

乳化沥青冷再生混合料断裂性能试验研究

褚晨枫¹, 邓军¹, 周琛¹, 王子昂², 况澳², 刘宏富^{2*}

(1. 武汉综合交通研究院有限公司, 湖北 武汉 430015; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 乳化沥青冷再生沥青路面的开裂问题是制约其大规模推广使用的主要原因之一。为了研究冷再生沥青混合料断裂性能的评价指标及抗裂性能提升措施, 以普通乳化沥青、外掺玄武岩纤维和SBR改性乳化沥青3种冷再生混合料为研究对象, 开展了有预制裂缝中梁的四点弯曲强度试验及其断裂过程的声发射测试; 以应变能释放速率、应力强度因子和声发射测试中所采集的能量及振铃计数-撞击数等参数为评价指标, 对比分析了3种不同乳化沥青冷再生混合料的断裂性能。试验结果表明: 使用SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维均对乳化沥青冷再生混合料的抗断裂性能有较为显著的提升, 且相比于使用SBR改性乳化沥青, 外掺玄武岩纤维更为有效。振铃计数和撞击数参数可以较好地描述材料的断裂特征, 声发射试验结果与断裂力学参数计算结果满足较好的线性相关性。声发射信号参数能够很好地描述乳化沥青冷再生混合料在四点弯曲试验中的断裂特征。

关键词: 道路工程; 乳化沥青冷再生混合料; 四点弯曲强度试验; 声发射技术; 玄武岩纤维; 断裂性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Experimental Study on Fracture Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture

CHU Chenfeng¹, DENG Jun¹, ZHOU Chen¹, WANG Zi'ang², KUANG Ao², LIU Hongfu^{2*}

(1. Wuhan Comprehensive Transportation Research Institute Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430015, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: Cracking in emulsified asphalt cold recycled pavements is one of the main constraints on their large-scale application in road engineering. To study the fracture performance indicators of cold recycled asphalt mixture and the improvement measures of crack resistance performance, this study investigated three types of mixtures: ordinary emulsified asphalt, basalt fiber, and styrene-butadiene rubber (SBR) modified emulsified asphalt. This study conducted a four-point bending strength test on notched beams, and acoustic emission tests of the beam with prefabricated cracks were carried out to evaluate the fracture performance of three different emulsified asphalt cold recycled mixtures in road engineering. The evaluation criteria included strain energy release rate, stress intensity factor, energy collected in acoustic emission test, and ringing count-impact number. A comparative analysis of the fracture performance was conducted on three distinct emulsified asphalt cold recycled mixtures, with and without the addition of basalt fiber and SBR modification. The test results show that both the use of SBR-modified emulsified asphalt and the addition of basalt fibers significantly improve the fracture resistance of the cold recycled emulsified asphalt mixture. Compared to the use of SBR modified emulsified asphalt, the addition of basalt is more effective. The parameters of ringing count and impact number can better describe the fracture characteristics of materials. There is a good correlation between the results of acoustic emission tests and the calculation results of fracture mechanics parameters. The acoustic emission signal parameters can well describe the fracture characteristics of emulsified asphalt cold recycled mixture during the four-point bending test. The research results of this paper offer valuable insights into the design of the fracture resistance of emulsified asphalt cold recycled

收稿日期: 2023-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52078064)

作者简介: 褚晨枫, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: chuchenfeng_wh@sina.com

*通信作者: 刘宏富, 男, 博士, 副教授. E-mail: lhf0625@csust.edu.cn

mixture and the application of acoustic emission technology in the research of cold recycled mixtures.

Keywords: road engineering; emulsified asphalt cold recycled mixture; four-point bending strength test; acoustic emission technology; basalt fiber; fracture performance

0 引言

2022年末中国公路总里程535.48万km,公路养护里程535.03万km,占公路总里程99.9%^[1]。中国公路养护体量大,预计每年产生的旧路面铣刨材料将达到千万吨级,如何对这些废料进行资源化处理并加以利用的问题日益凸显。针对上述问题,有必要推广建设乳化沥青冷再生路面,通常在乳化沥青冷再生路面的建设过程中,废旧沥青路面材料的使用量达80%以上^[2],可以有效减少旧沥青路面材料,促进废料的资源化利用。但现有的乳化沥青冷再生路面使用效果表明:相比于普通热拌沥青混凝土路面,乳化沥青冷再生路面的开裂问题发生得往往更早,发展过程往往也表现更为迅速^[3],造成了冷再生路面的服役寿命常常难以达到设计预期。

