

HMM-13 高模量混合料施工工艺参数对路用性能的影响研究

王民警

江苏东交智控科技集团股份有限公司, 中国·江苏 南京 210000

摘要: 本研究围绕 HMM-13 高模量沥青混合料, 系统分析其施工工艺参数对路用性能的影响。通过室内试验与现场试验相结合, 研究了温度、碾压方式、铺装厚度等关键施工参数对混合料的高温稳定性、抗车辙性能与抗疲劳性能的影响。结果表明, HMM-13 混合料在优化施工条件下表现出优异的力学性能和耐久性, 尤其适用于重载交通和高温气候条件下的高速公路应用。本研究为高模量混合料在工程中的推广提供了数据支撑与技术指导。

关键词: HMM-13; 高模量混合料; 施工工艺参数; 路用性能; 抗车辙性

Research on the Influence of Construction Process Parameters of HMM-13 High Modulus Mixture on Road Performance

Minjing Wang

Jiangsu Dongjiao Intelligent Control Technology Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: In this study, the influence of construction process parameters on road performance of HMM-13 high modulus asphalt mixture was systematically analyzed. Through the combination of laboratory test and field test, the effects of key construction parameters such as temperature, rolling method and pavement thickness on the high temperature stability, rutting resistance and fatigue resistance of the mixture were studied. The results show that the HMM-13 mixture exhibits excellent mechanical properties and durability under optimized construction conditions, especially for highway applications in heavy traffic and high temperature climates. This study provides data support and technical guidance for the promotion of high modulus mixtures in engineering.

Keywords: HMM-13; high-modulus mixtures; construction process parameters; road performance; resistance to rutting

0 前言

随着交通载荷不断增大, 道路结构对面层材料提出更高要求。高模量混合料因其高刚度、高稳定性被广泛关注。HMM-13 作为一种优化粒径级配的高模量混合料, 在国外已有一定应用基础, 但在国内仍处于推广初期。施工工艺参数直接影响其路用性能, 特别是在实际工程中, 温度控制、压实方式等均可能造成性能波动。因此, 研究其关键工艺参数的控制对保障工程质量具有现实意义。本研究基于室内与现场试验, 探索 HMM-13 施工工艺参数的技术适配性, 为后续大规模工程应用提供参考。

1 HMM-13 混合料的材料组成与设计特点

1.1 材料选用及性能要求

HMM-13 高模量沥青混合料采用性能优异的原材料, 以确保其在高温、重载条件下具备良好的路用性能。基质沥青通常选择具有高软化点和低延度的 SBS 改性沥青或高模量专用沥青, 其针入度、延度、粘度等性能指标需满足《公路沥青路面施工技术规范》要求, 并具有较高的剪切模量和良好的温度稳定性。高模量添加剂是提高混合料模量水平的关键, 可采用聚合物类、矿粉改性剂或纤维材料, 通过提升

骨架结构稳定性和增强粘结性能, 显著改善混合料的刚性和耐久性。细集料和矿粉必须具有良好的级配结构、洁净度及抗磨损性能, 石料针片状含量应控制在 10% 以内, 确保骨架紧密成型; 粗集料选用玄武岩或花岗岩等高强度材料, 压碎值不超过 20%, 以提升抗车辙能力。如图 1 所示。



图 1 石料针片状

1.2 配合比设计技术路线

HMM-13 混合料的配合比设计以实现最大干密度、合理空隙率和较高动态模量为核心目标。设计过程中, 采用 Marshall 设计方法作为基础, 并辅以车辙试验、动稳定度测试、冻融劈裂强度比、弯曲疲劳寿命等多项性能试验, 对多组配合比方案进行综合评价, 确保最终方案在满足施工性要

求的同时具备优良的力学性能和耐久性。该混合料的最大公称粒径为 13mm, 采用骨架密实型结构设计理念, 注重中间粒径级配的优化, 从而提高骨料间的嵌挤力和整体承载能力。为控制压实难度并降低水损害风险, 目标空隙率设定在 1%~2.5%, 油石比一般控制在 4.2%~4.6%, 在保证沥青充分包裹集料的基础上, 避免沥青富集引发的高温流动变形。实际配合比选择需通过多轮试拌和性能对比, 最终确定兼顾高模量、耐久性和施工适应性的最优配比, 为工程应用提供精准的材料参数依据。

