

再生胶/SBS复合改性沥青再生混凝土抗裂性能研究

李小斌

(青海西互高速公路管理有限公司,青海 西宁 810000)

摘要:为提高再生沥青混合料的抗裂特性,提出采用抗裂性能优良的新型SBS/橡胶复合改性沥青进行RAP料的再生。基于低温弯曲小梁蠕变、约束温度应力及四点弯曲疲劳试验对复合改性沥青、SBS改性沥青的再生混合料进行低温抗裂及疲劳开裂性能研究。结果表明:橡胶的加入可提高再生沥青混凝土的低温及中温抗裂性能,这可能与混合料开裂初期形成的微裂纹扩展至聚合物网络被吸收断裂能量,抑制微裂纹进一步发展有关。进一步分析断裂温度可知,复合改性沥青再生沥青混合料较普通SBS改性沥青的再生混合料可延伸路面的服役温度范围6℃左右,有利于再生沥青混合料在西北寒冷地区的推广应用。

关键词:再生沥青混合料;复合改性沥青;低温抗裂;疲劳开裂

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

目前,道路建设中对废旧沥青混凝土材料的再生与综合利用越来越被道路工作者们所重视,针对沥青混凝土的再生研究层出不穷。然而,根据各国工程的实际运用可知,热再生混合料的RAP掺量基本限定为20%~30%,常用的RAP掺量为25%^[1-3]。究其原因,在低RAP掺量时,再生沥青混合料的综合性能与新沥青混合料基本无异,但是当掺量超过25%时,再生沥青混凝土在低温时的抗裂性能及周期循环荷载下的抗疲劳性能难以满足路面的实际使用需求^[4-5]。因此,欲提高路面再生沥青混合料的RAP用量首先需要解决的是提高再生沥青混凝土的抗裂特性。另一方面,经济的发展促进了机动车保有量的量级改变,废旧轮胎的产生使得“黑色污染”问题日趋严重。为此,道路工作者类比于聚合物改性沥青的运用,尝试将废旧轮胎用于沥青改性^[6-8]。已有研究表明:橡胶改性沥青具有较为优良的性能特点,尤其是可有效改善路面的抗疲劳、抗低温开裂及耐久性等性能,国内外已广泛将其应用于应力吸收层、路表罩面,以减少路面裂缝及提高路面使用寿命。

此外,与性能相近的SBS改性沥青相比其具有明显的成本优势及有效解决废旧轮胎污染等问题^[9-10]。因此,考虑到橡胶沥青优异的抗裂特性及再生沥青混合料对抗裂性能的缺失特性,如果可以将二者有效地结合,则可以有效地提高再生沥青混合料中RAP料的掺量。目前,已有研究者将橡胶沥青用于再生沥青混合料的生产实施,如吴春颖等^[11]基于黏度指标确定了橡胶沥青+再生沥青的掺配比例,提出了其级配设计方法,并对橡胶沥青的再生沥青混合料进行了性能检验,发现再生沥青混合料在适量的橡胶沥青掺入下综合性能优异,并将其运用于贵州S305线的大中修改造工程;汪海年等^[12]采用沥青混合料低温弯曲试验及CT扫描技术对不同胶粉掺量、不同掺量的RAP进行综合研究后确定了低温性能最好时的胶粉掺量、RAP掺量,发现RAP掺量相同时采用橡胶改性沥青再生低温性能可比基质沥青提高40%以上,并可至少提高5%的RAP掺量。以上研究表明:将橡胶沥青用于再生沥青混合料可以有效地提高再生沥青混合料的抗开裂性能,是一种具有广泛应用前景的再生技术。

然而,如同现有绝大多数聚合物改性沥青,现有橡胶沥青作用机理仍属于物理改性范围,细小的胶

收稿日期:2022-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778136)