为了更好地了解乳化沥青冷再生路面的开裂行为和开裂机理,需重点研究混合料的抗裂性能试验方法和评价指标。当前评价沥青混合料抗裂性能的试验方法主要有劈裂试验、小梁三点弯曲试验和半圆弯曲试验等,国内外众多学者从不同角度运用不同的理论方法、试验技术以及评价指标来研究乳化沥青冷再生路面的开裂问题,也为后来的研究者提供了宝贵的研究基础及经验结果。李俊升等^[4]采用半圆弯曲(Semi-circle Bending, SCB)试验和Fénix试验并选取断裂能、断裂韧度和刚度作为评价指标,对比分析了普通热拌沥青混合料与冷再生混合料的低温断裂性能,结果表明冷再生混合料的低温抗裂性能较差,但断裂韧性较好;吴俊强等^[5]利用CT(Computed Tomography)扫描技术和PFC^{3D}对沥青混合料进行虚拟模型构建,随后对其进行虚拟劈裂试验,以沥青混合料的劈裂抗拉强度作为评价指标研究沥青混合料低温抗裂性能;郝培文等^[6]采用OT(Overlay Test)试验研究了对具有不同材料组成因素[其中包括级配、水泥类型及掺量、RAP(Reclaimed Asphalt Pavement)类型及掺量、乳化沥青剂量、乳化剂的种类、基质沥青的种类、不同集料]的乳化沥青冷再生混合料的抗裂性能;Arimilli等^[7]对不同RAP含量

(30%~80%)的冷拌混合料的性能进行了研究,通过对比分析未添加RAP掺量的混合料,得出含有RAP材料往往使其具有更好的抗断裂性能这一结论,并且得出60%RAP掺量为混合料设计时的最优掺量;Jeong等^[8]通过马歇尔稳定性试验、间接拉伸试验以及半圆弯曲试验研究再生剂对100%RAP掺量的冷再生混合料性能的影响,研究结果表明:再生剂剂量 $\geq 6\%$ 会显著提高混合料的抗裂性能。

声发射(Acoustic Emission, AE)现象是指材料或构件在外力作用下因局部应力的集中而产生变形或者开裂,内部从不稳定高能量应力集中状态快速过渡到低能量状态,并以弹性波的形式释放应变能的现象,通过采集声发射信号数据可以判断损伤发生的空间位置,判断材料断裂状态^[9]。Chai等^[10]采用声发射技术,针对大孔隙沥青混合料的冻融循环损伤过程进行了研究,试验中成功地采用了声发射参数对冻融循环损伤过程进行表征;Jiao等^[11]进行了温度以及不同加载模式下多孔沥青混合料的断裂行为的声发射技术表征,试验结果为理解复杂条件下多孔沥青路面的断裂机理和实时断裂监测提供了参考。

综上所述,通过对比分析试验方法和评价指标来评价混合料抗裂性能,由于劈裂试验考虑的混合料的性质比较单一,且容易产生局部开裂,所得到的抗拉强度作为评价指标不能全面反映抗裂性能。关于乳化沥青冷再生混合料抗裂性能提升方式,相关研究表明主要有RAP掺量、再生剂用量以及掺加改性剂等。因而,本文在前人相关研究成果的基础上,对乳化沥青冷再生混合料的断裂性能展开研究,进行有预制裂缝中梁的四点弯曲强度试验,采用断裂能、应力强度因子和声发射参数作为评价指标,分析不同提升方式对冷再生路面抗断裂性能的影响及声发射参数与力学参数之间的关联性,研究成果有助于提高乳化沥青路面的抗裂性能设计水平。

1 冷再生混合料配合比设计

本文所使用的RAP材料来源于武汉市江夏区,矿质成分为石灰岩。所使用的乳化沥青为慢裂BC-1

型阳离子乳化沥青,根据《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)对上述材料进行了检测,厂拌冷再生用RAP和乳化沥青检测结果分别见表1、2,外掺的新集料采用石灰岩质矿料。根据现有的研究确定使用的纤维材料为12 mm短切玄武岩纤维,掺量为混合料质量的0.3%^[12],纤维相关检测结果如表3所示。采用外掺SBR(Styrene-Butadiene Rubber)胶乳的方式对乳化沥青进行改性,SBR胶乳的掺量为乳化沥青的4%^[13];利用高速剪切机搅拌均匀后使用,SBR改性乳化沥青检测结果如表4所示。

表 1 RAP检测结果				
Table 1 Results of RAP test				
材料	检测项目	单位	测试结果	技术要求
RAP	最大颗粒粒径	mm	≤26.5	≤设计级配允许的最大粒径 26.5
4.75 mm 以下的 RAP	砂当量	%	75.5	≥50

考虑铣刨回收的RAP级配,参考已有工程的成功经验^[14],乳化沥青冷再生混合料中粒式级配的设计结果见表5。

参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用击实试验的方法,初定乳化沥青试验用量为3.5%,变化5个含水率2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、

4.0%进行击实试验,结果见图1。

表 2 冷再生用乳化沥青检测结果				
Table 2 Test results of cold recycled emulsified asphalt				
测试项目	单位	测试结果	技术要求	
破乳速度		慢裂	慢裂或中裂	
粒子电荷		阳离子(+)	阳离子(+)	
筛上残留物(1.18 mm)	%	0.05	≤0.1	
恩格拉黏度 E ₂₅		16	2~30	
含量	%	64.1	≥60	
溶解度	%	99.5	≥97.5	
蒸发残留物				
25 ℃针入度	0.1 mm	72.9	50~130	
15 ℃延度	cm	>100	≥40	
与粗集料的黏附性,裹覆面积		0.82	≥2/3	
与粗、细粒式集料拌和试验		均匀	均匀	
1 d	%	0.1	≤1.0	
5 d	%	0.6	≤5.0	