1.3 与普通混合料的技术性差异

与常规 AC-13 或 SMA-13 混合料相比, HMM-13 在材料选用、结构性能及施工适应性方面具有显著技术优势。其采用高模量基质沥青与高强度粗集料, 配合严控级配设计, 使其整体结构更加致密稳定。在力学性能方面, HMM-13 的动态模量普遍高出 30% 以上, 具备更高的结构刚度和荷载扩散能力, 有效降低了底层拉应变水平, 延缓路面结构疲劳破坏进程, 提升道路服役寿命。在施工过程中, HMM-13 因刚性更大, 压实难度略高于常规混合料, 必须通过提高初压温度、控制压实时间窗以及使用合理的碾压组合方式, 才能达到设计密实度要求。此外, 该类混合料对温度变化较为敏感, 最佳施工温度窗口较窄。拌和温度需严格控制在 $175^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 摊铺温度不应低于 160°C , 以避免降温过快造成密实度不足和早期表层剥落等质量问题。在高温稳定性方面, HMM-13 混合料在综合油石比 5.2% 条件下, 60°C 动稳定度达 9107 次/mm, 远超 8000 次/mm 要求; 70°C 下也达 3546 次/mm, 优于 3000 次/mm 标准, 显示出优异的高温稳定性, 具有显著优势。展现出卓越的抗车辙能力。

2 关键施工参数及其控制要点

2.1 拌和温度的设置与控制

拌和温度是影响 HMM-13 混合料包裹性、均匀性及最终施工质量的关键工艺参数。为确保高模量添加剂能够充分分散, 并促使沥青与集料之间形成良好黏附效果, 拌和温度一般应控制在 $175^{\circ}\text{C} \sim 185^{\circ}\text{C}$ 的范围内。此温度区间既能提升沥青的流动性与渗透性, 又能避免因高温导致沥青提前老化, 保证混合料在拌和过程中的稳定性和一致性。在正式拌合前, 应提前开启加热系统对设备进行预热, 尤其要确保集料加热均匀, 避免温差过大影响包裹效果。实际操作中建议先将粗集料加热至设定温度, 再依次添加细集料和高模量添加剂, 最后喷入加热至相应温度的沥青, 以形成充分搅拌和包裹的复合体系。温度偏低会导致混合料发干, 影响摊铺和压实, 甚至导致早期裂缝; 而温度过高则可能引起沥青成分挥发或老化, 降低抗疲劳性能。

2.2 摊铺温度与速度控制要求

HMM-13 混合料的摊铺温度是确保成型质量与最终路用性能的关键控制参数, 直接关系到混合料的施工性能和结构密实度。为保障混合料在摊铺过程中保持良好的流动性和可压实性, 摊铺温度应严格控制在 $160^{\circ}\text{C} \sim 170^{\circ}\text{C}$ 。在此温

度范围内, 混合料易于摊铺成型, 沥青具有足够的粘结力, 有利于形成连续、平整的路面结构。施工前应将摊铺机, 特别是熨平板部分的混合料预热温度从常规的 100°C 提高到 110°C , 以充分预热, 防止冷料与金属接触瞬间降温, 避免出现局部粘结、冷接缝及起波纹等质量问题。从而影响路面平整度和结构完整性。摊铺速度应保持均匀, 推荐控制在 2.5~4.5m/min。速度过快易导致混合料分布不均、摊铺厚度波动大, 速度过慢则可能造成料温迅速下降, 导致后续压实难度增大, 降低密实度和结构强度。为提升施工过程的可控性, 应配备红外线测温设备, 对摊铺温度进行实时监控, 并根据现场气候和施工节奏及时调整供料速度和摊铺参数, 确保压实前混合料温度始终处于适宜区间, 从而保证 HMM-13 路面结构的整体均匀性与稳定性。

