

细级配沥青混合料的抗裂指标研究

沈新¹, 林英乔², 杨树²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 裂缝会对沥青路面的正常使用造成极为严重的影响, 深入探究沥青材料的微观断裂机理, 对于提升路面使用寿命具有关键作用。为此, 采用半圆弯曲试验, 获取不同试验条件下试件的荷载-位移数据, 并据此计算出试件的强度、断裂能、抗裂指数等各类断裂指标, 进而研究沥青砂浆在不同温度下的抗裂特性; 同时, 通过系统分析沥青种类、沥青膜厚度、试验温度、加载速率等因素对沥青砂浆力学特性, 尤其是抗裂性能的影响, 对沥青砂浆试件开展定量与定性相结合的对比分析研究。结果表明: 沥青砂浆的断裂能随着加载速率的增大而减小; SBS改性沥青砂浆的断裂能优于基质沥青砂浆; 沥青膜厚度为10 μm 时的断裂能优于沥青膜厚度为9 μm 时; 10 $^{\circ}\text{C}$ 时的断裂能通常优于-5 $^{\circ}\text{C}$ 时, 且分别呈现柔性、脆性断裂及不同荷载-位移曲线。

关键词: 沥青; 断裂; 断裂能; 应力应变曲线

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0106-06

Research on Crack Resistance Performance of Fine Graded Asphalt Mixture

SHEN Xin¹, LIN Yingqiao², YANG Shu²

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Cracks have a significant impact on the normal use of asphalt pavements. The microscopic fracture mechanism of asphalt materials is further explored, which has a keying action in improving the service life of pavements. Therefore, the load-displacement data of specimens under different test conditions are obtained through the use of a semi-circular bending experiment, and according to this, various fracture indicators such as the strength, fracture energy and fracture indexes of the specimens are calculated so as to study the crack resistance of asphalt mortar at different temperatures. At the same time, by systematically analyzing the influence of factors such as asphalt type, asphalt film thickness, test temperature and loading rate on the mechanical properties of asphalt mortar, especially its crack resistance performance, a comparative analysis and study combining quantitative and qualitative methods are carried out on the asphalt mortar specimens. The results show that the fracture energy of asphalt mortar decreases with the increase of loading rate. The fracture energy of SBS modified asphalt mortar is superior to that of matrix asphalt mortar. The fracture energy when the asphalt film thickness is 10 μm is better than that when the asphalt film thickness is 9 μm . And the fracture energy at 10 $^{\circ}\text{C}$ is usually better than that at -5 $^{\circ}\text{C}$. The flexible fracture, brittle fracture and different load-displacement curves are presented respectively.

Keywords: asphalt; fracture; fracture energy; stress-strain curves

0 引言

沥青路面有着行车舒适性好、噪声低、养护简单、施工容易等不可替代的优点, 因此在我国有着广泛应用^[1]。随着“十四五”计划的不断推进, 沥青路面占公路路面的比例将不断提高。但随着使用年限的增加、交通量的不断增长、湿度温度变化、重载超载车辆的增加, 沥青路面逐渐出现了裂缝、松散、沉

陷、翻浆等多种病害, 极大地影响了道路的正常使用及其耐久性^[2-3]。为了尽量减少路面裂缝病害, 深入研究沥青路面裂缝的萌生以及扩展规律, 进一步发掘开裂机理, 完善路面抗裂性设计, 具有重要的实际工程意义。

研究发现, 沥青砂浆与沥青混合料同为多结构多层次的多尺度分散系, 其性能受温度、级配等多种因素影响^[4-6]。Hasan等^[7]基于DMA方法, 获得了沥青砂浆的动态力学响应曲线、特征温度等指标, 研究了沥青砂浆的高低温性能。结果表明, 相变温度 T_1 , T_0 , T_g 可用于评价沥青砂浆的低温性能; 细级配提高

