

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20240224008

文章编号:1674-599X(2026)02-0133-11

引用格式:刘朝晖,廖赤阳,黄优.布敦岩沥青-玄武岩纤维复合改性沥青混合料抗裂性能试验研究[J].交通科学与工程,2026,42(2):133-143.

Citation: LIU Zhaohui, LIAO Chiyang, HUANG You. Experimental study on crack resistance performance of buton rock asphalt-basalt fiber composite modified asphalt mixtures[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 133-143.

布敦岩沥青-玄武岩纤维复合改性沥青混合料抗裂性能 试验研究

刘朝晖¹,廖赤阳¹,黄优^{1,2}

(1.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】研究布敦岩沥青和玄武岩纤维复合改性沥青混合料的抗裂性能。【方法】在15℃和-10℃两种温度条件下对70#基质沥青混合料、添加20%布敦岩沥青(Buton rock asphalt, BRA)的改性沥青混合料,以及添加4%玄武岩纤维(basalt fiber, BF)+20%BRA的复合改性沥青混合料分别进行了小梁弯曲试验和半圆弯拉试验。基于断裂力学理论,计算了最大弯拉应变(ϵ_B)、应力强度因子(K_{IC})、峰前断裂能(G_f)和抗裂指数(C_{RI})等指标,以此对沥青混合料的抗裂性能进行对比分析,并对低温小梁弯曲和半圆弯拉这两种抗裂试验进行了评价。【结果】BRA的加入会提高沥青的高温稳定性;BRA对沥青混合料抗裂性能的影响具有温度依赖性: BRA的掺入能提高沥青混合料的中温(15℃)抗裂性,但会对沥青混合料低温(-10℃)抗裂性带来不利影响。相比之下,对于玄武岩纤维与布敦岩沥青复合改性的沥青混合料,无论是在中温还是低温条件下,其抗裂性能均得到显著提升。这表明,玄武岩纤维的增黏、加筋作用能够有效延后沥青混合料的关键开裂时间,进而提高其弯拉强度及变形能力。【结论】与低温小梁弯曲试验相比,半圆弯拉试验具有更大的温度适用范围,且不同材料间的试验结果差异更为显著。因此,半圆弯拉试验在评价沥青混合料抗裂性能方面更具优势。

关键词:沥青混合料;半圆弯拉试验;布敦岩沥青;玄武岩纤维;低温抗裂性

中图分类号:416.216

文献标志码:A

Experimental study on crack resistance performance of Buton rock asphalt-basalt fiber composite modified asphalt mixtures

LIU Zhaohui¹, LIAO Chiyang¹, HUANG You^{1,2}

(1.School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to investigate the crack resistance performance of Buton rock asphalt (BRA)-basalt fiber (BF) composite modified asphalt mixtures. [Methods] Small beam bending and semi-circular bending tests were conducted on 70# matrix asphalt mixture, modified asphalt mixture with 20% BRA, and composite modified asphalt mixture with 4% BF and 20% BRA at 15℃ and -10℃. Based on fracture mechanics theory, indicators such as the maximum bending strain

收稿日期:2024-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(52278437);湖南省自然科学基金项目(2022JJ40479);湖南省交通运输厅科技创新计划项目(202236);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kfj210401)

通信作者:黄优(1987—),男,副教授,主要从事耐久性路面结构与材料、道路韧性理论与方法、固废高值化利用技术、交能融合理论与实践方面的研究工作。E-mail:hyzju@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

(ε_B), stress intensity factor (K_{IC}), pre-peak fracture energy (G_f), and crack resistance index (C_{RI}) were calculated to compare and analyze the crack resistance performance of asphalt mixtures, and to evaluate the two crack resistance tests of small beam bending and semi-circular bending. [Findings] The addition of BRA can improve the high-temperature stability of asphalt, and the influence of BRA on the crack resistance performance of asphalt mixtures is temperature-dependent. Additionally, the addition of BRA can improve the crack resistance of asphalt mixtures at medium temperature (15 °C), but has adverse effects on their crack resistance at low temperature (-10 °C). In contrast, the BRA-BF composite modified mixture exhibits significantly improved crack resistance performance at both medium and low temperatures, indicating that the viscosity enhancement and reinforcement effects of BF can delay the critical cracking point of asphalt mixtures, and thus improve the bending strength and deformation of asphalt mixtures. [Conclusions] Compared with low-temperature small beam bending tests, semi-circular bending tests have a wider temperature range and more significant differences among test results of different materials. Therefore, the semi-circular bending tests are more advantageous in evaluating the crack resistance performance of asphalt mixtures.

Key words: asphalt mixture; semi-circular bending test; Buton rock asphalt; basalt fiber; low-temperature crack resistance

“十四五”规划实施以来,我国道路技术正朝着以耐久、绿色、智能为显著特征的“第五代”交通体系转型发展,这对道路基础设施的建设与维护提出了更高要求。随着中国公路运输行业的快速发展,交通量和重载交通均呈现不断增加的趋势,进而对沥青路面的性能提出了更为严苛的要求。在此背景下,提升路面服役性能和耐久性,促进绿色公路的发展成为当前国内外道路工程研究的重点。布敦岩沥青(buton rock asphalt, BRA)作为一种特殊的沥青类物质,是在热、氧、压力等自然条件长期综合作用下,由石油转化而来的^[1-2]。它具备优异的高温稳定性、水稳定性、耐疲劳性能以及耐微生物侵蚀能力,同时成本低廉、施工便捷,因此被视为一种理想的天然改性剂,可用于提升沥青混合料的路用性能^[3-4]。吴怀睿等^[5]通过X射线衍射与扫描电子显微镜技术分析发现, BRA中的天然无机粉粒主要成分为碳酸岩,且以方解石为主,非碳酸岩无机矿物质量占比达15%,这些粉粒呈现出多孔、松散的结构特征。曾梦澜等^[6]则运用Superpave评价体系对BRA改性沥青进行了评估,结果显示其高温性能与温度敏感性均得到了显著提升,复数模量指数降低,表明该改性沥青能够满足夏季高温且温差较大地区的道路使用需求。刘黎萍等^[7]的研究结果表明: BRA可有效降低沥青混合料的孔隙率,提高马歇尔稳定度,从而增强沥青混合料的整体路用性能。作为一种沥青改性材料,布敦岩沥青可以提升

