

文章编号:1007-9629(2022)03-0300-07

# 沥青混合料低温裂纹扩展演化行为分析

杜健欢<sup>1,2</sup>, 任东亚<sup>1,2,\*</sup>, 艾长发<sup>1,2</sup>, 邱延峻<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**以悬浮密实、骨架密实和骨架空隙这 3 种典型骨架结构沥青混合料为试验对象,通过间接拉伸试验(IDT),从宏观角度分析了骨架结构对沥青混合料低温裂纹扩展演化行为的影响;采用颗粒随机生长算法建立了沥青混合料离散元模型,结合数值分析,从裂纹类型、数量、裂纹能量释放率及裂尖应力场等细观尺度,对 3 种典型骨架结构沥青混合料低温裂纹扩展演化特征进行了分析.结果表明:在骨架空隙、骨架密实及悬浮密实骨架结构下,沥青混合料内部耗能速率提高,储能速率下降,裂纹能量总释放率增大,从能量角度证实悬浮密实型沥青混合料发生破坏时需要更多的能量;悬浮密实型沥青混合料内部更不易出现应力集中,有利于抑制剪应力场的出现,从而减少 II 型裂纹数量.

**关键词:**道路工程;沥青混合料;离散元模型;低温裂纹;裂纹能量释放率;裂尖应力场

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.012

## Low Temperature Crack Propagation and Evolution of Asphalt Mixture

DU Jianhuan<sup>1,2</sup>, REN Dongya<sup>1,2,\*</sup>, AI Changfa<sup>1,2</sup>, QIU Yanjun<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Three typical structure asphalt mixtures, such as suspend-dense structure, skeleton-dense structure and coarse-aggregate-skeleton structure, were used as test subjects to analyze the influence of crack propagation from a macro perspective through the indirect tensile test(IDT). Combined with the numerical analysis, heterogeneous discrete element models for asphalt mixtures were established by the random particle-based growth algorithm. The crack evolution characteristics of three asphalt mixtures under low temperature were analyzed through four aspects: the change in the number and proportion of micro cracks, the energy release rate, and crack tip stress field. The results indicate that in terms of the time-domain variation of the crack energy release rate  $G(t)$ , as changes of the spatial distribution of the aggregate in the coarse-aggregate-skeleton, skeleton-dense and suspend-dense asphalt mixture, the internal energy consumption rate increases, while the energy storage rate reduces, and thus increasing the total crack energy release rate. It indicates that more energy is required when the suspend-dense asphalt mixture is fractured. In terms of the stress field distribution in the crack tip region, compared with the coarse-aggregate-skeleton and skeleton-dense asphalt mixture, the interior of suspend-dense asphalt mixture is less likely to appear the phenomenon of stress concentration, which is beneficial to suppress the occurrence of shear stress field, thereby reducing the number of mode II cracks.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; discrete element model; low-temperature crack; crack energy release rate; crack tip stress field

收稿日期:2020-12-04; 修订日期:2021-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778541,51608457)

第一作者:杜健欢(1992—),男,浙江衢州人,西南交通大学博士生.E-mail:345910613@qq.com

通讯作者:任东亚(1985—),男,安徽濉溪人,西南交通大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:dongyaren@swjtu.edu.cn

针对沥青路面的低温开裂问题,国内外学者通过 Arcan 复合载荷断裂试验<sup>[1]</sup>、半圆弯曲(SCB)试验<sup>[2]</sup>以及小梁断裂试验<sup>[3-4]</sup>等宏观试验,研究了沥青胶浆对沥青混合料低温抗裂性能的影响。然而,沥青混合料是由不同粒径骨料与沥青相结合形成的具有特定空间结构的多相混合材料,其骨料类型、粒径、级配(骨架结构)及矿质混合料空间分布显著影响沥青混合料的力学性能<sup>[5]</sup>。由于骨料颗粒的空间分布具有随机性,使材料细观结构具有非均匀性,导致材料内部应力场不连续,从而致使宏观试验的可重复性较差,其结果离散性较大。因此,基于材料细观结构的离散元法为研究应力不连续问题提供了高效便捷的途径。

