DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.019
文章编号:1671-2579(2025)05-0174-08

基于精细分离技术的高RAP掺量再生沥青混合料路用性能研究

王海熊[1],唐伟[2*],高兴龙[3],樊向阳[4],鄢春鹏[4]

(1.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114;2.华东交通大学 土木建筑学院,江西 南昌 330013;3.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024;4.江西省交投养护科技集团有限公司,江西 南昌 330299)

摘要:废旧沥青路面材料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)的变异性问题是限制RAP在再生沥青混合料中实现高掺量使用的关键因素之一。精细分离技术能显著改善RAP的结团现象和变异性,但基于该技术制备的再生混合料的路用性能有待进一步研究。为此,该文首先通过精细分离技术处理RAP,通过车辙试验、冻融劈裂试验和小梁弯曲试验综合评价再生混合料的路用性能,同时研究了不同精细分离RAP掺量(40%~70%)和再生剂掺量(0%~8%)对路用性能的影响规律。结果表明:① 随着精细分离RAP掺量由40%增加至70%,再生沥青混合料的高温性能提升46.5%,但水稳定性能、低温性能和抗疲劳性能分别降低6.5%、39.6%和73.3%,动态模量呈现先增大后减小的趋势;② 随着再生剂掺量增加至8%,水稳定性能、低温性能和疲劳性能分别提升9.7%、89.4%和219.6%,但高温性能降低16.4%。所有RAP掺量下的再生混合料路用性能指标均满足规范要求,说明采用精细分离技术可使再生混合料RAP掺量达70%。综合考虑各项路用性能和成本,建议再生剂掺量控制为4%~6%。

关键词:再生沥青混合料;RAP;精细分离;路用性能;再生剂

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Study on the Road Performance of Recycled Asphalt Mixture with High RAP Percentage Based on Precision Separation Technology

WANG Haixiong[1], TANG Wei[2*], GAO Xinglong[3], FAN Xiangyang[4], YAN Chunpeng[4]

(1. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 4. Jiangxi Communications Investment Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330299, China)

Abstract: The variability of recycled asphalt pavement (RAP) is one of the key factors limiting its high-content use in recycled asphalt mixtures (RAM). Although the RAP variability and clustering phenomenon can be effectively reduced by the precision separation (PS) technology, the road performance of RAM based on this technology requires further investigation. To address this issue, RAP materials were pre-processed using PS technology, followed by a comprehensive evaluation of the road performance of the RAM through rutting tests, freeze-thaw splitting tests, and beam bending tests. In addition, the influences of PS-RAP content and rejuvenator content on the road performance were analyzed. Results indicate that as the RAP content increases from 40% to 70%, the high-temperature performance of the RAM improves by 46.5%, while water stability, low-temperature performance, and fatigue resistance decrease by 6.5%, 39.6%, and 73.3%, respectively. The dynamic modulus initially increases and then decreases with the RAP content. As the rejuvenator content increases to 8%, water stability, low-temperature performance, and fatigue resistance improve from 9.7%, 89.4%, and 219.6%, respectively but high-temperature performance decreases by 16.4%. All road performance

收稿日期:2025-07-03 **修回日期:**2025-09-09

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(编号:2023Z0001);江西省重点研发计划项目(编号:20252BCG330027)

作者简介:王海熊,男,硕士研究生. E-mail:whx@csust.edu.cn

***通信作者:**唐伟,男,博士,讲师. E-mail:vigor1944@163.com

indicators of the RAM under different RAP content meet the specification requirements, demonstrating that the RAP content can reach up to 70% when PS technology is applied. Considering both road performance and costs, it is recommended that the rejuvenator content be controlled within the range of 4% to 6%.

Keywords: recycled asphalt mixture; reclaimed asphalt pavement; precision separation; road performance; rejuvenator

0　引言

随着中国公路发展全面进入养护时代，由养护产生的废旧沥青路面材料（Reclaimed Asphalt Pavement，RAP）每年以数亿吨计。这些RAP的废置不仅侵占土地，污染环境，更是资源浪费[1-3]。在此背景下，沥青路面再生技术应运而生，成为道路工程领域实现资源循环利用与可持续发展的关键技术手段[4]。

厂拌热再生技术具有适用层位广、施工工艺简单的特点，在再生技术中应用最为广泛[5]。然而，目前RAP在厂拌热再生混合料中的掺量通常低于30%，无法产生更高的经济效益和社会效益[6]。造成此现状的关键因素之一是RAP的变异性大，致使再生混合料的质量稳定性难以控制，在高RAP掺量下尤为明显[7]。一方面，RAP材料组成复杂、多料源情况下RAP级配以及沥青含量等性质差异较大；另一方面，旧沥青胶砂黏附在旧集料表面，RAP结团程度严重。因此，RAP多料源以及结团现象均会造成其变异性大。

