

不同FRAP掺量的再生沥青混合料长期性能研究

张永远¹,孟卫红¹,杨鑫¹,吴昊^{2*},詹易群²,徐昊达²

(1.贵州高速公路实业有限公司,贵州 贵阳 550000;2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:目前沥青路面在精细化回收利用过程中,RAP细集料(FRAP)的利用率远低于RAP粗集料(CRAP),这不仅造成资源浪费,也限制了RAP在再生沥青混合料中更大规模应用。为此,该研究通过半圆拉伸(SCT)试验,基于材料断裂过程中的应变能(弹性、塑性)、表面能等能量演化规律,系统探究了FRAP掺量对再生沥青混合料长期性能的影响,根据其影响规律提出了相应改善措施,并论证了大比例FRAP掺量在再生沥青混合料中应用的可行性。研究结果表明:低温下,当FRAP掺量由0%增至12%时,再生沥青混合料应变能降低39.2%,表明其开裂所需能量急剧下降,更易出现裂缝;再生沥青混合料的表面能下降了71.3%,其裂缝扩展所需能量更少,说明裂缝越容易扩展至完全断裂状态。因此,在严寒地区需要对FRAP的最大掺量进行检验后使用。中温下,随着FRAP掺量的增加,再生沥青混合料的应变能急剧下降,绝大部分能量被用于裂缝的扩展,再生沥青混合料开裂问题较普通沥青混合料更加严重,建议在保证再生沥青混合料高温稳定性的同时,进一步降低新沥青的标号或增加再生剂的掺量。FRAP掺量的增长使得老化沥青含量进一步提高,再生沥青胶结料的变形不协调以及新旧沥青界面的应力集中问题使得再生沥青混合料的疲劳寿命较不含FRAP的沥青混合料下降约53%,疲劳损伤累积速率提高了26.7%。疲劳性能的劣化与FRAP掺量增长直接相关。分步拌和采用部分新沥青与FRAP首先拌和的方式提高了再生沥青混合料内部新旧沥青之间的黏结性能,使得再生沥青混合料的断裂疲劳性能均有一定程度的提高。

关键词:道路工程;RAP细集料(FRAP);再生沥青混合料;半圆拉伸试验;耗散能相对变化率;疲劳开裂性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Long-Term Performance of Recycled Asphalt Mixtures with Various FRAP Contents

ZHANG Yongyuan¹, MENG Weihong¹, YANG Xin¹, WU Hao^{2*}, ZHAN Yiqun², XU Haoda²

(1. Guizhou Expressway Industry Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: At present, in the refined recycling and utilization of asphalt pavement, the utilization rate of fine recycled asphalt aggregates (FRAP) is much lower than that of coarse recycled asphalt aggregates (CRAP). This not only leads to resource waste but also limits the larger-scale application of RAP in recycled asphalt mixtures. Therefore, this study systematically investigated the impact of FRAP content on the long-term performance of recycled asphalt mixtures through the semi-circular tensile (SCT) tests. Based on the energy evolution laws of strain energy (elasticity and plasticity) and surface energy during material fracture processes, corresponding improvement measures were proposed according to the influence patterns identified. Furthermore, the feasibility of applying a large proportion of FRAP in recycled asphalt mixtures was demonstrated. The research results show that at low temperatures, as the FRAP content increased from 0% to 12%, the strain energy of the recycled asphalt mixture decreases by 39.2%. This indicates a sharp decline in the energy required for cracking, making it more susceptible to the formation of cracks. Additionally, the surface energy of the recycled asphalt mixture decreases by 71.3%, resulting in less energy required for crack propagation, which suggests that cracks are more likely to spread to a completely fractured state. Therefore, the maximum allowable FRAP content should be tested before use in extremely cold regions. At medium

收稿日期:2025-03-30 修回日期:2025-05-07

基金项目:贵州省交通运输厅重大科技攻关项目(编号:2024-112-017)

作者简介:张永远,男,工程师.E-mail:413486524@qq.com

*通信作者:吴昊,男,博士,教授.E-mail:haoutk@csu.edu.cn

temperatures, with the increase in FRAP content, the strain energy of the recycled asphalt mixture drops sharply, with the majority of the energy being used for crack propagation. The cracking issue in recycled asphalt mixtures is more serious than that in conventional asphalt mixture. It is recommended to further reduce the grade of new asphalt or increase the content of regenerant while ensuring the high-temperature stability of the recycled asphalt mixture. The increase in FRAP content resulted in a further rise in the content of aged asphalt, leading to a mismatch in the deformation of the recycled asphalt binder and the stress concentration at the interface between the old and new asphalt. As a result, the fatigue life of the recycled asphalt mixture decreases by nearly 53% compared to that of mixtures without FRAP, and the rate of fatigue damage accumulation increases by 26.7%. The deterioration of fatigue performance is directly related to the increase in FRAP content. The use of a stepwise mixing method, where a portion of new asphalt is mixed with FRAP first, enhances the bonding performance between the new and old asphalt within the recycled asphalt mixture, resulting in a certain degree of improvement in the fracture fatigue performance of the recycled asphalt mixture.

Keywords: road engineering; FRAP; recycled asphalt mixture; semi-circular tensile test; relative change rate of dissipated energy; fatigue cracking performance

