DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.014
文章编号:1671-2579(2025)05-0131-10

高RAP掺量高模量沥青混合料研究

黄优[1,2],冯勃雄[2],刘朝晖[2],王帅[3],熊添乐[2]
(1.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南 长沙 410114;
2.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114;3.湖南省高速公路集团有限公司,湖南 长沙 410026)

摘要:沥青混合旧料具有硬度大、集料细的特点,与高模量沥青混合料的特点相匹配,针对当前沥青路面再生料(RAP)利用率普遍较低的问题,开展高RAP掺量高模量沥青混合料研究。该文制备了3种沥青混合料:① 添加RAP(4个掺量分别为0%、30%、50%和70%);② 添加高模量剂(2%沥青混合料质量);③ 同时添加RAP和低掺量高模量剂(1%沥青混合料质量),开展了动态模量、路用性能和疲劳性能的对比试验研究。结果表明:随着RAP掺量的增加,沥青混合料动态模量不断提高,其中70%RAP掺量的沥青混合料能够达到高模量沥青混合料的动态模量要求(10 Hz、15 ℃,$|E^*|$>14 000 MPa),其对沥青混合料动态模量的提升与添加2%高模量剂相当。50%RAP掺量的沥青混合料加入少量(1%)高模量剂后也能满足高模量沥青混合料的动态模量要求。此外,RAP掺量的增加也改善了沥青混合料的高温性能,并且大幅提升沥青混合料的抗剪强度;但会对沥青混合料的低温性能和疲劳性能产生不利影响。研究成果可促进沥青路面材料的循环利用及绿色养护技术发展。

关键词:道路工程;绿色养护技术;再生沥青混合料;高模量;高RAP掺量
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

High-Modulus Asphalt Mixtures with High RAP Content

HUANG You[1,2], FENG Boxiong[2], LIU Zhaohui[2], WANG Shuai[3], XIONG Tianle[2]
(1. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Expressway Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410026, China)

Abstract: The old asphalt mixtures are characterized by high hardness and fine aggregate, which is aligned with the characteristics of high-modulus asphalt mixtures. In view of the current problem that the utilization rate of recycled asphalt pavement (RAP) is generally low, research on high-modulus asphalt mixtures with high RAP content was carried out. Three kinds of asphalt mixtures were prepared, including RAP addition with the content of 0%, 30%, 50% and 70% respectively, the addition of the high-modulus agent (2% asphalt mixture mass), and the addition of both RAP and the high-modulus agent with low content (1% asphalt mixture mass). Comparative experimental studies were conducted on the dynamic modulus, road performance, and fatigue performance. The results show that the dynamic modulus of asphalt mixtures increases with the rising RAP content, with mixtures containing 70% RAP meeting the dynamic modulus requirement for high-modulus asphalt mixtures (10 Hz, 15°C, $|E^*|$ > 14,000 MPa). This enhancement for the dynamic modulus is comparable to the addition of the 2% high-modulus agent. Asphalt mixtures with 50% RAP content also satisfy the dynamic modulus requirement for high-modulus asphalt mixtures when a small amount (1%) of the high-modulus agent is added. Additionally, the increase in RAP content improves the high-temperature performance of the asphalt mixtures, and significantly increases the shear strength. However, low-temperature performance and fatigue performance are adversely affected. The research results can promote the recycling of asphalt pavement

收稿日期:2025-06-04 **修回日期:**2025-08-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52478442,52278437);湖南省芙蓉计划科技创新青年人才资助项目(2025RC3159);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2025JJ50247);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj210401)
作者简介:黄优,男,博士,副教授.E-mail:hyzju@csust.edu.cn

materials and the development of green maintenance technology.

Keywords: road engineering; green maintenance technology; recycled asphalt mixture; high modulus; high RAP content

0 引言

截至2024年底，中国公路总里程达549万km，其中公路养护里程占比超过90%，中国的公路建设已经进入大规模养护维修期[1]。每年的公路养护产生的旧沥青混合料达2亿t，未处理的旧料不仅是一种资源浪费，而且会加重环境污染[2]。基于此，沥青路面再生利用技术应运而生。

沥青路面再生利用技术（Recycled Asphalt Pavement，RAP）指将旧沥青路面经过铣刨、破碎、筛分后进行回收，然后与再生剂、新沥青、新集料按比例配合重新拌和成新混合料的技术。20世纪90年代后期，早期修筑的沥青路面逐渐需要进行维修改建，产生了大量的废旧沥青混合料，沥青路面再生利用逐渐受到重视。研究表明，适当利用RAP可增强沥青混合料的高温车辙性能，但可能会导致其抗裂性能降低[3-6]。目前中国沥青路面再生技术中旧料的掺量一般为10%～30%[7-9]。不同来源的RAP以及不同道路结构具有一定差异性，RAP添加比例的增大会加剧路面材料性能指标的变异性[10]，需要经过适当处理以提高RAP的使用性能[11-12]。因此，提高沥青路面RAP掺量的同时提升其使用性能成为公路养护亟待解决的问题。

