

文章编号:1671-8879(2019)04-0027-08

# 厂拌热再生 SBS 改性沥青混合料抗裂性能

王 杰,秦永春,曾 蔚,黄颂昌,徐 剑

(交通运输部公路科学研究院 道路结构与材料交通行业重点实验室(北京),北京 100088)

**摘 要:**为了研究厂拌热再生 SBS 改性沥青混合料的抗裂性能,采用半圆弯拉试验,通过断裂能分析中低温条件下旧料掺量、再生剂掺量对再生沥青混合料抗裂性能的影响;同时借助数字散斑技术,对半圆弯拉试验加载全过程中试件表面图像进行散斑处理,对其裂缝尖端水平应变场信息以及裂缝扩展特征进行评价,对比分析水平应变-时间曲线的变化规律;并研究长期老化和冻融循环作用对再生沥青混合料抗裂性能的衰减特性。研究表明:中低温条件下,再生沥青混合料的抗裂性能随旧料掺量的增加呈二次多项式递减,使用再生剂无法改变这种递减关系,但有助于减缓其劣化趋势,当旧料掺量(质量分数,下同)小于 30%时,再生沥青混合料抗裂性能接近新拌改性沥青混合料,但抗老化性能较差;再生沥青混合料砂浆易形成受力薄弱界面,再生剂可延长其开裂时间,并提高裂尖水平应变峰值,尤其对于大比例废旧 SBS 改性沥青混合料(RAP-SBS)再生改善效果更明显;影响再生沥青混合料低温抗裂性能的各因素依次为温度、旧料掺量、长期老化,其中温度的影响最显著;再生沥青混合料低温抗裂性能对冻融循环次数的敏感度随旧料掺量的增加而增大,指数模型可以较好表征再生沥青混合料低温抗裂性能随冻融循环次数的衰减状况,其损伤程度随冻融次数的增加大致分为快速损伤期和稳定损伤期 2 个阶段。

**关键词:**道路工程;再生 SBS 改性沥青混合料;断裂能;数字散斑技术;长期老化;冻融循环

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.004

## Crack resistance of mixture with reclaimed SBS modified asphalt pavement from central mixing plant

WANG Jie, QIN Yong-chun, ZENG Wei, HUANG Song-chang, XU Jian

(Key Laboratory of Road Structure & Material of Ministry of Transport (Beijing), Research Institute of Highway of Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To study the crack resistance of a mixture with reclaimed styrene-butadiene-styrene modified asphalt pavement (RAP-SBS) from a central mixing plant, a semi-circular bending test was performed to evaluate the effect of the RAP-SBS and rejuvenating agent content on the resistance at medium and low temperatures via fracture energy. At the same time, the specimen surface image during the loading process of the test was subjected to speckle processing using a digital speckle correlation technique. The horizontal strain field at the crack tip and crack development characteristics of the recycled mixture were analyzed as well as the variation law of the horizontal strain-time curve. The effects of long-term aging and freeze-thaw cycles on the

收稿日期:2019-02-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600100);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(2017-9089)

作者简介:王 杰(1987-),男,四川成都人,助理研究员,E-mail:j. wang@rioh. cn.

crack resistance were also analyzed. The results show that the recycled mixture crack resistance decreases in accordance with the quadratic polynomial as the RAP-SBS content increases at medium and low temperatures. The quadratic polynomial relationship cannot be changed by the rejuvenating agent, but it can help to slow the deterioration trend. When RAP-SBS content is less than 30%, the crack resistance is near that of a new mixture but the anti-aging property is poor. The mortar of the recycled mixture easily forms a weak interface and the rejuvenating agent can prolong the cracking time. The horizontal strain peak at the crack tip also increases. For a mixture with high RAP-SBS contents the improvement is more obvious. The influence degrees of low temperature crack resistance are shown in order from temperature, from reclaimed mixture content to long term aging. The influence of temperature is highly significant. The sensitivity of the low temperature recycled mixture crack resistance to the freeze-thaw cycle increases, as the RAP-SBS content increases and the exponential model can better reflect the attenuation trend between the recycled mixture crack resistance and freeze-thaw cycles. The damage degree can be divided into two stages, a rapid damage period and a stable damage period. 10 tabs, 9 figs, 17 refs.