路面的高温性能、耐久性和水稳定性。但布敦岩沥青混合料在低温环境中的抗裂能力不足,特别是在寒冷、且昼夜温差大的高原地区,仍需进一步研究其抗裂能力^[8]。

玄武岩纤维(basalt fiber, BF)是一种以天然玄武岩石为原料,经破碎、高温熔融、拉丝、退解等一系列工艺制备而成的天然纤维材料^[9],在道路领域得到了比较广泛的应用。作为一种纤维增强材料,玄武岩纤维能够通过增黏、加筋等作用机制,显著提升沥青混合料的高低温性能、抗疲劳性能以及水稳定性。特别是在改善沥青混合料的低温抗裂性方面,玄武岩纤维展现出了突出的优势^[10-12]。韦佑坡等^[13]研究了玄武岩纤维在沥青混合料中的作用机理,发现玄武岩纤维的加入增加了沥青与集料之间的相界面,产生了一定的界面增强作用,使其成为多相复合物,这一变化不仅增加了沥青的黏度,还起到了显著的“加筋”作用。MIAO等^[14]发现玄武岩纤维与沥青混合料具有良好的界面结合性能,并且与玻璃纤维和木质素纤维相比,玄武岩纤维具有更优的增强效果。刘朝晖等^[15]通过研究制备了玄武岩纤维改性沥青混合料,发现该沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性均有较大提升。同时,利用扫描电镜观察纤维的加筋和桥接状态,证明纤维的加入能起到分散应力的作用。WANG等^[16]指出多孔沥青混合料中玄武岩纤维的最佳长度和掺量分别为9 mm和0.3%,并探索了玄武岩纤

维的作用机理。WU等^[17]和CHENG等^[18]观察到玄武岩纤维能显著且稳定地提升沥青混合料低温抗裂性。WANG等^[19]指出,玄武岩纤维降低了冻融循环下沥青混合料的损伤程度和增长率。

目前,评价沥青混合料抗裂性能的试验方法主要包括间接拉伸试验、低温小梁弯曲试验以及半圆弯拉试验等^[20-21]。但是在间接拉伸试验中试件压头区域容易产生应力集中现象,同时试件内部存在拉伸、压缩和剪切等多种作用模式,造成试件的应力状态复杂、多种破坏模式相互交织,难以准确地反映试件在拉伸状态下的开裂行为。而低温小梁弯曲试验存在试件难以获取、破坏应变等指标与路面开裂状况的相关性较低等问题。因此,利用间接拉伸试验和小梁弯曲试验来评价沥青混合料的低温性能存在一定局限性^[22]。相比之下,半圆弯拉试验具有显著优势。其试件制备更为简便,既可以在实验室通过特定工艺成型,也能够直接利用路面芯样进行试验。在加载过程中,试件的受力模式更贴近路面在车辆荷载作用下的真实应力状态^[23]。

本文制备了三种沥青混合料,分别为基质沥青混合料、布敦岩沥青改性沥青混合料以及布敦岩沥青-玄武岩纤维复合改性沥青混合料。随后,针对这三种混合料分别开展半圆弯拉试验和低温小梁弯曲试验,以此深入探究沥青混合料的抗裂性能。研究过程中,详细分析了布敦岩沥青、玄武岩纤维对沥青混合料抗裂性能的具体影响,同时对比了半圆弯拉试验与低温小梁弯曲试验这两种方法在表征沥青混合料抗裂性能方面的优劣。

1 试件制备及室内试验

1.1 原材料及布敦岩沥青掺量

在70#基质沥青中掺入布敦岩沥青,可制备改性沥青,布敦岩沥青的技术指标见表1。为确定布敦岩沥青的最佳掺量,首先,将基质沥青加热到135℃,然后按沥青质量的0%(对照组)、10%、20%、30%、40%分别加入不同掺量的布敦岩沥青,持续加热并搅拌,使之充分混合。接着,放入160℃的烘箱中,静置1h后取出。最后,用高速剪切仪在160℃的温度下,以3500 r/min的剪切速率剪切30 min。

本文针对不同BRA掺量的改性沥青,开展了三大指标(针入度、软化点、延度)、黏度及剪切流变(dynamic shear rheological, DSR)试验,不同BRA掺

表1 布敦岩沥青技术指标

Table 1 Technical indicators of BRA

项目	沥青含量/%	灰分含量/%	密度/(g·cm ⁻³)	闪点/℃
测试结果	25.60	11.00	1.16	304.00
技术要求	>18.00	<15.00	>1.00	≥230.00
试验方法	T 0615	T 0614	T 0603	T 0611

量沥青技术指标见表2,DSR试验结果见表3。由表2可知,随着BRA掺量的逐渐提高,BRA改性沥青的软化点和黏度呈现增加的趋势,而其针入度和延度则逐渐减小。相比于基质沥青,当BRA掺量为20%和40%时,其针入度分别减小44.3%和65.2%,软化点分别增大28.2%和43.7%,延度分别减小52.5%和67.1%,黏度分别增加29.3%和207.8%,说明BRA改性沥青的感温性减小,温度敏感性得到改善。

表2 不同BRA掺量沥青技术指标

Table 2 Technical indicators of asphalt with different BRA content

BRA掺量/%	软化点/℃	25℃针入度/mm	15℃延度/cm	65℃黏度/(MPa·s ⁻¹)
0	48.3	63.5	104.1	490.6
10	57.1	48.7	61.7	509.4
20	61.9	35.4	49.4	634.2
30	66.8	31.8	37.7	872.6
40	69.4	22.1	34.2	1510.0

