

# 基于数字图像和超声技术的钢纤维混凝土劈裂损伤过程及规律

覃 源<sup>1</sup>, 赵世龙<sup>1</sup>, 周 恒<sup>2</sup>, 赵靖伟<sup>1,2</sup>, 吴江江<sup>1,3</sup>

(1. 西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 3. 中国能源建设集团西北建设投资有限公司, 西安 710048)

**摘 要:** 鉴于钢纤维混凝土衬砌(SFRC)在隧道等深基坑工程方面的应用价值, 为探究钢纤维混凝土的断裂过程, 以钢纤维和硅灰为控制变量, 共设计 9 组正交配合比试件进行劈裂力学试验, 采用数字图像相关技术(DIC)对试件在加载中的裂缝演化机制进行分析, 同时利用超声波技术(UT)捕捉试件劈裂损伤过程中的声学特征变化。结果表明: SFRC 具有较强的裂后承载能力, 钢纤维掺量 45 kg/m<sup>3</sup>, 硅灰掺量 6%, 储能水平最高且劈裂强度可提高 81.82%; 钢纤维对胶凝材料的补强作用主要表现在线弹性阶段, 90%峰值应力之后钢纤维的阻裂作用逐渐增强, 裂缝主要以纵向微裂缝扩展, 应力下降到 70%峰值应力后, 钢纤维的阻裂作用逐渐削弱, 裂缝开始迅速横向扩展; 此外, SFRC 劈裂损伤过程中超声波速呈梯形分级衰减趋势。基于能量演化规律分析 DIC 与 UT 表征裂缝扩展具有强相关性和互补性。

**关键词:** 钢纤维混凝土; 劈裂; 数字图像技术; 超声波测试; 裂缝演化过程

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2287-14

网络出版时间: 2025-06-05



近些年中国隧道工程发展迅速, 混凝土衬砌支护技术被广泛运用于隧道、地下工程和深基坑等结构之中<sup>[1]</sup>, 但是随着埋深增加、地应力增大, 普通混凝土抗拉性能往往存在一定局限性, 其服役过程中易开裂, 破坏时呈现明显的脆性, 对隧道工程安全性造成威胁<sup>[2]</sup>。因此, 为防止开裂, 通常在混凝土衬砌中掺入乱向分布的钢纤维<sup>[3]</sup>。

当前, 学者们在钢纤维混凝土(SFRC)领域对配合比进行优化, 材料改性机理方面的研究较为完善, 但是缺乏对 SFRC 的断裂损伤形态的研究, 而 SFRC 因其优异的抗拉性能常被用于工程结构的关键部位。在实际工程中, SFRC 的损伤特征具有隐蔽性, 且检测设备之间的技术壁垒导致 SFRC 的开裂损伤规律难以确定, 无法预测整体结构的安全性, 因此, 工程师们迫切寻求高精度的无损检测技术方法来判断混凝土的健康状态。部分学者们在混凝土损伤断裂力学研究领域采用三维技术(如: CT 技术、中子射线透照技术、全息干涉测量等)可以准确获取混凝土裂缝内部形态<sup>[4]</sup>, 但设备使用局限性大, 难以观察断裂材料的轮廓, 因此, 利用二维技术研究混凝土

土损伤更为简便有效。数字图像相关技术(DIC)是一种非接触式光学观测系统, 通过分析试件形变前后的图片来获取物体表面的位移和应变信息, 因其具有实时测量、非接触、全场性、精度高等特点, 被相关学者应用于断裂过程区(FPZ)等研究<sup>[5]</sup>。刘振威等<sup>[6]</sup>借助 DIC, 获取劈裂过程中的喷射混凝土衬砌表面裂纹特征, 实现了材料变形的精确测量, 为材料力学性能研究提供了直观的数据支持; Wu 等<sup>[7]</sup>通过对比 DIC、传统电测法和夹持引伸计测试方法验证了 DIC 的准确性, 并利用位移、应变云图获取裂缝口张开位移(CMOD)和裂尖张开位移(CTOD); 此外在纤维混凝土开裂性能研究领域, Lian 等<sup>[8]</sup>借助 DIC 探究了玄武岩纤维混凝土在不同荷载工况下的断裂性能及玄武岩纤维加固机理, 根据断裂应变云图演化规律发现玄武岩纤维的桥接效应表现在 90%的峰值应力之前。目前, 虽然 DIC 被广泛用于混凝土断裂研究, 但是仅停留在表面损伤检测, 而混凝土的断裂失效是一个复杂的过程, 因此有必要采用多分析仪器配合使用以提高检测的精度。

收稿日期: 2024-11-30。 修订日期: 2025-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079109, 52279139, 52009108)。

第一作者: 覃 源(1983—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-11-30. Revised date: 2025-02-10.

First author: QIN Yuan (1983—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: qinyuan@xaut.edu.cn

超声波技术(UT)作为一种无损声学检测技术,通过发射和接收特定的声学信号如:波速、幅值、频率等,来分析混凝土内部材料的健康状态,弥补了 DIC 只能观测表面损伤的不足。学者们对于 UT 在混凝土损伤领域开展大量基础性研究<sup>[9]</sup>。国内学者根据相关技术原理及大量工程数据总结并编撰了《混凝土无损检测技术手册》<sup>[10]</sup>。王怀亮等<sup>[11]</sup>基于超声波波速定义了损伤变量以评价混凝土加载过程中的损伤程度。高小宇等<sup>[12]</sup>利用超声技术对混凝土加载过程中裂纹扩展和性能退化进行了试验研究,发现超声波波幅衰减可以评估混凝土在加载过程中的损伤程度。Seher 等<sup>[13]</sup>研究了超声波波速值与裂缝深度两者的关联性。丁一宁等<sup>[14]</sup>验证了纤维混凝土裂缝扩展与超声波速规律变化的相关性,得出以超声波速定义的损伤变量有效反映评估混凝土内部微裂缝的扩展情况的结论。

以上研究表明, DIC 与 UT 同时具备良好的精度和裂缝检测能力,可相互配合使用<sup>[15]</sup>,但检测结果的互补性有待考证。因此,本工作在迸裂试验的同时利用 DIC 观测混凝土 FPZ 的裂缝应变演化与破坏模式,分析不同掺合料对混凝土衬砌开裂特征的影响;并结合超声波波速变化进行评价分析,获取混凝土裂缝演化过程的损伤水平;最后,基于能量演化原理,研究在迸裂破坏时不同配合比混凝土各阶段中的能量演化规律,归纳总结了不同掺合料对混凝土裂缝的抑制作用机理,验证了 DIC 与 UT 在断裂表征中具有强相关性和互补性。

## 1 实验

### 1.1 材料

钢纤维混凝土主要材料组成为:水泥、硅灰、

砂、石子、端钩型钢纤维、减水剂、速凝剂。水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;硅灰比表面积为  $15\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $\text{SiO}_2$  质量分数为 93.2%;细骨料为级配良好的中砂,细度模数为 2.65,表观密度为  $2\,670\text{ kg/m}^3$ ;粗骨料采用 5~10 mm 连续级配的人工碎石,表观密度为  $2\,740\text{ kg/m}^3$ ;端钩型钢纤维采用型号为 Dramix 65/35-BN,平均长度为 35 mm、直径为 0.75 mm、极限抗拉强度 $\geq 1\,000\text{ MPa}$ 、弹性模量为 200 GPa;外加剂采用 HPWSR 型聚羧酸系高性能减水剂,减水率 $\geq 25\%$ ;FSA-AF 型无碱速凝剂,掺入胶凝材料的 6%~9%,初凝时间 $\leq 3\text{ min}$ ,终凝时间 $\leq 10\text{ min}$ 。

### 1.2 制备

试件设计以钢纤维、硅灰掺量为控制变量,水胶比为 0.43,钢纤维质量掺量为 40、45、50  $\text{kg/m}^3$ ,矿物掺合料硅灰按照不同体积掺量(3%、6%、9%)等量取代水泥,命名方式如 StF40-SF3%,代表混凝土的钢纤维质量掺量为 40  $\text{kg/m}^3$ ,硅灰体积掺量为 3%。10 组混凝土试件采用湿喷制作和大板切割法,切割尺寸为:100 mm×100 mm×100 mm,配合比如表 1 所示。试件制备过程如下:

- 1) 对切割并养护完成的试件表面进行平整化处理,即用 10 目砂纸进行打磨并擦除表面浮尘。
- 2) 试件表面均匀喷涂一层哑光白漆,白漆不宜太厚,避免对混凝土裂缝扩展产生影响。
- 3) 静置 30 min 等待其干燥后,均匀点射喷制哑光黑漆,等待漆面风干即可开始试验。

### 1.3 方法

按照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13—2009)<sup>[16]</sup>,迸裂试验时使用电液伺服压力试验机(WAW-1000),控制参数采用最大试验荷载 1000 kN,应力控制加载速度为 0.04 MPa/s。在试件中心线位

表 1 混凝土配合比  
Table 1 Mix ratio of concrete samples

| Specimen   | Water-binder ratio | Volume mass/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |             |        |        |                  |       |               |
|------------|--------------------|-----------------------------------------------|-------------|--------|--------|------------------|-------|---------------|
|            |                    | Steel fiber                                   | Silica fume | Water  | Cement | Coarse aggregate | Sand  | Water reducer |
| StF40-SF3% | 0.43               | 40                                            | 12          | 169.42 | 388    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF40-SF6% | 0.43               | 40                                            | 24          | 169.42 | 376    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF40-SF9% | 0.43               | 40                                            | 36          | 169.42 | 364    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF45-SF3% | 0.43               | 45                                            | 12          | 169.42 | 388    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF45-SF6% | 0.43               | 45                                            | 24          | 169.42 | 376    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF45-SF9% | 0.43               | 45                                            | 36          | 169.42 | 364    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF50-SF3% | 0.43               | 50                                            | 12          | 169.42 | 388    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF50-SF6% | 0.43               | 50                                            | 24          | 169.42 | 376    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| StF50-SF9% | 0.43               | 50                                            | 36          | 169.42 | 364    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |
| DZ         | 0.43               | 0                                             | 0           | 169.42 | 400    | 873.6            | 806.4 | 2.58          |