0 引言

沥青路面在长期服役过程中会由于交通荷载、气候和环境等因素的影响产生各种病害问题。而在维修养护时会产生大量的沥青混合料回收料(RAP)。将这些RAP进行回收利用既可以减少对天然石料的开采,也可以节省沥青这一类不可再生资源,从而达到节省成本和保护环境的目的^[1-3]。但在厂拌热再生过程中,RAP的掺配比例仍然控制在30%以下^[4-5]。限制RAP材料大比例使用的主要原因是RAP的变异性问题,其主要可以分为RAP沥青含量、老化程度、级配变化等。针对这些问题,研究人员开展了大量的论证研究。Cong等^[6]采用圆盘拉伸试验对低RAP含量的再生沥青混合料低温性能进行研究,发现断裂能随着RAP含量的增加而逐渐降低。在相同RAP含量下,温度降低,断裂能也逐渐降低;Shah等^[7]利用间接拉伸试验计算了不同RAP掺量下的再生沥青混合料的开裂温度。结果表明,RAP的加入会较为明显地提高再生沥青混合料的开裂温度。当RAP含量达到40%时,再生沥青混合料的开裂温度相较于新沥青混合料提高了6.1℃,达到-22.8℃;Guo等^[8]采用表面活性SI、Evotherm温拌剂对热拌再生沥青混合料以及温拌再生沥青混合料开展低温弯曲试验,结果表明,RAP含量的增加均会导致热拌再生沥青混合料以及温拌再生沥青混合料的低温抗裂性能下降。添加再生剂的温拌再生沥青混合料、热拌再生沥青混合料结果均具有更高的弯曲拉伸强度;Wang等^[9]结合数字图像技术与SCB试验对再生沥青混合料的裂纹尖端的水平应力场和裂

纹扩展特性开展研究,结果表明,在中低温条件下,再生沥青混合料的断裂能随RAP含量的增加呈二次多项式下降。RAP可以有效地提高再生沥青混合料的低温性能,当RAP含量为30%时,添加RA再生剂后其低温抗裂性能与新沥青混合料相当,但长期性能仍然较差。这些影响因素的变化导致再生沥青混合料质量难以稳定,从而限制了大比例RAP的应用。

为了解决这个问题,道路行业工作者逐渐对RAP的精细化预处理(油石分离技术)开展研究,并衍生出多种新的预处理技术。现有油石分离技术主要分为物理、化学和生物分离3类^[10-14]。总的来说,化学法对分离沥青骨料最有效,但工艺较复杂,成本也较高;生物法分离效率低,技术仍处于探索阶段。物理油石分离技术的关键在于作用方式。传统破碎方式主要基于刚性破碎原理,利用破碎机冲击或挤压,使骨料产生良好的棱角性。但RAP材料组成较为复杂,其表面的老化沥青并非纯刚性材料。因此,传统的破碎机不完全适用于RAP材料。目前,采用转子离心破碎机加工RAP材料的物理分离技术已经引起了道路研究人员的关注,一些道路机械制造商已经开始开发特殊的破碎、分离和筛分设备。物理分离后,粗骨料表面仍残留部分沥青残渣,但技术比较成熟,整体成本较低,具备大规模生产的条件。此外,在北方低温地区具有较好的分离效果。经物理分离后,粒径不超过4.75 mm的颗粒称为RAP细集料(FRAP),剩余部分称为RAP粗集料(CRAP)^[15-17]。一般来说,FRAP中的老化沥青含量超过5%,具有显著的回收利用价值。

目前在再生沥青混合料的应用工程中,CRAP的

利用率显著高于FRAP,这主要是由于CRAP中的老化沥青含量较低,且颗粒完整性较好,对目标级配的调控效果较好,因此在部分再生工程中可直接应用。而FRAP中含有的老化沥青明显高于CRAP,且杂质含量较高。由于FRAP中的老化沥青含量及其性能会严重影响再生沥青混合料的低温抗裂和疲劳性能,故FRAP的利用率普遍较低,未经特殊处理难以保证再生工程的质量。但由于FRAP中的沥青含量较高,若能提升FRAP的利用率,将显著提高RAP材料的整体利用率,推动固废材料循环利用行业的发展。

本文基于贵州高速枫香绿色养护基地的RAP精细化骨料再生设备与再生沥青混合料原生拌和系统(RAPR 120+LBZK 2000,图1),采用离心式油石分离技术对原路面回收的RAP进行精细化预处理。在固定RAP掺量的条件下,通过调整FRAP的掺量,探究FRAP掺量对再生沥青混合料长期性能的影响,根据其影响规律提出相应的改善措施,并论证大比例FRAP掺量在再生沥青混合料中应用的可行性,进而更好地发挥材料的潜在价值,提高其再生利用效率。

1 材料与试验

1.1 原材料

本研究采用的新集料为石灰岩集料,沥青为SBS改性沥青。RAP来源于贵州省某高速公路大修工程的铣刨料,利用绿色养护基地的油石精细剥离设备进行精细化预处理。预处理后,RAP被分为0~5 mm、5~10 mm、10~20 mm 3档。不同粒径范围的石灰岩新集料与精细化预处理后的RAP旧集料见图



图1 RAP精细化处理与原生拌和系统
Figure 1 Refined treatment of RAP and primary mixing system

2。其材料基本特性与筛分试验结果分别见表1~3。

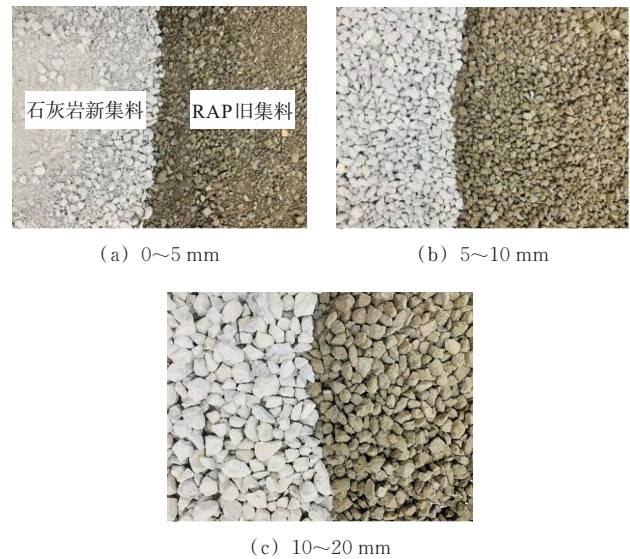


图2 石灰岩集料与精细化预处理后的RAP旧集料
Figure 2 Limestone aggregate and old aggregate of RAP after fine pre-treatment

