DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.05.016
文章编号:1671-2579(2025)05-0150-08

RAP掺量对微表处混合料性能影响分析

张大斌[1],黄健洪[2],岳爱军[3*],林奕安[3]
(1.广西桂通工程管理集团有限公司,广西 南宁 530000;2.广西交科工程建设有限公司,广西 南宁 530000;
3.桂林理工大学 土木工程学院,广西 桂林 541004)

摘要:为评价不同掺量沥青回收料(RAP)对微表处混合料的组成设计与性能影响,该文采用拌和试验和扭剪试验评价其施工和易性,通过负荷轮试验、车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂抗拉试验、SCB试验、抗疲劳耐久试验及黏聚力试验检验其力学性能及路用性能。研究表明:在最佳油石比下,随着RAP掺量增加,再生微表处混合料最佳乳化沥青含量减小,施工和易性下降,相应高温抗车辙变形性能、抗水损害性能及抗疲劳耐久性能均减弱,低温抗裂性能先增加后降低;当RAP掺量为50%时,再生微表处混合料的抗水损害性能不满足规范要求;当RAP掺量为40%时,再生微表处混合料的低温抗裂性能最佳;延长养护时间至80 min,掺入40%RAP微表处混合料力学性能满足开放交通的要求。综上所述,掺入40%RAP微表处混合料综合性能优良,可用于工程推广应用。

关键词:沥青混合料回收料;微表处混合料;施工和易性;路用性能;力学性能
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Influence of RAP Content on Performance of Micro-Surfacing Mixture

ZHANG Dabin[1], HUANG Jianhong[2], YUE Aijun[3*], LIN Yian[3]
(1. Guangxi Guitong Engineering Management Group Co. Ltd., Nanning, Gunagxi 530000, China; 2. Guangxi Jiaoke Engineering Construction Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China; 3. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: To evaluate the influence of different recycled asphalt pavement (RAP) content on the mix design and performance of micro-surfacing mixtures, mixing tests and torque shear tests were conducted to assess their workability. The mechanical and road performance were evaluated using load wheel tests, rutting tests, water immersion Marshall tests, freeze-thaw splitting tensile tests, SCB tests, fatigue durability tests, and cohesion tests. The study shows that, at the optimal asphalt-to-aggregate ratio, increasing RAP content leads to a decrease in the optimal emulsified asphalt content of the recycled micro-surfacing mixture and a reduction in workability. Correspondingly, the high-temperature rutting resistance, moisture damage resistance, and fatigue durability all weaken, while the low-temperature cracking resistance first increases and then decreases. When the RAP content is 50%, the moisture damage resistance of the recycled micro-surfacing mixture does not meet specification requirements. When the RAP content is 40%, the low-temperature cracking resistance of the recycled micro-surfacing mixture is optimal. When the curing time is extended to 80 minutes, the mechanical properties of the micro-surfacing mixture with 40% RAP content meet the requirements for opening to traffic. In summary, the micro-surfacing mixture with 40% RAP content exhibits excellent comprehensive performance and is suitable for engineering application.

Keywords: recycled asphalt pavement; micro-surfacing mixture; workability; road performance; mechanical properties

收稿日期:2025-06-28 **修回日期:**2025-08-21
基金项目:交通运输部2022年度交通运输行业重点科技项目(编号:2022-MS5-127);广西科技计划项目(桂科AF19110085)
作者简介:张大斌,男,硕士,高级工程师. E-mail:604166773@qq.com
***通信作者:**岳爱军,男,博士,教授级高工. E-mail:794755308@qq.com

0　引言

当前，广西公路发展已从大规模新建、改建阶段全面转入养护运营阶段，每年国省干线沥青路面大中修工程产生大量沥青混合料回收料（RAP）[1-2]。由于项目区域矿料资源分布不均，优质石料供应紧张，若不能实现RAP的高效再生利用，不仅将造成宝贵的筑路材料浪费，还将面临严峻的生态环境压力。在此背景下，如何科学处置并循环利用养护工程产生的废弃沥青混合料，已成为当前道路建设者迫切需要攻克的技术难题[3-4]。