随着中国公路运输事业的快速发展，重载、超载造成的车辙损害严重威胁着道路交通的安全和舒适性[13]。相比于传统沥青混合料，高模量沥青混合料（High Modulus Asphalt Mixture）拥有更好的抗变形能力和抗疲劳性能，能够延长路面使用寿命，减少沥青路面的养护成本，符合长寿路面设计的要求[14-18]。目前，生产高模量沥青混合料的方法主要包括使用硬质沥青、掺配天然沥青和添加高模量剂[19-20]。如杨琳[21]采用基质沥青与布顿岩沥青（BRA）复配改性技术制备高模量沥青混合料；张晨晨等[22]利用胶粉/SBS复合改性制备高模量沥青混合料，研究表明其具有优异的综合性能。由于RAP中的旧沥青老化变硬、集料颗粒变小，与高模量沥青混合料使用硬质沥青、级配偏细的材料特点相近[23]。因此，将沥青路面再生和高模量沥青混合料设计相结合，制备RAP高掺量的高模量沥青混合料，既可以充分利用废旧沥青路面材料，又能提高沥青路面性能，是未来绿色道路发展的重要方向之一[24-28]。

本文利用沥青路面再生料RAP制备高模量沥青混合料，同步开展掺加高模量剂的沥青混合料试验研究，在提高RAP利用率的同时提高沥青路面服役性能，对促进公路绿色养护技术发展和提升沥青路面耐久性具有重要意义。

1 沥青混合料配合比设计

1.1 原材料性能

RAP的材料性质会影响沥青混合料的路用性能，本文使用的RAP来自某高速公路AC-16沥青面层的铣刨旧料（图1），通过三级破碎（初始粒度≤50 mm）、振动筛分（筛孔尺寸：0.075 mm、2.36 mm、4.75 mm、9.5 mm、13.2 mm）和干燥[（温度（110±5）℃，时间30 min]，确保粒径分布均匀。经检测，RAP的主要技术指标如表1所示，各项性能指标均满足《公路沥青路面再生技术规范》（JTG/T 5521—2019）[29]要求。

图1 沥青路面再生料

Figure 1 Recycled asphalt pavement

高模量剂为苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物，具体技术指标如表2所示。

1.1.1 旧沥青性能评价

采用离心抽提法回收RAP中的旧沥青进行检测，为了更好地评价RAP中旧沥青的老化程度，通过RTFOT试验来模拟沥青的短期老化，RTFOT+PAV试验来模拟沥青长期老化，然后对这两类模拟老化的沥青进行针入度试验，并与RAP抽提回收的旧沥青进行对比，结果见表3。回收旧沥青的针入度

与短期老化试验的沥青针入度接近。因此,回收旧沥青老化程度一般,具有较好的可再生价值。

表1　RAP主要技术指标

Table 1　Main technical indicators of RAP

材料	试验项目	单位	检测结果	技术要求
RAP	含水率	%	0.67～1.00	≤3.0
	沥青含量	%	4.6～4.9	≥3.8
RAP中的沥青	25 ℃针入度	0.1 mm	22	≥10
	软化点	℃	72	实测
	15 ℃延度	cm	61	实测
RAP中的集料	压碎值	%	12	≤30
	洛杉矶磨耗值	%	10	≤35
	表观相对密度		2.702	≥2.45
	吸水率	%	0.6	≤3.0

表2　高模量剂技术指标

Table 2　Technical indicators of high-modulus agent

试验项目	单位	检测结果	技术要求
外观		颗粒状,均匀、饱满	颗粒状,均匀、饱满
熔点	℃	139	110～140
熔融指数(125 ℃,2.16 kg)	g/(10 min)	115.1	≥20

表3　沥青老化试验结果(针入度)

Table 3　Asphalt aging test results (penetration)　0.1 mm

70#新沥青	RTFOT后	RTFOT+PAV后	回收旧沥青
66	24	11	20
69	21	10	23
78	26	15	24

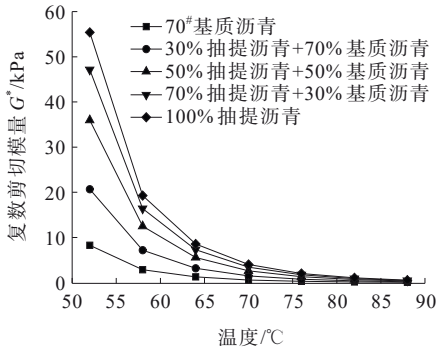
为了研究新旧沥青的融合特性,向70#基质沥青中加入30%、50%、70%比例的抽提沥青,测试其三大指标,结果如表4所示。随着抽提旧沥青掺量的增加,沥青针入度和延度不断降低,软化点不断升高。当抽提沥青比例为70%时,针入度为37(0.1 mm),是基质沥青的52%。回收旧沥青的25 ℃针入度大于20 (0.1 mm)时具有再生价值,满足规范要求[29]。

利用动态剪切流变仪(DSR)试验,通过复数剪切模量(G^*)、相位角(δ)以及车辙因子($G^*/\sin\delta$)对70#基质沥青、100%回收旧沥青、30%抽提沥青+70%基质沥青、50%抽提沥青+50%基质沥青、70%抽提沥青+30%基质沥青的流变性能进行研究,评价其高温抵抗变形能力。试验温度为52～88 ℃,设置剪切应力角速度为10 rad/s,选用25 mm转子,剪切板间隙为1 mm,结果如图2所示。

