

稿号: 2024-0272

**本文亮点介绍:** 研究冲击作用下混凝土裂纹处的动态力学性质和动态温度, 搭建高速红外测温系统, 其响应速度达到1MHz, 能够在微秒时间尺度内完成温度测量。先采用静态标定试验拟合混凝土电压-温度曲线; 将高速红外测温系统和 SHPB 试验装置相结合, 为了保证时间上的匹配采用动态信号采集仪对入射杆、透射杆上的应变片和高速红外测温系统进行同步监测; 通过高速红外测温系统监测混凝土裂纹处温度变化, 为混凝土裂纹扩展提供了新的监测手段。

## 高速冲击下混凝土动力学性质和动态温度研究\*

黄晨瑞<sup>1,3</sup>, 穆朝民<sup>2,3</sup>, 刘安坤<sup>4</sup>, 黄禧隆<sup>2</sup>, 张昌辉<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 安全与工程学院, 安徽 淮南 232001;

3. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

4. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为研究冲击作用下混凝土动态力学性质和裂纹处的动态温度, 以钢-聚丙烯纤维混凝土(SPFRC)为研究对象, 采用自搭建高速红外测温系统, 其系统响应速率达到微秒级, 并通过静态标定试验拟合混凝土温度曲线, 再结合霍普金森压杆试验装置。结果表明: 混凝土试件的温度演化与力学性能存在明显的耦合效应, 钢纤维掺量对动力学性能和温度有很大的影响。具体而言, 随着钢纤维的增加, 混凝土抗压强度得到了提升; 其中1.5%钢纤维掺量的试件表现出最佳的力学性能, 而钢纤维掺量达到2%时, 由于混凝土内部空隙增多, 力学性能略有下降。在冲击过程中, 裂纹处的动态温度效应呈现“台阶状”特征, 温度变化分为两个阶段: 在裂纹初期温度上升缓慢, 而裂纹扩展后摩擦和剪切效应加剧, 导致裂纹处温度急剧上升。不同钢纤维掺量对温度的变化影响有限, 其峰值温度和峰值应力呈现相似规律, 温度的主要变化由裂纹扩展和摩擦效应决定。采用了高速红外测温系统实时监测混凝土裂纹处温度变化, 为混凝土裂纹扩展提供了新的监测手段。

**关键词:** 钢-聚丙烯纤维混凝土(SPFRC); 动态温度; 红外测温; SHPB

中图分类号:

国标学科代码:

文献标识码: A

## Study on Dynamic Properties and Dynamic Temperature of Concrete under High-speed Impact

HUANG Chenrui<sup>1,3</sup> MU Chaoming<sup>2,3</sup> LIU An-kun<sup>4</sup> HUANG Xilong<sup>2</sup> ZHANG Changhui<sup>2</sup>

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

4. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic mechanical properties of concrete and the dynamic temperature at the crack under impact, steel-polypropylene fiber reinforced concrete (SPFRC) was taken as the research object, and a self-built high-speed infrared temperature measurement system was used. The response rate of the system reached the microsecond level, and the

\*收稿日期: 2024-08-01; 修回日期: 2024-11-06;

基金项目: 安徽理工大学研究生创新基金项目(2022CX2030); 国家重点研发计划课题(2021YFC3100802);

第一作者: 黄晨瑞(1999-), 男, 博士生. E-mail: 2023100104@aust.edu.cn;

通信作者: 穆朝民(1977-), 男, 博士, 教授. E-mail: chmmu@mail.ustc.edu.cn.

concrete temperature curve was fitted by static calibration test. Combined with the Hopkinson pressure bar test device, the dynamic properties of SPFRC specimens with different steel fiber contents and the dynamic temperature change at the crack were studied. The results indicate a significant coupling effect between the temperature evolution and mechanical properties of the concrete specimens, with the steel fiber content substantially influencing both dynamic performance and temperature. Specifically, as the steel fiber content increases, the compressive strength of the concrete improves, reaching optimal mechanical performance at a 1.5% steel fiber content. However, at a 2% steel fiber content, the mechanical performance slightly decreases due to an increase in internal voids within the concrete. During impact, the dynamic temperature effect at the crack location exhibits a "stepped" pattern, with temperature change occurring in two distinct stages: an initial slow rise during early crack formation, followed by a sharp increase as friction and shear effects intensify with crack propagation. The influence of varying steel fiber content on temperature change is limited, with peak temperature and peak stress showing similar trends. The primary temperature variations are driven by crack propagation and frictional effects. After impact, the overall temperature in SPFRC specimens continues to rise within the first 300  $\mu\text{s}$ . Due to thermal lag, the temperature does not decrease immediately after unloading. The high-speed infrared temperature measurement system provides a new method for real-time monitoring of temperature changes at concrete crack locations, offering a basis for assessing temperature evolution at cracks and aiding in the evaluation of crack propagation behavior.

**Keywords:** Steel-polypropylene fiber reinforced concrete ( SPFRC ); dynamic temperature; infrared temperature measurement; SHPB

混凝土是目前应用最广泛的建筑材料之一, 钢-聚丙烯纤维混凝土(SPFRC)更是一种常用的脆性建筑材料, 与普通混凝土相比, 钢纤维的掺入提高了混凝土的强度、韧性等方面<sup>[1-5]</sup>, 聚丙烯纤维的掺入抑制了裂纹的扩展、提升抗高温性能<sup>[6-8]</sup>, Kodur、Xu、徐礼华等<sup>[9-12]</sup>将钢纤维(Steel fiber, SF)和聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PF)混掺加入混凝土, 能够同时提升混凝土的强度和裂后性能。混凝土除了受到静载和恒载的压力外, 通常受到冲击载荷的影响, 使混凝土迅速发生局部穿透破坏或结构整体破坏, 造成不可估量的灾害<sup>[13]</sup>, 因此对混凝土动态性能的研究具有重要意义。

目前对纤维混凝土材料的动态力学性能的研究多集中于材料在动态压缩下的韧性和强度等方面<sup>[14-16]</sup>。但在冲击载荷作用下, 混凝土、岩石等材料内部微裂纹和断裂面会在应力作用下发生滑动摩擦, 引起混凝土局部温度的变化<sup>[17-19]</sup>。混凝土受冲击破碎过程可近似为绝热过程<sup>[20]</sup>。因此, 为了更深入的研究混凝土动态性能及破损后性能的变化, 有必要对混凝土裂纹处的动态温度变化进行研究<sup>[21, 22]</sup>。

由于温度变化的瞬时性和一次性, 难以实时监测温度变化。目前, 主要使用热电偶<sup>[23]</sup>和红外测温方法进行温度测量。虽然热电偶技术成熟且使用方便, 但其响应时间较长(约 1ms), 难以满足高速测温需求。相比之下, 红外测温具有响应迅速、非接触式测温等优点。

混凝土红外监测作为一种无损、非接触的监测手段, 具有效率高、实时监测等优点<sup>[24, 25]</sup>。已被广泛应用于混凝土和岩石结构的稳定性监测和破坏缺陷的无损检测<sup>[26, 27]</sup>。红外辐射反映了混凝土加载过程中内部复杂的物理力学过程, 试件损伤越严重, 产生的红外温度越大<sup>[28]</sup>。吴立新等<sup>[29, 30]</sup>采用热红外(TIR)成像技术, 研究岩石撞击前后红外辐射的升温最高幅度、比热和发射率等影响。刘善军等<sup>[31]</sup>采用红外热成像研究了岩石在单轴压缩时岩石破坏的时空演化特征, 其破坏特征与应力场密切相关。邓志毅、Sun 等<sup>[32, 33]</sup>采用红外成像仪监测混凝土和岩石在受力过程中温度变化特征, 其表面温度随着应力的增大而升高, 得到混凝土和岩石在破坏前存在温度奇变点。众多学者<sup>[34-36]</sup>通过红外研究混凝土、岩石破坏前兆, 但大多停留在静态加载或者准静态加载上。虽然有众多学者<sup>[37, 38]</sup>开展了岩石高速冲击破坏红外监测实验, 研究了冲击速度对混凝土、岩石破坏时红外热成像的规律, 但由于红外热成像采集速率仍难以满足冲击加载下的实时监测。因此, 有必要对冲击状态下混凝土破坏的实时温度进行监测。

有学者采用红外测温方法实时监测材料温度,国外学者 Hodowany<sup>[39]</sup>、Mason<sup>[40]</sup>、Potdar<sup>[41]</sup>将红外测温运用到冲击试验中,采用 HgTeGe 红外探测器监测铝合金表面温度,得到了塑性功转化系数 $\beta$ 。Nieto-Fuentes<sup>[42]</sup>详细介绍了在霍普金森压杆试验中红外测温监测固体瞬态温度的方法。国内学者夏源明等<sup>[43]</sup>提出红外探测器测量了岩石冲击拉伸断裂过程中温度变化。刘永贵<sup>[44,45]</sup>拟合静态下不同材料的温度标定曲线,结合标定曲线实时监测金属的表面温度。这些研究为了解混凝土和岩石等材料在瞬态破坏过程中的动态温度监测奠定了基础。因此,开展冲击状态下混凝土破坏的实时温度监测具有重要的研究意义。

基于以上研究结果,本文旨在探究混凝土的动态力学性能和动态温度之间关系。为此,选取钢纤维与聚丙烯纤维混杂的混凝土试件,采用分离式霍普金森压杆装置结合高速红外测温系统和数字图像相关(DIC)技术,实时监测钢-聚丙烯纤维混凝土(SPFRC)试件裂纹处的动态力学性能和温度演化。研究将重点分析混凝土裂纹处的动力学性能及动态温度,旨在揭示裂纹在破坏过程中温度演化与力学性能之间的时间关联,以更有效地分析混凝土裂纹的破坏特征。同时,为监测混凝土裂纹扩展提供了一种新的手段。

## 1 混凝土试样

钢-聚丙烯纤维混凝土(SPFRC)原材料包括:

(1)本试验水泥为天津禹门产的 P.O52.5 普通硅酸盐水泥,密度为  $3.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 2%的石灰石, 6%的天然石膏, 碱浓度大于 0.6%, 28 天的抗压强度为 53.7MPa;

(2)为了增强钢纤维和水泥之间的粘接力,防止钢纤维上锈腐蚀,采用镀铜圆直形短丝钢纤维,同时为了抑制裂纹扩展加入聚丙烯纤维,其纤维基本参数如表 1 所示;

表 1 纤维基本属性参数

Table 1 Basic property parameters of fiber

纤维种类	长度/mm	直径/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
镀铜钢纤维	15	0.25	2100	210	$7.80 \times 10^3$
聚丙烯钢纤维	10	0.18	750	8	$0.91 \times 10^3$