**Key words:** road engineering; recycled SBS modified asphalt mixture; fracture energy; digital speckle correlation technique; long term aging; freeze-thaw cycle

## 0 引言

SBS 改性沥青因其优良的力学性能<sup>[1-2]</sup>,自 21 世纪初开始在中国沥青路面铺筑中广泛使用,尤其是高速公路。因此,开展废旧 SBS 改性沥青混合料(reclaimed SBS modified asphalt pavement, RAP-SBS)再生技术的研究对促进中国道路可持续发展具有重要意义。与其他再生方式相比,厂拌热再生沥青混合料质量相对可靠<sup>[3-4]</sup>,应用最广。进行厂拌再生沥青混合料配合比设计时,目前均假定新旧沥青完全混溶,当旧料掺量(质量分数,下同)小于 20%时是可行的<sup>[5]</sup>;当旧料掺量超过 20%时,受旧沥青含量、搅拌时间与温度等因素的影响,新旧沥青难以均匀混溶,存在软弱夹层,在荷载作用下,软弱夹层会形成许多细微裂缝,加上旧沥青本身的硬脆特性,这都直接影响到再生沥青混合料的抗裂性<sup>[6]</sup>。

侯睿等采用劈裂试验研究了再生沥青混合料的低温性能,发现充分预热旧料、增加新旧料拌和时间有助于提高再生沥青混合料的低温抗裂性<sup>[7]</sup>。何兆益等基于小梁低温弯曲试验,研究了厂拌热再生沥青混合料的抗裂性,发现随旧料掺量的增加,再生沥青混合料弯曲破坏强度变化幅度较小,而弯曲破坏应变显著降低,脆性逐渐增大<sup>[8]</sup>。耿久光等研究了热再生沥青混合料全生命周期内的低温抗裂性,发现旧料掺量小于 40%时,其低温抗裂性接近新料,且抗老化能力优于普通沥青混合料<sup>[9]</sup>。Sabahfar 等

采用半圆弯拉(SCB)试验、电控沥青罩面测试系统试验(OT)研究了再生沥青混合料的低温抗裂性,发现 SCB 和 OT 试验均适用于评价旧料掺量与性质对再生沥青混合料低温抗裂性的影响,指出旧料性质对抗裂性的影响要大于旧料掺量<sup>[10]</sup>。Shu 等也采用 SCB 试验评价再生沥青混合料的抗裂性,指出旧料掺量的增加会增大再生沥青混合料的抗拉强度,但也会大幅降低其在峰值荷载下的应变,降低混合料 J 积分数值<sup>[11]</sup>。

现有研究涵盖了旧料掺量与性质、性能评价方法、再生工艺等对再生沥青混合料抗裂性的影响,但研究对象主要针对普通沥青混合料,缺乏关于 SBS 改性沥青混合料抗裂性的系统研究。针对厂拌热再生沥青混合料,主要关注点在于旧料掺量,明晰不同 RAP-SBS 掺量对混合料抗裂性的影响,可实现差异化应用;由于聚合物 SBS 的存在,再生剂对于再生沥青混合料抗裂性的改善尚存在不确定性;且沥青路面宏观裂缝是由沥青混合料内部细观损伤发展形成<sup>[12]</sup>,仅凭宏观试验可能无法从本质上了解裂纹产生机制,数字散斑技术(DSCT)通过测试物体变形过程中的散斑图像,可获得试件表面的全场变形信息,有助于研究其开裂特性<sup>[13-14]</sup>;此外,频繁的冻融循环会对沥青路面产生严重损伤<sup>[15]</sup>,然而目前缺乏针对再生改性沥青路面的研究。

为此,本文采用 SCB 试验,研究了 RAP-SBS 掺量和再生剂掺量对再生沥青混合料中低温抗裂性能的影响,借助 DSCT 分析了裂缝尖端水平应变场信

息及裂缝扩展特征,并研究了长期老化和冻融循环对再生沥青混合料低温抗裂性的作用效应,以期为 RAP-SBS 的再生应用提供指导。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

RAP-SBS 取自北京一开封(京开)高速公路面层铣刨料,经测试其沥青用量为 3.6%,再生沥青混合料所用新沥青为 SBS 改性沥青(I-D),新、旧改性沥青的主要技术指标见表 1,再生剂(RA)的主要技

术指标见表 2。

表 1 新、旧 SBS 改性沥青技术指标

Tab. 1 Properties of old and new SBS modified asphalt

性能		旧沥青	新沥青
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm		31.3	48.1
软化点/°C		70.0	69.3
延度(5 °C, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		0.1	30.7
135 °C 黏度/(Pa·s)		2.36	1.05
沥青薄膜加热试验	质量变化/%		0.52
	针入度比(25 °C, 100 g, 5 s)/%		72.9
	延度(5 °C, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		16.1

表 2 再生剂主要技术指标

Tab. 2 Main properties of rejuvenating agent

参数	黏度(60 °C)/(Pa·s)	闪点/°C	饱和分含量/%	芳香分含量/%	薄膜烘箱试验前后黏度比	薄膜烘箱试验前后质量变化/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
参数值	1.202	267	26.04	42.27	1.8	-2.62	1.013

再生剂对老化沥青性能的恢复试验见表 3。由表 3 可知,当再生剂掺量为 6% 时,改性沥青针入度、软化点、延度均可满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2008)中 SBS 改性沥青(I-D 型)技术要求;结合黏韧性试验,对比不同掺量下改性沥青的抗变形能力,拟定再生剂用量为 6%。