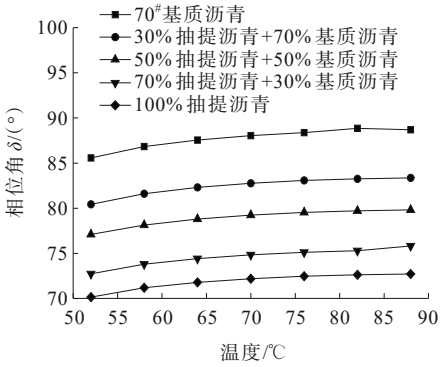
表4　不同掺量的新旧融合沥青三大指标值

Table 4　Three main indicators of old and new asphalt with different content

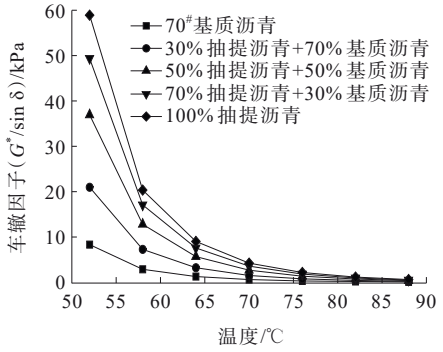
抽提旧沥青掺量/%	25 ℃针入度/(0.1 mm)	15 ℃延度/cm	软化点/℃
0	71	105	50
30	63	96	54
50	49	88	58
70	37	74	67
100	22	61	72
规范要求	≥20	实测	实测



(a) 复数剪切模量G^*随温度的变化



(b) 相位角δ随温度的变化



(c) 车辙因子$G^*/\sin\delta$随温度的变化

图2　流变性能试验结果

Figure 2　Rheological property test results

由图2可知：随着试验温度升高，沥青复数模量G^*和车辙因子$G^*/\sin\delta$都呈降低趋势，且抽提沥青含量越高，复数剪切模量G^*和车辙因子$G^*/\sin\delta$下降的速率越快，说明回收旧沥青的抗车辙能力对温度较为敏感。相同温度条件下，抽提沥青比例越高，复数剪切模量G^*和车辙因子$G^*/\sin\delta$越大，相位角δ越小：相比70#基质沥青，添加30%、50%、70%的旧沥青，复数剪切模量G^*平均增加了150%、334.9%、470%，车辙因子$G^*/\sin\delta$平均增加了152%、343%、491.2%，相位角δ平均减小了6%、10.2%、15.3%。而100%回收旧沥青的复数剪切模量G^*平均增加了570.1%、车辙因子$G^*/\sin\delta$平均增加了604.4%、相位角δ平均减小了18%。这表明添加回收旧沥青能够增加沥青的模量、弹性和抗变形能力。

1.1.2 级配评价

对RAP中旧矿料进行筛分，并与AC-13规范级配进行对比，结果如图3所示。RAP集料的级配曲线趋势平滑连续。AC-16的RAP级配曲线大部分处于AC-13级配上限曲线之上，说明RAP中的细料显著增加。这是因为沥青路面在长期承受车辆交通轴载作用，以及在铣刨过程中产生了集料的破碎。

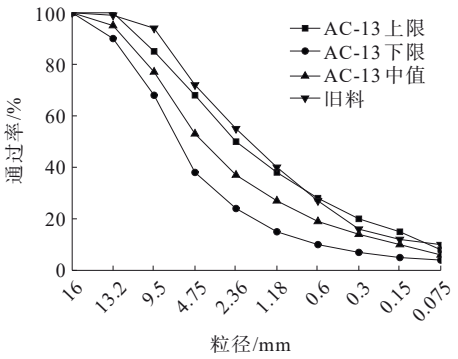


图3 RAP级配筛分

Figure 3 RAP screening gradation

1.2 沥青混合料配合比设计

高模量沥青混合料一般应用于沥青路面中下面层，选用《公路沥青路面施工技术规范》(JTG/F 40—2004)中的AC-20型沥青混合料级配，该级配也处于法国高模量EME20级配范围要求。分别选用0%、30%、50%和70%掺量的RAP进行配合比设计。按照规范的级配范围调整RAP和新集料的掺配比例，得到不同RAP掺量的合成级配。不同RAP掺量的再生混合料的矿料级配曲线如图4所示，4种RAP掺量的合成级配都接近AC-20级配中值。

