

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.06.007

物理精细分离工艺下厂拌热再生沥青 混合料质量监测

艾欣满¹, 曹继伟², 冯德成¹, 高立波³, 易军艳^{*1}

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 辽宁交通投资有限责任公司, 辽宁 沈阳 110166;
3. 辽宁省交通科学研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110017)

摘要:【目标】监测物理精细分离工艺下沥青混合料回收料 (RAP) 与热再生沥青混合料 (HRAM) 的质量。【方法】依托辽宁省高速公路养护维修项目, 通过室内试验分析了现场物理精细分离 RAP 材料及其高掺量 RAP 下 HRAM 的相关物理力学性质。基于级配偏离度、灰熵关联法、分形维数和响应面法对 RAP 材料的变异性、HRAM 级配及其马歇尔指标进行了分析与评价。【结果】各档 RAP 与各类型 HRAM 中沥青含量较为稳定, 变异性大多控制在 5% 以内; 集料级配偏离度较小, 处于低变异性等级以内; 沥青含量与集料级配的稳定充分证明了物理精细分离工艺的优势。通过灰熵关联法发现 16.0, 13.20, 9.50, 4.75, 0.15 mm 的筛孔尺寸通过百分率对 SMA-13L 类型 HRAM 马歇尔各指标影响最为显著, 而 19.0, 16.0, 13.2 mm 筛孔尺寸通过百分率对于 AC-16 类型 HRAM 的显著最影响; 基于响应面法提出了考虑 RAP 掺量、HRAM 油石比、HRAM 集料级配的马歇尔指标预估模型, 该预估模型的预测值与实际测试结果相近, 二者偏差仅在 5% 以内, 这表明预估模型可靠度较高。【结论】研究结果可为 RAP 固废料及其再生沥青混合料的质量管控提供一定参考与依据, 进而促进 RAP 的资源化利用。

关键词: 道路工程; 质量监测; 物理精细分离工艺; RAP; 热再生沥青混合料

中图分类号: U418.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2025) 06-0067-09

Quality monitoring of hot in-plant recycled asphalt mixture based on physical fine separation technology

AI Xinman¹, CAO Jiwei², FENG Decheng¹, GAO Libo³, YI Junyan^{*1}

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China;
2. Liaoning Provincial Transportation Investment Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110166, China;
3. Liaoning Transportation Research Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110017, China)

Abstract: [Objective] This study aims to monitor the quality of reclaimed asphalt pavement (RAP) and hot recycled asphalt mixture (HRAM) with physical fine separation process. [Method] Relying on an expressway maintenance project in Liaoning Province, this study analyzed the physical and mechanical

收稿日期: 2023-09-14 修改日期: 2025-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878229, 52178420); 辽宁省重点研发计划项目 (2020JH2/10300097); 辽宁交通投资有限责任公司项目 (MH20211120)

作者简介: 艾欣满 (1997-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 研究方向为沥青路面固废资源化利用。(3068803896@qq.com)

* 通讯作者: 易军艳 (1983-), 男, 四川富顺人, 博士, 教授, 研究方向为工农业固废资源化与循环利用技术、多物理场多尺度道路材料设计理论与方法、道路结构性能演化理论。(yijunyan@hit.edu.cn)

引用格式: 艾欣满, 曹继伟, 冯德成, 等. 物理精细分离工艺下厂拌热再生沥青混合料质量监测 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (6): 67-75. AI Xinman, CAO Jiwei, FENG Decheng, et al. Quality monitoring of hot in-plant recycled asphalt mixture based on physical fine separation technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (6): 67-75.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

properties of in-plant RAP materials by using physical separation technology, and HRAM with high RAP content through laboratory experiments. RAP materials variability, HRAM gradation, and Marshall indicator were evaluated by using gradation deviation degree, grey entropy correlation method, fractal dimension, and response surface methodology. [**Result**] The asphalt contents in different grades of RAP and various types of HRAM remain relatively stable, with most variability controlled within 5%. The aggregate gradation deviation is small, falling within the low variability range. The stabilities of asphalt content and aggregate gradation fully demonstrate the advantages of physical fine separation process. It indicates that the passing percentages of sieve sizes 16.0, 13.2, 9.50, 4.75, 0.15 mm have the most significant influences on Marshall indicators of SMA-13L HRAM by using grey entropy correlation method. While the passing percentages of sieve sizes 19.0, 16.0, 13.2 mm have the most significant influences on AC-16 HRAM. Marshall indicator prediction model is proposed considering RAP content, HRAM asphalt-aggregate ratio, and HRAM aggregate gradation based on the response surface methodology. The predicted values with model closely match the actual test results. The deviation is less than 5%, indicating a high reliability of the prediction model. [**Conclusion**] This study can provide a certain reference and basis for the quality control of RAP materials and their recycled asphalt mixtures, thereby promoting the resourceful utilization of RAP.

