

# 热压式煤基改性沥青混合料中低温性能研究

路凯冀<sup>1,2,3</sup>, 王超学<sup>1</sup>, 赵云刚<sup>4</sup>, 张宝鑫<sup>2,3</sup>, 蔡燕霞<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;  
3. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088; 4. 邯郸市交通运输局高速公路建设管理中心, 邯郸 056000)

**摘要:** 为了更准确的评价用于桥面铺装下面层沥青混合料的中低温抗裂性能, 通过数字图像散斑相关技术和半圆弯曲试验, 测试不同煤基掺量和不同混合料类型在中低温时的断裂能、应力强度因子和应变场分布状态。结果表明:  $-10^{\circ}\text{C}$  时, 掺质量分数为 25% 煤基的热压式沥青混合料应力强度因子达到最大, 断裂能随着煤基掺量的增加而逐渐降低; 采用煤基掺量为 25% 进行三种沥青混合料性能对比时, 热压式煤基改性沥青混合料中低温抗裂性能最好, 对桥面铺装具有更好适用性。整体上热压式煤基改性沥青混合料能更好满足冬季工程要求。研究成果可为相关工程提供参考。

**关键词:** 煤基; 热压式沥青混合料; 应力强度因子; 断裂能; 数字图像散斑相关技术

中图分类号: U416.217 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2026)01-0080-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.015

## Medium - low Temperature Performance of Heat - Pressed Coal - Modified Asphalt Mixture

LU Kaiji<sup>1,2,3</sup>, WANG Chaoxue<sup>1</sup>, ZHAO Yungang<sup>4</sup>, ZHANG Baoxin<sup>2,3</sup>, CAI Yanxia<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

3. Zhonglu Gao ke (Beijing) Road Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. Handan Municipal Transportation Department Expressway Construction Management Center, Handan 056000, China)

**Abstract:** In order to more accurately evaluate the medium and low temperature crack resistance performance of asphalt mixture used for bridge deck pavement, the fracture energy ( $G_f$ ), stress intensity factor ( $K_{Ic}$ ), and strain field distribution of different coal based content and mixture types at medium and low temperatures were tested through digital image correlation (DIC) technology and semi-circular bending (SCB) test. The results showed that at  $-10^{\circ}\text{C}$ , the stress intensity factor of the hot pressed asphalt mixture with a coal based content of 25% reached its maximum, and the fracture energy gradually decreased with the increase of coal based content; When comparing the performance of three types of asphalt mixtures with a coal based content of 25%, the hot pressed coal based modified asphalt mixture has the best low-temperature crack resistance and better applicability for bridge deck paving. Overall, the hot pressed coal based modified asphalt mixture can better meet the requirements of winter engineering. Research results can serve as a reference for related engineering projects.

**Key words:** coal based; hot pressed asphalt mixture; stress intensity factor; fracture energy; digital image correlation technology

作者简介: 路凯冀 (1975—), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 沥青路面结构与材料。

通信作者: 王超学 (1999—), 女, 硕士, 研究方向: 路面结构与材料。

收稿日期: 2024-10-25

## 0 引言

桥面铺装作为桥梁行车体系的组成部分,起到连接桥梁结构、分散交通荷载、减缓行车对桥面板冲击等重要作用<sup>[1]</sup>。铺装结构的质量好坏不仅影响着行车安全和舒适,同时关乎着桥梁体系的使用寿命和投资效益<sup>[2-4]</sup>。目前沥青混合料在桥面铺装材料中仍然占主体地位,但沥青混合料应用于桥面易受到多种因素影响,铺装层和桥面板作为一个整体进行工作,沥青混合料的变形协调性对整体起到至关重要的作用;桥面板与铺装层之间的黏结层抗剪性能不足会造成使用寿命过短;温度急剧下降使桥面铺装结构内部产生巨大的温度应力,导致沥青混合料变形能力下降,应力难以消解时会出现面层被拉裂现象<sup>[5]</sup>。热压式沥青混合料是一种悬浮-密实结构,变形协调性能好,具有突出的防水性能、优异的抗疲劳和耐久性,而且施工简便,只需采用常规设备就能进行施工等特点,对于桥面铺装具有广阔的利用前景<sup>[6-7]</sup>。