收稿日期: 2025-05-23

作者简介: 沈新(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市道路、公路、规划和勘察设计工作。

了沥青砂浆的低温性能,粗级配提高了改性沥青砂浆的高温性能。Osman 等^[8]为了研究沥青砂浆的动态力学性能,采用分离式霍普金森压杆(SHPB),对砂浆进行了中等应变率下的压应力-应变试验。试验结果表明:砂浆峰值强度随着应变速率的增加而增大,但增长速率逐渐减小。Woldekidan 等^[9]利用改进的半圆弯曲(SCB)试验参数建立沥青混凝土断裂弹性指标,并提出了由荷载-位移曲线推导出的柔性指数(F_I)。Xing 等^[10]利用数字图像相关技术采集裂缝长度等信息,发现了沥青应变与面积大小的关系。Zhan 等^[11]对沥青、沥青砂浆、沥青混合料的高温特性和动态流变特性进行了分析比较,发现矿物填料和 0.15 mm 细骨料对沥青混合料高温性能影响较大。Harris 等^[12-13]对沥青砂浆与沥青混合料之间的力学关系相关性进行了大量研究,结果发现通过提高砂浆的力学性能可提高沥青混合料的抗裂性。

由于对于砂浆的界定具有争议,本文中使用的沥青砂浆也可以理解为细级配沥青混合料。本文主要通过通过对沥青砂浆 SCB 试验的能量指标分析来研究沥青砂浆的抗裂性能。

1 原材料及试验方法

1.1 级配与油石比

本试验采用 AC-13 级配,并根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求和已有研究经验确定了相应的沥青含量,确保马歇尔试验中沥青混合料的孔隙率低于 4%。

AC-13 级配曲线见图 1。

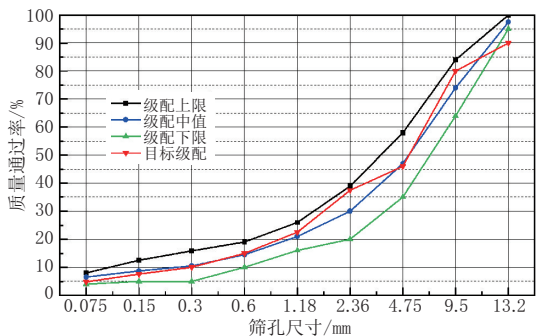


图 1 AC-13 级配曲线图

《公路沥青路面施工技术规范》所推荐的沥青膜厚度计算式为:

$$P_b = T_f \times S_A \tag{1}$$

式中: P_b 为沥青最佳用量,%; T_f 为沥青膜所需厚度, μm ; S_A 为集料比表面积, cm^2/g 。

S_A 采用美国 AI 提供的公式进行计算:

$$S_A = 10 \times [0.41 + 0.004 1P_{4.75} + 0.008 2P_{2.36} + 0.016 4P_{1.1} + 0.028 7P_{0.6} + 0.061 4P_{0.3} + 0.122 P_{0.15} + 0.327 7P_{0.075}] \tag{2}$$

式中: P_i 为第 i 级筛孔的通过率。

根据式(1)、(2),结合 AC-13 级配,可得到沥青膜厚度分别为 9、10 μm 所对应的油石比。

1.2 试验方法

半圆弯曲(SCB)试验在静载条件下可用来评价沥青混合料的低温抗裂性。通过旋转压实、路面取芯等方法得到圆柱形试件后,可根据试验需要按照不同厚度进行切割,且试件的利用率高。根据试验目的,试件可以预先开缝,预切缝深度和位置不同,断裂过程也会有所区别。评价指标包括断裂能、柔性指数和 J 积分等^[14-15]。

与间接拉伸试验相比,半圆弯曲试验更能反映裂缝萌生和扩展规律,与断裂指标的相关性更强,更适用于评价沥青混合料的低温抗裂性能。该试验通过荷载-位移曲线面积计算断裂能,通过试件尺寸和最大荷载计算弯拉强度,进而获得能量指标和强度指标,为全面评估沥青砂浆的抗裂性能提供了更可靠的依据。因此,采用半圆弯曲试验来评价沥青砂浆的抗裂性能具有明显优势。