表3 DSR试验结果

Table 3 DSR test results

BRA掺量/%	复数剪切模量G*/kPa	相位角δ/(°)	抗车辙因子
0	12.66	83.26	12.57
10	19.92	77.60	19.46
20	29.92	74.53	28.84
30	32.76	68.93	30.57
40	46.83	64.86	42.39

复数剪切模量G*是表征沥青抵抗剪切变形能力的参数,数值越大,表明沥青的抗剪切变形能力越强。相位角δ则用于描述沥青材料的黏弹性能,较小的δ值表明材料的弹性较大。抗车辙因子主要用于评价沥青的高温稳定性,抗车辙因子数值越大则沥青在高温下的稳定性能越佳,抗车辙能力越强。表3为相同温度下,不同掺量BRA下的改性沥青复数剪切模量G*、相位角δ和抗车辙因子。BRA改性沥青的G*和抗车辙因子随着BRA掺量的增加而增加,δ随着BRA掺量的增加而减小,说明将布敦岩沥青加入沥青后,在剪切荷载的作用下,改性沥

青抵抗变形的能力变强,且表现出显著的弹性。相较于70#基质沥青,掺量为10%、20%、30%、40%的BRA改性沥青的抗车辙因子分别提高了54.8%、129.4%、143.2%、237.2%。这主要是由于布敦岩沥青含量升高,沥青的弹性能力增加,沥青结合料的变形恢复能力增加,因而抗车辙因子逐渐变大。综上所述,BRA的掺入可大幅提高基质沥青的软化点、黏度和抗车辙因子,同时降低了针入度和延度。当BRA掺量从0%增加到20%时,沥青的各指标均出现了显著变化。当BRA掺量继续增加时,各指标的变化趋于平缓。当BRA掺量为20%时,其改性效果最佳,沥青的各指标也较均衡,因此,确定BRA的最佳掺量为沥青质量的20%。

选用AC-20级配进行马歇尔试验,其级配如图1所示。试验所用的集料为玄武岩,矿粉为石灰岩。通过试验确定了70#基质沥青混合料最佳油石比为4.8%,布敦岩沥青改性沥青混合料最佳油石比为4.9%。在制备布敦岩沥青-玄武岩纤维复合改性沥青混合料时,选用6 mm短切玄武岩纤维,玄武岩纤维的技术指标见表4。参考文献[24],将玄武岩纤维的掺量设定为沥青混合料质量的0.4%。

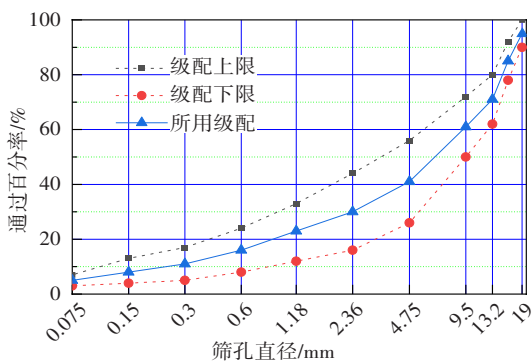


图1 AC-20沥青混合料级配曲线

Fig. 1 Grading curves of AC-20 asphalt mixture

表4 玄武岩纤维技术指标

Table 4 Technical indicators of BF

检测项目	技术指标
主要化学成分	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、CaO、MgO
纤维直径	12 ~ 15 μm
短切长度	6 ~ 12 mm
耐热性	(180±5) °C、体积无变化
熔点	1 450 ~ 1 500 °C
抗拉强度	2 800 ~ 3 800 MPa
弹性模量	90 ~ 100 GPa
断裂延伸率	3.2%

1.2 试件制备和试验加载

小梁弯曲试验主要用于评估沥青混合料在低温条件下的抗裂性能,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025),该试验采用碾压车辙板切割制备小梁试件,试件尺寸为250 mm(长)×30 mm(宽)×35 mm(高),采用MTS试验机进行加载,加载方式为位移控制模式,加载速率为50 mm/min,试验温度为-10 °C。通过该试验,可测量得到沥青混合料的最大弯拉强度和最大弯拉应变,并据此计算其弯曲劲度模量。低温弯曲小梁试验过程如图2所示,破坏后的试件如图3所示。



图2 小梁弯曲试验

Fig. 2 Small beam bending test



图3 破坏后的小梁试件

Fig. 3 Damaged small beam specimens

采用旋转压实操作制备半圆弯拉试件,其尺寸为150 mm(高)×100 mm(直径),具体操作时,先将旋转压实成型的试件沿纵向从中心位置切割,得到厚度为25 mm的圆柱体;接着,沿该圆柱体的直径方向将其切开,从而得到2个高为25 mm、直径为100 mm的半圆试件。为防止试件在试验过程中随机开裂,需沿着半圆试件的对称轴切割出一条预切口,该预切口宽1 mm、长15 mm。本试验共采用5组平行试件,半圆试件的具体形态如图4所示。

半圆弯拉试验采用MTS试验机进行加载。加载模式采用位移控制的3点加载方式,加载速率为

30 mm/min,同时实时采集加载过程中的荷载-位移数据。试验设置了15 °C和-10 °C两个温度水平,底部为梁式夹具支座,上压头为直径1 cm的圆柱体支座。图5展示了半圆弯拉试验加载过程。



图4 半圆试件

Fig. 4 Semi-circular specimen



图5 半圆弯拉试验

Fig. 5 Semi-circular bending test

1.3 抗裂性能指标

1) 应力强度因子。在断裂力学中,按裂纹所承受的荷载以及位移方向,将裂纹开裂模式分为三种^[25],分别为张开型(I型)、剪切型(II型)、撕裂型(III型),裂纹的三种基本开裂模式如图6所示。