在目前的研究中,沥青混合料无法同时保有良好的高低温性能,添加煤基对热压式沥青混合料的高温性能提升效果显著,但对中低温抗裂性能产生不利影响<sup>[8-10]</sup>。罗培峰<sup>[11]</sup>对基于半圆弯曲试验(SCB)的沥青混凝土断裂试验方法和评价指标进行了研究,发现低温时沥青混凝土的破坏属于线性破坏,温度较高时沥青混凝土的破坏属于弹塑性破坏;熊爱明等<sup>[12]</sup>通过同样的试验发现,增加油石比虽然不能显著改善混合料的强度,但能增强其抗变形能力和减缓裂缝扩展速度;付欣等<sup>[13]</sup>认为试件厚度为50 mm,加载速率为5 mm/min时获得的试验参数适用于应力吸收层沥青混合料;时金娜等<sup>[14-16]</sup>基于半圆弯曲试验(SCB),对沥青混凝土断裂试验关键参数进行了研究,确定不同温度下的试验参数和评价指标,在弹塑性破坏过程中,失稳后混凝土仍具有一定的残余强度。

为此,以沥青混凝土断裂力学理论为基础,采用数字图像相关技术和半圆弯曲试验研究煤基掺量和混合料类型对沥青混合料中低温抗裂性能的影响,更准确的评价用于桥面铺装下面层沥青混合料中低温抗裂性能。

## 1 试验原材料

### 1.1 沥青

沥青为A级道路石油沥青(70号),按照JTE20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》规定的试验方法测定沥青的基本性能指标,试验结果和规范值见表1。

表1 沥青基本性能指标  
Table 1 Basic performance indicators of asphalt

指标	针入度 /(25℃, 0.1 mm)	软化点 /℃	15℃延度 /cm	闪点 /℃	相对密度 /(15℃, g/cm <sup>3</sup> )
试验结果	70	49.0	>100	281	1.095
规范要求	60~80	≥46	≥100	≥260	

### 1.2 集料

粗细集料均为石灰岩石料,矿粉为干燥、洁净的石灰岩磨细的矿粉,四种集料的密度见表2。

表2 集料性能指标  
Table 2 Aggregate performance indicators

集料规格 /mm	表观相对密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	毛体积相对密度 /(g/cm <sup>3</sup> )
(0-5)	2.747	2.675
[5-10)	2.726	2.692
[10-15)	2.828	2.795
[15-20)	2.828	2.796

### 1.3 煤基

煤基室温下为表面有光泽的黑色片状,质地硬脆易粉碎。作为外掺剂,为提高煤基与沥青的相容性,试验选用研磨后的粉末。

## 2 试验方案

### 2.1 试验配合比

选用15%、25%、35%三种煤基掺量开展热压式沥青混合料试验,确定最佳掺量为25%。对热压式、高模量和AC-20型沥青混合料开展试验,三种沥青混合料最大公称粒径相同,总油石比为煤基掺量与基质沥青之和。三种混合料油石比及煤基掺量见表3,制作沥青混合料时,将集料与煤基拌合90 s,再添加沥青拌合90 s,最后添加矿粉拌合90 s。根据三种混合料级配曲线图1和表4可知:热压式沥青混合料为间断级配,细集料和沥青用量多,空隙率小,结构密实。

## 材料科学

表3 最佳油石比及煤基掺量

Table 3 The optimal oil stone ratio and coal based dosage /%

混合料类型	总油石比	目标空隙率	煤基掺量
热压式	6.0	2.7	15、25、35
高模量	5.6	2.8	25
AC-20	4.8	4.3	25

表4 不同混合料马歇尔技术指标

Table 4 Marshall technical indicators for different mixtures

混合料类型	毛体积相对密度	理论最大相对密度	空隙率 /%	矿料间空隙率 /%	有效沥青饱和度 /%	稳定度 /kN	流值 /mm
热压式	2.473	2.541	2.7	13.8	81.2	26.39	4.91
技术要求			(2, 3.5]	$\geq 13.0$	(70, 85]	$\geq 8.00$	(2, 5]
高模量	2.480	2.553	2.8	13.1	78.1	19.16	3.90
技术要求			(1.5, 4]	$\geq 13.0$	(70, 85]	$\geq 15.00$	(1.4, 4]
AC-20	2.476	2.588	4.3	13.6	68.3	15.40	3.26
技术要求			(3, 6]	$\geq 13.0$	(65, 75]	$\geq 8.00$	(2, 4]