表 3 玄武岩纤维检测结果					
Table 3 Test results of basalt fiber					
项目	长度/ mm	直径/ μm	密度/ (kg·m ⁻³)	强度/ MPa	弹性模量/ GPa
测试结果	12	18	2 672	4 637	11 540
技术要求	9/12/18	8~24	—	4 130~ 4 820	10 000~ 12 000

表 4 SBR 改性乳化沥青检测结果								
Table 4 Test results of SBR modified emulsified asphalt								
项目	粒子电荷	筛上剩余 量/%	蒸发残留 物含量/%	溶解度/ %	25 ℃针入度/ (0.1 mm)	15 ℃延度/ cm	软化点/ ℃	5 d 储存稳 定性/%
试验结果	阳离子(+)	0.03	69	98.5	67	>100	62.7	1.9
技术要求	阳离子(+)	≤0.1	≥60	≥97.5	50~100	≥40	≥55	≤5

表 5 乳化沥青冷再生混合料中粒式级配设计结果														
Table 5 Design results of gradation design of emulsified asphalt cold recycled mixture														
项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%													比例/ %
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075		
集料	RAP(10~20 mm)	100.0	80.9	49.8	14.3	4.3	1.1	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.0	30.0
	RAP(0~10 mm)	100.0	100.0	99.3	96.6	84.4	56.6	31.2	19.1	8.2	3.3	1.4	0.5	55.0
	石屑	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.4	68.7	50.0	26.3	14.2	8.1	3.2	13.5
	水泥	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.6	98.5	92.7	1.5
级配	上限	100.0	100.0	90.0	85.0	75.0	60.0	45.0	32.0	26.0	18.0	13.0	8.0	
	下限	100.0	90.0	78.0	62.0	55.0	35.0	20.0	12.0	10.0	5.0	3.0	2.0	
	中值	100.0	95.0	84.0	73.5	65.0	47.5	32.5	22.0	18.0	11.5	8.0	5.0	
	合成级配	100.0	94.2	84.6	72.4	62.7	45.8	28.1	18.9	12.2	5.3	3.4	2.1	

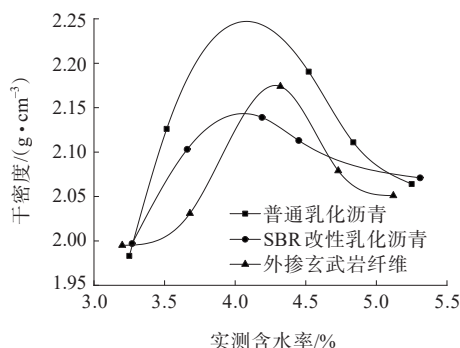


图1 击实曲线

Figure 1 Compacting curves

由图1确定普通乳化沥青冷再生混合料、SBR改性乳化沥青冷再生混合料、外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料的最佳含水率分别为4.2%、4.1%、4.3%。

变化5组乳化沥青用量(2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%)分别制备3种冷再生混合料的马歇尔试件,将5组乳化沥青用量下的试件进行15℃劈裂试验和浸水24h劈裂试验,计算干湿劈裂强度比,即浸水24h劈裂试验强度和15℃劈裂试验强度的比值,3种冷再生混合料干湿劈裂强度比试验结果见图2。

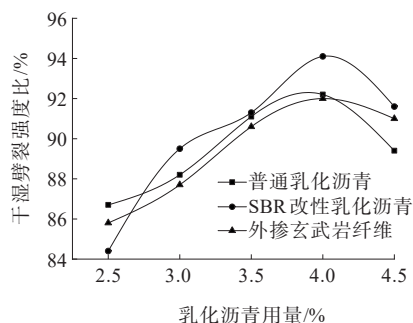


图2 3种冷再生混合料干湿劈裂强度比试验结果

Figure 2 Test results of dry and wet splitting strength ratio of three types of cold recycled mixtures

综合15℃劈裂强度试验和干湿劈裂强度比出现峰值,同时空隙率在8%~13%时对应的乳化沥青用量即为最佳乳化沥青用量(Optimal Emulsified Content),得到普通乳化沥青冷再生混合料、SBR改性乳化沥青冷再生混合料、外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料最佳乳化沥青用量分别为3.8%、4.1%、4.2%。

2 断裂性能试验方法及其表征参数

2.1 断裂性能试验方法

基于断裂力学的理论和方法,参照《公路工程无

机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009),采用15℃下预制裂缝梁试件的四点弯曲试验,对3种不同乳化沥青冷再生混合料的断裂性能进行评价,并采用声发射技术进行实时监测。

试件采用振动压实法成型尺寸为40 cm×10 cm×10 cm预制裂缝的中梁,成型试件时的面压力为0.1 MPa,振动频率为30 Hz,每个试件振动压实3 min。成型试件时在梁底中部放置长度为12 mm,厚度为2 mm的铁片进行裂缝的预制。试件成型后在模具中放置一昼夜,待水分散失,试件的强度初步形成后拆下模具,之后将试件置于60℃的恒温鼓风式烘箱中养生48 h,使其强度完全形成,随后取出试件,晾至室温,并置于22℃恒温水中浸泡24 h,取出试件后擦干表面水分后进行相关试验。