表1 精细化预处理后的RAP基本性质

Table 1 Basic properties of RAP after fine pre-treatment

RAP集料粒径范围/mm	油石比/%	含水率/%	表观相对密度	毛体积相对密度	砂当量/%	洛杉矶磨耗损失/%	棱角性(流动时间)/s	吸水率/%	针片状颗粒含量/%	软弱颗粒含量/%
0~5	6.70	0.78	2.752	2.660	66	—	—	—	—	—
5~10	2.58	0.16	2.764	2.698	—	—	35.4	0.88	4.4	3.8
10~20	2.17	0.14	2.773	2.719	—	16.8	—	—	4.1	2.5
技术要求	—	≤3	≥2.5	—	≥60	≤30	≥30	≤3	≤15	≤5

1.2 半圆拉伸试验

研究表明,再生沥青路面的主要病害形式为路面裂缝。因此,本文采用半圆拉伸(Semi-Circular Tensile,SCT)试验对再生沥青混合料的疲劳开裂性

能开展研究,试验设置如图2所示。SCT试验通过在半圆试件底部施加周期性拉应力/拉应变来评价材料的拉伸断裂性能和疲劳性能,可以模拟沥青路面在温度和车辆荷载反复作用下引起的自下而上的失

表 2 SBS 改性沥青基本性质

Table 2 Basic properties of SBS modified asphalt

项目	针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	延度(5 cm/min, 5 °C)/cm	软化点(环球法)/°C
测试结果	55.6	30.2	78.9
范围要求	30~60	≥20	≥60

效状态^[18-19]。该试验方法的试件制备简单,且试件在试验过程中的受力状态(纯 I 型断裂)明确,便于对试验结果进行解析;同时,通过传感器采集获得数据的方法稳定性较好,不易受试验过程中试件形态改变或破坏状态变化的影响,可靠性较高。试验采用 UTM 设备进行拉伸加载,可实现静力加载模式(单调加载)与疲劳加载模式。通过对前期试验加载控制方式的分析,确定在单调加载模式下采用应力控制,加载速率为 1 kN/min,直至试验结束;疲劳加载波形为半正矢波,加载频率为 1 Hz,试验过程中持续记录荷载-位移曲线,用于后续分析。

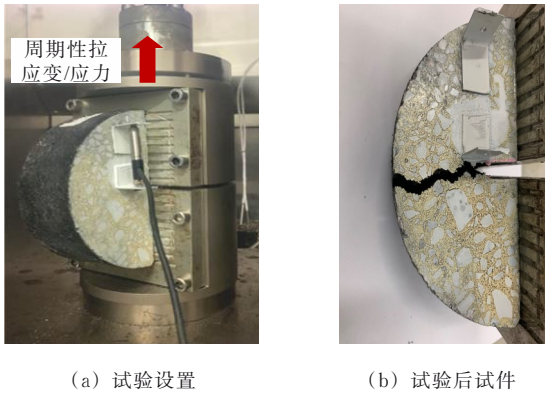


图 2 半圆拉伸(SCT)试验

Figure 2 Semi-circular tensile (SCT) test

SCT 试验的试件采用直径为 150 mm、厚度为 50 mm 的半圆试件。试验前在 SCT 试件底部中心线位置设置预切缝,切缝长度为 20 mm。在切缝尖端的水平位置设置变形传感器(LVDT),变形传感器一端紧靠切缝尖端,用于监测裂缝尖端应力的变化情况。结合 D_{CMOD} (裂缝开口位移),确定试件在应力-应变

曲线上的起裂点位置,如图 3 所示。其中,A 点为起裂点,B 点为峰值荷载点,直线 AD 的斜率与荷载-位移曲线初始斜率相同。基于线弹性、弹塑性断裂力学理论,断裂过程中的能量可分为 3 部分(图 3)。通过分析各种能量之间的演化关系,描述材料的整个断裂过程,各能量指标的物理意义见表 4。

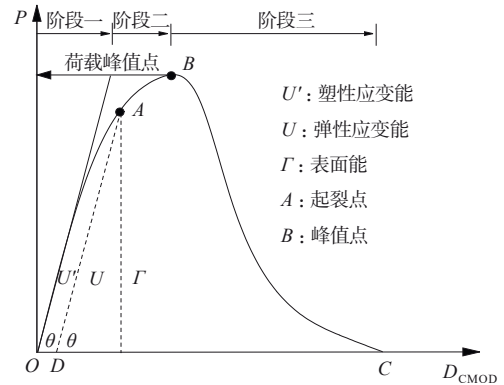


图 3 典型的 $P-D_{CMOD}$ 曲线

Figure 3 Typical $P-D_{CMOD}$ curves

在疲劳加载过程中,沥青混合料为适应内部结构变化而消耗的能量被定义为耗散能。耗散能的耗散方式可以分为两大部分:裂缝扩展耗散的表面能、塑性变形造成的塑性应变能损耗^[20-23]。然而,并非每一个周期内的全部能量损耗都与损伤有关,通常仅有一部分的能量用于引发损伤。因此,若仅用累积耗散能的增长来表征材料损伤,难以深入揭示疲劳过程中损伤的演化规律。相邻周期耗散能的变化才是反映材料发生损伤的准确指标。相邻周期内的耗散能变化率越大,表明单个周期内转化为材料损伤的能量越多,损伤演化速率越快。因此,本文采用耗散能相对变化率来研究沥青混合料的疲劳损伤过程,其计算公式如式(1)所示^[24-25]:

$$R_{DEC} = \frac{|E_{DE, N+1} - E_{DE, N}|}{E_{DE, N}} \quad (1)$$

其中: R_{DEC} 为耗散能变化率; $E_{DE, N+1}$ 、 $E_{DE, N}$ 分别为负荷重复 $N+1$ 、 N 次的耗散能。

表 3 RAP 的筛分结果

Table 3 Sieving results of RAP

粒径/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5
0~5	4.5	5.0	5.8	7.2	9.1	11.4	14.8	24.9	59.7	81.3	94.7	100.0
5~10	6.1	6.5	7.3	8.8	10.8	13.3	33.9	99.0	100.0	100.0	100.0	100.0
10~20	25.7	27.6	32.9	43.1	57.0	74.8	96.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表4 断裂过程中的能量划分

