

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.048



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于 RA-AF 特征的橡胶自密实混凝土 裂缝扩展研究

石振祥<sup>1</sup>, 陈徐东<sup>1</sup>, 宁英杰<sup>2</sup>, 田华轩<sup>1</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 杭州 310051)

**摘要:**为探究橡胶自密实混凝土断裂扩展模式, 结合声发射 RA-AF 特征和高斯混合模型 (GMM), 利用带预制裂缝的半圆盘弯曲试件进行三点弯曲试验, 选取橡胶掺量 (0%、10%、20%、30%) 及跨径比 (0.45、0.54、0.72) 为试验变量, 分析橡胶自密实混凝土裂缝开展种类及变化规律。结果表明: 橡胶掺量为 20% 时, 橡胶自密实混凝土表现出较好的工作性能; 橡胶掺量增加, 拉伸断裂声发射事件占比增大, 说明裂缝向 I 型拉伸裂缝发展, 并且裂缝发展具有连续的特点; 增大跨径比会导致试件承载能力下降, 但相同加载阶段其损伤程度逐渐降低, 试件内部的断裂模式发生变化, 跨径比为 0.54 时试件表现出较好的工作性能; GMM 法显示, 拉伸裂缝与剪切裂缝并非简单地以直线作为分界, 而是在某些区域内共同存在, GMM 法能更为合理地表述不同工况下拉伸断裂事件与剪切断裂事件发生比例的变化规律。

**关键词:**橡胶自密实混凝土; 裂缝模式; 半圆盘弯曲试件; 声发射技术; 高斯混合模型

**中图分类号:** TU528.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0175-09

## Study on crack propagation of rubber self-compacting concrete based on RA-AF characteristics

SHI Zhenxiang<sup>1</sup>, CHEN Xudong<sup>1</sup>, NING Yingjie<sup>2</sup>, TIAN Huaxuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, in order to explore the fracture propagation mode of rubber self-compacting concrete, combined with RA-AF characteristics and Gaussian mixture model, three-point bending test was carried out on semi-circular bending specimens with prefabricated cracks. Rubber content (0%, 10%, 20%, 30%) and span ratio (0.45, 0.54, 0.72) were selected as test variables to analyze the crack mode and variation of rubber self-compacting concrete. The results show that when the rubber content is 20%, the rubber self-compacting concrete shows better working performance. With the increase of rubber content, the proportion of tensile cracking AE events increases, indicating that the cracking mode transform into type I tensile cracks, and the

**收稿日期:** 2023-01-13

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2021YFB2600200); 国家自然科学基金 (51979090); 国家重点实验室开放基金 (2019CEM002)

**作者简介:** 石振祥 (1999-), 男, 主要从事混凝土损伤机理研究, E-mail: s923335190@163.com。

陈徐东 (通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cxdong1985@163.com。

**Received:** 2023-01-13

**Foundation items:** National Key R & D Program of China (No. 2021YFB2600200); National Natural Science Foundation of China (No. 51979090); Open Foundation of State Key Laboratory of Science and Technology (No. 2019CEM002)

**Author brief:** SHI Zhenxiang (1999-), main research interest: concrete damage mechanism, E-mail: s923335190@163.com.

CHEN Xudong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: cxdong1985@163.com.

cracks are continuous. The increase of the span ratio will lead to the decrease of the bearing capacity of the specimen, but the damage degree gradually decreases at the same loading stage, and the fracture mode inside the specimen changes. When the span ratio is 0.54, the specimen shows better working performance. The GMM method shows that the tensile crack AE and the shear crack AE are not simply divided by a straight line, but coexist in some areas. The GMM method can more reasonably describe the variation of the proportion of tensile crack AE events and shear crack AE events under different working conditions.

**Keywords:** rubber self-compacting concrete (RSCC); crack mode; semi-circular bending specimens; acoustic emission; Gaussian mixture model (GMM)

据统计,超过50%的废弃轮胎没有经过任何的处理就被丢弃<sup>[1]</sup>。将废弃橡胶掺入混凝土中能有效缓解橡胶的回收压力。橡胶混凝土相较于普通混凝土具有更好的延性、抗裂性,并具有较好的抗疲劳性能和抗冲击性能<sup>[2-6]</sup>。然而,橡胶的掺入会降低混凝土的抗压强度和弹性模量<sup>[7]</sup>,杨荣周等<sup>[8]</sup>、Bideci等<sup>[9]</sup>研究发现,橡胶的掺入不利于水泥砂浆的动态劈裂拉伸强度。龙广成等<sup>[10]</sup>研究发现,相较于普通混凝土,橡胶颗粒掺入自密实混凝土后,抗压强度降低程度减小;同时,橡胶颗粒能够在自密实混凝土流动填充过程中均匀分布,避免振捣密实成型作用造成的分布不均匀问题<sup>[11]</sup>。因此,采用橡胶自密实混凝土(Rubber Self-Compacting Concrete, RSCC)能够更好地发挥废弃橡胶颗粒对于混凝土性能的改善作用。为将橡胶自密实混凝土更广泛地应用于结构工程中,有必要对其裂缝开展及断裂特性进行深入研究。

