

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.143



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 超高性能混凝土劈拉损伤破坏的声光联合表征

陈徐东<sup>1</sup>, 冯子鸣<sup>1</sup>, 王宁宁<sup>2</sup>, 吴文文<sup>3</sup>, 石丹丹<sup>1</sup>, 栾金津<sup>1</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 苏交科集团股份有限公司, 南京 210017;

3. 中建三局集团有限公司, 武汉 430075)

**摘要:**为研究超高性能混凝土(UHPC)的劈拉破坏特征,采用3种不同的加载速率(0.1、0.01、0.001 mm/s)进行劈拉加载,在加载过程中采用数字图像相关(DIC)方法非接触观测裂缝演化,同时结合声发射(AE)技术对UHPC的破坏全过程进行动态监测,并基于DIC应变云图、AE参量分析试件的破坏特征。结果表明,钢纤维的掺入改善了混凝土的脆性,UHPC峰后荷载-位移曲线下降更平缓,没有出现急剧下降的情况;加载速率越高,UHPC测出劈拉强度越高,符合混凝土速率效应规律,加载速率由0.001 mm/s提升到0.01 mm/s和由0.01 mm/s提升到0.1 mm/s,劈拉峰值荷载分别提高了27.9%和28.5%。采用DIC法进行UHPC劈拉试验的变形测量可获得连续的变形数据,能完整地捕捉裂缝的开展过程,证明DIC能很好地反映试件表面裂缝开展演化过程。基于RA-AF值分析可以快速、有效地判断混凝土中裂缝的开展类型。根据分析结果,UHPC劈拉试验的裂缝类型绝大多数为拉伸裂缝,且随着加载速率的提高,拉伸裂缝占总裂缝的比例提高。

**关键词:**超高性能混凝土;劈拉;声发射;数字图像相关;损伤演化

中图分类号:TU528.58 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)01-0179-09

## Acousto-optic characterization of splitting tensile damage of ultra-high performance concrete

CHEN Xudong<sup>1</sup>, FENG Ziming<sup>1</sup>, WANG Ningning<sup>2</sup>, WU Wenwen<sup>3</sup>, SHI Dandan<sup>1</sup>, LUAN Jinjin<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. JSTI Group, Nanjing 210017, P. R. China; 3. China Construction Third Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430075, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the splitting tensile failure characteristics of ultra-high performance concrete (UHPC), three different loading rates (0.1, 0.01, 0.001 mm/s) were used for the splitting tensile loading. During the loading process, the digital image correlation (DIC) method was used to observe the crack evolution by non-contact deformation. At the same time, the acoustic emission (AE) technology was used to dynamically monitor the entire failure process of UHPC, and the failure characteristics of the specimen were analyzed based on the DIC strain cloud map and AE parameters. The results show that due to the incorporation of steel fibers,

收稿日期:2023-09-23

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600200);国家自然科学基金(51979090、52379124)

作者简介:陈徐东(1985-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事混凝土动态力学特性及损伤机理研究,E-mail:cxdong1985@163.com。

Received: 2023-09-23

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2600200); National Natural Science Foundation of China (Nos. 51979090, 52379124)

**Author brief:** CHEN Xudong (1985-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: dynamic mechanical properties and damage mechanism of concrete, E-mail: cxdong1985@163.com.

the brittleness of concrete is improved, and the post-peak load-displacement curve of UHPC decreases more gently without a sharp decline. The higher the loading rate, the higher the splitting tensile strength measured by UHPC, which conforms to the law of concrete rate effect. When the loading rate is increased from 0.001 mm/s to 0.01 mm/s and from 0.01 mm/s to 0.1 mm/s, the splitting tensile peak load is increased by 27.9 % and 28.5 % respectively. The digital image correlation method is used to measure the deformation of UHPC splitting tensile experiment, and continuous deformation data can be obtained, which can completely capture the development process of cracks. It is proved that DIC can well reflect the evolution process of cracks on the surface of specimens. The analysis based on RA-AF value can quickly and effectively determine the type of crack development in concrete. According to the analysis results, the crack types of UHPC splitting tensile experiment are mostly tensile cracks, and the proportion of tensile cracks in the total cracks increases with the increase of loading rate.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; splitting; acoustic emission; digital image correlation; damage evolution

混凝土作为建筑材料,至今已经超过100年,它具有适用性强、使用成本较低、施工方便等优点,是当今世界上用量最大的建筑材料<sup>[1]</sup>。但随着工程结构朝着更复杂、更高的趋势发展,传统混凝土自重大的缺点越发显现,这使得人们不断探索高强度、高耐久的混凝土材料<sup>[2]</sup>,从而减少混凝土用量,减轻建筑自重。1994年,有学者提出了超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)的概念<sup>[3]</sup>,此后越来越多学者研究超高性能混凝土。