Table 4 Energy distribution during fracture process

能量指标	物理意义
应变能	起裂前材料发生变形吸收的总能量
表面能	材料在起裂后,裂缝扩展吸收的能量
弹性应变能	材料发生弹性变形吸收的能量
塑性应变能	材料发生塑性变形吸收的能量
断裂总能量	断裂过程吸收的总能量

1.3 配合比设计

在进行再生沥青混合料配合比设计时,首先将精细化预处理后RAP的掺量固定为45%,FRAP的添加比例设置为0.6%、12%。为探究制备方法对再生沥青混合料性能的影响,设计了两种拌和工艺:①传统拌和方式,依次将加热好的新集料和RAP倒入拌锅,搅拌90 s后再添加新沥青进行拌和;②分步拌和方式,先将加热好的RAP以及一半质量的新沥青倒入拌锅后,搅拌60 s后再添加新集料与剩下的沥青。材料组合情况如表5所示。通过马歇尔设计方法计算得到各沥青混合料的油石比,如表6所示。在不添加再生剂的情况下,各组再生沥青混合料的高温稳定性和水稳定性均满足规范要求。但当FRAP掺量超过6%时,混合料的低温弯曲应变低于 $2\ 500 \times 10^{-6}$ 。为使再生沥青混合料的低温性能满足规范要求,通过试验确定再生剂的最低掺量为再生沥青混合料总质量的3%。

表5 新集料与RAP的掺配比例

Table5 Proportion of new aggregate and RAP

类别	石灰岩/%				预处理后RAP/%		
	0~3	3~5	5~10	10~20	0~5	5~10	10~20
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0%FRAP	21	0	6	28	0	30	15
6%FRAP	16	5	6	28	6	24	15
6%FRAP#	16	5	6	28	6	24	15
12%FRAP	10	8	9	28	12	24	9

注:6%FRAP、6%FRAP#分别代表(FRAP添加比例6%)传统拌和、分步拌和方式。下同。

表6 再生沥青混合料配合比设计

Table6 Mix design of recycled asphalt mixture

类别	油石比/%	再生剂掺量/%	拌和方式
0%FRAP	4.2	3	传统拌和
6%FRAP	4.3	3	传统拌和
6%FRAP#	4.3	3	分步拌和
12%FRAP	4.5	3	传统拌和

与新建普通路面相比,再生沥青路面状况的发展规律、性能劣化特征和表现形式均存在差异。这些差异所引发的病害问题在路面服役初期可能表现并不明显,但再生沥青路面进入性能劣化阶段更快,性能劣化速度也较新建沥青路面更迅速,因此再生沥青混合料的设计必须考虑其长期性能。为此,本文参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中T0734的要求制备长期老化试件。具体步骤如下:①将拌制好的沥青混合料均匀摊铺在托盘中,并将其放入 $(135 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的烘箱中,在强制通风条件下加热 $4\text{ h} \pm 5\text{ min}$,完成短期老化;②将完成短期老化后的沥青混合料加热至 $(170 \pm 5)^\circ\text{C}$,采用旋转压实仪制备圆柱体试件,冷却后切割成厚度50 mm、直径150 mm、底部中央切缝20 mm的半圆形试件;③将制备好的半圆试件放置于 $(85 \pm 3)^\circ\text{C}$ 的烘箱中,在强制通风条件下连续加热5 d,加热结束后自然冷却至室温。进而进行相关试验,每组平行试件个数不少于3个。

2 试验结果验证与分析

2.1 低温断裂性能

2.1.1 $P-D_{\text{CMOD}}$ 断裂曲线

不同FRAP掺量再生沥青混合料在长期损伤后的低温断裂曲线如图4所示。在 -10°C 时,再生沥青混合料的荷载峰值随着FRAP掺量的增加而逐渐降低,这主要是由于再生沥青混合料内部的老化沥青含量升高,同时相较于洁净的粉料,FRAP中也含有一定量的粉尘杂质,削弱了FRAP与新沥青的结合能力。采用分步拌和方式制备的再生沥青混合料的峰值荷载以及对应的 D_{CMOD} 均略高于传统拌和方式,表明分步拌和有助于提高再生沥青混合料的抵抗荷载以及抗变形的能力。

2.1.2 能量划分结果

假设在试验过程中,外力做功全部转化为试样断裂过程吸收的能量,可根据试件的起裂点对断裂过程中的能量进行划分,应变能与表面能结果如图5(a)所示。由图5(a)可知:低温应变能随着FRAP掺量的增加而逐渐降低,最大降幅达39.2%,表明FRAP掺量会极大程度地减少再生沥青混合料开裂所需能量。分步拌和方式下的应变能较传统拌和方式提升8.8%,说明分步拌和有助于新旧沥青之间的融合,增强了了界面之间的黏结能力,从而提高了界面开裂所吸收的能量。同时,表面能也随着FRAP掺

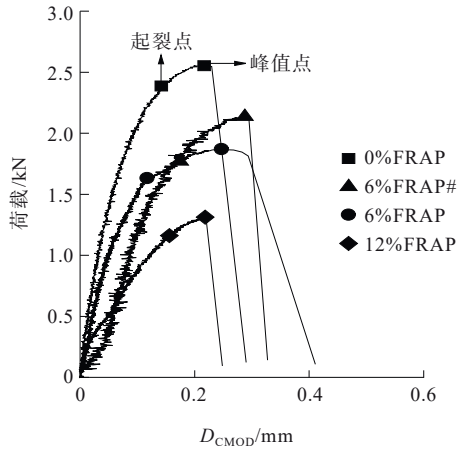


图4 低温下的 $P-D_{CMOD}$ 曲线

Figure 4 $P-D_{CMOD}$ curves at low temperature

量的增加而逐渐降低,最大降幅71.3%,表明再生沥青混合料低温开裂后裂缝扩展十分迅速。

弹性应变能与塑性应变能的变化规律如图5(b)所示。由图5(b)可知:在低温下,弹性应变能与塑性应变能的变化规律一致,均随FRAP掺量的增加而逐渐降低;相同FRAP掺量下,弹性应变能远大于塑性应变能,但塑性应变能的下降幅度略高,最大降幅为57.6%。这主要源于总应变能的逐渐下降。