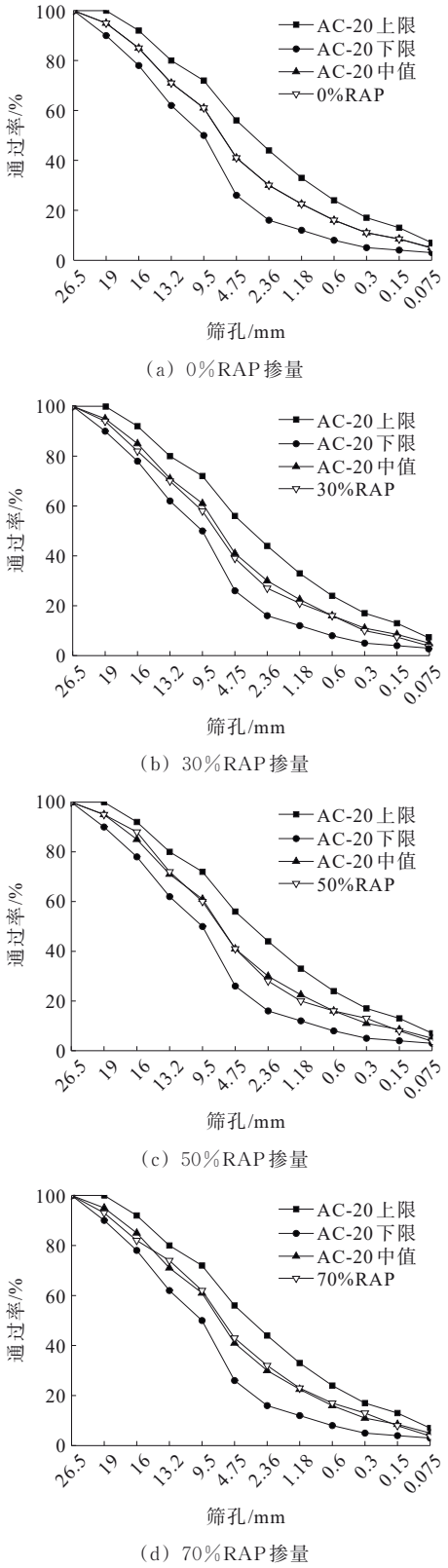


图4 矿料级配设计曲线图

Figure 4 Gradation design curves for mineral aggregates

不同RAP掺量的最佳油石比和其他马歇尔指标汇总后如表5所示。随着RAP掺量的增大，沥青饱和度和流值增大、空隙率逐渐变小。

表5　最佳油石比以及马歇尔试验结果

Table 5　Optimal bitumen aggregate ratio and Marshall test results

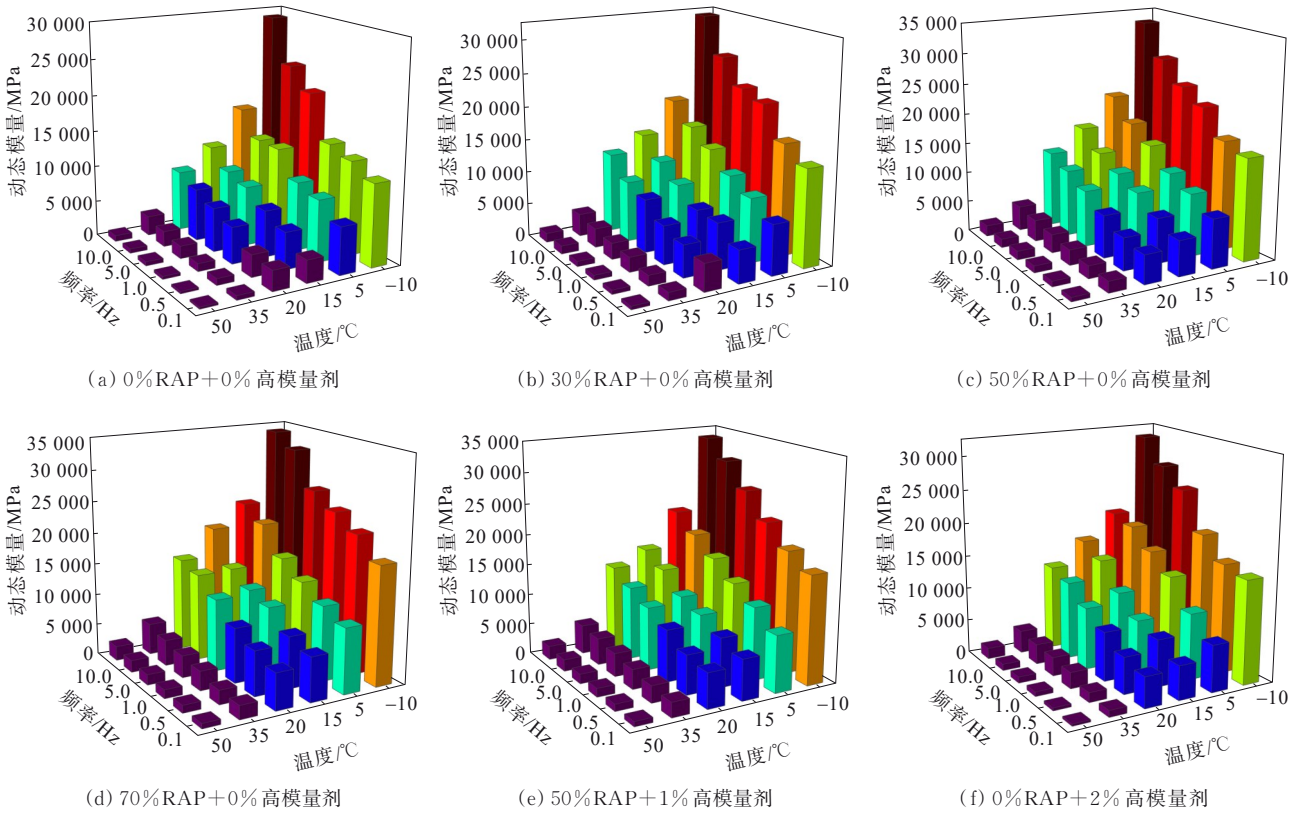
RAP掺量/%	最佳油石比/%	毛体积相对密度	最大理论相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
0	4.5	2.54	2.64	3.9	11.2	72	8.9	26
30	4.2	2.49	2.53	4.1	9.5	71	11.2	28
50	4.0	2.47	2.55	3.3	9.9	69	12.5	32
70	3.73	2.43	2.56	4.0	11.7	65	13.3	28

2　动态模量研究

制备Φ100 mm×150 mm的沥青混合料试件，采用单轴压缩法对0%、30%、50%、70%RAP掺量的沥青混合料动态模量进行测试，开展掺加RAP沥青混合料动态模量试验研究[30]。在加载频率分别为0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz、25 Hz，温度分别为−10 ℃、5 ℃、15 ℃、20 ℃、35 ℃、50 ℃的条件下对试件进行加载，绘制相同RAP掺量条件下不同加载频率和温度的动态模量柱状图。为了对比分析，同步进行50%RAP+1%高模量剂和0%RAP+2%高模量剂沥青混合料在相同条件下的对比测试，结果如图5所示。