Key words: road engineering; quality monitoring; physical fine separation technology; RAP; hot recycled asphalt mixture

0 引言

随着沥青路面固废资源化理念逐渐深入人心, 沥青路面再生技术因其具有节约能源、低碳环保等显著优势而成为交通行业的一大研究热点。沥青路面再生技术一般可分为厂拌热/冷再生、就地热/冷再生与全深式再生几大类^[1-5], 其中热再生技术(尤其是厂拌热再生技术)所生产的再生混合料性能优越, 能够满足各等级公路沥青路面的使用要求^[6], 因此热再生技术是道路工作者所关注的重点。

热再生沥青混合料(Hot Recycled Asphalt Mixture, HRAM)是指将原有沥青路面铣刨回收、破碎筛分之后, 与新集料、新沥青和再生剂等按照一定比例重新加热拌和、摊铺、碾压形成的沥青混合料^[7]。当RAP的掺量较低(20%以内)时, HRAM的性能接近于新拌沥青混合料^[8]; 当RAP掺量增大后, 由于RAP材料本身的属性差异(如老化沥青含量不一、性质各异, 集料级配变异明显等), HRAM的路用性能不稳定, 变异系数较大, 易于导致再生沥青路面病害的产生^[9]。《公路沥青路面再生技术规范》(JTGT 5521—2019)提出厂拌HRAM中RAP掺量一般不宜超过30%。

热再生沥青路面施工过程中RAP材料的均匀性(或变异性)程度将极大影响沥青路面的使用性能, 进而决定沥青路面的服役寿命^[10-12]。因此, 对沥青路面施工周期内RAP材料与HRAM的质量监测显得

尤为重要。RAP中老化沥青、旧集料的特殊性易导致再生混合料中的实际沥青含量、集料级配较大地偏离设计的目标值^[13-14], 使得较高RAP掺量下HRAM的设计生产难度加大, 对沥青路面的路用性能也将产生较大的不利影响^[15]。因而, 为满足更高比例RAP掺量的再生需求, RAP物理精细分离工艺必不可少。RAP物理精细分离工艺是采用纯物理的方法, 利用特定的分离设备, 经过破碎、研磨、筛分等工序后, RAP表面的老化沥青与集料充分剥离, 形成了沥青含量较少的粗RAP与沥青含量富集的细RAP, 极大降低了RAP原材料的变异性^[16]。相对于传统的简单破碎筛分流程而言, RAP物理精细分离工艺具有明显的技术特点与优势, RAP中旧沥青与集料的充分有效分离, 一方面能够促进旧沥青与再生剂的扩散融合, 另一方面可实现分离粗集料骨料化的目的, 有效地解决了厂拌热再生过程中由于RAP掺量过高而产生的混合料性能不稳定的问题^[17]。

本研究依托辽宁省某高速公路养护维修项目, 针对物理精细分离RAP材料及其高掺量RAP厂拌HRAM, 通过室内试验获取了日常施工过程中原材料RAP及HRAM的基本物理力学性质, 分析并评价了RAP与HRAM的变异性程度。基于灰熵关联法明确了集料级配对HRAM马歇尔试件各指标的影响规律, 基于响应面法建立了HRAM马歇尔试件各指标的预估模型。本研究可为厂拌热再生现场的生产作业与质量保障提供一定的参考。

1 原材料

RAP 材料是 HRAM 必不可少的重要组成部分,现场施工过程中,铣刨回收的旧沥青路面材料经物理精细分离工艺后,按照粒径大小被分为 0~5, 5~10, 10~15 mm 这 3 档。根据再生混合料级配类型及实际需要适宜选择合适档位及其掺配比例。

2 研究方法

2.1 级配偏离度

沥青混合料拌和、运输等过程中,由于人为操作或其他不可控因素的原因,实际的沥青混合料级配通常偏离预期值。根据集料设计级配与真实级配的差异性,可以量化沥青混合料的级配离析程度^[18]。本研究采用级配偏离度表征 RAP 材料或 HRAM 的集料级配变异性,其计算方法如式(1)所示,级配偏离度越大表明材料的变异性越高。

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{ij} - P_{ik})^2}, \quad (1)$$

式中, S 为 RAP 材料或 HRAM 集料级配偏离度; n 为不同筛孔尺寸等级; P_{ij} 为集料级配实际通过百分率; P_{ik} 为集料级配平均通过百分率。

集料级配的变异性等级根据级配偏离度计算结果可分为无变异性、低变异性、中变异性和高变异性 4 个级别,对应的级配偏离度取值范围分别为 < 10%, 10~20%, 20%~35%, >35%。

2.2 灰熵关联法

灰熵关联法是将灰色关联法与熵权法相结合的一种分析方法。熵权法是根据各指标所提供的信息计算相应的权重值,一般而言,熵值越小,该指标的离散程度越显著,因此该指标对综合评价(即权重)的影响越大^[19]。灰色关联分析是根据因素之间的发展趋势来衡量因素之间关联程度的一种方法,该方法的基本理论是判断参考序列与多个比较序列之间的关系是否密切,灰色关联度越大,影响程度越大^[20]。