半圆弯曲试验示意图见图 2。图中: a 为切缝长度; P 为荷载; $2s$ 为滚轴支座间距离, $2r$ 为半圆弯曲试件直径; b 为试件厚度。

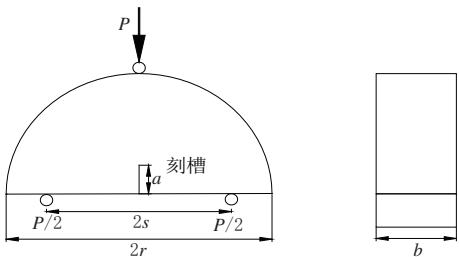


图 2 半圆弯曲试验示意图

1.3 试验指标

1.3.1 断裂能 G_f

断裂能指裂缝扩展单位面积所需的能量,它表征了沥青路面在低温环境下的抗裂性能。一般而言,沥青混合料断裂能的数值越大,表明其在该低温条件下的抗裂性能越好。 $G_f(\text{J}/\text{m}^2)$ 的计算式为:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \tag{3}$$

式中: W_f 为断裂功,J; A_{lig} 为韧带区域, m^2 。式(3)中 A_{lig} 的表达式为:

$$A_{lig} = (r - a) \times t \tag{4}$$

式中: r 为试样半径,m; t 为试样厚度,m。

1.3.2 柔性指数 F_I

柔性指数是衡量材料发生柔性断裂时的性能指标,它体现了沥青混凝土裂缝扩展的速度,在一定程度上体现了抗裂性能。柔性指数综合考虑了峰值后荷载-位移曲线的拐点斜率和断裂能,代表了裂缝平均扩展速率。通过分析柔性指数,可以发现早期开裂的脆性部分,并根据其数值对不同类型沥青混凝土的抗裂性能进行评价。

F_I 的表达式为:

$$F_I = \frac{G_f}{|m|} \times A \quad (5)$$

式中: A 为单位换算系数,取0.01; m 为峰后荷载-位移曲线拐点斜率,kN/mm。

1.3.3 抗裂指数 G_{RI}

为了更准确地评估沥青混合料的抗裂性能,研究人员提出了一种新的指标——抗裂指数,用来替代传统的柔性指数。抗裂指数采用峰值荷载进行计

算,有效降低了抗裂性能计算中可能出现的变异性。同时,它能够区分断裂能数值接近、但峰值荷载不同的情况,不过却无法反映实际裂缝的发展速度。

G_{RI} ($10^{-3}/m$)的计算式为:

$$G_{RI} = \frac{G_f}{|P_{max}|} \quad (6)$$

式中: P_{max} 为临界荷载,kN。

2 结果与讨论

2.1 断裂能及其影响因素

2.1.1 加载速率

在半圆弯曲试验中,相比高加载速率,低加载速率能更好地模拟沥青砂浆在低温下裂缝的发生和扩展,更好地评价沥青砂浆的低温抗裂性能。记录半圆弯曲试件在3种加载速率下的荷载-位移信息,并通过计算荷载-位移曲线的面积得到断裂能数值。试件在1、5、10 mm/min加载速率下的断裂能变化情况见图3。