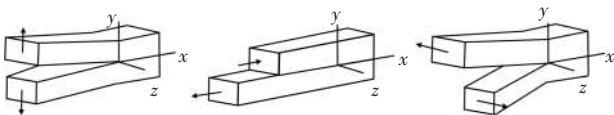


图6 裂纹的三种基本开裂模式

Fig. 6 Three kinds of basic cracking modes

半圆弯拉试验的裂缝扩展为张开型(I型),当考虑裂纹尖端附近应力奇异性时,传统的强度方程难以有效表达。因此可采用应力强度因子 K_I 来表征裂纹尖端附近应力奇异性,并据此建立相应的破坏条件。应力强度因子 K_I 一般写为:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中: Y 为形状函数,与裂纹的形状、位置有关; σ 为裂纹尖端应力场; a 为裂纹长度。在裂缝尖端附近,应力场与 K_I 成正比关系; K_I 值增大,裂缝附近的应力迅速增长。因此, K_I 可有效地反映裂缝尖端附近的应力场强度。

相关研究指出^[26],对于同一种材料的不同构件,若以相同的开裂形式加载并处于相同的应力状态下,它们在断裂时的应力强度因子 K_I 值是相同的,该值可视为一种临界值。断裂准则可描述为:当裂纹尖端应力强度因子 K_I 达到某一临界值 K_{Ic} (对应于平面应变状态)或 K_c (对应于平面应力状态)时,裂纹将经历失稳扩展过程。这一临界值通常用 K_{Ic} 或 K_c 表示,是材料阻止裂纹失稳扩展能力的度量,反映了材料的断裂韧性。HOFMAN^[27]的研究发现,随着沥青含量的增加,沥青混合料在断裂过程中更多地表现出非线性特征,此时I型应力强度因子公式不再适用,此时应力强度因子计算方法如式(2)所示:

$$K_{Ic} = \frac{P}{2rt} \times \sqrt{\pi a} \times Y \quad (2)$$

式中: K_{Ic} 为平面应变状态强度因子临界值; r 为试样半径; t 为试样厚度; P 为临界荷载。

2) 断裂能。断裂能是内聚力模型的参数之一,相关研究表明^[28]内聚力模型可以很好地表征沥青混合料断裂时的特性。随着研究的不断深入,越来越多的学者用内聚力模型来分析沥青裂缝的形成和扩展问题。可以通过内聚力-位移($T-\delta$)曲线来描述内聚力和位移的关系,如图7所示。

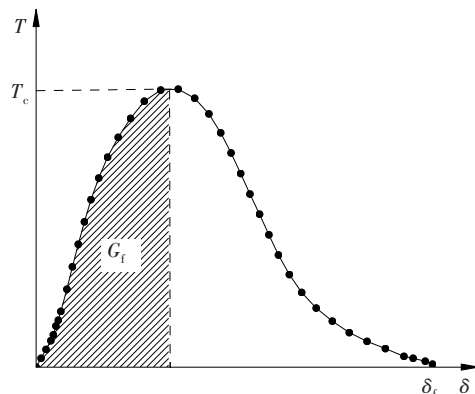


图7 半圆弯拉试件的T-δ曲线

Fig. 7 T-δ curve of semi-circular bending specimen

图7中, T_c 代表材料的力学强度,即内聚力所能达到的最大值; δ_f 表示裂纹或裂缝在材料中发展的最大位移,它可作为裂纹扩展的标志,通常被称为失效位移; G_f 为峰前断裂能; G_c 为断裂能,其值等于内

聚力-位移(T - δ)曲线下方的面积,这个面积代表裂纹面的位移从0直至完全分离所消耗的能量。 G_c 是量化材料抗断裂性能的重要参数,为研究裂纹扩展提供了关键的力学指标。其中峰前断裂能(G_f)体现沥青混合料的变形、松弛、强度等特性,反映试件整体的抗裂能力;峰后断裂能则与材料的残余强度有关。因此,本文使用峰前断裂能评价沥青混合料抗裂能力。峰前断裂能是指位移从0开始至位移顶峰处,曲线与横坐标所围成的面积,如图7中阴影部分所示。

3) 抗裂指数。抗裂指数是KASEER等^[29]提出的一种断裂指标,该指标采用峰值荷载替代柔性指数中峰后拐点的斜率进行计算。抗裂指数能够区分具有相似断裂能但峰值荷载不同的沥青混合料,评价抵抗裂缝扩展的可能性,是一种在有预切口工作条件下的综合抗裂指标,且与疲劳开裂现象密切相关。抗裂指数 C_{RI} 计算方法如式(3)所示:

$$C_{RI} = \frac{G_f}{|P_{max}|} \quad (3)$$

式中: C_{RI} 为抗裂指数; P_{max} 为最大临界荷载。

2 试验结果与分析

2.1 小梁弯曲试验

小梁弯曲试验的测试结果,涵盖最大抗弯拉强度、最大弯拉应变以及破坏时的弯曲劲度模量等指标,具体数据见表5。依据相关规范要求,在湖南地区对应的气候分区条件下,普通沥青混合料的破坏应变标准不得低于 $2\ 000 \times 10^{-6}$,改性沥青混合料的破坏应变标准则不得低于 $2\ 500 \times 10^{-6}$ 。

表5 三种沥青混合料的小梁弯曲试验结果

Table 5 Small beam bending test results of three types of asphalt mixtures

混合料类型	最大抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ 10^{-6}	弯曲劲度模量/MPa
基质沥青混合料	7.38	2 102	3 520
BRA改性沥青混合料	8.28	1 555	5 353
BF+BRA复合改性沥青混合料	10.03	2 753	3 943

从表5可知,70#基质沥青混合料的最大弯拉应变为 $2\ 102 \times 10^{-6}$,满足规范要求;然而,掺入20%布敦岩沥青后,试件的最大弯拉应变为 $1\ 555 \times 10^{-6}$,下