本研究采用综合灰关联度全面分析筛孔尺寸对 HRAM 马歇尔试件基本物理力学指标的影响程度^[19]。综合灰关联度越大表明关联度越强。

$$g_{i,c} = \alpha \cdot g_{i,b} + \beta \cdot g_{i,t} + \gamma \cdot g_{i,m} + \varepsilon \cdot g_{i,f} + \varphi \cdot g_{i,a}, \quad (2)$$

式中, $g_{i,c}$ 为综合灰关联度; $g_{i,b}$, $g_{i,t}$, $g_{i,m}$, $g_{i,f}$, $g_{i,a}$ 分别为第 i 级筛孔尺寸毛体积相对密度、最大理论相对密度、稳定度、流值和空隙率的灰色关联度,可由灰色关联分析法计算而来; α , β , γ , ε ,

φ 分别对应上述各指标的熵权,可由熵权法计算而来。

2.3 分形维数

沥青混合料中集料的粒径分布符合分形特征,可以采用分形维数对集料级配进行量化评价^[20]。对某一筛孔尺寸而言,沥青混合料中的集料质量包括通过筛孔尺寸的集料质量和残留的集料质量 2 部分,集料总质量为二者之和。对应的分形模型如式(3)和式(4)所示,即集料质量比与粒径比呈双对数线性相关关系^[21]。分形维数 D 可以通过直线的斜率进行确定。

$$\frac{M_p}{M_T} = \frac{M(d < d_p)}{M(d < d_T)} = 1 - \frac{M(d > d_p)}{M(d < d_T)} = \left(\frac{d_p}{d_T}\right)^{3-D}, \quad (3)$$

$$\lg(M_p/M_T) = (3-D)\lg(d_p/d_T), \quad (4)$$

式中, M 为集料质量占比; d 为筛孔尺寸; d_p 为级配曲线某一筛孔尺寸; M_p 为小于 d_p 的集料质量占比; M_T 为小于最大筛孔尺寸 d_T 的集料质量占比; D 为分形维数。

2.4 响应面法

响应面法是一种用以评价多因素对研究目标影响规律的分析方法^[22]。本研究采用响应面法分析 HRAM 通常考虑的 3 个重要因素(即 RAP 掺量, HRAM 油石比, HRAM 集料级配)对马歇尔试件各指标的变化,并利用带交互作用的二次模型对因变量与自变量进行拟合,明确马歇尔试件各物理力学指标的预估模型^[23-24],拟合公式如式(5)所示。HRAM 集料级配采用分形维数 D 定量表征。

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2, \quad (5)$$

式中, y 为马歇尔各物理力学指标; b_0 , b_j , b_{ij} , b_{jj} 分别为常数项系数、一次项系数、交叉项系数、二次项系数,通过规划求解进行确定; x_i 和 x_j 为各自变量; k 为自变量数目。

3 RAP 与 HRAM 变异性分析与评价

3.1 RAP 变异性分析与评价

(1) RAP 中老化沥青含量分析

采用抽提法与燃烧法对物理精细分离 RAP 材料进行测试分析,各档精分离 RAP 的沥青含量测试结果如图 1 所示。由图可见,精分离 RAP 细集料中沥青含量丰富,高达 6%~9%,因此其利用价值巨大;精分离 RAP 粗集料中沥青含量为 2%~3%。测试结果表明,燃烧法所测得的沥青含量要高于抽提法的

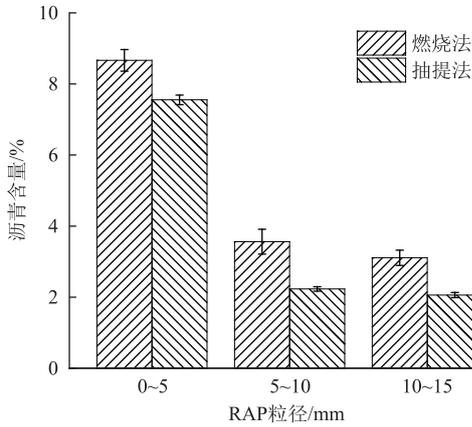


图1 各档精分离RAP沥青含量测试结果

Fig. 1 Test result of RAP contents with various fine-separated size ranges

测试结果,二者偏差在0.8%~1.5%之间。从沥青含量的变异性来看,燃烧法所对应的变异系数相对较高,达到3%~10%;而抽提法的测试结果较为稳定,其变异系数均能控制在5%以内。总体而言,物理精细分离RAP材料中老化沥青含量相对较为稳定。