作者简介:李小斌,男,硕士,高级工程师.E-mail:991228040@qq.com

粉粒子在助剂的帮助下吸附沥青中的轻质油分产生溶胀并生成交联网络,该溶胀行为受胶粉形态、溶胀发育工艺、基质沥青组分特性等因素控制^[13-14]。这种物理改性技术无法从本质上改变胶粉与基质沥青热力学不相容性,导致胶粉在沥青中的掺量受限,橡胶的优越性能也得不到有效发挥。事实上,现有橡胶沥青在工程中经常出现稳定性问题以及与集料的黏附力不足等关键问题,已成为现有橡胶沥青技术的通病^[15]。橡胶固化后的品质十分稳定但缺乏黏性,而这恰恰是物理改性的橡胶沥青稳定性较差、黏附力不足的重要原因。本文提出通过化学方式对橡胶颗粒进行部分活化处理,并利用等密度原理实现 SBS/橡胶的复合,可综合改善胶粉、SBS 与沥青的相容性,并减少橡胶沥青制备工艺中有害气体的排放^[16-18],有望大幅提升橡胶沥青的品质,并将其应用于热再生沥青混合料,实现热再生沥青混合料的抗裂特性的综合改善。

1 原材料技术性能

1.1 SBS/橡胶复合改性沥青

复合改性沥青由江苏某公司提供,其生产工艺如下:首先,将 SBS 和脱硫胶粉放入密炼机中以 120℃ 的温度密炼 30 min 后制备复合改性粒子,然后缓慢加入至已加热到 165℃ 的 70# 石油沥青;随后,用转速为 5 000 r/min 的剪切机在 180℃ 下剪切 60~90 min,最后,采用双叶轮搅拌机进行搅拌发育 30 min,制备的复合改性沥青基本性能如表 1 所示。

表 1 复合改性沥青基本性质

检测指标	单位	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	72.6
延度(5℃,5 cm/min)	cm	33.8
软化点(R&B)	℃	86.7
低温脆点	℃	-30.2
PG 分级		PG 82-28

1.2 RAP 及新集料

研究采用青海西互公路的现场老路铣刨经充分二次破碎的旧料,按筛孔粒径分为旧料 1#(≥ 9.5 mm)、旧料 2#(4.75~9.5 mm)、旧料 3#(≤ 4.75 mm) 3 档,3 档旧料抽提后结果如图 1 所示,由此尽可能地减

小 RAP 料产生的破碎影响,最大化地提高再生沥青混合料性能^[19]。新料中粗集料(5~10 mm、10~20 mm)采用玄武岩,细集料(0~5 mm)采用石灰岩,矿粉采用石灰岩矿粉,最终合成含 30% 的 RAP 再生沥青混合料级配(图 2),根据马歇尔级配设计方法确定油石比为 5.2%。

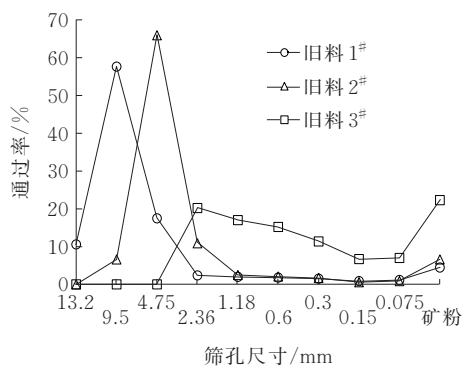


图 1 分档集料筛分结果

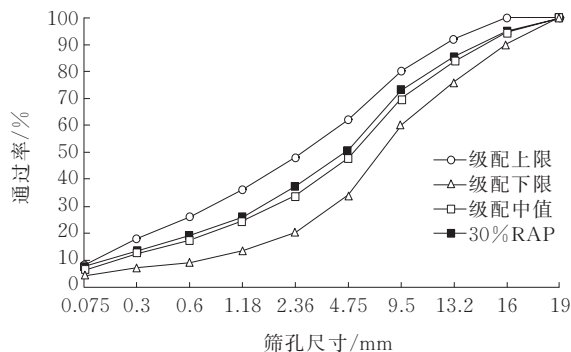


图 2 30% RAP 再生沥青混合料级配曲线

1.3 再生混合料生产过程

以往 RAP 料再生利用的生产程序为将新集料、再生剂和新沥青以及矿粉依次加入旧集料中拌和^[20]。按照分级再生法,提高新旧沥青的融合(具体工艺如图 3 所示),即先将小于 4.75 mm 的富油细料与新沥青拌和,随后加入含油量较少的粗旧料、新集料继续拌和,最后加入矿粉获得再生沥青混合料。