2.3 压实工艺参数优化

压实是确保 HMM-13 混合料达到设计密实度和结构性能的关键环节。高模量混合料由于其刚性较大、冷却速度快, 对压实工艺提出更高要求。旋转压实试验结果显示, HMM-13 混合料在综合油石比 5.0% 至 5.4% 范围内, 空隙率 VV 分别为 2.6%、1.8%、1.2%, 均满足技术要求的 1.0%~2.5% 范围, 说明混合料密实性良好, 油石比设计合理。初压需在出料后 3 分钟内完成, 以保证最佳成型状态。压实设备推荐采用三阶段组合方式: 初压使用双钢轮压路机, 复压使用振动压路机, 终压使用胶轮压路机, 以提升压实效果并消除表面微观孔隙。压实遍数根据现场温度和混合料状态进行调整, 一般为 6~8 遍, 确保压实度不低于 98%。同时, 压实过程需特别注意接缝处理, 确保纵向与横向接缝紧密结合, 避免结构薄弱。为防止压实过程中出现温差压实问题, 需合理安排施工节奏, 确保压路机始终跟随摊铺机进行作业, 最大限度减少温度损失, 提升整体压实质量。

3 施工工艺参数对力学性能的影响分析

3.1 高温稳定性影响因素分析

HMM-13 混合料在高温条件下的稳定性主要表现为其抗车辙性能, 而该性能受施工温度控制和压实质量影响显著。拌和温度过低会导致沥青包裹不完全, 骨料之间结合松散, 进而降低混合料在高温条件下的结构稳定性。试验表明, 拌和温度在 $175^{\circ}\text{C} \sim 185^{\circ}\text{C}$ 范围内时, 混合料的车辙深度最低, 动稳定度最高, 说明在此温度区间内可获得最佳高温性能。同时, 碾压温度对高温稳定性也具有显著影响。在温度控制合理的前提下, 混合料骨架更紧密、内摩擦力增强, 表现出更高的抗变形能力。动稳定度试验结果显示, 压实温度在 155°C 左右时, 混合料的动稳定度普遍大于 6500 次/mm, 显著优于常规混合料的性能水平。由此可见, 严格控制拌和和碾压过程中的温度, 是提升高温稳定性的核心手段。

3.2 抗疲劳性能响应规律

HMM-13 混合料的抗疲劳性能对道路寿命具有重要影响, 而施工参数尤其是压实度、油石比的控制直接关系到其疲劳寿命表现。通过四点弯曲疲劳试验发现, 当压实度达到

98% 以上时，试件在低应变水平下的疲劳寿命明显延长，疲劳破坏模式由粘结破坏转为延性疲劳裂缝，延缓了破坏过程。此外，摊铺和碾压温度对疲劳性能也有间接影响。较低的施工温度容易造成局部冷接缝、微裂纹，成为疲劳破坏源点。反之，在合适温度下压实形成的密实结构，空隙率较低，有效防止微裂纹扩展，从而提高疲劳抗裂性能。油石比的合理控制也尤为关键，过低易导致骨料间摩擦大、裂纹集中，过高则沥青膜厚、疲劳延性降低，二者均不利于抗疲劳性能的发挥。因此，应结合实验数据对油石比进行精准控制，优化疲劳响应。

3.3 模量发展与路用承载性能评价

混合料模量的高低是衡量其结构承载能力的重要技术指标，直接关系到道路在使用期内抵抗变形和分散荷载的能力。HMM-13 混合料在优化施工参数控制下，展现出优异的动模量水平。根据动态模量测试结果，施工温度控制在合理区间内时，混合料在 10Hz 频率下的动模量可达到 10000MPa 以上，显著优于普通 AC-13 型材料。同时，配合适宜的压实方式，可进一步提升模量发展速率。采用高频振动压实后，混合料骨架更加紧密，内部空隙率降低，模量增长趋势明显加快，进而增强整体路面结构的承载能力。通过有限元反演分析可知，在相同荷载条件下，HMM-13 结构层的应变响应更低，滞后损耗减小，表现出良好的延性和刚度结合特性。这一性能对于重载交通条件下的主干道、高速公路具有明显优势。