(3)为了提高混凝土强度和填充混凝土砂浆中的空隙,采用粒径  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$  的微硅粉和细度为 325 目的石英粉;

(4)为了影响水泥水化速度,增强混凝土强度和密实性,采用含量为 15%的聚羧酸减水剂。

试件按照钢纤维参量不同分为五组,不同混杂比例的混凝土的比配如表 2 所示。试验采用直径 70mm,高 35mm 的圆柱形试样。所有混凝土试件在浇筑 24 小时后脱膜,在室温环境下( $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ )进行 28 天标准养护。打磨试样确保试样两端平整度最大不超过 0.05mm,上下两端面不平行度最大不超过 0.05mm,使试样能够与压杆端面紧密贴合,尽量减少实验误差。

表 2 不同混杂比例的混凝土的比配

Table 2 The proportioning of concrete with different mixed proportions

编号	水泥 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	微硅粉 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	石英粉 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	细河沙 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	减水剂 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	水 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	聚丙烯 纤维/%	钢纤维 /%
SF0-PP5	800	200	240	880	14.4	152	0.5	0
SF5-PP5	800	200	240	880	14.4	152	0.5	0.5
SF10-PP5	800	200	240	880	14.4	152	0.5	1
SF15-PP5	800	200	240	880	14.4	152	0.5	1.5
SF20-PP5	800	200	240	880	14.4	152	0.5	2

试件编号方式以“SF0-PP5”试件为例,“SF0”代表其钢纤维含量,“0”钢纤维含量为 0%,“5”

钢纤维含量为 0.5%，以此类推，“PP5”代表其聚丙烯纤维的含量为 0.5%。试件实物如图 1 所示。



图 1 SF-FRC 试件实物  
Fig.1 SF-FRC specimen object

## 2 试验设备及原理

### 2.1 高速红外测温系统

#### 2.1.1 红外测温原理

红外测温的基本原理是依据描述被测物体辐射能与其绝对温度关系的斯特藩-玻耳兹曼定理<sup>[46]</sup>, 利用红外传感器捕捉被测物发出的红外辐射, 并根据式(1)计算出物体的温度<sup>[47]</sup>。

$$T = \sqrt[4]{\frac{P(T)}{\gamma\eta}} \quad (1)$$

式中:  $T$  为被测物体热力学温度;  $P(T)$  表示被测物体温度为  $T$  时, 单位时间内从被物体单位面积上辐射出的总辐射能, 称为总辐射度;  $\gamma$  为斯特藩-玻耳兹曼常量;  $\eta$  为被测物体发射率。

#### 2.1.2 高速红外测温系统搭建

高速红外测温系统响应频率能够达到 1MHz, 能够实现在微秒( $\mu$ s)级温度测量, 其主要组成部分包括: 光学系统、红外探测器、前置放大器、激光器件、动态数字信号采集仪。

光学系统采用单镀金抛物面反射镜, 材料为 6061-T6 铝合金, 镜面经过黄金镀膜对 2-14 $\mu$ m 红外光的反射率均达到 95%以上, 以达到聚光的效果。

试验中采用的红外探测器由 InfraRed Associates Inc 定制的光生伏特型 HgCdTe 探测器探测器, 为了降低热噪声, 采用 77K 液氮进行冷却。探测器的接受窗口采用 ZnSe 窗片, 可以有效透过 2-14 $\mu$ m 波段的红外光, 其主要参数如表 3 所示。

表 3 HgCdTe 红外探测器的主要参数

Table 3 Main parameters of HgCdTe infrared detector

主要参数	光敏面积	响应时间	波长敏感范围	温度分辨率	电阻	标准包装
大小/范围	1mm×1mm	0.5 $\mu$ s	2 $\mu$ m~14 $\mu$ m	0.1K	20~100 $\Omega$	MDL-12

当试件受到快速冲击而发生瞬态温升时, 其表面会辐射出较多的红外光, 通过反射镜将其聚集到红外探测器的接收窗口上, 通过红外探测器将光信号转化为电流信号。由于电流信号比较微弱, 所以在探测器与 ADC 接口之间接入前置放大器 MCT-1000, 最后由动态数字信号采集仪进行实时监测。

#### 2.1.3 高速红外测温系统校准及标定

由于不同材料的发射率不相同, 因此在试验前对高速红外测温系统光路校准和材料标定尤为重要。激光器件作为矫正光源, 能够提供稳定、集中的红外光。如图 2 所示, 通过分光镜将水平红外光分成

水平向右的光路和水平向左的光路，水平向右的光路用于标定镜面反射后的探测器位置，水平向左的光路用于标定试样位置。

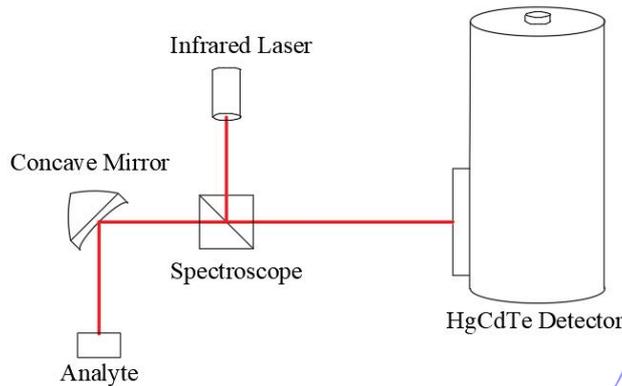


图2 光路校准示意图

Fig.2 Optical path calibration diagram

红外探测器的标定对精确测温具有重要意义。因此，有必要准确校准待测物温度与红外测温系统输出电压之间的关系。根据 Zehnder<sup>[48]</sup>的研究，由于难以确定发射率以及探测器接收的辐射占样品总辐射的比例，同时，由于混凝土内部结构和空隙会影响混凝土升温情况，在受冲击加载中存在气体逸出、吸热效应及破碎产生的摩擦效应导致温度各有不同，难以用简单的数学表达式准确描述其规律，因此，采用试验的方法进行标定。其中前置放大器 MCT-1000 具有精确恒定电压偏置的低噪声和高增益效果，可调增益提供可变信号，通常从 50 到 1000 倍振幅，但由于前置放大器的隔直流作用，因此静标时需要在红外探测器前方放置斩波器，如图 3 所示。

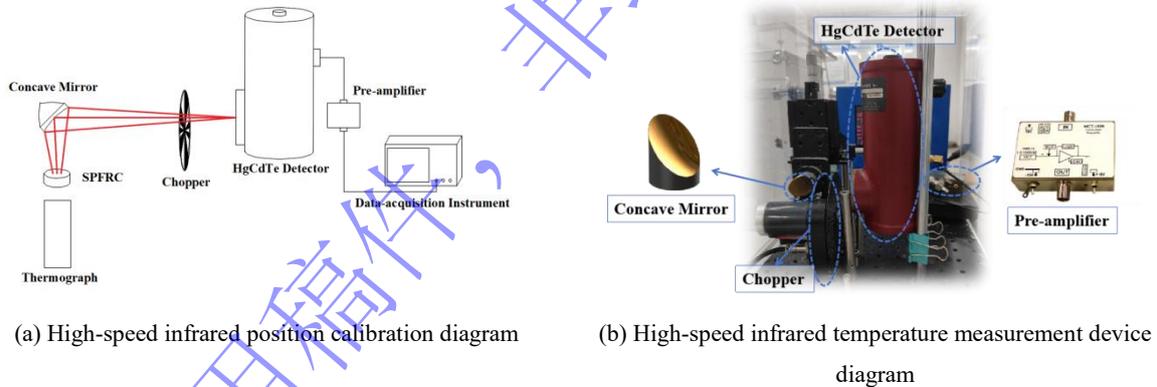


图3 高速红外测温标定示意

Fig.3 High-speed infrared temperature measurement calibration diagram

为实现下对 SPFRc 试样温度的标定，试验设计 5 种不同含量 SPFRc 试样同时在烘箱加热至不同温度，采用德力西 DM-5005 测温枪和高速红外测温系统对 SPFRc 试样进行测温，其测温枪测温范围在 -50~900℃，分辨率 0.1℃，测量精度 ±1.5%。

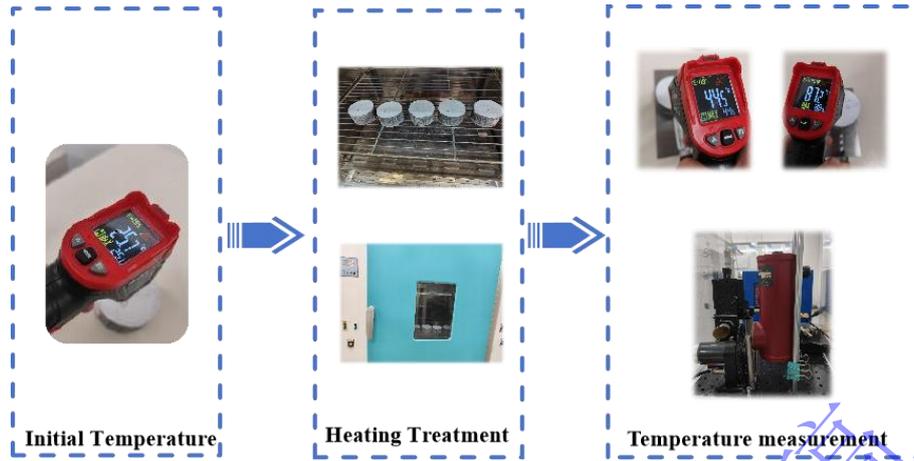


图 4 标定流程图

Fig.4 Calibration flow chart

如图 4 所示标定流程图，本次试验测温范围 25~150℃，先对常温下不同钢纤维掺量的 SPFRC 试样温度进行多次监测，得出初始温度为 25.7℃，将 SPFRC 试样加入烘箱进行加热；为防止温度耗散，同时采用测温枪和高速红外测温系统对 SPFRC 试样进行测温，记录测温枪所监测的温度和高速红外测温设备所测的电压数据，以测温枪所测温度作为标定基准温度。

