基于AMPT及数学模型探究再生沥青混合料的高温性能

余 芳[1],周 乾[2],杨礼明[2],李江涛[3],常明丰[3]*,熊 锐[3]

(1.广西交通职业技术学院,广西 南宁 530023;2.广西交通设计集团有限公司,广西 南宁 530029;
3.长安大学材料科学与工程学院,陕西 西安 710061)

摘 要:沥青混合料在高温下的稳定性是服役寿命的重要影响因素,探究各因素对高掺量回收沥青路面材料(RAP)复合再生沥青混合料高温性能的影响十分重要。研究采用原子力显微镜(AFM)确定再生剂(XT-3)最佳掺量,通过动态模量(|*E**|)试验研究不同RAP掺量、温度、加载频率及纤维种类对高掺量RAP复合再生沥青混合料高温性能的影响规律。结果表明:当XT-3质量分数为7.0%时,微观黏附力最大,为8.482 mN,增幅为775%,再生效果最优。在相同RAP掺量、加载频率条件下,随着温度的升高,|*E**|逐渐减小。在相同温度、加载频率条件下,随着RAP掺量的增加,|*E**|呈先增大后减小的趋势。在相同温度、RAP掺量条件下,随着加载频率的减小,再生沥青混合料的|*E**|降低,纤维的掺入能够有效提升沥青混合料的高温性能。结合方差分析、熵权-灰色关联度分析及随机森林模型方法,从3种数学框架探究温度、RAP掺量、加载频率及纤维种类对|*E**|所产生的影响,其中温度的影响最显著。

关键词:道路工程;再生沥青混合料;高温性能;数学模型
中图分类号:U414 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0113-07
DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.020

Exploration of High-temperature Performance of Recycled Asphalt Mixture Based on AMPT and Mathematical Models

YU Fang[1], ZHOU Qian[2], YANG Liming[2], LI Jiangtao[3], CHANG Mingfeng[3]*, XIONG Rui[3]
(1. Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning 530023, China; 2. Guangxi Communications Design Group Co. , Ltd. , Nanning 530029, China; 3. School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The stability of asphalt mixtures at high temperatures is a critical factor affecting their service life. It is of great importance to investigate the effects of various factors on the high-temperature performance of composite recycled asphalt mixtures with a high content of reclaimed asphalt pavement materials (RAP) . In the study, atomic force microscopy (AFM) was employed to determine the optimal dosage of the rejuvenator (XT-3). Dynamic modulus (|*E**|) tests were conducted to examine the influence of different RAP contents, temperatures, loading frequencies, and fiber types on the high-temperature performance of high-RAP-content composite recycled asphalt mixtures. The results indicated that when the mass fraction of XT-3 was 7.0%, the microscopic adhesion force reached its maximum value of 8.482 mN, representing an increase of 775%, and the rejuvenation effect was optimal. Under the same RAP content and loading frequency conditions, the |*E**| gradually decreased with increasing temperature. Under the same temperature and loading frequency conditions, the |*E**| first increased and then decreased with increasing RAP content. Under the same temperature and RAP content conditions, the |*E**| of the recycled asphalt mixtures decreased with decreasing loading frequency, and the incorporation of fibers effectively enhanced the high-temperature performance of the asphalt mixtures. By combining

收稿日期Submitted date 2025-10-17;修回日期Revised date 2025-11-28;录用日期Accepted date 2025-12-23
基金项目:2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1163);广西重点研发计划项目(桂科AB24010294)
*联系人,zcx13939864519@163.com
引用本文:余芳,周乾,杨礼明,等.基于AMPT及数学模型探究再生沥青混合料的高温性能[J].塑料科技,2026,54(8):113-119.
Citation:YU F, ZHOU Q, YANG L M, et al. Exploration of high-temperature performance of recycled asphalt mixture based on AMPT and mathematical models[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 113-119.

analysis of variance, the entropy weight-grey relational analysis method, and the random forest model, the effects of temperature, RAP content, loading frequency, and fiber type on |E^*| were investigated from three mathematical frameworks, among which temperature was found to have the most significant influence.