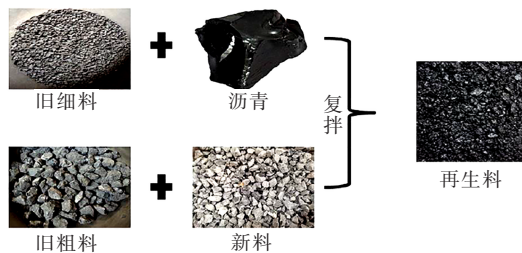


图 3 再生混合料生产流程

1.4 再生沥青混合料抗裂性能试验选择

现阶段沥青混合料开裂性能的研究包含低温开裂及疲劳开裂两类,低温开裂性能主要采用基于低温小梁弯曲蠕变试验的破坏应变、断裂能及基于约束温度应力试验的断裂温度等参数进行评价,疲劳开裂则主要采用四点弯曲疲劳试验、重复间接拉伸试验及得克萨斯罩面测试。基于沥青混合料低温开裂的结果表明:低温弯曲蠕变试验对沥青混合料的低温开裂评价具有广泛的适用性,故本文将其定义为低温开裂研究试验之一。此外,增加了美国 SHRP 提出的约束温度应力试验(TSRST),该方法可有效地模拟现场周边的约束状况,对现场沥青混合料的使用条件模拟更佳,从多个方面对沥青混合料低温开裂进行更为全面的评价。而在疲劳开裂方面,四点弯曲疲劳对沥青混合料性能的评价亦与实际运用关联度较高,重复度亦较高。因此,研究采用低温弯曲蠕变试验、四点弯曲疲劳及约束温度应力试验对再生沥青混合料性能进行综合性评价。

2 复合改性沥青再生混合料开裂性能研究

2.1 低温弯曲试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0715 方法,试验仪器选用万能材料试验机 UTM-25,试件尺寸为 250 mm×35 mm×30 mm,在-10℃、加载速率为 50 mm/min 条件下,对棱柱体小梁进行低温弯曲试验,每组混合料试验 6 次,取其平均值作为最终结果,由此评价沥青混合料的抗低温开裂性能。根据规范方法计算得到试件破坏时的抗弯拉强度、梁底最大弯拉应变、弯曲劲度模量如表 2 所示。

表 2 为同一 RAP 掺量下添加两种不同新沥青后的再生沥青混合料低温弯曲蠕变试验结果。由表 2 可以看出:低温条件下两种再生沥青的混合料小梁弯曲试验所得结果抗弯拉强度基本相同,但破坏时应变具有显著差异,SBS/橡胶复合改性沥青的再生沥青混合料平均破坏应变比 SBS 改性沥青再生混合料高 13% 左右,即平均抗弯拉应变值从 2 780 με 以下提高至 3 150 με 左右,表明采用 SBS/橡胶复合改性沥青所设计的再生沥青混合料的低温抗变形能

表 2 再生混合料低温弯曲试验结果

新加沥青类型	荷载峰值 P_B/N	跨中挠度 d/mm	抗弯拉强度 R_B/MPa	劲度模量 S_B/MPa	破坏应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$
SBS 改性沥青	1	1.590	0.524	12.754	4 647
	2	1.522	0.531	12.044	4 298
	3	1.180	0.525	9.378	3 360
	4	0.959	0.524	7.434	2 665
	5	1.554	0.533	12.409	4 411
	6	1.330	0.521	10.813	3 953
均值	1.356	0.526	10.805	3 889	2 780
SBS/橡胶复合改性沥青	1	1.164	0.581	9.259	3 036
	2	1.371	0.612	11.152	3 464
	3	1.106	0.615	8.705	2 822
	4	1.519	0.582	11.944	4 058
	5	1.414	0.593	10.748	3 404
	6	1.459	0.579	11.386	3 690
均值	1.339	0.594	10.532	3 412	3 148

力更加良好。此外,根据沥青路面设计规范,冬寒区($\geq 3\,000\,\mu\epsilon$)与冬暖区($\geq 2\,500\,\mu\epsilon$)的弯拉应变要求,结合沥青弯曲流变试验,可以判定复合改性沥青再生混凝土冬季使用的温度范围较 SBS 改性沥青的再生混凝土低 5~10℃,这一结果表明采用 SBS/橡胶复合改性沥青制备的再生沥青混合料可以更好地应对现阶段中国气候多变的影响,延伸再生沥青混凝土的服役温度范围,更加适用于青海地区。