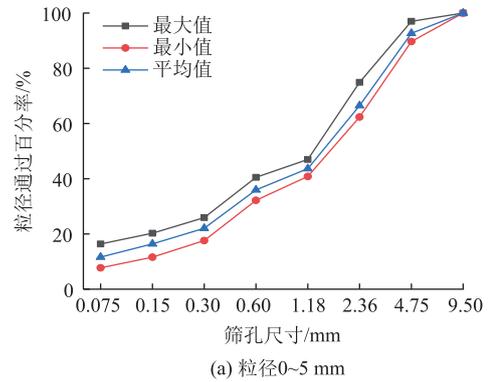
(2) RAP中集料级配分析

对RAP中集料性质而言,其级配稳定性乃是原材料分析的重中之重。本研究通过燃烧法获取了养护维修项目实际施工现场精分离RAP的集料级配数据,各档精分离RAP燃烧后集料级配监测结果如图2所示。由图可见,相对于精分离RAP粗集料而言,精分离RAP细集料沥青胶砂(即0~5 mm RAP)的集料级配变异性明显较低。这主要是由于精分离RAP粗集料中存在相对较多的颗粒结团现象,导致其中含有较多的“假粒径”或“伪级配”,致使无法准确确定其集料级配。

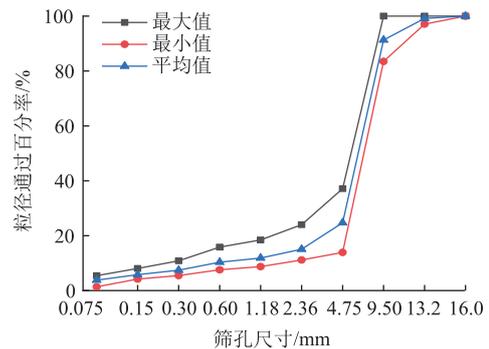
针对图2中精分离RAP燃烧后的集料级配测试结果,根据式(1)计算得到各档精分离RAP材料集料级配偏离度,如表1所示。计算结果显示3档精分离RAP材料中,10~15 mm精分离RAP粗料的集料级配偏离程度最大,5~10 mm次之,0~5 mm最小,与实际情况相一致。根据集料级配偏离度的平均值与标准差计算结果,3档精分离RAP材料集料级配变异性等级大多处于无变异性等级,部分处于低变异性等级。这充分说明了物理精细分离工艺的优势,能够一定程度上降低RAP材料的变异程度,有效保障再生混合料的稳定性。

3.2 HRAM变异性分析与评价

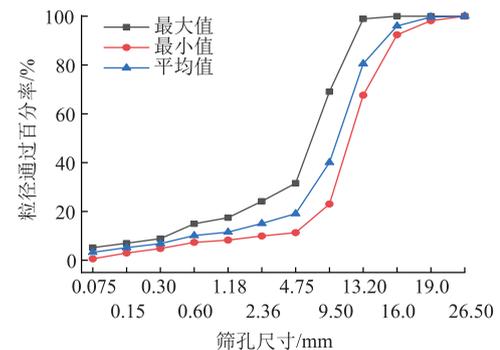
对高速公路养护维修现场各类型HRAM的沥青含量与集料级配进行了一段时间的监测,所测试的再生



(a) 粒径0~5 mm



(b) 粒径5~10 mm



(c) 粒径10~15 mm

图2 各档精分离RAP燃烧后集料级配监测结果

Fig. 2 Aggregate gradation monitoring result after RAP burning with various fine-separated size ranges

混合料类型主要包括 SMA-13L (20% RAP), AC-16 I (30% RAP), AC-16 II (50% RAP) 这3种。

表1 各档精分离RAP集料级配偏离程度计算结果

Table 1 Calculation result of aggregate gradation deviation for RAP with various fine-separated size ranges

RAP 粒径/ mm	集料级配偏离程度/%			变异性 等级
	最小值	最大值	平均值	
0~5	2.69	12.11	8.27±3.29	无
5~10	2.83	16.79	10.40±4.80	低
10~15	5.61	19.90	12.29±4.40	低

(1) 再生混合料中沥青含量监测

通过燃烧法测试不同类型HRAM的沥青含量,

各类型 HRAM 中沥青含量监测结果如图 3 所示。各 HRAM 的沥青含量与设计值相近, 其沥青含量的变异性也较低, 分别为 2.65%, 3.71%, 5.32%, 这说明 HRAM 中沥青含量相对稳定, 主要得益于精分离 RAP 原材料中沥青含量变异系数低, 不会对混合料