试验的加载系统采用美国MTS Systems公司生产的MTS-Landmark结合控温箱进行,高精度力学传感器配合设备自带的位移测试和挠度计可以实现实时记录试验过程中试件的力、位移、变形等数据。

预制裂缝梁试件的四点弯曲强度试验压力机压头的加载速率为50 mm/min。将试件放置于四点弯曲的夹具上,保证荷载的加载方向与试件成型时的压力方向一致。试验温度为15℃,在进行试验前将试件与夹具置于环境箱中保温4 h。为了消除试件与夹具之间的不均匀应力,同时降低夹具与试件之间的摩擦造成的噪声干扰,在试件与夹具接触处粘贴条状的聚四氟乙烯垫片。启动声发射采集系统,接着启动MTS系统,并记录试验数据。

声发射数据采集及处理设备采用AMSY-6型全数字声发射系统,采集前设置阈值为40 dB_{AE},采样频率10 MHz。由于乳化沥青冷再生混合料属于非均质材料,为了尽量降低裂缝开展的空间位置对声发射信号的影响,采用如图3所示的声发射传感器布置方案。

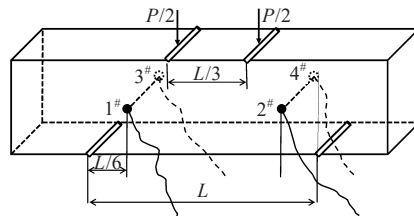


图3 声发射传感器的布置方案

Figure 3 Arrangement of AE sensors

2.2 断裂性能表征参数

在断裂力学理论研究中,当荷载应力超过允许应力时,材料中的裂纹便会萌生发展。材料的裂纹拓展模式主要可以分为以下3类:I型开裂(张开型)、II型开裂(滑开型)和III型开裂(复合型),其中I型开裂与道路实际的开裂模式较为吻合^[13]。常采用应变能释放速率 G 和应力强度因子 K_I 来表征材料的断裂性能。 G 定义为势能随着裂纹面积的拓展而产生的变化率, K_I 用来描述裂纹进一步发展的趋势。材料在发生断裂时, G 值越大,则代表材料的抗裂性能相对更好,而在裂缝宽度相同的前提下, K_I 值越大,则代表开裂进一步发生的可能性越小, K_I 值越小,代表其发生破坏的可能性就越大,其破坏越接近于脆性破坏^[14-15]。在I型(张开型)开裂模式下,通常采用式(1)计算应变能释放速率 G ,采用式(2)计算应力强度因子 K_I :

$$G = -\frac{1}{t} \cdot \frac{dU}{da} \quad (1)$$

式中: G 为应变能释放速率($\text{MPa} \cdot \text{m}$); t 为试件的厚度(m); dU 为弹性势能的变化量($10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$); da 为沿着裂缝方向发生的微小位移(m)。

$$K_I = FS\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中: F 为与几何形状有关的修正系数,是与裂缝长度 a 及试件长度 b 的比值 a/b 的函数,本文中 F 取1.12(无量纲); S 为垂直于断裂面上的应力强度(MPa); K_I 为断裂韧度($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。

本文选择表征参数分析法对声发射信号与材料的力学过程的关联性进行分析。选取声发射能量参数(Energy)和振铃计数-撞击数(Count-Hits)参数,研究3种不同乳化沥青冷再生混合料在四点弯曲试验中试件发生断裂时声发射现象的差异,从而分析评价混合料的断裂性能。撞击数(Hits)是指超过门槛电压的声发射信号次数,可以反映声发射活动的总量与频度特征。振铃计数(CNTS)是指单个声发射信号中越过门槛电压的次数,与材料中声发射的能量有一定的关联性,撞击数和振铃计数两项声发射参数的时间频度越高,材料发生断裂时的声发射活动越频繁,则材料抵抗断裂的能力越强。

3 试验结果及分析

3.1 断裂能分析

对3种乳化沥青冷再生混合料开展四点弯曲强

度试验,采集相关数据,并对混合料的断裂能进行计算分析,结果见表6所示。

表6 3种乳化沥青冷再生混合料断裂能计算结果
Table 6 Calculation results of fracture energy of three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

混合料类型	试件编号	G 的计算值/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}$)	G 的平均值/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}$)
普通乳化沥青	1	1 405.9	1 384.9
	2	1 597.2	
	3	1 151.6	
SBR改性乳化沥青	1	2 485.1	2 681.2
	2	3 508.1	
	3	2 050.3	
外掺玄武岩纤维 乳化沥青	1	5 255.2	7 241.3
	2	9 333.9	
	3	7 134.6	

由表6可知:相比于普通乳化沥青冷再生混合料,SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维对乳化沥青冷再生混合料的断裂能均有一定程度的提高。计算结果表明:与普通乳化沥青冷再生混合料相比,使用SBR改性乳化沥青的冷再生混合料的平均断裂能提高了93.6%,外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料的平均断裂能提升了4.23倍,两种手段对乳化沥青冷再生混合料的抗裂性能均有较为显著的提升,且相比于使用SBR对乳化沥青进行改性的方式,外掺玄武岩纤维更为有效。