徐海滨等<sup>[4]</sup>基于新型 UHPC 试验,并结合已有研究成果,提出了 UHPC 单轴受压和单轴受拉的本构方程。Wille 等<sup>[5]</sup>通过掺入 3 种类型的钢纤维,研究了超高性能纤维增强混凝土的弹性、应变硬化和软化拉伸参数,提出拉伸应力-应变响应的模型。Yu 等<sup>[6]</sup>研究了低掺量纳米二氧化硅下超高性能混凝土水化和微观结构发展的影响,发现对于孔隙率最低的 UHPC 的生产,存在一个最佳的纳米二氧化硅用量,在该用量下,成核的积极影响和截留空气的消极影响可以很好地平衡。与传统混凝土相比,由于加入纤维, UHPC 拉压比无明显变化,但抗拉强度显著上升,劈拉强度也显著提高<sup>[7]</sup>。目前对 UHPC 的研究主要集中在普通力学性能<sup>[8-14]</sup>和配合比设计上<sup>[15-19]</sup>,对于劈拉破坏特征的研究较少,对不同加载速率下的破坏研究则更少。而近年来 UHPC 广泛运用于桥梁、高层建筑,这对材料抵抗荷载的性能提出更高的要求,因此,有必要研究其在不同加载速率下的破坏特性。

声发射(acoustic emission, AE)最早应用于金属材料特性研究,经过近年来的改良,越来越多地应用在混凝土的破坏研究上。混凝土裂缝在形成和发展时,将能量以应力波的形式释放出来,产生声发射信号,这种信号能被转化成电信号而被设备

所采集。Assi 等<sup>[20]</sup>用 AE 技术探索弹性应力波信号与水泥水化潜在的关系,提出解决声发射参数分析局限性的方法。Soulioti 等<sup>[21]</sup>研究发现,特定的声发射参数随损伤发展而单调变化,可用于表征试件失效过程。有学者基于声发射技术提出一种方法以提高对 UHPC 作为强化材料应用的断裂和失效机理的理解<sup>[22]</sup>。数字图像相关方法(digital image correlation, DIC)是一种非接触式光学观测系统,对试件破坏时的位移具有良好的精度和监测能力<sup>[23]</sup>。相关研究表明, DIC 和 AE 同时应用于混凝土裂缝识别,其结果基本一致,具有互补性<sup>[24]</sup>, DIC 能从混凝土偏表层观测裂缝发展,而 AE 能监测混凝土内部损伤。AE 和 DIC 的共同特点是在不破坏材料的前提下实现实时监测,即无损检测。

中国目前约有 80 座桥梁使用 UHPC 材料,应用在桥梁主体结构、现浇接缝以及维修加固等方面<sup>[25]</sup>。随着时间的推移, UHPC 材料在服役的过程中会受到热胀冷缩、风荷载引起桥面位移等影响,局部容易发生受拉破坏,因此,有必要研究 UHPC 的受拉破坏特征,为 UHPC 的优化提供依据。笔者采用数字图像相关方法进行非接触式全场变形观测裂缝演化,同时结合声发射技术对 UHPC 的破坏全过程进行动态监测,并基于 AE 参量分析试件的破坏特征,研究不同加载速率下劈拉破坏特性以及裂缝发展演变过程,进一步探究 UHPC 的破坏特征及规律。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 材料及配合比

采用海螺牌 P·II 52.5R 高强度水泥。硅灰选择杭州三郎环保科技有限公司生产的无定形超细(非晶体)粉末,灰白色, SiO<sub>2</sub> 含量为 96%。矿渣粉

选择杭州某厂生产的S95级矿渣粉。钢纤维选择绍兴某厂生产的长度为8~12 mm、等效直径为0.31 mm、长径比为30的圆柱形直钢纤维,钢纤维形状合格率≥98%,纤维表面镀黄铜,杂质质量分数<0.1%,抗拉强度为2 750 MPa。选择新一代聚羟酸高性能减水剂,外观为浅黄色液体。采用《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)规定的养护方法,拆模后放入温度为(20±2)℃、相对湿度为95%以上的标准养护室中养护。具体配合比如表1所示。

表 1 超高性能混凝土(UHPC)配合比

Table 1 Mix proportions of ultra-high performance concrete

水胶比	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	硅灰/(kg/m <sup>3</sup> )	矿渣粉/(kg/m <sup>3</sup> )
0.21	694	185	260
石英砂/(kg/m <sup>3</sup> )	减水剂/(kg/m <sup>3</sup> )	钢纤维/(kg/m <sup>3</sup> )	水/(kg/m <sup>3</sup> )
1 000	102	156	235

### 1.2 试验方案

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)规定,试验的试样采用100 mm×100 mm×100 mm的UHPC。试验设备采用MTS 322型闭环伺服控制试验机、Correlated Solutions公司的VIC-3D系统、美国声学物理公司的SAMOS TM 16通道声发射测试系统,设备具体布置位置如图1所示,现场试验情况如图2所示。其中,使用MTS进行劈拉试验,为了研究加载速率的影响,采用3组不同的加载速率(0.1、0.01、0.001 mm/s)。用VIC-3D系统观察试件表面的变形,其中散斑直径约为0.5 mm,对应大小约为7个像素。将分辨率为2 048×2 048的工业相机用三脚架固定,然后进行图像采集和相机标定。同时通过