Keywords: Road engineering; Recycled asphalt mixtures; High-temperature performance; Mathematical model

回收沥青路面材料(RAP)具有较高的利用价值,而砂石骨料为不可再生资源,因此充分利用RAP并保障再生沥青路面的路用性能已成为道路工程领域的研究重点[1-2]。然而,由于旧料变异性大,外界因素显著影响再生沥青混合料的路用性能,从而使高RAP掺量的再生沥青混合料较少应用于面层[3-5]。RAP掺量与路用性能密切相关,适宜的RAP掺量对再生沥青混合料的路用性能具有积极作用[6-7]。王智超等[8]通过60 ℃车辙试验研究不同RAP掺量下再生沥青混合料的高温性能。结果表明:动稳定度随RAP掺量的增加而逐渐增大,且40% RAP掺量下的动稳定度增长率较30% RAP掺量提高近100%。高学凯等[9]采用动态模量(|E^*|)试验研究就地热再生沥青混合料的力学性能,发现|E^*|随加载频率的增加而增大。张荣等[10]采用动态模量试验探讨芳纶纤维和玻璃纤维单掺及复掺对再生沥青混合料路用性能的影响。结果表明:复掺纤维可使|E^*|提升21.9%。然而,上述研究多聚焦于单一因素对再生沥青混合料高温性能的影响。

因此,从温度、RAP掺量、加载频率及纤维种类等多因素耦合角度系统探究高掺量RAP再生沥青混合料高温性能影响因素的研究仍较少。因此,本研究利用再生沥青的微观黏附力确定再生剂的最佳掺量,进而借助动态模量试验,结合方差分析、熵权-灰色关联度模型及随机森林机器学习模型,以RAP掺量、温度、加载频率和纤维种类为影响因素,对高掺量RAP再生沥青混合料的高温性能开展系统研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

1.1.1 沥青混合料回收料

RAP,压碎值为20.1%,针片状颗粒质量分数为11.3%,含水率为3.7%,取自高寒海拔地区某高速公路面层铣刨料。表1为RAP含水率的测试结果。

表1 RAP含水率的测试结果

Tab.1 Test results of RAP moisture content

粒径/mm	含水率/%
0~5	1.7
5~10	0.8
10~15	2.2
15~30	1.6

1.1.2 再生剂

再生剂,XT-3,常州信拓路面改性材料有限公司。XT-3在常温下呈黑褐色黏稠态,温度升高后具有较好的流动性。表2为XT-3的技术指标。

1.1.3 其他原料

三氯乙烯,工业级,质量分数≥99.9%,西安宜美仪器仪表有限公司;苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青,西宁城东博升防水建材厂,表3为SBS改性沥青技术指标;新集料,压碎值为25.7%,针片状颗粒质量分数为7.4%,含水率为0.8%,灵寿县富恒矿产品有限公司;玄武岩纤维,短切6 mm,上海影佳化工原料商城;聚乙烯醇纤维,短切6 mm,江西硕邦新材料科技有限公司。

表2 XT-3的技术指标

Tab.2 Technical index of XT-3

项目	旋转黏度(60 ℃)/(Pa·s)	$w_{饱和分}$/%	$w_{芳香分}$/%	闪点/℃	薄膜烘箱试验前后的黏度比/%	薄膜烘箱试验前后的质量变化/%	密度(15 ℃)/(g·cm^{-3})
性能指标	169	28	69.7	242	0.8	-0.036	1.03
技术要求	175~600	≤25	>65.0	>220	≤3.0	≤3.000	0.95~1.05

表3 SBS改性沥青的技术指标

Tab.3 Technical index of SBS modified asphalt

针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	延度(10 ℃,5 cm·min^{-1})/cm	软化点(环球法)/℃	动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)	密度(25 ℃)/(g·cm^{-3})
81.8	52.8	43	207	1.1

掺入纤维能够有效改善沥青混合料性能[11-18]。本研究选取短切6 mm玄武岩纤维和高模高强聚乙烯醇纤维进行对照,两者添加质量分数均为0.4%。

1.2 仪器与设备

沥青混合料离心式快速抽提仪,DLC-3,北京申克试验仪器厂;旋转蒸发器,R-205,瑞士步琦有限公司;高速剪切机,BME 200L,上海威宇机电有限公司;原子力显微镜(AFM),Dimension Icon,德国布鲁克公司;马歇尔电动击实仪,SYD-0702A,上海昌吉地质仪器有限公司;压力试验机,YAW-100D,济南市成宇实验设备有限公司;切割机,

J1G-FFO2，南通冉旺机电有限公司；钻芯机，ZS-200，泰州市华联石油化工机械厂；液压型沥青混合料性能试验仪(AMPT)，AMPT Pro，欧美大地仪器设备中国有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 老化沥青的制备