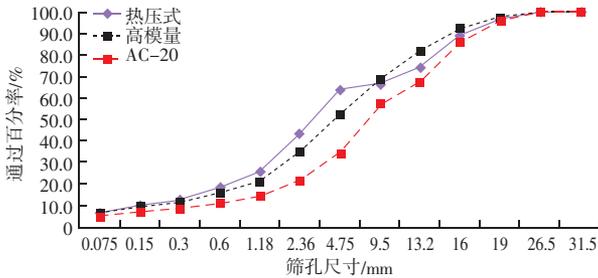


图1 混合料级配曲线图

Fig. 1 Grading curve of mixture

## 2.2 试件制备

沥青混合料试件通过旋转压实成型更贴合路面实际状况,制备试件时试模直径选择150 mm,旋转压实次数为100次,将试件空隙率与目标空隙率误差控制在 $\pm 0.5\%$ 之间,高度控制在170 mm左右。为了更好地控制试件的变异性,减小试件密度不均匀的影响,上下切掉20 mm厚的混合料,在压实试件中部选取两片厚度为50 mm的圆柱体切片,再将每个切片沿直径方向切成两个半圆形,沿每个半圆形试件的对称轴切一条长1.5 mm,宽1.5 mm的切缝<sup>[17]</sup>,试件成型过程如图2所示。

## 2.3 试验方法及步骤

为了探究沥青混合料在中低温的断裂性能,分别在低温 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、中温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行试验。半圆弯曲试验采用三点加载模式,如图3所示,为获得显著力学响应并避免支撑点变形或剪切破坏,设定试件厚度为50 mm,支座间距为100 mm。

试验步骤:

- (1) 预处理: 将半圆试件放入目标温度环境箱保温4~5小时。
- (2) 安装试件: 取出后对称放置于夹具,确保应力垂直穿过试件中心。
- (3) 数据清零: 加载前使上部加载点轻触试件,清除初始位移和荷载数据。
- (4) 加载与观察: 逐渐加载,预裂缝尖端沿垂直向上方向扩展裂缝。
- (5) 终止条件: 荷载降至0.3 kN以下时结束试验。

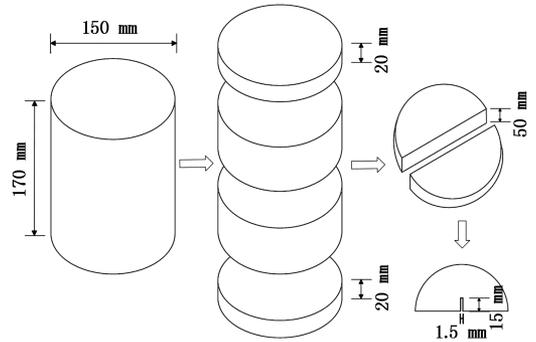


图2 SCB试件成型过程

Fig. 2 SCB specimen forming process

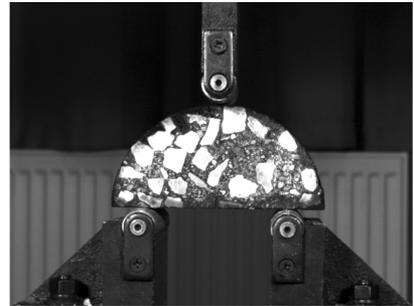


图3 SCB试验装置

Fig. 3 SCB test device

## 2.4 试验评价参数

沥青混合料的断裂能 $G_f$ 并不是一个能量单位,而是单位面积下试件韧带部分所承受的断裂功,由公式(1)求得。断裂功 $W_f$ 为试件断裂过程中所吸收的总能量,等于在加载过程中每一时刻加载荷载同该时刻裂缝尖端竖向位移所构成的面积如图4所示。韧带面积 $A_{lig}$ 指的是由裂缝尖端向上未开裂部分( $r-a$ )的面积,断裂能反映了试件从完好到断裂过程中所吸收的全部能量,断裂能越高,材料抵抗开裂的能力越好<sup>[18]</sup>。

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \quad (1)$$

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

$$A_{lig} = (r - a)t \quad (3)$$

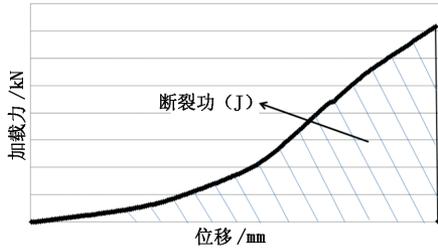


图4 SCB 试验加载曲线  
Fig. 4 SCB test loading curve

应力强度因子是反应裂缝尖端应力场强弱的物理量，它与应力、裂缝位置和尺寸等因素相关<sup>[19]</sup>。随着裂缝宽度不断增大或者应力逐渐增加，应力强度因子也逐渐增大。当应力强度因子扩大到某一个临界值  $K_{IC}$  时，裂缝就会发生失稳扩展，此时  $K_{IC}$  被称为断裂韧度<sup>[20]</sup>。公式 (5) 为半圆弯曲试验支撑底座之间的跨度距离与半径比值为 0.67 时的形状因子计算公式，应力强度因子描述的是材料抵抗裂缝扩展能力的度量<sup>[21]</sup>。