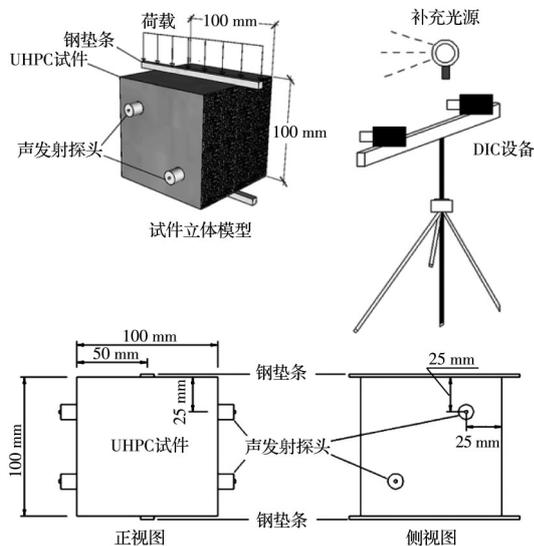


图 1 劈拉试验加载示意图

Fig. 1 Loading diagram of splitting tensile experiment

声发射测试系统采集混凝土损伤破坏的声发射信号,为保证试验采集数据的有效性、排除外界的噪声干扰,按预先试验结果设定35 dB为声发射门槛值。

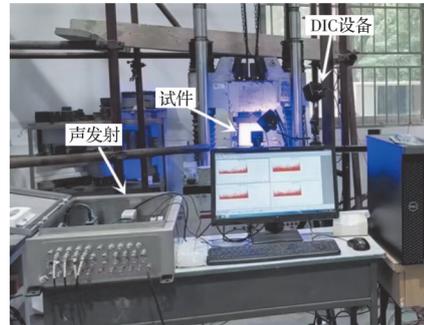


图 2 劈拉试验现场

Fig. 2 Splitting tensile experiment site

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同加载速率下超高性能混凝土劈拉全程荷载-位移曲线

每组速率采用3个试件进行试验,考虑混凝土试验的离散性,将3个试件的荷载-位移曲线求得平均值,绘制出曲线。图3为不同加载速率下超高性能混凝土劈拉平均荷载-位移曲线,横坐标Δ表示加载端头的位移,数据由加载设备导出获得。从图中可以发现,曲线呈现出阶段性的变化规律,大致可以分为4个不同的加载阶段。选取其中加载速率为0.1 mm/s的平均荷载-位移曲线分析,由图4可见:OA为压密阶段,曲线斜率逐渐增大,呈现出下凹状;AB为弹性阶段,荷载与位移呈线性关系;BC为屈服阶段,此时曲线斜率不断减小,趋向于峰值;CD为破坏阶段,此阶段荷载下降较平缓。对于没有加入钢纤维的素混凝土,当荷载达到峰值时,混凝土急剧开裂,呈现出明显的脆性破坏,曲线骤降。而UHPC由于钢纤维的掺入,曲线下降较缓慢,说明钢纤维延缓了裂缝的发展<sup>[5,26]</sup>。表2为不同加载速

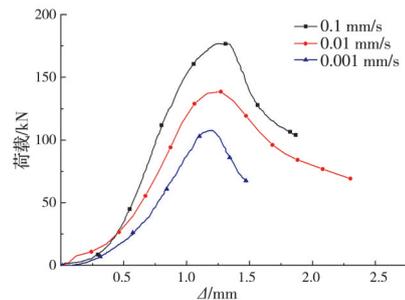


图 3 不同加载速率下超高性能混凝土的劈拉平均荷载-位移曲线

Fig. 3 Average splitting load-displacement curves of ultra-high performance concrete under different loading rates

率下平均峰值荷载及提升幅度,可以发现混凝土试件劈裂抗拉平均峰值荷载随加载速率的提高而增加,加载速率由 0.001 mm/s 提升到 0.01 mm/s,劈拉平均峰值荷载提高 27.9%,加载速率由 0.01 mm/s 提升到 0.1 mm/s,劈拉平均峰值荷载提高 28.5%,两次峰值荷载提升幅度较均匀,基本符合混凝土速率效应规律。

表 2 不同加载速率下平均峰值荷载及提升幅度  
Table 2 The average peak load and the increase range under different loading rates

加载速率/ (mm/s)	峰值荷载/kN	平均值/ kN	提升幅 度/%
0.001	107.7、116.0、96.1	106.6	
0.01	124.0、146.2、138.7	136.3	27.9
0.1	176.9、182.4、166.0	175.1	28.5

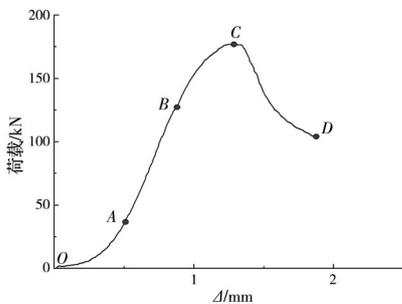


图 4 0.1 mm/s 加载速率下的平均荷载-位移曲线

Fig. 4 The average load-displacement curve at 0.1 mm/s loading rate

2.2 基于 DIC 的破坏过程研究

DIC 是一种无损监测技术,能通过非接触方式在试件加载过程的任何阶段获得全填充分布的试样表面应变。在 DIC 应变分析中,暖色代表拉伸应力引起的应变正值,如红色和黄色;冷色代表压缩效应引起的应变负值,如紫色和蓝色。在从冷色到暖色的过渡区域,绿色代表接近 0 的应变值。图例值的大小由破坏开始时正应变的最大绝对值和负应变的最大绝对值之间的较大值决定。图 5~图 7 为不同加载速率下的主应变云图,由于裂缝沿着垫

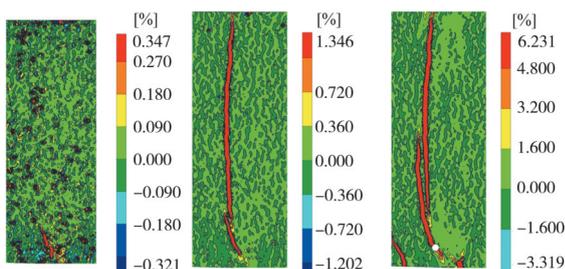


图 5 0.001 mm/s 加载速率下的 DIC 应变云图

Fig. 5 DIC strain nephogram under 0.001 mm/s loading rate

条加载方向开展,只有垂直方向的中间区域应变云图有变化,因此,截取该区域进行分析。从左到右,依次显示了峰值荷载的 70% (上升段)、100% 和 80% (下降段) 的主应变云图分布。