道路建设领域对沥青混合料回收料（RAP）的再生利用已开展了广泛研究，但现有成果主要集中在热拌和温拌再生技术领域。冼凌晨[5]发现沥青混合料回收料RAP路面再生冷补料具备较好的路用性能；汪德才等[6]研究了不同种类乳化沥青RAP再生微表处混合料的和易性能，结果表明：其施工和易性随着沥青混合料回收料RAP掺量的增大而减弱；王万展等[7]发现掺入40%～50%RAP温拌再生沥青混合料综合路用性能最佳；任瑞波等[8]在研究高掺量RAP温再生沥青混合料的使用性能指出，掺入80%RAP混合料路用性能已难以满足规范要求；孙良钰等[9]发现，随着回收料RAP掺量的增加，再生热拌沥青混合料疲劳寿命急剧降低，且RAP掺量与疲劳寿命呈对数负相关关系。

然而，关于RAP在微表处混合料中的资源化利用研究仍较少，这制约了RAP的高效回收利用。现有少量研究表明，RAP微表处技术面临诸多挑战。Poursoltani等[10]发现采用100% RAP微表处时，乳化沥青用量需降低1.0%，且混合料耐久性不足；Wang等[11]指出掺入RAP会降低微表处混合料的最佳乳化沥青含量，导致乳化沥青过少，可能使混合料干涩，影响摊铺均匀性；江小强等[12]则发现当RAP掺量为30%时，微表处混合料黏聚力可能不达标；高立波等[13]通过RAP精细分离和大比例回收技术，可实现70%RAP掺量的SMA热再生和27%RAP掺量微表处在高速公路中的应用，证明该技术的可行性。因此，深入研究沥青混合料回收料RAP对微表处混合料的配合比设计、组成设计和路用性能评价，对于完善RAP综合利用技术体系、促进公路养护行业绿色发展具有重要的理论和实践价值。

本文采用湿轮磨耗试验和负荷轮试验，研究不同RAP掺量与最佳乳化沥青用量的变化规律，通过拌和试验和扭矩试验检验RAP微表处混合料和易性能。在此基础上，通过黏聚力试验、负荷轮试验、车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、SCB试验及抗疲劳耐久性能试验，研究不同RAP掺量再生微表处混合料的力学性能和路用性能，为多元化综合利用RAP及再生微表处混合料的工程应用提供借鉴。

1　材料与试验

1.1　SBS改性乳化沥青

此次微表处混合料采用的改性乳化沥青是由乳化剂、基质沥青、SBS改性剂、盐酸及水等原材料经胶体磨剪切生产制备而成，其技术指标如表1所示。

表1　SBS改性乳化沥青技术指标

Table 1 Technical specifications of SBS modified emulsified asphalt

项目		单位	技术要求	实测值
筛上剩余量（1.18 mm筛）		%	≤0.1	0.03
粒子电荷			阳离子（+）	阳离子（+）
恩格拉黏度（E_{25}）			3～30	4.7
蒸发残留物	残留物含量	%	≥60	65
	溶解度	%	≥97.5	105.5
	针入度（25 ℃，5 s，100 g）	0.1 mm	40～100	60
	延度（5 ℃，5 cm/min）	cm	≥20	34.8
	软化点	℃	≥57	60.3
常温储存稳定性	1 d	℃	≤1	0.6
	5 d	℃	≤5	3.1

1.2　RAP

试验所用RAP来自桂林某国省干线大中修工程沥青面层辉绿岩旧料。RAP基本性能指标如表2所示，RAP抽提前后筛分结果如表3所示。

1.3　新集料

新粗、细集料分别选用桂林某碎石场生产的3～5 mm、5～10 mm辉绿岩碎石、0～3 mm石灰岩碎石，集料基本技术指标如表4、5所示。

1.4　填料

本文再生微表处混合料填料采用华润牌P·C 42.5水泥，其基本指标如表6所示。

表2 RAP基本性能指标

Table 2 Basic performance indicators of RAP

材料	检测项目	单位	实测值	技术要求
RAP中的沥青	针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	48.6	40～100
	延度(15 ℃,5 cm/min)	cm	56.5	≥20
	软化点	℃	54.6	≥53
RAP中的粗集料	洛杉矶磨耗值	%	17.5	≤28
	针片状颗粒含量	%	7.5	≤12
	压碎值	%	14.4	≤26
	石料磨光值	BPN	46	≥42

表3 RAP抽提前后筛分结果

Table 3 Sieve analysis results of RAP before and after extraction

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0～5 mmRAP	100	98.7	86.2	62.4	30.2	14.2	5.3	1.3
0～5 mmRAP抽提后	100	99.3	88.9	73.1	48.6	26.8	7.8	5.5

