

沥青路面再生混合料耐久性能研究

李峰

(湖南交通国际经济工程合作有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对沥青路面再生混合料的耐久性能进行试验研究, 主要分析荷载、水温 and 老化 3 个外界因素的长期影响, 检测其抗车辙、抗低温开裂、抗水损害等性能, 并铺筑试验路进行实际路用性能验证。结果表明, 与新沥青混合料相比, 再生混合料在耐久性能方面不占优势, 采用 SBR 胶乳的再生混合料的耐久性能比只添加再生剂的再生混合料更好。

关键词: 公路; 沥青路面; 再生混合料; SBR 胶乳; 耐久性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0089-06

自然环境中许多因素都会对沥青路面性能产生影响, 导致其逐渐老化衰退, 进而影响路面服役质量。再生混合料中加入的原沥青路面旧料(RAP)会对其耐久性能产生影响。为确保沥青路面的耐久性, 需全面评价再生混合料性能, 如不能达到要求, 则采取有效方案提高其耐久性。该文对此进行研究, 以期为实际工程应用提供理论支撑。

1 耐久性能试验方案

RAP 是再生混合料中的主要成分, 容易受环境因素影响而出现老化现象, 其掺量对于混合料的耐久性能至关重要。根据相关研究结果, 30%~50% RAP 掺量较为适宜, 就地热再生混合料中 RAP 掺量较高, 可超过 80%。因此, 对就地热再生混合料的耐久性能应倍加关注。

1.1 试验方案

(1) 通过间接拉伸疲劳试验评价在重复荷载作用下沥青混合料抵抗疲劳开裂的能力。

(2) 沥青混合料抵抗不利自然环境影响后性能退化, 采用多重冻融循环和二次老化后的劈裂试验、动态蠕变试验和半圆弯曲试验进行评价。

(3) 室内试验所用混合料中 RAP 与新料的比例为 85:15。再生混合料采用以下配置方案: 1) 只添加再生剂, 这是常规方法, 根据 RAP 沥青质量进行添加, 再生剂占比为 2%; 2) 同时添加 SBR 胶乳和 Evotherm 温拌剂, 再生剂用量为 RAP 沥青质量的 1%, SBR 胶乳用量为 RAP 沥青质量的 4%, 温拌剂用量为再生混合料沥青质量的 5%; 3) 设立对照组, 为相同级配的新沥青混合料, 与再生料进行对比。沥青混合料的级配组成见图 1。

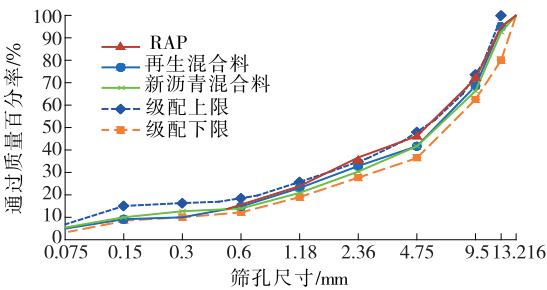


图 1 沥青混合料的级配组成

1.2 原材料性能

RAP 来源于某高速公路就地热再生现场, 路面上面层为 SBS 改性沥青混合料, RAP 性能测试结果见表 1。表 2 为新 SBS 改性沥青性能测试结果, 表 3 为新集料性能测试结果。

表 1 回收沥青性能测试结果

检测项目		检测结果	技术要求
针入度(25℃)/(0.1 mm)		27	50~800
延度(5℃)/cm		0	≥30
软化点/℃		60.2	≥60
布氏粘度(135℃)/(Pa·s)		2.816	≤3
车辙因子	原样沥青	2.822	≥1
	(76℃)/kPa 旋转薄膜后残留沥青	5.960	≥2.1
-12℃弯曲	蠕变劲度/MPa	402	≤300
梁流变试验	m 值/mm	0.253	≥0.3

表 2 新 SBS 改性沥青性能测试结果

检测项目		检测结果	技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)		63	50~80
针入度指数		-0.048	-0.2~1.0
延度(5℃, 5 cm/min)/cm		46	≥30
软化点/℃		88	≥60

续表 2

检测项目	检测结果	技术要求
布氏粘度(135℃)/(Pa·s)	2.364	≤3
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	1.03	实测
弹性恢复/%	93	≥75
薄膜加热后 质量损失/%	0.02	±1
(163℃, 针入度比(25℃)/%	71	≥65
5 h) 延度(5℃, 5 cm/min)/cm	22	≥15