国内外学者借助离散元法和数字图像技术,分别从复数模量<sup>[6]</sup>、接触力矢量<sup>[7-8]</sup>以及界面断裂形态<sup>[9]</sup>等角度,阐述了沥青混合料低温开裂的过程和机理。然而,现有的沥青混合料离散元模型中,骨料颗粒以球形颗粒为主,与实际情况存在较大出入,导致模拟结果与室内试验结果存在较大偏差。因此建立可考虑任意形状的骨料颗粒并充分考虑骨料之间、沥青

砂浆之间和骨料与沥青砂浆之间接触条件的沥青混合料离散元模型是分析沥青混合料开裂过程的关键。

基于此,本文以悬浮密实、骨架密实和骨架空隙这3种典型骨架结构沥青混合料为试验对象,通过间接拉伸试验(IDT),从宏观现象学和材料宏观力学性能等方面,分析骨架结构对沥青混合料内部裂纹扩展的影响。同时,采用颗粒随机生长算法分别建立3种骨架结构沥青混合料的离散元模型,从裂纹类型、数量、裂纹能量释放率和裂尖应力场等细观尺度方面,分析沥青混合料低温裂纹扩展演化规律。

## 1 间接拉伸试验

### 1.1 原材料

为研究骨架结构对沥青混合料低温抗裂强度的影响,采用3种典型骨架结构(见表1):悬浮密实 AC-13、骨架密实 SMA-13 和骨架空隙 OGFC-13,来配制沥青混合料。沥青选用多聚磷酸(PPA)复配 SBS 改性沥青,细集料选用玄武岩,填料选用石灰岩磨细加工的矿粉。

表1 沥青混合料的3种骨架结构  
Table 1 Three kinds of gradation for asphalt mixtures

Gradation	Passing ratio(by mass)/%									
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
OGFC-13	100.0	92.0	65.0	18.0	10.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0
SMA-13	100.0	95.0	62.0	27.0	20.0	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0
AC-13	100.0	97.5	84.0	62.5	42.5	32.0	24.0	15.5	11.0	6.0

### 1.2 试验方案

采用旋转压实法制备尺寸为 $\phi 150 \times 70$  mm的3种骨架结构沥青混合料试件。试件制备好后放置于 $-20$  °C环境温控箱中保温6 h,以保证试件内部温度达到试验温度( $-20$  °C)。参照 ASTM D1074-09《Standard test method for compressive strength of bituminous mixtures》进行间接拉伸试验(IDT),加载模式为位移加载。为避免加载速率过快导致材料内部裂纹未充分发育便发生快速扩展的问题,试验加载速率设定为1 mm/min。

### 1.3 试验结果分析

为直观观察试件经 IDT 试验破坏后的裂纹分布情况,对试验结果图像进行二值化处理,如图1所示。

由图1可见:悬浮密实沥青混合料内部裂纹扩展方向与荷载加载方向基本一致;然而,随着沥青混合料骨架结构由骨架密实转向骨架空隙,其内部裂纹扩展方向与荷载加载方向的偏离量增大;与悬浮密实沥青混合料相比,骨架密实和骨架空隙沥青混合

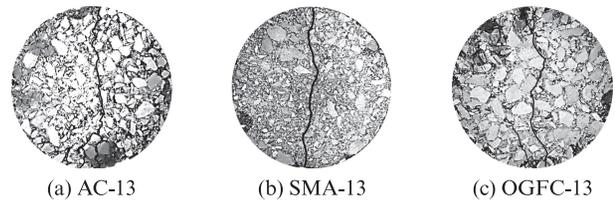


图1 二值化处理后的试验结果图像  
Fig. 1 Test result images after binarization

料发生破坏时,其内部明显具有多条分支裂纹,说明沥青混合料的骨架结构在一定程度上影响着裂纹扩展演化行为,致使不同骨架结构的沥青混合料低温抗裂性能表现出差异性。

3种骨架结构沥青混合料的低温抗裂强度 $R_T$ 如图2所示。由图2可知,在低温环境下,悬浮密实和骨架密实沥青混合料的低温抗裂强度无明显差距,且均高于骨架空隙沥青混合料的低温抗裂强度。