置上下放置垫块与钢制垫条, 垫条尺寸 200 mm×5 mm×5 mm。DIC 系统采用新拓三维非接触式全程应变测量与仿真优化分析系统, 使用高速摄像机以 200 ms/张的连拍速度拍摄试件劈裂试验破坏过程, 分析计算试件位移场及应变场变化信息生成云图。在进行劈裂试验时采用海创多通道超声综合测试仪对测, 试验准备前在换能器上均匀涂抹耦合剂凡士林进行零声时矫正。试验之后, 对劈裂破坏断裂面采用数码电子显微镜(Supereyes)放大 50 倍分析。

#### 1.4 能量演化原理

在荷载作用下的混凝土, 岩石等弹塑性材料的变形破坏过程就是材料内部能量演化并与外界进行能量交换的过程, 涉及的能量有弹性应变能、耗散能、损伤能等<sup>[17]</sup>, 其中也包括促使裂缝发展的能量耗散过程, 当混凝土吸收外界能量到达极限时, 储存在内部的能量便会迅速释放, 造成试件破坏<sup>[18]</sup>, 能量转化模型如图 1 所示:

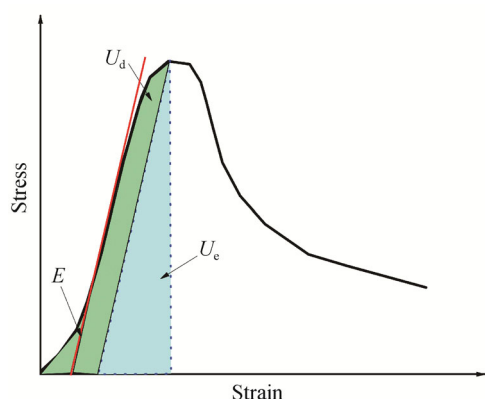


图 1 能量转化模型

Fig. 1 Energy transition model

因此 SFRC 试件在荷载作用下的主要能量转化关系为<sup>[19]</sup>:

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

式中:  $U$  为外界荷载输入的单位总应变能, MPa;  $U_e$  为储存在 SFRC 试件内的单位体积弹性应变能,  $\text{kJ/m}^3$ ;  $U_d$  为 SFRC 试件的损伤发展产生的单位体积耗散能,  $\text{kJ/m}^3$ 。

根据应力-应变关系, 单位体积的 SFRC 试件的外界输入总应变能为:

$$U = \int \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为 SFRC 试件的轴向应力, MPa;  $\varepsilon$  为 SFRC 试件的轴向应变。

因此 SFRC 试件的单位体积弹性应变能和单位体积耗散能分别为:

$$U_e = \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (3)$$

$$U_d = U - U_e = \int \sigma d\varepsilon - \frac{\sigma^2}{2E_0} \quad (4)$$

式中:  $E_0$  为 SFRC 试件的初始弹性模量, MPa。

#### 1.5 超声波声学损伤变量的定义

混凝土破裂演化过程就是试件内部裂缝从萌生、扩展、成核直至产生宏观裂缝的损伤发育过程<sup>[20]</sup>, 当超声波穿过混凝土时, 初始波速  $V_0$  与材料密度  $\rho$ 、弹性模量  $E_0$  以及泊松比  $\nu$  存在如下的关系<sup>[21]</sup>:

$$V_0^2 = \frac{E_0}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

如忽略在试件加载过程中荷载对试件材料密度  $\rho$  和泊松比  $\nu$  的影响, 则有:

$$V_t^2 = \frac{E_t}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

式中:  $V_t$  为不同荷载水平下的波速;  $E_t$  为不同荷载水平  $t$  下的有效动弹性模量, 即可利用超声波声速表征损伤变量:

$$D_d = 1 - \frac{V_t^2}{V_0^2} \quad (7)$$

式中:  $V_0$  和  $V_t$  分别为初始和不同应力水平  $t$  下的超声波声速, 通过  $D_d$  对超声波波速进行分析, 混凝土试件的初始状态为  $D_0$ ,  $D_d$  值越小, 表明试件越密实, 外荷载对试件的破坏程度越小 ( $0 \leq D_d \leq 1$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 断裂面微观结构

试样劈裂失效后选取含裂缝的块状试样, 利用电子显微镜对断裂面进行微观观测, 观察基质、骨料、和钢纤维失效形式, 观测结果如图 2 所示。劈裂破坏断面部分区域形成钢纤维集中且呈簇状分布 (见图 2a), 当混凝土中掺入不合理数量的钢纤维, 就会形成这种纤维分布现象, 此时钢纤维与基体难以紧密黏结, 容易形成空隙, 造成纤维锚固效果以及纤维-基体界面黏结区强度下降; 钢纤维表面附着水化产物 (见图 2b), 说明基体与纤维间形成了稳定黏结的微观结构, 保证了纤维对基体裂缝的有效约束<sup>[22]</sup>; 钢纤维脱黏、滑移形成纤维剥离区 (见图 2c), 在钢纤维脱离基体的过程中消耗大量能量, 抑制裂缝的进一步扩展; 钢纤维在基体内随机、均匀分布形成交错的网状结构, 部分钢纤维出现轻微颈缩现象 (见图 2d), 在荷载作用下部分, 可以充分缓冲分散应力集中的情况, 有效防止基体变形。

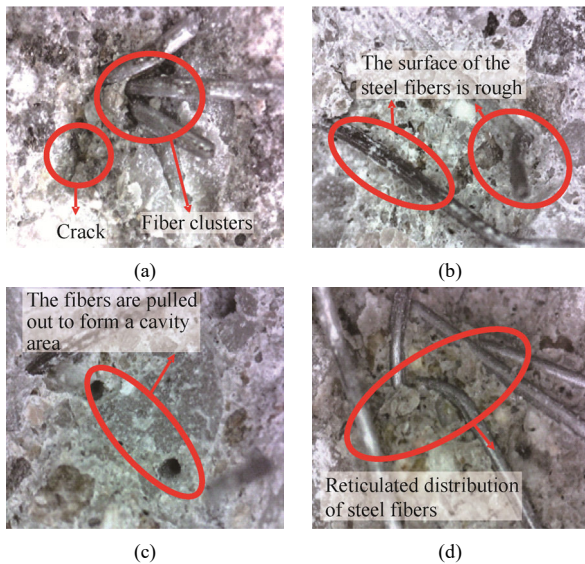


图2 SFRC 断裂面纤维微观结构

Fig. 2 Mesostructure of steel fiber on SFRC fracture surface

断裂面骨料基质微观结构如图3所示,在胶凝材料基体中常存在孔隙与微裂纹等薄弱区,裂缝的扩展首先从这些薄弱区开始,承受荷载时,在这些区域易于形成应力集中。当骨料-水泥界面过渡区(ITZ)黏结强度未能达到荷载要求时,粗骨料在剪应力作用下就会被剥离出基体(见图3a),粗骨料脱落后不再参与抵抗外部荷载,因此极大地影响了材料整体强度;反之,当ITZ密实,粗骨料在受到剪应力下形成平整断面(见图3b),此时,粗骨料与胶凝材料基体共同承担荷载,其强度远高于胶凝材料基体本身,对混凝土的阻裂性能有积极作用;StF50-SF9%基体在断裂时断面间细骨料相互摩擦,导致细骨料脱离(见图3c),该微观结构相对疏松易出

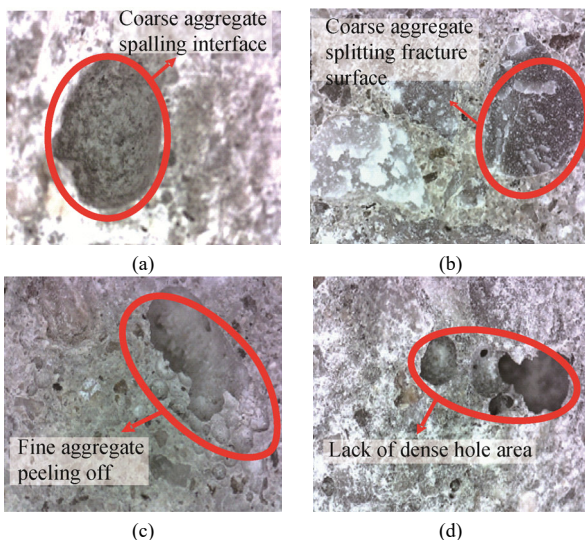


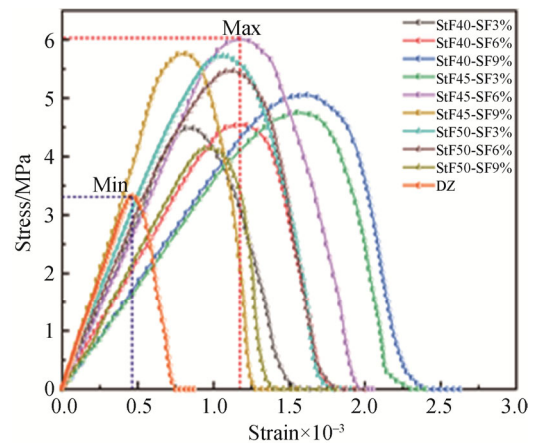
图3 断裂面骨料基质微观结构

Fig. 3 Mesostructure of aggregate matrix on fracture surface

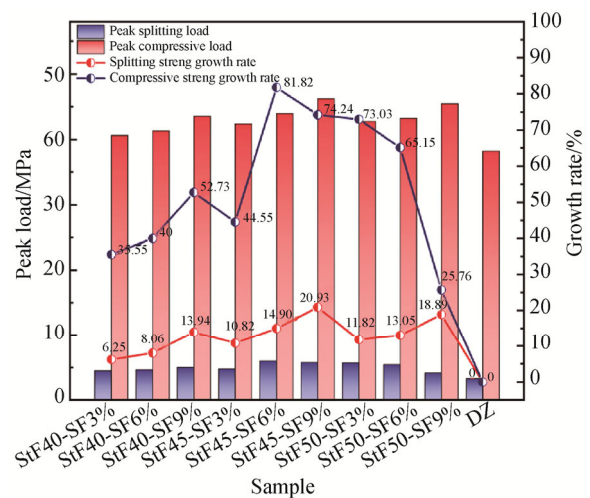
现孔隙,是荷载作用下形成内部微裂缝和初始损伤的原因之一;基体形成联通的孔隙结构(见图3d),当水胶比不变,过量的微集料硅灰掺入造成混凝土流动性降低,硅灰在浆体中发生团聚现象,导致孔隙和裂缝增加,对强度的提升效果产生负面影响<sup>[23]</sup>。

