

高温变温养护早龄期钢纤维喷射混凝土的动力响应及损伤特征

曾祥格^{1,2}, 谢全民^{1,2}, 徐永康^{1,2}, 周辉^{1,2}, 郑智彬^{1,2}, 潘冲^{1,2}

(1. 江汉大学精细爆破全国重点实验室, 湖北 武汉 430056;
2. 江汉大学爆破工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430056)

摘要: 高地温隧道钻爆法施工中, 早龄期钢纤维喷射混凝土因受热力耦合作用而出现损伤, 但损伤演化机制尚未明晰。为此, 基于分离式霍普金森压杆与 CT 图像的分形维数构建损伤本构模型, 研究了高温变温养护条件下 1~3 d 龄期钢纤维喷射混凝土在冲击荷载作用下的动力响应与损伤特征。结果表明: 高温变温养护环境显著降低了钢纤维喷射混凝土的动态力学性能; 1、2、3 d 龄期试件的动态强度降低幅度分别达 16.1%、38.1%和 56.5%, 温度损伤随龄期呈现累积效应; 3 d 龄期试件达到试验最高能量耗散率, 其耗散能占比较 1 和 2 d 龄期分别提升 98.9%、16.7%。构建的损伤本构模型的拟合优度达到 0.9 以上, 可表征冲击荷载作用下钢纤维喷射混凝土的弹性阶段、屈服阶段以及破坏阶段应力-应变曲线走向。同时, 研究还揭示了热-力耦合环境下早龄期钢纤维喷射混凝土动态损伤演化规律, 可为高地温隧道支护结构设计提供理论依据。

关键词: 高地温隧道; 高温变温养护; 早龄期; 钢纤维喷射混凝土; 损伤特征

中图分类号: TU528; O521.9 文献标识码: A

随着我国西部地区交通基础设施的快速发展, 隧道建设逐渐向长大深埋方向发展。受地下水、岩浆等热源影响, 出现多座岩温超过 30℃ 的高地温隧道。钻爆法是我国隧道开挖的主要施工技术, 为加快施工进度, 钻爆开挖与喷射混凝土支护常同步或穿插进行, 喷射混凝土尚未终凝就需进行下一循环爆破施工。在 高地温隧道爆破施工中, 通常每 2 天进行 2-3 次爆破, 爆破药量约 100-200kg, 振动速度可达 20-30cm/s。在这种工况下, 喷射混凝土往往在浇筑后 24h 内即需承受爆破振动, 为防止掌子面附近围岩变形破坏须及早进行支护。钢纤维喷射混凝土(Steel Fiber Shotcrete, SFS)凭借其优异的抗裂性与耐久性, 广泛用作高地温隧道初期支护材料。高地温隧道循环爆破易引发早龄期 SFS 损伤, 引起初支开裂、渗水和掉落, 严重威胁高地温隧道支护结构承载力和耐久性。目前国内外针对高地温隧道循环爆破扰动下早龄期 SFS 损伤机理方面的相关研究尚不充分, 致使高地温隧道爆破方案及支护结构设计、安全评估等难以精确开展。

在钢纤维混凝土静动态力学性能方面, X Y 刘新荣等^[1]研究表明钢纤维可显著提升衬砌混凝土的抗拉强度、抗弯韧性及抗渗性; 穆元睿等^[2]采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)技术对钢纤维混凝土进行了动态响应与本构模型研究; 尹志灏等^[3]和高秀青等^[4]等分别对不同钢纤维掺量超高性能混凝土进行了静态抗压强度及动态抗压强度试验; 韩长君等^[5]探讨了粉煤灰高强混凝土的动态破碎能量耗散机制。在温度对水泥基材料影响方面, 王明年等^[6]建立了高温变温养护条件下喷混-岩体界面的剪切本构方程, 揭示了温度梯度对黏结强度的衰减效应; Katalin Orosz 等^[7]发现变温养护可激发硅酸盐水泥掺合料的膨胀效应; 董婧等^[8]研究了经 25℃、200℃、400℃、600℃ 温度处理后自然冷却的普通混凝土与体积掺量为 1% 的钢纤维混凝土的力学性能与微观结构形态发现钢纤维的加入可以在一定程度上降低混凝土的高温后质量损失率, 改善混凝土的动静态力学性能。在混凝土分形理论的应用及损伤本构模型的相关研究方面, V.C.Saouma 等^[9]证实混凝土断裂面具有显著分形特征; 谢和平等^[10]发现细观裂纹演化具有强分形性; Lawler 等^[11]结合数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术与 CT 技术实现了破裂模式的多尺度观测; 余志龙等^[12]通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)验证了分形维数可有效表征微观结构的劣化; 王恩元^[13]、孔祥国^[14]等研究冲击荷载下煤岩力学性能和损伤演化规律; 雷经发^[15]等研究了聚氯乙烯动态力学性能,

收稿日期: 2026-02-05; 修回日期: 2026-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(52378399); 湖北省基础研究类平台专项(2025CSA072); 湖北省中央引导地方科技发展专项(2024CSA094)

作者简介: 曾祥格(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: zxxblast@163.com

通讯作者: 谢全民(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事爆破工程研究. E-mail: xqmblast@jhu.edu.cn

并基于 ZWT 模型修正提出了材料非线性黏弹性本构模型；刘鹏波等^[16]采用 SHPB 与 SEM 技术对高温后混凝土能量耗散及分形特征进行了研究。国内外相关研究尚缺乏对高温变温养护水泥基材料的动力响应及损伤特征研究。目前亟待解决的科学问题是在高温变温养护与爆破冲击荷载的耦合作用下，早龄期 SFS 的损伤演化规律其动态力学性能衰减规律，以及热力耦合损伤下的本构模型的建立；高温变温养护条件的研究旨在模拟高地温隧道中初期支护混凝土从浇筑初期的极端高温环境随隧道掘进和通风逐渐降温的实际工况，其核心特征为高地温隧道内温度的时变性和非恒定性。而早龄期（1~3d）是混凝土强度发展的关键期，也是支护结构最脆弱的阶段，研究此阶段的热力耦合损伤对工程安全至关重要。为此，采用 SHPB 与 CT 技术，对高温变温养护早龄期 SFS 试件开展冲击试验，建立基于裂纹分形维数的跨尺度损伤变量，阐明热力耦合下早龄期 SFS 损伤演化特征。

1 试验方法

1.1 试件制备

1.1.1 制备方法

试验原材料包括：普通硅酸盐水泥（P·O42.5 级，密度 $3.15\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ）；细骨料为 0.5~1mm 粒径范围的天然河砂（细度模数 2.1）；粗骨料为 4.75~10mm 连续级配碎石（压碎值 $\leq 8\%$ ）；镀铜端钩型钢纤维（长度 $l=13\text{mm}$ ，直径 $d=0.18\sim 0.2\text{mm}$ ，长径比 $l/d\approx 72$ ，体积掺量 0.45%）。

基于某高地温隧道工程的 SFS 配合比（见表 1），采用湿喷大板法制备试件。依据《GB 50086-2015》、《喷射混凝土应用技术规程》（JGJ/T 372-2016）和《钻芯法检测混凝土强度技术规程》（CECS 03:2007）进行试件制备。控制湿喷厚度 100mm，喷射压力设置为 0.6-0.8MPa，喷射角度 90°，喷射距离 1.0-1.5m，距试板边缘 $\geq 50\text{mm}$ 处进行钻芯取样，确保取样试件科学合理。喷射完成后使用刮尺沿模具侧壁径向刮除多余混凝土，通过钻芯取样系统制备直径 100mm、长径比 0.5 的标准圆柱体试件，表面平整度 $\leq 0.02\text{mm}$ 。

表 1 SFS 配合比 (kg/m^3)

Table 1 Mix proportions of steel fiber reinforced concrete

Cement	Natural river sand	Graded aggregate	Water-reducing admixture	Accelerating admixture	Water	Steel fiber
472	912	777	4.72	33.04	166	35