综上,悬浮密实与骨架密实沥青混合料相比,骨架结构的变化虽然改变了其内部裂纹扩展演化行为,但并未对其低温抗裂强度造成较大影响;而骨架

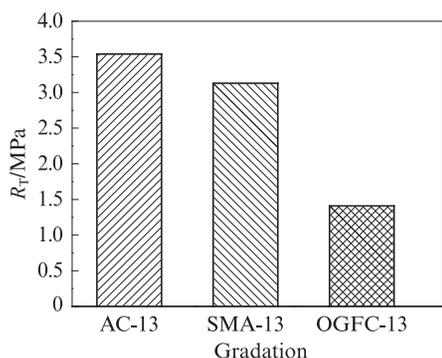


图2 3种骨架结构沥青混合料的低温抗裂强度  
Fig. 2 Low temperature cracking strength of three typical graded asphalt mixtures

空隙沥青混合料内部裂纹扩展演化行为发生了改变,其内部明显出现多条分支裂纹,致使其低温抗裂强度大幅下降.

下文借助离散元 PFC2D 分析平台,通过建立 3 种骨架结构沥青混合料的细观结构模型,从裂纹扩展过程、裂纹能量释放率和裂尖应力场等细观力学参数,详细分析骨架结构变化对沥青混合料内部裂纹扩展演化行为的影响.

## 2 沥青混合料细观结构模型

### 2.1 沥青混合料离散元模型的建立

在细观尺度上,沥青混合料被认为是由空隙、粒径大于 2.36 mm 的粗骨料和沥青砂浆组成的三相混合材料.因此,采用颗粒随机生长算法构建粒径大于 2.36 mm 的任意形状骨料颗粒的沥青混合料离散元模型,如图 3 所示.

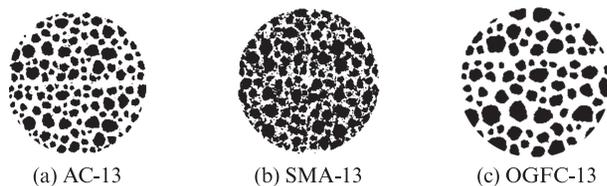


图3 沥青混合料离散元模型

Fig. 3 Discrete element model of asphalt mixture

### 2.2 沥青混合料细观力学特性

#### 2.2.1 细观颗粒间的接触特性

在沥青混凝土离散元模型中,颗粒间的接触包括粗骨料(粒径大于 2.36 mm)、沥青砂浆、沥青砂浆与粗骨料接触界面.针对沥青砂浆与粗骨料颗粒的接触特性,内聚力模型(CZM)<sup>[10]</sup>为模拟预测出现在裂尖域内的局部损伤提供了本构基础;同时,平行黏结模型可以模拟沥青砂浆在开裂过程中的力学本构行为,线刚度模型可以描述粗骨料颗粒间的接触状

态,如图 4 所示.

通过追踪颗粒位置、旋转角度、颗粒间的接触力、应力测量圆等方式,计算颗粒间的接触力 $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_c^n)^2 + (\tau_c^n)^2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c^n$ 、 $\tau_c^n$ 分别表示颗粒间接触力的法向分量和切向分量.

颗粒间的最大接触力 $\sigma_{\max}$ 可通过法向力 $\sigma_c$ 、切向力 $\tau_c$ 和接触力方向与颗粒中心连线之间的夹角 $\alpha$ 得到,即:

$$\sigma_{\max} = \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right) \times \sigma_c + \frac{2\alpha}{\pi} \times \tau_c \quad (2)$$

当颗粒间接触力 $\sigma$ 超过最大接触力 $\sigma_{\max}$ 时,颗粒间的接触将开始屈服或者软化,表现为颗粒间的接触力衰减.