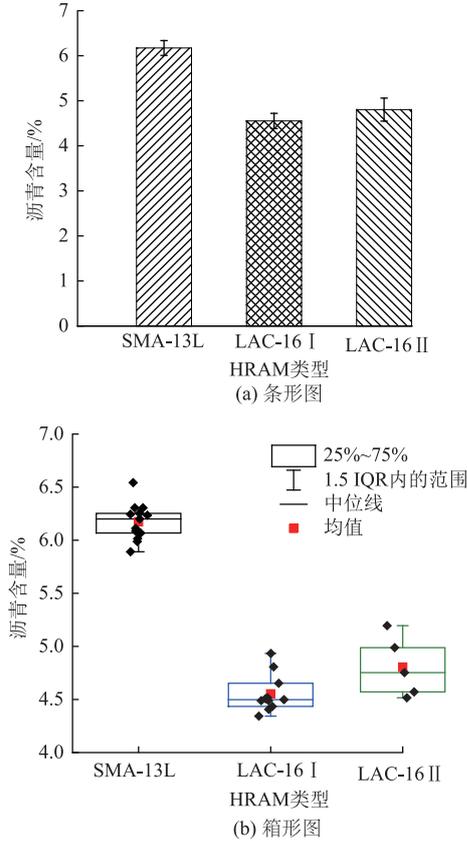


图 3 各类型 HRAM 中沥青含量监测结果

Fig. 3 Asphalt content monitoring result for various types of HRAM

产生较大的波动影响。

(2) 再生混合料中集料级配监测

各类型 HRAM 中集料级配监测结果如图 4 所示, 各类型 HRAM 中集料级配偏离度计算结果如表 2 所示。3 种类型再生混合料的级配偏离度相接近, 均同属于无变异性等级范围。由此可以说明再生现场混合料的集料级配变异性非常低, 能够在一个符合要求的级配通过百分率上保持相对的稳定, 从而减小对沥青路面产生的不利影响, 而这主要得益于精分离 RAP 材料中集料级配较为稳定。

4 基于灰熵关联法的 HRAM 级配影响分析

参考《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 可知, 路面施工过程中主要关注的集料级配控制指标是 4.75 mm 和 2.36 mm 筛孔尺寸的通

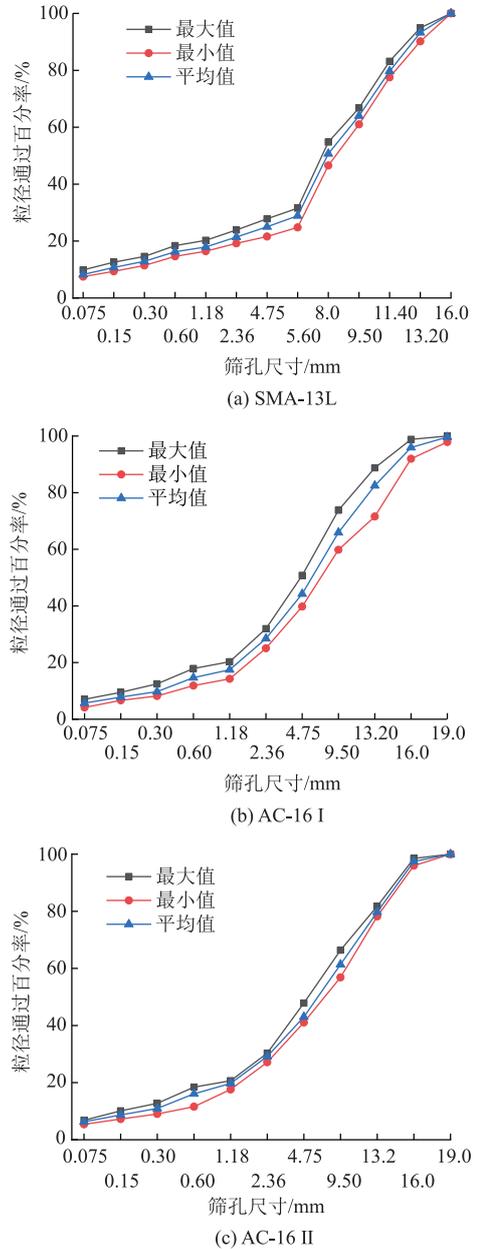


图 4 各类型 HRAM 中集料级配监测结果

Fig. 4 Aggregate gradation monitoring result for various types of HRAM

过百分率。然而, 仅考虑简单的 2 个指标通常无法生产出性能完全符合的沥青混合料。因此, 本研究以不同 HRAM 马歇尔试件的各物理力学指标为研究对象, 采用灰熵关联法分析不同筛孔尺寸通过百分率对各指标的影响程度。

首先, 计算不同 HRAM 马歇尔试件物理力学特性的熵权值, 结果如表 3 所示。结果表明 SMA-13L 类型 HRAM 的稳定度和流值对马歇尔试件的整体性能影响最大, 表观相对密度和稳定度对 AC-16 I 类型 HRAM 的影响最大, 而 AC-16 II 类型 HRAM 的显著影响因素为空隙率。

表 2 各类型 HRAM 中集料级配偏离度计算结果

Table 2 Calculation result of aggregate gradation deviation for various types of HRAM

HRAM 类型	集料级配偏离程度/%			变异性等级
	最小值	最大值	平均值	
SMA-13L	2.70	8.50	4.85±2.09	无
AC-16 I	2.93	7.81	5.36±1.52	无
AC-16 II	2.19	7.89	5.44±2.12	无

表 3 不同 HRAM 马歇尔试件物理力学特性的熵权值

Table 3 Entropy weights of physical and mechanical properties of Marshall specimens for various types of HRAM

HRAM 类型	表观相对密度	最大理论相对密度	稳定度	流值	空隙率
SMA-13L	0.155	0.173	0.204	0.299	0.169
AC-16 I	0.226	0.193	0.239	0.179	0.163
AC-16 II	0.143	0.181	0.152	0.154	0.371