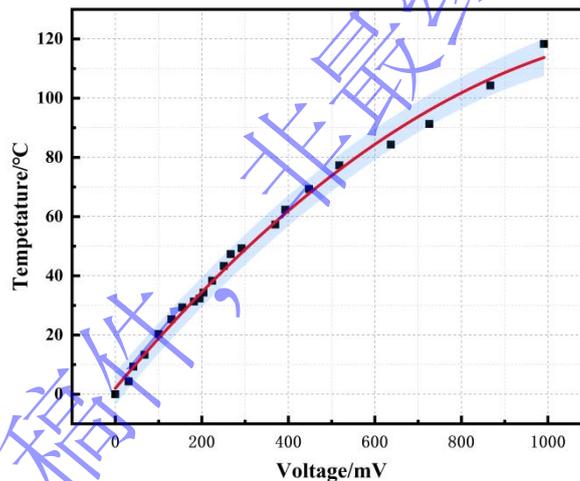


图 5 电压-温度拟合曲线

Fig.5 Voltage-temperature fitting curve

如图 5 所示温度-电压拟合曲线图，拟合残差在  $\pm 1^\circ\text{C}$ ，拟合精度较好，得到温度-电压的拟合函数为：

$$\Delta T = T - T_0 = -6.293 \times 10^{-5} \cdot V^2 + 0.175V + 1.992 \quad (2)$$

式中： $\Delta T$  为温度变化量，单位  $^\circ\text{C}$ ； $T$  为实时温度，单位  $^\circ\text{C}$ ； $T_0$  为室温温度，单位  $^\circ\text{C}$ ； $U$  为电压，单位 mV。

## 2.2 SHPB 试验装置及原理

本文试验采用深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室的分离式霍普金森(SHPB)试验系统完成，为了达到本实验的研究目的，在原有的 SHPB 实验系统上增加了高速红外测温系统。该试验系统的撞击杆、入射杆、透射杆、吸收杆直径均为 75mm，长度分别为 400mm、4500mm、2500mm、1500mm，材质均为高强度合金钢，密度为  $7810\text{kg/m}^3$ ，弹性模量为 210GPa，波速为 5190m/s，泊松比为 0.23。

在混凝土冲击试验中，SHPB 系统通过 DHDAS 动态信号采集仪采集应变片数据。试验时，高压气体推动撞击杆沿轴向以一定速度撞击入射杆，导致入射杆中产生压缩应力波。当应力波第一次传输到入射杆上的应变片时，入射杆上的应变片就会接收到入射应力波的信号 $\varepsilon_i(t)$ ，随即应力波继续传输到试件，试件将反射一个应力波回至入射杆，当应力波第二次传输到入射杆上的应变片时，入射杆上应变片得到了反射应力波的信号 $\varepsilon_r(t)$ ，同时另一个应力波射入透射杆中，经过透射杆应变片得到了透射应力波的信号 $\varepsilon_t(t)$ 。

基于一维应力波理论和应力均匀性假定，再根据巴西劈裂试验和“二波法”公式<sup>[49, 50]</sup>可得：

$$\begin{cases} \sigma(t) = \frac{ED_0}{2DB} \varepsilon_t(t) \\ \varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \\ \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2c_0}{D} \varepsilon_r(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_r(t)$ 、 $\varepsilon_t(t)$ 分别是  $t$  时刻的反射波和透射波； $D_0$ 、 $c_0$  分别是压杆的直径和波速； $D$ 、 $B$  分别是试件的直径和厚度。

### 2.3 试验方案及过程

以 SHPB 试验装置为基础，撞击杆由高压氮气驱动发射，为了使保持相同的应变率，通过调节气压的大小来控制撞击速度；为减小横向惯性震荡的影响，在入射杆和撞击端面处加装厚度 0.3mm、直径约 1.5mm 的整形片。冲击加载时，由于脉冲时间短(对于 400mm 长子弹，约 160 $\mu$ s)，可以忽略与外界的热交换，视为绝热过程。在压杆与混凝土之间涂抹凡士林，以减小摩擦；将高速红外测温系统放置在混凝土试件正前方，校准监测位置；在混凝土试件另一面(喷涂散斑)，放置高速摄像机，如图 6 所示。

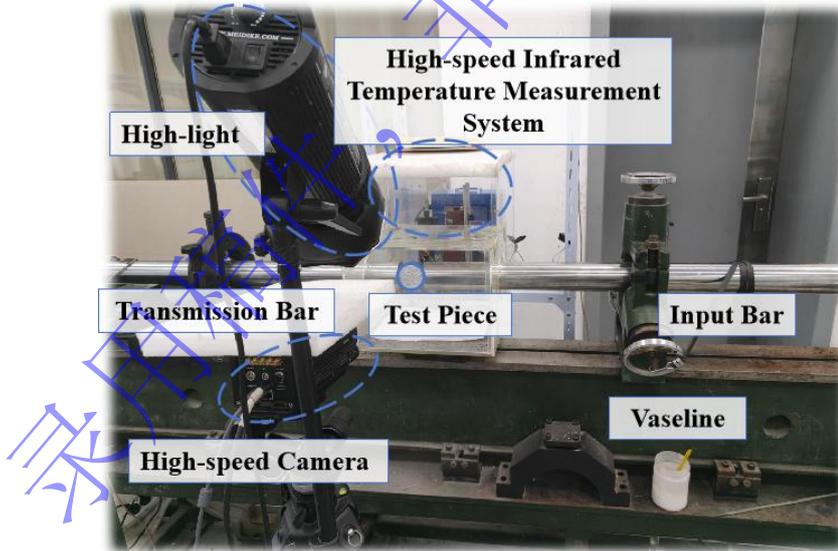


图 6 高速红外测温试验系统

Fig.6 High-speed infrared temperature measurement test system

在放置高速红外测温系统时，为了能够更明显的监测混凝土断裂时升温情况，更加深入分析温度对混凝土动态力学性能的影响。由众多学者研究可知，在受冲击过程中，混凝土裂纹处会产生应力集中，而往往应力集中位置会有明显升温。因此，本次试验采用巴西劈裂的方案，监测混凝土试件与入射杆接触位置的温度，其具体监测位置如图 7 所示。

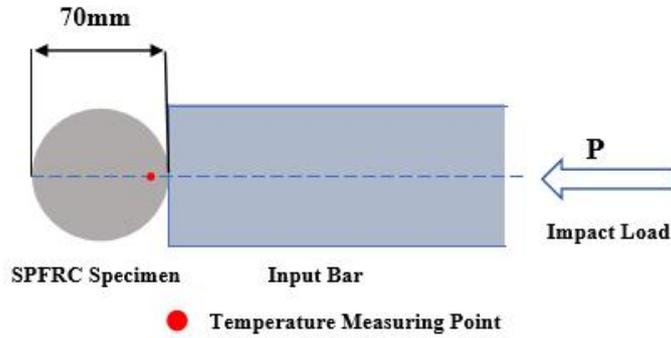


图7 温度测点示意图

Fig.7 Schematic diagram of temperature measuring point

在布置高速摄像机时，需要使用强光源以确保清晰拍摄花岗岩表面的散斑。调整相机以获得清晰的散斑场景，视场范围为  $150\text{mm}\times 100\text{mm}$ ，图像分辨率为  $0.38\text{mm}/\text{pixel}$ 。高速相机的图像采集频率为  $12300\text{Hz}$ ，记录了混凝土试件从破裂到最终断裂的全过程。

冲击试验结束后，将拍摄到的所有散斑照片选取保存，并使用 DIC 分析软件进行后续处理，得到应变场及破坏过程。采用 DHDAS 动态应变仪对入射杆、透射杆上的应变片和高速红外探测器进行监测，以实现同步监测，系统的采集频率为  $1\text{MHz}$ 。同时，使用 DIC 软件与高速摄像机配合监测从宏观到微观的各种变形。

本次试验，在  $0.6\text{MPa}$  气压下，设置钢纤维掺量不同的 5 种混凝土试件，以模拟在恒定气压下 SPFRC 试件动态力学特征和动态温度变化特征。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 动力学性质分析

为了保证试验结果的准确可靠，根据“二波法”验证动态应力平衡，如图 8 所示，冲击下混凝土的动态应变  $\epsilon_i$  与  $\epsilon_r + \epsilon_t$  基本吻合，表明加载过程中，混凝土试验两侧应变大致保持相同，说明动态应力实现了平衡。

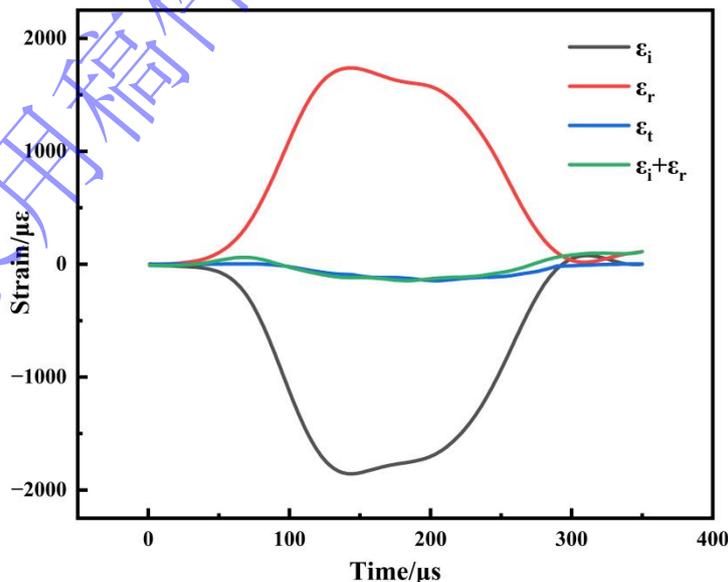


图8 混凝土应变平衡曲线图

Fig.8 Concrete strain equilibrium curve

SPFRC 试件的动态巴西圆盘劈裂试验结果列于表 4。

表 4 SPFRC 试件的动态巴西圆盘劈裂试验结果

Table 4 Dynamic Brazilian disc splitting test results of SPFRC specimens

编号	钢纤维/%	聚丙烯纤维/%	速度/m·s <sup>-1</sup>	应变率/s <sup>-1</sup>	峰值应力/MPa
第 1 组					
1-SF0-PP5	0	0.5	19.56	267.5	25.40
1-SF5-PP5	0.5	0.5	19.00	269.9	27.81
1-SF10-PP5	1	0.5	19.96	269.9	33.18
1-SF15-PP5	1.5	0.5	19.42	268.1	42.29
1-SF20-PP5	2	0.5	19.64	261.6	39.97
第 2 组					
2-SF0-PP5	0	0.5	19.96	265.2	25.55
2-SF5-PP5	0.5	0.5	19.43	267.1	29.01
2-SF10-PP5	1	0.5	19.75	267.2	32.29
2-SF15-PP5	1.5	0.5	19.21	259.8	42.18
2-SF20-PP5	2	0.5	19.00	272.4	40.64
第 3 组					
3-SF0-PP5	0	0.5	19.86	269.1	23.50
3-SF5-PP5	0.5	0.5	/	280.6	28.55
3-SF10-PP5	1	0.5	19.52	267.2	32.85
3-SF15-PP5	1.5	0.5	19.76	268.2	43.25
3-SF20-PP5	2	0.5	19.68	265.4	39.37