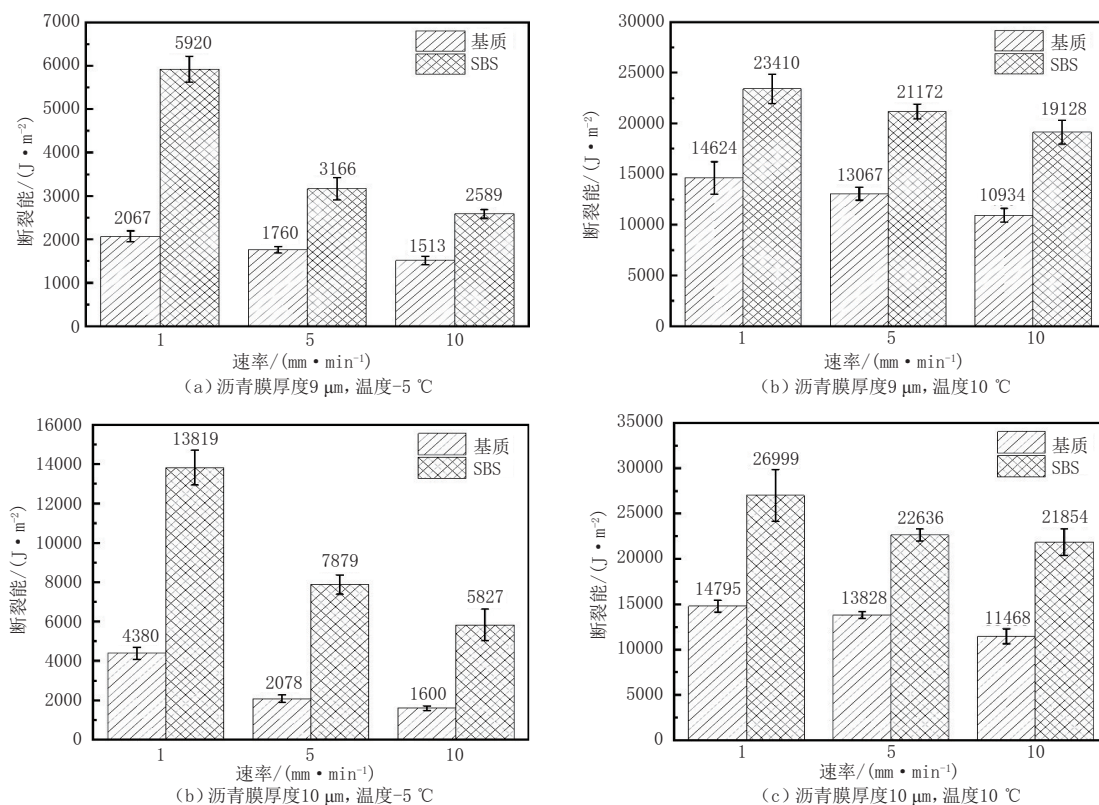


图3 不同条件对沥青砂浆断裂能的影响

由图3(a)可知,在沥青膜厚度为9 μm ,温度为-5 $^{\circ}C$ 的条件下,加载速率为1 mm/min时沥青砂浆的断裂能最大,然后随着加载速率的升高而降低,其中SBS改性沥青砂浆的降幅最大。由图3(b)可知,在沥青膜厚度为9 μm ,温度为10 $^{\circ}C$ 的条件下,基质沥青和SBS改性沥青砂浆的断裂能均随着加载速率的

提高而降低。图3(c)、(d)显示的断裂能变化趋势保持一致。

在本次试验中,沥青砂浆断裂能的变化幅度虽受到试验条件的影响,但总体趋势保持一致。这种现象可能与加载速率较低时,整个试验过程持续时间较长有关。

2.1.2 温度

由图3可知:

(1)对于SBS改性沥青砂浆而言,当沥青膜厚度分别为9、10 μm 时,在3种加载速率下,10 $^{\circ}\text{C}$ 时所表现出的断裂能均比-5 $^{\circ}\text{C}$ 时高,且提升幅度较大,断裂能的变化趋势则保持一致。原因是沥青砂浆在-5 $^{\circ}\text{C}$ 时,通常呈现出脆性断裂,而10 $^{\circ}\text{C}$ 时往往表现出柔性断裂,此时荷载-位移曲线囊括的面积更大,断裂能数值也因此有较大增长。

(2)对于基质沥青砂浆而言,当沥青膜厚度分别为9、10 μm 时,在3种加载速率下,10 $^{\circ}\text{C}$ 时的断裂能数值都要比-5 $^{\circ}\text{C}$ 时大,且此差异要比SBS改性沥青砂浆更为明显,说明基质沥青比SBS改性沥青对温度变化更为敏感。