观察破坏试件断裂的界面可以发现,断裂主要发生在沥青胶浆与细集料界面处,界面的性能在很大程度上影响乳化沥青冷再生沥青混合料的抗裂性能,由于SBR提升了乳化沥青的黏结性,而玄武岩纤维均匀分散在冷再生混合料中,对细集料产生加筋的效果,其断裂能计算值也较大,这也表明其宏观抗裂性能较强,采用SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维两种措施均提升了冷再生混合料的抗裂性能。

3.2 应力强度因子分析

3种乳化沥青冷再生混合料在I型开裂模式下的应力强度因子计算结果见表7。

由表7可知:普通乳化沥青冷再生混合料的应力强度因子为0.1~0.2(水泥混凝土约为1.18,风化花岗岩约为0.9)。普通乳化沥青冷再生混合料的应力强度因子小于上述两种材料,因而在外荷载作用下,

表 7 3 种乳化沥青冷再生混合料应力强度因子计算结果
Table 7 Calculation results of stress intensity factor of three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

混合料类型	试件 编号	梁底极限 弯拉应 力/MPa	应力强 度因子/ (MPa·m ^{1/2})	应力强度因 子均值/ (MPa·m ^{1/2})
普通乳化沥青	1	0.60	0.130	0.110
	2	0.46	0.099	
	3	0.47	0.102	
SBR 改性乳化沥青	1	0.47	0.102	0.127
	2	0.56	0.119	
	3	0.70	0.160	
外掺玄武岩纤维 乳化沥青	1	0.77	0.167	0.179
	2	0.99	0.217	
	3	0.69	0.150	

冷再生混合有更强烈的裂纹萌发趋势,在相同的应力条件下更趋向于发生断裂破坏。应力强度因子的

计算结果也表明:乳化沥青冷再生混合料试件的破坏形式为脆性破坏。

相比于普通乳化沥青冷再生混合料,使用 SBR 改性乳化沥青的冷再生混合料的应力强度因子增加了 15.5%,而外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料的应力强度因子增加较为明显(较普通乳化沥青冷再生混合料提升约 62.7%)。计算结果表明:在处于相似的应力状态下,使用 SBR 改性乳化沥青与采用外掺玄武岩纤维的手段均可以降低乳化沥青冷再生混合料的开裂风险,相比于使用 SBR 改性乳化沥青,外掺玄武岩纤维具有更好地降低开裂风险的效果。