选择 AC-13 作为再生沥青混合料类型,RAP-SBS 掺量为 0%、15%、30%、50% 和 70%,不同混合料的级配尽可能一致,见表 4。按照马歇尔设计法确定再生沥青混合料沥青用量,见表 5。

表 3 再生剂对老化改性沥青性能的影响

Tab. 3 Effect of rejuvenating agent on aged modified asphalt

指标	不同再生剂掺量(%)下的性能指标		
	3	6	9
25 °C 针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1mm	39.6	51.2	64.9
软化点/°C	67.5	65.1	62.8
延度(5 cm·min <sup>-1</sup> , 5 °C)/cm	13.8	22.2	30.3
135 °C 黏度/(Pa·s)	1.370	1.111	0.841
黏韧性/(N·m)	14.21	11.21	7.53
韧性/(N·m)	5.78	5.45	4.43

表 4 再生沥青混合料矿料级配

Tab. 4 Aggregate gradation of recycled mixtures

RAP-SBS 掺量/%	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0	100.0	97.3	75.1	41.9	28.1	18.2	13.6	10.2	8.0	6.3
15	100.0	97.0	73.2	42.4	27.3	17.8	13.4	10.1	8.0	6.5
30	100.0	97.2	75.0	41.9	29.1	18.7	13.8	10.3	7.9	6.2
50	100.0	97.0	73.4	40.4	28.2	18.4	13.7	10.3	8.0	6.4
70	100.0	96.9	72.6	40.7	28.4	18.6	14.0	10.6	8.4	6.7

表 5 再生沥青混合料沥青用量

Tab. 5 Asphalt contents of recycled mixtures

RAP-SBS 掺量	0	15 <sup>#</sup>	15 <sup>*</sup>	30 <sup>#</sup>	30 <sup>*</sup>	50 <sup>#</sup>	50 <sup>*</sup>	70 <sup>#</sup>	70 <sup>*</sup>
新沥青用量	4.60	4.06	4.03	3.52	3.46	2.90	2.79	2.28	2.13
总沥青用量	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.70	4.70	4.80	4.80

注: # 代表未添加再生剂; \* 代表添加了再生剂。

### 1.2 试验方案

采用 SCB 试验评价再生改性沥青混合料的抗裂性能,通过在设定尺寸的简支半圆试件跨中顶部位置作用恒定荷载直至试件断裂,见图 1。与小梁弯曲试验相比,其应力状态更接近于实际路面。采

用旋转压实仪成型直径为 150 mm、高为 105 mm 的圆柱形试件,控制空隙率为 7%±0.5%,然后切割成直径为 150 mm,厚为 50 mm 的半圆形试件,预切缝深度为 15 mm,试件底面两支点的间距为 120 mm。试验加载速率为 1 mm/min,试验温度为

-20℃、-10℃、0℃、25℃。每种工况平行试件为4个。

断裂能  $G_f$  计算为

$$G_f = \frac{W_f}{(r-a_f)t} \quad (1)$$

$$W_f = \int p du \quad (2)$$

式中: $G_f$  为断裂能( $J/m^2$ ); $r$  为试件半径(m), $a_f$  为预切缝深度(m); $t$  为试件厚度(m); $p$  为试验荷载(kN); $u$  为荷载作用下的位移(mm); $W_f$  为过程参数。



图1 SCB试验

Fig. 1 SCB test

DSCT 是一种基于光学原理的非接触式图像处理技术,其测试装置主要由电器耦合器、光源、图像采集系统、分析软件构成。通过测试试件变形前后的散斑图像,见图2,计算得到灰度场。利用散斑图像各个点的灰度值进行位置搜索,并以像素为单元,当变形前后区域完全相关时,相关系数为1;若产生变形,相关系数下降。因此,某点的变形可通过最大相关系数的点位置确定<sup>[16]</sup>,相关系数的计算为

$$C_{f,h}(P) = \frac{\sum_{x=-G}^G \sum_{y=-G}^G \left\{ \frac{f(x,y) - f_s}{\sqrt{\sum_{x=-G}^G \sum_{y=-G}^G [f(x,y) - f_s]^2}} - \frac{h(x',y') - h_s}{\sqrt{\sum_{x=-G}^G \sum_{y=-G}^G [h(x',y') - h_s]^2}} \right\}}{\quad} \quad (3)$$

式中: $C_{f,h}(P)$  为  $P$  点的相关系数; $f(x,y)$  为变形前  $P$  点的灰度值; $h(x',y')$  为  $P$  点变形后的灰度值; $f_s, h_s$  分别为变形前、后区域灰度值; $G$  为变形前区域内各个点的坐标值; $G'$  为变形后区域内各个点的坐标值。