1.1.2 养护方案

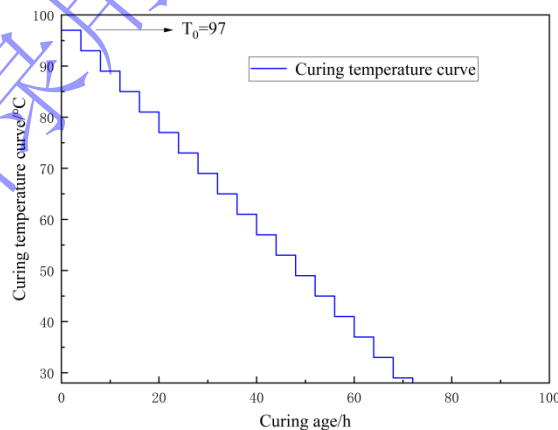


图 1 养护温度变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of curing temperature variation

养护方案的设计依据主要包括：王明年等^[17]在《高地温隧道工程》专著中提出的高温变温养护试验方法，目标温度 28°C 参照规范规定的运营期洞内气温上限。降温速率 $\Delta T=(97-28)/(6\times 3)\text{C}/4\text{h}$ 模拟了隧道掘进过程中随通风降温的实际工况。该降温速率下试件内部温度梯度小于 15°C，可有效避免温度裂缝干扰试验结果准确性。

基于王明年^[6]等对高地温隧道温度场的实测分析，隧道掌子面温度随掘进深度及通风条件呈衰减

趋势。设定初始养护温度 $T_0=97^\circ\text{C}$ (相对湿度 $\geq 95\%$)，在 0~3d 龄期内，每 4h 等幅降温，降幅 $\Delta T=(T_0-28)/(6\times 3)^\circ\text{C}$ ，最终目标温度为 28°C 。试件采用 GT-TH-800F 型可编程恒温养护箱（温度调控范围 $-40\sim 150^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，均匀度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）进行养护，温度时序曲线如图 1 所示。

1.2 试验方案

考虑到高地温隧道通常每 2 天开展 2~3 次爆破作业，选取 1~3d 的早龄期试件，开展 SHPB 冲击试验与 CT 扫描，对比冲击载荷作用前后试件的 CT 图像，量化分析损伤特征。

设计试验工况如表 2 所示，其中编号 A/B-a-b，A 表示高温变温养护条件，B 表示标准养护条件，a 表示养护龄期，b 表示冲击气压大小，图中 ASR 为平均应变率(Average Strain Rate)，控制两组试件 ASR 接近，每种工况设置 3 个平行试件，取数据平均值。试验共 27 个试件。

表 2 试验工况设计

Table 2 Experimental condition design

Curing method	Specimen number	Impact speed(m/s)	ASR (s^{-1})	Curing condition
A	A-1-0.1	3.030	15.941	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
	A-2-0.1	3.154	16.243	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
	A-3-0.1	3.194	16.695	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
	A-1-0.2	4.414	28.713	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
	A-2-0.2	4.290	26.731	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
	A-3-0.2	4.430	29.016	$T_0=97^\circ\text{C}$ 95%RH
B	B-1-0.2	4.414	16.924	$\pm 20^\circ\text{C}$ 95%RH
	B-2-0.2	4.290	17.245	$\pm 20^\circ\text{C}$ 95%RH
	B-3-0.2	4.430	15.819	$\pm 20^\circ\text{C}$ 95%RH

2 SHPB 试验数据分析

2.1 SHPB 试验设备

冲击试验采用如图 2 所示的霍普金森压杆试验系统，弹性杆为高强度轴承钢，弹性模量 $E=210\text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.30$ ；杆件直径 $\Phi=100\text{mm}$ ；入射杆、透射杆与缓冲杆长度分别为 $L_i=5000\text{mm}$ 、 $L_t=4500\text{mm}$ 和 $L_b=1000\text{mm}$ ；子弹长度 $H=800\text{mm}$ ；气压驱动系统压力范围 $0\sim 4.00\text{MPa}$ ，撞击杆初速 $v=0\sim 30\text{m/s}$ ；采用 4 通道超动态应变仪采集数据，最高采样频率 $f=20\text{MHz}$ ，分辨率 16bit。

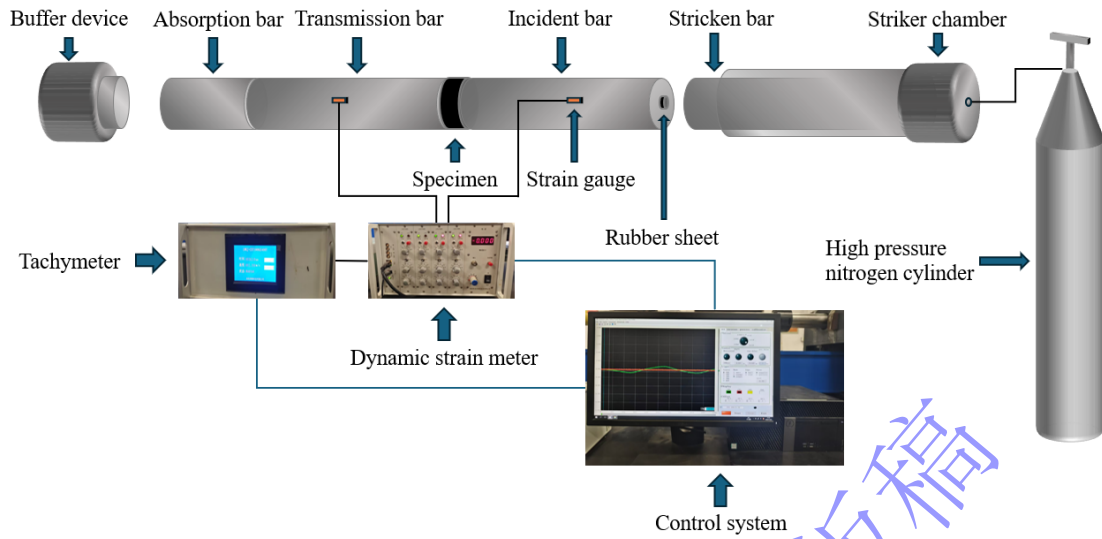


图 2 分离式霍普金森压杆
Fig. 2 Schematic diagram of split Hopkinson pressure bar testing machine

2.2 应力平衡校验

SHPB 试验需满足一维应力波传播理论，试验有效性依赖于应力平衡^[18-19]。原始电压信号经超动态应变仪采集后，提取入射应变、反射应变、透射应变时程曲线，经三波法推导 SFS 真实应力与应变率。应力平衡状态通过入射-反射应变叠加 $\varepsilon_I + \varepsilon_R$ 与透射应变 ε_T 的收敛性判定，其判据如公式(1)所示^[18]。

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (1)$$

式中： ε_I 为入射应变， ε_R 为反射应变， ε_T 为透射应变。

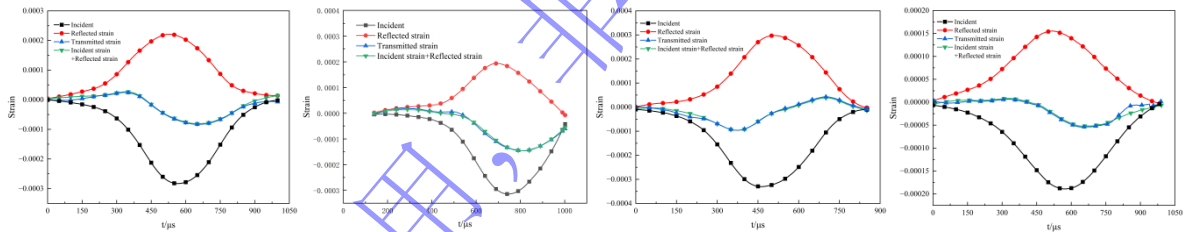


图 3 典型试件应力平衡校验
Fig. 3 Stress equilibrium verification diagram of typical specimen