综上所述,温度对沥青砂浆断裂能的影响较大,并且在10 $^{\circ}\text{C}$ 时的断裂能表现更好。

2.1.3 沥青种类

由于沥青砂浆的沥青含量高于沥青混合料,因此沥青性质对沥青砂浆的力学特性影响更为直接。

由图3可知,从加载速率这一关键因素来看,SBS改性沥青砂浆的断裂能均高于基质沥青砂浆。这充分说明SBS改性沥青在低温环境下具有更优异的综合力学性能,其改性成分能够有效改善沥青的低温脆性,提高其柔韧性和延展性,从而在承受外力时能够更好地分散应力,减少裂缝的产生和发展。特别值得注意的是,当加载速率为1 mm/min时,2种沥青砂浆断裂能的差异最为显著。这意味着在特定加载速率下,SBS改性沥青相较于基质沥青,在能量吸收和抵抗裂缝扩展方面具有更为突出的优势,能够更好地适应这种加载条件下的力学要求。

在特定的10 $^{\circ}\text{C}$ 试验温度和9 μm 沥青膜厚度条件下,SBS改性沥青砂浆的断裂能同样优于基质沥青砂浆。这一结果说明,在相对温和的低温环境(10 $^{\circ}\text{C}$)以及特定的沥青膜厚度设置下,SBS改性沥青依然能够保持其优越的抗裂性能。这进一步证明了SBS改性沥青在不同环境条件下的稳定性和可靠性,其内部结构或成分在低温下能够更好地协同工作,有效阻止裂缝的产生和扩展。

2.1.4 沥青膜厚度

比较图3(a)、(c)可知,在-5 $^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下,SBS改性沥青砂浆和基质沥青砂浆的断裂能在沥青膜厚度为10 μm 时数值较大。比较图3(b)、(d)可知,在10 $^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下,SBS改性沥青砂浆和基质

沥青砂浆的断裂能同样在沥青膜厚度为10 μm 时数值较大,并且比-5 $^{\circ}\text{C}$ 时对比更为明显,原因可能是油石比和沥青含量在低温时对于断裂特性更为重要。沥青含量的提高会提高沥青砂浆的断裂能,让沥青砂浆具有更好的抗裂性,但沥青含量增加到一定值时,断裂能将不再提高,且会随着沥青含量的继续增加而减小,抗裂性能将会下降。由此可见,选择合适的沥青膜厚度对于提高沥青砂浆的低温抗裂性至关重要。在-5 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同沥青膜厚度下沥青砂浆的断裂能差异更为明显,这暗示着在低温条件下,油石比和沥青含量对于沥青的断裂特性起着更为重要的作用。低温环境下,沥青的物理性能会发生显著变化,其黏弹性和韧性降低,更容易产生裂缝。此时,合理的油石比和沥青含量能够优化沥青与集料的黏结性能,形成更加均匀、致密的结构,从而提高沥青砂浆的整体强度和抗裂能力。沥青含量的变化对沥青砂浆的断裂能有着复杂的影响。一方面,沥青含量的提高会增强沥青与集料之间的黏结作用,填充集料间的空隙,使沥青砂浆更加密实,进而提高其断裂能,赋予沥青砂浆更好的抗裂性;另一方面,当沥青含量增加到一定值时,会出现“富沥青”现象,过多的沥青会在集料表面形成过厚的沥青膜,导致沥青与集料之间的黏结力下降,内部结构变得松散。在这种情况下,继续增加沥青含量,沥青砂浆的断裂能将会减小,抗裂性能也会随之下降。这表明存在一个最佳的沥青含量范围,能够使沥青砂浆的断裂能达到最大值,实现最佳的抗裂效果。

2.2 柔性指数及其影响因素

2.2.1 沥青种类

图4为温度为10 $^{\circ}\text{C}$ 时,沥青膜厚度分别为9、10 μm 时2种沥青砂浆的柔性指数对比。由图4可见,当加载速率为1 mm/min时,2种沥青砂浆的柔性指数均达到最大值,其中SBS改性沥青砂浆的柔性指数明显较高,且在沥青膜厚度为9 μm 时更为明显。SBS改性沥青砂浆的柔性指数整体高于基质沥青砂浆,说明SBS改性沥青砂浆具有更好的低温抗裂性。