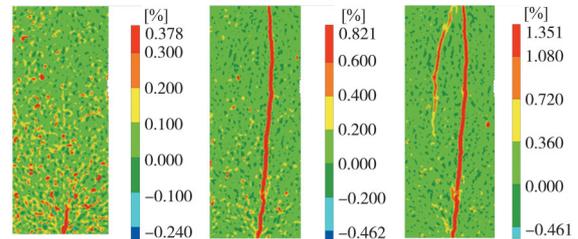


图 6 0.01 mm/s 加载速率下的 DIC 应变云图

Fig. 6 DIC strain nephogram under 0.01 mm/s loading rate

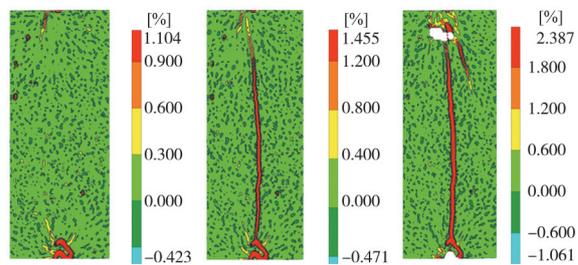


图 7 0.1 mm/s 加载速率下的 DIC 应变云图

Fig. 7 DIC strain nephogram under 0.1 mm/s loading rate

随着荷载的增加,位移矢量不断增大,导致加载方向的压缩增大,垂直于加载方向的膨胀增大,当横向位移到一定程度时,试件裂缝开始出现。在此过程中,DIC 技术可以清晰地绘制高应变区域(应变云图中的红、橙、黄色条状区域),随着荷载的增加,这些区域裂缝逐渐扩展,直至混凝土剥落(应变云图中的白色空洞区域)。分析不同加载速率下的主应变云图可以发现,对于混凝土劈拉试验,裂缝演化均由两端向中间发展。在加载过程中,经过前期加载的初始压密阶段,混凝土微裂缝逐渐发育,表面开始出现细微裂缝,但大部分未连通。随着加载的进行,损伤不断积累,离散的裂缝相互连通,形成连续的裂缝,当荷载达到峰值荷载的 70% 时,由应变云图可以看到,3 种加载速率下混凝土表面部分区域均出现红色条状区域,说明该区域发生较大水平位移,产生开裂,此时试件处于损伤稳定发展阶段。当荷载临近峰值时,应变云图迅速出现红色条状贯通区域,表明 UHPC 表面裂缝贯通,总体上为垂直的拉伸裂缝,充分体现了混凝土的脆性特征,且进一步说明混凝土整体的损伤是一个不断积累的过程。在峰值荷载的 80% (下降段) 时,应变云图中图例极值增大,显示试件横向位移较大,说明试件表面贯通裂缝尺寸在持续发展,同时混凝土部

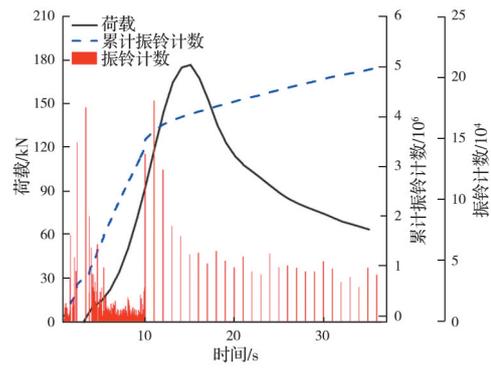
分表面开始剥落,剥落混凝土如图 5 及图 7 峰值荷载的 80%(下降段)白色空洞区域所示,DIC 此时无法提供该区域的应变分布,这体现了 DIC 技术的局限性。

### 2.3 基于 AE 振铃计数的损伤演化规律分析

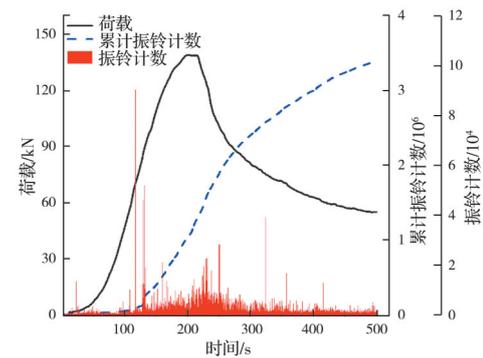
声发射是一种无损检测技术,当材料产生损伤和破坏时会以弹性波来释放能量,声发射系统将弹性波转化为电信号,通过分析这些信号能反映材料内部的损伤<sup>[27-28]</sup>。混凝土作为一种非均质的复合材料,其失稳破坏是许多微小损伤不断积累,最终形成贯通裂缝的结果,不是突然发生的。声发射技术能在混凝土表面观察不到裂缝情况下监测到混凝土的内部损伤过程。常见的 AE 表征参数包括撞击次数、振铃计数、信号幅值、能量、强度、峰值频率等。其中,材料声发射信号越活跃,振铃计数强度越高,累计振铃计数增长速度越快。