表 3 新集料和矿物性能测试结果

集料类型	检测项目	检测结果	技术要求
粗集料	表观相对密度	2.922	≥2.71
	压碎值/%	11.4	≤26
	洛杉矶磨耗损失/%	15.6	≤28
	吸水率/%	0.93	≤2
	与沥青的粘附性/级	5	≥4
	针片状颗粒含量/%	5.2	≤15
细集料	坚固性/%	3.4	≤12
	表观相对密度	2.781	≥2.61
	坚固性/%	6.6	≤12
	砂当量/%	70.2	≥60
	棱角性/s	49.6	≥30
矿粉	表观密度	2.686	≥2.5
	含水量/%	0.2	≤1.1
	各粒径(mm)	<0.6 100	100
	占比/%	<0.15 95.8	90~100
		<0.075 85.9	75~100

采用旋转压实仪成型试件,间接拉伸疲劳试验、劈裂试验、动态蠕变试验和半圆弯曲试验都在 UTM-25 试验机上完成。

2 水温循环作用下再生混合料的耐久性能

2.1 水温循环试验方案

(1) 采用室内多次冻融循环模拟环境,冻融循环的养生条件如下:将试件真空饱水后,先在-18℃冰箱中养生 24 h,再放入 60℃恒温水槽中养生 24 h。

(2) 制订 3 种水温循环养生方案,分别对应不同试件组,其中第一组试件不经过冻融循环养生,第二组试件冻融循环 1 次,第三组试件冻融循环 3 次。

(3) 分别采取动态蠕变试验、半圆弯曲试验、劈裂试验评价沥青混合料的高温抗变形、低温抗开裂和抗水损害性能。

2.2 水温循环作用下的高温变形性能

动态蠕变试验温度为 60℃,轴向压力为 0.7 MPa。试件为圆柱体,高度与直径各 100 mm。试验终止条件为荷载作用达到 10 000 次、轴向累积微应变达到 50 000 με 或蠕变曲线进入第三阶段。每组 2 个平行试件,取其均值作为试验结果(见表 4)。

由表 4 可知:1) 未冻融试件中,流变次数最大的为再生混合料(SBR),最小的为再生混合料(再生剂),新沥青混合料位于二者之间,说明将 SBR 胶乳加入再生混合料可提高其抗车辙性能。2) 混合料

表 4 冻融循环后动态蠕变试验结果

混合料类型	试件编号	试验条件	空隙率/%	第二阶段曲线拟合	流变次数 F_n /次	累积永久应变 $\epsilon_p/\mu\epsilon$
再生混合料 (再生剂)	1	未冻融	4.80	$y = 8.1552x + 20509$	2801	43565
	2	1次冻融	5.10	$y = 17.511x + 13988$	1501	40174
	3	3次冻融	4.80	$y = 38.412x + 20980$	721	45811
再生混合料 (SBR)	1	未冻融	4.90	$y = 4.561x + 13564$	5401	38432
	2	1次冻融	4.70	$y = 7.7316x + 19116$	3101	43430
	3	3次冻融	4.70	$y = 8.505x + 22923$	2051	40425
新沥青混合料	1	未冻融	4.80	$y = 5.192x + 11051$	3801	30891
	2	1次冻融	5.10	$y = 6.454x + 11098$	3001	30770
	3	3次冻融	5.10	$y = 11.4x + 18502$	1651	37465

经冻融循环后流变次数下降,说明经水温循环作用后其抗车辙性能下降。3) 与未冻融情况相比,再生混合料经过 1、3 次冻融循环后其流变次数下降,且下降幅度较大,新料在 1 次冻融后流变次数下降幅度相对较小。

2.3 水温循环作用下低温抗裂性能

半圆弯曲试验温度为-10℃,加载速率为 50 mm/min。试件为半圆形柱体,高度 50 mm,直径 150 mm。每组 4 个平行试件,取其均值作为试验结果(见表 5)。

表 5 冻融循环后半圆弯曲试验结果

混合料类型	试验条件	抗拉强度/MPa	破坏应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa	应变能密度/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
再生混合料 (再生剂)	未冻融	10.3	19 792	520.4	63.2
	1 次冻融	9.1	18 504	491.8	45.4
	3 次冻融	6.3	16 679	377.7	23.6
再生混合料 (SBR)	未冻融	12.1	21 784	555.5	85.8
	1 次冻融	10.6	19 903	532.6	63.7
	3 次冻融	7.4	17 357	426.3	35.2
新沥青混合料	未冻融	12.5	25 147	497.1	115.7
	1 次冻融	10.7	23 358	458.1	92.4
	3 次冻融	8.2	20 647	397.2	64.3