选取 4 组不同工况下高温变温养护 SFS 试件在冲击荷载下进行应力平衡校验，结果如图 3 所示。通过三波法分析表明，透射应变与入射-反射叠加最大相对偏差 $\leq 3.8\%$ ，表明试件达到了动态应力平衡。

2.3 结果分析

2.3.1 SFS 的损伤形态

图 4 揭示了不同冲击气压下高温变温养护 SFS 试件宏观损伤特征。1d 龄期试件冲击速度分别为 3.030m/s ($P=0.1\text{MPa}$) 和 4.414m/s ($P=0.2\text{MPa}$)。冲击损伤形态分析表明，低应变率冲击下 SFS 试件保持宏观完整，表面随机分布微裂纹，未出现明显主裂缝；随着应变率升高，形成贯通主裂缝且伴生更多微小裂纹，导致边缘层状剥落，破坏模式从微裂纹损伤向宏观裂缝扩展失效转变。

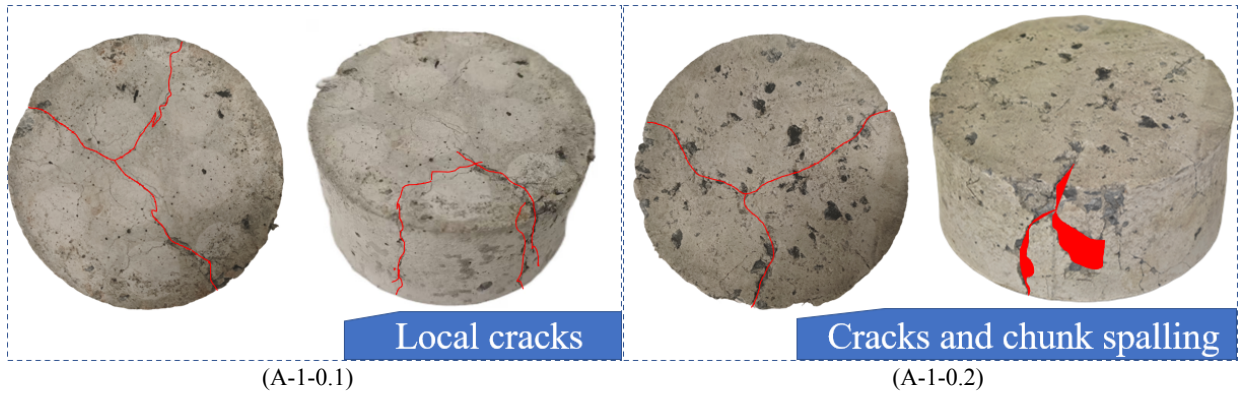


图4 裂纹及局部裂缝损伤形态

Fig. 4 Damage morphology of cracks and localized fractures

2.3.2 应变率曲线及应力-应变曲线分析

基于一维弹性应力波传播理论, 试件的动态应力、应变及应变率由入射波、反射波与透射波表征 [19-22],

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_S} [\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{C_0}{H} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{H} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] \quad (4)$$

式中: E 表示压杆弹性模量; A 表示压杆横截面积; A_S 表示试件横截面积; ε_T 表示透射应变; C_0 表示压杆弹性波波速; H 表示试件长度; ε_R 表示反射应变。

当 ASR 由 $15s^{-1}$ 增至 $25s^{-1}$ 时, 材料破坏模式由塑性压溃向脆性断裂转化, 此现象源于高应变率下 SFS 界面脱粘速率超越临界阈值导致桥接效应失效。如图 5 所示, 在相同冲击气压下, 峰值应变率随养护龄期增长呈单调下降趋势: 1d、2d 和 3d 龄期对应峰值应变率分别为 $41.2s^{-1}$ 、 $39.6s^{-1}$ 和 $26.4s^{-1}$ 。2~3d 龄期材料刚度显著提升, SFS 波阻抗提升致使应力波传播特征改变, 相同冲击能量下应变率逐渐降低, 表明材料从流塑态向固结态转变。

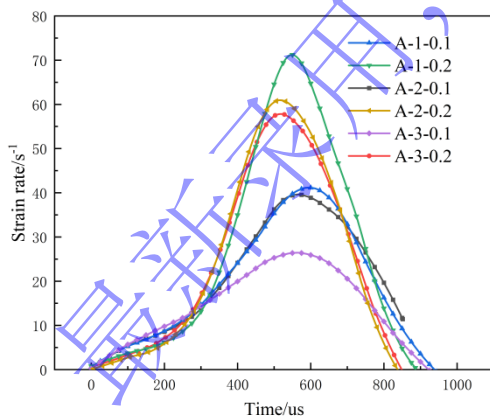


图5 应变率-时间曲线

Fig. 5 Strain rate-time curve

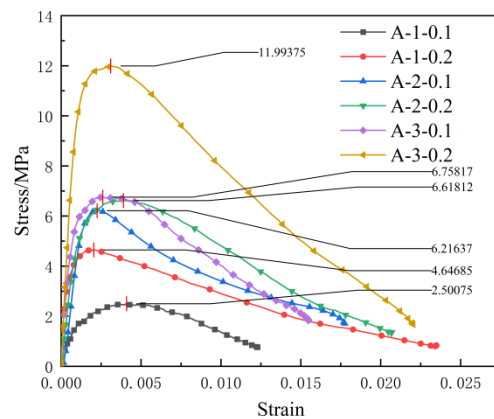


图6 动态应力-应变曲线

Fig. 6 Dynamic Stress-Strain Curve

图 6 动态冲击试验应力-应变曲线表明, 不同养护龄期 SFS 试件在冲击荷载下呈现显著的应变率效应。当冲击气压为 $0.1MPa$ 时, 2、3d 龄期试件峰值应力较 1d 分别提升 71.6% 和 175.1%; 而 $0.2MPa$ 冲击气压下对应增幅 42.4% 和 158.1%, 该非线性增长规律表明变温养护条件下材料强度发展具有强时效性特征, 其中 2~3d 龄期呈现最为显著的强度增长。1~2d 龄期试件在两种冲击速度下的动态弹性模量分别提升了 225.21% 和 133.17%, 而 2~3d 龄期的提升幅度达到 151.73% 和 195.45%。高温变温养护条件下 SFS 在 1~3d 龄期内力学性能发生显著变化, 反映了材料抗变形能力跃升, 体现了水泥基材料与钢纤维界面黏结性能的实质性改善, 同时揭示动态荷载作用下 SFS 的强度与刚度演化存在协同效应。

表 3 各组试件动态弹性模量

Table 3 Dynamic elastic modulus of each group of specimens

Specimen number	A-1-0.1	A-1-0.2	A-2-0.1	A-2-0.2	A-3-0.1	A-3-0.2
E_d/GPa	1.917	3.645	4.317	4.862	6.551	9.508

2.4 能量分析

冲击试验中，入射能(E_{inc})、反射能(E_{ref})和透射能(E_{tra})可通过以下公式进行计算^[23-26]：

$$E_{inc} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{inc}^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_{ref} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{ref}^2(t) dt \quad (6)$$

$$E_{tra} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{tra}^2(t) dt \quad (7)$$

其中， ρ_e 为弹性杆密度， σ_{inc} 、 σ_{ref} 和 σ_{tra} 分别为入射应力、反射应力和透射应力。

根据能量守恒定律，入射能等于反射能、透射能与耗散能之和。Li M^[27]认为耗散能由破碎能量耗散、试件碎块动能的释放以及热能、摩擦能等组成，破碎耗散能量占总耗散能量近 85%。耗散能(E_{dis})可按式 (8) 进行计算^[28-29]：

$$E_{dis} = E_{inc} - E_{ref} - E_{tra} \quad (8)$$

对不同龄期试件进行不同冲击气压试验，基于应变片采集数据，经式(2)~(4)计算试件在冲击荷载下动态应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ ，所有试件应变率在 14~29s⁻¹ 范围内；并运用式(5)~(8)定量解析试件能量演化特征，计算得到不同冲击速度下 E_{inc} 、 E_{ref} 、 E_{tra} 、 E_{dis} 。