由图5可知：在相同的加载频率下，沥青混合料的动态模量均随温度升高而逐步变小。相比普通沥青混合料(10 Hz)，在低温区域(−10～5 ℃)，30%RAP动态模量平均值增大了20.5%、50%RAP增大了28.5%、70%RAP增大了49.9%；在中温区域(15～20 ℃)时，30%RAP动态模量平均值增大了26.6%、50%RAP增大了38.4%、70%RAP增大了73.0%；在高温区域(35～50 ℃)时，30%RAP动态模量平均值增大了70.5%、50%RAP增大了85.7%、70%RAP增大了155.2%。综上所述，RAP能显著提高沥青混合料的动态模量，原因是RAP中的旧沥青黏性大、胶结能力强，增大了再生沥青混合料的模量。

当温度15 ℃、频率10 Hz时，70%RAP掺量再生



(a) 0%RAP+0%高模量剂　(b) 30%RAP+0%高模量剂　(c) 50%RAP+0%高模量剂

(d) 70%RAP+0%高模量剂　(e) 50%RAP+1%高模量剂　(f) 0%RAP+2%高模量剂

图5　不同RAP掺量及高模量剂掺量下动态模量的变化

Figure 5　Dynamic modulus variations under different RAP and high-modulus agent content

沥青混合料的动态模量达到了14 013 MPa；50% RAP+1%高模量剂的沥青混合料动态模量达到14 105 MPa，均满足法国沥青混合料材料规范（NF P98-819-1—2017）中对高模量混合料的要求（10 Hz、15 ℃，$|E^*|$>14 000 MPa）。0% RAP+2%高模量剂沥青混合料在相同条件下的动态模量为14 301 MPa。可见，添加70% RAP、2%高模量剂、50% RAP+1%高模量剂对沥青混合料动态模量的提升相当。

3 路用性能研究

3.1 高温稳定性

制备尺寸为300 mm×300 mm×50 mm的车辙板进行试验，试验温度为60 ℃，取3次平行试验的平均值作为试验结果，如表6所示。

表6 车辙试验结果

Table 6 Rutting test results

RAP掺量+高模量剂掺量	动稳定度/（次·mm^{-1}）	规范要求/（次·mm^{-1}）
0%+0%	2 861	>4 000
30%+0%	4 051	
50%+0%	4 735	
70%+0%	5 142	
0%+2%	5 384	
50%+1%	5 208	

由表6可知：普通沥青混合料的动稳定度较低，掺加了RAP的混合料动稳定度均达到4 000次/mm以上，满足《高模量沥青混合料施工技术规范》（DB23/T 2600—2020）的要求，高温性能良好，说明RAP能够大幅度提升高模量沥青混合料的高温抗车辙变形能力。相比普通沥青混合料，30%RAP掺量的再生沥青混合料动稳定度增加了41.5%、50%RAP增加了65.5%、70%RAP增加了79.7%。添加70%RAP的沥青混合料动稳定度达到5 142次，与添加2%高模量剂（5 384次）、50%RAP+1%高模量剂的效果（5 208次）相当。这是由于RAP中的旧沥青硬度和黏度变大，针入度和延度降低，软化点提高，从而提高了抗车辙变形能力。随着RAP掺量越高，动稳定度的增长速率逐渐变小。

采用旋转压实法成型Φ150 mm×100 mm的沥青混合料试件，在（60±0.5）℃的环境箱中保温5～6 h后进行单轴贯入试验，进一步评价其高温性能，加载速率为1 mm/min。结果如表7所示。

表7 单轴贯入试验结果

Table 7 Uniaxial penetration test results

RAP掺量+高模量剂掺量	抗剪强度/MPa	RAP掺量+高模量剂掺量	抗剪强度/MPa
0%+0%	0.532	70%+0%	1.133
30%+0%	0.817	0%+2%	1.281
50%+0%	1.034	50%+1%	1.209

由表7可知：随着RAP掺量的增加，再生沥青混合料的抗剪强度不断增大。相比普通沥青混合料，30%RAP掺量的再生沥青混合料的抗剪强度增加了53.5%、50%RAP增加了94.4%、70%RAP增加了113.0%。主要原因是RAP中的旧沥青提高了沥青混合料的黏聚力，从而提高抗剪强度。类似地，添加70%RAP的沥青混合料抗剪强度相比基质沥青提高了1倍，与添加2%高模量剂、50%RAP+1%高模量剂的效果相当。

3.2 水稳定性

将标准马歇尔试件分成两组，在60 ℃恒温水箱中保温0.5 h和48 h，然后分别测试其稳定度，每组做4次平行试验。试验结果如表8所示。

表8 浸水马歇尔试验结果

Table 8 Immersion Marshall test results

RAP掺量+高模量剂掺量	浸水0.5 h后的稳定度/kN	浸水48 h后的稳定度/kN	残留稳定度比/%	高模量沥青混合料规范要求/%
0%+0%	11.25	9.98	88.7	≥80
30%+0%	12.56	10.81	86.1	
50%+0%	13.84	11.72	84.7	
70%+0%	14.47	12.01	83.0	
0%+2%	15.80	13.62	86.2	
50%+1%	15.38	13.31	86.5	

由表8可知：不同RAP掺量再生沥青混合料的残留稳定度比都超过80%，说明利用高掺量RAP来制备高模量沥青混合料能够满足水稳定性要求。稳定度随着RAP掺量的增加而增大，相比普通沥青混合料在浸水0.5 h的稳定度，30%RAP增大了11.6%、50%RAP增大了23.0%、70%RAP增大了28.6%；相比普通沥青混合料在浸水48 h的稳定度，30%RAP增大了8%、50%RAP增大了17.4%、70%RAP增大了20.3%。但同时随着RAP掺量的增加，残留稳定