## 2.2 应力-应变与劈裂峰值应力

图4a为试验试件的应力-应变曲线,统计分析发现掺入钢纤维脆性有明显改善,SFRC峰后曲线下下降段斜率相较于DZ较为平缓。试件的峰值应力如图4b所示,SFRC的劈裂强度和抗压强度均高于DZ,分别较DZ提升25.76%~81.82%与6.25%~20.93%,两者对比发现,钢纤维对劈裂强度有明显增强作用。分析发现钢纤维掺量为40 kg/m<sup>3</sup>,硅灰体积掺量为3%、6%、9%,硅灰掺量与劈裂强度和抗压都呈正相关;钢纤维掺量为45 kg/m<sup>3</sup>时,随着硅灰掺量由3%增加至9%,与抗压强度仍然呈现正相关,而峰值劈裂强度较DZ提升率先上升



(a) Stress-strain curves



(b) Splitting and compressive peak load

图4 试件劈裂应力-应变曲线与峰值应力

Fig. 4 Splitting stress-strain curve and peak stress of specimens

后下降;当钢纤维掺量为  $50 \text{ kg/m}^3$ , 硅灰掺量为 3%、6%、9% 时, 较 DZ 组的峰值劈裂应力分别提升 73.03%、65.15%、25.76%, 该钢纤维掺量下硅灰的增加会导致劈裂强度提升效果的劣化。相同硅灰掺量下, 钢纤维掺量为  $45 \text{ kg/m}^3$  时, 对劈裂强度和抗压强度的平均提升率最大, StF45-SF6% 劈裂强度最优, 即该掺量下钢纤维与硅灰黏结协同作用效果好。分析原因, 在  $45 \text{ kg/m}^3$  时钢纤维均匀分散, 早期水泥和硅灰的水化反应中, 硅灰的促水化作用使得更多的水化产物包裹在钢纤维表面, 提高了纤维-基体界面强度使得桥接作用增强, 使得混凝土内部裂而不散, 从而促进了力学性能的提升; 当钢纤维掺量为  $50 \text{ kg/m}^3$  时, Yang 等<sup>[24]</sup>认为增加纤维的掺入可能导致基体密实度降低, 从而对强度的发展产生不利影响, 硅灰体积掺量的增加造成混凝土流动性变差, 更加剧了纤维团聚效应及弱界面的形成, 提高了能量输入时产生黏脱裂纹的概率, 削弱了综合力学性能。

### 3 基于 DIC 的裂缝扩展规律

#### 3.1 混凝土裂缝扩展阶段划分模型及观测方法

据现有研究提出的 4 阶段裂缝断裂模型概念, 将断裂过程分为: 线弹性阶段、微裂缝扩展阶段、宏观裂缝扩展阶段以及完全断裂阶段 4 个阶段<sup>[25]</sup>, 明确了宏观裂缝扩展起裂时刻的重要性, 因此本试验依托 DIC 研究 SFRC 裂缝扩展的 4 个阶段, 并提取 4 个阶段中的特征应力点进行划分研究, 划分模型如图 5 所示。

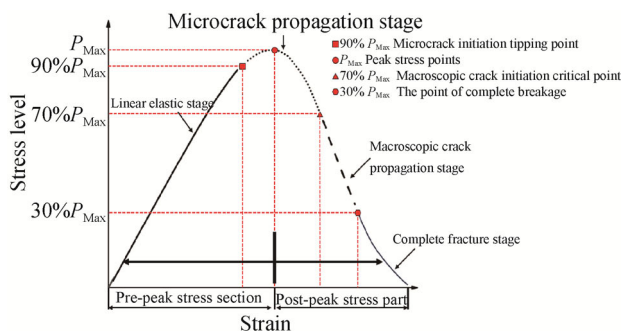


图 5 裂缝扩展阶段划分模型

Fig. 5 Fracture propagation stage division model

采用 DIC 对试件劈裂过程进行观测和处理, 并获取断裂全过程的水平位移及应变云图。在混凝土试件上选取适当的观测区, 以试件中心作为原点创建坐标系, 平行于  $x$  轴布置虚拟引伸计, 沿虚拟引

伸计从最左端到最右端均匀分布若干位移监测点, 当试件产生裂缝时, 位移监测点在坐标轴上移动, 提取相邻监测点坐标变化参数, 以此获取准确的裂缝扩展数据<sup>[26]</sup>, 图 6 为试件观测区及 5 条引伸计具体位置。

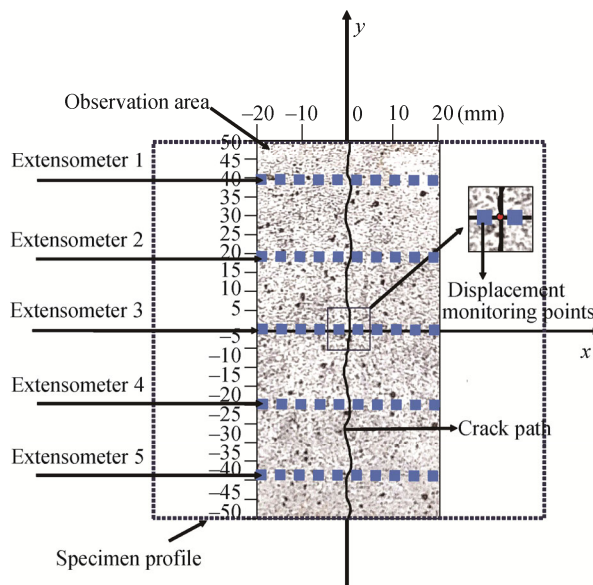


图 6 断裂观察区引伸计布置

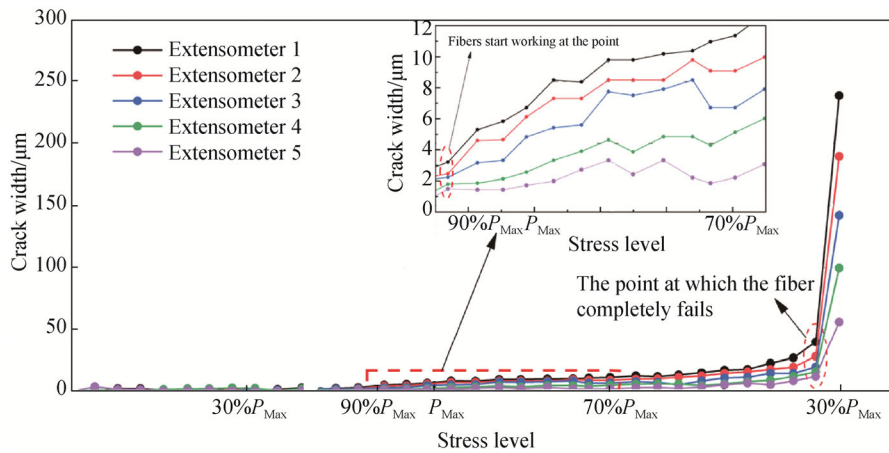
Fig. 6 Arrangement of extensometers in fracture observation area

#### 3.2 SFRC 裂缝扩展特性

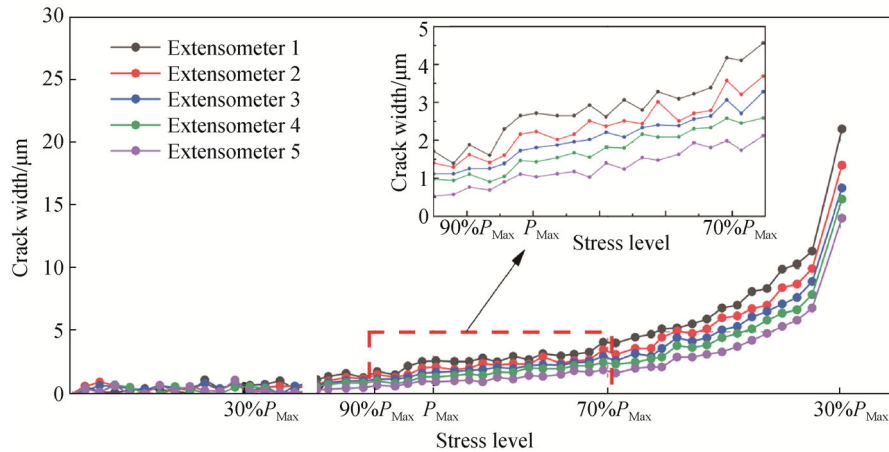
按照上述划分模型及测试方法, 可以获得试件在任意应力水平下的裂缝横向扩展情况。采用 StF40-SF3% 的 SFRC 与 DZ 在不同应力水平下各引伸计测得的裂缝横向扩展情况如图 7a 和图 7b 所示。对 4 阶段特征应力进行分析, 可以发现 DZ 与 SFRC 裂缝扩展规律有所不同。在加载初期, 试件裂缝扩展较为缓慢, 基本处于为零状态, 应力未达到  $90\%P_{\text{Max}}$  时, SFRC 曲线基本不发生畸变, 布置在不同高度的虚拟引伸计测得的裂缝扩展数据集中, DZ 裂缝宽度波动幅度较小; 随着应力的不断增大, 在接近  $P_{\text{Max}}$  时, SFRC 裂缝横向扩展速率提升, 各引伸计离散性增大, 裂缝宽度小于  $50 \mu\text{m}$ , 不同高度的虚拟引伸计数值响应有所延缓, 钢纤维由于弹性模量高变形能力较弱, 发挥微加筋作用<sup>[27]</sup>。DZ 断裂时各引伸计数值集中, 表明裂缝贯通顺利; 应力达到峰后阶段, SFRC 裂缝扩展速率明显减缓, 因此可以确定钢纤维对水泥基体的补强作用主要表现在  $90\%P_{\text{Max}}$  之前, 故将裂缝迅速扩展之前位置定义为钢纤维开始工作点; 当应力处于卸荷阶段, 在达到  $30\%P_{\text{Max}}$  之