基于图 7 的能量特性分析表明，SFS 试件在冲击荷载作用下的能量分配机制具有显著的龄期依赖特征。研究结果显示：在 0.1MPa 和 0.2MPa 冲击气压下，试件的平均入射能分别为 91.42J 和 257.31J；随着养护龄期增加，反射能占比在 0.1~0.2MPa 呈现阶梯式衰减规律，同时耗散能占比表现为阶梯式增长趋势，其中 3d 龄期试件在 0.2MPa 冲击气压下的耗散能占比达到峰值 31.83%。

进一步分析揭示：1~2d 龄期作为抗冲击性能发展的关键跃变阶段，其耗散能增幅变化率达 151%；能量分析可知两种冲击气压下能量耗散率随龄期的延长而逐步增长，在 3d 龄期时达到试验最高能量耗散率。

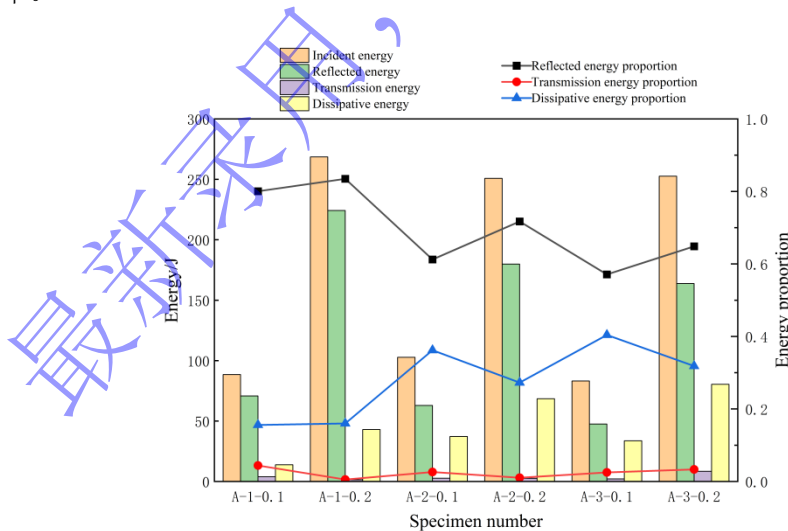


图 7 能量占比直方图

Fig. 7 Histogram of energy distribution

这种能量分配转型源于纤维-基体界面在变温养护中的渐进稳定，促使入射能量在塑性变形过程中耗散。需要说明的是，本文计算的耗散能为试件破碎过程吸收的总能量，包含破碎能耗、碎块动能、热能和声能等组分。根据 Li M 等^[27]的研究，在 SHPB 冲击试验中，用于产生新裂纹面的破碎耗散能量占总耗散能量的比例可达 85%左右，其余 15%主要为碎块动能。由于本研究中试件碎块收集过程中的动能损失难以精确测量，且热能、声能占比较小，本文未对耗散能进行进一步的定量拆分。后续

实验室购进新研究设备可结合高速摄像与碎块筛分技术，对耗散能组分进行更精细的分析。

2.5 热损伤特征分析

为量化早龄期高温变温养护对 SFS 损伤行为的影响，通过 SHPB 系统测试高温变温养护组与标准养护组试件各 3 组共 18 个试件，应变率及应力-应变曲线均值化结果如图 8、9 所示。高温变温养护组平均应变率分别为 $16.2s^{-1}$ 、 $15.9s^{-1}$ 和 $16.2s^{-1}$ ，离散系数仅为 2.1%；而标准养护组对应值为 $16.9s^{-1}$ 、 $17.2s^{-1}$ 和 $15.8s^{-1}$ ，离散系数为 4.22%。

图 8 揭示了高温变温养护、标准养护条件下 SFS 试件的应力-应变响应特性差异。为表征高温变温环境引发的材料性能退化构建了热损伤代理变量 D_T ：

$$D_T = 1 - \frac{f_{T,dyn}}{f_{0,dyn}} \quad \#(9)$$

其中： $f_{T,dyn}$ 为高温养护试件的动态峰值应力（取自 A 组试验）， $f_{0,dyn}$ 为同龄期标准养护试件的动态峰值应力（取自 B 组试验）。

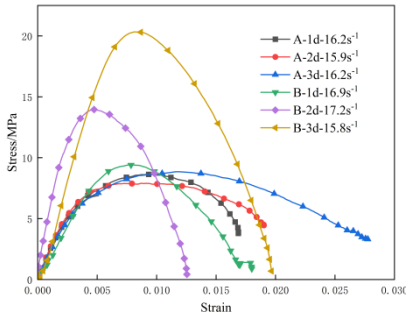


图 8 应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-Strain Curves

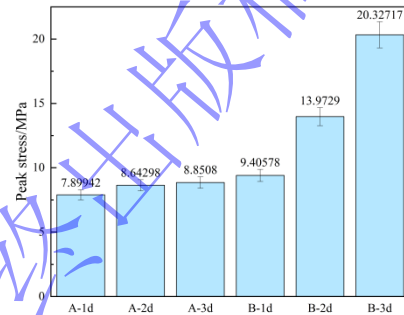


图 9 平均动态峰值应力

Fig. 9 Average dynamic peak stress

如图 9 所示，通过对各组试件平均动态峰值应力的系统测试与统计分析，1d 龄期试件 D_T 为 0.161，表明初始高温养护阶段造成约 16% 的动态强度损失；随着养护龄期延长至 2d 和 3d 时， D_T 递增至 0.38 和 0.565。高温变温养护组的动态强度增长速率显著低于标准养护组，且在相同应变率条件下，热损伤累积程度与养护时间呈正相关性。持续高温环境不仅抑制水泥水化进程，更通过热-力耦合作用诱发基体微裂纹扩展，导致材料完整性持续劣化。

为综合反映热力耦合作用下 SFS 的损伤程度，本文构建了基于宏观强度衰减与微观结构劣化的复合热损伤指标 D_T^{com} 。该指标由热损伤变量 D_T 和分形维数损伤增量 $\Delta D_f = \frac{D_f - D_{f0}}{D_{f0}}$ 加权组合而成。权重的确定采用熵权法，该方法根据各指标的信息熵大小客观赋权，避免主观因素干扰。计算过程如下：首先对 6 组高温变温养护试件的 D_T 和 ΔD_f 数据进行极差标准化处理，消除量纲影响；然后计算各指标的信息熵，得到 $e_{D_T}=0.812$ ， $e_{\Delta D_f}=0.753$ ；进而计算信息效用值并归一化，最终确定 D_T 的权重为 0.4， ΔD_f 的权重为 0.6。复合热损伤指标的计算公式为：

$$D_T^{com} = \alpha \cdot D_T + \beta \cdot \frac{D_f - D_{f0}}{D_{f0}} \quad \#(10)$$

其中， $D_{f0}=1.823$ ，为未冲击试件的初始分形维数。计算结果表明（见表 4），复合损伤值随养护龄期和冲击气压的增加而增大，与宏观强度衰减规律及微观裂纹演化特征具有良好的一致性。

为深入理解高温变温养护对 SFS 力学性能的影响机制，本文参考了相关研究中高温条件下钢纤维混凝土的静态与动态力学特性，并与本文动态试验结果进行对比分析。ZHU M 等^[30]对钢纤维自密实混凝土（SFRSCC）在 25~800°C 热处理后的动静态力学性能进行了系统研究，结果表明：静态抗压强度和动态抗压强度均随温度升高呈先增大后减小的趋势，200°C 时达到峰值静态抗压强度，动态抗压强度 96.3MPa，呈现显著的温度强化效应；超过 200°C 后强度逐渐衰减，600°C 后低于常温强度。文献表明，超过 200°C 后温度弱化效应逐渐显现，400°C 后强度开始显著下降。本文中随着养护龄期延长，热损伤变量 D_T 从 1d 的 0.161 增至 3d 的 0.565，反映出热损伤的累积效应，这与文献中持续高温