降了约26.0%,低于规范要求。同时,BRA改性沥青混合料最大抗弯拉强度为8.28 MPa,弯曲劲度模量达5 353 MPa,相比于基质沥青混合料的分别增加了约12%和52%。说明BRA的加入使得沥青混合料的抗弯拉强度有小幅提升,但同时沥青混合料明显变硬,因此降低了沥青混合料的低温性能,无法满足规范要求。而在加入玄武岩纤维后,试件的最大弯拉应变上升到 $2\ 753 \times 10^{-6}$,相比于70#基质沥青混合料的最大弯拉应变提高31.0%,相比于BRA改性沥青混合料的最大弯拉应变提高约77.0%;同时最大抗弯拉强度达到10.03 MPa,相比于基质沥青混合料和BRA改性沥青混合料分别提高了36%和21%,而弯拉劲度模量与基质沥青混合料的基本相当。这说明加入玄武岩纤维,不仅能增加试件的最大弯拉应变,还能提高试件最大抗弯拉强度,能有效改善混合料的低温抗裂性能。

2.2 半圆弯拉试验

在15℃条件下,三种沥青混合料的半圆弯拉试验荷载-位移曲线如图8所示。对于基质沥青混合料和BRA改性沥青混合料,在加载初期,沥青混合料具有较强的抗变形能力,随着位移的增大,荷载呈线性增加趋势;随着位移的增加,试件内部逐渐出现裂缝,损伤不断积累,在达到荷载峰值时试件的储能达到最大;此后,随着位移的进一步增大,荷载开始逐渐下降,试件内部的微裂缝快速扩张,试件承载力逐渐下降,直至最后完全断裂,总体而言试件表现出柔性破坏。对于BRA+BF复合改性沥青混合料,试件的前期加载过程与前两者相似,但在达到荷载峰值后,荷载急剧下降,表现出明显的脆性破坏。在三种混合料中,基质沥青混合料荷载-位移曲线最为平缓,试件达到破坏时的荷载最小、总位移最大;BRA改性沥青混合料的位移有所减小,但是破坏荷载显著提高;BF+BRA复合改性沥青混合料的破坏荷载最大、位移最小。

-10℃时半圆弯拉试验的荷载-位移曲线如图9所示。由图9可知,在加载初期,三种沥青混合料的荷载随位移呈线性增长趋势;荷载达到峰值后,荷载均急剧下降,试件快速断裂失效,表现出明显的脆性断裂。对比三种沥青混合料半圆试件荷载-位移曲线发现,在-10℃时,BRA改性沥青混合料的荷载峰值及其对应的位移都最小,其次是基质沥青混合料,而BF+BRA复合改性沥青混合料的荷载峰值及对应的位移均最大。

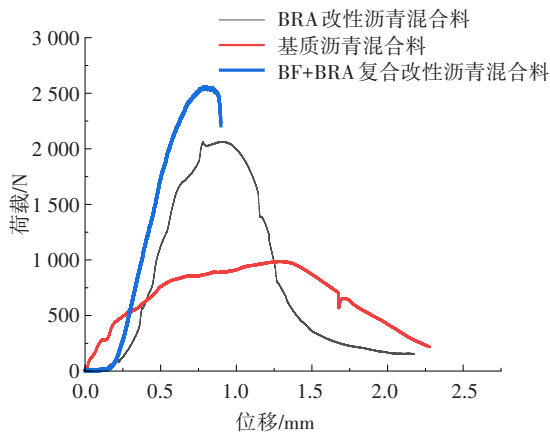


图8 15 °C下半圆试件的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of semi-circular specimens at 15 °C

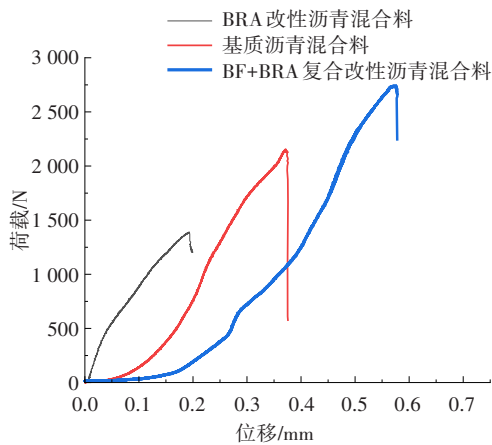


图9 -10 °C下半圆试件的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of semi-circular specimens at -10 °C

综合 15 °C 和 -10 °C 的荷载-位移曲线可以发现,相比于基质沥青混合料,BRA 的加入增强了混合料中温(15 °C)环境下的抗裂性能,但是降低了低温(-10 °C)环境下的抗裂性能。而 BF 与 BRA 的共同掺入,无论是在中温还是低温条件下,均能提高沥青混合料的抗弯拉强度,同时增强其变形能力。

2.3 应力强度因子

基于半圆弯拉试验的荷载-位移曲线,计算了半圆弯拉试件的应力强度因子(K_{Ic}),15 °C 下应力强度因子见表 6,-10 °C 下应力强度因子见表 7。

表 6 15 °C 下应力强度因子

Table 6 Stress intensity factors under 15 °C

混合料类型	端部位移/mm	最大荷载/kN	应力强度因子
基质沥青混合料	1.19	0.967	0.131
BRA 沥青混合料	0.64	1.788	0.241
BF+BRA 复合改性沥青混合料	0.83	2.296	0.307

表 7 -10 °C 下应力强度因子

Table 7 Stress intensity factors under -10 °C

混合料类型	端部位移/mm	最大荷载/kN	应力强度因子
基质沥青混合料	0.341	2.249	0.305
BRA 沥青混合料	0.189	1.418	0.286
BF+BRA 复合改性沥青混合料	0.516	2.630	0.338

由表 6 可知,在 15 °C 条件下,BRA 改性沥青混合料的应力强度因子 K_{Ic} 为 0.241,较基质沥青混合料的提升 84.0%。而在表 7 中 -10 °C 时,BRA 改性沥青混合料的 K_{Ic} 为 0.286,与基质沥青混合料的相比,降低了 6.2%。BF+BRA 复合改性沥青混合料试件的 K_{Ic} 无论是在 15 °C 还是 -10 °C 时均为最大值,相比于基质沥青混合料 K_{Ic} 分别提高了 134.4%、10.8%,较 BRA 改性沥青混合料 K_{Ic} 分别提高了 27.4% 和 18.2%。