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{2Rt} \sqrt{\prod aY_1} \quad (4)$$

$$Y_{1(0.67)} = 3.638 - 0.139 \left( \frac{a}{r} \right) + 0.039 \exp \left( 7.387 \left( \frac{a}{r} \right) \right) \quad (5)$$

式中： $P_{max}$ ——峰值荷载 (N)； $R$ ——半圆弯曲试件半径 (mm)； $t$ ——半圆弯曲试件厚度 (mm)； $Y_1$ ——形状因子。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 煤基掺量对抗裂性能的影响

从图 5 可知，在低温状态下，沥青混合料表现为线弹性，断裂模式呈脆性断裂。随着煤基掺量的增大，荷载曲线呈线性关系逐渐增大，热压式沥青混合料裂缝尖端竖向位移逐渐减小，沥青混合料的强度呈现先增加后减小的现象，这是因为煤基中多稠环芳烃结构具有较大的极性，可有效改善沥青与集料的黏附性，当煤基掺量达到一定程度时，沥青质

的高脆特性影响到整个体系导致强度降低。另一方面，随着煤基掺量增加，在拌合过程中煤基沥青无法完全溶胀，易出现沥青性能不均匀、应力集中等问题，影响热压式沥青混合料的抗裂性能。

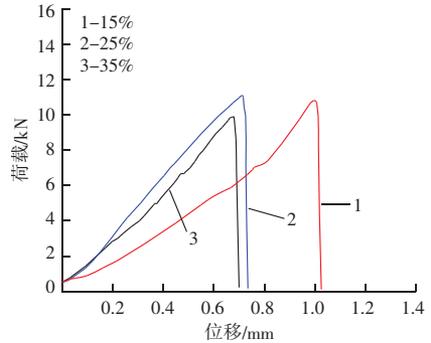


图5 -10 °C 时不同煤基掺量荷载 - 位移曲线图  
Fig. 5 Load displacement curve graph of different coal base dosages at -10 °C

由图 6 可知，随着温度升高沥青混合料表现出一定的黏弹性，在加载初期位移与荷载呈线性关系，随后表现出一定的非线性，位移逐渐增加，直到开裂；试件开裂后还存在一定的强度，荷载随着位移的增加而逐渐降低并没有立刻失去承载能力，说明中温时的断裂模式为延性破坏。随着煤基掺量增加，沥青混合料的强度也逐渐增加。

由公式 (4) 可知  $K_{IC}$  与峰值荷载呈线性关系，所以，随着煤基掺量增加热压式沥青混合料应力强度因子  $K_{IC}$  先增加后减小，说明在一定范围内增加少量的煤基可以提高热压式沥青混合料的低温断裂韧性；由图 7 可知，随着煤基掺量增加，断裂能呈明显的线性递减趋势，主要是由于随着煤基掺量增加，试件破坏时的裂缝尖端竖向位移逐渐减小，故掺加 15% 煤基的热压式沥青混合料断裂能更大。

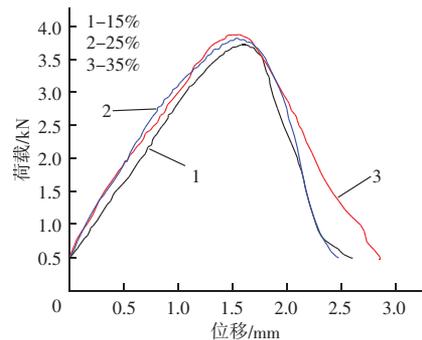


图6 25 °C 时不同煤基掺量荷载 - 位移曲线图  
Fig. 6 Load displacement curves graph of different coal base dosages at 25 °C

## 材料科学

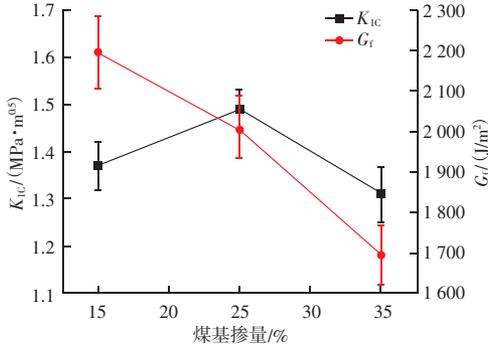


图7 -10 °C时不同煤基掺量应力强度因子  $K_{IC}$  和断裂能  $G_f$   
Fig. 7 Stress intensity factor  $K_{IC}$  and fracture energy  $G_f$  at different coal base dosages at -10 °C