导致材料劣化的规律一致。需要说明的是，上述对比受限于文献研究条件为 28d 龄期、恒温热处理与本文（1~3d 早龄期、变温养护）存在差异，主要为定性规律分析。未来需开展同龄期、同养护制度的静态与动态对比试验，以建立更完整的热-力耦合本构关系。

表 4 各指标计算结果

Table 4 Calculation results of each index

龄期	1d	2d	3d
D_T	0.161	0.380	0.565
D_T^{com}	0.067	0.159	0.237

3 基于二值化 CT 扫描图像分形维数的 SFS 动态损伤本构模型

3.1 CT 图像提取

SFS 试件冲击加载前后，采用 Nano Voxel 4000 高分辨 CT 系统进行显微观测，扫描参数设定为 200kV 管电压、180uA 电流强度及 0.58s 单帧曝光时间。基于 X 射线衰减系数差异建立的灰度映射模型中，骨料相呈高亮白色域，砂浆基体表现为连续灰色背景，孔隙缺陷为黑色不规则区域。基于灰度阈值的孔隙与骨料自动识别算法，可提取试件冲击前后损伤演化特征。

3.2 SFS 分形特征

基于分形维数可提取 SFS 试件损伤特征。计算图像分形维数有差分盒维数法、盒维法^[31-33]等。为计算图像的差分盒维数，将图像划分为不同尺寸的块，统计每个尺寸下的覆盖盒子数，并通过线性回归计算分形维数。通过 Matlab 将图像转化为二值化图像，并采用 Otsu 算法自动阈值分割^[34]通过最大化类间方差来自动确定图像二值化的最佳阈值寻找使方差最大的阈值，将阈值映射到[0,1]范围，然后调用 otsuthresh 函数确定分割阈值，利用最小二乘法拟合得到差分盒维数如图 10 所示。

表 4 统计了各组试件冲击后分形维数。盒维数通过量化裂缝网络的几何复杂性和空间分布的不规则性直接反映损伤在微观尺度上的拓扑结构和演化过程，捕捉了传统连续介质力学参数无法表征的试件内部裂纹裂缝的“粗糙度”、“曲折度”和“分支程度”。利用分形维数差异量化损伤程度，裂纹分形维数越高，表明损伤越严重。

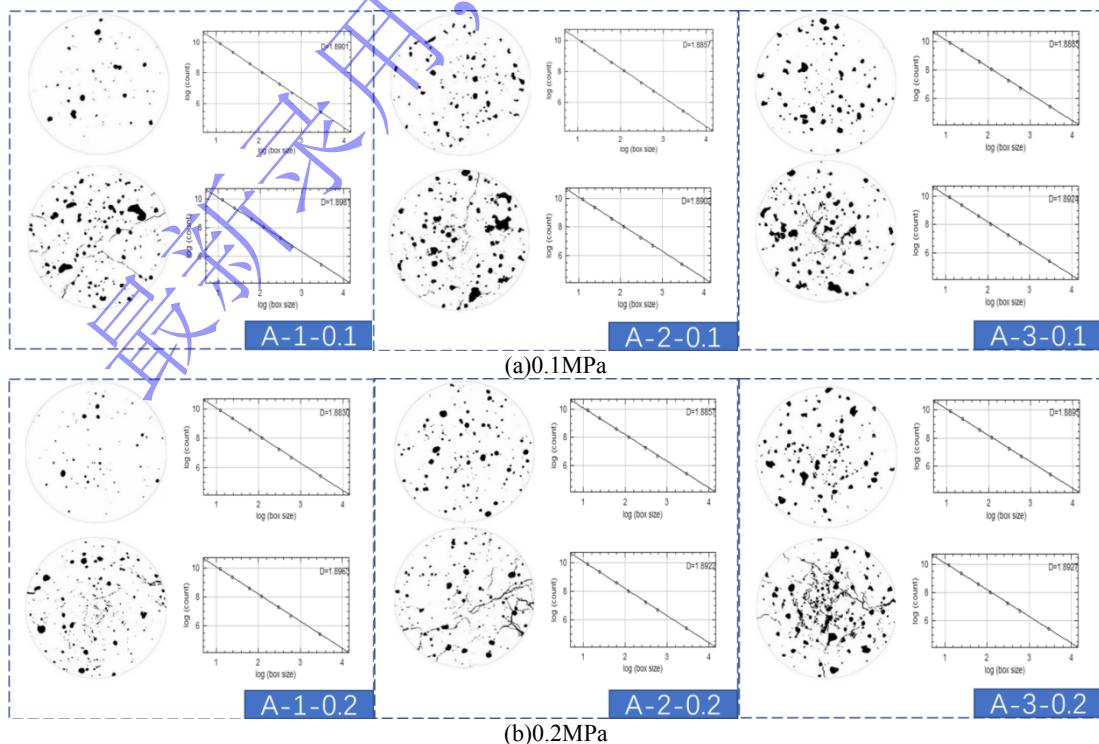


图 10 二值化图像及盒维数法拟合图
Fig. 10 Binarized images and box-counting dimension fitting results

表 5 CT 扫描分形维数 (区别)

Table 5 Fractal dimension from CT scanning

Specimen number	A-1-0.1	A-1-0.2	A-2-0.1	A-2-0.2	A-3-0.1	A-3-0.2
D_f	1.832	1.871	1.845	1.893	1.858	1.923

3.3 基于分形维数的 SFS 动态损伤本构模型

3.3.1 ZWT 本构模型的改进

ZWT 本构模型是唐志平、朱兆祥等人针对均匀、各向同性材料，基于高分子物理松弛机制，提出的一个由非线性弹簧和两个不同特征时间尺度的 Maxwell 单元并联而成的数学模型，能够描述混凝土、岩石等材料在冲击载荷作用下的非线性粘弹本构关系，其本构方程为^[35]：

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_2 \int_0^t \varepsilon e^{-\frac{t-\tau}{\varphi_2}} d\tau + E_3 \int_0^t \varepsilon e^{-\frac{t-\tau}{\varphi_3}} d\tau \quad (11)$$

式中： E_1 、 α 、 β 为非线性弹性平衡态应力对应的弹性常数； E_2 、 φ_2 分别为低频 Maxwell 体的弹性常数和松弛时间； E_3 、 φ_3 分别为高频 Maxwell 体的弹性常数和松弛时间。

鉴于 SFS 试件内部微裂纹扩展、纤维拔出、应力波传播都具有明显的时间依赖性，为准确描述 SFS 试件在冲击荷载下损伤效应，对 ZWT 模型作如下改进：

低频 Maxwell 体松弛时间为 $10^1\text{s} \sim 10^2\text{s}$ ，SFS 无足够时间松弛，将其简化为简易弹簧，弹性模量为 E_0 。SFS 因纤维连接，应力-应变曲线峰后存在较长的破坏阶段，在 ZWT 模型非线性弹簧部分引入应变的四次方项 ε^4 ，描述 SFS 韧性以及钢纤维桥连效应。

为表征材料的率相关性及微裂纹损伤演化导致的刚度退化，考虑材料损伤效应，引入损伤变量 D ，在 ZWT 模型的基础上建立一个包含损伤的黏弹性损伤模型如图 11 所示，改进后模型总应力为：

$$\sigma = (1-D) \left(\sigma_e + E_3 \int_0^t \varepsilon e^{-\frac{t-\tau}{\varphi_3}} d\tau + \sigma_0 \right) \quad (12)$$