前, SFRC 在纤维失效后裂缝扩展速率较为稳定, 而 DZ 则不断横向扩展; 当应力到达  $30\%P_{\text{Max}}$  后, 在接近完全断裂前, SFRC 和 DZ 引伸计测量值突

增, 裂缝转变为清晰的宏观裂缝, 故以突变位置定义为钢纤维失效点, DZ 则为脆性完全断裂点, 此时裂缝贯通材料失效。



(a) Crack opening width of SFRC in different load stages



(b) Crack opening width of DZ in different load stages

图 7 SFRC 与 DZ 裂缝横向扩展变化过程

Fig. 7 Transverse propagation process of SFRC and DZ cracks

### 3.3 CMOD 与 CTOD 各应力阶段应变场规律

采用文献[28–29]位移等值线的分析方法, 通过应变云图及  $x$  方向上的位移云图将底端裂缝开口位置定义为 CMOD, 裂缝尖端位置定义为 CTOD。如图 8 所示, 显示了 StF40-SF3% 试件达到破坏标准( $70\%P_{\text{Max}}$ ) 的位移等值线。原点设置在初始裂缝的底端,  $x$  轴、 $y$  轴分别垂直于和平行于初始裂缝平面。由图 8b、图 8c 分别为 CMOD 和 CTOD 的位移等值线图, 当  $y=0$  mm 时, CMOD 为  $239\text{ }\mu\text{m}$ , 当  $y=97.52$  mm 时, CTOD 为  $42.5\text{ }\mu\text{m}$ 。混凝土在宏观裂缝的尖端通常会有一个微观损伤区, 该区域难以观测, 但可以借助 DIC 对比形变前后散斑点位移场、应变场云图的变化来识别并计算。根据演化云图发现, 混凝

土的断裂过程非常复杂, 裂缝往往产生在应力集中的区域<sup>[29]</sup>, 因此裂缝的扩展程度可以间接反映混凝土的损伤程度。

图 9 为不同应力工况下 SFRC 与 DZ 的应变等值线云图<sup>[30]</sup>。由图 9a 可以发现 SFRC 在  $30\%P_{\text{Max}}$  处于线弹性阶段, 虽然试件表面无裂缝且无明显的应力集中现象, 但是随着外界能量的输入却产生明显的应变场波动; 应力水平从  $90\%P_{\text{Max}}$  到  $70\%P_{\text{Max}}$  的过程中, SFRC 达到强度极限后进入卸荷阶段, CMOD 从  $5.3\text{ }\mu\text{m}$  增长至  $11.4\text{ }\mu\text{m}$ , CTOD 从  $1.4\text{ }\mu\text{m}$  增长至  $2.3\text{ }\mu\text{m}$ , 裂缝高度( $L$ )在该区间内发展迅速由  $23.12\text{ mm}$  增长至  $96.06\text{ mm}$ , 表明该阶段内裂缝横向发育稳定但是竖向发育迅速, 此时钢纤维发挥桥

接作用, 且钢纤维受环向拉应力导致表面水化产物产生不同程度的黏脱裂纹并逐渐疏松;  $30\%P_{\text{Max}}$  时, CMOD 为  $256.2\ \mu\text{m}$ , CTOD 为  $42.5\ \mu\text{m}$  横向裂缝扩展迅速, 宏观裂缝形成, 而  $L$  从  $96.06\ \text{mm}$  增至  $97.52\ \text{mm}$  时不再竖向向上延伸, 钢纤维失去承载能力。图 9b 为 DZ 各应力阶段应变场, 当应力水平处于  $90\%P_{\text{Max}}$  前, DZ 与 SFRC 应变场及裂缝扩展参数基本一致, 表明在峰前的线弹性阶段, 主要参与

阻裂作用为胶凝材料基体的黏结性; 当应力水平由  $90\%P_{\text{Max}}$  到  $P_{\text{Max}}$  时, 裂缝延伸速率增大,  $L$  从  $26.46\ \text{mm}$  增长至  $66.47\ \text{mm}$  且 CMOD 由  $2.2\ \mu\text{m}$  扩展至  $11.4\ \mu\text{m}$ , 同水平下 SFRC 明显增长; 当处于峰后卸载阶段  $70\%P_{\text{Max}}$  时, 裂缝贯穿 DZ, CMOD 与 CTOD 接近峰值, 因此, 通过对以上应变场演化特征和裂缝参数的对比, 较为充分地表明 SFRC 在应力峰后阶段具有较强的裂后承载能力。

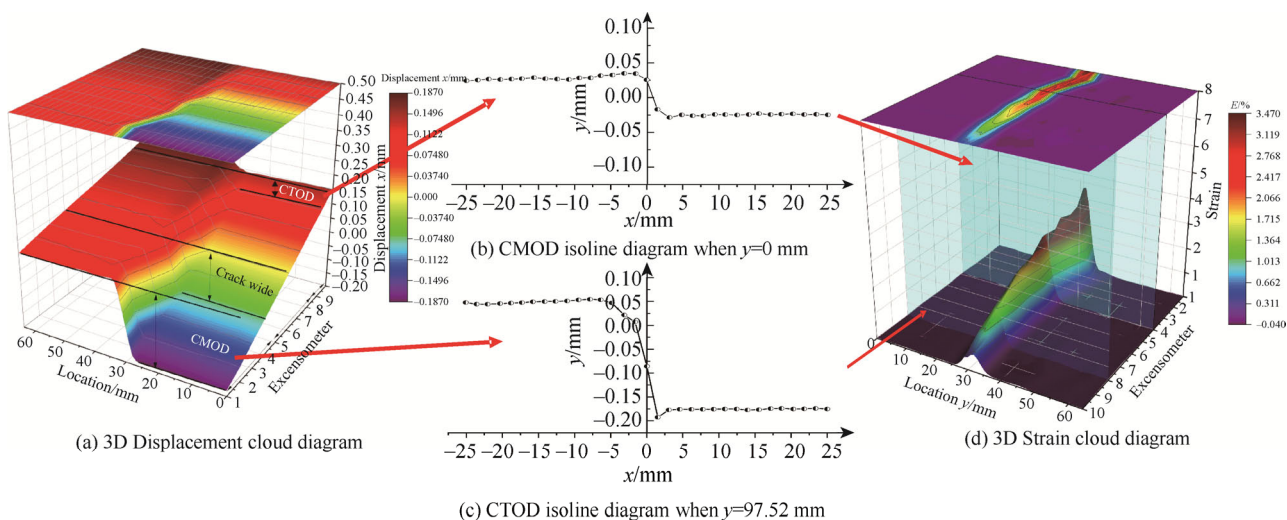


图 8 StF40-SF3% 的 CMOD 与 CTOD 计算模型  
Fig. 8 CMOD and CTOD calculation model of StF40-SF3%

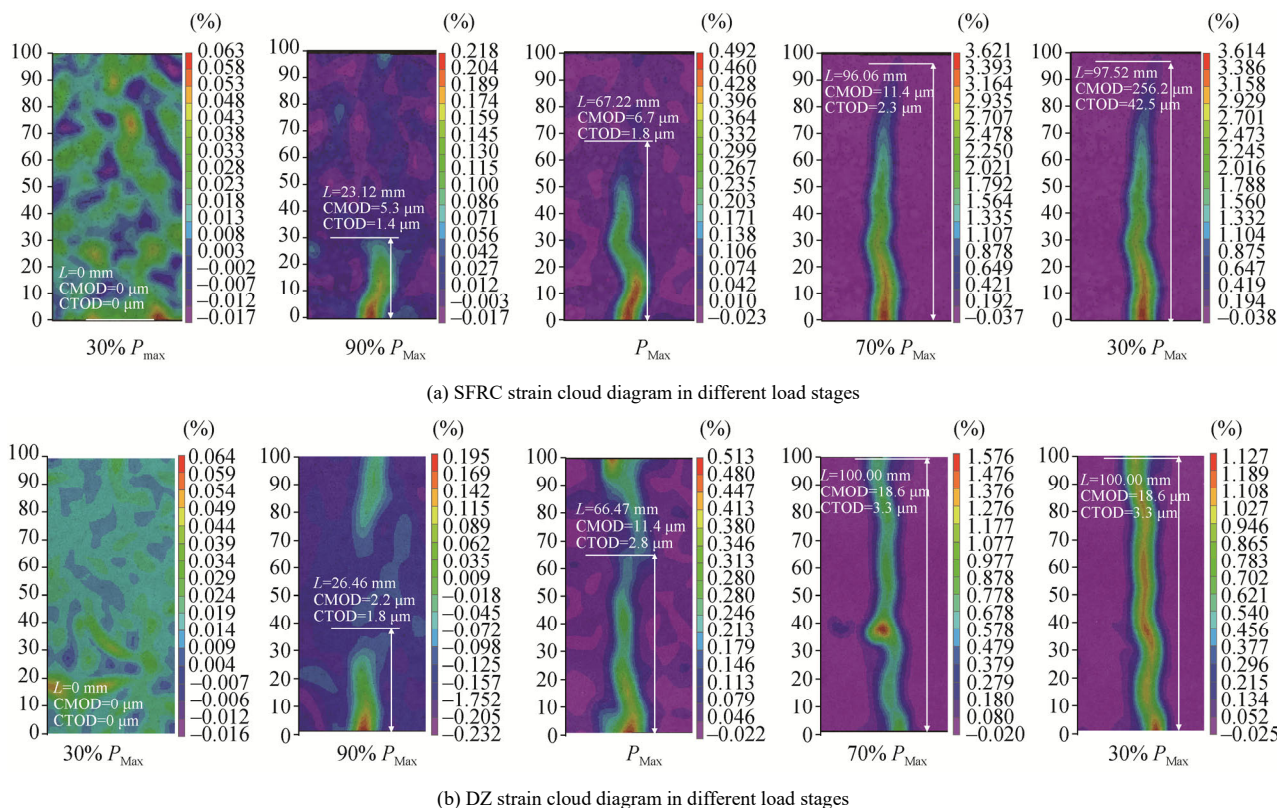


图 9 不同荷载阶段的 SFRC 与 DZ 试件应变云图<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Strain nephograms of SFRC and DZ specimens at different load stages<sup>[30]</sup>