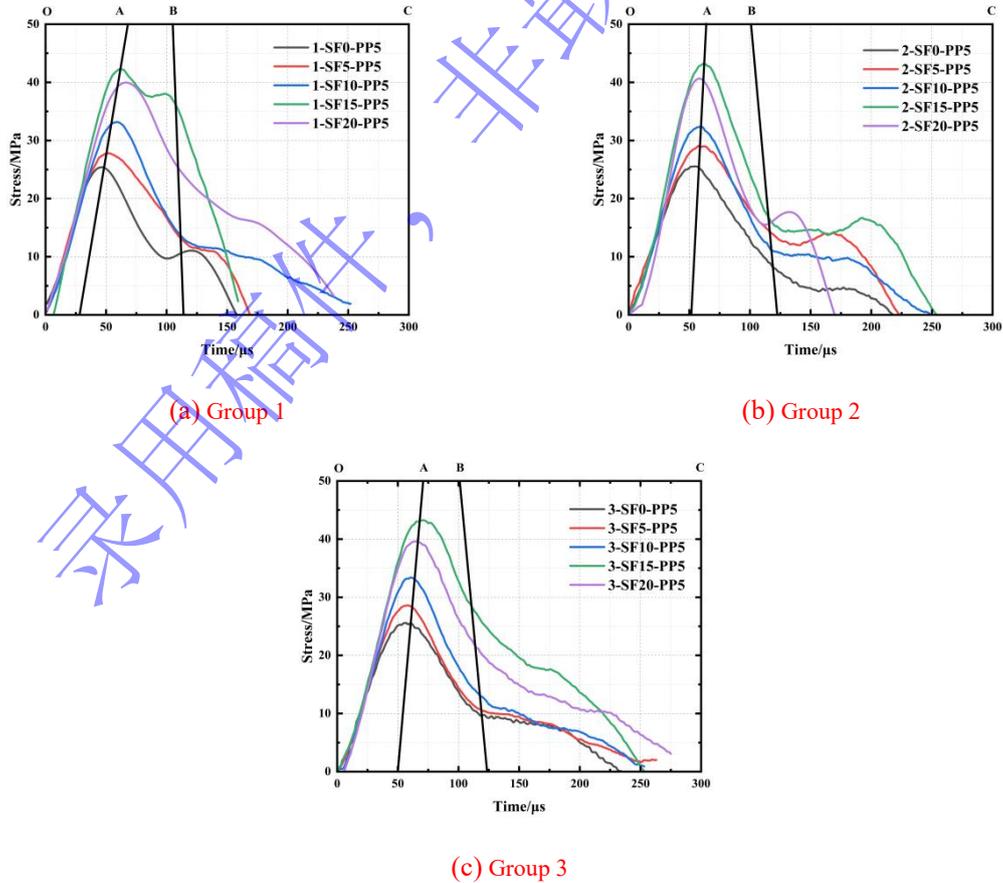


图 9 不同掺量钢纤维试件应力-时程曲线

Fig.9 Stress-time curve of steel fiber specimens with different content of steel fiber

取各组 SPFRC 试件应力-时程曲线进行对比分析, 分析不同掺量钢纤维混凝土试件其应力演化过程, 如图 9 所示。每组混凝土试件应力-时程曲线具有相似的变化规律, 以第 3 组试验为例, 不同掺量钢纤维试件应力-时程曲线大致分为 3 个区域, 分别应力迅速增长区(OA)、应力迅速衰减区(AB)和应力缓慢衰减区(BC)。

由图可知, 随着钢纤维的添加混凝土抗压强度整体性能得到了提升, 同时, 添加了 0.5%的聚丙烯纤维, 使其在冲击后仍具有一定的残余承载力, 峰后力学性能得到显著改善, 延性显著增强。由于冲击速度过大, 未能呈现出以往学者<sup>[51-53]</sup>研究所述的压密阶段, 随之仅有应力迅速增长(OA)阶段, 应力随着时间呈非线性递增, 直至达到峰值应力, 试件明显破坏进入应力迅速衰减(AB)阶段, 其承载能力随应变的增加迅速下降, 应力随之快速降低, 试件迅速破坏, 由于添加了 0.5%的聚丙烯纤维, 使其试件具有一定的残余承载力出现应力缓慢衰减(BC)阶段。

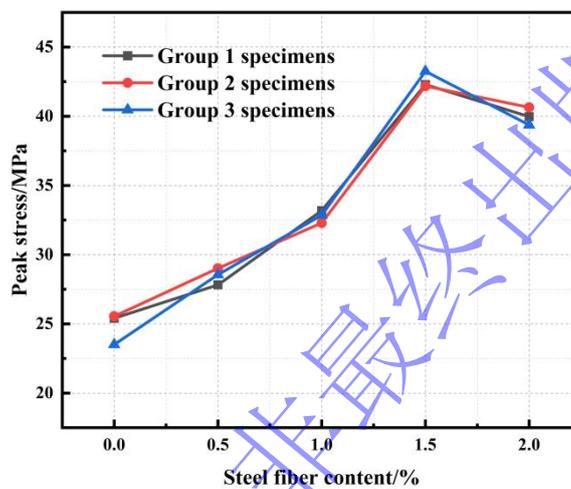


图 10 不同钢纤维掺量下峰值应力折线图

Fig.10 Peak stress line chart under different steel fiber content

由图 10 可知, SPFRC 试件动态抗压强度先变大后减小, 钢纤维体积掺量为 1.5%时动态抗压性能最优。体积掺量 0.5%、1%、1.5%、2%的钢纤维与未掺钢纤维的混凝土相比, 动态抗压强度分别提高了 26.81%、32.18%、41.29%、38.97%, 当钢纤维体积掺量为 2%时抗压强度对比体积掺量为 1.5%时略有下降, 可能由于钢纤维含量过多, 导致 SPFRC 试件内部结构不均匀, 使得凝胶材料、砂浆和钢纤维未能很好的粘接, 导致其抗压强度不升反降, 而钢纤维体积掺量 0.5%~1.5%时, 能够有效的提升混凝土的抗压强度。

### 3.2 破坏过程与破坏形态分析

在相同气压下, 不同掺量钢纤维混凝土试件破坏形态和时程关系, 如图 11 所示。由无钢纤维掺量试件 (SF0-PP5) 对比可知, 由于聚丙烯纤维的掺量混凝土试件在 81.3-162.6 $\mu$ s 期间形态较为完整, 随后在较高冲击下, 试件具有多裂缝开裂的特点, 且断面仍有部分聚丙烯纤维连接。随着钢纤维掺量的增加, 试件的破碎程度越大, 在钢纤维掺量 0.5-1.5%时, 在 81.3-162.6 $\mu$ s 期间, 有明显的主裂纹, 且在钢纤维较少处破裂, 由 243.9-325.2 $\mu$ s 期间可以看出, 随着钢纤维掺量增加, 显著减少了中间裂纹数量和宽度。在钢纤维掺量 2%是在 81.3 $\mu$ s 时基本无明显裂纹, 随后在与压杆接触端钢纤维较少处出现破裂, 中间裂纹宽度也最小。可以看出随着钢纤维从 0.5%增加到 2%, 砂浆对骨料表面的粘结作用变小。

在无钢纤维试件中, 试件破坏主要表现为裂纹的快速扩展, 且裂缝较多、较宽, 聚丙烯纤维起到了一定的延展作用但不足以阻止破坏。在随着钢纤维掺量的增加, 试件的破坏演化过程明显受到控制,

裂纹扩展速度减缓，裂纹形态变得更加集中和受控。钢纤维通过其桥接作用在裂纹之间形成了应力传递通道，有效减轻了裂纹扩展的幅度，尤其是在较高掺量时，裂纹的宽度和数量都显著降低。这种纤维-基体之间的相互作用在冲击载荷下尤为明显，表现出优异的抗裂性能。

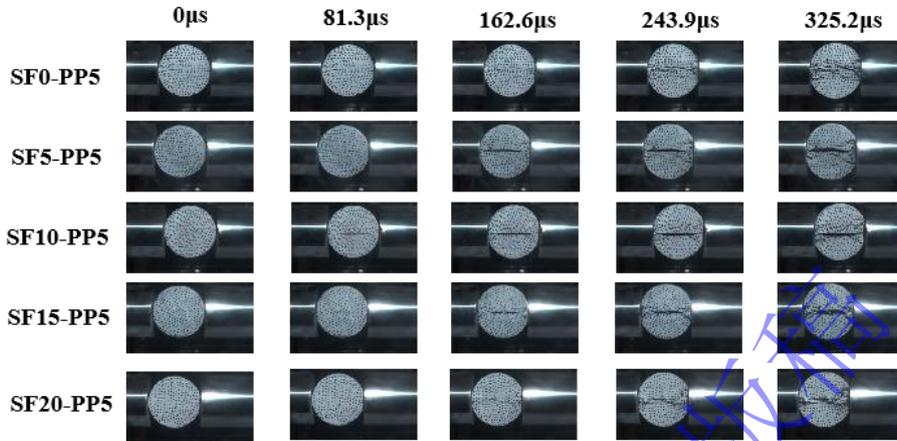


图 11 试验劈裂冲击时程破坏情况

Fig. 11 Time-history failure of splitting impact test

由图 12 可见，不同掺量钢纤维混凝土试件破坏后的形态存在显著差异。在未掺入钢纤维的情况下，聚丙烯纤维通过形成有效的纤维网状结构，分散应力并减少应力集中，使破坏后的碎块较大且整体性较好，保持相对完整。然而，随着钢纤维掺量的增加，尽管块状碎片未显著增多，但粉末状碎片却明显增加。主要因于钢纤维与混凝土基体结合后形成的网状结构，该结构在高冲击载荷下增加了混凝土的韧性，并改变了裂纹扩展方式。

具体来说，高掺量钢纤维通过桥接裂纹并分散应力，抑制了裂纹沿特定路径的扩展，使裂纹难以形成大块状碎片，而是以更细小、粉末状形式破裂。此外，钢纤维与脆性混凝土基体之间的粘结效应导致裂纹在微观层面被分散，进一步耗散了冲击能量。因此，在钢纤维交接作用和混凝土基体脆性的共同作用下，试件在受拉开裂时更倾向于粉末化破碎。