李双喜等<sup>[12]</sup>研究了不同橡胶形态对混凝土抗冲击性能的影响;傅强等<sup>[13]</sup>研究了橡胶集料自密实混凝土的相对动弹模量、质量损失率及抗压强度耐蚀系数的变化规律;薛刚等<sup>[14]</sup>发现了橡胶混凝土在低温下耗电量增加幅度明显提升;陈徐东等<sup>[15-16]</sup>分析了橡胶掺量对自密实混凝土的破坏模式和边界效应的影响,并建立了橡胶自密实混凝土的疲劳损伤预测模型。目前对于橡胶自密实混凝土的基本力学性能研究较为深入,但是对于其裂缝扩展模式及断裂特性的研究尚且不足。半圆盘弯曲(Semi-Circular Bending, SCB)试件试验方法简单,计算断裂韧度方便,且对于I型断裂韧度计算尤为适合,因而被广泛推荐<sup>[17]</sup>。声发射RA-AF(Risetime/Amplitude-Average Frequency)特征主要用以区分裂缝种类,反映裂纹扩展模式,可用含预制裂缝的半圆盘弯曲试件试验方法,结合RA-AF特征对橡胶自密实混凝土的断裂模式进行表征。吴金荣等<sup>[18]</sup>利用SCB试件对沥青混合料进行了低温抗裂性能研究;吕有厂<sup>[19]</sup>利用SCB方法发现页岩断裂韧性受加载速率和层理影响;甘一雄等<sup>[20]</sup>利用RA-AF值研

究了花岗岩劈裂破坏评价的指标;吴顺川等<sup>[21]</sup>利用RA-AF特征描述了岩体破裂情况。鉴于利用RA-AF值对裂缝演化过程分析存在困难,而高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)能够用多个高斯概率密度分布量化样本数据,从而对声发射信号数据的概率进行拟合,因此,有必要结合高斯混合模型来分析试件破坏过程中的开裂特征<sup>[22-23]</sup>。

抗裂性是评估混凝土整体性能的一项重要指标,对于结构的耐久性和稳定性具有较大影响,断裂表征对于橡胶自密实混凝土的实际应用意义重大。已有大量学者对橡胶自密实混凝土进行了研究,但对于使用RA-AF特征结合SCB试验对橡胶自密实混凝土裂缝扩展模式进行表征的研究较少。笔者以不同橡胶掺量和跨径比的橡胶自密实混凝土SCB试件为主要研究对象,利用RA-AF特征与GMM法对其裂缝扩展模式进行研究。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计及配合比

表1为选用的自密实混凝土配合比,硅酸盐水泥采用海螺牌P·O 42.5级水泥,粗骨料为6~10 mm连续级配砾石,细骨料为细度模数级为2.56的河沙,同时加入高效聚羧酸减水剂改善混凝土的和易性。橡胶颗粒为1~5 mm连续级配的细橡胶颗粒,主要由废弃橡胶轮胎在常温下切割制得,通过保持水泥掺量、添加物掺量和水胶比,以橡胶颗粒替代砂。

SCB试件多用于评价沥青混合料低温抗裂性

表1 橡胶混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of RSCC

编号	配合比/(kg/m <sup>3</sup> )							减水剂
	水泥	水	粉煤灰	硅粉	碎石	河砂	橡胶	
RSCC-0	535	278	193	36	1 111	1 414	0	10.4
RSCC-10	535	278	193	36	1 111	1 273	56	10.4
RSCC-20	535	278	193	36	1 111	1 132	112	10.4
RSCC-30	535	278	193	36	1 111	991	168	10.4

能,其试件的相关参数并未形成统一标准<sup>[24]</sup>。试验试件尺寸为:厚度  $T$  为 60 mm; $a$  为预制裂缝长度,取 50 mm;半径  $R$  为 100 mm; $2S$  表示加载跨径,将  $S/R$  表示为 SCB 试件跨径比。试件尺寸示意图见图 1,试件制作过程为:

1)将拌好的橡胶自密实混凝土装入准备好的模具中,刮平表面,为防止混凝土水分蒸发,在试件表面贴一层塑料膜,静置 24 h 后进行拆模;

2)将试件放在水中进行养护,养护时间为 28 d;

3)将试件取出,使用岩石切割机加工成半圆形 SCB 试件,并进行预制裂缝的切割,裂缝厚度控制为 1~2 mm。

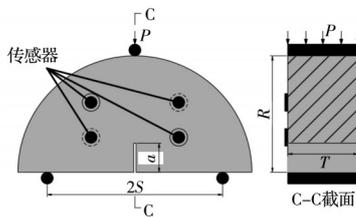


图 1 SCB 试件示意图

Fig.1 Schematic diagram of SCB specimen

### 1.2 加载方案

共有两种不同工况:1)橡胶掺量分别为 0%、10%、20%、30%;2)底部支撑点跨径比为 0.45、0.54、0.72。

采用 MTS 液压伺服试验机进行半圆盘试件的三点弯曲试验,加载设备采用美国 MTS-810 液压伺服动态试验机,声发射系统为美国声学物理公司的 SAMOSTM 16 通道声发射测试系统。加载速率为 0.05 mm/min,声发射系统前置放大器的增益为 40 dB,经测定环境噪声后,将门阈值设为 40 dB,采样频率为 1 MHz。声发射探头布置在试件的左右两侧,以获得损伤破坏过程中试件产生的声发射信号(见图 1),为使传感器和试样表面充分接触,在试验过程中使用凡士林将传感器和试样进行耦合,并在试验前进行断铅试验。试验过程中 MTS 试验机与声发射设备同时启动,以保证数据的准确性。