2.2.2 沥青膜厚度

对比图4(a)、(b)可知,当沥青膜厚度为10 μm 且加载速率为1 mm/min时,SBS改性沥青砂浆的柔性指数最大;在3种加载速率下,沥青膜厚度为10 μm 时的柔性指数均大于沥青膜厚度为9 μm 时。由此可见,在本次试验条件下,沥青膜厚度为10 μm 时沥青砂浆的柔性指数明显好于沥青膜厚度为9 μm 时,

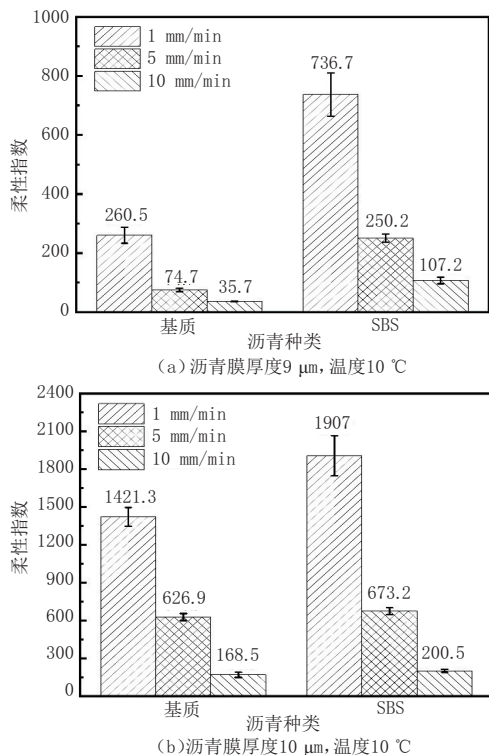


图4 不同条件对沥青砂浆柔性指数的影响

说明其有着更好的低温性能。

2.2.3 加载速率

在不同加载速率下,沥青砂浆的断裂能有着不同的数值,并且具有一定规律性,而柔性指数与断裂能具有一定的相关性,所以图4所示的柔性指数也随着加载速率的不同而不同。当沥青膜厚度为9 μm时,基质沥青砂浆和SBS改性沥青砂浆的柔性指数都随着加载速率的升高而降低,其中基质沥青砂浆的柔性指数降低幅度较明显,其最小值为35.7;当沥青膜厚度为10 μm时,2种沥青砂浆的柔性指数变化趋势与沥青膜厚度为9 μm时保持一致,柔性指数的降幅均较大,说明加载速率对柔性指数的变化具有显著影响。在本次试验条件下,2种沥青砂浆的柔性指数都会随着加载速率的增大而减小。

2.3 抗裂指数及其影响因素

2.3.1 温度

沥青是一种温度敏感性很高的材料,随着温度的变化,沥青砂浆的断裂能和峰值荷载也会发生变化,导致其抗裂指数也发生变化。图5为沥青膜厚度分别为9、10 μm时,2种沥青砂浆的抗裂指数。可以看出图中标记都处于斜线上方,表明10 °C时2种沥青砂浆的抗裂指数都要高于-5 °C时,其中以SBS改性沥青砂浆更为明显。说明温度能较大幅度地影响沥青砂浆的抗裂指数,温度较高时要明显好于温