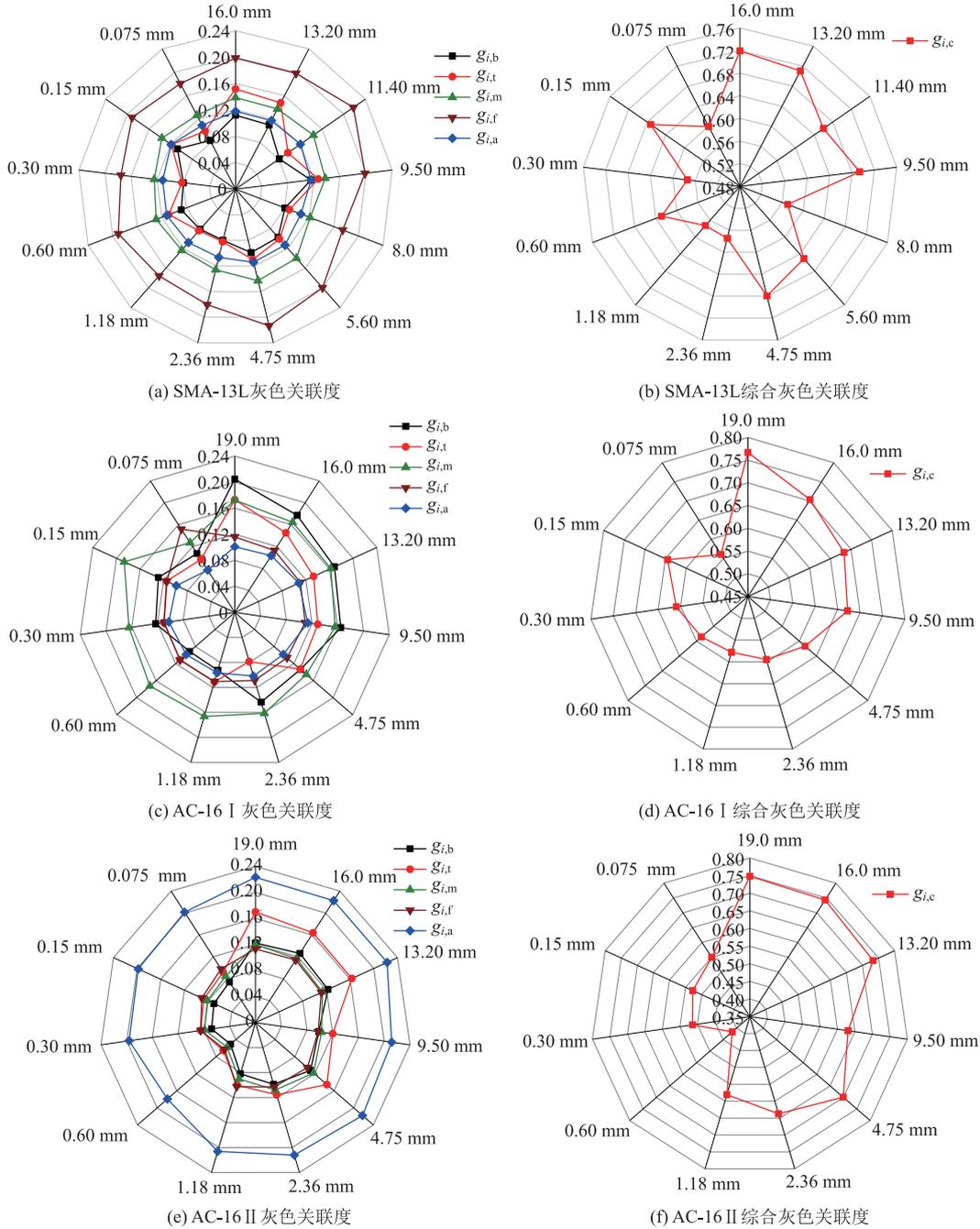


图 5 不同类型 HRAM 灰熵关联法计算结果

Fig. 5 Calculation result of various types of HRAM with grey entropy method

然后，计算不同 HRAM 马歇尔试件各项指标在各筛孔尺寸下的灰色关联度，进而确定了各指标的

综合灰色关联度，计算结果如图 5 所示，图中各符号含义与式 (2) 所述一致。根据综合灰色关联度结

果排序, 明确了影响 HRAM 马歇尔试件性能的前 5 个集料筛孔尺寸。16.0, 13.20, 9.50, 4.75, 0.15 mm 筛孔尺寸的通过率对 SMA-13L 类型 HRAM 马歇尔试件的综合性能有显著影响; 对于 AC-16 类型 HRAM 而言, 其最为重要的筛孔尺寸为 19.0, 16.0, 13.20, 9.50, 0.15 mm; 对于 AC-16 II 类型 HRAM 而言, 其最为重要的筛孔尺寸为 19.0, 16.0, 13.20, 4.75, 2.36 mm。