由此可见,在基质沥青中添加布敦岩沥青(BRA)有利于提升混合料的中温抗裂性能。这是因为布敦岩沥青主要由纯沥青和灰分组成,其中纯沥青与基质沥青具有较好的相容性,而灰分则具有较大的孔隙率和表面粗糙度。因此,布敦岩沥青能够与基质沥青充分结合,提高了胶浆的稳定性,进而提升了沥青混合料在中温条件下的抗裂性能。然而,当温度降低时,由于布敦岩沥青中含有大量的硬质沥青,这些沥青质的稠度较大,会使改性沥青变硬变脆,尤其在低温时,这种硬化脆化效应对沥青混合料低温抗裂性能的负面影响远大于其正面作用,从而降低了 BRA 沥青混合料的低温抗裂性能。而玄武岩纤维的加入,能够在沥青混合料中形成一种三维网状结构,起到增黏、加筋、增韧和阻裂的作用。这种结构能够有效抵抗外力作用下集料之间的相对滑移,限制裂纹的产生和扩展,显著改善布敦岩沥青带来的不利影响,提高沥青混合料的应力松弛能力,即增强其低温抗裂能力。因此,BF+BRA 复合改性沥青混合料兼具良好的中温和低温抗裂性能。

2.4 断裂能和抗裂指数

试件在荷载作用下,产生裂纹直至发生破坏的这一过程本质上是沥青混合料内部损伤不断积累,最终引发性能劣化的过程,此过程伴随着能量的持续耗散。通过分析试件的荷载-位移曲线,可计算出试件破坏时所吸收的能量,用该能量能够较为准确地评价沥青混合料的抗裂性能。本文针对三种沥

青混合料,分别开展了小梁弯曲和半圆弯拉试验,并计算了试件的峰前断裂能(G_f)和抗裂指数(C_{RI}),如图10、11所示。

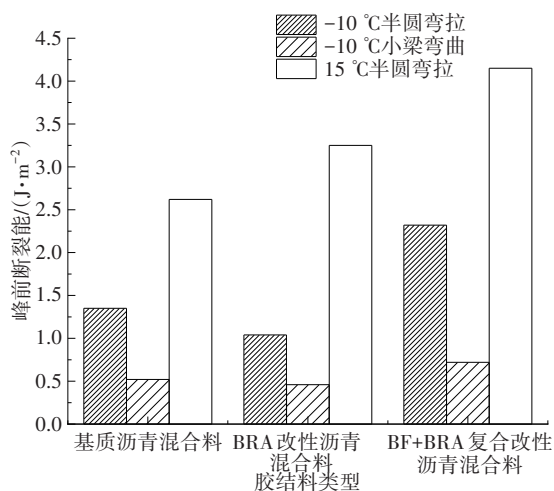


图10 三种沥青混合料的峰前断裂能

Fig. 10 Pre-peak fracture energy of three types of asphalt mixtures

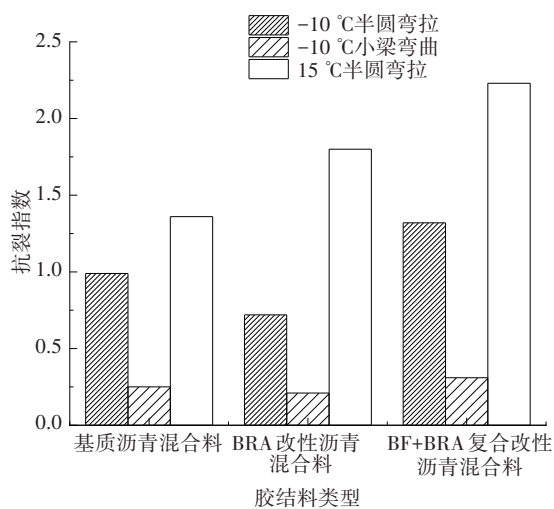


图11 三种沥青混合料的抗裂指数

Fig. 11 Crack resistance indexes of three types of asphalt mixtures

对比三种沥青混合料半圆试件的峰前断裂能 G_f 和抗裂指数 C_{RI} 发现,在-10 °C时,BRA 沥青混合料半圆试件的 G_f 和 C_{RI} 最小,基质沥青混合料的次之,BF+BRA 复合改性沥青混合料的最大。相比于BRA 沥青混合料,BF+BRA 复合改性沥青混合料的 G_f 和 C_{RI} 分别提高了87.5%和65.8%;相比于基质沥青混合料,BF+BRA 复合改性沥青混合料的 G_f 和 C_{RI} 分别提高了73.1%和25.6%。而在15 °C时,基质沥青混合料的 G_f 和 C_{RI} 最小;BRA 改性沥青混合料的次之,其 G_f 和 C_{RI} 分别较基质沥青的提高27.4%和15.3%;

BF+BRA 复合改性沥青混合料的 G_f 和 C_{RI} 最大,相比于基质沥青混合料,分别提高了56.3%和48.8%。进一步分析表明,在基质沥青中添加适量的布敦岩沥青或玄武岩纤维,均可显著提升沥青混合料在中温时的抗裂性能。然而,布敦岩沥青会对沥青混合料的低温抗裂性能产生不利影响。相比之下,玄武岩纤维与布敦岩沥青复合改性可同时提升沥青混合料的中温和低温抗裂性能,使其展现出更好的抗裂能力。

由图10、11可知,-10 °C条件下三种沥青混合料的半圆弯拉试验计算的 G_f 和 C_{RI} 相差较大;而小梁弯曲试验的 G_f 和 C_{RI} 比较接近,变化不明显。不同沥青混合料半圆弯拉试验的 G_f 变化范围为1.04~2.32 J/m²,小梁弯曲试验的 G_f 变化范围为0.46~0.72 J/m²,半圆弯拉试验的 C_{RI} 变化范围为0.72~1.32,而小梁弯曲试验的 C_{RI} 变化范围为0.21~0.31。BF+BRA 复合改性沥青混合料小梁弯曲试验的 G_f 较基质沥青混合料和BRA 改性沥青混合料的 G_f 分别提高38.4%和56.3%;而BF+BRA 复合改性沥青混合料半圆弯拉试验的 G_f 较基质沥青混合料和BRA 改性沥青混合料半圆弯拉试验的 G_f 分别提高71.8%和123.1%;小梁弯曲试验和半圆弯拉试验得到的BRA 改性沥青混合料 G_f 相较于基质沥青混合料的分别下降13.0%、29.8%, C_{RI} 分别下降19.0%和37.5%。说明半圆弯拉试验对沥青混合料抗裂性能的敏感性比小梁弯曲试验的高。