表4 粗集料基本技术指标

Table 4 Basic technical specifications of coarse aggregate

项目	单位	新集料	技术要求
吸水率	%	0.94	≤2.0
压碎值	%	11.5	≤26
洛杉矶磨耗值	%	9.5	≤28
针片状颗粒含量	%	8.7	≤15
<0.075 mm颗粒含量	%	0.6	≤1
与沥青黏附性等级		5	≥4

表5 细集料基本技术指标

Table 5 Basic technical specifications of fine aggregates

项目	单位	新集料	技术要求
表观相对密度		2.729	≥2.6
砂当量	%	84	≥65
亚甲蓝值	g/kg	0.96	≤25
棱角性(流动时间)	s	35	≥30

1.5 试验方法

为评价不同掺量RAP对微表处混合料的组成设计与性能影响,采用拌和试验和扭剪试验评价其施工和易性,选用负荷轮试验、车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂抗拉试验、SCB试验、抗疲劳耐久试验及黏聚力试验检验其力学性能及路用性能,其中混合料的施工和易性、力学性能及路用性能的相关技术要求参照《公路沥青路面养护技术规范》(JTG 5142—2019)[14]、《微表处和稀浆封层技术指南》[15]、《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)[16]的规定。

表6 水泥基本技术指标

Table 6 Basic technical specifications of cement

项目	单位	水泥	技术要求
表观密度	g/cm^3	3.080	≥2.5
初凝时间	min	305	>180
终凝时间	min	420	>360且<600
安定性(标准法)		0.5	<5
细度(45 μm筛余)		8.7	≥5
外观		无团粒结块	无团粒结块

2 再生微表处沥青混合料配合比设计

2.1 配合比设计

本试验根据《公路沥青路面养护技术规范》(JTG 5142—2019)[14]进行RAP微表处混合料配合比设计。不同RAP掺量的微表处混合料配合比如表7所示,由于RAP旧料筛分和掺量问题,级配曲线不能完全重合,为使本次试验具有更好的可对比性,调整不同掺量RAP微表处混合料级配曲线均接近粗级配MS-Ⅲ,级配曲线如图1所示。为简化试验组名称,将未掺入RAP微表处混合料、30%RAP微表处混合料、40%RAP微表处混合料、50%RAP微表处混合料分别命名为N-MS、30-MS、40-MS、50-MS。

表7 不同RAP掺量的微表处沥青混合料配合比

Table 7 Mix proportions of micro-surfacing asphalt mixtures with different RAP content kg/m^3

0～5 mm RAP	0～3 mm 石灰岩	3～5 mm 辉绿岩	5～10 mm 辉绿岩	水泥
30	35	40	14	1
40	25	20	14	1
50	15	20	14	1

2.2 最佳乳化沥青含量确定

《微表处和稀浆封层技术指南》要求:1 h的540 g/m^2湿轮磨耗值、450 g/m^2负荷轮黏砂量所对应的乳化沥青含量分别对应微表处混合料的最小、最大乳化沥青含量。不同掺量RAP微表处混合料的最佳乳化沥青含量试验结果如表8及图2所示。

由表8及图2可知:① 同等乳化沥青用量条件下,随着RAP掺量增加,再生微表处混合料的1 h湿轮磨耗值变小、负荷轮黏砂量变大,抗荷载变形性能

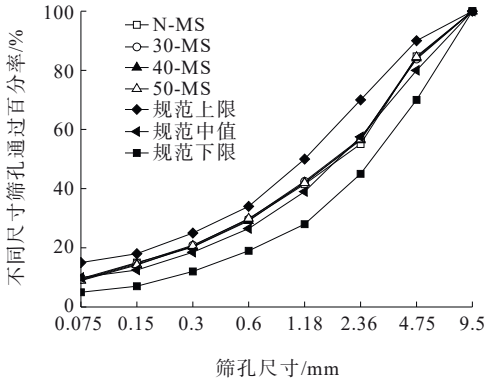


图1　不同RAP掺量微表处混合料合成级配曲线

Figure 1　Synthetic gradation curves of micro-surfacing mixtures with different RAP contents

效果变差;② 相同RAP掺量条件下,增加乳化沥青含量,RAP再生微表处混合料的1 h湿轮磨耗值降低,负荷轮黏砂量增加;③ 随着RAP掺量的增加,再生微表处混合料的最佳乳化沥青用量呈递减趋势,其中混合料N-MS、30-MS、40-MS、50-MS最佳乳化沥青用量分别为12.5%、12.0%、11.0%、10.5%,主要原因是RAP的老化沥青在拌和过程中部分会重新活化并参与胶结作用,同时RAP集料表面附着的沥青膜会影响新乳化沥青的润湿和裹覆效果,混合料最佳乳化沥青用量相应减少[16]。