### 3.4 峰后应力裂缝扩展状态

峰值应力后的  $P/P_{\text{Max}}-\omega_{\text{CMOD}}$  曲线如图 10a 所示, 对比发现:  $P/P_{\text{Max}} < 0.3$  时各 SFRC 应力下降速率产生明显区别, SFRC 的劈裂强度随钢纤维掺量的增加而提升, 在相同钢纤维掺量下硅灰掺量的增加对钢纤维的阻裂效果产生了不同影响,  $P/P_{\text{Max}} > 0.6$  时硅灰掺量对钢纤维阻裂作用影响不明显;  $P/P_{\text{Max}} < 0.6$  时各配合比曲线分化较大, 钢纤维掺量为  $40 \text{ kg/m}^3$  时, 硅灰掺量与阻裂效果呈正相关; 在钢纤维掺量为  $45$ 、 $50 \text{ kg/m}^3$  时, 硅灰体积掺量为  $6\%$  时,  $P/P_{\text{Max}}-\omega_{\text{CMOD}}$  曲线下下降斜率较小, 表现出良好的塑性特征。当  $P/P_{\text{Max}} < 0.3$  时, DZ 丧失结构承载力, DZ 峰值应力后  $\omega_{\text{CMOD}}$  荷载下降速率迅速, 短时间内断裂失效, 符合脆性断裂特征; SFRC 随  $\omega_{\text{CMOD}}$  的增大, 下降速率明显

小于 DZ, 特别是 StF45-SF6% 组曲线下下降时, 斜率远小于其他组, 图中红色方框内为钢纤维完全失效位置。

各配合比试件的裂缝开口位移峰值 ( $\text{CMOD}_c$ ) 与裂缝尖端张口位移峰值 ( $\text{CTOD}_c$ ) 如图 10b 所示, DZ 的  $\text{CMOD}_c$  为  $25.1 \mu\text{m}$ , 而 SFRC 的  $\text{CMOD}_c$  为  $643.8 \mu\text{m}$ , 远大于 DZ 的  $\text{CMOD}_c$ , 说明钢纤维可以有效阻止混凝土开裂, 即在相同的破坏标准下劈裂强度越大的钢纤维能够承接更大的裂缝开口位移; 各组  $\text{CTOD}_c$  离散性小, 相同钢纤维掺量条件下 SFRC 的  $\text{CTOD}_c$  随硅灰掺量的增加而降低, 说明硅灰提供水泥基体额外的黏结力, 对于微裂缝裂缝尖端的扩展具有抑制作用, 开裂的产生往往是在微裂缝的基础上, 在裂缝尖端形成应力集中不断扩展最终形成宏观裂缝。

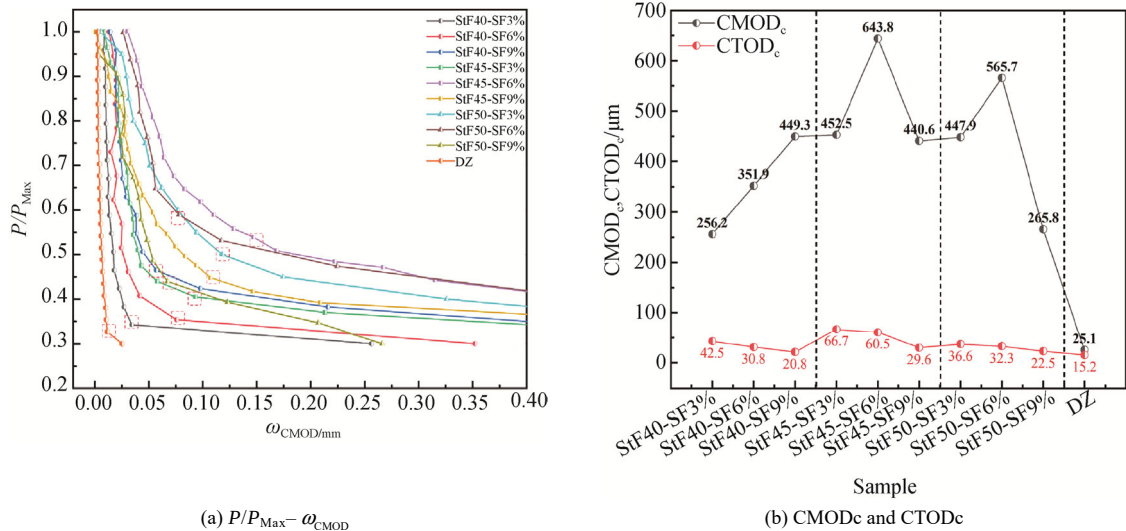


图 10  $\text{CMOD}_c$  和  $\text{CTOD}_c$  发展趋势  
Fig. 10  $\text{CMOD}_c$  and  $\text{CTOD}_c$  development trends

### 3.5 劈裂裂缝轨迹与曲折度计算

混凝土曲折度计算方法如图 11 所示:

$$L_0 = n\delta \quad (8)$$

$$L_t = \sum_{i=1}^n \sqrt{[z(i) - z(i-1)]^2 + \delta^2} \quad (9)$$

式中:  $z(i)$  和  $z(i-1)$  分别为  $i$ 、 $i-1$  点所对应的高度值;  $\delta$  为单元尺寸;  $n$  为单元划分个数; 裂缝曲折度为  $\tau = L_t / L_0$  ( $L_0 = 100 \text{ mm}$ )。

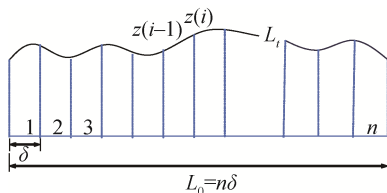


图 11 混凝土曲折度计算方法  
Fig. 11 Calculation method of concrete tortuosity

SFRC 试件的断裂区和位移场的组合图如图 12 所示, 对比试件断裂区和位移场裂缝轨迹发现, 裂缝的扩展路径与位移场的变化模式高度一致, 这进一步验证了 DIC 研究裂缝的适用性, 同时在断裂过程中发现裂缝的延伸具有一定的曲折性, 这是由钢纤维的桥接作用或分布的各项异性等因素导致, 因此为清晰地观察裂缝扩展轨迹, 采用优选的断裂面图像进行双边滤波、自适应 Binarize 处理后得到 Binarize 图像, 并利用 Sobel operator 与闭运算对图像进行计算<sup>[31]</sup>, 基于像素欧式距离得到试件裂缝的真实轨迹长度  $L_t$ , 并通过裂缝曲折度  $\tau$  来分析不同配合比对裂缝轨迹的影响。

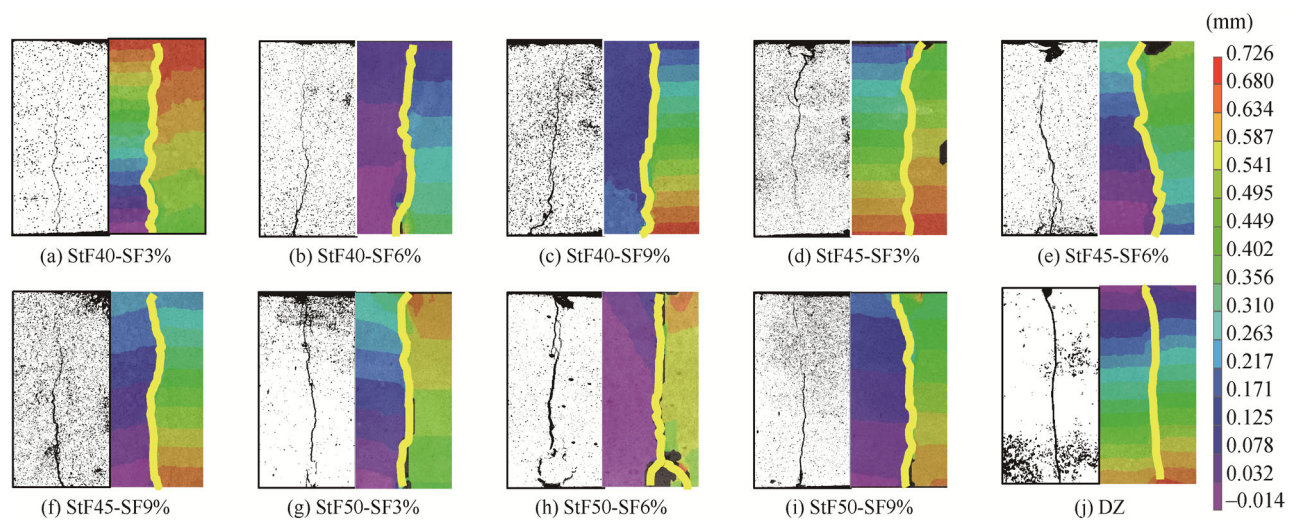


图 12 混凝土断裂区二值化与位移云图

Fig. 12 Binarization and displacement cloud diagrams of concrete fracture zone

通过以上方式计算得不同配合比下 SFRC 裂缝曲折度, 计算结果如表 2 所示。StF40-SF3%、StF40-SF6%、StF40-SF9%相较于 DZ 曲折度分别提高 5.56%、9.27%、13.95%; StF45-SF3%、StF45-SF6%、StF45-SF9%相较于 DZ 曲折度分别提高 15.8%、22.05%、16.49%; StF50-SF3%、StF50-SF6%、StF50-SF9%相较于 DZ 曲折度分别提高 5.95%、15.8%、1.56%。研究表明, 试件的劈裂强度与曲折度有着较高的相关性, 曲折度越大, 表明试件中存在更多对裂缝的桥接机制, 因此, 曲折度是该纤维在水泥基体中分散性的间接度量。在钢纤维掺量为 40 kg/m<sup>3</sup> 时, 曲折度与硅灰掺量呈现正相关, 钢纤维 45 kg/m<sup>3</sup> 和 50 kg/m<sup>3</sup> 时, 硅灰掺量为 3%、6%、9%, 曲折度表现出先增大后减小的趋势; 硅灰掺量为 6% 时, 表现出良好的黏结性能; 同时适量的钢纤维掺量会降低外荷载作用下的拔出效率,