为解决RAP的变异性问题，精细分离技术应运而生。精细分离是一种基于物理原理的RAP油石分离技术，包含“油石分离”和“精细筛分”两个步骤。该技术首先通过转子离心机高速旋转产生碰撞、剪切和研磨作用，“打开”结团颗粒的同时，将RAP料上黏结的沥青砂剥离下来，实现油石分离的目的。然后采用高频筛，根据粒径大小将RAP精细筛分为3～5档[8]。通过精细分离，可以分别降低由RAP结团和多料源引起的变异性，从而显著提高再生混合料的RAP掺量[9]。然而，目前对基于精细分离技术的高RAP掺量再生混合料性能的相关研究较少。

基于此，本文首先通过精细分离技术处理RAP料，然后通过车辙试验、冻融劈裂试验和低温半圆弯曲试验全面研究再生沥青混合料的路用性能，并分析精细分离RAP和再生剂掺量对再生沥青混合料路用性能的影响规律。本文研究旨在提升RAP掺量，并推动精细分离技术的应用。

1　原材料

1.1　精细分离RAP

文中采用的RAP来源于江西省某高速公路中面层AC-20，至铣刨时已经服役15年。为了降低RAP的变异性，本文采用精细分离技术对RAP进行处理，将其分为0～5 mm、5～11 mm和11～22 mm 3档，如图1所示。从图1可以看出：精细分离RAP颗粒的粒度均一，表面洁净，黏附的沥青胶砂少，说明RAP的均匀性较好。

图1　精细分离设备及其RAP料

Figure 1　Precision separation equipment and RAP materials

采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20—2019）中的方法对RAP的性质进行测试，结果如表1所示。由表1可知：RAP粗料（>5 mm）的沥青含量为2%左右，明显低于通过常规破碎筛分所得对应粒径RAP的沥青含量[10]，这是因为大量沥青胶砂从RAP粗料剥离并进入0～5 mm RAP细料中，使得RAP细料的沥青含量增加。RAP中旧集料和旧沥青的性质完全满足规范的要求（表1、2），表明精细分离技术具有适用性。

1.2　新集料

新集料由江西交通工程集团赣东事业部南城基地提供，粒径选用10～20 mm和5～10 mm，经测试各项性能指标均满足规范要求。新集料与RAP中旧集料的级配见表3。

1.3　新沥青及再生剂

新沥青采用SBS改性沥青，再生剂选用自主研

表1 精细分离RAP的性质

Table 1 Properties of precision-separated RAP

材料	性能指标		单位	11～22 mm	5～11 mm	0～5 mm	规范要求
RAP	沥青含量		%	1.9	2.2	5.9	
	含水率		%	0.6	0.8	1.2	≤3
	变异性(通过率SD)	0.075 mm		0.071	0.066	0.759	≤1.5
		2.36 mm		0.207	0.678	3.751	≤5
		4.75 mm		0.375	1.286	1.518	≤5
旧集料	表观相对密度			2.713	2.717	2.688	≥2.6
	吸水率		%	0.28	0.47	1.12	≤2.0
	针片状		%	12.6	14.7	—	≤15
	软石含量		%	2.7			≤3
	压碎值		%	11.3		—	≤26
	洛杉矶磨耗损失		%	25.8			≤28
	砂当量		%	—		62	≥10
	棱角性		s			37	

发的润强RA-102改性沥青专用再生剂,性能指标分别见表4和表5。

表2 旧沥青的性质

Table 2 Properties of aged asphalt

性能指标	单位	试验结果	规范要求
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	22	≥10
软化点(R&B)	℃	63.0	
延度(15 ℃)	cm	12	

表3 集料级配通过率

Table 3 Aggregate gradation passing rate

筛孔尺寸/mm	新集料/%		旧集料/%		
	10～20 mm	5～10 mm	11～22 mm	5～11 mm	0～5 mm
26.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19	83.7	100.0	90.9	100.0	100.0
16	58.5	100.0	77.0	100.0	100.0
13.2	25.8	100.0	43.0	100.0	100.0
9.5	1.6	99.2	7.8	98.9	100.0
4.75	0.2	11.1	1.8	15.2	96.7
2.36	0.2	2.9	1.7	3.5	77.9
1.18	0.2	1.3	1.7	3.2	57.9
0.6	0.2	0.9	1.7	3.0	45.6
0.3	0.2	0.8	1.7	2.8	32.2
0.15	0.2	0.7	1.7	2.7	23.9
0.075	0.2	0.7	1.7	2.6	17.2