#### 2.2.2 宏细观力学参数

沥青混合料的微观力学参数可由其宏观力学参数(见表 2)计算获取<sup>[11-13]</sup>,结果如表 3 所示.其中, $f_c$ 、 $f_c'$ 分别为骨料和沥青砂浆的抗裂强度; $k_c^n/k_c^t$ 为平行黏结法向与切向刚度之比.

## 3 离散元模拟结果分析

借助离散元 PFC2D 分析平台,在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下,对 3 种骨架结构沥青混合料进行模拟 IDT 试验,以 1 mm/min 的恒定速率加载.以低温抗裂强度为指标,提取数值模拟结果与室内试验结果进行对比,如表 4 所示.

由表 4 可知,数值模拟结果能够较为真实地反映室内试验结果.调用 fracture 子程序采集沥青混合料在破坏过程中的内部颗粒接触失效个数以及失效方式(即以接触失效个数代表裂纹数量),数值模拟结果图像如图 5 所示,图中黑色线条表示裂纹.

由图 5 可知:与悬浮密实 AC-13 和骨架密实 SMA-13 沥青混合料相比,在荷载作用下,骨架空隙 OGFC-13 沥青混合料内部裂纹扩展方向发生较大偏离,这与室内试验结果(见图 1)具有较高的相似性,进一步验证了离散元模型的准确性;同时,从模拟结果和试验结果均可知,沥青混合料骨架结构类型对其低温裂纹扩展演化行为具有较大影响.

#### 3.1 裂纹扩展过程分析

在离散元 PFC2D 分析平台中,颗粒间在平面内位置的接触状态如图 6 所示.

图 6 中: $X_1$ 、 $X_2$ 分别为 2 个单独颗粒的圆心点坐标; $R_1$ 、 $R_2$ 分别为 2 个单独颗粒的半径; $d$ 为颗粒间的中心距, $d = \|X_2 - X_1\|$ ;  $g_c$ 为颗粒间的间隙, $g_c = d -$

$(R_1+R_2)$ ;  $h$ 为接触面位置与球面之间的最短距离,  $h=0.5g_c$ ;  $n_c$ 为接触面的法线方向,  $n_c=(X_2-X_1)/2$ ;  $X_c$ 为接触面位置坐标,  $X_c=X_1+(R_1+0.5g_c)$ .

通过识别使颗粒间接触失效的应力方向,可以判断裂纹扩展类型:若应力为法线方向,即拉应力,

则裂纹扩展属于以拉为主的 I 型裂纹;若应力为切线方向,即剪应力,则裂纹扩展属于以剪为主的 II 型裂纹.裂纹扩展参数见表 5.