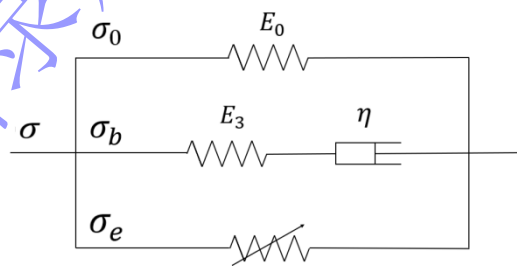


图 11 本构模型示意图

Fig. 11. Schematic of the proposed constitutive model

其中， σ_e 是非线性弹性应力， $\sigma_e = E_e \varepsilon_e$ 、 $\sigma_0 = E_0 \varepsilon_0$ ， D 为损伤变量。

宏观裂纹贯通阶段分形维数显著升高。结合 Krajcinovic 统计损伤模型^[36]将 SFS 试件视作含有 N 个含有不同缺陷的微元体，建立损伤变量 D ：

$$D = \frac{n}{N} \quad (13)$$

其中， n 为已破坏的微元数目。

由于 SFS 内部构造含有不同的缺陷，各微元所具有的强度不尽相同，假设各微元强度 f 分布满足 Weibull 分布^[37]， $\varphi(f)$ 满足：

$$\varphi(f) = \frac{m}{a} \left(\frac{f}{a}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{f}{a}\right)^m} \quad \#(14)$$

其中， a 为尺度参数； m 为材料中缺陷的分布参数， f 为微元强度。

微元破坏占总微元比例为 $\varphi(f)$ 的累计分布函数 $P(f)$ ：

$$P(f) = 1 - e^{-\left(\frac{f}{a}\right)^m}$$

损伤变量 D 为已破坏微元的比例，则有：

$$D(f) = P(f) = 1 - e^{-\left(\frac{f}{a}\right)^m} \quad \#(15)$$

$$\frac{dD}{df} = \varphi(f) \quad \#(16)$$

在对 SFS 的研究中，同样取应变 ε 来度量损伤变量 D ：

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m} \quad \#(17)$$

对式(17)移项取倒数：

$$\frac{1}{1-D} = e^{\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^m} \quad \#(18)$$

定义 $D^* = \frac{1}{1-D}$ ，两边取自然对数有：

$$\ln D^* = m \ln \varepsilon - m \ln a \quad \#(19)$$

由于 $\text{grad}(D) > 0$ ，故 D^* 和 D 有相同的变化趋势，两者在描述损伤演化方面是等价的，根据白晨光等的研究，岩石材料的初始缺陷分布具有显著的分形特征，其分形维数 D_f 与 Weibull 分布的形状参数 m 存在如下理论关系^[38]：

$$\#(20)$$

该关系的物理本质在于：分形维数表征了裂纹网络的复杂程度和空间填充能力，而 Weibull 分布的形状参数 m 表征了材料内部缺陷分布的集中程度。二者均反映了材料微观结构的非均匀性。当材料内部裂纹网络越复杂（即 D_f 越大），意味着缺陷分布越分散，对应的 Weibull 分布形状参数 m 越小。因此，用分形维数 D_f 替代形状参数 m 具有明确的物理意义和数学基础。

带入式(17)得：

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^{D_f}} \quad \#(21)$$

将式(21)代入到式(12)中，得到 SFS 黏弹性损伤模型，同时引入龄期-ASR 耦合因子 γ ，用于表征龄期和 ASR 对 SFS 强度的影响。

$$\gamma = \frac{f_{d,s}}{f_{d,0}} \quad \#(22)$$

其中， $f_{d,s}$ 和 $f_{d,0}$ 分别为高温变温养护和标准养护试件在相同应变率下的动态峰值应力。

在相同冲击气压下，随着养护龄期的延长， γ 值呈降低趋势；在相同养护龄期下，随着冲击气压的增大， γ 值亦呈降低趋势。通过纤维掺量和 ASR 来拟合 γ 值，评估二者对 SFS 动态抗压强度的影响。利用试验数据拟合龄期-ASR 耦合因子 γ ：

图 12 所示曲面较好地描绘了 SFS 的动态抗压强度随龄期和 ASR 变化趋势, 表明非线性曲线模型能够有效反映不同龄期和 ASR 对 SFS 动态抗压强度的影响, 拟合 γ 后 SFS 动态黏弹性损伤本构模型为:

$$\sigma = \gamma e^{-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^D} \left(b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 + e\varepsilon^4 + E_3 \int_0^t \varepsilon e^{-\left(\frac{t-\tau}{\varphi_3}\right)} d\tau + E_0\varepsilon \right) \#(23)$$

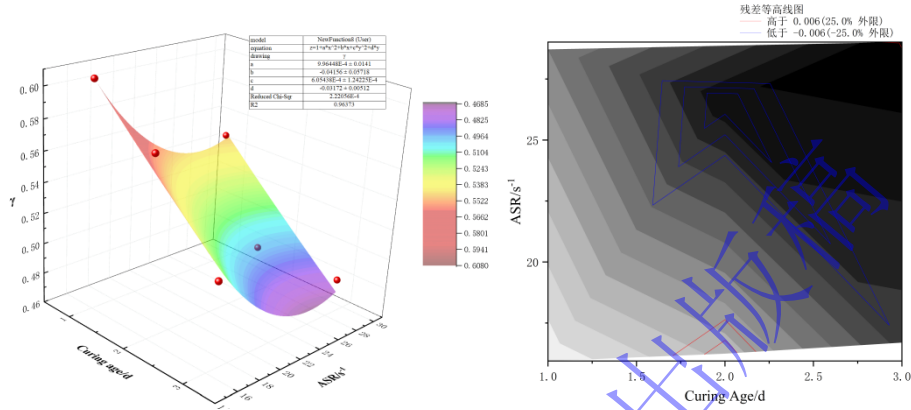


图 12 耦合因子 γ 拟合结果
Fig. 12 Fit of the coupling factor γ

其中, γ 的计算式为:

$$\gamma = 0.000996x^2 - 0.0416x + 0.000605\varepsilon^2 - 0.0317\varepsilon + 1 \#(24)$$

式中, x 为养护龄期, ε 表示平均应变率 $ASR(s^{-1})$ 。

实验的加载率可近似看作 ASR 恒定加载, 对于高频 Maxwell 体, 通过积分运算其黏弹性项可进一步简化为:

$$I = \varepsilon\varphi_3 \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon\varphi_3}\right)} \right) \#(25)$$

黏弹性部分应力贡献为:

$$\sigma = E_3 I_3 \#(26)$$

$$\sigma = \varepsilon E_3 \varphi_3 \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon\varphi_3}\right)} \right) \#(27)$$

将式(26)带入到式(22)中, 得到所求的动态损伤本构模型:

$$\sigma = \gamma e^{-\left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^D} \left(b\varepsilon + c\varepsilon^2 + d\varepsilon^3 + e\varepsilon^4 + \varepsilon E_3 \varphi_3 \left(1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon\varphi_3}\right)} \right) + E_0\varepsilon \right) \#(28)$$

3.3.2 模型的验证

所建损伤本构模型有 10 个特征参数。其中的 8 个未知参数 (a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 E_3 、 φ_3 、 E_0) 需通过拟合确定, 2 个已知参数 D_f 和 γ 由计算和设计确定。图 13 为 SFS 的动态应力-应变曲线拟合结果。