表4 新沥青的性能指标

Table 4 Performance indicators of new asphalt

性能指标	单位	测试结果	技术要求
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	55	40～60
软化点(R&B)	℃	81	≥76
延度(5 ℃)	cm	32	≥25
离析(48 h软化点差)	℃	1.5	≤2.5
弹性恢复(25 ℃)	%	91.8	≥75
密度(15 ℃)	g/cm^3	1.025	—

表5 再生剂的性能指标

Table 5 Performance indicators of rejuvenator

性能指标	单位	测试结果	技术要求
60 ℃黏度	mm^2/s	5 370	50～60 000
闪点	℃	241	≥220
饱和分含量	%	20.3	≤30
芳香分含量	%	64.2	实测
薄膜烘箱试验前后黏度比		1.3	≤3
薄膜烘箱试验前后质量变化		0.5	[−3,3]

2 再生混合料路用性能试验

2.1 再生混合料配合比设计

为了能够最大程度使用RAP,本文选用与RAP混合料类型相同的级配(AC-20)进行高RAP掺量再生混合料的配合比设计,同时根据马辉等[11]提出的级配可恢复程度确定精细分离RAP的最大掺量为70%,此时0～5 mm、5～11 mm和11～22 mm 3档

RAP的比例为26%、29%和15%，再生混合料的合成级配见图2。通过马歇尔设计方法确定最佳沥青用量为4.3%。为了避免由于级配的差异对结果造成影响，其他RAP掺量（40%、50%和60%）的混合料均保持与70%掺量时相同的级配与沥青用量。与此同时，本文在所有再生混合料中添加了0%、2%、4%、6%和8%的再生剂（占旧沥青的质量比），以研究再生剂用量对混合料路用性能的影响规律。

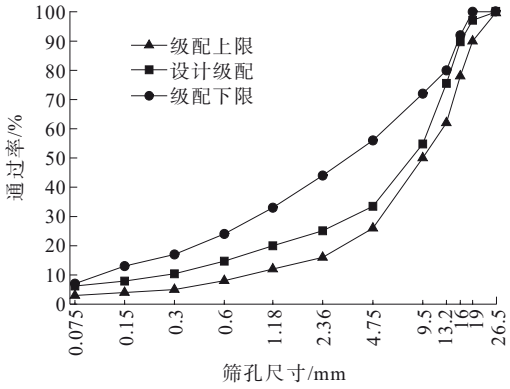


图2　再生混合料的合成级配曲线

Figure 2　Synthetic gradation curves of recycled mixtures

2.2　路用性能试验

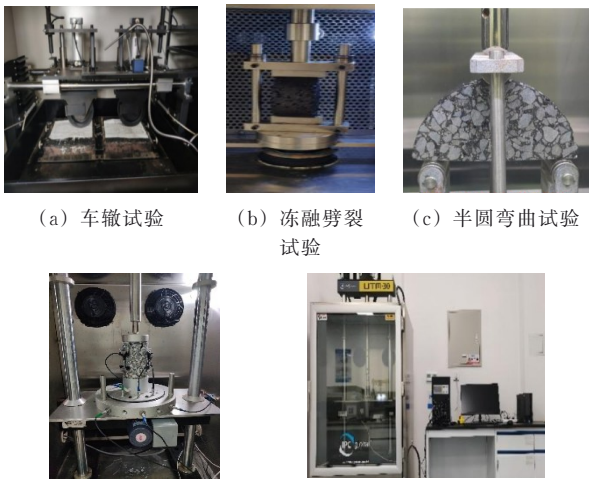
为了研究高RAP掺量再生混合料的路用性能，根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20—2019）中的试验步骤对再生混合料进行了车辙试验、冻融劈裂试验、半圆弯曲试验和动态模量试验，每个试验均设置3组平行试验，以评价高温性能、水稳定性、低温性能和黏弹特性[12-14]。对于再生混合料的疲劳性能，本文根据欧洲规范（EN 12697-24）的试验步骤进行，并同样开展了3组平行试验。试验加载采用半正矢波荷载的应力控制模式，应力水平为0.3，试验温度为15 ℃，加载频率为10 Hz[15]。再生混合料的路用性能试验见图3。

3　试验结果分析

3.1　高温性能

采用车辙试验中的动稳定度来评价混合料的高温性能，动稳定度越大，混合料的高温抗车辙能力越好[16]。不同类型再生混合料的动稳定度结果如图4所示。

图4结果表明：各RAP掺量下的动稳定度均满足规范技术要求（夏炎热区≥2 400 次/mm）。RAP掺量每增加10%，动稳定度增加11%～22%，且增幅逐渐降低。这表明掺入RAP有利于提升再生沥青混