表8　再生微表处混合料的最佳乳化沥青含量试验结果

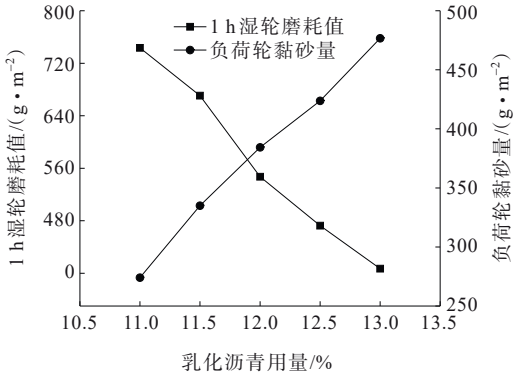
Table 8　Test results of optimal emulsified asphalt content for recycled micro-surfacing mixture

混合料类型	1 h湿轮磨耗值/($g\cdot m^{-2}$)	负荷轮黏砂量/($g\cdot m^{-2}$)	最佳乳化沥青用量/%
N-MS	547	384	12.5
30-MS	521	368	12.0
40-MS	509	351	11.0
50-MS	483	342	10.5

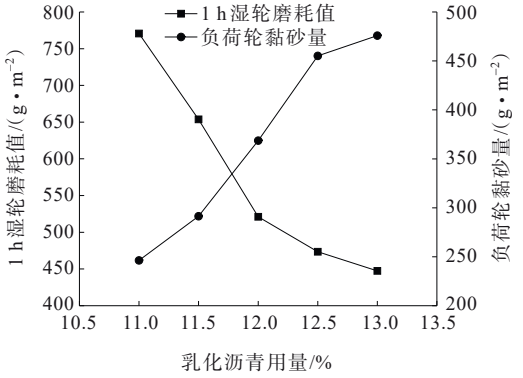
3　RAP再生微表处混合料和易性能

3.1　拌和试验

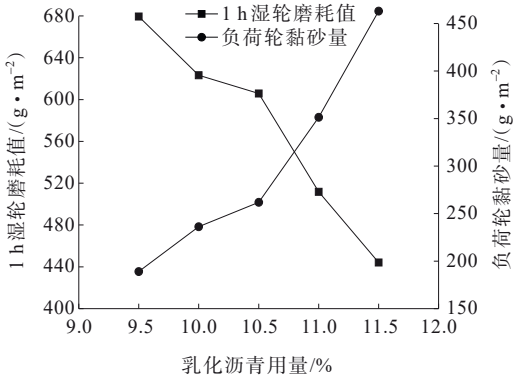
可拌和时间是微表处混合料和易性能的重要指标之一。可拌和时间过短,微表处混合料施工和易性效果差;可拌和时间过长,微表处混合料的路用性能下降[14]。按设计配比拌和RAP与新集料后,依次加入水、SBS改性乳化沥青,先强力搅拌3~8 s,再以60~70 r/min匀速搅拌。当混合料黏度显著增大、搅



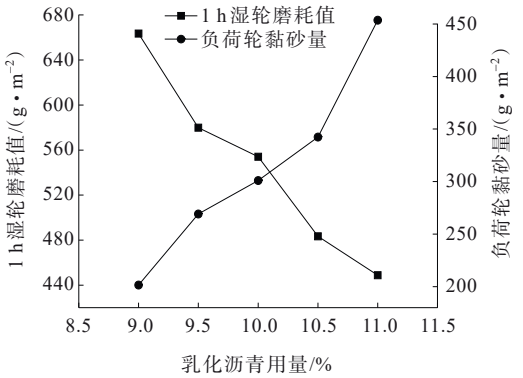
(a) 再生微表处混合料N-MS



(b) 再生微表处混合料30-MS



(c) 再生微表处混合料40-MS



(c) 再生微表处混合料50-MS

图2　不同乳化沥青用量下的1 h湿轮磨耗试验、负荷轮黏砂量的变化规律

Figure 2　Variation of 1 h wet wheel wear and load wheel sand adhesion with emulsified asphalt content