根据JTG 3410—2025提取老化沥青。表4为老化沥青的技术指标。

表4 老化沥青的技术指标

Tab.4 Technical index of aging asphalt

针入度(25 ℃，100 g，5 s)/0.1 mm	延度(15 ℃，5 cm·min^{-1})/cm	软化点(环球法)/℃	动力黏度(60 ℃)/(Pa·s)
31	3.7	70	731

1.3.2 再生沥青的制备

将老化沥青进行脱水处理，分别将质量分数为4.0%、6.0%、6.5%、7.0%、7.5%、8.0%和10.0%的XT-3掺入老化沥青中，利用高速剪切机以3 000 r/min的速率剪切60 min，制备再生沥青。再生沥青样品以再生剂掺量进行命名，如掺入7.0% XT-3的再生沥青命名为7.0% XT-3。

1.3.3 再生沥青混合料制备

高掺量RAP再生沥青混合料级配设计：以AC-20级配通过率上限、下限作为约束条件，以各粒径筛孔通过率中值为目标，将未掺入再生剂的RAP和新集料、新填料的筛孔通过率相结合，采用规划求解法计算，得到RAP质量分数分别为30%、40%、50%和60%的再生沥青混合料。表5为再生沥青混合料的级配组成。

表5 再生沥青混合料的级配组成

Tab.5 Grading composition of recycled asphalt mixture 单位：%

w_{RAP}/%	各筛孔合成级配											
	26.50 mm	19.00 mm	16.00 mm	13.20 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm	0.075 mm
30	100.0	95.7	86.0	53.5	48.6	15.60	6.10	5.90	5.8	5.8	5.60	1.400
40	100.0	96.3	87.6	62.1	54.3	30.30	20.50	17.20	13.9	11.1	8.90	4.800
50	100.0	96.2	87.3	62.1	53.4	32.70	24.80	20.80	16.7	13.2	10.60	5.800
60	100.0	96.2	87.0	62.0	52.5	36.50	26.40	21.70	16.7	12.5	9.40	6.200

最佳沥青用量确定根据表5中的级配，采用马歇尔试验方法进行最佳油石比确定。表6为再生沥青混合料的最佳油石比。

表6 再生沥青混合料的最佳油石比

Tab.6 Optimal oil-to-stone ratio of recycled asphalt mixtures

w_{RAP}/%	最佳油石比/%	稳定度/kN	流值/mm
30	4.30	9.20	2.33
40	4.32	10.87	2.50
50	4.20	11.02	2.96
60	4.10	18.37	3.85

1.3.4 AMPT试件的制备

结合表5和表6的试验结果，在170 ℃下进行拌和并将金属试模及压头置于100 ℃左右烘箱中加热1 h。将拌和后的再生沥青混合料倒入直径150 mm、高度180 mm的圆柱体试模中，利用压力试验机静压成型。再利用内径为50 mm的钻芯机进行取样，利用切割机进行切割打磨，制备成直径50 mm、高度110 mm的圆柱体试件。本研究中，以RAP掺量和纤维种类对样品命名，将不添加纤维、RAP质量分数为30%的AMPT试件命名为30% RAP；将RAP质量分数为30%、添加玄武岩纤维的AMPT试件命名为30% RAP+玄武岩；将RAP质量分数为30%、添加高模高强聚乙烯醇纤维的试件命名为30% RAP+聚乙烯醇。

1.4 性能测试与表征

微观性能测试：利用原子力显微镜对老化及再生沥青进行测试，利用微观黏附力确定再生剂最佳掺量。为量化增幅程度，根据式(1)对其再生效果进行表征。

$$\alpha=\frac{F_{再}-F_{老}}{F_{老}} \tag{1}$$

式(1)中：α为黏附力增幅程度，%；$F_{再}$为再生沥青黏附力，nN；$F_{老}$为老化沥青黏附力，nN。

马歇尔试验：以AC-20级配通过率上限、中值、下限作为约束条件，通过规划求解法，计算出未添加XT-3、RAP质量分数分别为30%、40%、50%和60%的再生沥青混合料的级配。随后以体积参数(包括毛体积参数、有效沥青饱和度、孔隙率等)为指标，依据JTG F40—2004规定确定最佳沥青用量。

AMPT试验：采用单轴压缩模式，使试件处于无侧限状态，改变加载频率、加载温度，获得不同RAP掺量再生沥青混合料的$|E^*|$。$|E^*|$为材料在正弦荷载下应力幅值与应变幅值的比值。