（a）车辙试验　（b）冻融劈裂试验　（c）半圆弯曲试验

（d）动态模量试验　（e）疲劳试验

图3　路用性能试验

Figure 3　Road performance tests

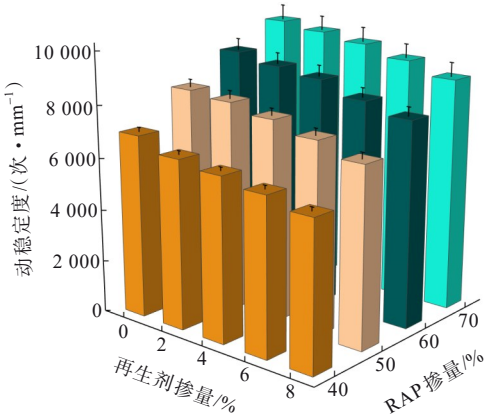


图4　再生混合料的动稳定度

Figure 4　Dynamic stability of recycled mixtures

合料的高温稳定性，这主要是由于沥青混合料的高温稳定性受材料组成、结构特性等因素的影响，而RAP中旧沥青重质组分的含量较高，新旧沥青混合后形成的沥青结合料黏度增大，提升了再生沥青混合料的高温抗车辙能力，但提升的效果有限。随着再生剂掺量的增加，动稳定度逐渐降低。但在RAP掺量较低的情况下降幅越大，RAP掺量为40%和70%时，平均降幅分别为5.3%和3.4%。究其原因，再生剂能恢复旧沥青的流动性，从而提升再生沥青混合料的高温性能。然而，当RAP掺量较高时，再生剂难以渗透至老化沥青内部，其改善作用因此减弱。

3.2　水稳定性

在冻融劈裂试验中，使用冻融循环后试件劈裂抗拉强度与冻融前的劈裂强度比值R_{TSR}作为评价沥青混合料水稳定性能的指标[17]，试验结果如图5

所示。

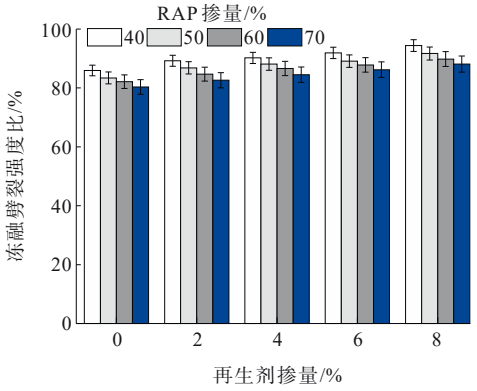


图5 再生混合料的劈裂强度比

Figure 5 Splitting strength ratio of recycled mixtures

由图5可知：① RAP掺量每增加10%，R_{TSR}逐渐减小，减小幅度约为20%，但均满足规范技术要求（R_{TSR}≥80%）。这主要是由于RAP中的旧沥青与集料黏附性降低，沥青与集料在动水压力作用下相互剥离，同时，在冻结过程中，冻胀效应使得试件内部产生微小裂缝，在融化过程中水更易渗透进入试件，引起水损害，从而使混合料水稳定性降低；② 随着再生剂掺量的增大，R_{TSR}逐渐增大。这是由于随着再生剂的增多，旧沥青的针入度、延度增大，软化点减小，改善了旧沥青的组分，增大了沥青与石料的接触面积，使其黏附性能变好，水稳定性增强。但是当再生剂掺量超过6%后，可能导致沥青黏度下降过低，进而冻融循环作用下沥青与集料的黏附性能恶化，最终抑制R_{TSR}的增长。

3.3 低温抗裂性能

断裂能是指断裂表面从开始断裂到完全断裂所消耗的能量与韧带面积的比值，即单位面积破坏所需要的断裂功[18]。越大的断裂能表明在试验条件下具有更优异的抗裂性能。相比于应变或强度指标，有效弥补了单一因素导致试验结果不准确的问题。因此，以断裂能评价沥青混合料的低温抗裂性能，其试验结果如图6所示。

由图6可知：① 随着精细分离RAP掺量增加至70%，再生沥青混合料的断裂能显著降低40%。这是因为随着沥青混合料中旧沥青比例的增加，新旧沥青之间的不均匀混溶增加，同时沥青混合料中旧沥青比例上升，新沥青比例相对减少，整体黏结性能下降，脆性增强，导致沥青混合料的抗裂性能降低；② 随着再生剂掺量的增大，沥青混合料的断裂能明显增大。这是因为适量的再生剂渗透至旧沥青中，使其分子链舒展，增加延展性。此外，随着再生剂掺量的增加，旧沥青的性能进一步恢复，沥青与集料间的黏结也更均匀，能够更有效地分散应力，避免应力集中，从而共同提高了沥青混合料的断裂能[19]。