度也在逐渐下降，说明RAP掺入对再生沥青混合料的水稳定性具有一定的负面影响，但下降幅度较小。

3.3　低温抗裂性

制备尺寸为250 mm×30 mm×35 mm的小梁试件，在恒温水箱中保温45 min后在－10 ℃条件下进行弯曲试验，加载速率为50 mm/min。每组再生沥青混合料做3次平行试验，沥青混合料各性能指标如表9所示。

表9　低温小梁弯曲试验结果

Table 9　Low-temperature beam bending test results

RAP掺量＋高模量剂掺量	弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/10^{-6}	弯曲劲度模量/MPa	最大弯拉应变规范要求/10^{-6}
0%＋0%	4.95	3 154	1 565	≥2 000
30%＋0%	6.79	2 196	3 002	
50%＋0%	8.92	2 152	5 298	
70%＋0%	10.70	1 935	5 534	
50%＋1%	8.06	1 823	5 760	
0%＋2%	8.97	1 617	6 113	

由表9可知：随着RAP掺量的增加，再生沥青混合料的弯拉强度和弯曲劲度模量都在不断增大，弯拉应变不断减小，70%RAP掺量的再生沥青混合料最大弯拉应变为1 935×10^{-6}，低于《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求，属临界达标失效状态(尤其严寒地区)。相比普通沥青混合料，30%RAP掺量的再生沥青混合料最大弯拉应变降低了30.4%、50%RAP降低了31.8%、70%RAP降低了38.6%，说明由于RAP具有脆硬特性，对再生沥青混合料的低温性能有一定负面影响，在低温环境下更容易产生开裂，应限制其在严寒地区应用。

3.4　疲劳性能

疲劳试验前首先进行劈裂强度试验，采用标准马歇尔试件，试验温度为15 ℃，试验的加载速率为50 mm/min，试验平行试件个数为4个，结果见表10。

由表10可知：随着RAP掺量的不断增加，再生高模量沥青混合料的劈裂强度不断增大，相比普通沥青混合料，30%RAP掺量的再生沥青混合料劈裂强度增长了35.9%、50%RAP增长了68.2%、70%RAP增长了87.8%。同时，随着RAP的掺量增加，劈裂强度增长速率逐渐变慢，RAP掺量从0%到30%时劈裂强度增加了36%，从30%到50%增加了24%，50%到70%增加了11.6%。这是因为RAP老化后变硬，沥青混合料也整体变硬，RAP掺量越多强度就越大；但是当RAP掺量过高，旧沥青与集料黏附性较低的不足就会凸显，强度的增长速率变慢。

表10　间接拉伸强度试验结果

Table 10　Indirect tensile strength test results

RAP掺量＋高模量剂掺量	破坏荷载/kN	劈裂强度/MPa	劈裂强度平均值/MPa
0%＋0%	14.69	1.568	1.603
	15.21	1.632	
	14.94	1.608	
30%＋0%	19.74	2.101	2.178
	20.56	2.195	
	20.79	2.237	
50%＋0%	24.32	2.725	2.697
	24.17	2.700	
	24.96	2.665	
70%＋0%	28.45	3.028	3.010
	28.21	3.012	
	28.01	2.991	
50%＋1%	27.43	2.731	2.680
	27.14	2.623	
	27.82	2.687	
0%＋2%	26.85	2.668	2.603
	26.34	2.618	
	25.37	2.522	

在间接拉伸强度基础上开展间接拉伸疲劳试验，试验采用正弦波加载方式，应力比选择0.3、0.4和0.5，荷载频率为10 Hz，试验温度为15 ℃，各RAP掺量的沥青混合料的疲劳寿命随应力比的变化见图6。

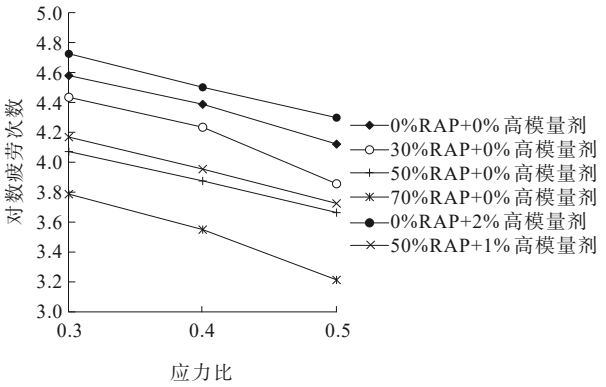


图6　沥青混合料对数疲劳寿命随应力比的变化

Figure 6　Variation of logarithm of fatigue life with stress ratios

由图6可知：当应力比相同时，随着RAP掺量的增加，沥青混合料的疲劳寿命越低。以应力比0.3为

例，RAP掺量为30%、50%、70%时，再生沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命对比普通沥青混合料分别减少了28.4%、68.9%、83.9%，高RAP掺量（≥50%）导致疲劳寿命显著下降，说明RAP的加入对沥青混合料的疲劳性能产生了不利影响。高模量剂的加入则显著提升了混合料的疲劳寿命，掺50%RAP混合料加入1%高模量剂后，疲劳寿命提高了25%；基质沥青加入2%高模量剂，疲劳寿命约提高了40%。RAP中旧沥青老化导致轻质组分流失，沥青质含量升高[表2中回收旧沥青针入度仅为20(0.1 mm)左右]，使胶结料脆性增强、黏弹性失衡。根据图2(b)，相位角δ随旧沥青掺量增加而显著降低，表明弹性响应主导，削弱了耗散荷载能量的能力。同时图2(a)中高复数模量虽提升刚度，但降低了疲劳裂缝的自愈能力，旧沥青的掺入导致玻璃化转变温度上升，使混合料呈现低温脆裂特征，低温收缩应力与疲劳荷载叠加，加速裂缝贯通(图6中高应力比下曲线陡降)。最后，RAP集料破碎导致细集料比例升高，削弱了矿料骨架嵌挤作用，局部应力集中现象加重。