拌阻力突增时，记录破乳时间为可拌和时间，试验结果如表9所示。

表9 再生微表处混合料拌和试验结果

Table 9 Mixing test results of recycled micro-surfacing mixture

混合料类型	可拌和时间/s	相对N-MS再生微表处混合料拌和时间增加比例/%	技术要求/s
N-MS	125	—	≥120
30-MS	137	9.6	
40-MS	146	16.8	
50-MS	153	22.4	

由表9可知：随着RAP掺量的增加，再生微表处混合料的拌和时间呈现明显的增长趋势，其中N-MS拌和时间为125 s，满足规范技术要求；当RAP掺量达到30%、40%和50%时，再生微表处混合料拌和时间分别延长至137 s、146 s和153 s，相应延长幅度分别为9.6%、16.8%、22.4%，分析主要原因是沥青混合料回收料RAP与乳化沥青吸附作用较弱使得沥青破乳速度降低，导致混合料稠度下降，表现为拌和时间有所延长[17]。

3.2 扭剪试验

所受扭矩是评价RAP再生微表处混合料和易性能的重要指标。将混合料装入和易性仪料桶并整平表面后，分别设置50 s、70 s、90 s、120 s、150 s、170 s、190 s和210 s不同拌和时间梯度进行试验。使用扭矩扳手以(0.33±0.03) r/s的转速匀速逆时针旋转，实时记录不同拌和时间试验的最大扭矩值，试验结果如图3所示。

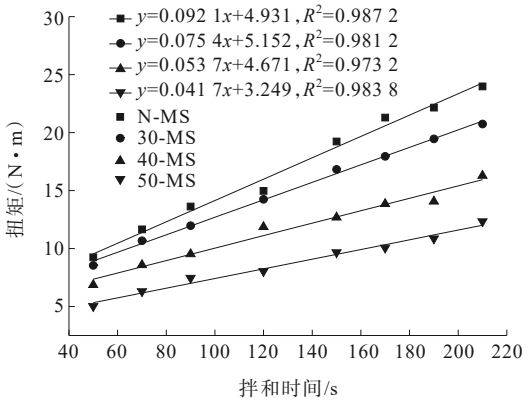


图3 再生微表处混合料扭剪试验结果

Figure 3 Twist shear test results of recycled micro-surfacing mixture

由图3可知：RAP再生微表处混合料所受扭矩与拌和时间呈 $y=ax+b$ 线性关系，即随着拌和时间的增加，RAP再生微表处混合料所受扭矩呈递增趋势，RAP再生混合料和易性逐渐增强；相同拌和时间条件下，增加RAP的掺量，再生混合料和易性逐渐下降，这与RAP表面纹理及棱角性差导致混合料集料间嵌挤摩擦不足相关；以所受扭矩来表征RAP再生微表处混合料和易性，掺入50%RAP性能最差，其次为掺入40%RAP，最后是掺入30%RAP。

4 再生微表处混合料路用性能

4.1 高温稳定性

本文通过负荷轮试验和车辙试验检验不同掺量RAP再生微表处混合料高温性能。负荷轮试验：通过测定混合料试件经历1 000次轮碾后的黏砂宽度及深度变化来表征其高温抗变形能力；车辙试验采用轮碾成型法制备尺寸为300 mm×300 mm×40 mm的试件，在60 ℃恒温环境中，施加0.7 MPa的胶轮压强模拟行车荷载作用，通过测试试件的动稳定度及车辙变形深度来评价混合料的高温稳定性，试验结果如表10、11所示。

表10 再生微表处混合料车辙试验结果

Table 10 Rutting test results of recycled micro-surfacing mixture

混合料类型	动稳定度/(次·mm^{-1})	相对N-MS再生微表处混合料动稳定减少比例/%
N-MS	2 864	—
30-MS	2 172	24.16
40-MS	1 909	33.34
50-MS	1 703	40.53

表11 再生微表处混合料负荷轮试验结果

Table 11 Load wheel test results of recycled micro-surfacing mixture

项目	碾压前		碾压后		车辙情况	
	高度/mm	宽度/mm	深度/mm	宽度/mm	深度变形率/%	宽度变形率/%
N-MS	12.5	50.79	0.81	52.67	6.48	3.7
30-MS	12.6	49.92	1.34	51.97	10.63	4.1
40-MS	12.4	51.31	1.47	52.64	11.85	4.6
50-MS	12.3	50.37	1.56	53.19	12.68	5.3
技术要求	—	—			— —	≤5.0