由图8可知,在25 °C时,峰后断裂能的数值随着煤基掺量的增加而逐渐增大,断裂韧性的数值也随着煤基掺量的增加而逐渐增大,说明中温下煤基掺量可以提高沥青混合料的开裂韧性;随着煤基掺量增加,与掺量为15%的热压式沥青混合料相比,掺加25%的沥青混合料的峰后断裂能提高了19%,与掺量为25%的热压式沥青混合料相比,掺加35%的沥青混合料的峰后断裂能提高了31%。

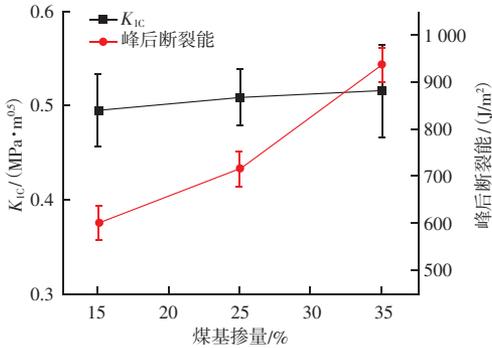


图8 25 °C时不同煤基掺量下的应力强度因子  $K_{IC}$  和峰后断裂能  
Fig. 8 Stress intensity factor  $K_{IC}$  and post peak fracture energy at different coal base dosages at 25 °C

### 3.2 混合料类型对抗裂性能的影响

由图9可知,不同混合料的荷载-位移曲线呈线性关系逐渐增大到峰值荷载然后迅速卸载,峰后面积几乎没有,代表沥青混合料在低温时带裂缝工作能力差,一旦出现裂缝沥青混合料就失去承受荷载的能力<sup>[22]</sup>。与高模量混合料和AC-20混合料相比,热压式沥青混合料强度更高,主要是由于热压式沥青混合料采用间断级配使得集料之间能够有效嵌挤,增强了混合料的强度,提升了承载能力。另一方面与高模量混合料和AC-20混合料相比,热压式沥青混合料的位移最大,主要是因为热压式沥青混合料

沥青和细集料的含量更高,从而增强了黏结性和稳定性,提高了混合料抗变形能力。

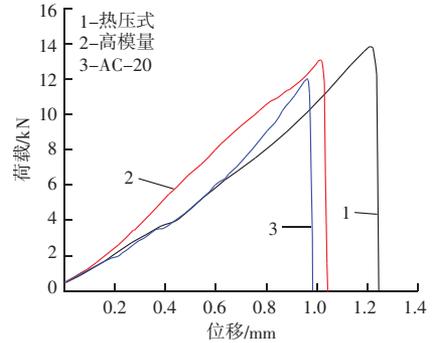


图9 -10 °C时不同混合料荷载-位移曲线图  
Fig. 9 Load displacement curve graph of different mixtures at -10 °C

由图10可知,峰后面积和峰前面积几乎呈对称分布,代表沥青混合料在中温时带裂缝工作能力比低温时要好,即使出现裂缝沥青混合料也没有完全失去承受荷载的能力。中温时三种混合料中强度最高是热压式沥青混合料,主要是因为温度升高时沥青含量高的沥青混合料黏性变形能力更强。

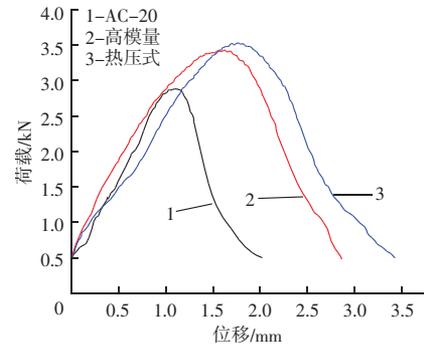


图10 25 °C时不同混合料荷载-位移曲线图  
Fig. 10 Load displacement curve graph of different mixtures at 25 °C

煤基掺量为25%的三种沥青混合料在-10 °C条件下的应力强度因子  $K_{IC}$  和断裂能  $G_f$  如图11所示,热压式沥青混合料应力强度因子显著比高模量混合料和AC-20混合料应力强度因子大,故热压式沥青混合料的低温断裂韧性更好。

由图12可知,热压式沥青混合料应力强度因子显著比高模量混合料和AC-20混合料应力强度因子大,故热压式沥青混合料的中温断裂韧性更好;与AC-20沥青混合料相比,高模量沥青混合料的峰后断裂能提高了66%,热压式沥青混合料的峰后断裂能提高了78%。热压式沥青混合料在中温条件下断