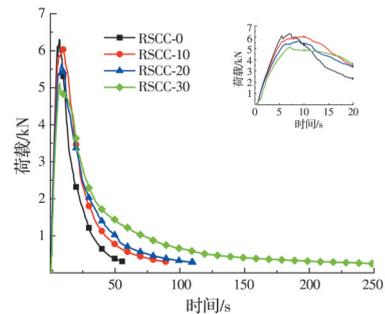
## 2 RSCC 性能分析

### 2.1 强度分析

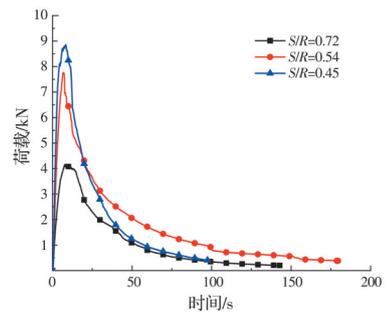
试验制备了多个 SCB 试件,加载时每种工况进行 3 次重复试验,当荷载值达到峰值荷载的 5% 时视为加载结束,取平均曲线作为试验结果,最终结果见图 2。为了便于比较,对相同工况的重复试验,仅显示其平均值曲线。

由图 2(a)可知,随着橡胶掺量的增加,峰值荷载整体呈下降趋势,当橡胶掺量为 10% 时,峰值荷

载下降 4.69%,当掺量达到 20% 以上时,峰值荷载大幅降低,掺量为 20%、30% 时分别下降了 14.06% 和 21.09%。图 2(a)子图为峰值荷载局部特征图,根据图像可以看出,当橡胶掺量为 10% 和 20% 时,荷载达到峰值前均产生了明显了软化现象,而橡胶掺量为 0% 和 30% 时软化阶段较短。说明适量橡胶颗粒的掺入能够延长试件的软化过程,而当橡胶掺量达到 30% 时,由于橡胶掺量过多,混凝土强度下降,橡胶未完全发挥延性作用时混凝土就已经开始破坏,因此软化阶段缩短。在峰后软化阶段,曲线随橡胶掺量的增加逐渐变缓,当自密实混凝土橡胶颗粒掺入时,试件在 140 s 左右完全破坏,当混凝土试件中存在橡胶颗粒时,试件加载时间有所延长,当橡胶掺量为 30% 时,加载时间延长至 250 s。说明橡胶颗粒的掺入降低了混凝土的强度,但同时能够有效地改善混凝土的延性。主要原因是橡胶颗粒自身强度较低,取代了作为骨料的河沙,且与混凝土黏结性能较差,因此较易形成薄弱区,随着橡胶掺量增多,混凝土内部薄弱区较多,导致混凝土强度降低;但同时橡胶颗粒能够减少裂缝尖端的应力集中现象,通过吸收外力作用产生的能量,延缓裂缝的产生和发展。由图 2(b)可以看出,随着跨径比不断增大,试件峰值荷载呈下降趋势,当跨径比为 0.54 时,其峰值荷载为跨径比为 0.45 时的 87.6%;当跨径比为 0.72 时,其峰值荷载仅为跨径比为 0.45 时的 44.4%。



(a) 橡胶掺量



(b) 跨径比

图 2 时间-荷载曲线

Fig.2 Time-loading curve

## 2.2 断裂韧度

试验假设试件内部各方向均质同性,试件断裂方式为 I 型断裂,由此得到 SCB 试件断裂韧度  $K_{IC}$

$$Y = -1.297 + 9.516 \left( \frac{2s}{2R} \right) - \left[ 0.47 + 16.457 \left( \frac{2a}{2R} \right) \right] \beta + [1.071 + 34.401(2s/2R)] \beta^2 \quad (2)$$

式中: $P_{max}$ 为试件峰值荷载; $R$ 为试件半径; $T$ 为试件厚度; $a$ 为预制裂缝长度; $2S$ 为加载跨度; $\beta=a/R$ ; $Y$ 为临界应力强度因子。

为了保证试验数据的准确性,对每个试件进行尺寸测量,使用实际尺寸作为断裂韧度的计算值,代入式(1)、式(2)计算,结果如表2所示。

结合数据表2,当试件内部橡胶掺量不超过20%时,试件断裂韧度下降较为缓慢,橡胶掺量达到30%时,断裂韧度下降率达到25.59%,此时试件的承载能力最弱。断裂韧度反映了试件在断裂过

计算式为<sup>[25]</sup>

$$K_{IC} = \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2RT} Y \quad (1)$$

程中吸收能量的能力大小,断裂韧度越大,代表试件阻止裂缝扩展的能力越强,说明橡胶的掺入会导致试件内部裂缝开展数量增多,抵抗裂缝扩展的能力降低。对于不同跨径比试件,试件断裂韧度值变化剧烈,当跨径比为0.72时,试件断裂韧度为34.065 MPa·mm<sup>1/2</sup>,当跨径比减小到0.54时,其断裂韧度减小到19.77 MPa·mm<sup>1/2</sup>,下降了41.96%;当跨径比为0.45时,试件断裂韧度为8.101 MPa·mm<sup>1/2</sup>,下降了76.22%,断裂韧度下降与跨径比减小呈正相关性。