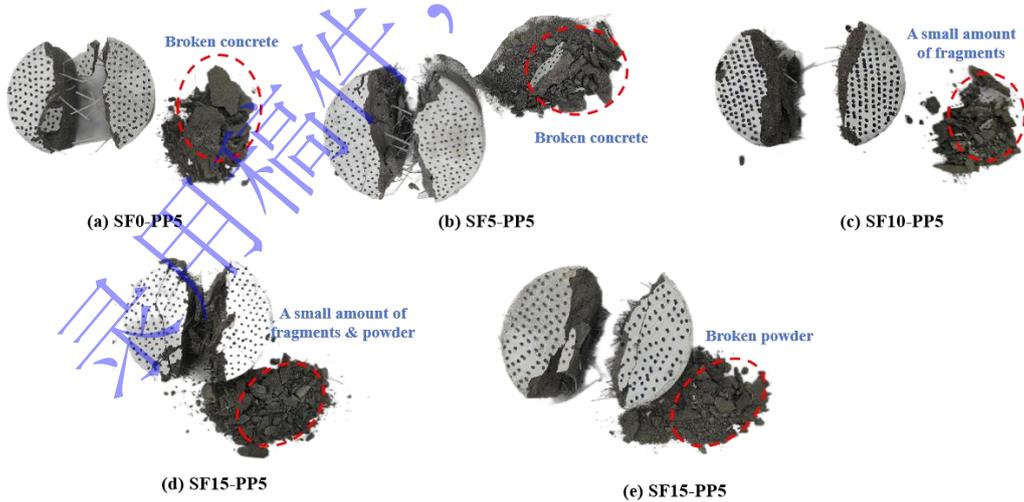


图 12 混凝土试件破坏形态

Fig.12 Failure mode of concrete specimen

### 3.3 DIC 分析

为验证动态加载下劈裂是否中心起裂，利用超高速摄像机以 12300 Hz 拍摄断裂图像，并利用 DIC 方法计算应变场、位移场演化。由于 SPFRC 试件破坏迅速仅在 81.3μs、162.6μs 时 DIC 能有效反映试

件位移、应变情况。为了更好的比较不同掺量钢纤维在冲击过程中位移应变情况，选取试件径向方向的位移场和应变场。

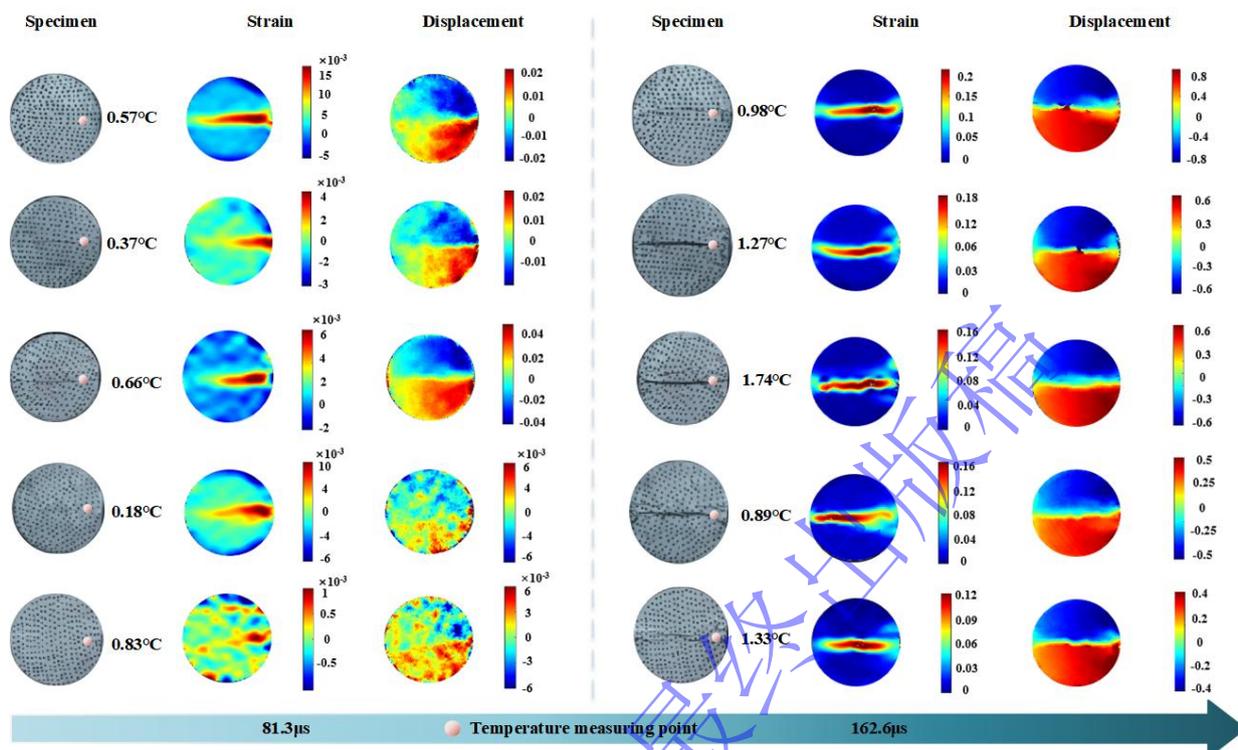


图 13 混凝土试件在件 DIC 结果示意图

Fig.13 DIC results of concrete specimen

取圆盘中心点竖直方向(即试件的拉伸应力主轴)应变,如图 13 所示,在混凝土试件  $81.3\mu\text{s}$  时,尽管图 11 中未显示明显裂纹,但拉应变从加载方向开始扩展,此时数值较小。到  $162.6\mu\text{s}$  时,裂纹开始形成并逐渐加宽,拉应变显著增大。由此可知,应变在圆盘中心靠近加载方向的一端(右端)最先增大,出现应力集中。应力集中极有可能引发局部温度的快速上升。对比不同钢纤维掺量的混凝土试件,随着钢纤维掺量的增加,在  $162.6\mu\text{s}$  时的峰值应变逐渐减小,表明钢纤维的引入能够有效抑制裂缝扩展。当钢纤维含量增加时,形成更致密的纤维网络结构,使钢纤维在受力时能更好地桥接裂纹,有效地分散应力集中区域的能量,抑制裂纹的扩展和宽度增加,从而减少拉应变峰值的出现。

从位移场分析可知,SPFRC 试件在 SHPB 劈裂冲击下从中间破碎,发生上下方向的位移。这种位移行为受钢纤维桥接作用的影响,钢纤维分布在混凝土基体中形成了连接网络,阻止了裂纹的快速扩展和整体断裂,减缓了破坏速度。随着钢纤维掺量的增加,向上下位移量减小,表明了钢纤维的增强效果,使混凝土表现出更好的抗裂性能和能量耗散能力。

温度场的变化则揭示了热力耦合效应。在  $81.3\mu\text{s}$  时,温度虽然有所增加,但幅度较小,仅表现为局部轻微升温,这与裂纹形成的初期阶段相对应。而在  $162.6\mu\text{s}$  时,随着裂纹扩展和裂缝逐渐贯通,摩擦和剪切效应显著增加,导致裂纹处的温度迅速升高。

结合这三种场的变化可以看出,钢纤维在冲击载荷下起到了多重作用:不仅有效桥接裂纹、分散应力集中、增强抗裂性能,还减缓了裂纹的扩展速度,降低了位移。钢纤维掺量的合理控制使混凝土展现出更均衡的力学性能与热响应,揭示了在冲击破坏过程中,力学行为和热效应的密切耦合关系。

### 3.4 动态温度分析

#### 3.4.1 动态温度效应

混凝土受冲击破坏引起温度变化实际上是一种能量累积及其转化的复杂效应,其中一部分机械能

转化为热能，而混凝土是典型的脆性材料，在受冲击时会产生大量的微裂纹，而伴随微裂纹的产生，破裂面会发生错动和摩擦，因而有摩擦热效应产生，必然导致温度上升。对于不同性质的裂纹，其摩擦热效应也会有所不同。为了研究冲击荷载下混凝土裂纹处动态温度效应，通过搭建的高速红外测温系统，旨在实时监测混凝土破裂时瞬间裂纹处温度变化情况。

为了深入分析在受冲击时，混凝土裂纹处温度演化规律，对整个冲击过程(约 10000 $\mu$ s)温度进行分析。

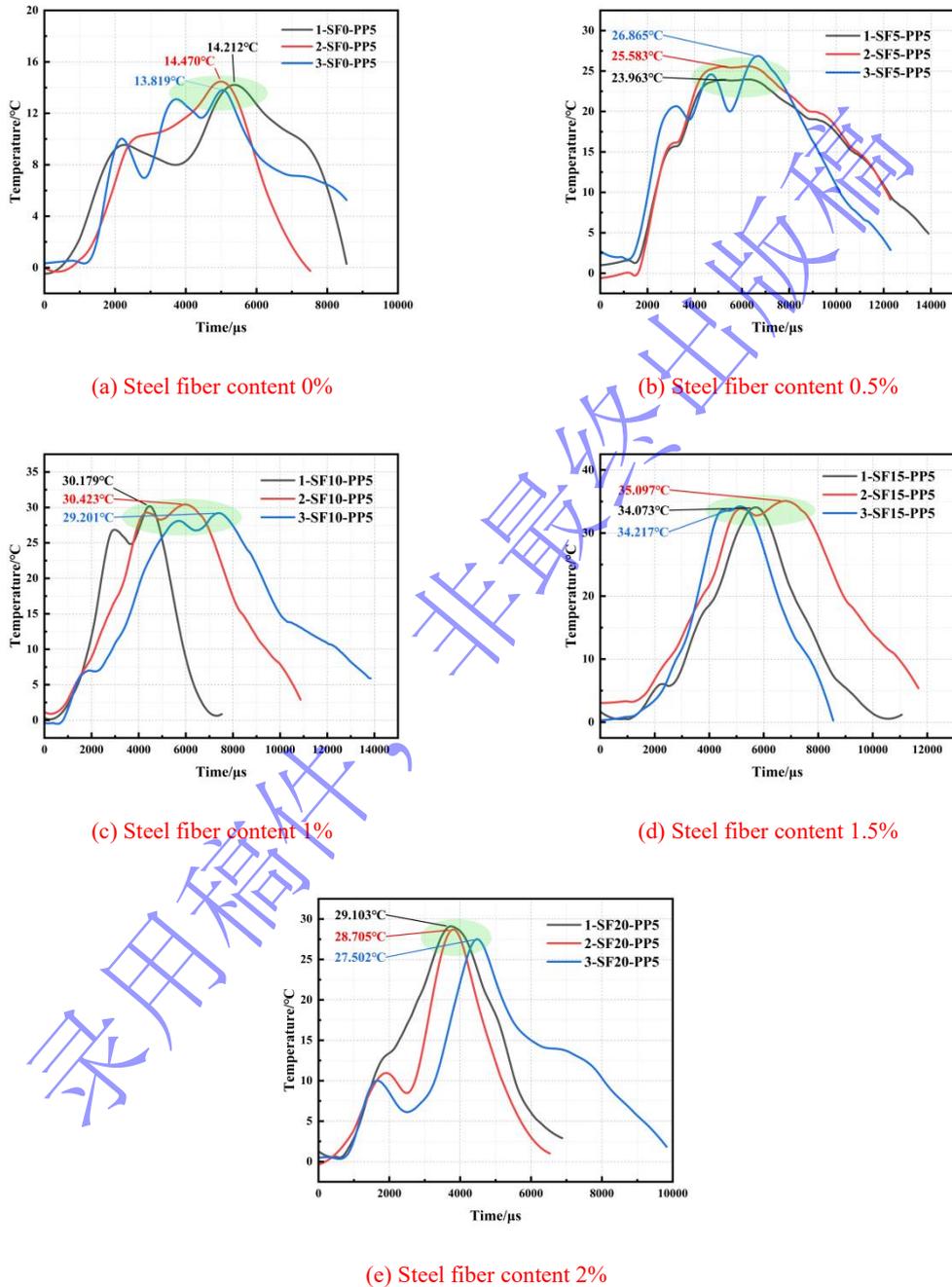


图 14 不同钢纤维掺量混凝土试件动态温度效应

Fig.14 Dynamic temperature effect of concrete specimens with different steel fiber content