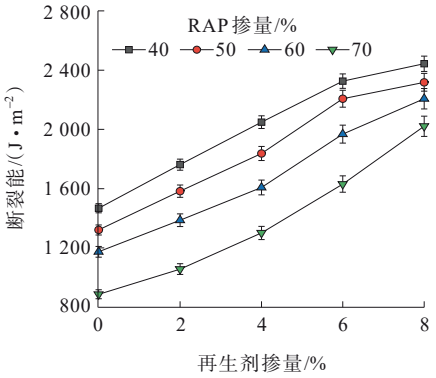


图6 不同RAP及再生剂掺量下再生沥青混合料断裂能

Figure 6 Fracture energy of recycled asphalt mixtures with different RAP and rejuvenator content

3.4 黏弹特性

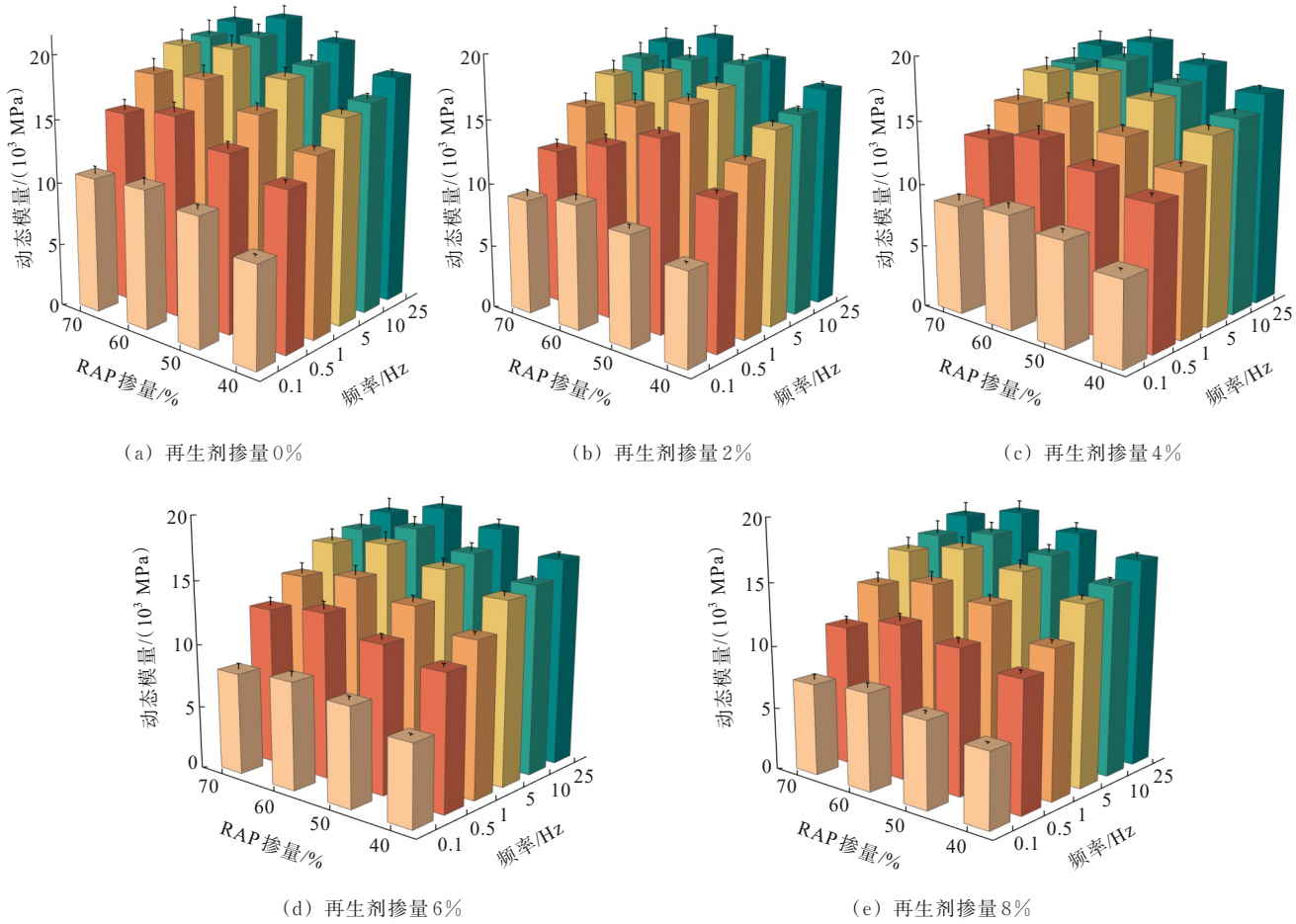
试验温度为5 ℃，频率为0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz、25 Hz，测定不同条件下的动态模量，结果如图7所示。