表2 试件断裂韧度

Table 2 Fracture toughness of test piece

工况	断裂韧度 $K_{IC}$ 试验值/(MPa·mm <sup>1/2</sup> )			断裂韧度 $K_{IC}$ 均值/(MPa·mm <sup>1/2</sup> )	下降率/%
	第1次试验	第1次试验	第1次试验		
橡胶掺量0%	26.404	26.717	24.709	25.944	0
橡胶掺量10%	23.254	23.165	25.404	23.941	7.72
橡胶掺量20%	21.582	21.62	25.095	22.766	12.25
橡胶掺量30%	19.69	18.532	19.691	19.304	25.59
跨径比0.72	33.975	33.396	34.824	34.065	0
跨径比0.54	20.04	18.349	20.921	19.77	41.96
跨径比0.45	8.138	8.477	7.689	8.101	76.22

注:下降率是指相较于橡胶掺量为0%或跨径比为0.72的试件断裂韧度下降程度。

## 3 声发射参数分析

### 3.1 声发射参数特征

声发射<sup>[26]</sup>(Acoustic Emission, AE)技术是一种新型无损检测技术,处理和放大材料内部因能量释放而产生的弹性波,并将其转化为电信号进行接收,通过相关参数反映结构受损状态,从而达到无损检测的目的。

在声发射参数中,RA(Risetime/amplitude)和AF(Average frequency)是一组表征试件破裂机制的重要参数。RA是指上升时间与振幅之比,代表上升时间段信号包络线梯度的倒数,AF指平均频率,表示振铃计数与持续时间之比。一般来说,拉伸破坏情况下波形梯度较大,信号频率较高,此时RA值较小而AF值较大;相反,如果信号波形梯度小、信号频率低,则说明此时AF值较小而RA值较大。因此,可以通过RA-AF值表征加载过程中试件的破裂模式。其判定方法如图3所示,以斜率为 $k$ 的对角线为分界线,其左上部为拉伸破坏,右下部

为剪切破坏,此处 $k$ 值由直剪试验确定。

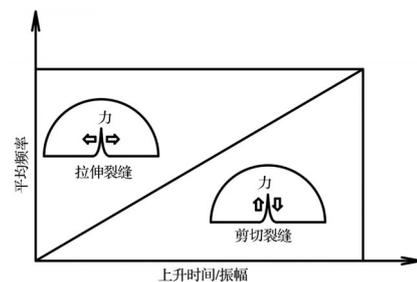


图3 断裂类型分类

Fig. 3 Classification of fracture types

### 3.2 RA-AF特征

#### 3.2.1 不同橡胶掺量

根据不同橡胶掺量的试件加载的声发射信号,研究RA与AF值分布规律。图4为不同橡胶掺量下剪切断裂事件与拉伸断裂事件的发展情况。

由图4(a)可以看出,对于橡胶掺量为0%的自密实混凝土,荷载加载过程中拉伸断裂事件与剪切断裂事件增长规律基本相同,裂缝在初始阶段发展

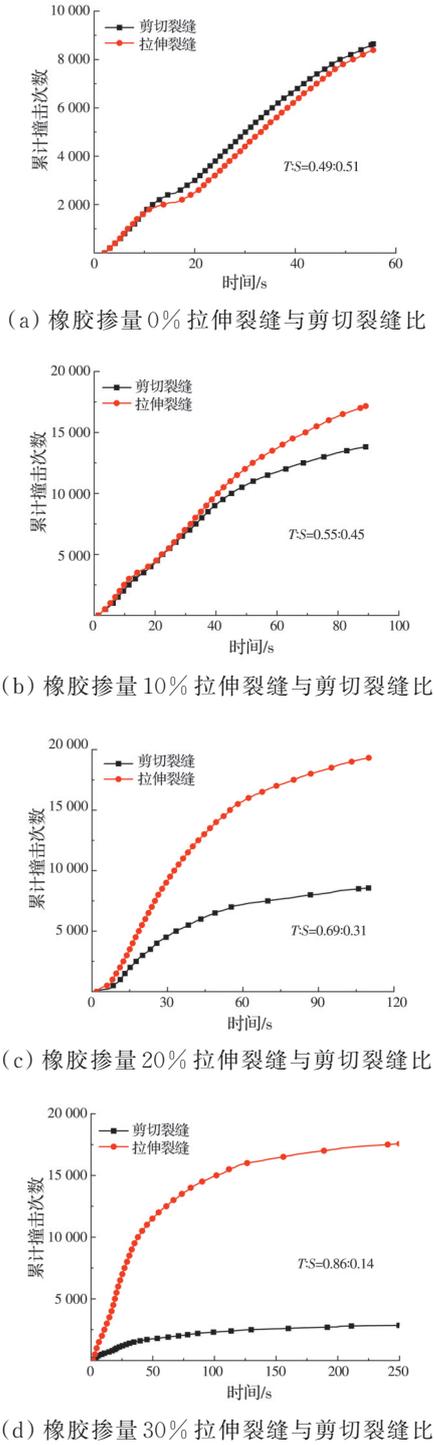


图 4 不同橡胶掺量 RA-AF 分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of RA-AF with different rubber content

