进行冷再生下面层施工。旧沥青混合料 100%循环利用,添加新集料和水泥,泡沫沥青发泡用水量 3.5%,半衰期 10 秒。

3.1.2 转速优化与结果

在试验段施工中,通过调整铣刨机转子转速(97-121 r/min)和拌和时间,优化混合料均匀性。结果表明,当转速为 109 r/min 时,混合料的沥青裹覆均匀性最佳,芯样密实度达到设计要求,空隙率低于 6%。车辙试验显示,再生混合料的稳定度平均值为 5529 次/毫米,远高于规范值 2800 次/毫米,高温稳定性优异。

3.1.3 技术创新

该工程采用徐工 XCL300P 泡沫沥青冷再生厂拌设备,通过分级搅拌技术和乳化沥青分级喷洒技术,结合可调转速的转子,实现了混合料的均匀拌和和高效再生。同时,引入智能控制系统,实时监测转速、温度和材料配比,提高了施工精度和质量。

3.2 案例二:G346 随县双河段泡沫沥青冷再生工程

3.2.1 工程概况

G346 随县双河段采用泡沫沥青冷再生技术进行路面结构性改造。该工程旧路面为沥青混凝土面层,存在严重的老化和破损问题。施工中使用维特根 W380 CR 冷再生机,铣刨宽度 6.2 m,铣刨深度 5 cm,添加泡沫沥青和水泥作为再生结合料。

3.2.2 转速控制与效果

施工过程中,通过调整转子转速(110-160 r/min)和铣刨速度(4-6 m/min),优化混合料均匀性。试验结果表明,当转速为 130 r/min 时,混合料的级配均匀性最佳,油石比控制在 5.05%-5.10%之间,符合设计要求。芯样检测显示,再生层的马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度均满足规范要求,路面取芯完整密实,无离析现象。

3.2.3 经验总结

该案例表明,合理控制转子转速可有效提高泡沫沥青冷再

生混合料的均匀性和路用性能。在施工中,需根据旧料特性和再生剂类型,通过试验确定最佳转速范围,并结合智能控制技术实现动态调整,确保施工质量。

3.3 案例三:江西樟吉高速公路乳化沥青冷再生工程

3.3.1 工程概况

江西樟吉高速公路改扩建工程采用乳化沥青冷再生技术处理旧沥青路面,再生层用作下面层,上面加铺橡胶沥青混凝土面层。施工中使用维特根 W380 CR 冷再生机,铣刨宽度 6.2 m,铣刨深度 8 cm,添加乳化沥青和水泥。

3.3.2 转速影响与对策

在施工过程中,发现转子转速过高($>160\text{ r/min}$)时,乳化沥青破乳速度加快,导致裹覆效果下降,混合料均匀性变差。通过降低转速至 130 r/min ,并调整乳化沥青喷洒量和拌和时间,有效改善了混合料的均匀性。芯样检测显示,再生层的强度和耐久性满足设计要求,路面取芯完整密实,无明显离析。

3.3.3 经验启示

该案例表明,乳化沥青冷再生施工中,转子转速需与乳化沥青的破乳特性相匹配。过高的转速可能破坏乳液结构,影响裹覆效果,因此需通过试验确定最佳转速,并结合乳化剂类型和喷洒工艺进行优化。

4 影响因素与优化策略

4.1 材料特性

旧沥青混合料的老化程度、集料级配、沥青含量等特性对转子转速的选择具有重要影响。老化程度较高的旧料需要更高的转速以实现充分破碎和再生剂裹覆;集料级配偏粗时,需适当提高转速以增加细集料含量,改善级配均匀性。此外,再生

剂类型(如泡沫沥青、乳化沥青)和用量也会影响转速的优化。例如,乳化沥青冷再生中,转速过高可能导致破乳过快,需适当降低转速以保证裹覆效果。

4.2 设备参数

铣刨机的转子直径、刀头数量、排列方式等参数与转速协同作用,共同影响混合料均匀性。较大的转子直径和更多的刀头数量可增加剪切力和搅拌效果,但也可能导致材料过度破碎。例如,宝马格 MPH122-2 冷再生机采用 206 个刀头和可调转速($110\text{--}160\text{ r/min}$),在保证剪切力的同时,有效控制了材料破碎程度。此外,行走速度、铣刨深度等施工参数也需与转速相匹配,以实现最佳的拌和效果。

4.3 施工工艺

施工工艺的合理性直接影响混合料均匀性。例如,再生剂的喷洒方式、拌和时间、碾压顺序等均需与转速参数协同优化。在泡沫沥青冷再生中,采用同步摊铺工艺和智能喷洒系统,可实现再生剂的精确添加和均匀分布。碾压过程中,需根据混合料的温度和转速调整碾压遍数和压路机类型,确保压实效果和均匀性。

4.4 优化策略

试验优化通过室内试验和现场试验,建立转速与混合料均匀性指标(如级配、沥青裹覆率、空隙率)的关系模型,确定最佳转速范围。引入传感器和物联网技术,实时监测施工参数(如转速、温度、湿度),结合机器学习算法实现转速的动态调整和优化。优化转子设计,采用可调节刀头数量和排列方式的模块化转子,提高设备对不同材料和工况的适应性。综合考虑材料特性、设备参数和施工工艺,建立多参数协同优化模型,实现混合料均匀性的全面提升。

参考文献:

- [1] 汪学斌,胡永彪,陆鹏震.沥青混凝土单刀铣削阻力计算模型与试验修正[J].中国公路学报,2016,29(2):136-142.
- [2] 顾海荣,焦生杰,肖翀宇,等.路面铣刨机铣削载荷特性分析与试验[J].中国公路学报,2012,25(3):154-158.
- [3] 李玉平,向军,郑明远,等.路面铣刨机铣削载荷的动力学仿真[J].湘潭大学自然科学学报,2014,36(1):102-104.
- [4] 汪学斌,胡永彪,陆鹏震.沥青混凝土单刀铣削阻力计算模型与试验修正[J].中国公路学报,2016,29(2):136-142.
- [5] 母福生,熊宏志,栗慧.铣刨鼓铣削过程仿真及切削应力分析[J].机械科学与技术,2014,33(1):43-47.
- [6] 高宇,王珠,张伟.旧沥青路面铣刨过程中路面材料力学特性分析[J].交通节能与环保,2020,16(80):101-105.