并在断裂过程中吸收更多的能量。对比发现钢纤维掺量为 45 kg/m<sup>3</sup> 时混凝土韧性显著提高, 曲折度最大; 钢纤维掺量为 50 kg/m<sup>3</sup> 时, 平均提升不明显且 StF50-SF9% 曲折度更接近于 DZ, 此时钢纤维掺量过大易造成钢纤维团聚的现象, 阻裂效果不理想。

#### 4 劈裂破坏下 SFRC 超声波波速变化规律

不同配合比下试件的超声波波速随应变的变化规律如图 13 所示。研究发现 SFRC 变形协调性良好, 在断裂过程中超声波速呈现明显的分级阶梯式衰减, 过程如图 14 所示。在 A~B 阶段, 各配合比的混凝土初始波速集中在 4.25~4.75 km/s, 离散性小, 表明制样均匀, 加载初期混凝土不断吸收外界能量, 但试件无明显的损伤, 积累的能量不足以使混凝土发

表 2 各组试件真实裂缝长度及曲折度

Table 2 True crack length and tortuosity of each group of specimen

| Specimen   | Length $L_0$ /mm | Length $L_t$ /mm | $t$   |
|------------|------------------|------------------|-------|
| StF40-SF3% | 100              | 108.20           | 1.082 |
| StF40-SF6% | 100              | 112.00           | 1.120 |
| StF40-SF9% | 100              | 116.81           | 1.168 |
| StF45-SF3% | 100              | 118.71           | 1.187 |
| StF45-SF6% | 100              | 125.06           | 1.251 |
| StF45-SF9% | 100              | 119.35           | 1.194 |
| StF50-SF3% | 100              | 108.59           | 1.086 |
| StF50-SF6% | 100              | 118.69           | 1.187 |
| StF50-SF9% | 100              | 104.06           | 1.041 |
| DZ         | 100              | 102.45           | 1.025 |

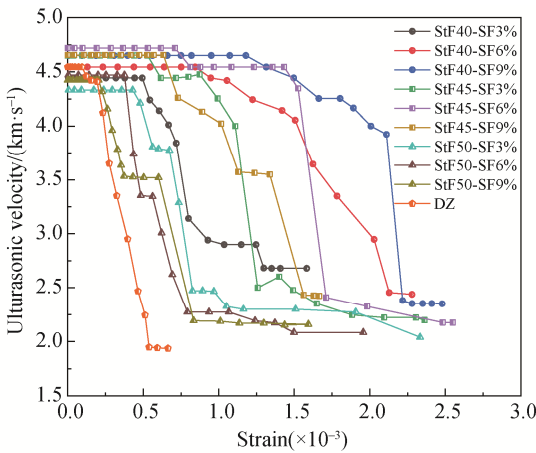


图 13 不同应变水平下的超声波波速变化

Fig. 13 Ultrasonic wave velocity variation at different strain levels

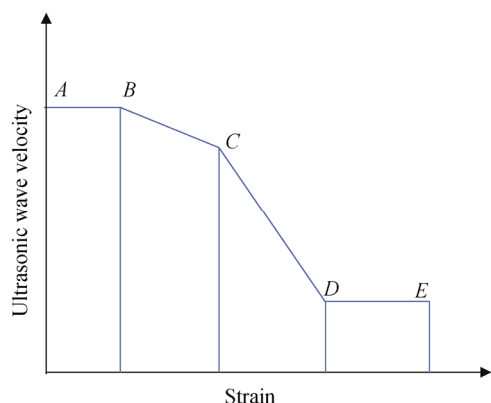


图 14 SFRC 应变-波速模型

Fig. 14 Strain-ultrasonic velocity model of SFRC

生破坏, 故处于无损伤阶段; 基于混凝土抗压不抗拉的特性, 在  $B \sim C$  段混凝土内部产生微裂缝, 随着外荷载的输入应变不断增大波速开始减小; 在  $C \sim D$  阶段, 随着应变的不断增大, 混凝土内部的微裂缝

增多并不断扩展, 导致此时超声波波速曲线斜率明显增大, 即波速突然降低, 该点出现在 SFRC 的峰后阶段, 此时测试路径上产生宏观裂缝; 在  $D \sim E$  阶段, 钢纤维退出工作, 波速再次稳定, 而 DZ 波速衰减斜率最大, 降幅为 57.36%, 高于各 SFRC。

## 5 基于能量演化的 SFRC 劈裂裂缝损伤规律

在混凝土开裂过程中, 耗散能的演变与混凝土的开裂行为密切相关, 能够反映混凝土从开始加载到最终破坏过程中能量的不可逆损失<sup>[32]</sup>, 因此从能量耗散角度阐述裂缝的扩展过程完全具备理论依据。同时, 在加载过程中, 损伤的直接表征为混凝土表面的开裂, 间接表征为超声波波速的影响, 试件在不同应力阶段的能量转化过程及各表征变化规律如图 15 所示。

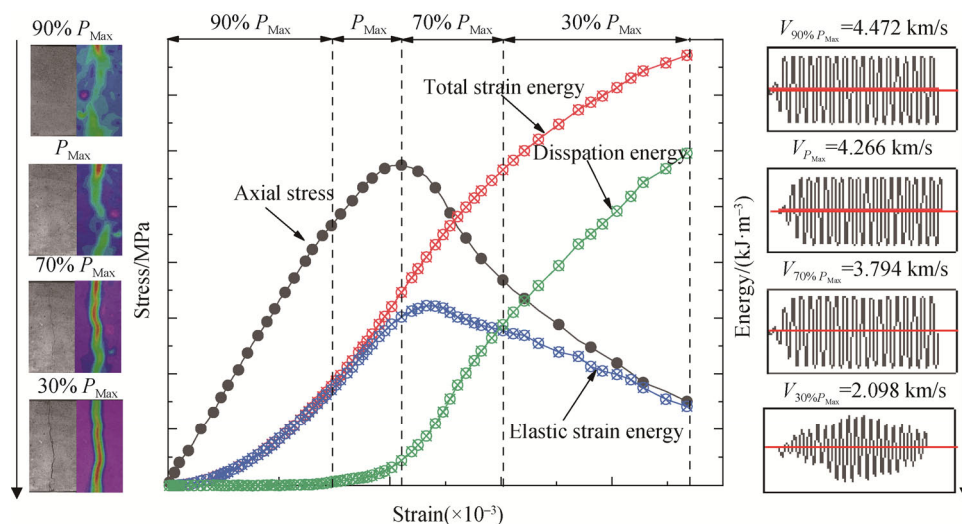


图 15 裂缝扩展过程中的声-光-能量联合表征模型

Fig. 15 Ultrasonic-light-energy joint characterization model in crack propagation process

在  $90\%P_{\text{Max}}$  阶段, 随着外界能量的不断输入, 试件对能量的吸收能力先强后弱, 总能量不断升高, 转化为储存在试件内部的弹性应变能, 试件表面发生微小损伤但仍在试件承载范围内, 超声波波形良好且超声波速为 4.472 km/s; 在  $P_{\text{Max}}$  时达到开裂条件后弹性应变能增速减缓, 此时能量由储存在混凝土中的弹性应变能转化为裂缝扩展的耗散能, 试件微裂缝的产生造成首波波幅降低, 波速衰减至 4.266 km/s, 波形整体均匀稳定; 在  $70\%P_{\text{Max}}$  时表观微裂缝发育完全开始向宏观裂缝转变, 试件承载能力下降, 总能量曲线斜率减缓, 弹性应变能到达峰值后开始降低, 耗散能曲线斜率迅速增大, 首波幅

值降低波速降低至 3.794 km/s, 波形发生畸变; 在  $30\%P_{\text{Max}}$  时耗散能在总能量中占比最高, 宏观裂缝贯穿试件, 波速降至最低(2.098 km/s)且再次达到稳定, 波形包络线呈纺锤状并在首末段发生明显畸变, 故判断试件达到破坏标准。结果显示, 声学参数、断裂应变云图与能量演化过程具有较强的相关性。

各试件能量演化规律及超声波速损伤变量曲线如图 16 所示。DZ 耗散能明显小于 SFRC, 钢纤维掺量为 40、45、50 kg/m<sup>3</sup> 时, 耗散能较 DZ 最高分别提升 5.57、5.75、4.63 kJ/m<sup>3</sup>。钢纤维掺量为 45 kg/m<sup>3</sup> 时, 对混凝土在裂缝扩展过程中能量耗散最多, 此外在不同钢纤维掺量中, StF45-SF6%较 StF45-SF3%与