由图7可知：在同一温度下，沥青混合料的动态模量随加载频率的加快而增大，且在较低频率下增幅较大。在RAP掺量为40%～60%时，沥青混合料的动态模量随RAP掺量的增大而升高，这是因为RAP中的旧沥青老化程度高，黏度大，表现出较高的硬度。当RAP掺入时，在受到荷载作用时，抵抗变形的能力增强，从而导致动态模量升高。当RAP掺量大于60%时，沥青混合料的动态模量开始降低，这主要是由于大量的RAP使得旧沥青与新沥青的兼容性问题凸显，难以形成均匀的结合料体系[20]。同时，旧集料表面过厚的旧沥青膜会影响新沥青与集料的黏结效果，削弱混合料内部结构的均匀性和整体性，从而限制动态模量的增长，可能引发模量值下降。随着再生剂掺量的增加，动态模量逐渐减小，这是因为再生剂会改变沥青的化学组成和结构，使沥青的性能发生较大变化，在动态荷载作用下容易产生过度的黏性流动，使混合料的动态模量降低。

3.5 疲劳性能

为分析沥青混合料的疲劳耐久性能，采用试件断裂时对应的加载作用次数（即疲劳寿命）作为评价指标[21]，试验结果如图8所示。

由图8可知：随着RAP掺量的增加，再生沥青混



（a）再生剂掺量0%　（b）再生剂掺量2%　（c）再生剂掺量4%

（d）再生剂掺量6%　（e）再生剂掺量8%

图7　再生沥青混合料动态模量

Figure 7　Dynamic modulus of recycled asphalt mixtures

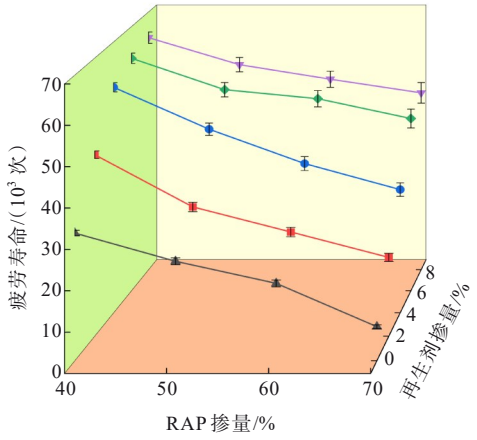


图8　再生沥青混合料疲劳寿命

Figure 8　Fatigue life of recycled asphalt mixtures

合料疲劳寿命逐渐下降。这是由于RAP中的旧沥青老化严重，其性能劣化，黏性和韧性下降，使混合料的整体柔韧性降低。在反复荷载作用下，材料更容易出现微裂纹，且裂纹扩展速度加快，从而缩短了疲劳寿命。随着再生剂掺量增加至8%，沥青混合料的疲劳寿命明显增大，RAP掺量在70%时增加了3倍。这是因为随着再生剂掺量的增大，在循环荷载作用下再生剂能够更好地吸收和耗散能量，并且确保荷载在沥青混合料内部均匀传递，避免因局部应力集中而引发疲劳裂缝，进而延长了沥青混合料的疲劳寿命。

3.6　路用性能相关性分析

通过皮尔逊相关性分析，对再生沥青混合料的动稳定度D_{DS}、冻融劈裂强度比R_{TSR}、断裂能G_f、动态模量E^*以及疲劳寿命N_f之间的关联性进行了分析，通过计算相关系数来衡量几种材料之间多因素影响下的关联性[22]，相关系数取值范围在−1～1之间，其中，−1代表完全负相关，0代表无相关性，1代表完全正相关。相关性分析结果如图9所示。

从图9可知：不同RAP掺量的混合料的各性能参数表现出不同的影响程度，其中，再生沥青混合料的动稳定度D_{DS}与再生沥青混合料的动态模量E^*呈高度正相关，与沥青混合料的冻融劈裂强度比R_{TSR}、