图 8(a)为 0.1 mm/s 加载速率下累计振铃计数、振铃计数、荷载与时间的关系,在加载过程中声发射信号存在 3 个不同的阶段。在初始阶段,试件处于压密状态,声发射信号较弱,说明此时较少有裂缝开展,由于加载速度较快,此阶段历时很短。随后试件进入弹性至裂缝稳定发展阶段,此时累计振铃计数曲线斜率开始不断增大,声发射信号开始进入活跃期,表明由离散型细微裂缝趋向于贯通裂缝发展。此后累计振铃计数曲线保持相同的斜率增长,说明此时混凝土内部裂缝开始迅速发展,混凝土开始出现严重损伤。在荷载曲线的峰后阶段,试件破坏严重,承载力趋于丧失,此阶段较少形成新的裂缝,累计振铃计数曲线开始缓慢增长甚至不增长,进入一个平台期。此阶段声发射信号数量较加载前期有所减少,而呈现出强度较高的特点,这是因为 UHPC 内部的钢纤维断裂发出高能声发射信号。在加载后期,混凝土基体已劈裂为两部分,已不具备产生高能声发射信号的条件,由于钢纤维有延性,当混凝土基体裂开时,仍连接着两部分混凝土,当裂缝进一步拓展,钢纤维断裂产生声发射信号。

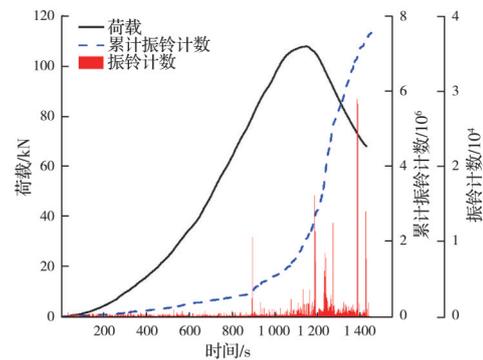
图 8(b)为 0.01 mm/s 加载速率下累计振铃计数、振铃计数、荷载与时间的关系。与较快的加载速度不同,该试件有较明显的初始压密阶段,持续时间在 70 s 左右,在试件压密状态下,声发射信号较弱,累计振铃计数曲线几乎没有增长,说明此阶段较少有裂缝开展,且裂缝之间没有相互贯通。当荷载为峰值的 50% 时,有高能振铃计数产生,曲线开始出现转折并快速增长,此阶段的振铃计数强度高且密集,说明该试件裂缝开展较均匀,裂缝趋向



(a) 0.1 mm/s



(b) 0.01 mm/s



(c) 0.001 mm/s

图 8 不同加载速率下累计振铃计数、振铃计数、荷载与时间的关系

Fig. 8 Relationship between cumulative ringing counts, ringing counts, loads and time under different loading rates

于相互连通。在加载曲线的峰值过后,累计振铃计数曲线开始缓慢增长,说明此阶段较少形成新的裂缝,声发射信号主要来源于钢纤维的断裂。

图 8(c)为 0.001 mm/s 加载速率下累计振铃计数、振铃计数、荷载与时间的关系。在较慢的加载速率下,试件存在最长的压密阶段,此过程的累计振铃计数曲线增长平缓,裂缝开展缓慢,同时裂缝之间没有相互贯通。由于有长时间的充分压密,加载到荷载峰值点附近时,试件损伤已经积累到极限,裂缝开始剧烈性增长,迅速连通。此时的累计振铃计数开始剧增,曲线几乎呈现垂直增长状态。

对比图 8 中每种加载速率下的振铃计数可以发

现,声发射信号分布与加载的快慢密切相关。当加载速度较快时,声发射信号集中在加载前部分,当加载到峰后阶段混凝土完全开裂时,声发射信号较稀疏。而当加载速率降低时,试样有足够的时间监测试件缓慢变形,从而能收集更多的声发射信号,这些信号主要集中在加载的中后期,而加载前期由于处于压密状态,声发射信号强度弱且数量少。

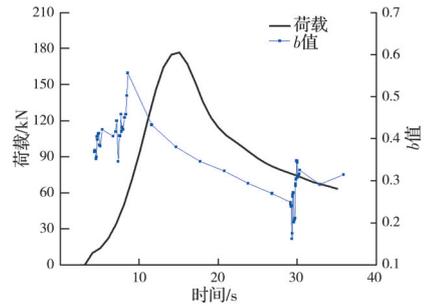
2.4 b 值分析

b 值分析法最初用于测量某一地区的地震活动水平。由于混凝土破坏过程中应变能释放产生的弹性波与地震波类似,b 值分析法经过改进后形成了可用于混凝土类材料的 AE 信号分析方法。在声发射分析中,幅值与累积频度对数呈线性关系,b 为拟合直线的斜率<sup>[29]</sup>,用来表征声发射事件震级分布的尺度,衡量试验过程中试件内部小震级破裂事件和大震级破裂事件的相对数量。b 值增大说明混凝土的微裂缝增长,b 值减小说明裂缝相互贯通形成较大的裂缝。计算式为

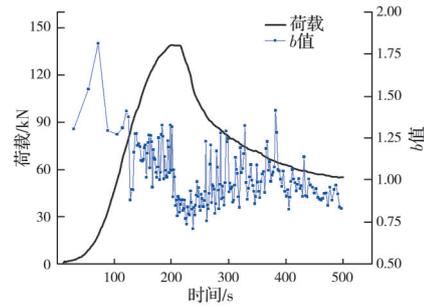
$$\lg N = a - b \left( \frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (1)$$