迅速,而在后期发展速率逐渐降低。随着橡胶掺量的增加,拉伸断裂事件所占比例显著增加,拉伸裂缝逐渐成为主要的裂缝开展方式。

拉伸断裂事件与剪切断裂事件比例(T:S)由 0.49:0.51 分别增长至 0.55:0.45、0.69:0.31、0.86:0.14,拉伸断裂事件分别增长 12.2%、40.8% 和 75.5%,说明随着橡胶掺量的增加,裂缝的发展模

式发生变化,内部剪切型裂缝的发展减少。原因是剪切裂缝是由试件内部错动产生的,而拉伸裂缝是由微裂缝的聚集与贯通产生的,由于橡胶颗粒的掺入,试件内部变形能力提升,而橡胶颗粒周围产生较多薄弱区,因此,试件更容易发生拉伸断裂事件,剪切断裂事件比例降低。

此外,从图 4 中还可以看出,当不掺橡胶或橡胶掺量较少时,声发射曲线增长呈现不平滑性,而随着橡胶掺量的增多,这种不平滑性得到了缓解。其原因可能是当橡胶含量较少时,试件脆性较大,断裂事件就会突然发生,橡胶含量较多时,断裂事件主要从橡胶颗粒与混凝土胶结面形成并快速发展,因此裂缝的发展具有连续的特点。

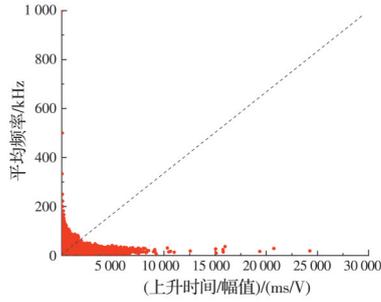
### 3.2.2 不同跨径比

图 5(a)~(c)所示为不同跨径比条件下试件 RA-AF 数值点的分布,图 5(d)为在全加载过程中,拉伸断裂事件与剪切断裂事件占全部声发射事件的比值。

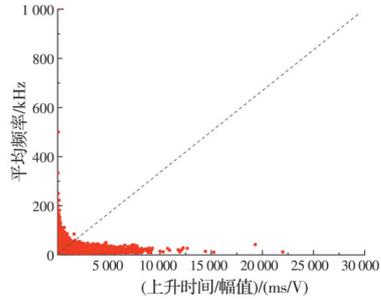
由图 5(a)~(c)可以看出,随着试件加载跨径比的不断减小,RA 值较大的点增加,剪切断裂事件数量增加。由图 5(d)可以看出,在试件加载的开始阶段,拉伸断裂事件与剪切断裂事件比例曲线呈波动状,随着跨径比的增大,曲线波动次数减少,而持续时间延长,其原因可能是随着跨径比增加,试件加载过程中受力状态更加稳定,拉伸断裂事件占据主导地位。

除此以外,当加载时间达到总时间的 40% 时,拉伸断裂事件与剪切断裂事件比例曲线基本稳定,不再产生较大的变化,结合荷载曲线可以发现,此时恰好为荷载曲线的软化点,该阶段荷载下降速率逐渐降低,产生的裂缝主要是由微裂缝贯通形成宏观裂缝。

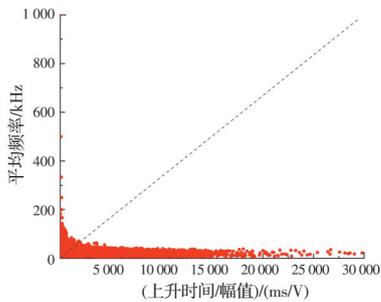
当跨径比为 0.45 时,拉伸断裂事件数量略多于剪切断裂数量,而跨径比由 0.45 增大到 0.54 时,拉伸断裂事件所占比例大幅度增加,加载结束时,拉伸断裂事件占比由 0.57 增长到了 0.78,增长了 36.8%;当跨径比由 0.54 增长到 0.72 时,加载结束时,拉伸断裂事件占比增长至 0.82,增长了 5.1%。综上所述,跨径比增大能够有效增加拉伸断裂事件所占比重,但增加至一定程度时,拉伸断裂事件比例增长程度有限。结合图 2(b)可知,增大跨径比会导致试件承载能力下降,但同时能够大幅度改变试件内部的断裂模式。



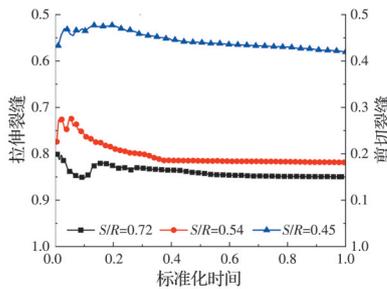
(a) 跨径比 0.72



(b) 跨径比 0.54



(c) 跨径比 0.45



(d) 拉伸裂缝与剪切裂缝比

图 5 不同跨径比 RA-AF 分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of RA-AF with different span ratios

#### 4 基于高斯混合模型的裂缝类别表征

裂缝模式分类在理解和预测整个结构的可能失效模式及其完整性和稳定性方面发挥着重要作用。当前技术虽然在识别裂缝方面进展较大,但不能为裂缝模式分类提供有效手段。GMM法可以通过对 AE 数据中未定义的损伤信号进行分析,通过概率分布客观地对裂缝进行分类。