由表 5 可知:相对骨架空隙沥青混合料而言,骨架密实与悬浮密实沥青混合料发生破坏时,其内部

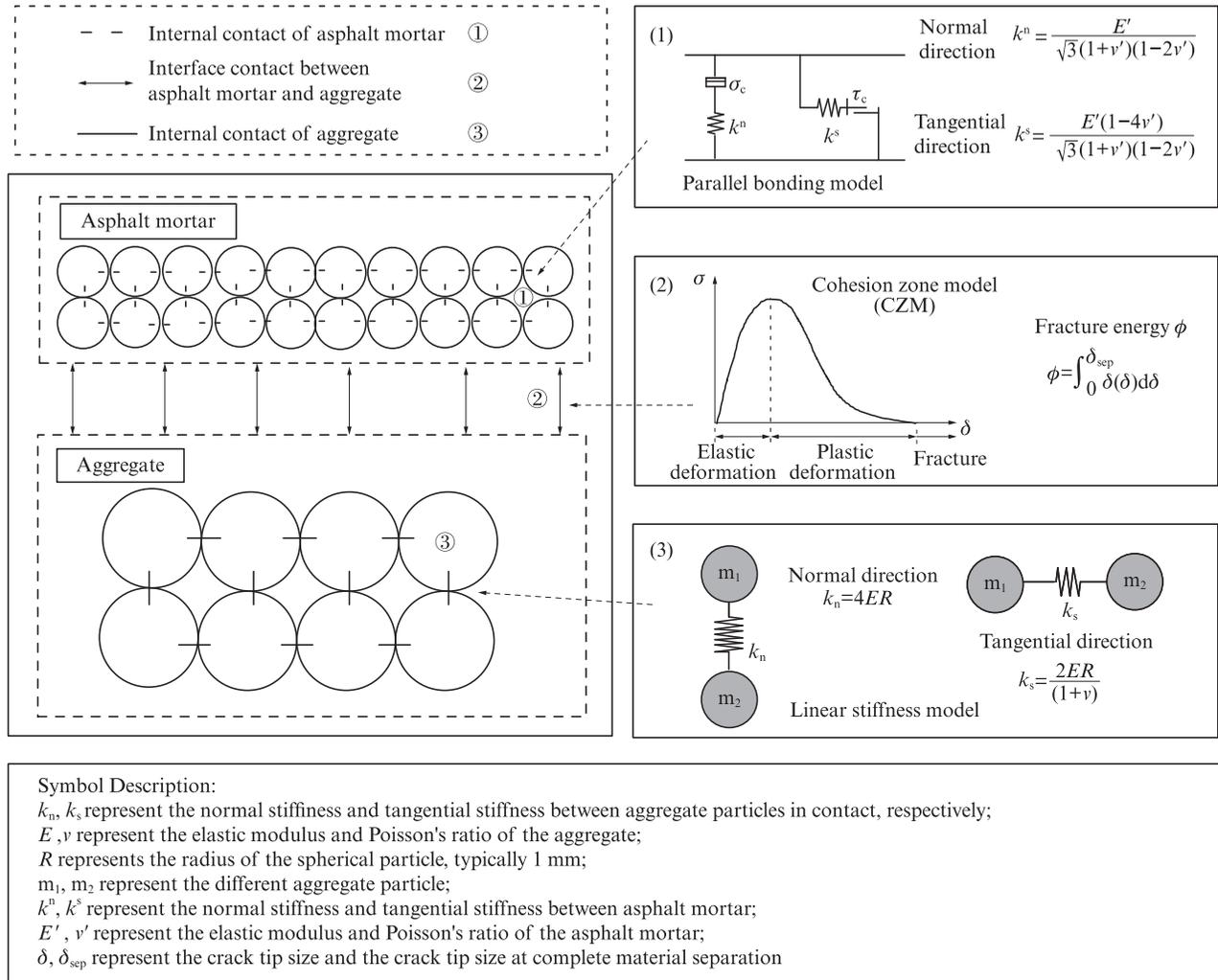


图 4 沥青混合料离散元模型中的相互作用示意图和相应的本构模型

Fig. 4 Sketch of interactions and the corresponding constitutive models within the asphalt mixtures

表 2 -20 °C 下 3 种骨架结构沥青混合料的宏观力学参数

Table 2 Macro mechanical parameters of three structure asphalt mixtures at -20 °C

Material	Parameter	AC-13	SMA-13	OGFC-13
Coarse aggregate	$E/\text{GPa}$		55.5	
	$f/\text{MPa}$		27.6	
	$\nu$		0.23	
Asphalt mixture	Void ratio (by volume) / %	2.100	3.800	20.704
	Maximum theoretical density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2610	2487	2642
Asphalt mortar	$E'/\text{GPa}$	0.832	0.633	0.345
	$f'/\text{MPa}$	3.55	3.13	1.41
	$\nu'$		0.20	

产生的裂纹数量大幅增加;骨架空隙沥青混合料发生破坏时,其内部Ⅱ型裂纹数量占总数量的14.84%,而悬浮密实沥青混合料发生破坏时,其内部

Ⅱ型裂纹数量仅占总数量的9.03%,说明悬浮密实沥青混合料内部粗骨料的空间分布能够有效地抑制材料内部Ⅱ型裂纹的产生.