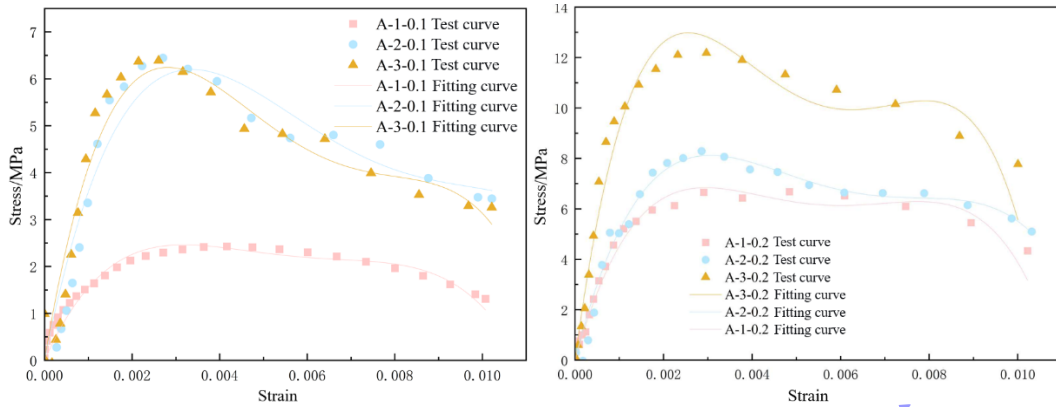


图 13 SFS 动态应力-应变曲线拟合结果

Fig. 13. Fitting results for the dynamic stress-strain curves of SFS

为验证动态损伤本构模型的可靠性，通过对比分析不同冲击气压下 SFS 的应力-应变试验曲线与拟合曲线，对模型进行准确性校验。由图 13 可以看出，试验曲线与模型曲线拟合良好，能够准确描述 SFS 在动态冲击荷载下的损伤特性，表明改进的本构模型具有较好的适用性。

表 6 模型拟合参数值

Table 6 Fitted parameters of the model

Specimen number	a	b	c	d	e	E_3	φ_3	E_0	R^2
A-1-0.1	-1.53E16	1181.4	-1029918	1.25E8	-5.51E9	1090	-4.4E8	1181	0.921
A-1-0.2	-1.32E19	3793.5	-3611313	4.62E8	-2.07E10	3796	-4.54E7	3794	0.982
A-2-0.1	-9.69E18	-17866.3	-2066651	1.94E8	-6.33E9	44027	2.39E8	-17866	0.955
A-2-0.2	-2.29E19	4173.7	-3990868	4.55E8	-1.82E10	5380	4.95E8	4174	0.959
A-3-0.1	-3.21E19	3579	-3171284	3.58E8	-1.41E10	3429	-8.99E7	3579	0.941
A-3-0.2	-1.2E21	9396.3	-9412545	1.22E9	-5.5E10	8986	1.80E8	9396	0.918

注：本构模型参数中， a （尺度参数）、 b 、 c 、 d 、 e （非线性弹性项系数）为数学拟合参数，其量级较大且包含负值是由多项式的数学形式决定的，主要作用是在高应变率下准确描述应力-应变曲线的非线性特征，如峰后软化段，本身不具有独立的物理意义； E_0 和 E_3 为弹性模量（单位：Pa），其正值符合物理预期； φ_3 为松弛时间（单位：s）。模型整体拟合优度 R^2 均大于 0.9，表明该组参数能够有效描述试验曲线。

表 7 模型拟合误差统计

Table 7 Statistical analysis of model fitting errors

试件编号	R^2	最大相对误差 (%)	平均相对误差 (%)	RMSE (MPa)
A-1-0.1	0.921	5.23	2.87	1.24
A-1-0.2	0.982	6.71	3.42	1.58
A-2-0.1	0.955	4.89	2.61	1.09
A-2-0.2	0.959	7.34	3.98	1.76
A-3-0.1	0.941	5.67	3.11	1.31
A-3-0.2	0.918	8.76	4.56	2.03

注：最大相对误差、平均相对误差和 RMSE 均基于所有数据点计算得出。所有曲线的 R^2 均大于 0.9，最大相对误差均小于 10%，平均相对误差小于 5%，RMSE 相对于峰值应力的比例在 10% 以内，表明模型具有较高的预测精度，未出现过拟合情况。

4 结 论

(1) 揭示了高温变温养护条件下早龄期 SFS 热损伤存在显著的累积效应。定量分析表明：1d、2d 及 3d 龄期试件的损伤变量值分别为 0.161、0.38 和 0.565，反映出材料动态强度损失率随龄期

呈非线性增长。该规律清晰量化了变温养护对早期强度的负面影响，为高地温隧道工程中早龄期支护结构的性能评估与安全控制提供了参考数据。

(2) 高温养护改变了 SFS 的能量吸收特性。研究发现，3d 龄期试件在 0.2MPa 冲击下耗散能占比达到峰值 31.83%，且该占比随龄期呈阶梯式增长。同时，3d 龄期反射能占比最低，源于变温养护下纤维-基体界面的渐进稳定化，显著提升了材料塑性变形阶段的能量耗散效率。

(3) 针对现有 ZWT 模型表征纤维混凝土高应变率响应能力的不足，融合损伤变量与龄期-冲击气压耦合因子对模型进行修正。建立的改进动态黏弹性损伤本构模型优化了传统模型在描述早龄期 SFS 冲击力学特性的局限性。

参考文献：

- [1] 刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(08):2319-2323.
LIU Xingrong, ZHU Yunhua, LI Xiaohong, et al. Experimental study on single-layer lining of steel fiber reinforced shotcrete in tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(8), 2319-2323.
- [2] 穆元睿, 张于晔, 程少琪. 基于 SHPB 试验的钢纤维混凝土动态响应与本构模型研究[J]. 防护工程, 2025, 47(06):15-22.
MU Yuanrui, ZHANG Yuye, CHENG Shaoqi, Research on dynamic response of steel fiber reinforced concrete and constitutive model based on SHPB test. [J]. PROTECTIVE ENGINEERING, 2025,47(06):15-22.
- [3] 尹志灏, 张佩, 张东方, 等. 钢纤维和玄武岩纤维对玄武岩石粉超高性能混凝土 (UHPC) 力学性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2025, (10):61-65.
YIN Zhihao, ZHANG Pei, ZHANG Dongfang, et al. Study on influence of steel fiber and basalt fiber on mechanical properties of ultrahigh performance concrete (UHPC) with basalt stone powder. [J]. CHINA CONCRETE AND CEMENT PRODUCTS, 2025, (10):61-65.
- [4] 高秀青, 葛吉宏. 冲击荷载下钢纤维混凝土材料力学性能测试[J]. 混凝土, 2024, (10):185-188.
GAO Xiuqing, GE Jihong. Test of strength of materials performance of steel fiber reinforced concrete under impact load. [J]. Concrete, 2024, (10):185-188.
- [5] 韩长君, 周海龙, 王海龙. 冲击荷载下高强混凝土动力特性及破碎特征研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(11):320-326.
HAN Changjun, ZHOU Hailong, WANG Hailong. Dynamic characteristics and crushing features of high-strength concrete under impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024,43(11), 320-326.
- [6] 王明年, 胡云鹏, 童建军, 等. 高温变温环境下喷射混凝土-岩石界面剪切特性及温度损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(01):63-75.
WANG Mingnian, HU Yunpeng, TONG Jianjun, et al. Experimental study on shear mechanical properties and thermal damage model of shotcrete-rock interfaces under variable high temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(1), 63-75.
- [7] Orosz K, Hedlund H, Cwirzen A. Effects of variable curing temperatures on autogenous deformation of blended cement concretes [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 474-480.
- [8] 董婧, 杨进良, 王伟, 等. 高温后钢纤维混凝土的力学性能与微观结构[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(01):84-96.
DONG Jing, YANG Jinliang, WANG Wei, et al. Mechanical Properties and Microstructure of Elevated Temperature Processed Steel Fiber Reinforced Concrete. [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(01):84-96.
- [9] Saouma V E, Barton C C. Fractals, fractures, and size effects in concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(4): 835-854.