3.3 声发射参数分析

3.3.1 声发射能量分析

声发射能量是指声发射信号包络线下方的面积,图 4 为 3 种乳化沥青冷再生混合料的单次声发射事件的能量分布时程图。

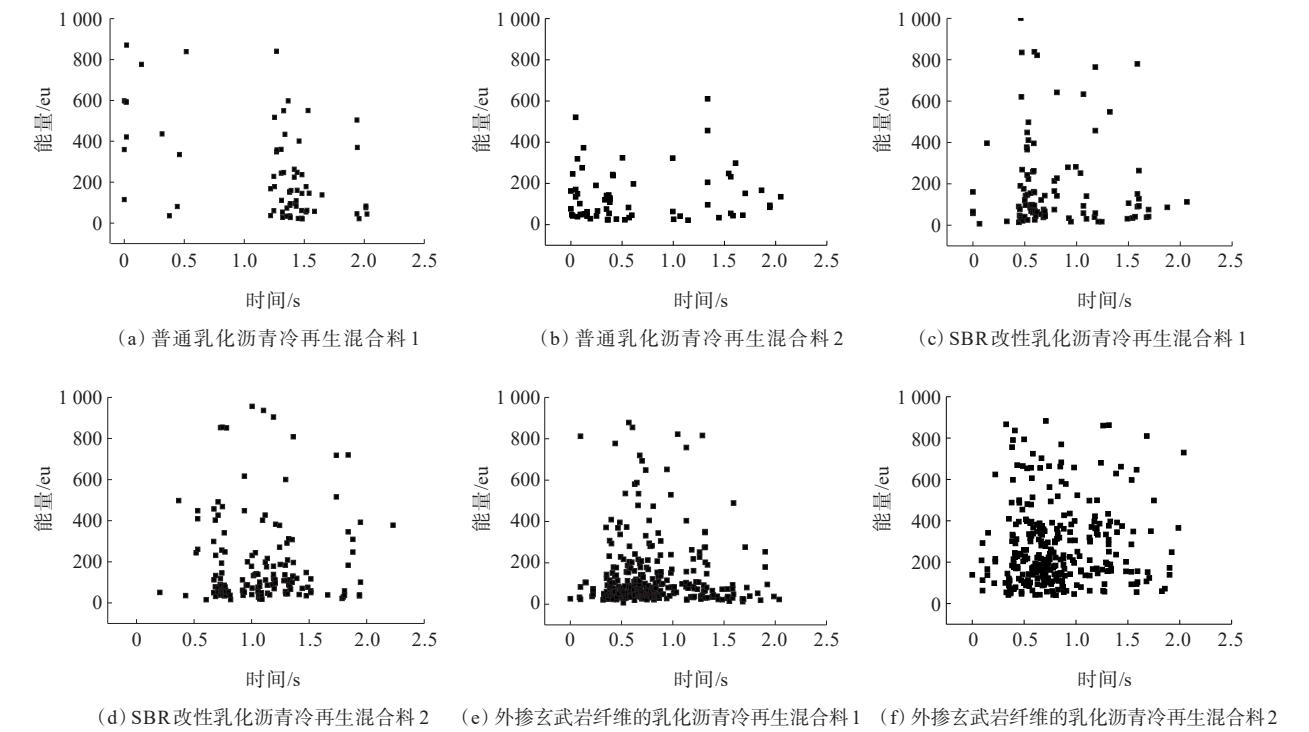


图 4 3 种乳化沥青冷再生混合料声发射能量分布时程图

Figure 4 Time history of acoustic emission energy distribution of three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

由图 4 可知:在断裂过程中,冷再生混合料的单次声发射信号能量的分布在 40~900 eu 之间,但是 30~300 eu 之间能量的信号分布最为密集。能量的最大值和最小值之间相差可达 20 倍左右,信号的绝对值相差较大可能与信号的产生位置和产生方式有

关,开裂位置距离传感器近则能量信号强度高,距离传感器距离远则信号强度低。

相比于普通乳化沥青冷再生混合料,SBR 改性乳化沥青冷再生混合料和外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料单位时间内发生的能量参数点更多,

表明后两者在发生断裂时声发射现象更为活跃。3种乳化沥青冷再生混合料在统计时间内的累积声发射能量统计结果见表8,同时计算了3种乳化沥青冷再生混合料在发生断裂时单次能量事件的均值。

表 8 3种乳化沥青冷再生混合料的累积能量和单次事件平均能量
Table 8 Cumulative energy and average energy per event for three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

混合料 类型	编号	累积声发射 能量/eu	累积声发射能 量均值/eu	单次声发射事 件能量/eu	单次声发射事件 能量均值/eu
普通乳化沥青	1	3.8E+04	3.2E+04	4.2E+02	3.5E+02
	2	2.9E+04		2.8E+02	
SBR改性乳化沥青	1	5.2E+04	9.1E+04	4.9E+02	6.3E+02
	2	1.3E+05		7.7E+02	
外掺玄武岩纤维 乳化沥青	1	3.0E+05	2.1E+05	9.8E+02	7.0E+02
	2	1.2E+05		4.3E+02	

由表8可知:不同试件的累积声发射能量值相差较大,这可能与单个试件中声发射信号产生位置以及产生数量的差异性有关。对比普通乳化沥青冷再生混合料,使用SBR改性乳化沥青的冷再生混合料累积声发射能量平均值提升了184%,外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料提升了约556%。使用SBR改性乳化沥青和掺加了玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料单次声发射事件的能量均值均提高了约1倍。

3.3.2 振铃计数-撞击数分析

3种混合料单位时间内振铃计数和撞击数的发生频次统计结果见表9,3种乳化沥青冷再生混合料的振铃计数-撞击数的时程图见图5。

表 9 3种乳化沥青冷再生混合料的振铃计数-撞击数频次
Table 9 Ringing count-impact frequency of three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

混合料类型	试验 编号	振铃计 数频次/ (次·s ⁻¹)	振铃计数 频次均值/ (次·s ⁻¹)	撞击数 频次/ (次·s ⁻¹)	撞击数频 次均值/ (次·s ⁻¹)
普通乳化沥青	1	218	156	27	26
	2	93		24	
SBR改性乳化沥青	1	219	297	44	48
	2	374		52	
外掺玄武岩纤维 乳化沥青	1	524	596	110	106
	2	668		101	

由图5可知:SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维的乳化沥青冷再生混合料相比普通乳化沥青冷再生混合料的振铃计数-撞击数的参数分布更为密集。表9的统计结果表明:SBR改性乳化沥青冷再生混合

料的撞击数频次和振铃计数频次均为普通乳化沥青的1.9倍左右,而通过添加玄武岩纤维,撞击数频次为普通乳化沥青的4倍,振铃计数频次为普通乳化沥青的3.8倍。

声发射振铃计数结果表明:3种不同乳化沥青冷再生混合料声发射信号有很大差异。声发射振铃计数稀疏阶段表明应力初始加载稳定。此时,没有出现裂纹的进一步发展。随着加载时间的延长,声发射信号相比初始阶段越来越强烈,说明试件在初始加载过程累积的应力得以释放,微裂缝发展为大裂缝。随后导致梁试件发生断裂破坏,声发射振铃计数信号减少。SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维乳化沥青冷再生混合料相比普通乳化沥青冷再生混合料的振铃计数-撞击数的参数分布更为密集,撞击数频次和振铃计数频次的提高,从裂纹损伤程度的角度来看,SBR改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维的应用使得裂纹发展阶段得以延长,阻止裂纹的进一步演化,从而有效地提升乳化沥青冷再生混合料的抗裂性能。

3.4 断裂能和声发射能量指标相关性分析

为了分析声发射参数和力学参数的相关性,基于断裂能与声发射能量计算结果,将每种乳化沥青冷再生混合料的断裂能计算值和声发射能量值进行一对一关联,断裂能和声发射能量相关性关系见图6。3种不同乳化沥青冷再生混合料的断裂能和声发射能量指标之间具有较好的线性相关性。