2.2 约束温度应力试验

沥青混合料约束温度应力收缩试验(TSRST)通过固定试件初始位置,以限制沥青混合料在降温过程中产生收缩,模拟路面实际使用过程中的约束作用,可以更好地评价沥青混合料低温性能。研究采用的初始试验温度为 55℃,随后以 5℃/h 的降温速率降温至沥青混合料断裂,试验过程中记录被约束试件的表面温度和被约束试件产生的拉力。采用尺寸为 250 mm×50 mm×50 mm 的棱柱体小梁试件,每种沥青混合料测试样品为 3 件,实测两种再生沥青混合料的典型温度-应力发展曲线如图 4 所示。

约束试件温度应力试验可以获得冻裂温度、冻断强度、转折点温度及温度应力曲线等评价低温抗裂性的指标^[21],试验结果如表 3 所示。本文使用冻断

试验曲线的变化斜率及冻断温度对再生沥青混合料进行性能表征。

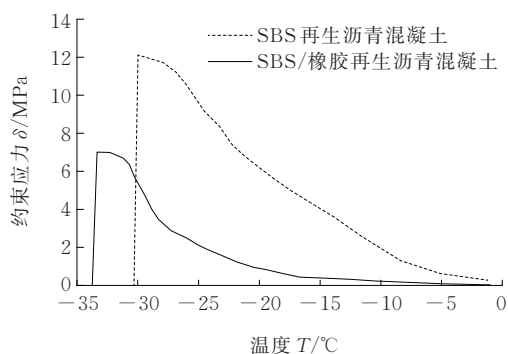


图 4 约束应力—温度关系曲线

表 3 约束试件温度应力试验结果

新加沥青类型	冻断温度/℃	冻断强度/ MPa	转化点温 度/℃	
SBS/橡胶复 合改性沥青	1	−33.6	8.01	−26.7
	2	−35.2	7.21	−27.9
	3	−32.9	9.43	−25.7
	均值	−33.9	8.22	−26.8
SBS 改性沥青	1	−29.1	12.12	−18.6
	2	−27.6	11.61	−17.5
	3	−26.1	10.13	−17.0
	均值	−27.6	−11.29	−17.7

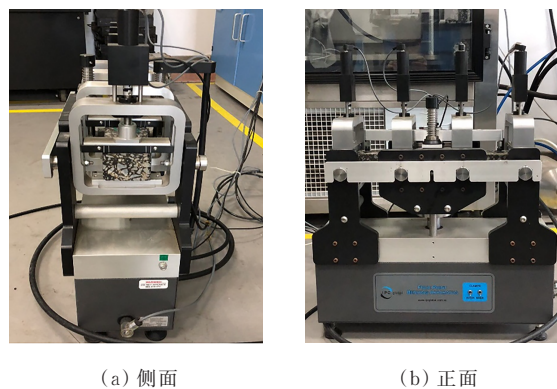
由图 4 及表 3 可以看出:① 不同改性沥青的再生混合料在被约束降温过程中有着显著不同的温度应力发展模式,SBS 改性沥青混合料较 SBS/橡胶复合改性沥青混合料的温度—应力曲线在初期阶段上升明显,SBS/橡胶复合改性沥青混合料在初期时基本趋近于平台,这一结果表明 SBS/橡胶复合改性沥青混合料在被约束的情况下,温度降低过程中存在明显的应力松弛,而 SBS 改性沥青再生沥青混合料应力增长速度过快表明其应力松弛效应较弱,这可能与 SBS/橡胶复合改性沥青中存在胶粉颗粒有关,胶粉颗粒在拉升过程中呈现高弹性而使得应力获得释放;② 两种再生沥青混合料的冻断温度亦存在显著的差异,类似于低温弯曲的试验结果,SBS/橡胶复合改性沥青的再生沥青混合料平均冻断温度亦较 SBS 改性沥青的再生混合料低约 6 °C。同样地,转化点温度与冻断温度呈现类似规律,但两者差值更大,这也体现了复合改性再生沥青混合料抗温度开裂能力较

佳。然而,复合改性沥青再生混合料强度较低,这与低温弯曲试验的劲度模量结果一致,可能是未溶胀的橡胶颗粒降低了承载的有效面积。

综合以上研究结果可知:复合改性沥青的再生混合料具有较好的应力松弛能力,低温性能好,其与沥青低温弯曲试验结果一致,表明复合改性沥青的再生混合料可适应更低的服役温度,有利于在青海严寒地区的进一步推广使用。