#### 4.1 高斯混合模型

高斯模型主要有单高斯模型和高斯混合模型两类,其区分依据主要是模型数目。单高斯模型公式为<sup>[23]</sup>

$$N_i(x|\mu, \Sigma_i) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(x-\mu)^\top(\Sigma_i)^{-1}(x-\mu)\right)}{2\pi^{\frac{D}{2}}|\Sigma_i|^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为 $D \times 1$ 的平均向量; $\Sigma_i$ 为 $D \times D$ 的协方差矩阵。单高斯模型可用样本均值取代 $\mu$ ,用样本方差代替 $\Sigma_i$ 。

高斯混合模型是单高斯模型的推广,可视为由单高斯模型加权平均所得,其公式表示为<sup>[27]</sup>

$$p(x_i) = \sum_{i=1}^m \alpha_i N(x|\mu_i, \Sigma_i) \quad (4)$$

式中: $m$ 为模型个数; $\alpha_i$ 为混合模型的权重,有 $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ ;  $N(x|\mu_i, \Sigma_i)$ 表示第 $i$ 个单高斯概率密度函数。

对于高斯混合模型,可以采用最大似然估计法(Maximum Likelihood, ML)和最大期望值算法(expectation-maximization algorithm, EM)对其进行迭代计算,最终得到所求样本的参数估计。采用 Matlab 对高斯混合模型进行程序计算,最终得到拉伸裂缝和剪切裂缝分类。

#### 4.2 裂缝开展分析

利用高斯混合模型计算程序,得到了橡胶自密实混凝土声发射信号裂缝开展特征,将其区分为拉伸断裂和剪切断裂。图 6 为根据高斯混合模型所得到的裂缝分类云图,其中图 6(a)~(d)为不同橡胶掺量的试件裂缝分类云图,图 6(e)~(g)为不同跨径比的试件裂缝分类云图。由图 6(a)~(d)可以看出,试件裂缝产生以拉伸裂缝为主,同时随着橡胶掺量的增大,云图中 RA 值范围由 0~30 dB 缩小至 0~5 dB, AF 值由 30 kHz 增长至 50 kHz,说明拉伸断裂事件所占的比例不断上升,而剪切断裂事件比例逐渐下降。由图 6(e)~(g)可得,随着跨径比的减小,RA 值逐渐增大,而 AF 值逐渐减小,剪切断裂事件所占的比例上升。综合上述,通过 GMM 法云图对裂缝分类的表征,与传统 RA-AF 法所得结论具有一致性,说明使用 GMM 法进行声发射研究是可行的。

由图 6 可以看出,用 GMM 法计算得出的裂缝分类云图中,拉伸裂缝与剪切裂缝并非以直线区分,而是在某些区域内共同存在,证明 GMM 法能够更好地反映试件加载过程中拉伸裂缝与剪切裂缝