4 结 论

(1) 对比普通乳化沥青冷再生混合料,SBR改性

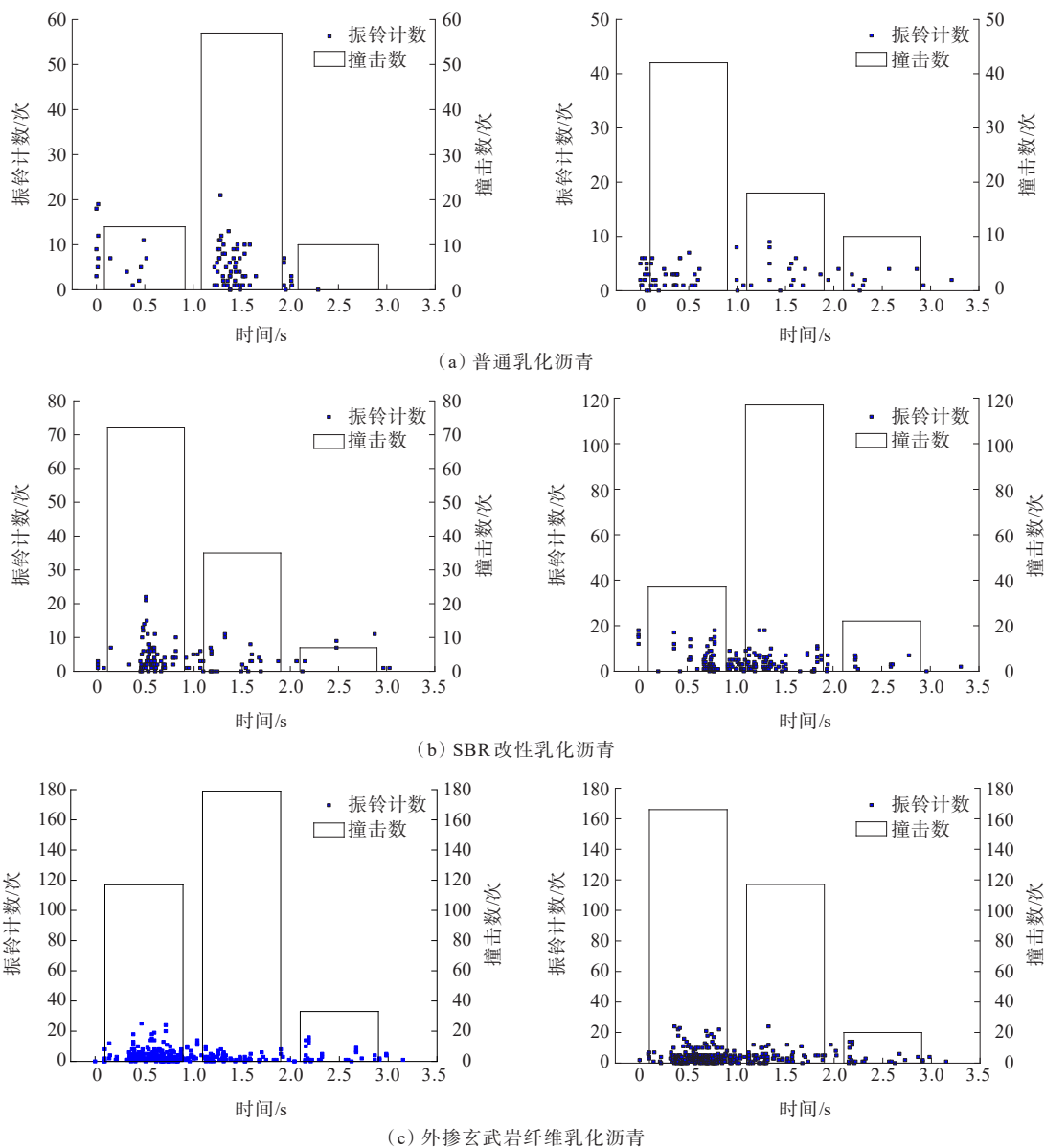


图5 3种乳化沥青冷再生混合料的声发射振铃计数-撞击数时程图

Figure 5 Time history of acoustic emission ringing count-impact count of three types of emulsified asphalt cold recycled mixtures

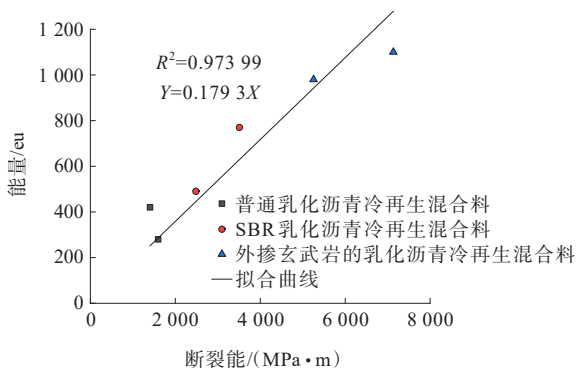


图6 断裂能和声发射能量相关性

Figure 6 Correlation between fracture energy and acoustic emission energy

乳化沥青和外掺玄武岩纤维对乳化沥青冷再生混合料的断裂能和应力强度因子均有较为显著的提升;外掺玄武岩提升更显著,抗裂性能更好。

(2) 在试验温度为 15℃,加载速度为 50 mm/min 的试验条件下,乳化沥青冷再生混合料的断裂破坏趋近于脆性破坏,断裂位置主要发生在沥青胶浆与细集料的界面处,SBR 乳化沥青或外掺玄武岩纤维可改善冷再生混合料的界面性能进而提升整体的抗裂性能。