长期老化和冻融循环室内模拟方法可分别参照

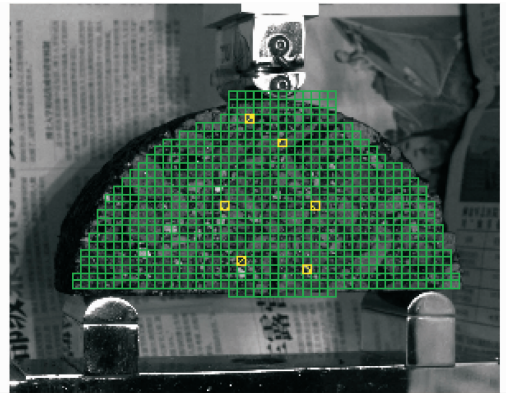


图2 SCB试验试件散斑图像

Fig. 2 Seckle image of specimen in SCB test

现行《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011),其中冻融循环次数分别为1、4、7、10和15。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 中低温条件下再生沥青混合料的抗裂性

不同温度条件下再生沥青混合料的断裂能见表6。

表6 不同温度条件下再生沥青混合料的断裂能

Tab. 6  $G_f$  of recycled mixture at different temperatures

RAP-SBS 掺量/%	不同温度(℃)下的 $G_f/(J \cdot m^{-2})$			
	-20	-10	0	25
0	1 563	1 787	2 943	3 353
15#	1 542	1 732	2 862	3 289
30#	1 450	1 697	2 110	3 221
50#	1 423	1 670	2 040	2 737
70#	1 197	1 510	1 790	2 212
15*	1 572	1 801	2 867	3 390
30*	1 560	1 827	2 677	3 388
50*	1 497	1 727	2 123	2 975
70*	1 457	1 710	2 067	2 507

由表6可知,中低温条件下,再生沥青混合料相比于新料(RAP-SBS掺量为0%),其抗裂性有所劣化,且RAP-SBS掺量越大,抗裂性越差,添加再生剂可起到改善作用。当RAP-SBS掺量小于30%时,再生沥青混合料中低温抗裂性与新料水平接近。

表7为拟合结果,其中, $y$ 为断裂能, $x$ 为RAP-SBS掺量。可知,中低温条件下,随旧料掺量的增加,再生沥青混合料的断裂能呈二次多项式递减,使用再生剂虽无法改变这种多项式递减关系,但减小了断裂能的变化斜率(为对多项式求导数后,计算的各掺量点值),致使再生沥青混合料抗裂性的劣化趋势得到减缓。

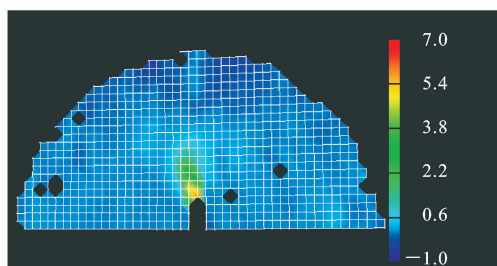
表 7 再生沥青混合料断裂能与 RAP-SBS 掺量拟合结果

Tab. 7 Fitting results between  $G_r$  and RAP-SBS contents of recycled mixture

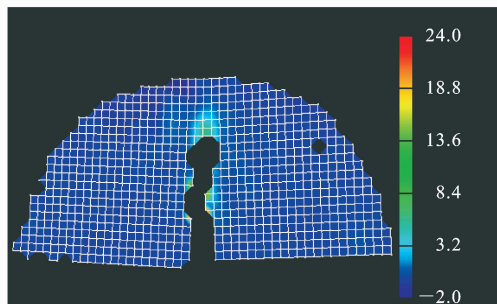
温度/℃	拟合公式	相关系数	不同 RAP-SBS 掺量(%)下的斜率			
			15	30	50	70
-20	未添加再生剂 $y = -0.068x^2 - 0.177x + 1556.1$	0.95	-2.23	-4.26	-6.98	-9.70
	添加了再生剂 $y = -0.028x^2 + 0.269x + 1568.3$	0.96	-0.57	-1.41	-2.53	-3.65
-10	未添加再生剂 $y = -0.039x^2 - 0.802x + 1772.5$	0.95	-1.97	-3.14	-4.70	-6.26
	添加了再生剂 $y = -0.037x^2 + 1.233x + 1792.9$	0.76	0.12	-0.99	-2.47	-3.94
0	未添加再生剂 $y = -0.007x^2 - 17.359x + 3004.7$	0.92	-17.57	-17.78	-18.06	-18.34
	添加了再生剂 $y = -0.008x^2 - 13.784x + 3003.9$	0.93	-14.02	-14.26	-14.58	-14.90
25	未添加再生剂 $y = -0.256x^2 + 1.442x + 3351.4$	0.99	-6.24	-13.92	-24.16	-34.40
	添加了再生剂 $y = -0.289x^2 + 7.899x + 3355.5$	0.99	-0.77	-9.44	-21.00	-32.56