由表10可知：与N-MS相比，再生微表处混合料30-MS、40-MS、50-MS的动稳定分别降低了

24.16%、33.34%、40.53%，这主要是因为：RAP在使用及回收过程中会导致集料表面棱角性降低，混合料集料间嵌挤摩擦受力减小，且随着RAP掺量的增加，再生微表处混合料中老化沥青含量相应增加，阻碍其与新乳化沥青的有效融合，混合料抗变形性能下降；由表11可知：微表处混合料30-MS、40-MS、50-MS车辙宽度变形率分别为4.1%、4.6%、5.3%，其中掺入50%RAP微表处混合料已不满足规范技术要求。综上所述可知，掺入40%RAP时，再生微表处混合料高温抗车辙变形性能最佳。

4.2　水稳定性

本文采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂抗拉试验评价不同掺量RAP微表处混合料受水损害性能，浸水马歇尔试验将标准马歇尔试件在60 ℃下进行测试，冻融劈裂试验采用双面击实次数为50次马歇尔试件，在25 ℃下进行测试，试验结果如表12所示。

表12　再生微表处混合料抗水损害性能试验结果

Table 12　Test results of water damage resistance of recycled micro-surfacing mixture

项目	M_1/kN	M_2/kN	M_0/%	T_0/MPa	T_1/MPa	R_{TSR}/%
N-MS	11.76	11.50	97.79	0.72	0.69	95.83
30-MS	11.20	10.24	91.43	0.66	0.59	88.93
40-MS	10.98	9.77	88.98	0.62	0.52	83.37
50-MS	10.57	8.99	85.05	0.59	0.46	77.97
技术要求	—	—	≥85	—	—	≥80

注：M_1为浸泡0.5 h的稳定度；M_2为浸泡48 h的稳定度；M_0为浸水后残留稳定度；T_0为未经冻融的劈裂抗拉强度；T_1为经1次冻融的劈裂抗拉强度；R_{TSR}为冻融劈裂抗拉强度比。

由表12可知：再生微表处混合料的残留稳定度M_0和冻融劈裂抗拉强度比R_{TSR}均随着RAP掺量的增加呈逐渐下降趋势，这主要是因为RAP会导致混合料中新-旧沥青拌和融合的均匀性下降[17-18]。与N-MS相比，再生微表处混合料30-MS、40-MS、50-MS的浸水残留稳定度M_0分别降低了6.50%、9.01%、13.03%，冻融劈裂抗拉强度比R_{TSR}分别下降了7.20%、13.00%、18.64%，其中RAP掺量为50%时，微表处混合料浸水残留稳定度接近规范下限值，冻融劈裂抗拉强度比不满足规范要求。综上所述，考虑RAP微表处混合料的抗水损害性能，RAP掺入量宜不大于40%。

4.3　低温稳定性

试验温度为−10 ℃，加载速率为1 mm/min，通过SCB试验评价不同掺量RAP再生微表处混合料的低温稳定性，其测试结果如表13所示。

表13　再生微表处混合料低温抗裂试验结果

Table 13　Low-temperature crack resistance test results of recycled micro-surfacing mixture

混合料类型	抗弯拉强度/MPa	极限应变/10^{-6}	劲度模量/MPa
N-MS	4.74	2 728.2	1 737.4
30-MS	4.38	2 375.3	1 844.0
40-MS	4.17	2 164.6	1 926.5
50-MS	3.84	2 039.8	1 897.2

由表13可知：再生微表处混合料弯拉强度和极限破坏应变均随着RAP掺量的增加呈逐渐下降趋势，而劲度模量呈先升高后降低趋势，当掺量为40%RAP时达到峰值，这主要是因为RAP掺量在0%～40%时，其表面裹附旧沥青仍能增强微表处混合料黏结性，RAP掺量为40%～50%时，再生微表处混合料中旧沥青量偏多，导致其黏聚力有所下降，受到动态荷载时，会产生较多微裂缝，表现为劲度模量呈现下降趋势[18]。从不同掺量RAP再生微表处混合料低温抗裂性能效果来看，40%掺量最佳，50%掺量其次，30%掺量最差。

4.4　抗疲劳耐久性能

考虑到再生微表处混合料的层位功能和受力环境，采用剪切疲劳试验评价其耐久性能。试验选取不同RAP掺量微表处混合料制备标准马歇尔试件（101.6 mm×63.5 mm），在试件两端粘贴环氧树脂增强层以提高界面强度，成型后的试件置于25 ℃恒温鼓风烘箱中养护48 h。剪切疲劳试验采用UTM-100动态伺服液压系统，试验温度为25 ℃，控制应力水平为0.1、0.3、0.5、0.7，加载频率设定为10 Hz，试验结果如图4所示。