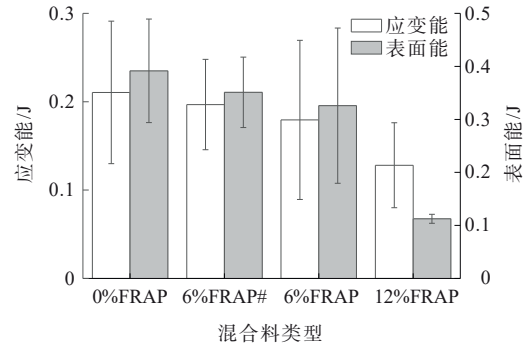
断裂总能量如图5(c)所示。由图5(c)可知:FRAP掺量对再生沥青混合料断裂总能量有负面影响。同一FRAP掺量下,分步拌和方式的断裂总能量较传统拌和方式提高8.7%。

不同FRAP掺量下再生沥青混合料断裂各部分能量占比如图5(d)所示。由图5(d)可知:传统拌和方式下,随着FRAP掺量的增加弹性应变能占比逐渐升高,塑性应变能占比逐渐下降。虽然再生沥青混合料的弹性应变能呈现下降的趋势,但其占比逐渐提高,这意味着再生沥青混合料变得更硬,开裂风险增大。当FRAP掺量达12%时,再生沥青混合料中裂缝扩展吸收的表面能占比显著下降,而开裂吸收的总应变能占比略高,这可能是低温时再生沥青混合料本身脆硬,高FRAP掺量使再生沥青混合料内部新旧沥青界面增多,一旦开裂再生沥青混合料较难抵抗裂缝扩展,迅速达到完全破坏状态。因此,在严寒地区应对FRAP的最大掺量进行限制,从而减少再生沥青路面的低温开裂问题。

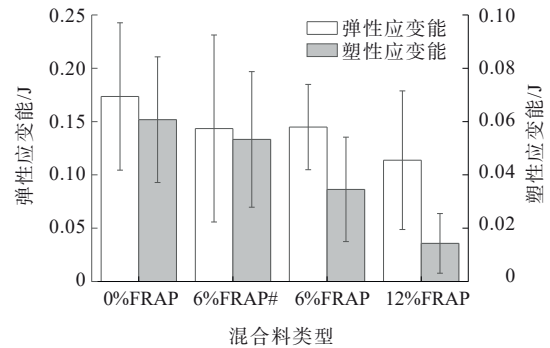
2.2 中温断裂性能

2.2.1 $P-D_{CMOD}$ 断裂曲线

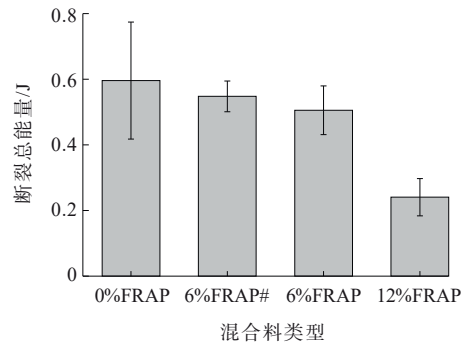
不同掺量FRAP的再生沥青混合料的中温断裂



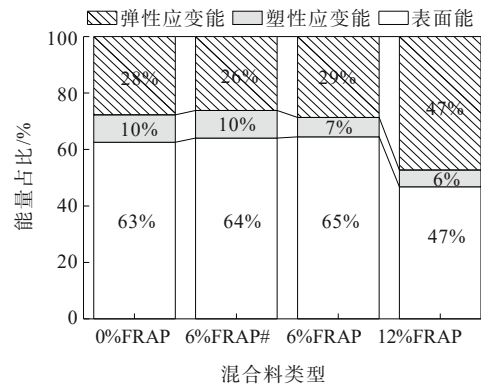
(a) 应变能与表面能



(b) 弹性应变能与塑性应变能



(c) 断裂总能量



(d) 各部分能量占比

图5 低温下能量划分结果

Figure 5 Energy distribution results at low temperature

曲线如图6所示。

由图6可知:当FRAP掺量不超过6%时,再生沥

青混合料的峰值荷载差距较小;当FRAP掺量达到12%后,其峰值荷载较未掺FRAP的混合料下降约17.1%。 D_{CMOD} 结果也表明,FRAP掺量的增加会严重削弱再生沥青混合料的变形能力,这主要是因为FRAP掺量越高,再生沥青混合料内部的老化沥青含量越大,而再生沥青经历长期老化后更加脆硬,从而使材料整体性能下降。

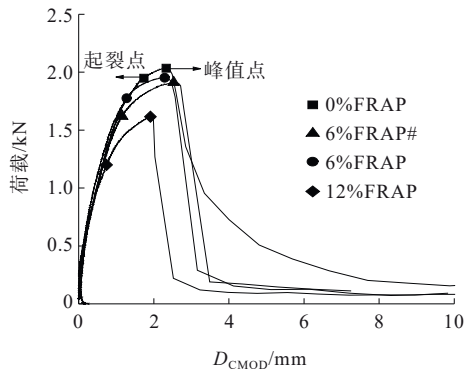


图6 中温下的 $P-D_{CMOD}$ 曲线

Figure 6 $P-D_{CMOD}$ curves at medium temperature

2.2.2 能量划分结果

不同FRAP掺量下再生沥青混合料的应变能与表面能如图7(a)所示。由图7(a)可知:应变能随着FRAP掺量的增加显著下降,当FRAP掺量为0时,再生沥青混合料的应变能显著高于其他掺量下的应变能,这可能是由于其老化沥青含量较低,再生剂能更有效地软化新旧融合沥青并抵抗长期老化。当FRAP掺量从6%增至12%时,应变能下降约64.7%。分步拌和方式下的应变能较传统拌和方式提高了22.4%,说明开裂所需要的能量有明显提升,开裂的难度较高。随着FRAP掺量的增加,再生沥青混合料的表面能呈现升高的趋势,且开始高于同期的应变能,这表明开裂吸收的能量逐渐减少,外力做功绝大部分用于裂缝的扩展。