钢纤维混凝土(SPFRC)试件在冲击荷载作用下表现出明显的温度变化趋势。由于混凝土内部存在空隙，受冲击后裂纹处的应力分布不均匀，导致温度波动较大。此外，不同钢纤维掺量的混凝土内部

空隙分布不同，影响了裂纹处的吸热效应，最终造成温度变化的差异。尽管具体温度有所不同，但整体趋势大致相同，即在冲击后温度迅速上升，随后在一定范围内保持平稳波动，再快速下降。

SPFRC 试件在受到冲击后温度随之上升。在升温过程中，由于混凝土内部空隙和钢纤维掺入，使其产生的吸热效应，导致温度略微下降。当混凝土破坏到一定程度时，温升和吸热效应相互制约，导致出现高温保持阶段(图中 14 中绿色区域)。此时定义在变化峰值温度  $T_m$  的 95% 为高温保持阶段，即在高温保持阶段的最低温度为高温保持温度  $T_c$ ，高温保持阶段所处的时间为高温保持时间  $t_c$ ，高温保持温度  $T_c$  计算如式 4 所示。

$$T_c = \frac{T_{m1} + T_{m2} + \dots + T_{mn}}{n} \times 95\% \quad (4)$$

钢纤维掺量由 0%-2% 高温保持时间  $t_c$  依次持续了约 1500 $\mu$ s、3000 $\mu$ s、2500 $\mu$ s、1800 $\mu$ s、700 $\mu$ s，钢纤维掺量与高温保持时间  $t_c$  呈非线性关系。由于钢纤维掺量增多，混凝土空隙较多，吸热效应的程度提高，导致高温保持阶段时间减少。如图 14(e) 所示钢纤维掺量为 2% 的混凝土，由于大量的钢纤维导致凝胶材料、砂浆和纤维之间未能很好的粘接，混凝土中存在空隙气体逸出产生吸热效应，从而引起温度下降，导致温度达到峰值后迅速下降，高温保持阶段非常短暂。

表 5 SPFRC 试动态温度试验结果  
Table 5 Dynamic temperature test results of SPFRC

	钢纤维掺量/%	均值温度 $T_d/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_m/^\circ\text{C}$	峰值均值温度 $T_{md}/^\circ\text{C}$	高温保持时间 $t_c/\mu\text{s}$
1-SF0-PP5	0	13.685	14.212		1462
2-SF0-PP5	0	13.241	14.470	14.167	1415
3-SF0-PP5	0	13.435	13.819		1524
1-SF5-PP5	0.5	23.443	23.963		3456
2-SF5-PP5	0.5	24.497	25.583	25.470	2859
3-SF5-PP5	0.5	23.834	26.865		2613
1-SF10-PP5	1	27.097	30.179		2501
2-SF10-PP5	1	28.250	30.423	29.934	3029
3-SF10-PP5	1	27.774	29.201		2809
1-SF15-PP5	1.5	33.536	34.073		1020
2-SF15-PP5	1.5	33.831	35.097	34.462	1499
3-SF15-PP5	1.5	33.645	34.217		3058
1-SF20-PP5	2	57.652	29.103		1053
2-SF20-PP5	2	56.942	28.705	28.437	674
3-SF20-PP5	2	25.241	27.502		523

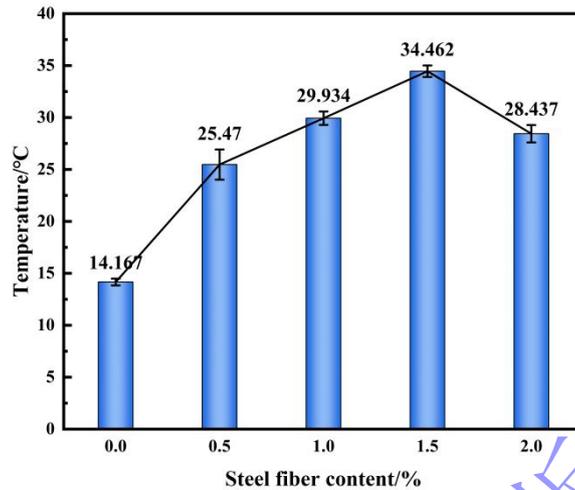


图 15 不同钢纤维掺量混凝土峰值温度

Fig.15 Peak temperature of concrete with different steel fiber content

结合表 5 和图 15 分析可知,在整个冲击过程中,峰值温度和峰值应力呈现相似规律,在钢纤维掺量为 0%-1.5%时,峰值温度随着钢纤维掺量的增加而上升,由于适量的钢纤维在冲击过程中起到桥接作用,阻止了裂纹的快速扩展,使裂纹集中在局部区域,产生较高的摩擦和剪切效应,进而导致局部温度升高。随着钢纤维掺量的增加,裂纹扩展受到更有效的抑制,摩擦和破坏能量更多地转化为热能,因而温度达到更高的峰值。

然而,当钢纤维掺量达到 2%时,峰值温度略有下降。由于较高的纤维掺量导致混凝土内部纤维分布不均匀,部分区域形成了较多的空隙。高纤维掺量虽然能够抑制部分裂纹扩展,但在高冲击下,纤维和基体的粘结作用减弱,导致混凝土破碎成较多小颗粒,热量更易散失。因此,温度上升受到抑制,峰值温度出现下降。

在冲击过程中混凝土最大温度升高了 34.46℃,而在传统的混凝土裂纹计算<sup>[54]</sup>和混凝土本构<sup>[55]</sup>中,通常忽略了混凝土破坏过程中温度变化的影响,这种忽略会导致一定程度的误差。尤其是在应力与温度相互作用明显的情况下,忽视温度变化不仅会影响对裂纹扩展行为的准确判断,还会对能量耗散和整体力学性能的评估产生偏差。因此,本次试验通过监测裂纹处的温度变化,提供了重要的依据,有助于更全面地分析裂纹扩展的动力学过程。这结果表明,在混凝土动态性能的研究中,将温度变化纳入分析对于提高计算精度和准确预测裂纹扩展具有重要意义。

### 3.4.2 热力效应

如图 16 为 SPFRC 试样得到的典型霍普金森压杆波形图和动态温度波形图,在应力波脉冲到达试样的瞬间,温度信号仅有小幅度上升,随后温度基本保持不变,在约 180μs 后温度开始明显上升,由于混凝土密度较低和多孔结构其导热系数较低,在受到冲击作用时,温度变化与力学响应之间的传递和反馈并非瞬间完成,而是相对于力存在滞后效应。

两种信号在时间上相匹配,进一步证实了力与温度变化之间的关联性,这种由混凝土受冲击破坏从而引温度变化的现象被称为热力耦合效应。

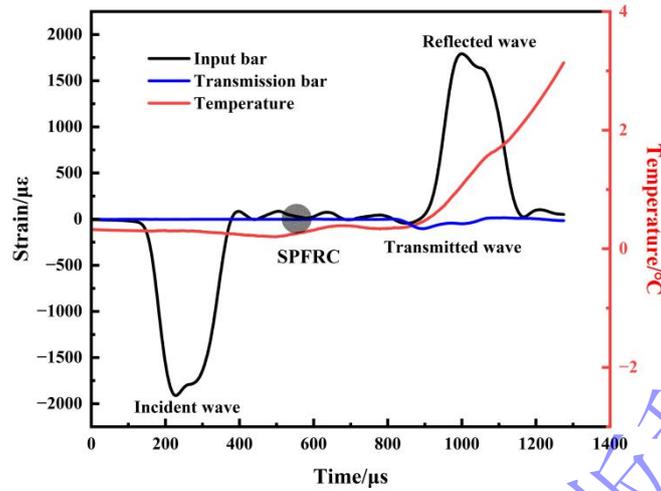


图 16 SPFRC 试样霍普金森杆和变化温度波形图

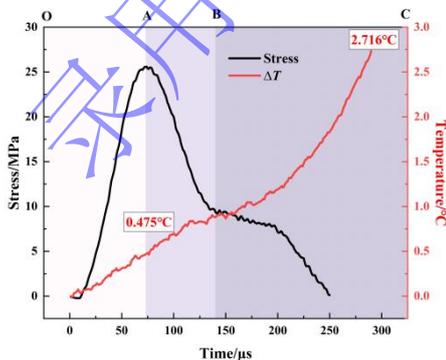
Fig.16 Waveform diagram of SPFRC specimen on the hopkinson bar and temperature variation

如图 17 所示，SPFRC 试样在受冲击后温度变化呈现“台阶状”，在加载初期升温较为缓慢；在混凝土达到峰值应力后迅速升温。根据 SPFRC 试样应力-时程结合变化温度 $\Delta T$ -时程大致可将温度变化分为 2 个阶段。

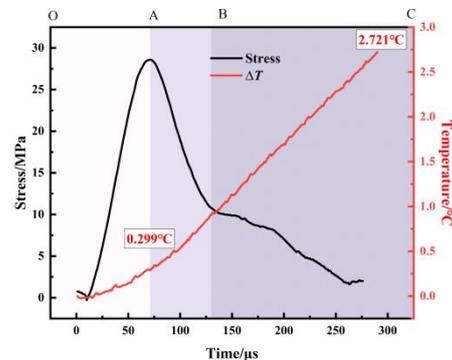
①温度缓慢上升阶段，与应力迅速增长(OA)区域相对于，此时混凝土表面出现细微裂纹，在裂纹处温度上升较为缓慢。此时裂纹扩展较小，摩擦效应并不显著，因此温度上升缓慢，显示出混凝土在承载初期的稳定性。