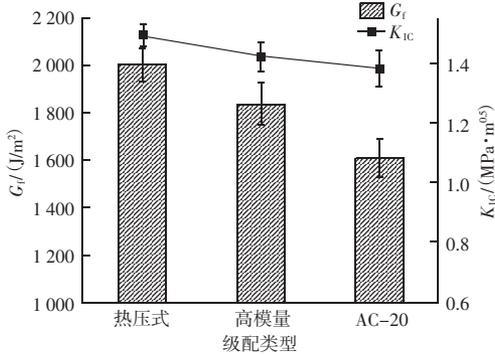


图 11  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同混合料应力强度因子  $K_{IC}$  和断裂能  $G_f$   
 Fig. 11 Stress intensity factor  $K_{IC}$  and fracture energy  $G_f$  at different mixtures at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

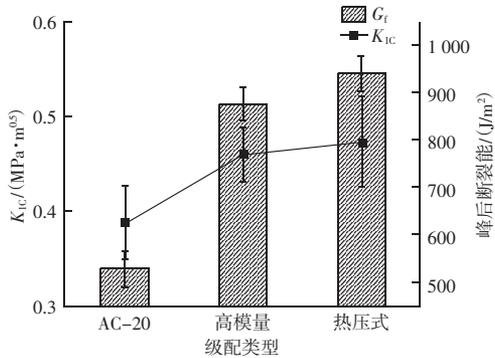
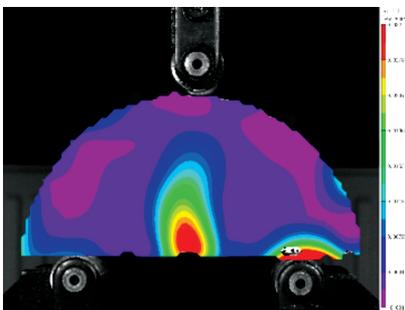


图 12  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同混合料应力强度因子  $K_{IC}$  和峰后断裂能  
 Fig. 12 Stress intensity factor  $K_{IC}$  and post peak fracture energy at different mixtures at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

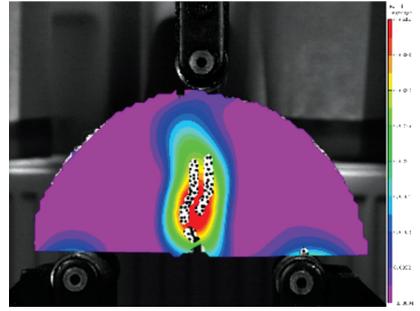
裂性能较好，随着温度升高沥青黏结性增强，提高了混合料塑性变形能力。

### 3.3 基于 DIC 的横向应变云图分析

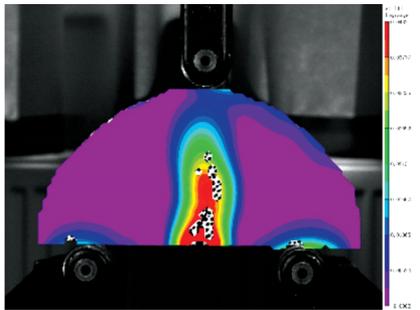
由图 13 可知， $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同煤基掺量的热压式沥青混合料在达到最大承载力时的横向应变云图从受拉到受压的颜色变化从红色到紫色，三种煤基掺量热压式沥青混合料的横向应变场集中区域最开始出现在预裂缝处，随着裂缝发展开始向上移动。其中，掺加 15%、25%、35% 煤基的热压式沥青混合料最大应变分别为 0.015 5、0.032 0、0.043 2。随着



(a) 15%



(b) 25%

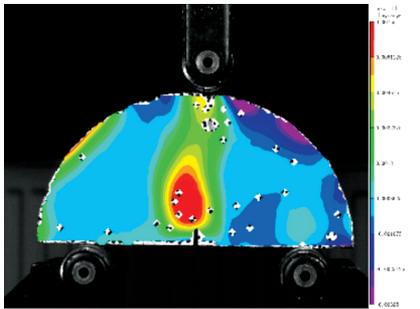


(c) 35%

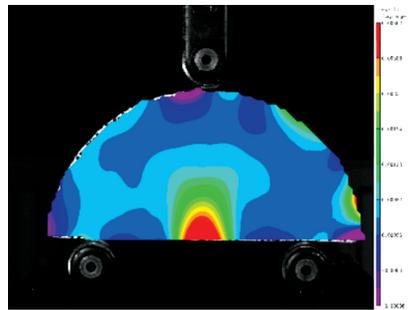
图 13  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同煤基掺量横向应变云图  
 Fig. 13 Horizontal strain cloud map of different coal base dosages at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