- [10] 谢和平,鞠杨.混凝土微观损伤断裂的分形行为[J].煤炭学报,1997,(06):28-32.
XIE Heping, JU Yang. Fractal Characteristics of Meso/Micro Damage and Fracture of Concrete[J]. Journal of China Coal Society, 1997, (06): 28-32.
- [11] Lawler J S, Keane D T, Shah S P. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression[J]. Materials Journal, 2001, 98(6): 465-475.
- [12] 余志龙, 赵利军, 孟凡皓.基于 MATLAB 对混凝土 SEM 分形维数的计算[J].水泥工程, 2014 (5): 59-62.
YU Zhilong, ZHAO Lijun, MENG Fanhao. Calculating SEM fractal dimension of concrete by MATLAB [J]. Cement Engineering, 2014 (5), 59-62.
- [13] 王恩元,孔祥国,何学秋,等.冲击载荷下三轴煤体动力学分析及损伤本构方程[J].煤炭学报,2019,44(07):2049-2056.
WANG Enyuan, KONG Xiangguo, HE Xueqiu, et al. Dynamics analysis and damage constitutive equation of triaxial coal mass under impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2049-2056.
- [14] 孔祥国,李宇航,李树刚,等.冲击载荷下煤体巴西劈裂动态力学特性及损伤本构模型[J/OL].煤炭学报, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0343>
KONG Xiangguo, LI Yuhang, LI Shugang, et al. Dynamic mechanical properties and damage constitutive model of coal in Brazilian splitting under impact load[J]. Journal of China Coal Society, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0343>
- [15] 雷经发,许孟,刘涛,等.聚氯乙烯弹性体静态力学性能及本构模型[J].爆炸与冲击,2020,40(10):66-73.
LEI Jingfa, XU Meng, LIU Tao, et al. Static/dynamic mechanical properties and a constitutive model of a polyvinyl chloride elastomer[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(10): 66-73.
- [16] 刘鹏波,孟祥,刘磊,等.高温后玄武岩纤维增强混凝土冲击能量耗散及破碎分形特征研究[J].建筑结构, 2025,55(17):46-53.
LIU Pengbo, MENG Xiang, LIU Lei, et al. Study on Impact Energy Dissipation and Fractal Characteristics of Fragmentation of Basalt Fiber Reinforced Concrete After High Temperature. [J] Building Structure, 2025, 55(17): 46-53.
- [17] 王明年,童建军,刘大刚等.高地温隧道工程[M].北京:科学出版社, 2019.
WANG Mingnian, TONG Jianjun, LIU Dagang et al. High Geothermal Tunnels. [M]. Beijing: Science Press, 2019
- [18] 马俊,谢全民,万鹏,等.早龄期喷射混凝土冲击动力学响应及损伤演化试验研究[J].振动与冲击,2025,44(04):176-183+206.
MA Jun, XIE Quanmin, WAN Peng, Experimental Study on Impact Dynamic Response and Damage Evolution of Shotcrete at Early Age[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(04): 176-183+206.
- [19] Xie F J, Zhang J S, Chen J H. Dynamic damage model of rock under impact loads of compression and tension[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 420-427.
- [20] Wu X, Jiang L, Xu X, et al. Numerical analysis of deformation and failure characteristics of deep roadway surrounding rock under static-dynamic coupling stress[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 543-555.
- [21] Yin T, Wang P, Li X, et al. Effects of thermal treatment on physical and mechanical characteristics of coal rock[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2336-2345.
- [22] Xiao P, Li D, Zhao G, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of central south university, 2020, 27(10): 2945-2958.
- [23] Zhou Z, Zou Y, Li X, et al. Stress evolution and failure process of Brazilian disc under impact[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(1): 172-177.
- [24] Yu L, Zhang T, Zhu Z, et al. Physical and dynamic mechanical behaviors of marble after heat treatment in quasi-vacuum and air-filled environments[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2770-2785.
- [25] Dai B, Shan Q, Chen Y, et al. Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under cyclic impact loading[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(1): 116-128.
- [26] Xie Q, Li S X, Liu X L, et al. Effect of loading rate on fracture behaviors of shale under mode I loading. J Cent South Univ,

2020, 27 (10) : 3118

- [27] Li M, Mao X, Lu A, et al. Effect of specimen size on energy dissipation characteristics of red sandstone under high strain rate[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 151-156.
- [28] Ma J, Li D, Luo P, et al. Dynamic damage and failure of layered sandstone with pre-cracked hole under combined cyclic impact and static loads[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(3): 2271-2291.
- [29] LU Y Y, YU Y, FENG G L, et al. Experimental study on dynamic mechanical response and crack control mechanism of anchored layered sandstone by DIC technology [J]. Measurement, 2025, 250: 117078.
- [30] ZHU M, GONG N P. Dynamic and static mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete after exposed to high temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(11): 3895-3905.
- [31] 张乐.基于 CT 图像和改进的差分盒维数法的混凝土细观损伤研究[D].西安理工大学, 2017.
ZHANG Le. Quantitative Study to Concrete Meso-damage Based on CT Image and Improved Differential Box Counting Method [D]. Xi'an University of Technology, 2017.
- [32] 吴国铭, 李熙喆等.基于分形理论探究碳酸盐岩 CT 图像二值化最佳阈值[J].石油地球物理勘探, 2017, 52(5):1025-1032.
WU Guoming, LI Xizhe, et al. Fractal theory-based determination of optimal binarization threshold for carbonate rock CT images [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5), 1025-1032.
- [33] 毛灵涛, 连秀云, 郝丽娜.基于数字体图像三维裂隙的分形计算及应用[J].中国矿业大学学报, 2014 (6):1134-1139.
MAO Lingtao, LIAN Xiuyun, HAO Lina. The Fractal calculation of 3D cracks based on digital volumetric images[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014 (6), 1134-1139.
- [34] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. Automatica, 1979, 11(285-296).
- [35] 孙紫建,王礼立.高应变率大变形下的聚丙烯/尼龙共混高聚物损伤型本构特性[J].爆炸与冲击, 2006, 26(6): 492 - 497.
SUN Z J, WANG L L. The constitutive behavior of PP/PA polymer blends taking account of damage evolution at high strain rate and large deformation [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(6): 492-497.
- [36] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of continuous damage theory [J]. Int. J. Solids Structures. 1982, 18 (7): 551~562.
- [37] W Weibull. A statistical theory of the strength of materials [M]. Stockholm, 1939.
- [38] 白晨光,魏一鸣,朱建明.岩石材料初始缺陷的分形维数与损伤演化的关系[J].矿冶, 1996, 5 (2):17~19.
Bai Chengguang, Wei Yiming, Zhu Jianming. The relation between dimension of defects of rock material and its damage evolution. [J] MINING & METALLURGY, 1996, 5 (2): 17~19.

Experimental Study on Dynamic Response and Damage Characteristics of Early-Age Steel Fiber Reinforced Shotcrete with High-Temperature Variable Curing

ZENG Xiangge^{1,2}, XIE Quanmin^{1,2}, XU Yongkang^{1,2}, ZHOU Hui^{1,2},
ZHENG Zhibin^{1,2}, PAN Chong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: In the drill-and-blast construction of tunnels under high geotemperature conditions, the mechanism governing damage evolution in early-age steel fiber reinforced shotcrete subjected to combined thermal and mechanical loads has not been fully understood. A damage constitutive model was developed utilizing the split Hopkinson pressure bar technique and the fractal dimension analysis of CT images. The dynamic response and damage features of SFS specimens (aged 1 d to 3 d) subjected to impact loading, following with a curing regime involving high and fluctuating temperatures, is studied with this model. The results indicate that curing environment with high-temperature varying-temperature markedly degrades the dynamic mechanical properties of SFS. The reductions in dynamic strength were measured at 16.1%, 38.1%, and 56.5% for specimens aged 1, 2, and 3 d, respectively, demonstrating a cumulative temperature-induced damage effect with increasing age. The 3-day-old SFS demonstrated the highest energy absorption efficiency, with its proportion of dissipated energy increasing by 98.9% and 16.7% relative to the 1 and 2 d-old specimens, respectively. The developed damage constitutive model yielded a goodness-of-fit exceeding 0.9, proving capable of representing the progression of the stress-strain curve for SFS under impact loading across its elastic, yielding, and failure phases. Furthermore, the research reveals the dynamic damage evolution law of early-age SFS under thermo-mechanical coupling, which provides a theoretical basis for the design of support structures in high ground-temperature tunnels.

Keywords: high geothermal temperature tunnel; high-temperature variable temperature curing; early-age; steel fiber reinforced shot-crete; damage characteristics