综上分析，掺加RAP能显著提高沥青混合料的动态模量，抗变形能力、抗剪强度和间接拉伸强度，也提高了抗水损害能力，但是对低温抗裂及疲劳性能有一些不利影响。沥青路面结构中，刚性基层和半刚性基层上沥青面层以受压剪为主，主要产生剪切作用下的车辙变形和Top-down开裂[31]；而在柔性基层上沥青面层中，中面层主要抵抗车辙变形，下面层则以抗弯拉为主。结合大RAP掺量沥青混合料的力学性能，可在刚性或半刚性基层上的沥青路面中下面层，以及柔性基层的沥青路面中面层使用高RAP掺量沥青混合料，以提高抗车辙、抗剪切和抗水损害能力。

4 结论

针对当前旧沥青混合料RAP利用比例低的问题，通过提高RAP掺量制备了高模量沥青混合料，开展了高RAP掺量再生沥青混合料动态模量、路用性能和疲劳性能试验研究，主要结论如下：

(1) 回收旧沥青的掺入显著提升了沥青材料的高温性能。随旧沥青掺量增加，复数剪切模量G^*和车辙因子$G^*/\sin\delta$显著提升，相位角δ减小，表明结合料弹性成分增加，抗变形能力增强。AC-16铣刨料(RAP)因荷载与铣刨作用发生破碎，细集料比例增高，其级配曲线主要分布于AC-13级配范围上限附近。

(2) 沥青混合料的动态模量随着RAP掺量的增加而显著提升，70%RAP掺量、2%高模量剂改性、50%RAP+低剂量高模量剂(1%掺量)的沥青混合料动态模量相当，均满足高模量混合料技术要求(10 Hz、15 ℃，$|E^*|$>14 000 MPa)；RAP对动态模量的增强效应随温度升高与频率降低而减弱。

(3) 高RAP掺量显著改善了混合料的高温稳定性和抗剪强度。70%RAP掺量的再生沥青混合料的动稳定度和抗剪强度分别增加了79.7%和112%，效果与添加2%高模量剂的沥青混合料相当。同时，所有掺RAP混合料的浸水残留稳定度均大于80%，满足水稳定性要求。

(4) 沥青混合料的低温弯拉应变随RAP掺量增加而显著降低(70%RAP时较普通混合料降低38.6%)，且其疲劳寿命显著下降(应力比0.3时，70%RAP掺量下疲劳寿命下降83.9%)。这主要归因于RAP中老化沥青的脆性增加以及新旧沥青界面融合不充分，导致材料柔韧性下降，微裂缝更易扩展。

(5) 验证了利用70%RAP替代全部高模量剂，或利用50%RAP+低剂量高模量剂制备高模量沥青混合料的技术可行性，在显著降低材料成本的同时，获得了优异的高温性能和抗水损害能力。基于其“抗剪切能力显著提升、抗裂和疲劳损伤存在不足”的力学特性，高RAP掺量高模量混合料适用于以承受压剪应力为主的路面结构层，如南方地区刚性或半刚性基层之上的沥青中下面层，可充分发挥其高模量、高强度优势，并规避其低温抗裂性能不足的缺陷。

(6) 本研究采用的疲劳试验方法为间接拉伸疲劳试验(ITFT)，未来可采用四点弯曲疲劳试验(4PBB)等方法进一步验证其不同荷载模式下的疲劳特性。并结合微观结构观测(如SEM)、界面能测试等技术，从细微观尺度深入揭示其性能衰变机制。

参考文献：

References：

[1] 交通运输部.2023年交通运输行业发展统计公报[N].中国交通报,2024-06-18(002).
Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2023 statistical bulletin on the development of the

transportation industry[N]. China Transportation News, 2024-06-18(002).

[2] 孙良钰,王盟,张喜伦,等.高RAP掺量沥青混合料疲劳预估模型研究[J].中外公路,2022,42(3):195-201.
SUN Liangyu,WANG Meng,ZHANG Xilun,et al.Study on fatigue prediction model of asphalt mixture with high RAP content[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(3):195-201.

[3] ZAUMANIS M, ARRAIGADA M, POULIKAKOS L D. 100% recycled high-modulus asphalt concrete mixture design and validation using vehicle simulator[J]. Construction and Building Materials,2020,260:119891.

[4] 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.

[5] 王争愿,李九苏,娄梦雷,等.RAP掺量对反应型冷拌再生沥青混合料性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):35-41.
WANG Zhengyuan,LI Jiusu,LOU Menglei,et al.Effect of RAP contents on performance of reactive cold mix recycled asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019,16(4):35-41.

[6] 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.

[7] 左锋,叶奋,宋卿卿.RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.
ZUO Feng, YE Fen, SONG Qingqing. Influence of RAP content on road performance of recycled asphalt mixture [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2020,50(4):1403-1410.

[8] 张琛,张翔.低温地区橡胶热再生沥青混合料的参数优化及其工作性[J].公路工程,2020,45(1):67-73.
ZHANG Chen,ZHANG Xiang.Parameter optimization of rubber hot recycled asphalt mixture and the workability study in low temperature regions[J].Highway Engineering, 2020,45(1):67-73.