由表 5 可知:1) 未冻融循环试件中,应变能密度最大的为新料,最小的为再生混合料(再生剂),再生混合料(SBR)居中,说明添加 SBR 胶乳的再生混合料的低温抗裂性能优于只添加再生剂的再生混合料。2) 与未冻融情况相比,经过冻融循环的再生混合料的应变能密度有所下降,其中 1 次冻融作用后下降较小,3 次冻融后则大幅度下降,说明长期水温循环作用下其低温抗裂性能欠佳。3) 经过冻融后新料的应变能密度下降幅度不大,说明冻融作用对再生混合料低温抗裂性能的损害作用比新料更大。

2.4 水温循环作用下抗水损害性能

试件在水槽中养生,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,时间为 3 h。测试试件的劈裂强度,计算冻融劈裂强度比。每组 4 个平行试件,取其均值作为试验结果(见表 6)。

表 6 冻融循环后劈裂试验结果

混合料类型	试验条件	劈裂强度 R_t/MPa	冻融劈裂强度 比 $\text{TSR}/\%$
再生混合料 (再生剂)	未冻融	1.11	100.0
	1 次冻融	0.92	82.9
	3 次冻融	0.71	64.1
再生混合料 (SBR)	未冻融	1.13	100.0
	1 次冻融	0.98	86.7
	3 次冻融	0.79	69.9
新沥青混合料	未冻融	1.23	100.0
	1 次冻融	1.11	89.4
	3 次冻融	0.96	78.1

由表 6 可知:1) 与新料相比,再生混合料的劈裂强度较小,即抗拉强度较低。其原因在于老化沥青的影响。2) 新料的冻融劈裂强度比最大,添加 SBR 胶乳的再生混合料次之,只添加再生剂的再生混合料最小,说明 SBR 胶乳可增强沥青与集料之间

的粘结力,提升再生混合料的抗水损害性能。

3 长期老化作用下再生混合料的耐久性能

3.1 长期老化试验方案

(1) 再生混合料室内长期老化模拟试验采用 85 $^{\circ}\text{C}$ 长期烘箱老化法。

(2) 再生混合料试件和新料试件都分为 2 组,分别在 85 $^{\circ}\text{C}$ 强制通风烘箱内养生 5、10 d。

(3) 将长期老化模拟后的试件进行动态蠕变试验、半圆弯曲试验和冻融劈裂试验,并将试验结果与未模拟老化试件的试验结果进行比较,分析再生混合料二次老化后性能变化规律。

3.2 长期老化作用下高温变形性能

动态蠕变试验每组 2 个平行试件,取其均值作为试验结果,试验温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 。试验结果见表 7。

由表 7 可知:1) 随着老化时间的延长,再生混合料、新沥青混合料的流变次数逐渐增大,说明其抗车辙性能在经过长期老化后都得到增强。2) 经过 5、10 d 老化后,各种混合料的流变次数都增加,但添加 SBR 胶乳的再生混合料的变化幅度最小,说明 SBR 胶乳提升了沥青的抗老化能力,其在长期老化过程中沥青胶结料的再次老化程度较轻,再生混合料流变次数的增长幅度较小。3) 沥青胶结料通过长期烘箱老化后性能发生改变,老化程度加重,抗车辙性能增强,其变化程度与材料老化程度一致,可以此表示沥青胶结料的老化情况。

3.3 长期老化作用下低温开裂性能

半圆弯曲试验温度为 -10 $^{\circ}\text{C}$,荷载施加速率为 50 mm/min。半圆形试件直径 150 mm,高 50 mm,底部支撑点间距为直径的 0.8 倍。每组试验采用 4 个平行试件,取其均值作为试验结果(见表 8)。