其中:N 为幅值大于  $A_{dB}$  的 AE 事件数;a 为拟合常数;b 为拟合直线的斜率; $A_{dB}$  为 AE 事件的幅值。

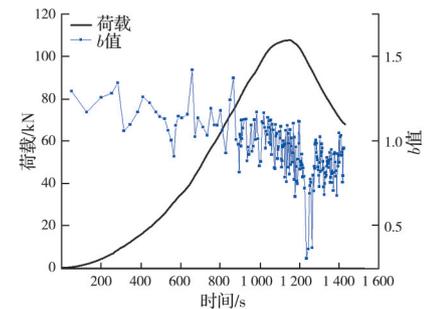
将采集到的声发射数据代入式(1),并通过最小二乘法计算出最佳拟合直线的系数 a 和 b。图 9 (b)、(c) 分别为 UHPC 试件在 0.01 mm/s、0.001 mm/s 加载速率下的 b 值分布。可以看到,前期 b 值波动比较大,均呈现出先增大再减小的特征,这完全符合混凝土的破坏特性。b 值增大说明混凝土的微裂缝增长,而当微裂缝增加到一定程度时,裂缝相互贯通形成较大的裂缝,此时 b 值开始减小,在加载的前期呈现出 b 值增大和减小的往复过程,这说明混凝土的破坏是一个长期积累的过程,而不是在一瞬间完成的。与图 9(b)、(c) 不同的是,图 9(a) 加载初期 b 值呈波动上升的趋势,该阶段混凝土内部大量微裂缝聚集,在局部区域形成裂缝。当加载到峰值荷载附近时,b 值开始大幅下降,表明裂缝开始不稳定扩展,微裂缝相互连通成宏观裂缝并快速增长,在这一阶段,大部分声发射能量通过形成不稳定的裂缝扩展而释放,从而导致试件承载力失效。通过对比不同的加载速率可以发现,加载速率越小,b 值的波动越小,这是因为较小的加载速率能使裂缝缓慢均匀发展,不会导致在短期内形成较大的裂缝使 b 值急剧下降。总体而言,b 值随着加载的进行而减小,尤其是过了加载荷载的峰值点后,b 值下降明显。



(a) 0.1 mm/s



(b) 0.01 mm/s



(c) 0.001 mm/s

图 9 UHPC 试件不同加载速率下 b 值分布

Fig. 9 b values distribution of UHPC specimens under different loading rates

2.5 RA-AF 值分析

有学者研究发现<sup>[30]</sup>,混凝土的裂缝开展模式可以基于 RA-AF 值进行分析(RA 为上升时间段信号包络线梯度的倒数,AF 为平均频率)。根据图 10 中的声发射参数,AF 定义为振铃计数与持续时间的比值,RA 定义为上升时间与 AE 信号幅值的比值,如式(2)、式(3)所示。根据 RA 和 AF 的关系可以将裂缝分为拉伸裂缝和剪切裂缝两种形式,剪切裂缝

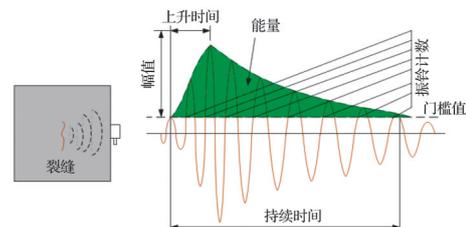


图 10 声发射参数物理意义示意图

Fig. 10 Physical meaning diagram of acoustic emission parameters

有高 RA 低 AF 特征,拉伸裂缝则是高 AF 而低 RA,裂缝类型判断如图 11 所示。基于 Farhidzadeh<sup>[31]</sup>等的研究成果,将 RA-FA 分布图分割线作为拉伸-剪切裂缝分界线,采用斜率  $k=0.2$  的标线作为划分裂缝类型的依据。