度较低时。

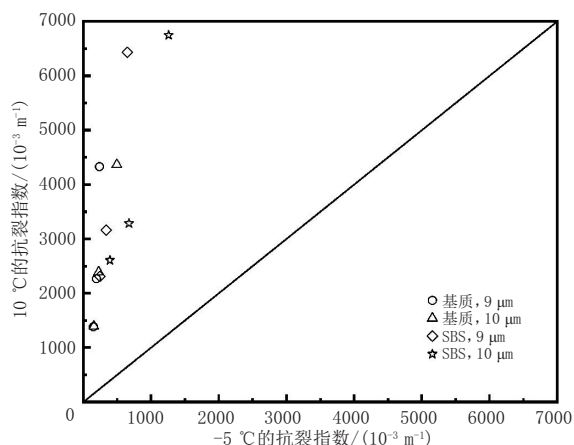


图5 温度对沥青砂浆抗裂指数的影响

2.3.2 沥青膜厚度

图5结果表明,在-5、10 °C下,无论是SBS改性沥青砂浆还是基质沥青砂浆,其抗裂指数均随着沥青膜厚度的增加而提高。特别是在加载速率为1 mm/min时,沥青膜厚度为10 μm时的抗裂指数达到最大值。这说明适当提高沥青膜厚度可以在一定范围内提升沥青砂浆的低温抗裂性能。但这并不意味着沥青膜越厚越好,而是需要把握合理的膜厚范围,才能最大程度地优化沥青砂浆的耐低温性。

3 结 语

SBS改性沥青砂浆的断裂能优于基质沥青砂浆;断裂能随着加载速率的增大而减小;沥青膜厚度为10 μm时的断裂能表现优于9 μm时;10 °C时的断裂能通常优于-5 °C时,且分别呈柔性、脆性断裂及不同荷载-位移曲线。综上,推荐以断裂能作为细级配沥青混合料抗裂设计指标。

参考文献:

- [1] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.
- [2] ZHOU Z, GU X, JIANG J, *et al.* Fatigue cracking performance evaluation of laboratory-produced polymer modified asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement material[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 379-389.
- [3] WU S, MUHUNTHAN B. A mechanistic-empirical model for predicting top-down fatigue cracking in an asphalt pavement overlay[J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(6): 1322-1353.
- [4] ZEIDADA W, LIU H, EZZAT H, *et al.* Review of the superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126063.
- [5] OMARS M, SHARIF B M, AHMED H U, *et al.* Comparison Study between Marshall and superpave mix design methods[J]. Halabja

- University Journal, 2021, 6(1): 348-365。
- [6] QIU C, DU X, TENG J, *et al.* Seismic design method for multi-story SMA braced frames based on inelastic displacement ratio[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 147: 106794。
- [7] HASAN M R M, HAMZAH M O, VAN De Ven M, *et al.* Disruption of air voids continuity based on permeability loss due to mortar creep[J]. Construction and Building Materials, 2016, 116: 347-354.
- [8] OSMAN, SAMI A. The role of bitumen and bitumen/filler mortar in bituminous mixture fatigue[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2005.
- [9] WOLDEKIDAN M F, HUURMAN M, MO L T. Nonlinear response characterization of bituminous mortar[M]. Wuhan: China ASTM International, 2012.
- [10] XING C, TAN Y, LIU X, *et al.* Research on local deformation property of asphalt mixture using digital image correlation[J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 416-423.
- [11] ZHAN X, LOU T, MING X. Effect of asphalt mortar on high-temperature properties of asphalt mixture[C]//ICTE 2013: Safety, Speediness, Intelligence, Low-Carbon, Innovation. Chengdu: Fourth International Conference on Transportation Engineering, 2013: 2927-2932.
- [12] HARRIS B M, STUART K D. Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt[J]. Asphalt Paving Technology, 1995, 64: 54-95.
- [13] KAVUSSI A, HICKS R G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1997, 66:153-186.
- [14] YANG S, JIANG J, LENG Z, *et al.* Feasibility and performance of the Semi-circular Bending test in evaluating the low-temperature performance of asphalt mortar[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121305.
- [15] LIU T, YANG S, BRAHAM A, *et al.* An alternative of crack length extension in R-curve analysis of asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120741.

~~~~~

(上接第 89 页)

- Interface Science, 2015, 224: 72-112.
- [9] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] Ingevity. Getting Started with Evothrm® [EB/OL]. [2025-09-04]. <https://www.ingevity.com/uploads/market-pdfs/Getting-started-with-Evothrm.pdf>.
- [11] 李克南, 延西利, 王钰洁, 等. 温拌 SBS 改性沥青的流变特性及微观机理研究[J]. 应用化工, 2023, 52(12): 3309-3313; 3320.
- [12] 张强, 高学凯, 梁春雨. 热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 218-222.
- [13] 刚增军. Sasobit 温拌剂对橡胶沥青流变与蠕变性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(12): 56-59.