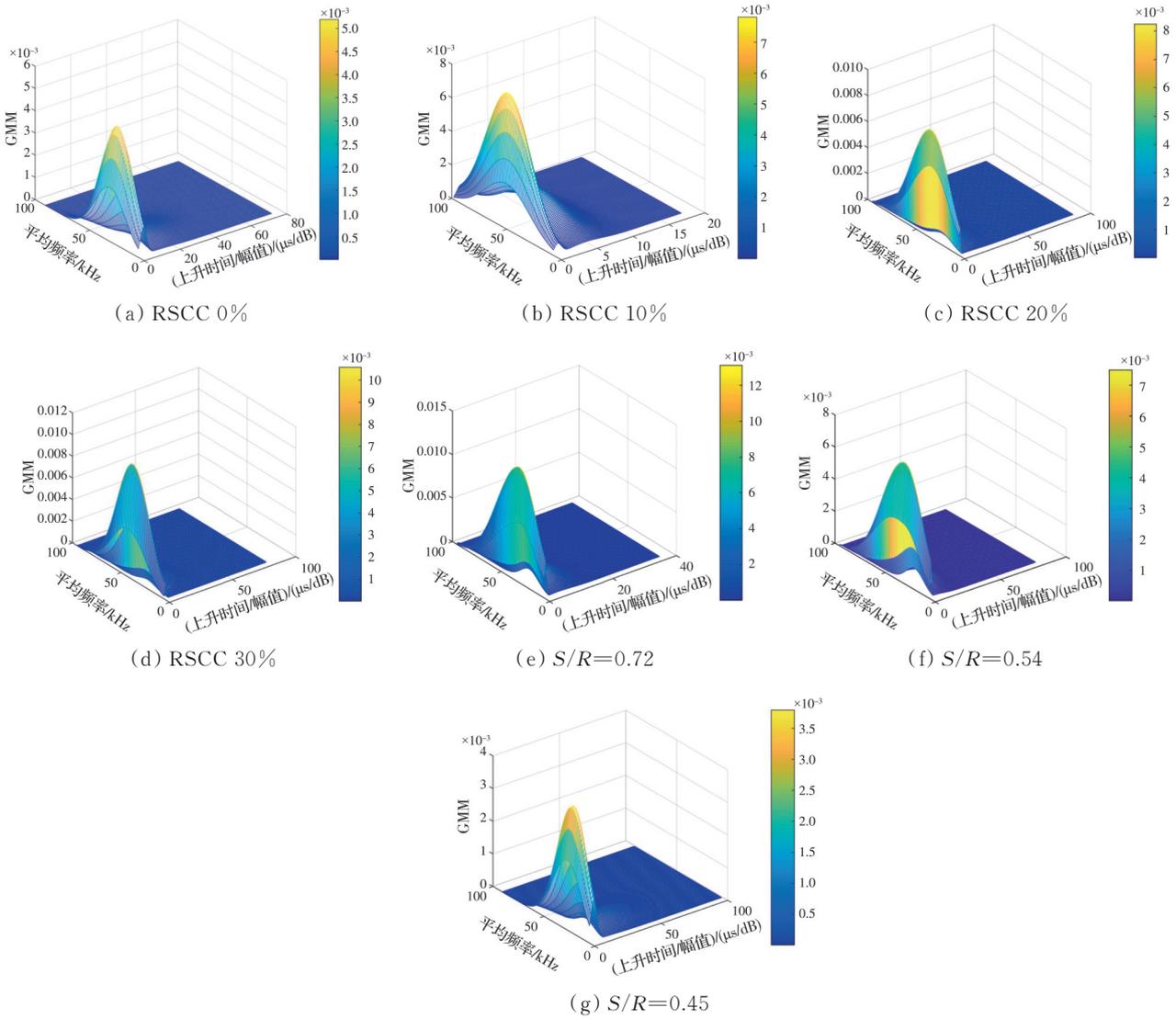


图 6 GMM 法裂缝分类云图

Fig. 6 Cloud chart of fracture classification by GMM method

发生的概率,并且指明不同工况下拉伸断裂事件与剪切断裂事件发生比例的变化规律。

### 5 结论

运用 RA-AF 特征与 GMM 法对橡胶自密实混凝土 SCB 试件的裂缝开展种类进行研究,同时引入高斯混合模型理论,通过理论与数据分析,得到如下结论:

- 1)掺入适量橡胶能够改善试件延性,橡胶掺量过多,混凝土强度较低,无法发挥橡胶颗粒的延性作用。
- 2)随着橡胶掺量的增加,拉伸断裂事件所占比例显著增加,断裂模式向 I 型断裂发展;橡胶含量较多时,断裂事件主要从橡胶颗粒与混凝土胶结面形成并快速发展,裂缝的发展具有连续的特点。
- 3)增大跨径比会导致试件承载能力下降,但相同加载阶段其损伤程度逐渐降低。当跨径比为

0.54时,试件峰值荷载下降 12.4 %,而拉伸裂缝占比增长 36.8 %。

4)由 GMM 法可知,拉伸裂缝与剪切裂缝并非以直线区分,而是在某些区域内共同存在,GMM 法能够更好地反映试件加载过程中拉伸裂缝与剪切裂缝发生的概率,并且指明不同工况下拉伸断裂事件与剪切断裂事件发生比例的变化规律。

### 参考文献

- [1] GIRSKAS G, NAGROCKIENĖ D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties [J]. Construction and Building Materials, 2017, 140: 36-42.
- [2] 徐颖,卜静武,刘雨夕,等.循环荷载下橡胶混凝土的断裂特性[J].土木与环境工程学报(中英文),2022(1): 142-148.
- XU Y, BU J W, LIU Y X, et al. Fracture behaviors of rubber concrete under cyclic loading [J]. Journal of Civil