为进一步比较小梁弯曲和半圆弯拉哪一种试验方法能更好地反映沥青混合料的抗裂性能,对 G_f 和 C_{RI} 进行显著性分析。在统计分析中, p 值用于衡量各个因素对试验结果的影响程度。在95%的置信水平下($p=0.05$), p 值小于0.05,表明该因素对断裂指标具有显著影响。方差分析结果见表8。

表8 试验结果方差分析

Table 8 Variance analysis of test results

试验	G_f 的 p 值	C_{RI} 的 p 值
半圆弯拉	0.010 3	0.015 4
小梁弯曲	0.180 4	0.218 6

从表8可以看出,半圆弯拉试验得出的 G_f 和 C_{RI} 的 p 值均小于0.05,说明半圆弯拉试验中不同类型沥青混合料对峰前断裂能和抗裂指数有显著影响;

而小梁弯曲试验结果的 p 值均大于0.05,表明不同类型沥青混合料对小梁弯曲试验所得 G_r 和 C_{RI} 没有显著影响。因此,使用半圆弯拉试验评价沥青混合料抗裂性更加可靠。

3 结论

本文采用小梁弯曲和半圆弯拉试验,对70#基质沥青混合料、20%布敦岩沥青(BRA)改性沥青混合料和4%玄武岩纤维(BF)+20%布敦岩沥青(BRA)复合改性沥青混合料的抗裂性能进行试验研究,主要结论如下:

1) 随着BRA掺量的增加,BRA改性沥青的针入度和延度不断减小,软化点和黏度不断增加。说明BRA改性沥青的感温性减小,温度敏感性得到改善;BRA掺量越高,复数剪切模量和抗车辙因子也越高、相位角越小,沥青的高温性能越好。

2) 15℃时,加入BRA和BF后试件应力强度因子、断裂能和抗裂指数都有较明显的提高,说明在中温下,BRA和BF都可以增加沥青混合料的抗裂性能。

3) -10℃时,BRA的加入会降低沥青混合料的低温抗裂性能,而BF可以削弱这种不利影响,延后沥青混合料关键开裂时间,提高其低温抗裂性能。

4) 小梁弯曲试验得出的不同沥青混合料峰前断裂能和抗裂指数没有显著差异,不能准确地反映胶结料对沥青混合料抗裂性能的影响;半圆弯拉试验结果对材料抗裂性能的敏感性和显著性均比小梁弯曲试验的高,因此使用半圆弯拉试验评价沥青混合料的抗裂性更加可靠。

参考文献(References):

[1] LV S T, PENG X H, LIU C C, et al. Aging resistance evaluation of asphalt modified by Buton-rock asphalt and bio-oil based on the rheological and microscopic characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120589. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120589.

[2] 吴源锋, 廖军, 黄晚清, 等. BRA改性沥青高温性能评价指标的比较研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1079-1084. DOI:10.3963/j.issn.2095-3844.2019.06.018.

WU Yuanfeng, LIAO Jun, HUANG Wanqing, et al. Comparative study on high-temperature performance evaluation indexes of BRA modified asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation

Science & Engineering), 2019, 43(6): 1079-1084. DOI:10.3963/j.issn.2095-3844.2019.06.018.

[3] 查旭东, 钱光耀, 张云帆. BRA改性沥青混合料AC-13C适宜掺量的研究[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 1-5, 33. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2015.02.001.

ZHA Xudong, QIAN Guangyao, ZHANG Yunfan. Research on suitable mixing amount for BRA modified asphalt mixture AC-13C[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2): 1-5, 33. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2015.02.001.

[4] 李亚非, 方晓坤, 桂启涛. 基于原子力显微镜的活化工艺对布敦岩沥青改性沥青性能影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 215-218. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.038.

LI Yafei, FANG Xiaokun, GUI Qitao. Research on effect of activation process on the performance of Buton rock asphalt-modified asphalt based on atomic force microscope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 215-218. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.038.

[5] 吴怀睿, 叶奋, 徐骁龙. 布敦岩沥青无机粉粒微观特征及改性机理[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 556-564. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.20180582.

WU Huairui, YE Fen, XU Xiaolong. Microstructural characteristics and modification mechanism of inorganic fine particles in Buton rock asphalt [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(3): 556-564. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.20180582.

[6] 曾梦澜, 朱桃, 胡圣魁, 等. 布敦岩沥青改性沥青Superpave使用性能研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2014, 36(2): 30-35. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjx.u.2014.02.007.

ZENG Menglan, ZHU Tao, HU Shengkui, et al. Evaluating superpave performance of Buton rock asphalt modified asphalt binder [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2014, 36(2): 30-35. DOI: 10.13715/j.cnki.nsjxu.2014.02.007.

[7] 刘黎萍, 秦钜泽, 洪奕尚. 制作工艺对布敦岩沥青混合料高温性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1): 44-47.

LIU Liping, QIN Juzhe, HONG Yishang. Effect of production processes on high temperature performance of Buton rock asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2018, 42(1): 44-47.

[8] 黄文通, 徐国元. 布敦岩沥青混合料路用性能的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 87-91. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2012.02.016.