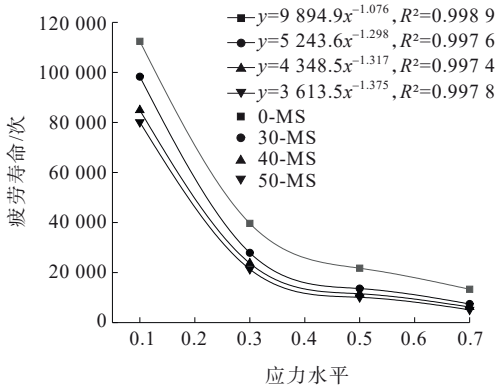


图4　再生微表处混合料抗疲劳耐久性能

Figure 4　Fatigue resistance and durability of recycled micro-surfacing mixture

由图4可知：不同掺量RAP微表处混合料控制应力水平与其疲劳寿命呈$y=Ax^{-B}$幂函数形式，相关系数R^2均大于0.97，说明控制疲劳寿命次数随控制应力水平变化具有显著相关性；当控制应力水平为0.1～0.4时，与N-MS相比，再生微表处混合料30-MS、40-MS、50-MS的疲劳寿命分别降低了12.6%～37.3%、24.5%～50.9%、28.7%～54.4%，其中在高控制应力水平0.7条件下，RAP掺量超过40%，混合料疲劳寿命次数衰减幅度大于50%。因此，再生微表处混合料应用于长大纵坡重载交通道路时，为确保混合料在高控制应力水平不产生疲劳破坏，RAP掺量宜不大于40%。

5 RAP再生微表处混合料力学性能

实际工程施工过程中，常采用黏聚力作为判断微表处开放交通的依据。在温度为25 ℃时，采用内径60 mm、高度10 mm的环形试件进行黏聚力试验，黏聚力试验仪的空气压力保持在200 kPa，试验结果如表14所示。

表14 再生微表处混合料黏聚力试验结果

Table 14 Cohesion test results of recycled micro-surfacing mixture

混合料类型	不同养护时间(min)下RAP再生微表处混合料黏聚力/(N·m)					
	30	40	50	60	80	100
N-MS	1.31	1.62	1.87	2.14	2.31	2.83
30-MS	1.02	1.39	1.71	1.88	2.22	2.71
40-MS	0.94	1.26	1.64	1.76	2.11	2.60
50-MS	0.81	1.11	1.49	1.63	1.97	2.38
技术要求	≥1.2	—	—	≥2.0	—	—

由表14可知：养护时间为30 min、60 min时，再生微表处混合料30-MS、40-MS、50-MS黏聚力均不能满足规范要求[19-20]，即达不到开放交通的要求。随着养护时间的增加，不同掺量RAP微表处混合料的黏聚力呈增加趋势，养护时间为80 min，RAP微表处混合料30-MS、40-MS的黏聚力分别为2.22 N·m、2.11 N·m，能满足规范要求的开放交通条件(>2.0 N·m)，而增加养护时间至100 min，RAP再生微表处混合料50-MS黏聚力为2.38 N·m，达到开放交通要求(>2.0N·m)。综上所述，再生微表处混合料工程应用时，要有足够养护时间以保证其黏聚力强度的形成。

6 结论

(1) 再生微表处混合料1 h湿磨耗值、负荷轮黏砂量及所受扭矩均随着RAP掺量的增加呈下降趋势，掺入30%、40%、50%RAP的微表处最佳乳化沥青用量分别为12.5%、12.0%、11.0%、10.5%。

(2) 随着RAP掺量的增加，再生微表处混合料可拌和时间有所延长，拌和扭矩呈降低趋势，施工和易性下降。

(3) 随着RAP掺量的增加，再生微表处混合料的高温抗车辙变形性能、抗水损害性能及抗疲劳耐久性能不断降低，而低温抗裂性能先增加后降低，其中以掺入40%RAP的微表处混合料的路用性能优良，表现出良好的耐久性。

(4) RAP微表处混合料实际工程应用时，RAP掺量宜不大于40%，且养护时间应适当增加以确保再生微表处混合料黏聚力强度的形成。

参考文献：

References：

[1] 张永远，孟卫红，杨鑫，等.不同FRAP掺量的再生沥青混合料长期性能研究[J/OL].中外公路，1-11[2025-07-28]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250728.1652.003.
ZHANG Yongyuan, MENG Weihong, YANG Xin, et al. Investigation on long-term performance of recycled asphalt mixtures with various FRAP contents[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-11[2025-07-28]. https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250728.1652.003.