煤基掺量增加应变场集中范围呈现递增趋势，说明煤基掺量过多会导致试件破坏应变增大，对热压式沥青混合料的变形能力产生不利影响。

由图 14 可知，掺加 15%、25%、35% 煤基的热压式沥青混合料应力集中区域应变分别为 0.075 5、

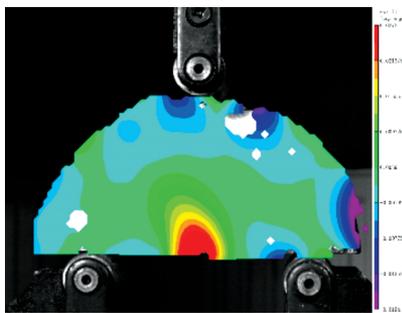


(a) 15%



(b) 25%

## 材料科学



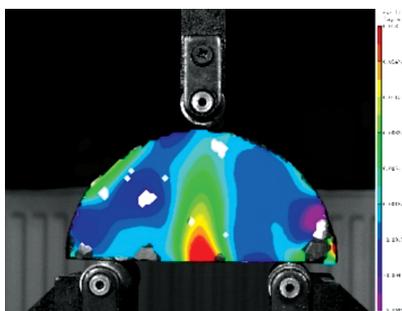
(c) 35%

图 14 25 °C 时不同煤基掺量横向应变云图

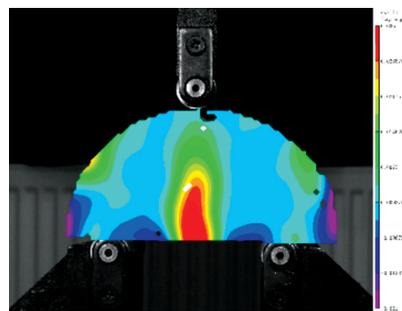
Fig. 14 Horizontal strain cloud map of different coal base dosages at 25 °C

0.036 2、0.027 2，且煤基掺量为 15% 时应力集中区域比掺量为 25% 和 35% 时位置都要偏上，应力集中范围更大，说明在中温时增加煤基掺量可以抑制裂缝的发展。

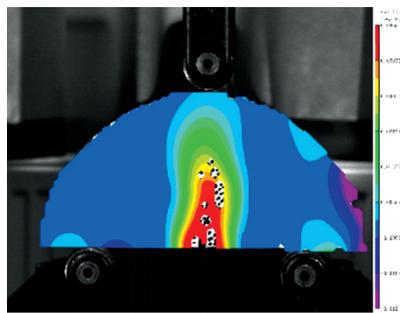
由图 15 可知，沥青混合料的抗拉强度小于其抗压强度，所以表现为拉应力在试件的破坏行为中占主导地位。热压式、高模量、AC-20 沥青混合料最大应变分别为 0.018 0、0.036 0、0.046 5，并且热压式沥青混合料应变场集中范围较小。说明相较于连续级配而言间断级配更能降低结构间空隙率，增强沥青混合料的强度，使得试件整体横向应变较均匀，在一定程度上削弱横向应变集中。



(a) 热压式



(b) 高模量



(c) AC-20

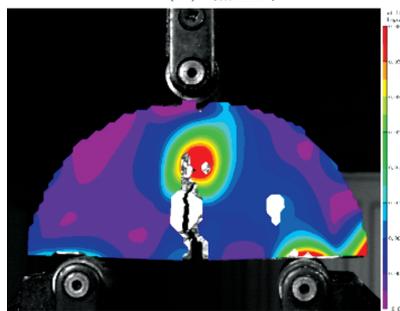
图 15 -10 °C 时不同混合料横向应变云图

Fig. 15 Horizontal strain cloud map of different mixtures at -10 °C

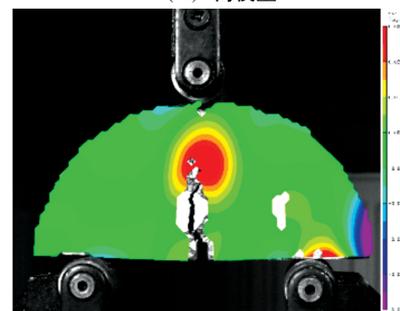
由图 16 可知，热压式、高模量、AC-20 沥青混合料最大应变分别为 0.034 6、0.037 4、0.045，并且热压式沥青混合料应变集中范围较小，裂缝发展趋势较小。说明相较于连续级配而言间断级配在一定程度上削弱应变集中，抑制沥青混合料试件裂缝发展。