- and Environmental Engineering, 2022(1): 142-148. (in Chinese)
- [3] LI Y, LI Y Q. Experimental study on performance of rubber particle and steel fiber composite toughening concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 267-275.
- [4] 赵秋红, 董硕, 朱涵. 钢纤维-橡胶/混凝土单轴受压全曲线试验及本构模型[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2359-2369.  
ZHAO Q H, DONG S, ZHU H. Experiment on stress-strain behavior and constitutive model of steel fiber-rubber/concrete subjected to uniaxial compression [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2359-2369. (in Chinese)
- [5] KARIMIPOUR A, GHALEHNOVI M, DE BRITO J. RETRACTED: Mechanical and durability properties of steel fibre-reinforced rubberised concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119463.
- [6] 龙广成, 李宁, 薛逸骅, 等. 冲击荷载作用下掺橡胶颗粒自密实混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(8): 1081-1090.  
LONG G C, LI N, XUE Y H, et al. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating rubber particles under impact load [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(8): 1081-1090. (in Chinese)
- [7] 冯明扬, 刘保东, 张敏强, 等. 外包橡胶混凝土覆层对梁式桥墩防撞性能影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2): 269-274.  
FENG M Y, LIU B D, ZHANG M Q, et al. Experimental study on the anti-collision performance of beam bridge piers with wrapped crumb rubber concrete layers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 269-274. (in Chinese)
- [8] 杨荣周, 徐颖, 陈佩圆, 等. SHPB劈裂试验下橡胶水泥砂浆的动态力学、能量特性及破坏机理试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10062-10072.  
YANG R Z, XU Y, CHEN P Y, et al. Experimental study on dynamic mechanics, energy characteristics, and failure mechanism of rubber cement mortar under SHPB splitting test [J]. Materials Review, 2021, 35(10): 10062-10072. (in Chinese)
- [9] BIDECI A, ÖZTÜRK H, BIDECI Ö S, et al. Fracture energy and mechanical characteristics of self-compacting concretes including waste bladder tyre [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 669-678.
- [10] 龙广成, 马昆林, XIE X, 等. 橡胶集料对混凝土抗压强度的降低效应[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 758-762.  
LONG G C, MA K L, XIE X, et al. Effect of rubber aggregate on reduction of compressive strength of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5): 758-762. (in Chinese)
- [11] ASLANI F, MA G W, WAN D L Y, et al. Experimental investigation into rubber granules and their effects on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1835-1847.
- [12] 李双喜, 魏昆仑, 姜春萌. 玄武岩纤维橡胶混凝土的抗冲磨性能[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220522.1809.004.html>.  
LI S X, WEI K L, JIANG C M. Abrasion resistance of basalt fiber rubber concrete [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220522.1809.004.html>. (in Chinese)
- [13] 傅强, 牛获涛, 谢友均, 等. 橡胶集料自密实混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 359-365.  
FU Q, NIU D T, XIE Y J, et al. Sulfate erosion resistance of rubberized self-compacting concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 359-365. (in Chinese)
- [14] 薛刚, 张宪法, 曹美玲. 考虑温度效应的橡胶混凝土阻尼耗能性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 94-100.  
XUE G, ZHANG X F, CAO M L. Tests for damping energy-dissipation performance of rubber concrete considering temperature effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19): 94-100. (in Chinese)
- [15] 陈徐东, 黄业博, 陈晨. 橡胶自密实混凝土断裂性能及声发射特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 758-765.  
CHEN X D, HUANG Y B, CHEN C. Fracture properties and acoustic emission characteristics of rubber self-compacting concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 758-765. (in Chinese)
- [16] 陈徐东, 王佳佳, 田华轩. 橡胶自密实混凝土疲劳断裂全过程声发射特征辨识参量试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 129-136.  
CHEN X D, WANG J J, TIAN H X. Tests for acoustic emission characteristic recognition parameters of rubber self-compacting concrete in fatigue fracture process [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 129-136. (in Chinese)
- [17] 张盛, 王龙飞, 常旭, 等. 中心直裂纹半圆盘试样的石灰岩断裂韧度尺寸效应试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1740-1749, 1760.  
ZHANG S, WANG L F, CHANG X, et al. Experimental study of size effect of fracture toughness of limestone using the notched semi-circular bend samples

- [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1740-1749, 1760. (in Chinese)
- [18] 吴金荣, 崔善成, 李飞, 等. 煤矸石粉/聚酯纤维沥青混合料低温抗裂性研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(6): 6078-6085.
- WU J R, CUI S C, LI F, et al. Study on low temperature crack resistance of coal gangue powder/polyester fiber asphalt mixture [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(6): 6078-6085. (in Chinese)
- [19] 吕有厂. 层理性页岩断裂韧性的加载速率效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1359-1370.
- LV Y C. Experimental study on loading rate effect of fracture toughness of layered shale [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1359-1370. (in Chinese)
- [20] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(7): 2324-2332.
- GAN Y X, WU S C, REN Y, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7): 2324-2332. (in Chinese)
- [21] 吴顺川, 甘一雄, 任义, 等. 基于RA与AF值的声发射指标在隧道监测中的可行性[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(6): 723-730.
- WU S C, GAN Y X, REN Y, et al. Feasibility research of AE monitoring index in tunnel based on RA and AF [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(6): 723-730. (in Chinese)
- [22] 周逸飞, 朱星, 刘文德. 基于声发射和高斯混合模型的灰岩破裂特征识别研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(11): 131-140.
- ZHOU Y F, ZHU X, LIU W D. Identification of cracking characteristics of limestone under uniaxial compression condition using acoustic emission and GMM [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(11): 131-140. (in Chinese)
- [23] 陈忠购. 基于声发射技术的钢筋混凝土损伤识别与劣化评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- CHEN Z G. Damage identification and deterioration evaluation of reinforced concrete based on acoustic emission technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [24] 陈飞, 张林艳, 封基良, 等. 沥青混合料低温抗裂性能试验方法研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(Sup2): 127-137.
- CHEN F, ZHANG L Y, FENG J L, et al. Research progress on test methods of asphalt mixture's low-temperature anti-cracking performance [J]. *Materials Review*, 2021, 35(Sup2): 127-137. (in Chinese)
- [25] 吴顺川, 孙伟, 刘洋, 等. I型断裂韧度模拟方法及细观影响因素研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2536-2546.
- WU S C, SUN W, LIU Y, et al. Study on simulation method of mode I fracture toughness and its meso-influencing factors [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2536-2546. (in Chinese)
- [26] 崔正龙, 孙万吉, 费海超, 等. 碳化高温后再生混凝土受压声发射特性与损伤演化[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(4): 175-185.
- CUI Z L, SUN W J, FEI H C, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution of recycled concrete after carbonization at high temperature under axial compression [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(4): 175-185. (in Chinese)
- [27] 郑泓, 段忠东. 考虑非线性环境因素影响的结构损伤预警方法研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(6): 1101-1111.
- ZHENG H, DUAN Z D. Structural damage alert with consideration of the nonlinear environmental effects [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(6): 1101-1111. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)