再生沥青混合料的弹性应变能与塑性应变能如图7(b)所示。由图7(b)可知:弹性应变能与塑性应变能的变化规律一致,均随着FRAP掺量的增加而逐渐降低。同期弹性应变能均高于塑性应变能。由于未添加FRAP,在老化沥青含量较少以及再生剂的双重影响下,0%FRAP再生沥青混合料的弹性应变能与塑性应变能均较高。随着FRAP掺量的持续增加,长期老化后再生沥青混合料的塑性应变能急剧降低。

再生沥青混合料的断裂总能量如图7(c)所示。

由图7(c)可知:当FRAP掺量不超过6%时,断裂总能量下降不明显,但当FRAP掺量由6%增至12%后,其断裂总能量下降约18.7%。

再生沥青混合料各部分能量占比情况如图7(d)所示。由图7(d)可知:弹性应变能占比与塑性应变能占比均随着FRAP掺量的增加而逐渐降低,且塑性应变能占比下降更为明显。表面能占比显著提高,这意味着开裂吸收的能量占总能量的比例显著降低,开裂也更为简单。当FRAP掺量达到12%时,中温时应变能占比仅为断裂总能量的18%,表明此时再生沥青混合料在常温下已经变得较为脆硬,开裂风险较高。这主要是由于再生沥青混合料内部的老化沥青含量过高,新沥青与再生剂难以完全恢复老化沥青的性能,建议在高掺量FRAP下,在保证再生沥青混合料高温稳定性的同时,使用更软的新沥青或提高再生剂的含量。

2.3 重复加载试验结果

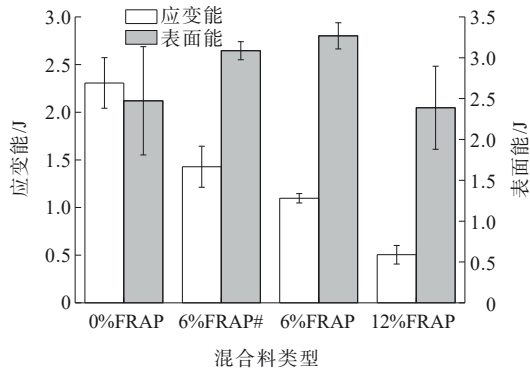
2.3.1 疲劳寿命

不同掺量FRAP的再生沥青混合料中温疲劳寿命曲线如图8(a)所示。由图8(a)可知:当应力比为0.5时,各再生沥青混合料的疲劳寿命曲线形状基本一致,在循环荷载加载初期,12%FRAP再生沥青混合料的 D_{CMOD} 增长显著高于其他沥青混合料,表明其内部损伤程度远高于其他沥青混合料。

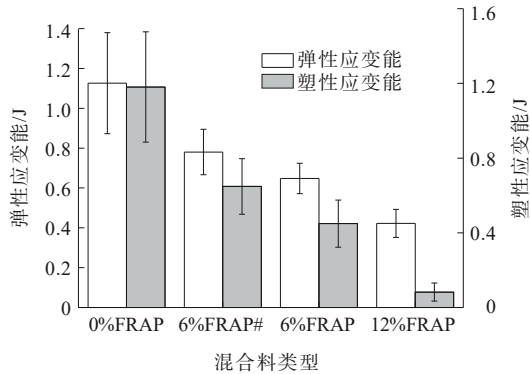
再生沥青混合料的疲劳寿命均值如图8(b)所示。由图8(b)可知:随着FRAP掺量的增加,再生沥青混合料的疲劳寿命逐渐降低。当FRAP掺量达到12%时,再生沥青混合料的疲劳寿命较未掺FRAP的沥青混合料降低约52.9%。分步拌和方式的再生沥青混合料较传统拌和方式下的疲劳寿命增长约13.5%。一方面,FRAP掺量增加会显著降低再生沥青混合料的可容许变形,在外力的反复作用下,再生沥青混合料只能通过开裂释放能量,导致疲劳寿命大幅下降;另一方面,随着FRAP掺量的增加,老化沥青与新沥青的融合效果变差,加之再生沥青混合料内部天然缺陷的存在,在外力反复作用时,新旧沥青交界面容易产生应力集中,从而导致宏观裂缝的出现。

2.3.2 耗散能演变规律

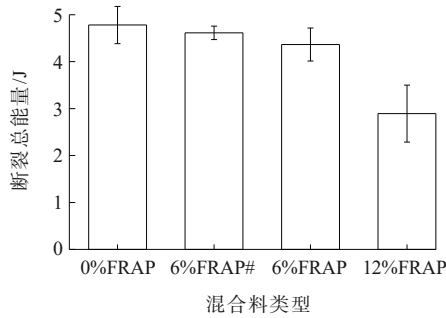
不同掺量FRAP的再生沥青混合料耗散能曲线如图9(a)所示。由图9(a)可知:FRAP掺量对于再生沥青混合料耗散能变化曲线的形状无明显影响,但FRAP掺量越高,再生沥青混合料在任意周期下的