表 7 长期老化后动态蠕变试验结果

混合料类型	试件编号	试验条件	空隙率/%	第二阶段曲线拟合	流变次数 F_n /次	累积永久应变 $\epsilon_p/\mu\epsilon$
再生混合料 (再生剂)	1	未老化	4.80	$y = 8.155x + 20\ 509$	2 800	43 564
	2	5 d 老化	4.80	$y = 5.309x + 16\ 729$	4 200	39 040
	3	10 d 老化	4.90	$y = 3.571x + 15\ 022$	4 800	33 080
再生混合料 (SBR)	1	未老化	4.90	$y = 4.561x + 13\ 564$	5 400	38 431
	2	5 d 老化	5.10	$y = 4.261x + 15\ 612$	6 500	42 282
	3	10 d 老化	5.20	$y = 3.339x + 18\ 907$	7 200	43 081
新沥青混合料	1	未老化	4.80	$y = 5.192x + 11\ 051$	3 800	30 890
	2	5 d 老化	5.10	$y = 4.236x + 18\ 832$	4 800	39 592
	3	10 d 老化	5.01	$y = 2.244x + 11\ 516$	6 000	25 106

表 8 长期老化后半圆弯曲试验结果

混合料类型	试验条件	抗拉强度/MPa	破坏应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa	应变能密度/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
再生混合料 (再生剂)	未老化	10.3	19 792	520.40	63.2
	5 d 老化	9.5	16 352	581.01	50.8
	10 d 老化	9.1	15 475	588.01	45.3
再生混合料 (SBR)	未老化	12.1	21 784	555.50	85.8
	5 d 老化	11.2	18 959	590.70	68.5
	10 d 老化	10.7	17 034	628.20	57.1
新沥青混合料	未老化	12.5	25 147	497.10	115.7
	5 d 老化	11.6	21 528	538.80	86.2
	10 d 老化	10.9	19 291	565.01	70.4

由表 8 可知:1) 随着老化时间的延长,再生混合料和新沥青混合料的抗拉强度、应变能密度下降,表明沥青混合料在长期低温环境下的抗开裂性能下降。2) 经过 5、10 d 老化后,虽然新沥青混合料仍具有最大的应变能密度,但其应变能密度下降幅度最大,两种再生混合料的应变能密度下降幅度较低。3) SBR 胶乳对老化沥青低温性能的改善效果显著,可明显提升沥青混合料的低温性能,但经长期老化后,SBR 胶乳的改性作用削减,相应地混合料的低温性能也削弱。

3.4 长期老化作用下水损害性能

对老化后沥青混合料试件进行冻融劈裂试验,试件分为两组:第一组不冻融,置于 25 ℃ 水环境中养生 2 h;另一组试件真空饱水后,先置于 -18 ℃ 冷冻柜中养护 24 h,再置入 60 ℃ 恒温水中 24 h,然后取出放入 25 ℃ 水中 2 h。试验结果见表 9。

由表 9 可知:1) 添加 SBR 胶乳的再生混合料与新沥青混合料的冻融劈裂强度比都随老化时间的增加而下降,抗水损害性能下降。主要是因为长期冻融循环作用下胶结料的粘性受到损坏。2) 与

表 9 长期老化后冻融劈裂试验结果

沥青混合料类型	试验条件	劈裂强度 R_{t1} /MPa	劈裂强度 R_{t2} /MPa	冻融劈裂强度比
		MPa	MPa	TSR/%
再生混合料(再生剂)	未老化	1.10	0.91	82.90
	5 d 老化	1.24	1.04	84.01
	10 d 老化	1.32	1.02	76.40
再生混合料(SBR)	未老化	1.12	0.97	86.70
	5 d 老化	1.21	1.03	85.20
	10 d 老化	1.28	1.01	79.10
新沥青混合料	未老化	1.22	1.10	90.20
	5 d 老化	1.30	1.11	85.50
	10 d 老化	1.41	1.16	82.40

未老化试件相比,添加 SBR 胶乳的再生混合料在 5、10 d 老化后的冻融劈裂强度比分别下降 1.5%、7.6%,新沥青混合料在 5、10 d 老化后的冻融劈裂强度比分别下降 4.7%、7.8%,二者抗水损害性能几乎一致。3) 仅添加再生剂的再生沥青混合料在 5 d 老化后的冻融劈裂强度比轻微增长,但 10 d 老化强度大幅度降低。

4 再生混合料的疲劳性能分析

沥青混合料在长期荷载持续作用下的疲劳抗裂性能是其耐久性的核心指标之一。采用间接拉伸疲劳试验评价再生沥青混合料的疲劳性能。

4.1 间接拉伸强度试验

采用间接拉伸强度试验测定沥青混合料的破坏荷载限值及间接拉伸强度。选用直径 10 cm、高度 5 cm 的圆柱形试件,试验温度 15 ℃,荷载加载速率 5 cm/min。每组试验采用 4 个平行试件,取其平均值作为试验结果(见表 10)。