[2] 贺华刚，贾晓东，李小龙.高RAP掺量下热再生混合料路用性能与加热工艺研究[J].中外公路，2021，41(3):286-290.
HE Huagang, JIA Xiaodong, LI Xiaolong. Study on road performance and heating process of hot recycled mixture with high RAP content[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):286-290.

[3] 朱云升，章汉卿，王开凤，等.不同RAP掺量下热再生沥青混合料性能衰变规律[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2024，48(4):698-704.
ZHU Yunsheng, ZHANG Hanqing, WANG Kaifeng, et al. Performance decay law of hot recycled asphalt mixture with different RAP content[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2024,48(4):698-704.

[4] 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.

[5] 冼凌晨.基于RAP的沥青路面再生冷补料制备与性能研究[J].西部交通科技,2024(8):27-28,93.
XIAN Lingchen.Study on preparation and performance of asphalt pavement recycled cold patch based on RAP[J]. Western China Communications Science & Technology, 2024(8):27-28,93.

[6] 汪德才,郝培文,刘娜,等.乳化沥青冷再生混合料和易性指标及影响因素[J].北京工业大学学报,2016,42(6): 919-925.
WANG Decai, HAO Peiwen, LIU Na, et al. Workability indicator for emulsified asphalt recycled mixture and influence factors[J]. Journal of Beijing University of Technology,2016,42(6):919-925.

[7] 王万展,曾良球,曾俐豪,等.RAP掺量对再生沥青混合料性能的影响研究[J].西部交通科技,2024(7):11-13,160.
WANG Wanzhan, ZENG Liangqiu, ZENG Lihao, et al. Study on the influence of RAP content on the performance of recycled asphalt mixture[J]. Western China Communications Science & Technology, 2024(7): 11-13,160.

[8] 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.

[9] 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.

[10] POURSOLTANI M, HESAMI S. Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering,2020,21(12):1491-1504.

[11] WANG A P, SHEN S H, LI X H, et al. Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement:Mix design and performance evaluation[J]. Construction and Building Materials,2019,201:303-313.

[12] 江小强,曹宇坤,刘刚,等.再生料对微表处混合料技术性能影响[J].公路,2021,66(6):340-344.
JIANG Xiaoqiang,CAO Yukun,LIU Gang,et al.Influence of recycle material on technical performance of micro-surfacing mixture[J].Highway,2021,66(6):340-344.

[13] 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.

[14] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面养护技术规范:JTG 5142—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 maintenance of highway asphalt pavement: JTG 5142—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2019.

[15] 交通运输部公路科学研究所.微表处和稀浆封层技术指南[M].北京:人民交通出版社,2006.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical guidelines for micro-surfacing and slurry seal [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

[16] 交通运输部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2005.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press,2005.

[17] 汪海年,焦虎,徐宁,等.乳化沥青冷再生混合料强度提升措施研究进展[J].交通运输工程学报,2024,24(3):48-68.
WANG Hainian, JIAO Hu, XU Ning, et al. Research progress on strength improvement measures of emulsified asphalt cold recycling mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2024,24(3):48-68.

[18] 董夫强,祖元哲,于新,等.沥青混合料拌和和易性评价方法研究综述[J].中外公路,2024,44(5):83-96.
DONG Fuqiang, ZU Yuanzhe, YU Xin, et al. Review of evaluation methods for mixing workability of asphalt mixture[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44 (5):83-96.

[19] 郅晓,侯可,张迅,等.高掺量改性RAP热再生沥青混合料低温抗裂性能宏微观机理[J].北京工业大学学报,2023, 49(11):1190-1202.
ZHI Xiao, HOU Ke, ZHANG Xun, et al. Macroscopic and microscopic mechanisms of low-temperature crack resistance of hot mix asphalt with high content of rejuvenated RAP[J]. Journal of Beijing University of Technology,2023,49(11):1190-1202.

[20] 朱杰,银燕琼,赖月漂,等.高RAP掺量沥青混合料性能优化研究进展[J].土木工程,2025,14(3):382-390.
ZHU Jie, YIN Yanqiong, LAI Yuepiao, et al. Research progress on performance optimization of asphalt mixture with high RAP content[J]. China Civil Engineering Journal ,2025,14(3):382-390.