## 2.2 再生沥青混合料裂缝扩展特性

图 3 为利用 DSCT 计算的 25 ℃ 条件下再生沥青混合料裂缝尖端的水平应变场云图。由图 3 可知,裂缝未产生时,再生沥青混合料裂尖产生应变集中,呈带状分布,尖端局部区域应变较大。随着加载的进行,应变逐渐达到最大,这是由于预切口尖端存在应力集中,产生了应力奇异场,致使应变达到最大,当超过材料的极限破坏应变时,裂缝产生。之后裂尖逐渐向试件顶部扩展,同时最大应变也向上移动,且最大应变总位于裂尖处。



(a) 即将产生裂缝



(b) 裂缝扩展

单位: %

图 3 再生沥青混合料水平应变场云图(RAP-SBS 掺量为 70%\*)

Fig. 3 Horizontal strain cloud of recycled mixture (RAP-SBS content is 70%\*)

图 4 为再生沥青混合料产生裂缝破坏时的图像。由图 4 可知,裂缝发展会避开粗集料,主要沿砂浆位置分布,说明砂浆易产生较大水平拉应变,形成受力薄弱界面。同时也说明图 3 中水平应变带的弯

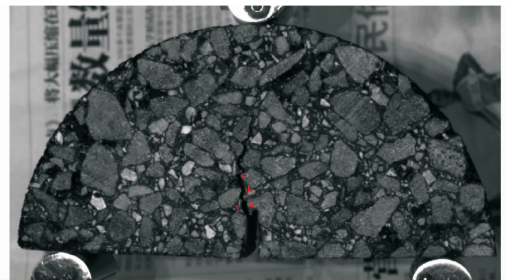


图 4 再生沥青混合料产生裂缝破坏(RAP-SBS 掺量为 70%\*)

Fig. 4 Crack failure of recycled mixture

(RAP-SBS content is 70%\*)

曲分布特征,即应变带会避开粗集料沿周围薄弱界面分布。

为了进一步分析再生沥青混合料裂缝扩展特性,选取图 4 中开裂点(位于沥青砂浆处),其水平应变-时间曲线见图 5。

由图 5 可知,再生沥青混合料和新料水平应变随时间的变化趋势基本一致,大致可分为 3 个阶段:①线性增长阶段,水平应变随时间延长基本线性增长,此时无裂纹产生;②快速增长阶段,随着荷载持续增加,试件内部产生微裂纹,在裂尖形成应力集中,导致应变迅速增大;③突变阶段,由于微裂纹贯通,试件开裂,致使应变迅速减小。

由图 5 还可知,不同掺量再生沥青混合料水平应变发生突变的时间,即开裂时间,以及水平应变峰值相差较大,见图 6、图 7。

由图 6、图 7 可知,随 RAP-SBS 掺量的增加,再生沥青混合料的开裂时间提前,水平应变峰值减小,添加再生剂可延缓开裂时间,并提高水平应变峰值,当 RAP-SBS 掺量较高时,改善效果较明显。当 RAP-SBS 掺量小于 30% 时,再生沥青混合料的抗裂特性与新料接近,这与断裂能试验结果类似。