(a) 热压式



(b) 高模量



(c) AC-20

图 16 25 °C 不同混合料横向应变云图

Fig. 16 Horizontal strain cloud map of different mixtures at 25 °C

## 4 结论

基于沥青混凝土断裂力学理论,采用数字图像相关技术和半圆弯曲试验研究三种煤基掺量和三种混合料的中低温抗裂性能,可以获得以下结论:

(1) 在低温  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,掺量为 25% 煤基的热压式沥青混合料应力强度因子 ( $K_{IC}$ ) 达到最大,但随着煤基掺量增加,热压式沥青混合料的断裂能 ( $G_I$ ) 逐渐降低。

(2) 在中温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,随着煤基掺量的增加,峰后断裂能和应力强度因子 ( $K_{IC}$ ) 逐渐增大,即煤基掺量为 35% 时热压式沥青混合料抗裂性能最优。

(3) 确定 25% 为最佳煤基掺量,热压式沥青混合料的中低温抗裂性能最优,AC-20 混合料中低温抗裂性能最差。

## 参 考 文 献

- [1] 唐亮, 乔浩玥, 屈建, 等. 高性能混凝土在钢桥面铺装中的应用研究进展 [J]. 混凝土, 2024 (4): 83-88, 133.
- [2] HAN Y J, NI F J, JIANG J W, et al. Rheological investigation of a super-tough resin-based binder for steel bridge deck paving [J]. Construction and Building Materials, 2023, 384.
- [3] 闵召辉, 孔冬雷, 黄卫. 钢桥面铺装用环氧沥青混合料低温断裂性能 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15 (1): 91-95.
- [4] SUN J, HUANG W, LU G Y, et al. Investigation of the performance and micro-evolution mechanism of low-content thermosetting epoxy asphalt binder towards sustainable highway and bridge decks paving [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384.
- [5] REN H S, QIAN Z D, CHEN T J, et al. Fracture resistance of asphalt mixtures used for bridge deck pavement in high-altitude and cold regions [J]. Construction and Building Materials, 2024, 443137833-137833.
- [6] 白峻荣. 热压式沥青超薄磨耗层开发 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [7] 梅万波. 热压式沥青混合料路面结构行为研究 [D]. 成都: 西

南交通大学, 2013.

- [8] DIAB A, ZHANG C, WANG H, et al. Characterization of Low Temperature Crack Resistance of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Semi-Circular Bending Tests [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2016, 44 (2): 847-855.
- [9] 要辉, 吴永杰, 阮如玉, 等. 煤液化残渣结构演变及其高软化点包覆沥青制备表征 [J]. 炭素技术, 2024, 43 (4): 60-69.
- [10] 王建立, 尹甜, 姜浩强, 等. 煤液化沥青组成结构研究进展 [J]. 炭素技术, 2024, 43 (2): 6-11, 22.
- [11] 罗培峰. 基于半圆弯曲试验的沥青混合料断裂试验方法和评价指标研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [12] 熊爱明, 黄卫东, 吕泉, 等. 半圆弯拉试验评价沥青混合料低温性能指标选取 [J]. 石油沥青, 2020, 34 (4): 33-39.
- [13] 付欣, 刘秋, 陈拴发. 基于 ANSYS 的带切口半圆弯曲试验参数分析 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (2): 13-17, 28.
- [14] 时金娜, 赵燕茹, 郝松, 等. DIC 技术分析玄武岩纤维混凝土单轴受压应力应变曲线研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (6): 1668-1673, 1680.
- [15] 赵健龙. 基于 DIC 柱体试样表面场变形的测量研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [16] 郑得标. 沥青混合料中低温半圆弯曲断裂试验关键参数研究及粘弹性分析 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [17] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (7): 50-57.
- [18] 宋卫民, 吴昊. 基于断裂力学的沥青混凝土抗裂性能与研究方法进展 [J]. 材料导报, 2023, 37 (16): 93-103.
- [19] 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.
- [20] 吴昊, 宋卫民, 邓子成. 基于内聚力模型的再生沥青混合料低温断裂性能研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 473-484.
- [21] 徐子浩. 基于断裂力学的热再生沥青混凝土断裂行为分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [22] MA Y, MOHAMMAD NL, LIU J, et al. Development of a cyclic semi-circular bending test protocol to characterize fatigue cracking of asphalt mixture at intermediate temperature [J]. Construction and Building Materials, 2024, 443137669-137669.