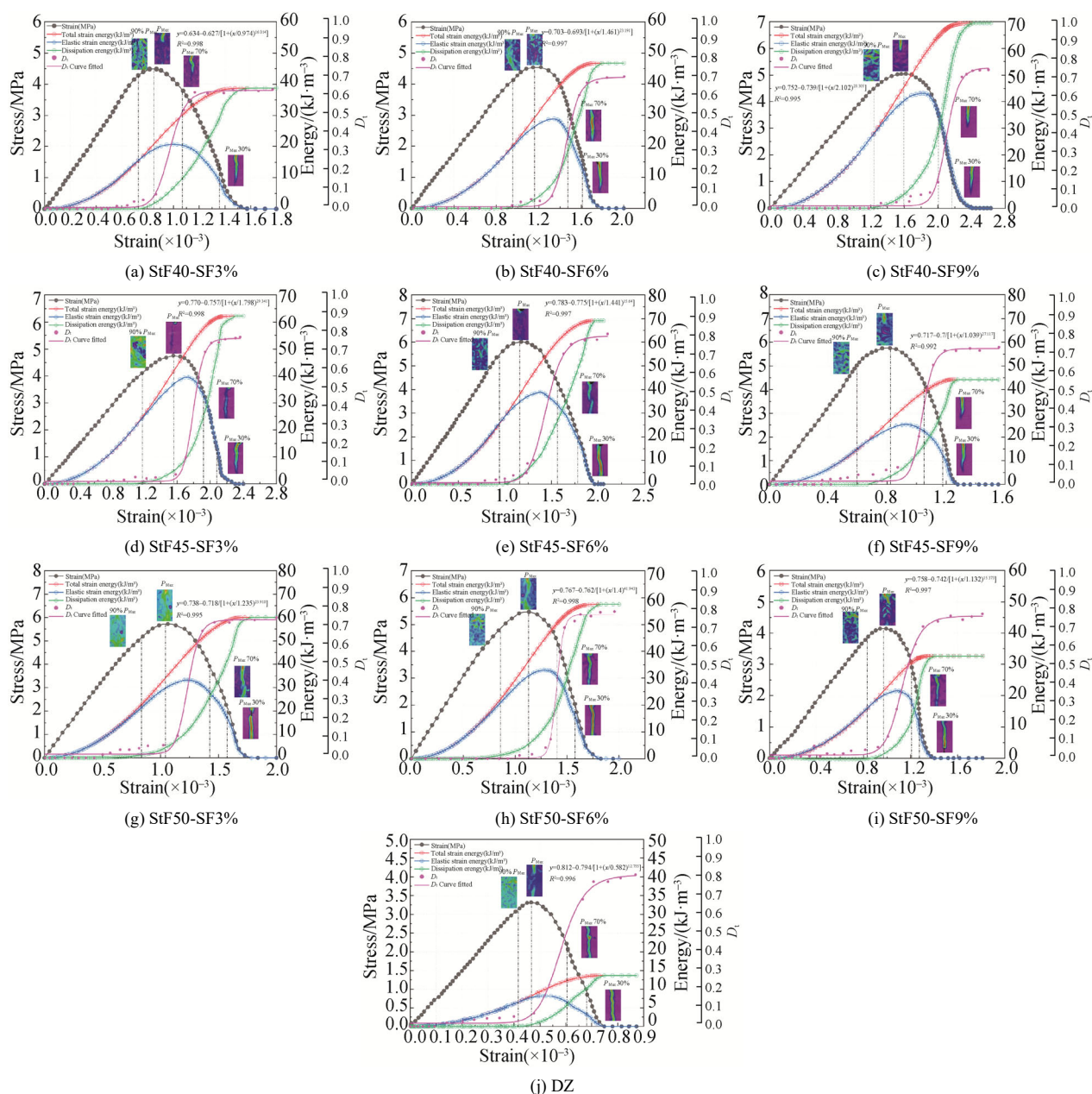


图 16 裂缝扩展过程中的声光能量联合演化规律

Fig. 16 Joint evolution of sound-light-energy during fracture propagation

表 3 试件断裂能量水平及声学损伤

Table 3 Fracture energy level and acoustic damage of specimens

| Specimen   | $U$ /<br>( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $U_e^a$ /<br>( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $U_e^b$ /<br>( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $K_d$ | $D_d$ |
|------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------|
| StF40-SF3% | 3.88                                         | 1.95                                             | 0.87                                             | 0.45  | 0.63  |
| StF40-SF6% | 4.67                                         | 2.60                                             | 1.35                                             | 0.52  | 0.71  |
| StF40-SF9% | 6.94                                         | 3.94                                             | 2.11                                             | 0.54  | 0.74  |
| StF45-SF3% | 6.22                                         | 3.69                                             | 2.05                                             | 0.56  | 0.74  |
| StF45-SF6% | 7.02                                         | 3.53                                             | 2.15                                             | 0.61  | 0.80  |
| StF45-SF9% | 4.42                                         | 2.36                                             | 1.21                                             | 0.51  | 0.73  |
| StF50-SF3% | 6.00                                         | 2.91                                             | 1.66                                             | 0.57  | 0.78  |
| StF50-SF6% | 5.75                                         | 3.10                                             | 1.61                                             | 0.52  | 0.78  |
| StF50-SF9% | 1.22                                         | 1.95                                             | 1.04                                             | 0.53  | 0.77  |
| DZ         | 1.37                                         | 0.77                                             | 0.31                                             | 0.40  | 0.82  |

StF45-SF3%耗散能分别提升 14.47%、61.08%，表明硅灰体积掺量为 6%时能充分发挥填充和火山灰效应。发生断裂时硅灰可以有效弥补钢纤维的黏结界面弱化效应对劈裂强度的影响，在水泥基复合材料中掺加钢纤维能够有效控制裂缝扩展，降低材料发生脆性破坏的可能<sup>[33]</sup>。在劈裂过程中，损伤处的弹性应变能与峰值应力处的弹性应变能之比可以在一定程度上反映该阶段的混凝土的储能水平。将损伤应力处的储能水平定义为  $K_d(K_d=U_e^a/U_e^b)$ ，表 3 为各配合比试件裂缝演化过程中的能量及储能水平，SFRC 储能水平  $K_d$  相较于 DZ 提升 12.5%~52.5%，混凝土的裂缝演化为一个先难后易的过程，同时在

外荷载下, 超声波透射混凝土内部也是随裂缝扩展而逐渐减小的, 所以储能水平  $K_d$  与声学损伤变量  $D_d$  具有较强的关联性,  $K_d$  表示混凝土从内部微裂缝扩展到试件宏观裂缝扩展完成阶段的储能范围的相对值。 $K_d$  越大, 混凝土储能极限越高, 抗损伤能力越强, 在发生断裂破坏时随外部荷载的不断升高产生的损伤越彻底, 因此  $K_d$  可以作为检验混凝土损伤能力的考量指标<sup>[34–35]</sup>。

利用声学损伤变量进行分析, 发现声学损伤变量与混凝土耗散能的初始突变位置基本一致, 初始突变时表面应变场并未产生变化, 说明超声波技术对开裂损伤表现更为敏感, 而声学损伤变量在峰后应力阶段就已趋于稳定, 此时宏观裂缝形成, 应变云图可对损伤表征进行补充, 进一步验证了 DIC 与 UT 的互补性。

## 6 结论

采用 DIC 和 UT 技术, 基于能量演化规律验证了不同配合比下 SFRC 衬砌的裂缝扩展过程, 验证了 DIC 与 UT 的试验结果具有强相关性和互补性, 揭示了钢纤维及硅灰对断裂力学性能的影响, 主要结论如下:

1) 钢纤维掺量为 40、45、50 kg/m<sup>3</sup> 时的峰值应力相较于 DZ 分别最大提升 52.73%、81.82%、73.03%, 即钢纤维掺量为 45 kg/m<sup>3</sup> 时劈裂强度提升显著, 其中 StF45-SF6% 表现出良好的延性和安全储备; 钢纤维掺量为 50 kg/m<sup>3</sup> 时, 硅灰体积掺量增加导致应力-应变曲线峰后斜率明显增大, 与劈裂强度呈现负相关。

2) 通过分析 DIC 云图发现, 应力到达 90% $P_{Max}$  后钢纤维对主裂缝的阻裂作用开始增加, 裂缝主要纵向延伸; 当应力到达 70% $P_{Max}$  后, 主裂缝开始横向扩展, 横跨在裂缝路径上的钢纤维对裂缝的抑制作用逐渐下降形成宏观裂缝; 在相同钢纤维掺量下硅灰体积掺量与 CTOD<sub>c</sub> 呈反比, 即硅灰能提供额外的黏性, 对 CTOD 的扩展有良好的阻碍效果。

3) SFRC 超声波波速在峰后应力阶段发生突降, 即宏观裂缝形成, 波速变化在不同应变水平下为梯形分级衰减过程, 根据波形、首波幅值和波速等声学特征分为: 无损期、微裂缝扩展期、宏观裂缝扩展期、损伤稳定期。

4) 基于能量演化原理验证了 DIC 与 UT 具有强相关性和互补性, SFRC 储能水平  $K_d$  相较于 DZ 提升 12.5%~52.5%, 弹性应变能的释放速率显著降低。

## 参考文献:

- [1] 张佳威, 崔臻, 张翔宇, 等. 高地应力环境下跨活断层隧道抗错断铰接设计试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3333–3344.  
ZHANG Jiawei, CUI Zhen, ZHANG Xiangyu, et al. Rock Soil Mech, 2024, 45(11): 3333–3344.
- [2] 同月苹, 王艳, 张少辉. 隧道衬砌纤维混凝土力学性能与耐久性能的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(3): 528–536.  
TONG Yueping, WANG Yan, ZHANG Shaohui. J Mater Sci Eng, 2022, 40(3): 528–536.
- [3] 岳健广, 夏月飞, 方华. 钢纤维混凝土断裂破坏机理及受拉损伤本构试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 93–106.  
YUE Jianguang, XIA Yuefei, FANG Hua. China Civ Eng J, 2021, 54(2): 93–106.
- [4] LANDIS E N, ZHANG T, NAGY E N, et al. Cracking, damage and fracture in four dimensions[J]. Mater Struct, 2007, 40(4): 357–364.
- [5] 许颖, 樊悦, 王青原, 等. 基于 DIC 的聚丙烯纤维增强混凝土断裂过程分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 103–111.  
XU Ying, FAN Yue, WANG Qingyuan, et al. J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci Ed, 2024, 52(2): 103–111.
- [6] 刘振威, 魏凯, 石丹丹, 等. 基于 AE 和 DIC 的超高性能喷射混凝土轴压和劈拉破坏特性[J/OL]. 工程科学与技术, 2024: 1–17[2024-09-30].  
LIU Zhenwei, WEI Kai, SHI Dandan, et al. Adv Eng Sci, 2024: 1–17[2024-09-30].
- [7] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique[J]. Eng Fract Mech, 2011, 78(17): 2978–2990.
- [8] LIAN H H, SUN X J, YU Z P, et al. Research on the fracture mechanical performance of basalt fiber nano-CaCO<sub>3</sub> concrete based on DIC technology[J]. Constr Build Mater, 2022, 329: 127193.
- [9] 张明华, 凯乐, 赵海红, 等. 超声波检测混凝土构件缺陷的研究进展[J]. 江西建材, 2021(10): 12–15.  
ZHANG Minghua, KAI Le, ZHAO Haihong, et al. Jiangxi Build Mater, 2021(10): 12–15.
- [10] 吴新璇. 混凝土无损检测技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [11] 王怀亮, 宋玉普. 不同尺寸混凝土试件受压状态下超声波传播特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1): 90–94.  
WANG Huailiang, SONG Yupu. J Dalian Univ Technol, 2007, 47(1): 90–94.
- [12] 高小宇, 孙洋, 吴关良, 等. 基于超声波特性的混凝土损伤表征试验研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(4): 31–34.  
GAO Xiaoyu, SUN Yang, WU Guanliang, et al. Low Temp Archit Technol, 2020, 42(4): 31–34.
- [13] SEHER M, IN C W, KIM J Y, et al. Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound[J]. J Nondestruct Eval, 2013, 32(1): 81–92.
- [14] 丁一宁, 李林泽, 曾伟. 纤维对混凝土的损伤、裂缝曲折度及裂缝恢复的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2439–2447.  
DING Yining, LI Linze, ZENG Wei. Acta Mater Compos Sin, 2019, 36(10): 2439–2447.
- [15] ALAM S Y, SALIBA J, LOUKILI A. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. Constr Build Mater, 2014, 69: 232–242.
- [16] 大连理工大学. CECS 13—2009 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [17] 刘晓辉, 郝齐钧, 胡安奎, 等. 准静态应变率下单轴煤岩特征应力