表 10 沥青混合料间接拉伸强度试验结果

混合料类型	最大荷载/N	间接拉伸强度/MPa
再生混合料(再生剂)	22 135	2.77
再生混合料(SBR)	23 348	2.93
新沥青混合料	24 230	3.02

由表 10 可知:相较于只添加再生剂的再生沥青混合料,添加 SBR 胶乳的再生沥青混合料具有较高的破坏荷载和间接拉伸强度,主要来源于 SBR 胶乳的作用。

4.2 疲劳试验

在 0.1~0.4 范围内选取 4 个应力比进行试验,每组试验采用 2 个平行试件,取其平均值作为试验结果。通过电子图像测量技术得到试件疲劳破坏过程中径向位移随加载情况的变化曲线,根据曲线第二反弯点对应的加载次数确定疲劳寿命,结果见表 11 和见图 2。

由表 11 和图 2 可知:1) 在同等应力条件下,再生混合料的疲劳寿命和新沥青混合料存在一定差距,添加 SBR 胶乳的再生混合料的疲劳寿命高于仅添加再生剂的再生沥青混合料,表明 SBR 胶乳能明显提升再生沥青混合料在应力作用下的疲劳寿命。2) 疲劳方程的斜率反映沥青混合料的疲劳寿命对应力作用的敏感性,两类再生混合料的斜率均低于

表 11 沥青混合料间接拉伸疲劳试验结果

混合料类型	应力比	疲劳寿命 N_f /次	疲劳方程
再生混合料(再生剂)	0.10	259 730	$\lg N_f = -5.716(\sigma/R_t) + 5.885 9, R^2 = 0.979 9$
	0.20	40 940	
	0.30	13 540	
	0.40	4 670	
再生混合料(SBR)	0.20	298 660	$\lg N_f = -6.162(\sigma/R_t) + 6.668 9, R^2 = 0.989 0$
	0.30	54 950	
	0.34	32 940	
	0.40	17 380	
新沥青混合料	0.20	404 920	$\lg N_f = -6.654 3(\sigma/R_t) + 6.960 2, R^2 = 0.996 9$
	0.30	102 170	
	0.34	42 520	
	0.40	18 960	

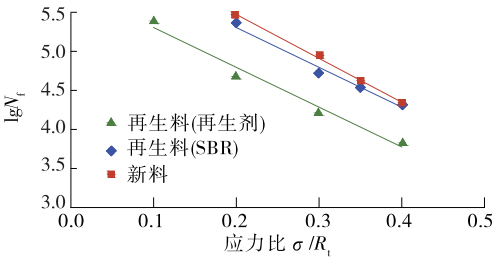


图 2 沥青混合料疲劳寿命曲线

新沥青混合料,主要是由于再生混合料中 RAP 经过多年服役后路用敏感性下降;添加 SBR 胶乳的再生混合料的斜率大于仅添加再生剂的再生混合料,表明 SBR 胶乳能改善老化沥青的流变性能,提高再生混合料的应力敏感性。

5 再生混合料的路用耐久性能

对某高速公路就地热再生试验段进行跟踪观测,分析再生混合料的实际使用耐久性能。该试验段采用 SBR 胶乳和 Evotherm 温拌剂同时添加的再生方案。经检测,该试验段目前无裂缝和水损害等病害。对路面车辙平均深度、平整度指数及横向力系数进行跟踪检测,结果见表 12。由表 12 可知:

表 12 试验段性能指标跟踪检测结果

检测时间	平整度指数				车辙深度				横向力系数			
	检测结果/(m·km ⁻¹)			变异系数/%	检测结果/mm			变异系数/%	检测结果			变异系数/%
	最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值	
2015—10	1.7	0.9	1.2	16.4	1.4	0.7	1.1	17.9	53.1	49.1	51.5	2.4
2016—09	1.7	1.1	1.4	14.7	2.8	1.5	2.1	18.4	52.1	48.1	50.3	2.6
2017—09	1.9	0.9	1.4	20.6	3.4	2.4	2.8	10.8	53.1	48.1	50.8	2.5
2018—12	2.1	0.9	1.4	18.7	3.7	2.3	2.9	15.6	53.1	48.1	50.9	2.2