断裂能G_f以及疲劳寿命N_f呈高度负相关。这是因为沥青混合料的动稳定度和动态模量均为材料内部结构与黏弹性能的宏观体现，沥青混合料的刚度越高（动态模量高），抵抗变形的能力越强（动稳定度高）；动稳定度高的沥青混合料低温韧性差，而断裂能依赖沥青混合料的低温韧性。此外，再生沥青混合料的冻融劈裂强度比R_{TSR}与断裂能和疲劳寿命呈高度正相关，断裂能与疲劳寿命之间也呈现出高度正相关。这是因为沥青混合料高延展性、高黏结力的沥青胶浆可同时提升R_{TSR}（抗冻融剥离）、断裂能（能量吸收）及疲劳寿命（黏弹性恢复）；R_{TSR}越低，水分会加剧集料与沥青界面的劣化，形成微裂纹，这些缺陷成为疲劳开裂的起始点，导致疲劳寿命缩短。反之，R_{TSR}越高意味着材料抗冻融损伤能力越强，疲劳荷载下的抗裂能力也越强。

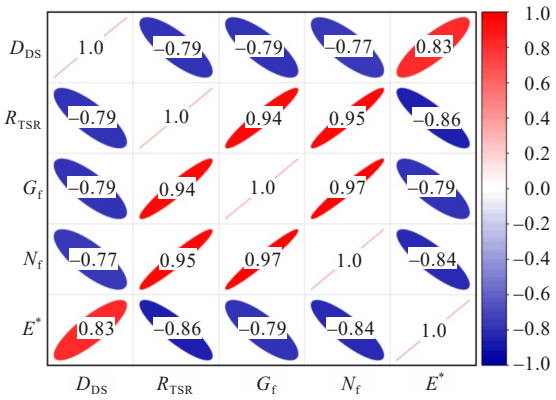


图9 Pearson相关性分析热图

Figure 9 Heat map of Pearson correlation analysis

4 结论

本文采用精细分离RAP制备了再生混合料，通过车辙试验、冻融劈裂试验和动态模量等试验评价了再生混合料的路用性能，并分析研究了不同RAP和再生剂掺量对再生沥青混合料路用性能的影响规律，得到主要结论如下：

（1）通过使用精细分离技术，再生混合料的RAP掺量可达到70%。随着精细分离RAP掺量的增加，高温性能明显提高，低温抗裂性能、水稳定性和抗疲劳性能小幅下降，动态模量呈现先升高后降低的趋势，当RAP掺量在60%左右时，动态模量达到峰值。

（2）随着再生剂掺量的增加，低温抗裂性能、疲劳性能和水稳定性呈逐渐提升的趋势，而高温性能和动态模量逐渐降低。过高的再生剂掺量会使高温性能降幅较大，较低的掺量对混合料的性能提升效果有限。因此建议居中选取再生剂的掺量，本文中再生剂掺量为4%～6%。

（3）再生沥青混合料的动稳定度与动态模量E^*呈高度正相关，与沥青混合料的冻融劈裂强度比R_{TSR}、断裂能以及疲劳寿命呈高度负相关。再生沥青混合料的冻融劈裂强度比R_{TSR}与断裂能和疲劳寿命呈高度正相关，断裂能与疲劳寿命之间也呈现出高度正相关。这与混合料的内部结构和黏弹性能直接相关。

（4）本文通过室内试验发现精细分离技术下的再生混合料具有良好的路用性能，为工程实践提供了一定的数据支撑。后续将通过实际工程验证本文结论的合理性，拓展精细分离技术的应用前景。

参考文献：

References：

[1] 王雪莲，胡林，黄晓明．沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J]．中外公路，2019，39(1)：210-214.
WANG Xuelian, HU Lin, HUANG Xiaoming. Key technology of hot recycling process for plant-mixed asphalt pavement[J].Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(1):210-214.

[2] 樊统江，徐栋良，贾敬鹏，等．沥青砼路面再生技术及其在国外的发展[J]．重庆交通学院学报，2007，26(3)：82-87.
FAN Tongjiang, XU Dongliang, JIA Jingpeng, et al. Recycling technology for asphalt concrete pavement and its development in overseas[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2007,26(3):82-87.

[3] 田耀刚，覃超，张梦缘，等．温拌SBS改性再生沥青混合料的路用性能研究[J]．应用化工，2024，53(5)：1031-1035.
TIAN Yaogang,QIN Chao,ZHANG Mengyuan,et al.Study on the road performance of warm-mix recycled SBS modified asphalt mixes[J]. Applied Chemical Industry, 2024,53(5):1031-1035.

[4] GULZAR S, FRIED A, PRECIADO J, et al. Towards sustainable roads: A state-of-the-art review on the use of recycling agents in recycled asphalt mixtures[J].Journal of Cleaner Production,2023,406:136994.

[5] 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.