表3 -20℃下采用平行黏结模型所得3种骨架结构沥青混合料的细观力学参数  
Table 3 Parameters of three structure of asphalt mixtures with parallel bond model at -20℃

Material	Parameter	AC-13	SMA-13	OGFC-13
Coarse aggregate	$k_n$ /MPa		222.00	
	$k_s$ /MPa		90.24	
	$k_c^n/k_c^s$		1	
	$k^n/k^s$	0.667/0.133	0.508/0.106	0.277/0.055
Asphalt mortar	Coefficient of friction between particles $f_s$		0.5	
	$\sigma_c$ /MPa	3.55	3.13	1.41
	$\tau_c$ /MPa	3.55	3.13	1.41

表4 室内试验结果与数值模拟结果对比  
Table 4 Comparison of indoor test results and numerical simulation results

Gradation	$R_T$ /MPa	
	Test result	Simulation result
AC-13	3.55	3.67
SMA-13	3.13	3.22
OGFC-13	1.41	1.46

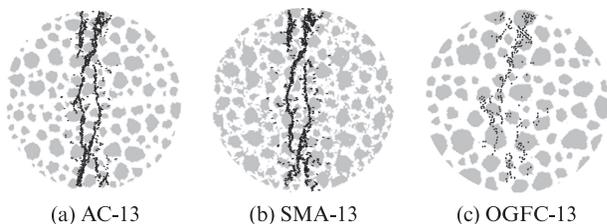


图5 数值模拟结果图像  
Fig. 5 Numerical simulation result image

3.2 裂纹能量释放率分析

调用微裂纹监控程序,实时采集沥青混合料内部自微裂纹出现至形成宏观裂缝的过程中裂纹能量释放率在时域内的变化  $G(t)$ ,并计算裂纹能量总释放率  $G$ ,结果如图7所示.

由图7(a)可见,沥青混合料的裂纹释放率  $G(t)$  在裂纹扩展初期无明显变化,随着时间推移,其增长趋势逐渐加快;骨架密实沥青混合料的裂纹释放率经时变化具有明显的滞后现象,说明该骨架结构有

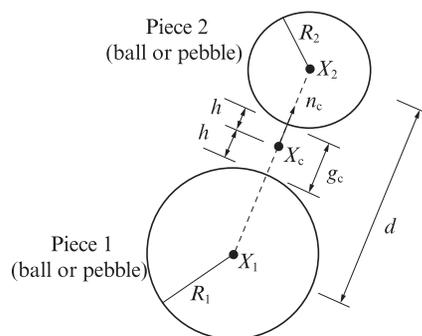


图6 颗粒间的接触状态  
Fig. 6 Contacts state between particles

利于延迟裂纹的扩展时间,即具有较好的早期抗裂性能.由图7(b)可知,悬浮密实沥青混合料发生破坏时,其裂纹能量总释放率  $G$  要远高于骨架密实和骨架空隙沥青混合料.这意味着悬浮密实沥青混合料需要更多的能量才能促使裂纹发生扩展,即沥青混合料内部能量耗散的速率提高,能量储存的速率下降.说明悬浮密实沥青混合料内部粗骨料的空间分布在一定程度上能够提高耗能速率、降低储能速率,宏观表现为沥青混合料具有更优异的低温抗裂性能.

3.3 裂尖应力场分析

结合离散元数值模拟结果,通过Fish编写子程序,以识别裂尖应力场,如图8所示.沥青混合料平均应力场面积占比如图9所示.

表5 裂纹扩展参数  
Table 5 Crack propagation parameters

Gradation	Total number of cracks	Number of mode I cracks	Proportion of mode I cracks/%	Number of mode II cracks	Proportion of mode II cracks/%
AC-13	1 107	1 007	90.97	100	9.03
SMA-13	917	796	86.80	121	13.20
OGFC-13	283	241	85.16	42	14.84