②温度迅速上升阶段，与应力迅速衰减(AB)区域和应力缓慢衰减(BC)区域相对应。当混凝土试件达到峰值应力并逐渐破裂后，裂纹增多且贯通，摩擦效应显著增强，导致裂纹处的温度急剧上升。这表明当混凝土失去承载能力时，摩擦和剪切作用显著，裂纹区域迅速升温，进一步验证了裂纹扩展与温度变化的密切关联。

在整个冲击过程中，混凝土试件的温度呈现持续上升趋势。由于混凝土导热系数较低，热量难以及时与外界交换，尽管试件的应力开始卸载，但温度仍未下降。在峰值应力之后，混凝土并不会立即完全破坏，其强度逐渐下降，而裂纹的摩擦效应持续产生热量，导致温度继续上升，形成滞后效应。



(a) SF0-PP5



(b) SF5-PP5

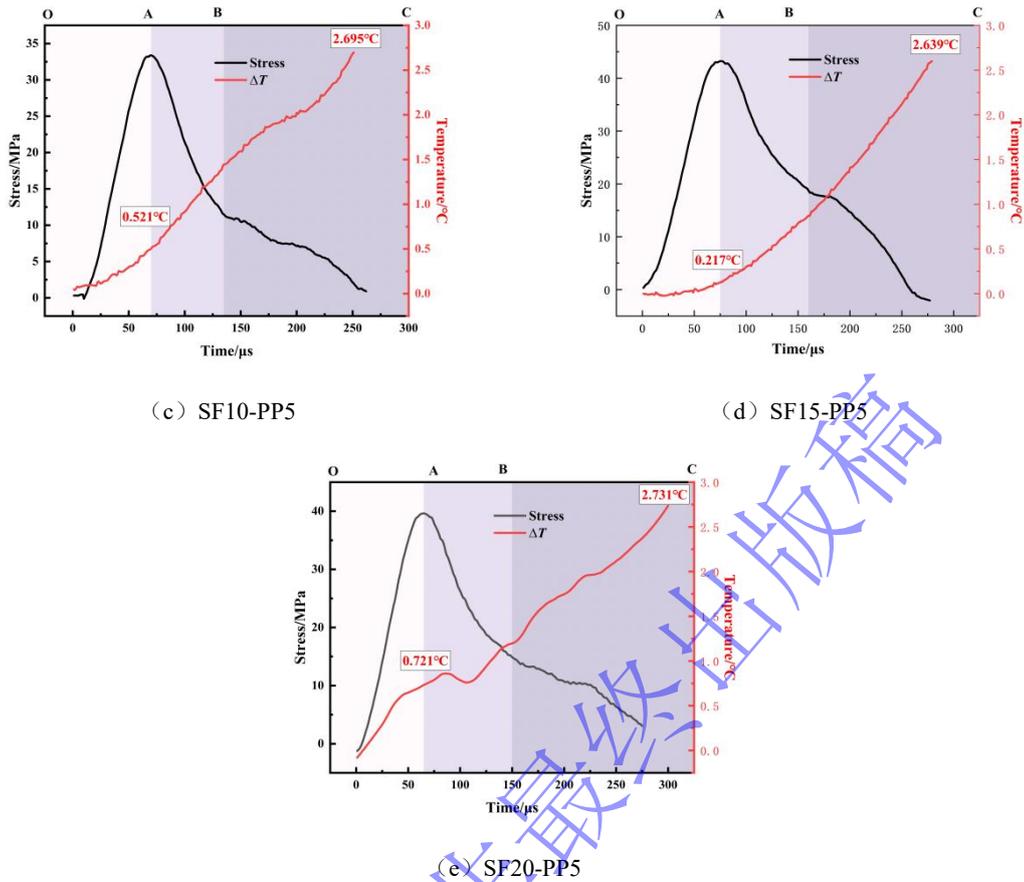


图 17 混凝土试件应力温度-时程曲线

Fig. 17 Concrete specimen stress-temperature time history curve

进一步分析发现,在峰值应力时,不同钢纤维掺量对温度变化并未表现出显著规律。在  $300\mu\text{s}$  内,温度变化  $\Delta T$  基本保持在  $2.7^\circ\text{C}$  左右,说明温度的变化并不会随着钢纤维掺量的增加而显著变化。这一现象表明,尽管钢纤维可以改善混凝土的力学性能,但对温度的影响有限,裂纹处的温度上升主要由裂纹扩展与摩擦效应决定。

从热力耦合效应的角度分析,混凝土在承受冲击载荷时,力学应力和温度变化是相互作用的。应力的增长促进了裂纹的产生和扩展,而裂纹的摩擦和剪切作用又进一步导致了局部温度的上升。因此,在分析混凝土的破坏过程时,不仅要考虑力学响应,还需关注温度变化,才能全面理解混凝土在冲击下的破坏机理。

## 4 结论

本文主要研究目的是搭建高速红外测温系统对不同钢纤维掺量的 SPFRC 试件的动力学、动态温度进行分析,旨在复杂条件下难以监测应力应变时,通过红外测温监测混凝土冲击破碎过程,为监测裂纹处温度变化情况来判断裂纹扩展情况提供了依据。具体得出以下结论:

(1)搭建高速红外测温系统,其响应速度能够达到微秒级,对其进行静态标定,拟合算法得到了混凝土温度拟合曲线及方程,并将高速红外测温系统与 SHPB 试验结合,用于监测混凝土裂纹处温度变化,为后续受冲击条件下混凝土裂纹处温度监测奠定了研究基础。

(2)不同钢纤维掺量的 SPFRC 试件在冲击载荷下表现出显著的力学性能差异。随着钢纤维掺量的增加,混凝土试件的抗冲击性能和残余强度均得到了提升,裂纹扩展得以抑制。掺量为 1.5% 的钢纤维混凝土表现出最佳力学性能,然而,当掺量达到 2% 时,由于内部空隙增加,力学性能略有下降。破

坏过程显示, 钢纤维能够有效增强裂纹扩展的抵抗能力, 使混凝土在峰后阶段具有较好的残余承载力。

(3)冲击荷载下, SPFRC 试件的动态温度变化呈现出明显的“台阶状”特征。温度变化可以分为两个阶段: 第一阶段是温度缓慢上升, 与应力迅速增长阶段相对应, 此时裂纹尚未完全形成; 第二阶段是温度迅速上升, 与应力衰减和裂纹扩展相对应。当混凝土裂纹扩展并贯通后, 摩擦和剪切效应加剧, 导致裂纹处温度急剧上升, 形成动态温度效应。为监测裂纹处温度变化情况判断裂纹扩展情况提供了依据。

(4)结合 SHPB 的应力-时程曲线, 进一步证实了力学应力与温度变化之间的热力耦合效应, 热力耦合效应对理解裂纹扩展和破坏机理具有重要意义。在冲击后 SPFRC 试件在  $300\mu\text{s}$  内温度整体呈现上升趋势, 由于温度的滞后效应, 并没有因卸压而导致温度下降; 在混凝土峰值应力时, 不同掺量钢纤维温度变化并未表现出明显规律, 在  $300\mu\text{s}$  内变化温度  $\Delta T$  基本保持在  $2.7^\circ\text{C}$ , 并未随着钢纤维掺量改变而变化。

## 参考文献

- [1] RUIZ G, DE LA ROSA A, ALMEIDA L C, et al. Dynamic mixed-mode fracture in SCC reinforced with steel fibers: an experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 129: 101-111. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.03.003.
- [2] TÜRKMEN İ, KANTARCI A. Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(6): 2378-2383. DOI:10.1016/j.buildenv.2006.06.002.
- [3] FRAZÃO C, CAMÕES A, BARROS J, et al. Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 80: 155-166. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.061.
- [4] SUESCUM-MORALES D, RÍOS J D, DE LA CONCHA A M, et al. Effect of moderate temperatures on compressive strength of ultra-high-performance concrete: A microstructural analysis [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 140: 106303. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106303.
- [5] DATCU S, IBOS L, CANDAU Y, et al. Improvement of building wall surface temperature measurements by infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(6): 451-467. DOI: 10.1016/j.infrared.2005.01.001.
- [6] RAMEZANIANPOUR A A, ESMAEILI M, GHAHARI S A, et al. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44: 411-418. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.
- [7] REN G, GAO X, ZHANG H. Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104555. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104555.
- [8] PARK J-J, YOON D-Y, KIM S, et al. Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103401. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103401.
- [9] KODUR V K R, CHENG F-P, WANG T-C, et al. Effect of Strength and Fiber Reinforcement on Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 253-259. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(253).
- [10] XU L, DENG F, CHI Y. Nano-mechanical behavior of the interfacial transition zone between steel-polypropylene fiber and cement paste [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145: 619-638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.035.
- [11] 徐礼华, 邓方茜, 徐浩然, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱抗震性能试验研究 [J]. *土木工程学报*. 2016, 49(01): 3-13. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.01.002.

- XU L H, DENG F Q, XU H R, et al.. On seismic behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2016,49 ( 01 ) : 3-13. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.01.002.
- [12] 王秋维, 梁林, 史庆轩. 混杂钢纤维超高性能混凝土轴拉力学性能及本构模型 [J]. 复合材料学报. 2024, 41(01): 383-394. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.002.
- WANG Q W, LIANG L, SHI Q X. Mechanical properties and constitutive model of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber under axial tension[J]. Acta Materiae Compositae Sinica. 2024, 41 ( 01 ) : 383-394. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.002.
- [13] WANG Z, BAI E, LIANG L, et al. Effect of ceramic fiber on mechanical properties of concrete with different strength grades and its strengthening and toughening behaviors under impact load [J]. Construction and Building Materials, 2023, 402: 132993. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132993.
- [14] 张超峰, 管仲国. 混凝土结构冲击的研究现状; proceedings of the 2021 第五届土木工程国际会议 [C]. 中国江苏南京, 2022 . DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.014929.
- ZHANG C F, GUAN Z G. Research status of concrete structure impact ; proceedings of the 2021 5th International Conference on Civil Engineering [C]. Nanjing, Jiangsu, China, 2022. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.014929.
- [15] LI B, CHI Y, XU L, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 80-94. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.202.
- [16] ZHOU X, XIE Y, LONG G, et al. Effect of surface characteristics of aggregates on the compressive damage of high-strength concrete based on 3D discrete element method [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124101. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124101.
- [17] YU Y, ZHENG Y, ZHAO X-Y. Mesoscale modeling of recycled aggregate concrete under uniaxial compression and tension using discrete element method [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121116. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121116.
- [18] CAO K, DONG F, YU Y, et al. Infrared radiation response mechanism of sandstone during loading and fracture process [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 126: 103974. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103974.
- [19] LI X, LI Z, YIN S, et al. Experimental study on infrared thermal response characteristics of water-bearing concrete under drop hammer impact [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 135: 104899. DOI: 10.1016/j.infrared.2023.104899
- [20] 吴立新, 李国华, 吴焕萍. 热红外成像用于固体撞击瞬态过程监测的实验探索 [J]. 科学通报 . 2001, (02): 172-176. DOI: 10.1360/csb2001-46-2-172.
- WU L X, LI G H, WU H P. Experimental exploration of thermal infrared imaging for monitoring the transient process of solid impact [ J ]. Chinese Scientific Bulletin, 2001, ( 02 ) : 172-176. DOI: 10.1360/csb2001-46-2-172.
- [21] 张宗贤, 喻勇, 赵清. 岩石断裂韧度的温度效应 [J]. 中国有色金属学报 . 1994, (02): 7-11. DOI: 10.19476/j.yssxb.1004.0609.1994.02.003.
- ZHANG Z X, YU Y, ZHAO Q. Temperature effect of rock fracture toughness [ J ]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 1994, ( 02 ) : 7-11. DOI: 10.19476/j.yssxb.1004.0609.1994.02.003.
- [22] 张志镇, 高峰, 刘治军. 温度影响下花岗岩冲击倾向及其微细观机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报 . 2010, 29(08): 1591-1602.
- ZHANG Z Z, GAO F, LIU Z J. Research on rockburst proneness and its microcosmic mechanism of granite considering temperature effect [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2010, 29 ( 08 ) : 1591-1602.
- [23] ALGOURDIN N, PLYIA P, BEAUCOUR A L, et al. Effect of fine and coarse recycled aggregates on high-temperature behaviour and residual properties of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127847. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127847.
- [24] HIASA S, BIRGUL R, NECATI CATBAS F. A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges [J]. Computers & Structures, 2017, 190: 205-18. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.05.011.