方差分析模型：方差分析模型用来判断一个或多个自变量对因变量是否产生显著影响，包括多因素之间的交互作用[19]。

熵权-灰色关联度模型：熵权-灰色关联度模型是一种探究影响因素对目标影响权重的数学模型，定量表征不同影响因素的特征排序[20]。灰色关联系数[$\xi_i(k)$]及关联度

(λ_i)计算公式为：

$$\xi_i(k)=\frac{\Delta_{\min}+\rho\Delta_{\max}}{\Delta_i(k)+\rho\Delta_{\max}} \tag{2}$$

$$\lambda_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\xi_i(k) \tag{3}$$

式(2)~式(3)中：$\xi_i(k)$为灰色关联系数；$\Delta_{\min}$为全局极差最小值；$\Delta_{\max}$为全局极差最大值；$\Delta_i(k)$为参考序列和比较序列的计算绝对差；ρ为分辨系数，取0.5；λ_i为关联度。

熵值(E)、权重(w_i)计算公式为：

$$E=-\frac{\sum P_i\ln P_i}{\ln m} \tag{4}$$

$$w_i=\frac{p_i d}{\sum(p_i d)} \tag{5}$$

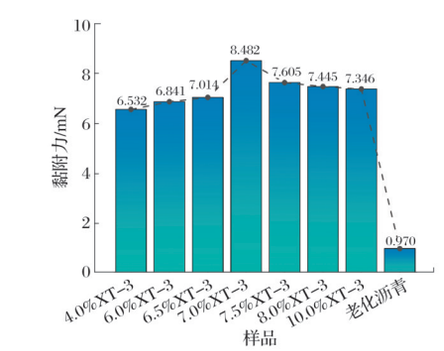
式(4)~式(5)中：E为熵值；P_i为归一化关联度；m为因素个数；w_i为权重；p_i为第i个指标的特征比重；d为差异系数。

随机森林机器学习模型：其核心是利用相关数据构建决策树，每个决策树分类器通过投票来确定最佳结果[21]。本研究通过将模型预测结果与传统数学模型进行比较，以提高结果的可靠性。

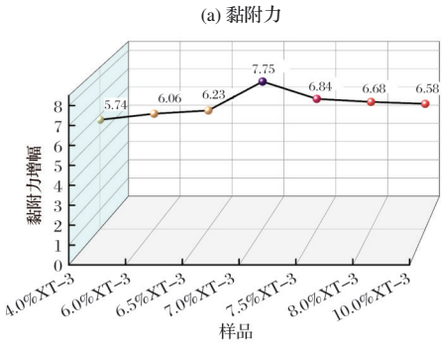
2 结果与讨论

2.1 再生沥青微观性能

采用AFM的轻敲模式，探针与样品接触后抽离，经过NanoScope软件处理其力曲线，得到样品对探针的黏附力，从而表征老化沥青的再生程度[22-24]。图1为再生沥青黏附力及其增幅。



(a) 黏附力



(b) 黏附力增幅

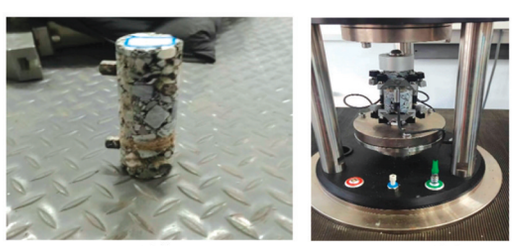
图1 再生沥青黏附力及其增幅

Fig.1 Adhesive force and its growth rate of recycled asphalt

从图1可以看出，老化沥青的黏附力远低于再生沥青。其原因在于随着路面服役时间的增加，在外界环境老化作用下，沥青老化变硬，弹性成分增多，黏性成分减少，对探针离开沥青表面时的阻力减小，进而导致黏附力下降。随着XT-3的加入，老化沥青中增加较多轻质组分，沥青质等极性大分子相对含量减少，使沥青黏性成分增多，进而增加对探针的阻力。其中，7.0% XT-3再生沥青黏附力最大，为8.482 mN。当XT-3质量分数为7.0%时，黏附力增幅最大，为775%。结合黏附力及增幅趋势，当XT-3质量分数为7.0%时，再生效果最优。