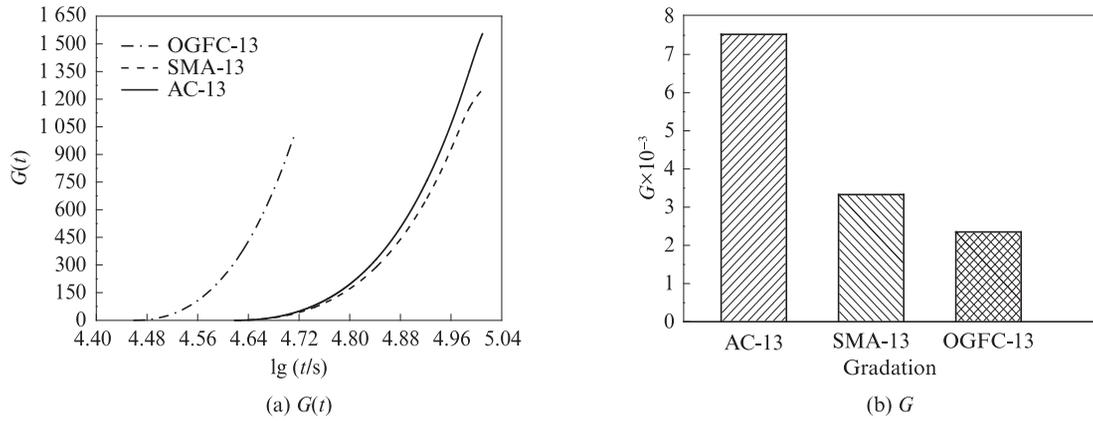


图7 沥青混合料的裂纹能量释放率  
Fig. 7 Crack energy release rate of asphalt mixtures

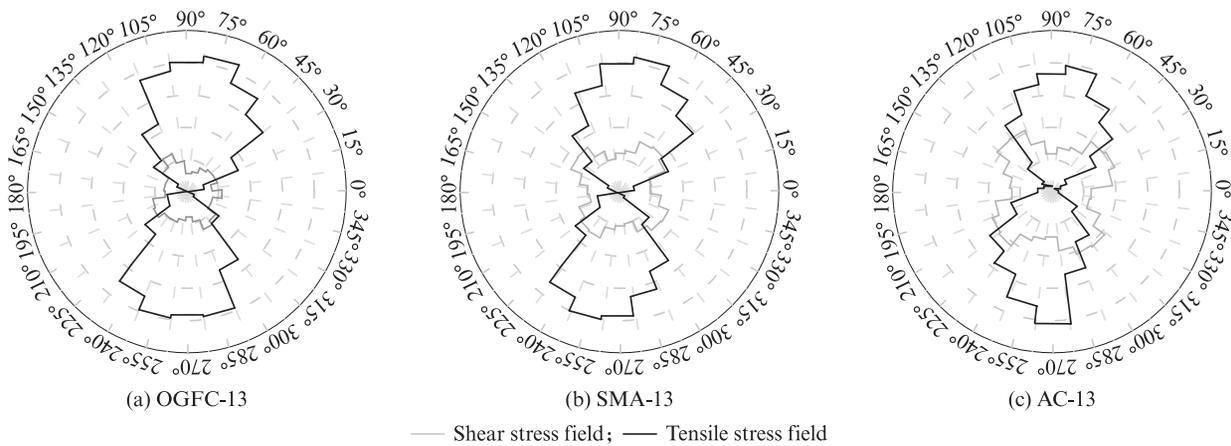


图8 沥青混合料的裂尖应力场  
Fig. 8 Crack tip stress field of asphalt mixtures

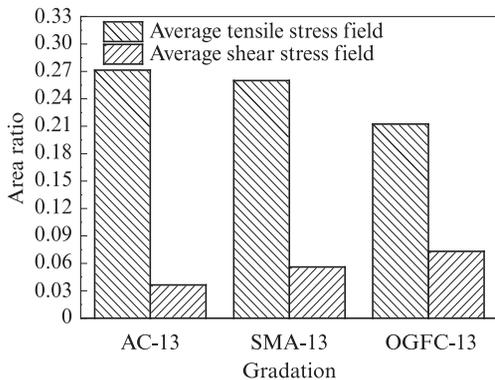


图9 沥青混合料平均应力场面积占比  
Fig. 9 Proportion of average stress field area of asphalt mixtures