5 基于响应面法的 HRAM 马歇尔指标预估模型

以 x_A , x_B , x_C 分别表示 RAP 掺量、HRAM 油石比和集料级配分形维数。针对 AC-16 类型的 HRAM, 结合响应面法, 采用规划求解方法确定 HRAM 马歇尔各项指标的预估模型并进行验证。参考机器学习中留出法的数据集划分方法, 针对本研究中汇总的 18 组 HRAM 马歇尔指标测试结果, 将其中 14 组数据集作为预估模型的训练集, 其余 4 组数据集作为预估模型的验证集。训练集中 HRAM 马歇尔各项指标测试结果如表 4 所示。

为进一步验证所建模型的合理性, 结合验证集中的测试结果, 根据预估模型计算了相应材料组成下各项指标的预测值, 如表 5 所示。结果表明, 各项指标的测试值与预测值的偏差较小, 其中毛体积

表 4 AC-16 型 HRAM 马歇尔指标测试结果
Table 4 Test results of Marshall indicators for AC-16 HRAM

RAP 掺量/%	油石比/%	分形维数	毛体积相对密度	最大理论相对密度	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
30	4.54	2.448	2.432	2.544	13.49	36.4
30	4.71	2.461	2.438	2.549	14.63	44.2
30	4.64	2.433	2.456	2.558	13.47	35.4
30	4.70	2.432	2.459	2.554	14.58	36.0
30	4.61	2.451	2.425	2.551	13.13	35.4
50	4.65	2.437	2.454	2.573	14.54	46.8
50	4.69	2.473	2.457	2.545	15.20	39.7
50	4.73	2.486	2.446	2.564	14.32	40.4
50	4.68	2.493	2.453	2.557	14.06	38.3
50	4.68	2.440	2.444	2.546	13.69	41.9
50	4.73	2.473	2.445	2.544	13.75	42.20
50	4.71	2.488	2.444	2.543	13.44	40.60
50	4.70	2.494	2.449	2.555	15.11	34.60
50	4.75	2.483	2.448	2.553	14.35	38.70

相对密度与最大理论相对密度的误差在 1% 以内, 稳定度与流值的误差控制在 5% 以内, 这充分证明了响应面回归模型的准确性。后续还需进一步进行跟踪观测, 以更充分验证本研究预估模型的准确性与普适性。

表 5 AC-16 型 HRAM 马歇尔指标预测值与测试值
Table 5 Predicted and test values of Marshall indicators for AC-16 HRAM

HRAM 材料组成			毛体积相对密度		最大理论相对密度		稳定度/kN		流值/(0.1 mm)	
x_A	x_B	x_C	测试值	预测值	测试值	预测值	测试值	预测值	测试值	预测值
50	4.72	2.468	2.446	2.447	2.548	2.545	13.75	14.24	39.40	40.32
50	4.69	2.480	2.445	2.450	2.550	2.553	13.66	14.11	39.0	40.09
50	4.68	2.481	2.443	2.451	2.549	2.555	13.82	14.06	38.60	40.01
50	4.74	2.496	2.445	2.444	2.552	2.546	13.99	14.31	39.80	40.48

6 结论

本研究依托辽宁省高速公路养护维修项目, 结合级配偏离度、灰熵关联法、分形维数和响应面法等研究方法, 开展了基于物理精细分离工艺的厂拌热再生沥青混合料质量监测。

(1) 基于物理精细分离工艺的各档 RAP 材料中老化沥青变异性较低, 变异系数控制在 5% 以内, 其集料级配相对稳定, 级配偏离度属于无/低变异性等级。

(2) 各类型 HRAM 中沥青含量波动较小, 变异系数在 6% 以内, 其集料级配偏离度在 10% 以内, 属于无变异性等级。

(3) 对 SMA-13L 类型 HRAM 马歇尔试件各物理力学指标影响显著的筛孔尺寸为 16.0, 13.20, 9.50, 4.75, 0.15 mm; 而对于 AC-16 类型 HRAM 而言, 其最为重要的筛孔尺寸为 19.0, 16.0, 13.2 mm。

(4) RAP 掺量、HRAM 油石比和 HRAM 集料级配与 HRAM 马歇尔试件各指标之间具有较强的二次模型相关性, 与实际测试结果偏差较小, 经过验证表明预估模型可靠度和准确度较高。

参考文献:

References:

[1] 郭思怡, 冯振刚, 曲建涛, 等. 基于模糊意见集中决策法的再生沥青混合料生产工艺 [J]. 公路交通科技,

- 2024, 41 (12): 67-76.
- GUO Siyi, FENG Zhen'gang, QU Jiantao, et al. Recycled asphalt mixture production process based on method of fuzzy comment and focused decision [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2024, 41 (12): 67-76.
- [2] 李达. 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响分析 [J]. *长安大学学报 (自然科学版)*, 2018, 38 (5): 25-31.
- LI Da. Influence of RAP content on durability of warm-mix recycled asphalt mixture [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 38 (5): 25-31.
- [3] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析 [J]. *公路交通科技*, 2016, 33 (10): 148-151, 158.
- CHAI Mingming, LI Ming, QI Guicai, et al. Analysis of carbon emission during hot in-place recycling asphalt pavement construction [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33 (10): 148-151, 158.
- [4] 彭波, 尹志全, 李龙刚, 等. 基于早期抗压强度的乳化沥青冷再生混合料配合比设计方法 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37 (1): 1-9.
- PENG Bo, YIN Zhiquan, LI Longgang, et al. Study on mix design of emulsified asphalt cold recycled mixture based on early compression strength [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37 (1): 1-9.
- [5] 边海滨. 全深式水泥稳定就地冷再生基层应用与耐久性评价 [J]. *公路工程*, 2020, 45 (3): 161-168.
- BIAN Haibin. Application and durability evaluation of full-deep cement stabilized in-situ cold recycled mixture base [J]. *Highway Engineering*, 2020, 45 (3): 161-168.
- [6] 马辉, 茅荃, 李宁. 沥青路面厂拌热再生 RAP 料掺量影响因素分析 [J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2020, 39 (9): 97-104.
- MA Hui, MAO Quan, LI Ning. Influence factors of RAP content in plant-mixed hot recycling asphalt pavement [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39 (9): 97-104.
- [7] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34 (10): 72-88.
- XU Jinzhi, HAO Peiwen, GUO Xiaogang, et al. Review of mix design method of hot in-plant recycled asphalt mixture [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34 (10): 72-88.
- [8] OUALIT M, IREKTI A, HAMI B. Performance of recycled asphalt mixtures formulated with modified bitumen [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2019, 18 (12): 2613-2621.
- [9] HONG F, GUO R H, ZHOU F J. Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2014, 15 (4): 841-855.
- [10] 孙学楷. 厂拌改性热再生沥青路面施工过程质量控制与改进研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- SUN Xuekai. Research on quality control and improvement of hot in central plant recycling modified asphalt pavement for construction process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] 曾俐豪. 厂拌热再生混合料中新旧沥青扩散及 RAP 分散特征研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- ZENG Lihao. Research on diffusion of recycled bitumen and RAP dispersion characteristics in hot central plant recycled mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2019.
- [12] 吴建涛, 焦岩, 夏新全, 等. 基于筛分试验的热再生沥青混合料结团量化分析 [J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 52 (3): 564-570.
- WU Jiantao, JIAO Yan, XIA Xinquan, et al. Analysis on cluster quantification in hot recycled asphalt mixtures based on sieve tests [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52 (3): 564-570.
- [13] GAO J, YANG J G, YU D, et al. Reducing the variability of multi-source reclaimed asphalt pavement materials: A practice in China [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278: 122389. (2021-04-05) [2022-09-01] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122389>.
- [14] AUSTERMAN A J, MOGAWER W S, STUART K D. Variability of reclaimed asphalt pavement (RAP) properties within a state and its effects on RAP specifications [J]. *Transportation Research Record*, 2020, 2674 (6): 73-84.
- [15] MONTAÑEZ J, CARO S, CARRIZOSA D, et al. Variability of the mechanical properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) obtained from different sources [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 116968. (2020-01-10) [2022-09-01] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116968>.
- [16] AI X M, CAO J W, FENG D C, et al. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures with various percentages of RAP from the rotary decomposition process [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2022,

- 321: 126406. (2022-02-28) [2022-09-01] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126406>.
- [17] 高立波,王森,霍继辉,等. 沥青路面旧料精分离技术与大比例再生技术在高速公路中的应用 [J]. 北方交通, 2021 (8): 33-38.
GAO Libo, WANG Sen, HUO Jihui, et al. Application of fine separation technology and large proportion recycling technology of old materials of asphalt pavement in expressways [J]. Northern Communications, 2021 (8): 33-38.
- [18] LI X L, CHEN S Y, XIONG K Y, et al. Gradation segregation analysis of warm mix asphalt mixture [J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (4). (2018-01-17) [2022-09-01] [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002208).
- [19] GAO Y, HOU K, JIA Y S, et al. Variability Evaluation of gradation for asphalt mixture in asphalt pavement construction [J/OL]. Automation in Construction, 2021, 128: 103742. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103742>.
- [20] 周兴林,刘万康,肖旺新,等. 沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17 (6): 1-9.
ZHOU Xinglin, LIU Wankang, XIAO Wangxin, et al. Influence of asphalt mixture volume indexes on asphalt pavement skid resistance performance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17 (6): 1-9.
- [21] XU O M, WANG Z J, WANG R. Effects of aggregate gradations and binder contents on engineering properties of cement emulsified asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 632-640.
- [22] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56 (2): 362-369.
- [23] 姚玉权,仰建岗,高杰,等. 基于性能-费用模型的厂拌再生沥青混合料优化设计 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52 (3): 585-595.
YAO Yuquan, YANG Jian'gang, GAO Jie, et al. Optimal design on recycled hot-mix asphalt mixture based on performance-cost model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52 (3): 585-595.
- [24] 姚玉权,黄伯承,宋亮,等. 多来源RAP下RHMA材料组成的动态控制策略 [J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52 (6): 79-88.
YAO Yuquan, HUANG Bocheng, SONG Liang, et al. Dynamic control strategy for RHMA material composition under multi-source RAP [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52 (6): 79-88.