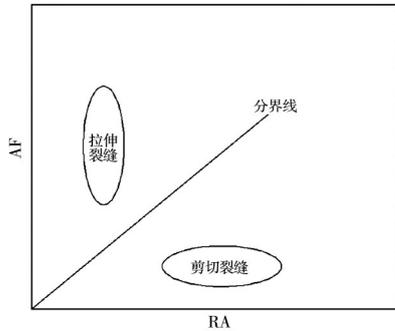


图 11 裂缝类型判断示意图

Fig. 11 Schematic diagram of crack type judgment

$$RA = \frac{\text{上升时间}}{\text{幅值}} \quad (2)$$

$$AF = \frac{\text{振铃计数}}{\text{持续时间}} \quad (3)$$

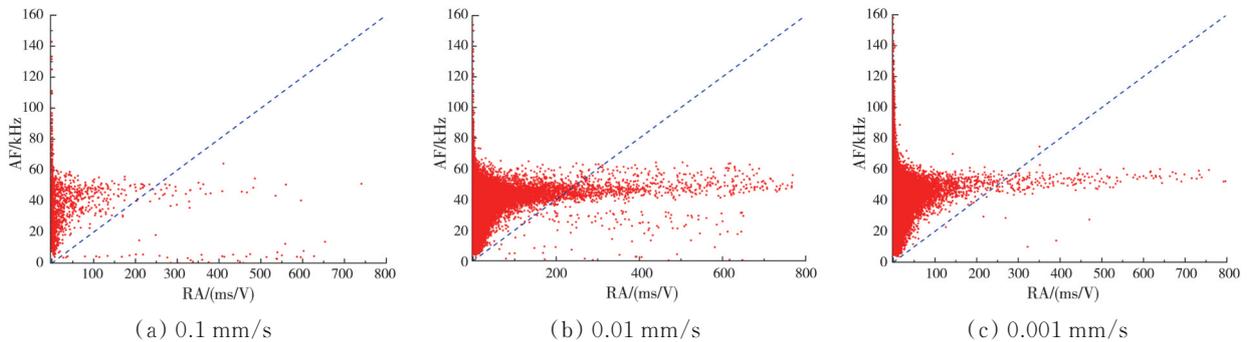


图 12 不同加载速率下 UHPC 的 RA-AF 值

Fig. 12 RA-AF values of UHPC under different loading rates

图 13 为不同加载速率下的 UHPC 裂缝分布情况。可以看出,拉伸裂缝的比例远大于剪切裂缝的比例,几乎接近 100%,说明 UHPC 以拉伸破坏为主。而加载速度越小,拉伸裂缝的占比越高,较大的加载速度有助于剪切裂缝的形成。

### 3 结论

研究了 UHPC 的劈拉破坏特征,用 3 种不同的加载速率(0.1、0.01、0.001 mm/s)进行劈拉试验加载,采用数字图像相关方法进行非接触式全场变形观测裂缝演化,同时结合声发射技术对 UHPC 的破坏全过程进行动态监测,并基于 AE 参量分析试件的破坏特征,得出以下结论:

1) 钢纤维的掺入改善了混凝土的脆性,UHPC 峰后荷载-位移曲线下降得更平缓,不会出现急剧下

图 12 为不同加载速率下 UHPC 的 RA-AF 值分布。图中虚线为划分裂缝类型的标线,位于标线上部的点信号源为拉伸裂缝产生,位于标线下部的点信号源为剪切裂缝产生。从图 12 可以看出,对于 UHPC 试件,无论加载速率快慢,拉伸裂缝的 AF 值主要集中在 20~60 kHz 区间,而剪切裂缝的 RA 值呈现出离散的特征,分布的区间较宽泛。通过比较不同加载速率的剪切裂缝特征可以发现,速度越快,剪切裂缝点落在 AF 小区间值的数量越多。在不同的加载速率下,位于虚线上方的点始终多于在虚线下方的点,这说明 UHPC 试件的拉伸裂缝均明显多于剪切裂缝。同时可以看到,加载速度越小,RA-AF 值的数据点越多。这是因为加载速度小,材料损伤释放的能量可以充分地传递到探头上,使声发射信号得到充分收集,直接体现为数据增多。由于采用钢垫条进行劈拉试验(如图 1、图 2 所示),有应力集中效应,裂缝沿着垫条与 UHPC 接触的位置发展。从整体上看,UHPC 破坏表现为垂直贯通裂缝,符合拉伸裂缝的特征,这个现象印证 RA-FA 分析中,拉伸裂缝占据裂缝类型的主要部分,说明该分析方法准确有效。

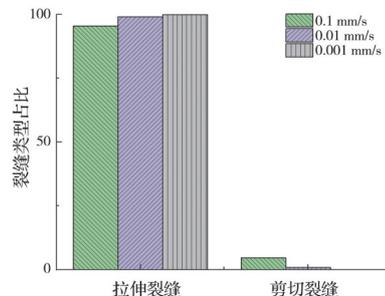


图 13 不同加载速率下 UHPC 裂缝分布

Fig. 13 Crack distribution of UHPC under different loading rates

降的情况。

2) 加载速率越高,UHPC 测出的劈拉强度越高,加载速率由 0.001 mm/s 提升到 0.01 mm/s 和由 0.01 mm/s 提升到 0.1 mm/s,劈拉峰值荷载分别

提高 27.9%、28.5%。

3) 采用数字图像相关法进行 UHPC 劈拉试验的变形测量, 可获得连续的变形数据, 证明 DIC 能很好地反映试件表面裂缝的开展演化过程。

4) 基于 RA-AF 的断裂模式分析可以快捷、有效地判断混凝土中裂缝的开展类型。UHPC 劈拉试验的裂缝类型绝大多数为拉伸裂缝, 同时加载速度越大, 拉伸裂缝的占比越高。