由图8、9可知,在低温下,悬浮密实沥青混合料内部平均剪应力场明显偏小;同时,该骨架结构沥青混合料的平均拉应力场分布面较广,说明其粗骨料空间分布能够较好地起到分散荷载的作用,即不易产生应力集中,使沥青混合料能够承受更大的荷载,从而提高了其低温抗裂性能。

### 4 结论

(1)在低温环境下,沥青混合料骨架结构的变化会使其内部粗骨料的空间分布结构发生改变,从而影响其内部裂纹扩展演化行为,宏观上其低温抗裂强度表现出较大差异性。

(2)通过数值模拟分析可知,在细观尺度上,悬浮密实沥青混合料发生破坏时,裂纹数量最多,且以拉为主的I型裂纹比例较大,而以剪为主的II型裂纹比例较少。

(3)3种典型骨架结构沥青混合料发生破坏时,骨架密实和悬浮密实沥青混合料裂纹能量释放率经时变化明显晚于骨架空隙沥青混合料,且悬浮密实沥青混合料需要累积更多能量才能促使裂纹发生扩展。

(4)通过分析裂尖应力场,进一步证实了悬浮密实沥青混合料中粗骨料的空间分布不仅能减少应力集中现象的出现,还能有效抑制剪应力场的出现,使得内部裂纹扩展时II型裂纹数量减少,宏观上表现

出更优异的低温抗裂性能。

#### 参考文献:

- [ 1 ] GAO L, NI F J, BRAHAM A, et al. Mixed-mode cracking behavior of cold recycled mixes with emulsion using Arcan configuration[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 415-422.
- [ 2 ] AMERI M, MANSOURIAN A, PIRMOHAMMAD S, et al. Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 93:153-167.
- [ 3 ] 周志刚, 袁秀湘, 谭华. 沥青混合料预缺口试件直接拉伸疲劳损伤分析[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1):30-37.  
ZHOU Zhigang, YUAN Xiuxiang, TAN Hua. Fatigue damage analysis of asphalt mixture specimen with pre-made gaps in direct tension test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1):30-37.(in Chinese)
- [ 4 ] 李震南, 申爱琴, 郭寅川, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1):146-152.  
LI Zhennan, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Low temperature performance correlation of basalt fiber asphalt mortar and mixture[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 146-152. (in Chinese)
- [ 5 ] ASI I M. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes[J]. Building and Environment, 2007, 42(1):325-329.
- [ 6 ] YOU Z P, LIU Y, DAI Q L. Three-dimensional microstructural-based discrete element viscoelastic modeling of creep compliance tests for asphalt mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 23(1):79-87.
- [ 7 ] 裴建中, 常明丰, 陈拴发, 等. 沥青混合料间接拉伸试验的数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(5):6-10.  
PEI Jianzhong, CHANG Mingfeng, CHEN Shuanfa, et al. Numerical simulation of indirect tensile test for asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(5):6-10. (in Chinese)
- [ 8 ] MAHMOUD E, MASAD E, NAZARIAN S. Discrete element analysis of the influences of aggregate properties and internal structure on fracture in asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1):10-20.
- [ 9 ] 崔亚楠, 邢永明, 倪文琛, 等. 基于微观结构特征的沥青混合料断裂机理研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1):86-90.  
CUI Yanan, XING Yongming, NI Wenchun, et al. Study on split mechanism of asphalt mixture based on meso-structure feature[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):86-90. (in Chinese)
- [ 10 ] KIM H, WAGONER M P, BUTTLAR W G. Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8):552-563.
- [ 11 ] LIU Y, DAI Q L, YOU Z P, et al. Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(4):324-333.
- [ 12 ] WANG L B. Mechanics of asphalt: Microstructure and micromechanics[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2011: 285-322.
- [ 13 ] 冷严. 季冬区高速铁路沥青混凝土强化基层表层材料制备技术与综合性能试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.  
LENG Yan. Test study on asphalt concrete mixture material design and comprehensive performance of high-speed railway surfacer layer of foundation bed reinforced by asphalt concrete at seasonal frozen region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)