2.2 动态模量试验结果

|E^*|反映沥青混合料在不同温度和频率下的刚度特性。试件直径为50 mm，高度为110 mm。图2为AMPT试件和试验装置。本试验采用四因素作为试验变量，试验变量如表7所示。



(a) 试件 (b) AMPT 试验

图2 AMPT试件和试验装置

Fig.2 AMPT specimens and test equipment

表7 试验变量

Tab.7 Test variables

因素	水平数	水平
w_{RAP}/%	4	30、40、50、60
温度/℃	3	40、50、60
纤维种类	2	玄武岩纤维、聚乙烯醇纤维
加载频率/Hz	4	25.0、10.0、5.0、0.5

2.2.1 温度、RAP掺量及频率对|E^*|的影响

图3为不同温度、RAP掺量及频率下复合再生沥青混合料的|E^*|。从图3可以看出，在相同RAP掺量、加载频率下，随着温度的升高，|E^*|逐渐减小，表明再生沥青混合料的高温性能下降。主要是因为随着温度的升高，沥青中分子链段运动能力增强，使其流动性增强，黏附力降低。沥青混合料的强度及劲度降低，抗剪强度不足，在水平荷载作用下易产生推移破坏，从而产生永久变形。

在相同温度、加载频率条件下，随着RAP掺量的增加，|E^*|呈先增大后减小的趋势。当温度为40 ℃时，4种不同加载频率下的|E^*|出现明显波动。但总体来看，当RAP质量分数为30%时，其抵抗变形能力最差。主要是因为RAP掺量较小，老化沥青占比小，调和沥青偏软，进而使抗剪能力差。当加载频率为25.0 Hz、RAP质量分数为50%时，高温性能最好；而在其他频率下，RAP质量分数为60%时性

能最优。

在相同温度、RAP掺量条件下，随着加载频率的减小，再生沥青混合料的|*E**|均下降。其原因在于沥青是一种黏-弹性材料。根据时温等效原理，当频率逐渐降低，沥青有更长的时间发生黏性流动，弹性响应占比减少，使再生沥青混合料更易发生永久变形。根据试验结果可以看出，当温度为60 ℃时，在不同RAP掺量和加载频率下，再生沥青混合料的|*E**|无较大差异，证明不同种类样品高温性能接近。而结合温度为40 ℃和50 ℃的结果发现，当RAP质量分数为50%时，高温性能更加优异。

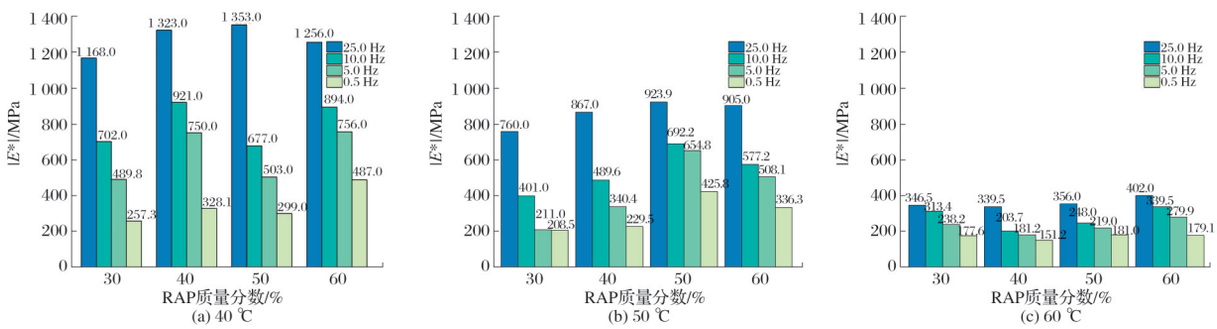


图3 不同温度、RAP掺量及频率下复合再生沥青混合料的|*E**|

Fig.3 |*E**| of composite recycled asphalt mixtures under different temperatures, RAP adding amounts and frequencies

2.2.2 纤维种类对|*E**|的影响

图4为不同温度、RAP掺量及频率下纤维再生沥青混合料的|*E**|。从图4可以看出，纤维的掺入能够有效改善沥青混合料的高温性能。主要是因为纤维可在沥青混合料中形成交错的空间网状结构，从而有效分散荷载应力，减少塑性流动。同时，纤维的弹性模量远高于沥青，可提升沥青混合料在高温条件下的弹性恢复能力。随着温度的升高以及加载频率的降低，|*E**|降低。在3种温度下，添加聚乙烯醇纤维的再生沥青混合料表现出更优异的高温性能。当温度为40 ℃、RAP质量分数为50%时，50% RAP+玄武岩的|*E**|高于50% RAP+聚乙烯醇。当温度为50 ℃、RAP质量分数为40%时，40% RAP+玄武岩的|*E**|高于40% RAP+聚乙烯醇。整体来看，在多种因素耦合作用下，聚乙烯醇纤维再生沥青混合料高温性能更加优异。