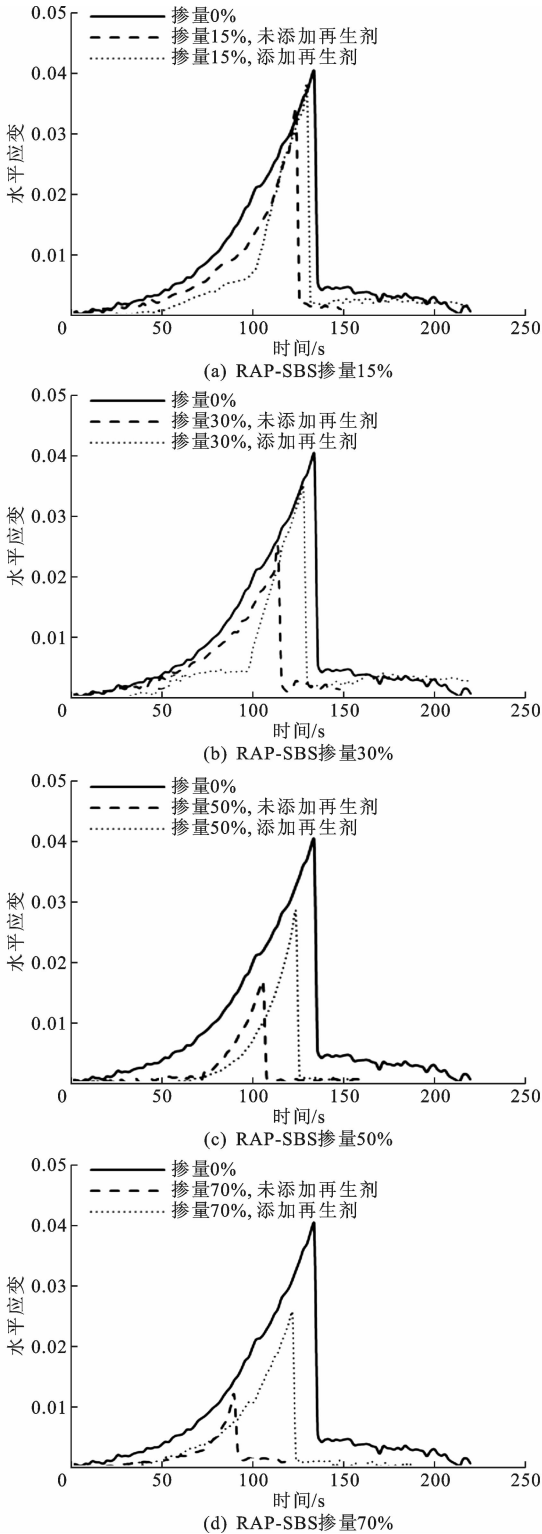


图5 再生沥青混合料水平应变-时间曲线

Fig. 5 Horizontal strain-time curves of recycled mixture

### 2.3 长期老化对再生沥青混合料低温抗裂性的影响

经历长期老化后,再生沥青混合料的断裂能见表8,其中相对变化率为老化后断裂能相较于老化前断裂能的变化率。

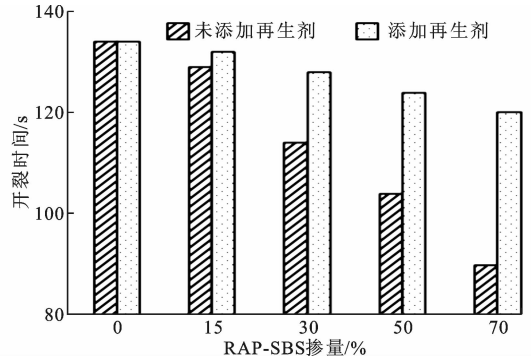


图6 再生沥青混合料开裂时间

Fig. 6 Cracking time of recycled mixtures

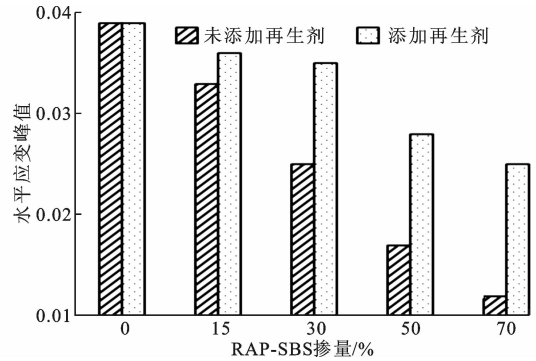


图7 再生沥青混合料水平应变峰值

Fig. 7 Maximum horizontal strain of recycled mixtures

表8 经长期老化后再生沥青混合料的断裂能

Tab. 8  $G_f$  of recycled mixture after long-term aging

RAP-SBS 掺量/%	不同温度(°C)下的 $G_f$					
	-20		-10		0	
	数值/ ( $J \cdot m^{-2}$ )	相对变 化率/%	数值/ ( $J \cdot m^{-2}$ )	相对变 化率/%	数值/ ( $J \cdot m^{-2}$ )	相对变 化率/%
0	1 470	-6.0	1 761	-1.5	2 687	-8.7
15*	1 473	-6.3	1 616	-10.3	2 581	-9.9
30*	1 450	-7.1	1 582	-13.4	2 370	-11.5
50*	1 423	-4.9	1 577	-8.7	2 083	-1.9
70*	1 370	-6.0	1 437	-16.0	1 923	-7.0

由表8和表6对比可知:经过长期老化,再生沥青混合料的断裂能有所劣化,且均低于新老老化后的水平。低温条件下,当RAP-SBS掺量小于30%时,再生沥青混合料断裂能相对变化率大于新料,表明再生沥青混合料抗老化性能较差;当RAP-SBS掺量大于50%时,断裂能变化无明显规律,这与温度和RAP-SBS掺量有关。

表9给出了RAP-SBS掺量、温度和长期老化对再生沥青混合料低温断裂能的方差分析结果,显著性水平为0.05。表9中,SS为离差平方和,DF为自由度,MS为均方差,P值为F值对应的概率,F为F分布统计量。

表 9 再生改性沥青混合料断裂能方差分析结果

Tab. 9 ANOVA results for  $G_f$  of recycled mixtures

类型	SS	DF	MS	P 值	F
RAP-SBS 掺量	1 075 013	4	268 753	0.278	2.63
温度	6 273 330	2	3 136 665	<0.001	3.24
长期老化	50 586	1	50 586	0.629	4.08