- 确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2038–2046.
- LIU Xiaohui, HAO Qijun, HU Ankui, et al. Chin J Rock Mech Eng, 2020, 39(10): 2038–2046.
- [18] LU S, XU J Y, BAI E L, et al. Effect of particles with different mechanical properties on the energy dissipation properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 502–515.
- [19] YANG S, QIN Y, KOU J L, et al. Sulfate resistance of UHPC during dry-wet cycling and energy dissipation under compression[J]. J Build Eng, 2024, 95: 110149.
- [20] 龙广成, 李承洋, 张占森, 等. 混杂纤维增韧水泥基复合材料的静态弯拉性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 592–602.
- LONG Guangcheng, LI Chengyang, ZHANG Zhansen, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(2): 592–602.
- [21] 王鑫. 疲劳损伤演化对混凝土后期承载力的影响研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- WANG Xin. Study on the influence of fatigue damage evolution on the later bearing capacity of concrete [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [22] LIU R, XIAO H G, GENG J S, et al. Effect of nano-CaCO<sub>3</sub> and nano-SiO<sub>2</sub> on improving the properties of carbon fibre-reinforced concrete and their pore-structure models[J]. Constr Build Mater, 2020, 244: 118297.
- [23] YANG E H, WANG S X, YANG Y Z, et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites[J]. J Adv Concr Technol, 2008, 6(1): 181–193.
- [24] 符永康. 混凝土四阶段断裂模型及其在刚性道面断裂分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- FU Yongkang. Four-stage fracture model of concrete and its application in fracture analysis of rigid pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [25] 罗滔, 李骄洋, 张天祺, 等. 基于 DIC 技术的自密实混凝土界面裂缝扩展规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 143–153.
- LUO Tao, LI Jiaoyang, ZHANG Tianqi, et al. J Water Resour Water Eng, 2024, 35(1): 143–153.
- [26] 潘慧敏, 马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 956–961.
- PAN Huimin, MA Yunzhao. J Build Mater, 2017, 20(6): 956–961.
- [27] 李志龙, 王璟, 李阳, 等. 基于 DIC 技术的碾压混凝土层面裂缝扩展规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 987–996.
- LI Zhilong, WANG Jing, LI Yang, et al. South N Water Transf Water Sci Technol, 2024, 22(5): 987–996.
- [28] GOLEWSKI G L. Validation of the favorable quantity of fly ash in concrete and analysis of crack propagation and its length—Using the crack tip tracking (CTT) method—In the fracture toughness examinations under Mode II, through digital image correlation[J]. Constr Build Mater, 2021, 296: 122362.
- [29] 鞠杨, 刘彩平, 谢和平. 混凝土断裂及亚临界扩展的微观机制[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 1–9.
- JU Yang, LIU Caiping, XIE Heping. Eng Mech, 2003, 20(5): 1–9.
- [30] YE Y C, YANG Q, XIAO S L, et al. Fracture evolution characteristics of asphalt concrete using digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. Constr Build Mater, 2024, 447: 138100.
- [31] 蒋京泰, 李地元, 汪小东, 等. 钢纤维混凝土力学性能优化与裂纹扩展特性试验研究[J]. 实验力学, 2023, 38(4): 455–466.
- JIANG Jingtai, LI Diyu, WANG Xiaodong, et al. J Exp Mech, 2023, 38(4): 455–466.
- [32] GONG N N, LIU W S, CAI X N, et al. Fracture behavior and mechanical properties of engineered cementitious composites exposed to long-term sulfate and chloride environments[J]. Case Stud Constr Mater, 2024, 21: e03602.
- [33] 项长生, 程建曙, 周宇, 等. 基于耗散体系的混凝土裂缝演化演变研究[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(3): 122–126.
- XIANG Changsheng, CHENG Jianshu, ZHOU Yu, et al. J Lanzhou Univ Technol, 2017, 43(3): 122–126.
- [34] 郭伟娜, 鲍玖文, 张鹏, 等. 基于数字图像方法的混掺纤维应变硬化水泥基复合材料力学性能及变形特征[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(5): 1401–1409.
- GUO Weina, BAO Jiuwen, ZHANG Peng, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(5): 1401–1409.
- [35] QIN Y, MEN B, LIANG D, et al. Energy evolution of concrete with cold joint under the action of sulfate dry–wet cycles with loading[J]. J Build Eng, 2023, 68: 106098.

## Splitting Damage Process and Law of Steel Fiber Reinforced Concrete Based on Digital Image and Ultrasonic Technology

QIN Yuan<sup>1</sup>, ZHAO Shilong<sup>1</sup>, ZHOU Heng<sup>2</sup>, ZHAO Jingwei<sup>1,2</sup>, WU Jiangjiang<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Power China Northwest of Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China, 3.China Energy Construction Group Northwest Construction Investment Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

### Extended Abstract

**Introduction** In recent years, China's tunnel engineering has developed rapidly, and concrete lining support technology has been widely used in tunnels, underground engineering projects and deep foundation pits. However, with increasing buried depth and ground stress, ordinary concrete lining support technology often has certain limitations. It is easy to crack during service and shows obvious brittleness when destroyed, which poses a threat to the safety of tunnel engineering. Therefore, in order to prevent cracking, steel fibers with random distribution are usually mixed into concrete to achieve, and in the engineering practice of tunnel lining detection, engineers urgently seek to use high-precision non-destructive testing methods to detect the health status of concrete lining. Therefore, two non-destructive testing methods, Digital image correlation technology (DIC) and Ultrasonic technology (UT), are used to characterize the cracking damage process of concrete, and the strong correlation and complementarity of DIC and UT are verified

based on the law of energy evolution.

**Methods** The specimens were designed with steel fiber and silica fume content as the control variables, and a total of 9 groups of orthogonal mix specimens were designed for splitting mechanical tests, with a water-glue ratio of 0.43, a mass steel fiber content of 40, 45 kg/m<sup>3</sup>, and 50 kg/m<sup>3</sup>, and the mineral admixture silica fume replaced cement with the same amount according to different volume parameters (3%, 6%, 9%), and the dimensions of the 10 groups of specimens in this experiment were: 100 mm × 100 mm × 100 mm.

In accordance with CECS13-2009 Fiber Concrete Test Method Standard, the electro-hydraulic servo pressure testing machine (WAW-1000) is used in the splitting test, the maximum test load is 1000 kN for the control parameters, the stress control loading speed is 0.04 MPa/s, and the failure standard is set to 30% of the peak load. Place the steel gasket up and down at the centerline position of the specimen, and the size of the gasket is 200 mm × 5 mm × 5 mm.

**Results and discussion** In this paper, by using DIC and UT, based on the energy evolution law, the crack propagation process of SFRC lining under different mix ratios is verified, and the strong correlation and complementarity between DIC and UT test results are verified. The influence of steel fiber and silica fume on fracture mechanical properties is revealed. The main conclusions are as follows:

The peak stress at 40, 45 kg/m<sup>3</sup> and 50 kg/m<sup>3</sup> was increased by 52.73%, 81.82% and 73.03% respectively compared with DZ, respectively, that is, the cleavage strength increased significantly when the steel fiber content was 45 kg/m<sup>3</sup>, and StF45-SF6% showed good safety reserve and ductility, and the increase of silica fume volume content at 50 kg/m<sup>3</sup> led to a significant increase in the slope behind the peak of the stress-strain curve, which was negatively correlated with the cleavage strength.

According to the cloud map analysis of DIC, it is found that the cracking resistance of steel fiber on the main crack begins to increase after the stress reaches the 90% $P_{\text{Max}}$ , and the crack mainly extends longitudinally. When the stress drops below 70% $P_{\text{Max}}$ , the main fracture begins to expand laterally, and the inhibition effect of steel fiber across the fracture path gradually decreases to form macroscopic cracks. Under the same steel fiber content, the silica fume volume content was inversely proportional to the CTOD<sub>c</sub>, that is, silica fume could provide additional viscosity and had a good hindrance effect on the expansion of CTOD.

According to the acoustic characteristics such as waveform, first wave amplitude and wave velocity, it can be divided into: no damage period, microcrack propagation period, macroscopic crack propagation period, and damage stability period. Based on the principle of energy evolution, it is verified that DIC and UT have strong correlation and complementarity, and the energy storage level of SFRC  $K_d$  increased by 12.5%~52.5% compared with DZ, and steel fiber significantly reduced the release rate of elastic strain energy.

**Conclusions** The main summary of this paper is as follows: SFRC has a strong post-cracking bearing capacity, with steel fiber content of 45 kg/m<sup>3</sup> and silica fume content of 6%, the highest energy storage level and the splitting strength can be increased by 81.82%; Based on the cloud map analysis of DIC, the bridging effect of silica fume is mainly manifested before the 90% peak stress. After 90% peak stress, the crack resistance of steel fibers is gradually enhanced, and the cracks are mainly propagated by longitudinal microcracks. After the stress drops to 70% of the peak stress, the steel fiber crack resistance is gradually weakened, and the fracture begins to expand horizontally rapidly. In addition, the ultrasonic velocity of SFRC showed a trapezoidal hierarchical attenuation trend during splitting damage. Analysis based on the energy evolution law, UT and DIC have strong correlation and complementarity in characterizing the crack propagation process.

**Keywords** steel fiber reinforced concrete; splitting; digital image technology; ultrasonic technology; crack evolution process