(3) SBR 改性乳化沥青和外掺玄武岩纤维提高了乳化沥青冷再生混合料平均声发射能量,断裂过程中的声发射活动更为活跃,振铃计数和撞击数参

数可以较好地描述乳化沥青冷再生混合料的断裂特征,并且声发射能量和断裂能指标之间满足较好的线性相关性。

参考文献:

References:

- [1] 交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2022-06-16)[2022-10-21].https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
Ministry of Transport. Statistical bulletin of transport industry development in 2022[EB/OL]. (2022-06-16) [2022-10-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [2] 王兆仑,宁金成,栗威.冷拌再生沥青混合料能耗与碳排放量分析[J].公路,2021,66(5):263-268.
WANG Zhaolun, NING Jincheng, LI Wei. Analysis of energy consumption and carbon emissions of cold mix recycled asphalt mixture[J]. Highway, 2021, 66(5): 263-268.
- [3] 杨普新. 养生条件对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 250-255.
YANG Puxin. Influence of natural environment on the serviceability of emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 250-255.
- [4] 李俊升,樊江,王永鹏,等.厂拌乳化沥青冷再生混合料低温抗开裂性能研究[J].中国建材科技,2020,29(5):86-88.
LI Junsheng, FAN Jiang, WANG Yongpeng, et al. Study on low temperature cracking resistance of cold recycling mixture of plant mixed emulsified asphalt[J]. China Building Materials Science & Technology, 2020, 29(5): 86-88.
- [5] 吴俊强,吴文亮,卢家志.基于虚拟劈裂试验研究影响沥青混合料低温抗裂性能的因素[J].城市道桥与防洪,2022(2):204-209,25.
WU Junqiang, WU Wenliang, LU Jiazh. Research on factors affecting low-temperature anti-cracking performance of asphalt mixture based on virtual split test[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(2): 204-209, 25.
- [6] 郝培文,李万军,韩钰祥,等.基于OT试验的乳化沥青冷再生面层混合料抗反射裂缝性能研究[J].材料导报,2021,35(S2):150-157.
HAO Peiwen, LI Wanjuan, HAN Yuxiang, et al. Study on anti-reflection crack performance of emulsified asphalt cold recycling surface mixture based on OT test[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 150-157.
- [7] ARIMILLI S, JAIN P K, NAGABHUSHANA M N. Optimization of recycled asphalt pavement in cold emulsified mixtures by mechanistic characterization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 04015132.
- [8] JEONG M M, KIM S, SHEN J N. Laboratory evaluation of foamed asphalt mixtures with 100% RAP and rejuvenator [J]. Australian Journal of Civil Engineering, 2021, 19(1): 46-57.
- [9] 耿荣生,沈功田,刘时凤.基于波形分析的声发射信号处理技术[J].无损检测,2002,24(6):257-261.
GENG Rongsheng, SHEN Gongtian, LIU Shifeng. Acoustic emission signal processing technique based on waveform analysis[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(6): 257-261.
- [10] CHAI C, CHENG Y C, ZHANG Y W, et al. Experimental study on the performance decay of permeable asphalt mixture in seasonally frozen regions under freeze-thaw cycles[J]. Sustainability, 2020, 12(7): 2966.
- [11] JIAO Y B, FU L X, SHAN W C, et al. Damage fracture characterization of pervious asphalt considering temperature effect based on acoustic emission parameters [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210: 147-159.
- [12] 范文孝.玄武岩纤维增强路面材料性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2011.
FAN Wenxiao. Experimental investigation on performance of basalt fiber-reinforced pavement materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [13] 胡富贵,田小草,胡宏立,等.SBR胶乳掺量对改性乳化沥青性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(4):895-900.
HU Fugui, TIAN Xiaoge, HU Hongli, et al. Effect of SBR latex content on performance of modified emulsified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 895-900.
- [14] 韩庆奎,李泉,向思南,等.乳化沥青厂拌冷再生技术在高速公路大中修中的应用研究[J].新型建筑材料,2018,45(4):115-118.
HAN Qingkui, LI Quan, XIANG Sinan, et al. Research on the application of emulsified asphalt plant mixed cold regeneration technology in highway large and medium repair project[J]. New Building Materials, 2018, 45(4): 115-118.
- [15] 王华城,吴海林,吴强,等.基于现场实测数据的高速公路裂缝形态特征及开裂模式研究[J].公路交通科技,2018, 35(12):28-34,41.
WANG Huacheng, WU Hailin, WU Qiang, et al. Study on morphological characteristics and cracking mode of expressway crack based on field measured data[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(12): 28-34, 41.