2.3 四点弯曲疲劳试验

由于再生沥青混合料现阶段多用于中、下面层,根据结构受力分析可知,此层沥青混合料受到拉应力作用,在反复车轮荷载作用下,沥青路面可能产生一定的疲劳开裂。为此,在评价再生沥青混凝土材料的开裂性能时,需要关注其抗疲劳开裂情况。研究采用四点弯曲疲劳试验(T0739—2011),测试了两种再生沥青混凝土的疲劳性能。试验温度为(15±0.5) °C,加载频率为(10±0.1) Hz,采用恒应变控制的连续偏正弦加载模式,试样为长度(380±5) mm、厚度(50±5) mm、宽度(63.5±5) mm 的小梁试件。试验中采用 400 με、600 με 恒应变控制,试验装置如图 5 所示。试验终止条件为弯曲劲度模量降低到稳定发展阶段的起始弯曲劲度模量的 30% 对应的加载循环次数,而未采用广泛的 50% 的初始劲度模量,这是因为已有研究表明改性沥青的疲劳开裂过程存在平台区,往往 50% 初始模量并不是改性沥青的实际疲劳破坏^[10,22]。



(a) 侧面

(b) 正面

图 5 四点弯曲疲劳寿命试验装置

四点弯曲疲劳试验结果见表 4。由表 4 可知:无论应变水平在 400 με 还是 600 με 的情况下,SBS/橡胶复合改性沥青再生混凝土的平均疲劳寿命均高于

表4 复合改性沥青混合料疲劳试验结果

新加沥青类型	应变水平/ $\mu\epsilon$	初始模量/MPa	疲劳寿命/次
SBS/橡胶复合 改性沥青	400	2 856	698 524
		2 976	756 324
		3 123	772 091
	均值	2 985	742 313
		3 574	495 863
		3 736	574 961
	600	3 616	544 544
		3 642	538 456
		3 245	395 642
		2 986	335 612
SBS改性沥青	400	3 591	374 447
		3 274	368 567
		4 289	195 862
	600	3 736	254 862
		4 800	338 678
		4 275	263 134
	均值		

SBS改性沥青再生混合料,400 $\mu\epsilon$ 、600 $\mu\epsilon$ 时分别超过101%、105%,这表明在相同的车辆荷载作用下,复合改性沥青较一般的SBS改性沥青再生沥青混合料可极大地增加使用寿命。此外,对比应变发生改变后两种再生沥青混合料的疲劳寿命变化比,可以发现:复合改性沥青对应变的敏感程度较低。此外,研究中对比两种改性沥青的再生沥青混合料,发现两种复合改性沥青的疲劳过程不同于基质沥青,其疲劳过程明显分为3个阶段,图6为应变水平600 $\mu\epsilon$ 情况下两种再生沥青混合料疲劳破坏过程,该曲线表征了复合改性沥青疲劳初始为迅速下降,称为初

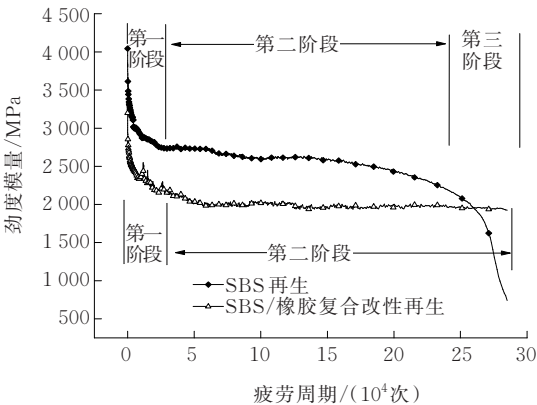


图6 再生沥青混凝土板梁四点弯曲疲劳试验结果(应变水平:600 $\mu\epsilon$)