试验段路面的平整度指数小于 2.3 m/km,车辙平均深度小于 5 mm,横向力系数大于 48,均达到优等,且其值随通车时间增加的变化较小。

对试验段钻取芯样,分别进行动态蠕变试验、半

圆弯曲试验和间接拉伸试验,结果见表 13~15。由表 13~15 可知:通车 2 年多后,该试验段再生面层芯样表现出较好的抗车辙、低温抗裂性能及抗拉强度,说明试验段再生面层混合料耐久性能良好。

表 13 芯样动态蠕变试验结果(60℃)

芯样编号	第一阶段 曲线拟合	第二阶段 曲线拟合	第二阶段重复荷载 作用次数/次	第三阶段产生的 永久应变/ $\mu\epsilon$	流变次数 F_n /次
1	$y=2\ 471.5x^{0.312}$	$y=6.162x+13\ 852$	2 000	39 251.0	5 200
2	$y=2\ 371.3x^{0.285}$	$y=7.512x+12\ 237$	1 500	42 788.0	4 300
均值	—	—	1 750	41 019.5	4 750

表 14 芯样半圆弯曲试验结果(-10℃)

芯样编号	抗拉强度/MPa	破坏应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa	应变能密度/ $(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
1	7.3	14 125.0	517.7	48.01
2	8.5	17 134.0	496.5	75.01
3	8.1	18 701.0	433.8	71.20
4	6.5	27 153.0	239.1	52.30
均值	7.6	19 278.2	421.8	61.60
变异系数/%	10.1	25.1	26.1	18.90

表 15 芯样间接拉伸试验结果(15℃)

芯样编号	最大荷载/N	间接拉伸强度/MPa
1	16 370	2.60
2	15 420	2.44
均值	15 895	2.52

6 结论

(1) 多次冻融循环作用后,再生混合料试件的抗车辙、低温抗开裂和抗水损害性能均较大程度削减,和新沥青混合料相比,再生沥青混合料在长期水温循环作用下的耐久性能较低;采用 SBR 胶乳的再生混合料比只添加再生剂的再生混合料表现出更好的耐久性能。

(2) 在长期环境影响老化作用下,再生沥青混合料的抗车辙性能提升,低温抗裂性和抗水侵蚀特性降低;和新沥青混合料相比,采用 SBR 胶乳的再生混合料表现出更好的长期老化耐久性能。

(3) 在应力控制疲劳试验中,采用 SBR 胶乳的再生沥青混合料的疲劳寿命远高于仅添加再生剂的再生沥青混合料,在疲劳抗裂性方面优势更明显,但与新沥青混合料相比仍存在一定差距。

(4) 采用 SBR 胶乳和 Evotherm 温拌剂的就地

热再生试验段的路用性能较好。考虑到试验段服役年限相对较短,其长期服役能力还有待继续观测。

参考文献:

- [1] 于明明,张利鹏.新型活性橡胶对密级配沥青混合料的影响研究[J].公路与汽运,2018(6).
- [2] 卢勇,刘爱华,张文浩,等.高速公路沥青路面各层老化性能及影响因素分析[J].公路与汽运,2018(5).
- [3] 杨焯.两种沥青路面的力学响应及结构层寿命对比分析[J].公路与汽运,2018(3).
- [4] 聂浩,唐新国,陈云亮,等.高耐久性铺装沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2015(1).
- [5] 贾立术,卢争艳.高 RAP 掺量热再生混合料抗裂性能研究[J].公路工程,2017,42(2).
- [6] 冯需.不同 RAP 掺量 Sasobit 温拌再生混合料适用性研究[J].公路工程,2017,42(1).
- [7] 秦炜.高 RAP 掺量热再生混合料疲劳性能研究[J].公路工程,2016,41(1).
- [8] 吴晓霞.高比例 RAP 掺量橡胶热再生混合料路用性能与改性机理研究[J].公路工程,2016,41(4).
- [9] 齐小飞,邹晓翎,阮鹿鸣,等.高 RAP 掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J].中外公路,2018,38(2).
- [10] 王宏.聚酯纤维对 TPS 改性沥青及其混合料抗裂性能研究[J].公路,2015(10).
- [11] 董玉凯.RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2017(3).
- [12] 彭剑,凌俊,周志刚.SBS 改性沥青砼再生设计与路用性能评价[J].公路与汽运,2018(5).
- [13] 林翔,李海军,林立宽.基于正交试验的再生沥青混合料耐久性能研究[J].公路交通科技:应用技术版,2015(11).
- [14] 徐剑,黄颂昌,秦永春,等.乳化沥青和泡沫沥青冷再生混合料性能研究[J].公路交通科技,2010,27(6).