[6] 周洲．厂拌热再生沥青混合料抗裂性能和开裂机理研究[D]．南京：东南大学，2020.
ZHOU Zhou. Research on cracking behavior and fracture mechanism of plant produced reclaimed asphalt pavement mixtures[D].Nanjing:Southeast University,2020.

[7] 张金喜,林翔,苗英豪,等.再生沥青混合料变异性影响因素正交试验[J].北京工业大学学报,2010,36(6):771-778.
ZHANG Jinxi, LIN Xiang, MIAO Yinghao, et al. Study on the factors and variability affecting recycled asphalt mixture by orthogonal test[J]. Journal of Beijing University of Technology,2010,36(6):771-778.

[8] 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].Construction and Building Materials,2022,321:126406.

[9] TANG W, LI N, ZHUANG Y, et al. Evaluation and influencing factors on particle agglomeration in RAP[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2024,39(1):60-68.

[10] 周健楠,张哲诚,王洋,等.破碎工艺对回收沥青路面材料再利用特性的影响[J].上海公路,2024(增刊1):53-60,87.
ZHOU Jiannan, ZHANG Zhecheng, WANG Yang, et al. Influence of crushing process on reuse characteristics of recycled asphalt pavement materials[J]. Shanghai Highways,2024(sup 1):53-60,87.

[11] 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.

[12] 冯云霞,罗钰鸿,牛开民,等.盐及环境耦合作用下沥青和混合料性能劣化规律及机理研究进展[J].材料导报,2023,37(13):107-116.
FENG Yunxia, LUO Yuhong, NIU Kaimin, et al. Research progress on the deterioration law and mechanism of asphalt and mixture properties under the coupling influence of salt and environment[J]. Materials Reports, 2023,37(13):107-116.

[13] 李祖仲,李梦园,刘卫东,等.蔗渣纤维表面改性及其沥青混合料路用性能[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(6):1738-1745.
LI Zuzhong, LI Mengyuan, LIU Weidong, et al. Surface modification of bagasse fibers and road performances of asphalt mixture[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2024,54(6):1738-1745.

[14] 钟昆志,朱耀庭,范剑伟,等.高旧料掺量高模量再生沥青混合料的动态模量与抗裂性能研究[J].公路,2025,70(4):9-15.
ZHONG Kunzhi, ZHU Yaoting, FAN Jianwei, et al. Research on dynamic modulus and crack resistance of high modulus recycled asphalt mixture with high RAP content[J].Highway,2025,70(4):9-15.

[15] 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.
WANG Zhichao, HU Bin, SHEN Mingyan, et al. Study on RAP content of hot recycled asphalt mixture based on road performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(1): 10-17.

[16] 蒋鑫.掺蔗渣纤维橡胶沥青再生混合料路用性能研究[J].中外公路,2024,44(2):130-137.
JIANG Xin. Road performance of reclaimed asphalt mixture mixed with bagasse fibers and rubber-modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44 (2):130-137.

[17] 任瑞波,尹利洋,徐强,等.RAP掺量对温再生沥青混合料力学性能和路用性能的影响规律研究[J].中外公路,2024,44(1):66-75.
REN Ruibo, YIN Liyang, XU Qiang, et al. Influence of RAP content on mechanical properties and pavement performance of warm recycled asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(1):66-75.

[18] 吕松涛,陈淇,鲁巍巍,等.沥青混合料低温半圆弯曲试验评价指标研究[J].中外公路,2025,45(3):25-36.
LYU Songtao, CHEN Qi, LU Weiwei, et al. Research on evaluation index of low-temperature semi-circular bending test of asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway,2025,45(3):25-36.

[19] SONG W M, ZOU X H, WU H, et al. Energy evolution in fracture process of hot mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement and rejuvenator[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2023,124:103809.

[20] JAMSHIDI A, WHITE G, HOSSEINPOUR M, et al. Characterization of effects of reclaimed asphalt pavement (RAP) source and content on dynamic modulus of hot mix asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019,217:487-497.

[21] 蓝勇,邓星鹤,张子达,等.超柔型FMA混合料抗反射开裂和疲劳性能研究[J/OL].中外公路,1-20[2025-06-27]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250627.1405.002.
LAN Yong, DENG Xinghe, ZHANG Zida, et al. Study on resistance to reflection cracking and fatigue performance of the ultra-high performance FMA mixture[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-20[2025-06-27]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250627.1405.002.

[22] XUE Y H, LIU C C, QU J J, et al. Research on pavement performance of recycled asphalt mixture based on separation technology of asphalt and aggregate in RAP[J]. Construction and Building Materials,2023,393:132103.