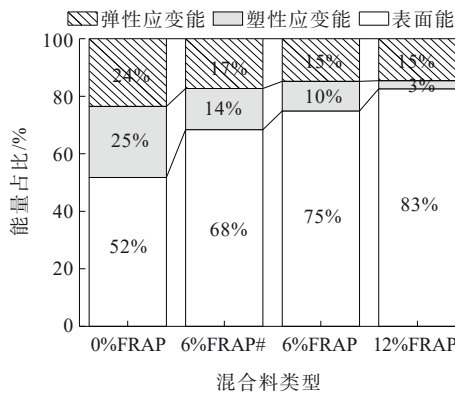
(a) 应变能与表面能



(b) 弹性应变能与塑性应变能



(c) 断裂总能量

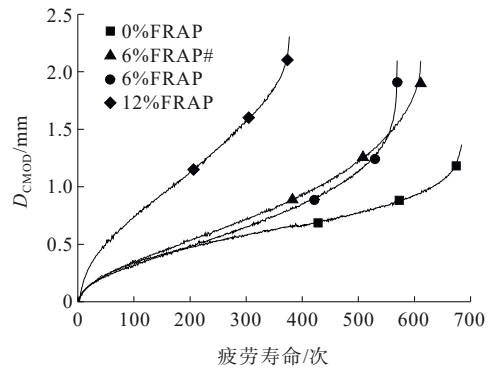


(d) 各部分能量占比

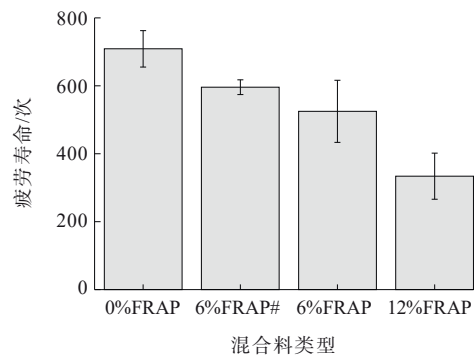
图7 中温下能量划分结果

Figure 7 Energy distribution results at medium temperature

耗散能越大,表明FRAP掺量会极大程度影响能量耗散的程度。累积耗散能及其均值结果如图9(b)所



(a) D_{CMOD} -疲劳寿命曲线(应力比: 0.5)



(b) 疲劳寿命均值

图8 不同FRAP掺量下的疲劳试验结果

Figure 8 Fatigue test results at different content of FRAP

示。由图9(b)可知:随着FRAP掺量的增加累积耗散能逐渐降低,但分步拌和方式下,再生沥青混合料的累积耗散能比传统拌和方式增长10.6%,这主要是由于分步拌和有助于提高再生沥青混合料中各个界面的黏结,变形协调性提高。FRAP掺量的增大会导致再生沥青混合料耗散能均值升高,即每一加载周期下耗散的能量越多,产生的不可恢复变形越多。分步拌和方式同样利用提高再生沥青混合料内部黏结性能的优势进一步降低了每一个周期下的能量耗散。

2.3.3 疲劳损伤分析

再生沥青混合料的耗散能相对变化率如图10所示。由图10可知:耗散能相对变化率随着FRAP掺量的增加逐渐提高。FRAP掺量由0增至12%时,耗散能相对变化率增长26.7%,这表明添加FRAP后,再生沥青混合料的疲劳损伤累积速度会显著提高,这主要是由于FRAP中含有大量的老化沥青,使得再生沥青混合料内部黏结弱化,在黏结弱化区域更易产生应力集中,同时相同的外力作用下可能会导致更为显著的不可恢复变形,从而提高了损伤程度。当采用分步拌和方式时,耗散能相对变化率相较于传统拌和方式下降了13.2%,表明分步拌和可以一定

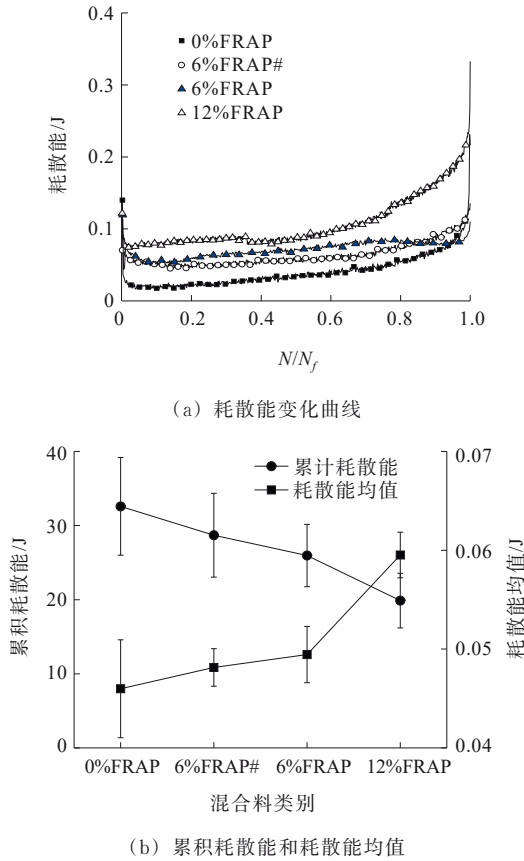


图9 不同FRAP掺量下的耗散能结果
Figure 9 Dissipated energy results at different content of FRAP

程度上提高新旧沥青之间的融合程度,降低由FRAP造成疲劳损伤累积速度的增长。

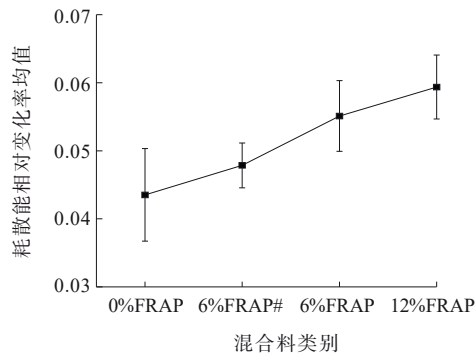


图10 再生沥青混合料的耗散能相对变化率均值
Figure 10 Average relative change rate of dissipated energy in recycled asphalt mixtures

3 结论

(1) 长期损伤后低温断裂性能:在总RAP掺量不变的情况下,随着FRAP掺量增至12%,再生沥青混合料的应变能下降约39.2%,表面能下降约71.3%,

再生沥青混合料的低温断裂性能显著降低。这主要是由于低温时再生沥青混合料本身就较为脆硬,高FRAP掺量增加了再生沥青混合料内部新旧沥青界面,一旦开裂再生沥青混合料较难抵抗裂缝的扩展,迅速达到完全破坏状态。

(2) 长期损伤后中温断裂性能:在总RAP掺量不变的情况下,当FRAP掺量不超过6%时,断裂总能量下降不明显,但当FRAP掺量由6%增至12%时,其断裂总能量下降约18.7%。当FRAP掺量达到12%时,中温时应变能占比仅占断裂总能量的18%,表明此时再生沥青混合料在常温下已经变得较为脆硬,开裂风险较高。