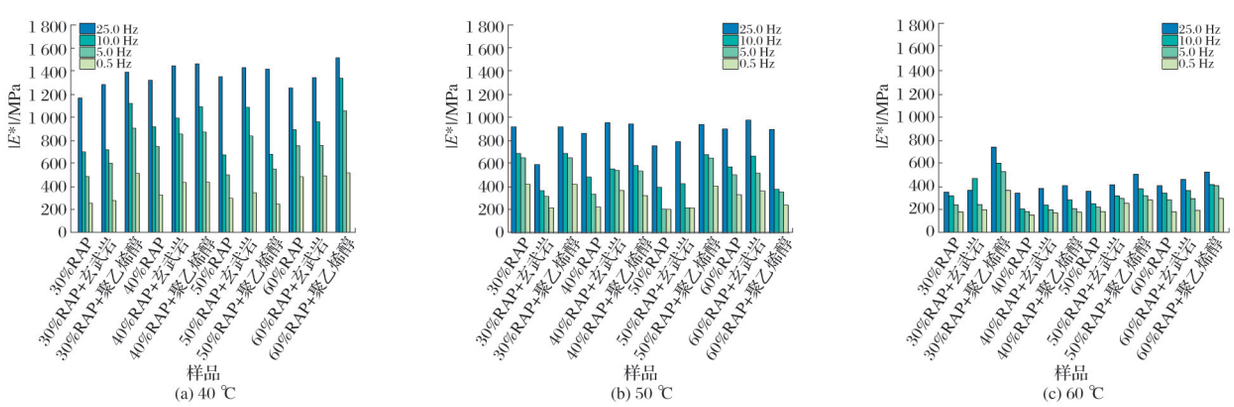


图4 不同温度、RAP掺量及频率下纤维再生沥青混合料的|*E**|

Fig.4 |*E**| of fiber-reinforced asphalt mixtures under different temperatures, RAP adding amounts and frequencies

2.3 数学模型构建

2.3.1 方差模型

影响动态模量试验结果的因素包括温度、RAP掺量、加载频率及纤维种类，利用多因素及双因素方差分析对|*E**|的影响程度进行相关表征。选取95%的置信度(α=0.05)，当P<0.05时，该因素对|*E**|影响显著。表8为|*E**|的方差分析结果。从表8可以看出，在4种试验因素影响下，温度、RAP掺量、加载频率及纤维种类均对高掺量RAP复合再生沥青混合料的|*E**|产生显著影响，影响的显著程度顺序为：温度>RAP掺量>纤维种类>加载频率。而两种因素交互作用下影响不显著，证明因素之间无协同作用。

表8 |*E**|的方差分析结果

Tab.8 Analysis of variance results of |*E**|

因素	P值
温度	2.200×10^{-16}
RAP掺量	2.340×10^{-15}
加载频率	3.210×10^{-8}
纤维种类	1.560×10^{-12}
RAP×温度	0.072
RAP×纤维	0.096
纤维×温度	0.065

2.3.2 熵权-灰色关联度模型

灰色关联度法可以对变量和因变量之间的关联程度进行比较，以此来确定影响程度[25]。表9为4种影响因素的关联度。

表9 4种影响因素的关联度

Tab.9 Correlation degree of four influencing factors

因素	关联度
温度	0.693
RAP掺量	0.684
加载频率	0.678
纤维种类	0.663

熵值的计算建立在关联度之上，权重的计算需要关联度及熵值的结合。结合熵权-灰色关联度法进行分析，得到4种影响因素的权重如表10所示。

表10 4种影响因素的权重

Tab.10 Weight of four influencing factors 单位：%

因素	权重
温度	25.5
纤维种类	24.4
RAP掺量	25.2
加载频率	24.9

本研究利用熵权-灰色关联度法分析发现|E^*|与温度的关联度较高且温度所占权重最大，证明在动态模量试验中温度影响最为显著，其余因素依次为RAP掺量、加载频率、纤维种类。