通过比较表 9 中 SS 可知:再生沥青混合料低温抗裂性影响因素依次为温度、RAP-SBS 掺量、长期老化;通过比较 P 值可知,温度对再生沥青混合料断裂能的影响显著,而 RAP-SBS 掺量和老化对断裂能的影响一般。

### 2.4 冻融循环对再生沥青混合料低温抗裂性的影响

规定次数冻融循环作用后,再生沥青混合料 SCB 试验温度为  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ,试验结果见图 8。

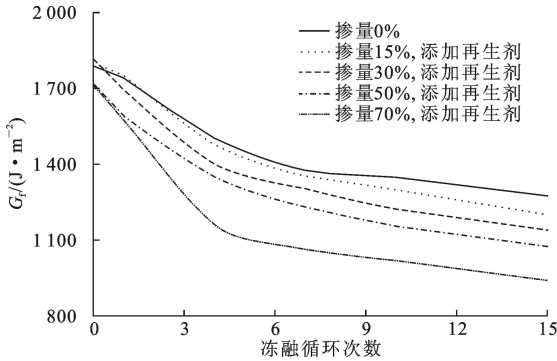


图 8 再生沥青混合料断裂能随冻融循环次数  $n$  的变化

Fig. 8  $G_f$  changes of recycled mixture with  $n$

由图 8 可知:再生沥青混合料的断裂能随冻融循环作用次数的增加而减小,前 4 次冻融循环作用下,再生混合料断裂能衰减较快,冻融循环作用 7 次后衰减趋于平缓;15 次冻融循环作用后,RAP-SBS 掺量为 15%、30%、50%、70%的再生沥青混合料断裂能比新料分别减小 5.9%、10.7%、15.5%、26.3%,表明 RAP-SBS 掺量越大,开裂风险越大。

图 8 还反映出混合料断裂能随冻融循环作用次数非线性变化,为此,本文利用指数模型对冻融循环

作用下的断裂能进行分析,即

$$y_1 = a + be^{cx_1} + \epsilon \quad (3)$$

式中: $y_1$  为因变量(断裂能); $a$  为参数(断裂能初值); $b$  为参数(性能衰减速率); $c$  为参数(方程的曲率); $x_1$  为解释变量(冻融循环作用次数); $\epsilon$  为误差项,符合正态分布。

式(3)假定变量  $\epsilon$  的均值为零,其方差具备齐次性,且和  $y_1$  不相关。利用最小二乘法拟合参数,考虑  $\epsilon$  具有正态分布特性,可通过  $\chi^2$  评价拟合参数的有效性,并利用方差分析检验了模型拟合的显著性,见表 10。

由表 10 可知,拟合参数  $R_{adj}^2$  值均较大,P 值均小于显著性水平 0.05,表明该模型在统计学上是显著的,可以较好反映再生沥青混合料断裂能和冻融循环作用次数的关系。随着 RAP-SBS 掺量的提高, $b$  值逐渐增大,说明再生沥青混合料低温抗裂性对冻融次数的敏感度逐渐增加,性能衰减加速。冻融循环作用会在再生沥青混合料内部形成损伤,影响其性能。因此,可通过冻融循环过程中断裂能的变化来表征材料内部的损伤程度。根据损伤力学,损伤变量  $D$  为<sup>[17]</sup>

$$D = 1 - \frac{G_f(n)}{G_{f0}} \quad (4)$$

式中: $G_f(n)$  为冻融循环  $n$  次后的断裂能; $G_{f0}$  为未冻融试件的断裂能。

再生沥青混合料断裂能损伤变量随冻融循环次数的变化见图 9。由图 9 可知,再生沥青混合料冻融损伤变量随冻融次数的变化规律与新料类似,均可大致分为 2 个阶段:①快速损伤期,该阶段滞留在材料内部的水发生冻胀,使材料内部由无裂缝状态迅速产生微裂纹,产生较多开口孔隙,引起抗裂性能迅速衰减;②稳定损伤期,损伤变量随冻融次数的增加进一步增大,但衰减速度明显减缓,此阶段混合料在冻胀力的作用下,内部微裂纹进一步扩展,独立孔隙相互贯通,对冻胀力产生部分消散作用,因而损伤相对平稳。