(3) 长期损伤后疲劳性能:随着FRAP掺量的增加,再生沥青混合料的疲劳寿命、累积耗散能均下降,疲劳寿命最大降幅约53%;耗散能相对变化率均值表现为增长趋势,最大增长幅度达26.7%。总的来说,FRAP掺量的增加会严重劣化再生沥青混合料的疲劳性能,这主要是由于内部老化沥青含量升高引起内部再生胶结料变形不协调,进而产生应力集中。

(4) 拌和方式的影响:在相同FRAP掺量下,分步拌和使再生沥青混合料在中温下的应变能提高22.4%,低温下规律类似,表明分步拌和方式能提高开裂难度。分步拌和使中温条件下的疲劳寿命延长13.5%,损伤累积速率下降约13.2%。总的来说,分步拌和方式通过增强再生沥青混合料内部黏结性能,进一步提高了再生沥青混合料的断裂、疲劳性能。本文未深入探讨分步拌和的作用机理,后续研究将对降低分步拌和过程中老化沥青的激活程度进行定量研究。

参考文献: References:

[1] 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.

[2] 李浩,王选仓,曾国东,等. 再生沥青混合料拉压疲劳特性及黏弹表征[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(8): 711-719.
LI Hao, WANG Xuancang, ZENG Guodong, et al. Tensile and compressive fatigue characteristics and viscoelastic characterization of reclaimed asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(8): 711-719.

- [3] 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.
- [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 recycling asphalt mixture with different RAP content[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 242-246.
- [5] 王明刚, 孙静. 再生沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 270-274.
WANG Minggang, SUN Jing. Study on road performance of recycled asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 270-274.
- [6] CONG P L, ZHANG Y H, LIU N. Investigation of the properties of asphalt mixtures incorporating reclaimed SBS modified asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 334-340.
- [7] SHAH A, MCDANIEL R S, HUBER G A, et al. Investigation of properties of plant-produced reclaimed asphalt pavement mixtures[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1998(1): 103-111.
- [8] GUO N S, YOU Z P, TAN Y Q, et al. Performance evaluation of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(11): 981-989.
- [9] WANG J, QIN Y C, XU J, et al. Crack resistance investigation of mixtures with reclaimed SBS modified asphalt pavement using the SCB and DSCT tests[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120365.
- [10] XUE Y H, LIU C C, QU J J, et al. Research on pavement performance of recycled asphalt mixture based on separation technology of asphalt and aggregate in RAP[J]. Construction and Building Materials, 2023, 393: 132103.
- [11] LIU C C, ZHAO B, XUE Y H, et al. Synchronous method and mechanism of asphalt-aggregate separation and regeneration of reclaimed asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131127.
- [12] FENG D C, CAO J W, GAO L B, et al. Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Road Engineering, 2022, 2(4): 332-347.
- [13] YU X, TANG W, LI N, et al. Refined decomposition: a new separation method for RAP materials and its effect on aggregate properties[J]. Construction and Building Materials, 2022, 358: 129452.
- [14] LIU C C, LIAO X H, FAN G P, et al. Utilization of bio-oil for separation of aged asphalt from reclaimed asphalt pavement: Mechanistic and experimental insights[J]. Construction and Building Materials, 2025, 471: 140743.
- [15] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 72-88.
XU Jinzhi, HAO Peiwen, GUO Xiaogang, et al. Review of mix design method of hot in-plant recycled asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 72-88.
- [16] SAINI S K, SAHDEO S K, RANSINCHUNG RN G D, et al. Performance of cement mortar mixes containing fine reclaimed asphalt pavement aggregates and zinc waste[J]. Advances in Cement Research, 2024, 36(4): 192-204.
- [17] BAI Z H, PEI Z S, QIAO Y H, et al. Study on the development and performance optimization of gussasphalt containing high percent of fine reclaimed asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 420: 135557.
- [18] ZHAN Y Q, WU H, SONG W M, et al. A novel approach to investigate the crack resistance of recycled asphalt mixture based on energy evolution[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 307: 110284.
- [19] ZHAN Y Q, WU H, SONG W M, et al. A framework for estimating the fracture resistance of hot mix asphalt using an energy approach[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 281: 109129.
- [20] AMERI M, SEIF M, ABBASI M, et al. Investigation of fatigue life of asphalt mixtures based on the initial dissipated energy approach[J]. Petroleum Science and Technology, 2017, 35(2): 107-112.
- [21] GAO Y, GENG D W, HUANG X M, et al. Prediction of remaining service life of asphalt pavement using dissipated energy method[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2018, 144(2): 04018011.
- [22] 虎东霞, 冯哲, 刘梦梅, 等. 不同添加剂下沥青混合料抗疲劳性能研究综述[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 241-245.
HU Dongxia, FENG Zhe, LIU Mengmei, et al. Evaluating the effect of additives on improving asphalt mixtures fatigue behavior[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(4): 241-245.
- [23] 雷军军. 基于100%RAP使用率的水泥-乳化沥青冷再生胶浆和混合料性能研究[J]. 公路, 2023, 68(11): 8-15.
LEI Junjun. Research on the performance of cement-emulsified asphalt cold recycled mortar and mixture based on 100% RAP utilization rate[J]. Highway, 2023, 68(11): 8-15.
- [24] 孙雅珍, 房辰泽, 王金昌, 等. 基于耗散能相对变化率平稳值的橡胶沥青混合料疲劳寿命预测方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 108-112.
SUN Yazhen, FANG Chenze, WANG Jinchang, et al. Method of fatigue life prediction for rubber asphalt mixture based on plateau value of dissipated energy ratio [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 108-112.
- [25] 房辰泽, 郭乃胜, 尤占平, 等. 基于能量耗散历史的沥青混合料疲劳损伤特性研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 1018-1024.
FANG Chenze, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Fatigue damage characteristics for asphalt mixture based on energy dissipation history[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 1018-1024.