2.3.3 随机森林模型

本研究选取随机森林模型进行验证，图5为随机森林模型原理。

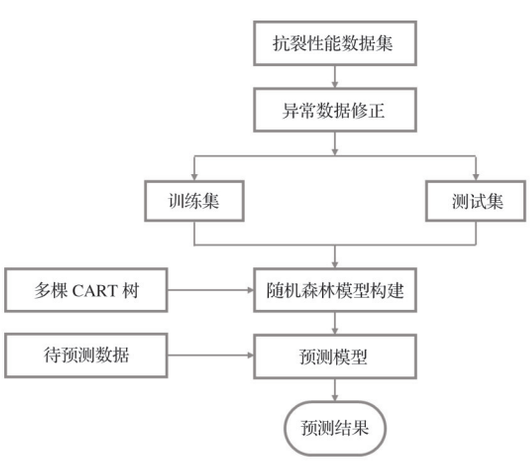


图5 随机森林模型原理

Fig.5 Principle of random forest model

该模型具有较好的抗过拟合能力，可以提供特征重要性等优点。因此，利用该模型进行高温性能影响因素探究。数据集由4个特征和1个目标变量构成，80%作为训练集，20%作为测试集。表11为随机森林模型中影响因素特征重要性。从表11可以看出，温度是影响再生沥青混合料高温性能的关键因素，其余试验因素影响程度顺序为：加载频率>纤维类型>RAP掺量。

表11 随机森林模型中影响因素特征重要性

Tab.11 Importance of influencing factor characteristics in random forest models

因素	特征重要性
温度	44.9
加载频率	44.3
纤维类型	8.0
RAP掺量	3.8

2.3.4 模型结果对比

为探究不同数学方法的差异性，将所得到的结果进行对比，利用数字1~4分别代替纤维类型、温度、RAP掺量及加载频率。表12为不同分析方法的影响因素权重。

表12 不同分析方法的影响因素权重

Tab.12 Weight of influencing factors for different analysis methods

分析方法	第一重要因素	第二重要因素	第三重要因素	第四重要因素
方差分析	2	3	1	4
熵权-灰色关联度分析	2	3	4	1
随机森林模型	2	4	1	3

3种分析方法均表明，温度是影响再生沥青混合料|E^*|的关键因素。3种方法次要因素的排序存在差异，可能是3种方法计算原理不同所致。

2.4 影响因素探究

在不同试验因素的影响下，复合再生沥青混合料的|E^*|发生不同程度的变化。其中，|E^*|与温度呈负相关，与加载频率呈正相关。纤维的加入能够提升其高温稳定性。主要是因为沥青作为一种黏-弹性材料，其黏-弹性成分占比会随着温度而发生变化。当温度升高，沥青黏性成分占比增加，流动性增大，在受到外界荷载作用时容易发生形变，进而导致其高温稳定性降低。纤维的加入会在沥青混合料内部形成网格结构，增强沥青混合料各部分之间的相互作用进而改善高温性能，但不同纤维相关性能存在差异，进而对再生沥青混合料性能产生不同程度的影响。为了量化试验因素的影响程度，本研究在传统数学模型的基础上引入机器学习算法。传统数理统计方法与机器学习模型分析结果相互验证，共同揭示温度是影响高掺量RAP复合再生沥青混合料高温性能的关键因素。

3 结论

本研究借助AFM及NanoScope软件，将再生沥青的

宏观与微观黏附力相结合，发现再生沥青性能随XT-3掺量的增加呈先增后减趋势。当XT-3质量分数为7%时，再生效果最优。沥青混合料动态模量试验结果表明，随着温度的升高，|E^*|减小。在相同温度及加载频率下，|E^*|随RAP掺量的增加呈先增后减趋势；在相同温度及RAP掺量下，|E^*|随加载频率的减小而降低。掺入纤维后，不同种类高掺量RAP复合再生沥青混合料的高温稳定性均得到提升，其中聚乙烯醇纤维的改善效果更为显著。温度、RAP掺量、加载频率及纤维种类均对|E^*|产生显著影响，其中温度的影响最为显著。

目前，高掺量RAP再生沥青混合料在面层中的应用仍较少，车辙试验是评价其高温性能的主流方法，但局限于特定温度和频率下的动稳定度测定。为探究多因素耦合作用下再生沥青混合料的高温性能，本研究采用AMPT试验进行系统测定，构建从试验到数学模型的研究框架，并将宏观与微观尺度性能相结合，为再生剂最佳掺量的确定提供更可靠的研究基础。此外，将传统数学模型与机器学习方法相结合，为高RAP掺量再生沥青混合料在面层中的应用提供参考。

参考文献

[1] 范秀泽, 曹淋淋, 熊远顺, 等. 基于油石分离的高RAP掺量再生沥青混合料性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(3): 1080-1090.