表 10 再生沥青混合料指数模型拟合结果

Tab. 10 Exponential model fitting results of recycled mixture

RAP-SBS 掺量/%	$a$		$b$		$c$		减小的 $\chi^2$	$R_{adj}^2$	P 值
	数值	标准误差	数值	标准误差	数值	标准误差			
0	1 244	38.1	560.3	38.000	-0.187	0.035	617.7	0.98	$2.8 \times 10^{-6}$
15	1 151	47.7	590.2	46.100	-0.165	0.029	579.4	0.99	$3.4 \times 10^{-6}$
30	1 125	28.0	639.9	29.172	-0.212	0.025	454.3	0.99	$2.0 \times 10^{-6}$
50	1 051	18.2	698.0	18.368	-0.224	0.015	154.2	0.99	$4.7 \times 10^{-7}$
70	943	36.6	785.9	43.600	-0.278	0.046	1393.9	0.98	$1.6 \times 10^{-5}$

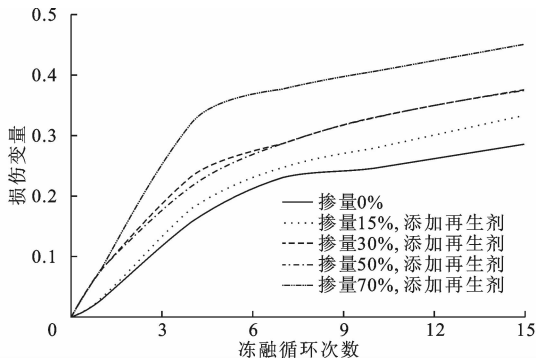


图9 再生沥青混合料断裂能的损伤变量  $D$  随冻融次数  $n$  的变化  
Fig.9  $D$  of  $G_f$  changes of recycled mixture with  $n$

### 3 结 语

(1)中低温条件下,再生改性沥青混合料的断裂能随 RAP-SBS 掺量的增加呈二次多项式递减,使用再生剂无法改变这种递减关系,但有助于减缓其劣化趋势,当 RAP-SBS 掺量小于 30% 时,再生沥青混合料的抗裂性接近新料,但抗老化性能较差。

(2)再生沥青混合料砂浆易形成受力薄弱界面,使用再生剂可延缓其开裂时间,并提高裂尖水平应变峰值,尤其针对大比例 RAP-SBS 再生,改善效果更明显。

(3)再生沥青混合料低温抗裂性影响因素依次为温度、RAP-SBS 掺量、长期老化,其中温度的影响高度显著。

(4)再生沥青混合料低温抗裂性能对冻融循环次数的敏感度随旧料掺量的增加而增大,利用指数模型可以较好表征低温抗裂性随冻融循环次数的衰减状况,其损伤程度随冻融次数的增加大致分为快速损伤期和稳定损伤期 2 个阶段。

(5)本结论仅是在一种 RAP-SBS 材料的基础上得到的,在 RAP-SBS 材料改变后是否仍然具有很好的重现性,还有待检验;且本文仅是基于室内试验得到的,仍有待工程检验。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 朱梦良,张起森. SBS 改性沥青及 SMA 混合料的应用研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 13-20.  
ZHU Meng-liang, ZHANG Qi-sen. Applied research on SBS modified bitumen and SMA mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 13-20.

[2] GOLI A, ZIARI H, AMINI A. Influence of carbon nanotubes on performance properties and storage sta-

bility of SBS modified asphalt binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(8): 04017070.

- [3] XIAO F, AMIRKHANIAN S N. Moisture susceptibility and rut resistance of RAP asphalt mixtures with high percentage of natural sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(7): 04014217.
- [4] DONG F, YU X, XU B, et al. Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder[J]. Construction & Building Materials, 2017, 134: 594-601.
- [5] ZAUMANIS M, MALLICK R B, POULIKAKOS L, et al. Influence of six rejuvenators on the performance properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures[J]. Construction & Building Materials, 2014, 71: 538-550.
- [6] GHABCHI R, SINGH D, ZAMAN M, et al. Laboratory characterisation of asphalt mixes containing RAP and RAS[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(9): 829-846.
- [7] 侯睿, 黄晓明, 李海军. 再生工艺对热再生沥青混合料低温抗裂性能的影响[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 10-14.  
HOU Rui, HUANG Xiao-ming, LI Hai-jun. Influence of recycling technology of hot-recycled asphalt mixture's low temperature anti-cracking performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(3): 10-14.
- [8] 何兆益, 陈龙, 陈先勇, 等. 厂拌热再生沥青混合料力学性能及应用研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5): 871-875.  
HE Zhao-yi, CHEN Long, CHEN Xian-yong, et al. Mechanical properties and application research of hot recycled asphalt mixture from central mixing plant[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5): 871-875.
- [9] 耿九光, 戴经梁, 陈忠达. 热再生沥青混合料低温抗裂性能全程评价[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(6): 1029-1032.  
GENG Jiu-guang, DAI Jing-liang, CHEN Zhong-da. Whole process evaluation of low temperature anti-cracking property of hot-recycled asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2008, 32(6): 1029-1032.
- [10] SABAHFAR N, AHMED A, AZIZ S R, et al. Cracking resistance evaluation of mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 29(4): 06016022.