4 耐久性与现场适应性评估技术

4.1 水稳定性控制与评价方法

HMM-13 混合料的水稳定性是评估其抵抗水损害能力的关键性能指标，直接关系到路面的早期使用质量与长期耐久性。水分一旦渗入混合料内部，会削弱沥青与集料之间的粘结力，造成剥落、脱层、坑槽等早期病害，尤其在雨季或积水路段更为显著。因此，在材料设计与施工中必须严格控制相关参数，以提升其抗水侵蚀能力。材料选用方面，建议采用亲油性强的低活性矿粉，并添加适量抗剥落剂，以增强沥青对集料的包裹与黏结能力，提升水稳定性。施工过程中应确保压实密度达到规范标准，防止形成渗水通道。通过浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验验证，HMM-13 混合料在油石比 4.4%、压实度 98% 的条件下，残留稳定度为 89.2%，冻融劈裂强度比为 84.6%，均高于规范要求的 85% 和 80%，表明其具有良好的抗水损害能力，适用于多雨和潮湿环境下的高等级公路建设。具体试验结果见表 1。

表 1 HMM-13 混合料水稳定性试验结果

项目	实测值 (%)	技术要求 (%)
残留稳定度	89.2	≥ 85
冻融劈裂强度比 TSR	84.6	≥ 80

合理控制摊铺温度和压实时效，有助于降低混合料内部空隙率，避免雨水渗透，从而进一步提升水稳定性。

4.2 冻融循环影响与控制措施

在寒冷或季节交替频繁的地区，冻融循环对混合料的耐久性影响显著。冻融作用会在混合料内部形成微裂缝，累积应力造成材料剥落、强度降低。试验表明，HMM-13 混合料在经过 5 次冻融循环后，强度下降不超过 12%，说明其具有较强的抵御能力。影响其抗冻性能的主要因素包括：集料级配、孔隙结构、沥青膜厚度等。通过采用高密实度压实技术与温控施工，可显著降低冻融循环引起的损伤。表 2 展示了不同压实度条件下，HMM-13 在冻融循环后的劈裂强度变化情况。

表 2 冻融循环后不同压实度下混合料劈裂强度

压实度 (%)	初始强度 (MPa)	冻融后强度 (MPa)	强度下降率 (%)
96	1.03	0.86	16.5
98	1.05	0.92	12.4
99	1.06	0.95	10.4

从表中可见，压实度越高，抗冻融性能越稳定。因此在施工中应严格控制压实温度与遍数，确保压实度达标。

4.3 现场施工适应性技术评估

为确保 HMM-13 混合料在不同地区、不同环境下具备良好的现场适应性，需要从施工设备适配性、温度管理能力和现场质量控制机制等方面综合评估。摊铺设备须具备自动找平系统和实时温控装置，压路机则应配备智能压实系统以应对混合料较高的刚性特征。现场实测结果表明，在正常施工节奏下，摊铺温度波动范围保持在 ±5℃ 以内，压实度偏差小于 1%，施工成型质量稳定。同时，通过红外线测温和核密仪的过程监测技术，实现对施工全过程的动态调整与反馈，有效减少质量缺陷。HMM-13 的适应性评估显示，其在南方高温与北方季冻环境下均表现出良好的施工可控性与稳定性，是具备广泛推广价值的高性能混合料材料。

5 结语

本研究围绕 HMM-13 混合料，明确了关键施工工艺参数对其路用性能的技术性影响规律。研究表明，合理控制拌和与摊铺温度、压实方式、压实温度等参数，有助于显著提升其高温稳定性、抗车辙性与抗疲劳性能。HMM-13 在规范施工条件下具备良好的结构承载能力与使用耐久性，适用于重载高速公路面层施工。未来推广应用时，应重点关注施工现场温度控制与机械设备匹配，确保混合料性能发挥最优。

参考文献：

[1] 李发先.高模量沥青混凝土路面基层施工技术研究[J].交通世界,2024(22):55-57.

[2] 彭楠峰.抗车辙高模量天然沥青混合料设计及施工工艺研究[D].邯郸:河北工程大学,2023.

[3] 满伟.基于GTM法的高模量沥青路面材料设计与施工技术研究[D].邯郸:河北工业大学,2018.

[4] 欧阳新峰.高模量沥青混合料在调坡路面中的应用研究[D].西安:长安大学,2014.