- [25] YIN S, LI Z, SONG D, et al. Experimental study on the infrared precursor characteristics of gas-bearing coal failure under loading [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(5): 901-12. **DOI:** 10.1016/j.ijmst.2021.07.003.
- [26] GAO Q, MA L, LIU W, et al. Research on the denoising method of infrared thermogram during rock fracture [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104651. **DOI:** 10.1016/j.infrared.2023.104651.
- [27] ICHI E, DORAFSHAN S. Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks [J]. *Automation in Construction*, 2022, 142: 104523. **DOI:** 10.1016/j.autcon.2022.104523.
- [28] YIN S, LI Z, WANG E, et al. The infrared thermal effect of coal failure with different impact types and its relationship with bursting liability [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 138: 105263. **DOI:** 10.1016/j.infrared.2024.105263.
- [29] 吴立新, 钟声, 吴育华, 等. 落球撞击岩石热红外辐射温度的时延特征 [J]. *中国矿业大学学报*. 2005, (05): 557-63. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-1964.2005.05.004.
- WU L X, ZHONG S, WU Y H, et al. Time dependent features of thermal infrared radiation temperature of rock impacted by free-falling steel ball [ J ]. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2005, ( 05 ) : 557-63. **DOI:** 10.3321/j.issn: 1000-1964.2005.05.004.
- [30] 吴立新, 吴育华, 钟声, 等. 岩石撞击的热红外成像探测研究进展与方向 [J]. *岩石力学与工程学报*. 2006, (11): 2180-2186. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.11.003.
- WU L X, WU Y H, ZHONG S, et al. Research progress and direction of detection on rock impactation with thermal infrared imaging [ J ]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2006, ( 11 ) : 2180-2186. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-6915.2006.11.003.
- [31] 刘善军, 吴立新, 张艳博. 岩石破裂前红外热像的时空演化特征 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*. 2009, 30(07): 1034-1038. **DOI:** 10.3969/j.issn.1005-3026.2009.07.029.
- LIU S J, WU L X, ZHANG Y B. Temporal-Spatial Evolution Features of Infrared Thermal Images Before Rock Failure [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*. 2009,30 ( 07 ) : 1034-1038. **DOI:** 10.3969/j.issn.1005-3026.2009.07.029.
- [32] 邓志毅, 张东胜, 安里千. 热探测法监测岩石应力变化的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*. 2006, (05): 623-627. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-1964.2006.05.012.
- DENG Z Y, ZHANG D S, AN L Q. Experimental of Monitoring Stress Variation of Rock Using a Thermal Detection [ J ].*Journal of China University of Mining & Technology*.2006, ( 05 ) : 623-627. **DOI:** 10.3321/j.issn:1000-1964.2006.05.012.
- [33] SUN X, XU H, HE M, et al. Experimental investigation of the occurrence of rockburst in a rock specimen through infrared thermography and acoustic emission [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93: 250-259. **DOI:** 10.1016/j.ijrmms.2017.02.005.
- [34] LOU Q, HE X. Experimental study on infrared radiation temperature field of concrete under uniaxial compression [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 90: 20-30. **DOI:** 10.1016/j.infrared.2018.01.033.
- [35] 周子龙, 刘洋, 蔡鑫, 等. 冲击荷载下砂岩的红外辐射特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*. 2022, 53(07): 2555-2562. **DOI:** 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.07.015.
- ZHOU Z L, LIU Y, CAI X, et al. Infrared radiation characteristics of sandstone exposed to impact loading [ J ]. *Journal of Central South University ( Natural Science )*. 2022, 53 ( 07 ) : 2555-2562. **DOI:** 10.11817/j.issn.1672-7207. 2022.07.015.
- [36] TIAN H, LI Z, YIN S, et al. Research on infrared radiation response and energy dissipation characteristics of sandstone crushing under impact load [J]. *Engineering Geology*, 2023, 322: 107171. **DOI:** 10.1016/j.enggeo.2023.107171.
- [37] CHEN H Y, CHEN C. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126: 130-137. **DOI:** 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.027.

- [38] PEDRAM M, TAYLOR S, HAMILL G, et al. Experimental evaluation of heat transition mechanism in concrete with subsurface defects using infrared thermography [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 360: 129531. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129531.
- [39] HODOWANY J. On the conversion of plastic work into heat[C]. 1997 .
- [40] MASON J J, ROSAKIS A J, RAVICHANDRAN G. On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic work converted to heat: an experimental study using high speed infrared detectors and the Kolsky bar [J]. *Mechanics of Materials*, 1994, 17(2): 135-145. DOI: 10.1016/0167-6636(94)90054-X.
- [41] POTDAR Y K, ZEHNDER A T. Measurements and Simulations of Temperature and Deformation Fields in Transient Metal Cutting [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003, 125(4): 645-655. DOI: 10.1115/1.1596571.
- [42] NIETO-FUENTES J C, OSOVSKI S, RITTEL D. High-speed infrared thermal measurements of impacted metallic solids [J]. *MethodsX*, 2020, 7: 100914. DOI: 10.1016/j.mex.2020.100914.
- [43] 夏源明, 饶世国, 杨报昌. 红外瞬态测温装置及其在冲击拉伸试验中的应用 [J]. *实验力学*, 1990, (02): 170-177.  
XIA Y M, RAO S G, YANG B C. An infrared transient temperature measuring apparatus and its application to the tensile impact testing [ J ]. *Journal of Experimental Mechanics*. 1990, ( 02 ) : 170-177.
- [44] 刘永贵, 唐志平, 崔世堂. 冲击载荷下瞬态温度的实时测量方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(04): 471-475. DOI:10.11883/1001-1455(2014)04-0471-05.  
LIU Y G, TANG Z P, CUI S T. Real-time measuring methods for transient temperature under shock loading [ J ]. *Explosion and Shock Waves*. 2014, 34 ( 04 ) : 471-475. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)04-0471-05.
- [45] ZHANG T, GUO Z R, YUAN F P, et al. Investigation on the plastic work-heat conversion coefficient of 7075-T651 aluminum alloy during an impact process based on infrared temperature measurement technology [J] *Acta Mechanica Sinica* . 2018, 34(02): 327-333. DOI: 10.1007/s10409-017-0673-8.
- [46] R.D.小哈德逊. 红外系统原理 [M]. 红外系统原理, 1975.  
R. D. Hudson, Jr., *Principles of Infrared Systems* [ M ]. *Principles of Infrared Systems*, 1975.
- [47] 晏敏, 颜永红, 曾云, 等. 非接触式红外测温原理及误差分析 [J]. *计量技术*. 2005, (01): 23-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0771.2005.01.009.  
YAN M, YAN Y H, ZENG Y, et al. Principle and error analysis of non-contact infrared temperature measurement [ J ]. *Measurement Technique*. 2005, ( 01 ) : 23-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0771.2005.01.009.
- [48] ZEHNDER A T, GUDURU P R, ROSAKIS A J, et al. Million frames per second infrared imaging system [J] *Review of Scientific Instruments* . 2000, 71(10): 3762-3768. DOI: 10.1063/1.1310350.
- [49] 宋力 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. *爆炸与冲击*. 2005, (04): 368-73. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2005.04.014.  
SONG L, HU S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [ J ]. *Explosion and Shock Waves*. 2005, ( 04 ) : 368 - 73. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2005.04.014.
- [50] 赵毅鑫, 肖汉, 黄亚琼. 霍普金森杆冲击加载煤样巴西圆盘劈裂试验研究 [J]. *煤炭学报*. 2014, 39(02): 286-291. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.2011.  
ZHAO Y X, XIAO H, HUANG Y Q. Dynamic split tensile test of Brazilian disc of coal with split Hopkinson pressure bar loading [ J ]. *Journal of China Coal Society*. 2014,39 ( 02 ) : 286-291. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.2011.
- [51] LI J, YANG L, XIE H, et al. Research on impact toughness and crack propagation of basalt fiber reinforced concrete under SHPB splitting test [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77: 107445. DOI: 10.1016/j.job.2023.107445.
- [52] PHAM T M, LIU J, TRAN P, et al. Dynamic compressive properties of lightweight rubberized geopolymer concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120753. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120753.
- [53] HUANG B, XIAO Y. Compressive impact tests of lightweight concrete with 155-mm-diameter split hopkinson pressure bar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 114: 103816. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103816.

- [54] BAO X, LI Y, CHEN X, et al. Investigation on the flexural behaviour and crack propagation of hybrid steel fibre reinforced concrete with a low fibre content for tunnel structures [J]. Construction and Building Materials, 2024, 417: 135253. **DOI:** 10.1016/j.conbuildmat.2024.135253.
- [55] LI B, CHEN Z, WANG S, et al. A review on the damage behavior and constitutive model of fiber reinforced concrete at ambient temperature [J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134919. **DOI:** 10.1016/j.conbuildmat.2024.134919.

录用稿件，  
非最终出版稿