始阶段,之后迅速进入稳定阶段,最后步入微裂纹迅速扩展的破坏阶段。与此同时,对比两种再生沥青混合料疲劳破坏过程可以发现,SBS/橡胶复合改性沥青再生混合料的第二阶段较SBS改性沥青的再生混合料具有明显的延长,是因为其在橡胶及SBS改性剂的共同作用下,再生沥青混合料内生成了连续的聚合物网络结构,当微裂纹产生后,裂缝扩展至聚合物网络后,被其弹性所阻挡,并吸收了其断裂的能量,从而降低了再生沥青混合料的裂缝快速发展,延长了再生沥青混凝土的疲劳寿命^[23-25]。

3 结论

根据低温弯曲蠕变试验、约束温度应力试验及四点弯曲疲劳试验对两种再生沥青混合料的抗开裂能力进行评估,得到如下主要结论:

- (1) 低温弯曲蠕变试验及约束温度应力试验结果表明:橡胶的加入可提高再生沥青混凝土的低温性能,SBS/橡胶复合改性沥青再生混合料较SBS改性沥青再生混合料可延伸路面的服役温度范围6℃左右,有利于西北寒冷地区的再生沥青混合料的推广应用。
- (2) 疲劳试验结果表明:SBS/橡胶复合改性沥青再生混合料的稳定阶段较SBS改性沥青的再生混合料具有明显的延长,这说明疲劳过程中微裂纹扩展至聚合物网络被吸收断裂能量,有效地抑制微裂纹发展,从而延长了再生沥青混凝土的疲劳寿命。
- (3) 低温开裂及疲劳开裂试验结果表明:SBS/橡胶复合改性沥青再生混合料较SBS改性沥青再生混合料具有更佳的抗开裂能力,是一种较为有效的解决再生沥青混合料抗开裂能力不佳的技术方法,值得进一步推广使用。

参考文献:

[1] 牛文广. 沥青路面就地热再生技术现状与发展历程[J]. 中外公路,2019,39(5):50-59.

[2] 李东升. 高比例RAP厂拌热再生沥青混合料应用技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[3] 朱成. 高比例RAP热再生沥青混合料性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

- [4] YAN Y, ROQUE R, COCCONCELLI C, et al. Evaluation of cracking performance for polymer-modified asphalt mixtures with high RAP content[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(S1):450-470.
- [5] 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):118-123.
- [6] 何志敏. 复合改性UTAC薄层罩面在北京高速公路中的应用[J]. 中外公路, 2018, 38(2):75-79.
- [7] 王枫. 废轮胎胶粉改性沥青的机理及其应用研究[D]. 上海:华东理工大学, 2015.
- [8] 刘汉中. 废旧轮胎橡胶粉复合改性沥青性能试验研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010.
- [9] LÓPEZ-MORO F J, MORO M C, HERNÁNDEZ-OLIVARES F, et al. Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48:691-699.
- [10] ASGHARZADEH S M, SADEGHI J, PEIVAST P, et al. Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways[J]. Construction and Building Materials, 2018, 184:248-257.
- [11] 吴春颖, 于明明, 刘开琼. 橡胶沥青再生旧沥青路面技术应用研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(1):64-67.
- [12] 汪海年, 张琛, 方俊, 等. 橡胶热再生混合料低温性能与细观特征研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11):123-128.
- [13] 何亮, 马育, 黄晓明, 等. 再生胶改性沥青性能及其微观结构研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2):227-231.
- [14] 韦大川, 王云鹏, 李世武, 等. 橡胶粉与SBS复合改性沥青路用性能与微观结构[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(3):525-530.
- [15] 刘勇. SBS/胶粉复合改性沥青机理与性能评价研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- [16] ZHU J, BALIEU R, WANG H. The use of solubility parameters and free energy theory for phase behaviour of polymer-modified bitumen: a review[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 22(4):757-778.
- [17] ZHANG F, HU C. The research for structural characteristics and modification mechanism of crumb rubber compound modified asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2015, 76:330-342.
- [18] DUAN S, MUHAMMAD Y, LI J, et al. Enhancing effect of microalgae biodiesel incorporation on the performance of crumb Rubber/SBS modified asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237:117725.
- [19] 房占永. 厂拌热再生高模量沥青混合料技术研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- [20] 交通部公路科学研究院. 公路沥青路面再生技术规范: JTGF41—2008[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [21] 田小草, 应荣华, 郑健龙. 沥青混凝土温度应力试验及其计算方法研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4):14-18.
- [22] 郑健龙, 吕松涛. 沥青混合料非线性疲劳损伤模型[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5):21-28.