[9] 李浩,熊鑫,李俊.不同RAP掺量SMA再生沥青混合料性能试验分析[J].中外公路,2022,42(2):242-246.
LI Hao, XIONG Xin, LI Jun. Experimental study on pavement performance for SMA recyling asphalt mixture with different RAP content[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):242-246.

[10] 王杰,秦永春,黄颂昌,等.沥青混合料回收料变异性[J].北京工业大学学报,2018,44(2):244-250.
WANG Jie, QIN Yongchun, HUANG Songchang, et al. Variability of reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Beijing University of Technology,2018,44(2):244-250.

[11] ZHANG J Z,ZHANG X M,LIANG M,et al.Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage[J]. Construction and Building Materials,2020,238:117778.

[12] 李雪连,许杰,朱硕,等.高RAP掺量温拌再生沥青混合料制备工艺[J/OL].交通科学与工程,1-11[2023-06-28]. https://link. cnki. net/doi/10.16544/j. cnki. cn43-1494/U. 20230628003.
LI Xuelian,XU Jie,ZHU Shuo,et al.Preparation process of warm mix asphalt mixtures with high contents of reclaimed asphalt pavement[J/OL]. Journal of Transport Science and Engineering, 1-11[2023-06-28]. https://link. cnki.net/doi/10.16544/j.cnki.cn43-1494/U.20230628003.

[13] 王朝辉,舒诚,韩冰,等.高模量沥青混凝土研究进展[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):1-15.
WANG Chaohui, SHU Cheng, HAN Bing, et al. Research progress of high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40 (1):1-15.

[14] 周庆华,沙爱民,杨琴.高模量沥青混凝土力学性能试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2008,29(1):128-131.
ZHOU Qinghua, SHA Aimin, YANG Qin. Experimental study for mechanical property of high modulus asphalt concrete[J].Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2008,29(1):128-131.

[15] XU X Q, LU G L, YANG J, et al. Mechanism and rheological properties of high-modulus asphalt[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1):8795429.

[16] ZHANG H W, YANG X W, LI Y, et al. Laboratory evaluation of dynamic characteristics of a new high-modulus asphalt mixture[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 11838.

[17] 郭寅川,张争明,邵东野,等.高模量天然沥青混合料设计及路用性能对比研究[J].硅酸盐通报,2021,40(8):2811-2821.
GUO Yinchuan,ZHANG Zhengming,SHAO Dongye,et al. Design and road performance of high modulus natural asphalt mixture[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(8):2811-2821.

[18] 卢桂林,许新权,唐志赟,等.高模量改性剂的作用机理及应用研究[J].建筑材料学报,2021,24(2):355-361.
LU Guilin, XU Xinquan, TANG Zhiyun, et al. Mechanism and application of high modulus agent[J]. Journal of Building Materials,2021,24(2):355-361.

[19] 夏全平,高江平,罗浩原,等.用于高模量沥青砼的复合改性硬质沥青低温性能[J].吉林大学学报(工学版),2022,52 (3):541-549.
XIA Quanping,GAO Jiangping,LUO Haoyuan,et al.Low-temperature performance of composite modified hard asphalt used in high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022,52(3):541-549.

[20] 李九苏,保安青,姜舜君.超高模量沥青混凝土的制备与

路用性能研究[J].交通科学与工程,2023,39(2):8-15.
LI Jiusu, BAO Anqing, JIANG Shunjun. Study on preparation and pavement performance of ultra-high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2023,39(2):8-15.

[21] 杨琳.基于低标号沥青与岩沥青掺配技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J].公路工程,2016,41(4):297-301.
YANG Lin. Study on endurable of high modulus asphalt mixture based on low-grade asphalt and rock asphalt blending technology[J]. Highway Engineering,2016,41(4):297-301.

[22] 张晨晨,潘春梅,孙艺涵,等.胶粉/SBS复合改性高模量沥青混合料性能研究[J].中国建材科技,2022,31(6):65-68,33.
ZHANG Chenchen, PAN Chunmei, SUN Yihan, et al. Research on properties of high modulus crumb rubber/SBS composite modified asphalt mixture[J]. China Building Materials Science & Technology,2022,31(6):65-68,33.

[23] 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.

[24] ZHANG J Z,GUO C C,CHEN T T,et al.Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators[J]. Construction and Building Materials,2021,269:121337.

[25] SAPKOTA K, YAGHOUBI E, WASANTHA P L P, et al. Mechanical characteristics and durability of HMA made of recycled aggregates[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5594.

[26] ZHU J Q,MA T,FAN J W,et al.Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121447.

[27] 费维水,张直云,吴志强,等.再生高模量沥青混合料劲度模量的影响因素研究[J].公路交通科技,2016,33(4):20-24.
FEI Weishui,ZHANG Zhiyun,WU Zhiqiang,et al.Study of factors affecting stiffness modulus of regenerated high modulus asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 20-24.

[28] 陈健侠,祝谭雍,李伟,等.高模量再生沥青混合料性能研究[J].城市道桥与防洪,2016(3):169-173,176,17.
CHEN Jianxia, ZHU Tanyong, LI Wei, et al. Study on performance of high modulus recycle asphalt mixture[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2016(3):169-173,176,17.

[29] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for highway asphalt pavement recycling: JTG/T 5521—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2019.

[30] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing:China Communications Press,2011.

[31] HUANG Y, LIU Z H, LIU J Y, et al. Laboratory study on mechanical properties of composite pavement under partial compression-shear load[J]. Construction and Building Materials,2022,356:129240.