HUANG Wentong, XU Guoyuan. Experimental investigation into pavement performance of Buton rock asphalt mixtures [J]. Journal of South China University

- of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(2): 87-91. DOI:10.3969/j.issn.1000-565X.2012.02.016.
- [9] 李新娥. 玄武岩纤维和织物的研究进展[J]. 纺织学报, 2010, 31(1): 145-152. DOI:10.13475/j.fzxb.2010.01.014.
LI Xin'e. Research progress of basalt fiber and fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(1): 145-152. DOI:10.13475/j.fzxb.2010.01.014.
- [10] 梁波, 张海涛, 刘政, 等. 纤维改性沥青混合料性能研究进展[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 1-16. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.001.
LIANG Bo, ZHANG Haitao, LIU Zheng, et al. Research progress on properties of fiber modified asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 1-16. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.001.
- [11] 闫景晨, 刘松辉, 王崧. 玄武岩纤维复合布敦岩沥青改性沥青混凝土低温开裂特性[J]. 中国科技论文, 2023, 18(6): 637-642. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2023.06.009.
YAN Jingchen, LIU Songhui, WANG Song. Low temperature cracking characteristics of asphalt concrete synergistically modified by basalt fiber and Buton rock asphalt [J]. China Sciencepaper, 2023, 18(6): 637-642. DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2023.06.009.
- [12] 杨程程, 刘朝晖, 柳力, 等. 玄武岩纤维增强沥青混合料弯拉性能多参数敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(11): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.11.001.
YANG Chengcheng, LIU Zhaohui, LIU Li, et al. Analysis on multiparameter sensitivity of flexural-tensile performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2020.11.001.
- [13] 韦佑坡, 张争奇, 司伟, 等. 玄武岩纤维在沥青混合料中的作用机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(2): 39-44. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2012.02.008.
WEI Youpo, ZHANG Zhengqi, SI Wei, et al. Performance promoting mechanism of asphalt mixture by basalt fiber [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(2): 39-44. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2012.02.008.
- [14] MIAO Y H, WANG T, WANG L B. Influences of interface properties on the performance of fiber-reinforced asphalt binder[J]. Polymers, 2019, 11(3): 542. DOI:10.3390/polym11030542.
- [15] 刘朝晖, 朱国虎, 柳力, 等. 玄武岩纤维与高模量外掺剂复合增强沥青混合料性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2147-2155. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023.05.044.
LIU Zhaohui, ZHU Guohu, LIU Li, et al. Performance of asphalt mixture reinforced by basalt fiber and high modulus admixture [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 2147-2155. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2023.05.044.
- [16] WANG S, KANG A H, XIAO P, et al. Investigating the effects of chopped basalt fiber on the performance of porous asphalt mixture [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019(1): 2323761. DOI:10.1155/2019/2323761.
- [17] WU J R, HONG R B, GU C B. Influence of fiber type on low-temperature fracture performance of presawed asphalt mixture beams [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018(1): 5087395. DOI:10.1155/2018/5087395.
- [18] CHENG Y C, YU D, TAN G J, et al. Low-temperature performance and damage constitutive model of eco-friendly basalt fiber-diatomite-modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles[J]. Materials, 2018, 11(11): 2148. DOI:10.3390/ma11112148.
- [19] WANG W S, CHENG Y C, MA G R, et al. Further investigation on damage model of eco-friendly basalt fiber modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles [J]. Applied Sciences, 2019, 9(1): 60. DOI:10.3390/app9010060.
- [20] ZHONG K, YANG X, LUO S. Performance evaluation of petroleum bitumen binders and mixtures modified by natural rock asphalt from Xinjiang China [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 623-631. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.182.
- [21] 宋卫民, 徐子浩, 吴昊, 等. 一种沥青混凝土中低温断裂性能统一评价方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2386-2393. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.024.
SONG Weimin, XU Zihao, WU Hao, et al. A unified evaluation method for intermediate and low temperature fracture performance of asphalt concrete [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2386-2393. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.024.
- [22] 姜鑫龙, 杨树, 李庭予. 基于半圆弯曲试验的沥青混凝土低温性能指标研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(2): 428-434. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210216.
JIANG Xinlong, YANG Shu, LI Tingyu. Research on low-temperature performance index of asphalt concrete based on semicircular bending test [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(2): 428-434. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20210216.
- [23] 高虎, 杨新华, 陈龙. 沥青混合料半圆弯曲断裂实验和离散元数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 123-129. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.04.020.

- GAO Hu, YANG Xinhua, CHEN Long. Experimental and discrete element analysis of semi-circular bending fracture of heterogeneous asphalt mixture[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(4): 123-129. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.04.020.
- [24] 何东坡,左惠宇.基于流变学的玄武岩矿物纤维改性岩沥青高低温性能研究[J].功能材料,2020,51(10):10081-10088. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2020.10.012.
- HE Dongpo, ZUO Huiyu. High and low temperature performance of compound modified asphalt with basalt mineral fiber and rock asphalt based on rheology [J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(10): 10081-10088. DOI:10.3969/j.issn.1001-9731.2020.10.012.
- [25] 庞拓.混凝土路面细观开裂行为的近场动力学分析[J].中外公路,2021,41(5):64-67. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.014.
- PANG Tuo. Peridynamics analysis of micro-cracking behavior of concrete pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 64-67. DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.014.
- [26] 李盛,刘朝晖,李宇峙.刚柔复合式路面沥青层荷载疲劳损伤特性及开裂机理[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(9):3857-3862.
- LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Fatigue damage characteristics and cracking mechanism of asphalt concrete layer of rigid-flexible composite pavement under load [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3857-3862.
- [27] HOFMAN R. Semi-circular bending test to assess the resistance against crack growth [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2356(1): 133-138.
- [28] OZER H, AL-QADI I L, SINGHVI P, et al. Fracture characterization of asphalt mixtures with high recycled content using illinois semicircular bending test method and flexibility index [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2575(1): 130-137. DOI:10.3141/2575-14.
- [29] KASEER F, YIN F, ARÁMBULA-MERCADO E, et al. Development of an index to evaluate the cracking potential of asphalt mixtures using the semi-circular bending test [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 286-298. DOI:10.1016/j.2018.02.014.

(责任编辑:薛仪;校对:石月珍)