## 参考文献

- [1] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 1-18.  
JIN L, ZHANG R B, DU X L, et al. Research progress on the influence of temperature on the mechanical performance of concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 1-18. (in Chinese)
- [2] 王晓飞, 周海龙, 王海龙. 超高性能混凝土的抗剪强度[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2190-2195.  
WANG X F, ZHOU H L, WANG H L. Shear strength of ultra-high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(8): 2190-2195. (in Chinese)
- [3] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [4] 徐海滨, 邓宗才. 新型 UHPC 应力-应变关系研究[J]. 混凝土, 2015(6): 66-68, 79.  
XU H B, DENG Z C. Stress-strain constitutive law of a new kind of UHPC [J]. Concrete, 2015(6): 66-68, 79. (in Chinese)
- [5] WILLE K, EL-TAWIL S, NAAMAN A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 53-66.
- [6] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 140-150.
- [7] 张哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.  
ZHANG Z, SHAO X D, LI W G, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58. (in Chinese)
- [8] 管品武, 涂雅箏, 张普, 等. 超高性能混凝土单轴抗压本构关系研究[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1295-1305.  
GUAN P W, TU Y Z, ZHANG P, et al. A review on constitutive relationship of ultra-high-performance concrete under uniaxial compression and tension [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1295-1305. (in Chinese)
- [9] 胡翱翔, 梁兴文, 李东阳, 等. 超高性能混凝土配合比设计及其受拉性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 39-46.  
HU A X, LIANG X W, LI D Y, et al. Mix design method and uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 39-46. (in Chinese)
- [10] 王倩楠, 顾春平, 孙伟. 水泥-粉煤灰-硅灰基超高性能混凝土水化过程微观结构的演变规律[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 85-89.  
WANG Q N, GU C P, SUN W. Microstructure evolution during hydration process of ultra-high performance concrete containing fly ash and silica fume [J]. Materials Review, 2017, 31(23): 85-89. (in Chinese)
- [11] 曹润倬, 周茗如, 周群, 等. 超细粉煤灰对超高性能混凝土流变性、力学性能及微观结构的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2684-2689.  
CAO R Z, ZHOU M R, ZHOU Q, et al. Effect of ultra-fine fly ash on rheological properties, mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete [J]. Materials Reports, 2019, 33(16): 2684-2689. (in Chinese)
- [12] 梁兴文, 胡翱翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 722-731.  
LIANG X W, HU A X, YU J, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 722-731. (in Chinese)
- [13] 张文华, 刘鹏宇, 吕毓静. 超高性能混凝土动态力学性能研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19): 3257-3271.  
ZHANG W H, LIU P Y, LYU Y J. Dynamic mechanical property of UHPCs: A review [J]. Materials Reports, 2019, 33(19): 3257-3271. (in Chinese)
- [14] 欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 296-304.  
OUYANG X, SHI C J, SHI J H, et al. Compressive mechanical properties and prediction for elastic modulus of ultra-high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2): 296-304. (in Chinese)
- [15] 杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652-658.  
YANG J, CHEN B C, SU J Z. Effect of steel fiber on elastic modulus of ultra-high-performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(5): 652-658. (in Chinese)
- [16] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274-1280.  
DENG Z C. Flexural toughness and characterization

- method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6): 1274-1280. (in Chinese)
- [17] 杲晓龙, 王俊颜, 郭君渊, 等. 循环荷载作用下超高性能混凝土的轴拉力学性能及本构关系模型[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3925-3938.  
GAO X L, WANG J Y, GUO J Y, et al. Axial tensile mechanical properties and constitutive relation model of ultra-high performance concrete under cyclic loading [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3925-3938. (in Chinese)
- [18] 邓宗才, 姚军锁. 箍筋约束超高性能混凝土柱受压性能研究进展[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(1): 14-25.  
DENG Z C, YAO J S. Research progress on compressive behavior of stirrup-confined ultra-high performance concrete columns [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(1): 14-25. (in Chinese)
- [19] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(2): 10-20.  
CHEN B C, WEI J G, SU J Z, et al. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(2): 10-20. (in Chinese)
- [20] ASSIL, SOLTANGHARAEI V, ANAY R, et al. Un-supervised and supervised pattern recognition of acoustic emission signals during early hydration of Portland cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 103: 216-225.
- [21] SOULIOTID, BARKOULA N M, PAIPETIS A, et al. Acoustic emission behavior of steel fibre reinforced concrete under bending [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(12): 3532-3536.
- [22] PREM P R, VERMA M, MURTHY A R, et al. Smart monitoring of strengthened beams made of ultra-high performance concrete using integrated and nonintegrated acoustic emission approach [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(5): e2704.
- [23] YING J W, GUO J. Fracture behaviour of real coarse aggregate distributed concrete under uniaxial compressive load based on cohesive zone model [J]. *Materials*, 2021, 14(15): 4314.
- [24] ALAM S Y, SALIBA J, LOUKILI A. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 69: 232-242.
- [25] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(1): 1-13.  
SHAO X D, FAN W, HUANG Z Y. Application of ultra-high-performance concrete in engineering structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(1): 1-13. (in Chinese)
- [26] WANG J Y, GUO J Y. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 88: 17-28.
- [27] 邱继生, 周云仙, 王民煌, 等. 冻融循环作用下煤矸石混凝土的损伤特性及本构关系[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(5): 149-157.  
QIU J S, ZHOU Y X, WANG M H, et al. Damage characteristics and constitutive relationship of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5): 149-157. (in Chinese)
- [28] 张黎明, 高速, 任明远, 等. 大理岩破坏起裂应力及断裂能特征试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(4): 69-73.  
ZHANG L M, GAO S, REN M Y, et al. Experimental analysis on crack initiation stress and rupture energy of marble failure [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(4): 69-73. (in Chinese)
- [29] 郭玉柱, 陈徐东, 胡良鹏, 等. 花岗岩-喷射混凝土梁损伤的声发射可视化表征[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(8): 90-99.  
GUO Y Z, CHEN X D, HU L P, et al. Visualized characterization of damage in granite-shotcrete beams based on acoustic emission [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(8): 90-99. (in Chinese)
- [30] OHTSU M, SHIOTANI T, SHIGEISHI M, et al. Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete test method for classification of active cracks in concrete structures by acoustic emission [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(9): 1187-1189.
- [31] FARHIDZADEH A, SALAMONE S, SINGLA P. A probabilistic approach for damage identification and crack mode classification in reinforced concrete structures [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(14): 1722-1735.