[2] 刘燕燕, 李飞泉, 刘栋, 等. 纳观尺度下再生沥青-集料界面性质的分子模拟[J]. 化工进展, 2025, 44(8): 4302-4310.

[3] 汤文, 盛晓军, 谢旭飞, 等. 回收料掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 204-208.

[4] 吴天昊, 胡靖, 黄卫, 等. 高比例掺量下厂拌环氧热再生沥青混合料性能评价[J]. 公路, 2025, 70(10): 1-9.

[5] 刘峰, 许新权, 陈炳燊, 等. 高RAP掺量环氧再生沥青混合料路用性能研究[J]. 热固性树脂, 2025, 40(3): 1-7.

[6] 刘成, 刘一鸣, 叶群水, 等. 废食用油改性高掺量沥青混合料回收料热拌/温拌再生沥青混合料路用性能[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(9): 3828-3839.

[7] 郭克难. 高RAP掺量厂拌热再生沥青混合料性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.

[8] 王智超, 胡槟, 沈明燕, 等. 基于路用性能的热再生沥青混合料RAP掺量研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(1): 10-17.

[9] 高学凯, 贺文栋, 周新星. 就地热再生沥青混合料的动态力学特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15742-15748.

[10] 张荣, 王彬. 复掺芳纶纤维和玻璃纤维再生沥青混合料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2794-2802.

[11] HUI Y X, MEN G Y, XIAO P, et al. Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications[J]. Materials, 2022, 15(19): 6826.

[12] JIU X Y, WANG Y, WU Z G, et al. High-temperature performance evaluation of asphalt mixtures by adding short-chopped basalt fiber[J]. Buildings, 2023, 13(2): 370.

[13] LOU K K, KANG A H, XIAO P, et al. Effects of basalt fiber coated with different sizing agents on performance and microstructures of asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121155.

[14] REN D Y, LUO W R, SU S N, et al. Study on crack resistance of basalt fiber reinforced asphalt mixture modified by titanate coupling agent based on digital image correlation[J]. Construction and Building Materials, 2024, 437: 136934.

[15] 李靖, 曹海波, 任海生. 玄武岩纤维增韧环氧沥青及其混合料性能研究[J]. 公路, 2024, 69(9): 285-290.

[16] 姚华彦, 王旭洋, 拓明阳, 等. 盐冻融循环对玄武岩纤维沥青混合料抗裂性能及微观结构的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊2): 630-635.

[17] 吴林松, 王旭洋, 许泽宁, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆抗剪性能研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(6): 17-24.

[18] 桑添翼, 康爱红, 张垚, 等. 玄武岩纤维掺量对冷拌环氧沥青混合料性能影响[J]. 热固性树脂, 2023, 38(3): 8-14.

[19] 周腾飞. 基于合成方差协方差矩阵的激光点云随机特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2026, 63(4): 375-388.

[20] 谢祥兵, 包梦, 李广慧, 等. 基于改进灰熵关联分析的混合型再生粗骨料评价指标及分级研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 354-362.

[21] 王东, 李宇暄, 吴欢, 等. 基于随机森林的智能网联汽车开放测试道路评级算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(9): 2998-3006.

[22] ZHANG X J, JUN Z, GU R H, et al. Effect of aging on micromechanical behavior of asphalt surfaces using an atomic force microscope[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03098.

[23] HAN Y J, CUI B Y, TIAN J H, et al. Evaluating the effects of styrene-butadiene rubber (SBR) and polyphosphoric acid (PPA) on asphalt adhesion performance[J]. Construction and Building Materials, 2022, 321: 126028.

[24] ZHANG E H, SHAN L Y, QI X F, et al. Investigating the relationship between chemical composition and mechanical properties of asphalt binders using atomic force microscopy (AFM) [J]. Construction and Building Materials, 2022, 343: 128001.

[25] 廖方平, 吴莲张, 高鹏慧, 等. 基于灰色关联度分析法对23份草果种质资源进行综合评价[J]. 热带农业科学, 2026, 46(1): 63-70.