

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501010

高温后钢纤维混凝土的力学性能与微观结构

董 婧, 杨进良, 王 炜, 刘 渊, 杜 娟

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为研究不同温度作用对钢纤维混凝土力学性能与微观结构的影响, 对比了经 25 °C、200 °C、400 °C、600 °C 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。首先, 通过混凝土立方体抗压试验及劈裂抗拉试验获取了试件的破坏形态、抗压强度、劈裂抗拉强度; 然后, 使用霍普金森压杆装置开展了 4 种冲击气压下试件的动态冲击压缩试验, 获取了动态抗压强度与动态压缩增长因子, 并运用扫描电镜观察了不同处理温度条件下试件的微观结构。研究结果表明: 随着处理温度的升高, 普通混凝土与钢纤维混凝土的颜色、表观裂纹、质量以及微观结构上均会产生变化, 抗压强度与劈裂抗拉强度均呈降低趋势, 且在 400~600 °C 时出现了骤降; 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, 有效改善混凝土的动静态力学性能。此外, 钢纤维的桥接作用可在一定程度上抑制混凝土裂纹的扩展。

关键词: 钢纤维混凝土; 抗压试验; 劈裂抗拉; 霍普金森压杆

中图分类号: TU528

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2025)01-084-13



听语音
与作者互动
聊科研

Mechanical Properties and Microstructure of Elevated Temperature-processed Steel Fiber Reinforced Concrete

DONG Jing, YANG Jinliang, WANG Wei,
LIU Yuan, DU Juan

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The effects of different temperatures on the mechanical properties and microstructure of steel fiber reinforced concrete (SFRC) was investigated by conducting a comparative study of the mechanical properties and microstructure of normal concrete (NC) that was naturally cooled after elevated-temperature treatment at 25 °C, 200 °C, 400 °C and 600 °C, and SFRC with a volume proportion of 1%. First, the failure mode, compressive strength, and splitting tensile strength were obtained by compression and splitting tensile tests of a concrete cube. Second, the dynamic compressive strength and dynamic compression growth factors were obtained through dy-

收稿日期: 2024-07-20

基金项目: 火箭军工程大学青年基金资助项目 (2022QN-B007)

第一作者: 董婧 (1987—), 女, 讲师, 博士, 主要从事结构抗冲击及爆炸研究。E-mail: kimikobe@163.com

引用格式: 董婧, 杨进良, 王炜, 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 (1): 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 (1): 84-96.

dynamic impact compression tests, which were conducted on the specimens under four different impact pressures using Split Hopkinson Pressure Bar. The micro-structures of the specimens under different temperature treatments were observed using scanning electron microscope. Results showed that with an increase in temperature, both NC and SFRC change in terms of color, surface cracks, mass, and microstructure. Simultaneously, the compression and splitting tensile strengths show a decreasing trend, with a sudden drop at 400~600 °C. However, the addition of steel fibers can reduce the mass-loss rate of concrete after high-temperature treatment, and effectively improve the dynamic and static mechanical properties of concrete. Additionally, the bridging effect of the steel fibers can inhibit the propagation of concrete cracks to some extent.

KEYWORDS: steel fiber reinforced concrete; compression test; splitting tensile; Split Hopkinson Pressure Bar

纤维混凝土是将纤维类增强材料掺入水泥、砂浆或混凝土基层而形成的复合材料。目前,混凝土中常见的纤维掺料包括金属纤维、无机纤维和有机纤维^[1]。其中,钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)因其超高的抗拉强度和弹性模量,被广泛应用于对结构力学性能要求较高的国防工程、道路桥梁、工业与民用建筑等土木建设领域。

学者们对 SFRC 的力学性能开展了大量的研究。其中,在准静态力学性能方面,白敏等^[2]开展了不同掺量 SFRC 的抗压、劈拉、抗折试验;Pal 等^[3]开展了 2 种掺量的 SFRC 抗压与劈裂抗拉试验;王艳等^[4-5]研究了碳化与酸雨侵蚀、弯曲荷载与酸雨侵蚀下的 SFRC 耐久性;栗罡等^[6]对 3 种掺量的 SFRC 开展了三点弯曲断裂试验。以上研究总体表明,钢纤维的掺入可以使混凝土抗压强度小幅度增加,劈裂抗拉、抗折、耐久性能明显提升,学者们普遍认为钢纤维混凝土中钢纤维的最优体积掺量为 1%~2%。在动态力学性能方面,混凝土材料在动荷载作用下的力学响应和静荷载作用下存在着较大的差异,分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)是研究材料动态力学性能的主要装置。大量研究表明,混凝土在常温及高温条件下的压缩、拉伸和弯曲强度都具有明显的应变率增强效应^[7-9]。Li 等^[10]采用 SHPB 装置研究了钢纤维自密实混凝土的动态力学性能,结果表明,应变率和钢纤维掺量对材料的破坏模式、峰值应力、峰值应变和弹性模量均有显著影响。Yu 等^[11]采用光滑粒子流体动力学法模拟了钢纤维在超高性能混凝土中的运动并分析了其动态力学性能,提出了基于三阶段的钢纤维动态性能演变规律。

混凝土结构除了承受准静态荷载之外,还可能遭受爆炸、冲击、侵彻等动态荷载作用。比如某些存放武器、弹药的国防工程作为战时作战对手的重点攻击对象,更容易遭受爆炸冲击荷载,使其结构处于高温状态,造成混凝土的高温劣化现象^[12]。除了力学性能的下降,混凝土内部的胶凝介质受高温影响也会发生显著的物理与化学变化^[13-14]。因此,本文主要对高温后钢纤维混凝土的力学性能与微观结构变化开展研究,对比 SFRC 与素混凝土(Normal Concrete, NC)的应变率效应与高温劣化规律,为工程结构防护提供参考。

1 试验设计

1.1 试件制备

采用冀东海德堡 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料采用天然河沙,细度模数为 2;粗骨料采用 5~20 mm 的连续级配碎石;拌合水采用实验室自来水;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂;钢纤维采用衡水晟英金属制品有限公司生产的端钩型钢纤维,长度为 30 mm,直径为 0.75 mm,密度为 7.9 g/cm³,抗拉力为 1 150 MPa。

配合比设计按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)^[15]、《钢纤维混凝土》(JG/T 472—2015)^[16]进行。根据已有研究,钢纤维的掺量为 1%~2% 为宜,本文中 SFRC 试件中的钢纤维体积掺量取 1%,同时设计了 NC 试件作为对照组。NC 的配合比为水泥 243 kg/m³、水 165 kg/m³、砂 708 kg/m³、石 1 258 kg/m³、减水剂 1.6 kg/m³;SFRC 的配合比为水泥 243 kg/m³、水 165 kg/m³、砂 708 kg/m³、石 1 258 kg/m³、减水剂 1.6 kg/m³、

钢纤维 79 kg/m³。

本文中用于静态力学性能测试的试件为边长 100 mm 的立方体, 用于动态力学性能测试的试件为 $\Phi 72\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的圆柱体。按照《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T 221—2010)^[17], 先将纤维及粗、细骨料投入搅拌机干拌 60 s 混合均匀, 然后将纤维分散开, 防止出现“抱团”现象, 再加入水泥、水和减水剂搅拌 120 s, 将各原材料均匀混合, 尽量让混凝土各方向的力学性能保持均匀。搅拌完成后, 将混凝土拌合物倒入至边长 100 mm 的立方体试模以及外径 75 mm、内径 72 mm、高 450 mm 的 PVC 管内。试件在振动台上振动密实成型后, 静置 24 h, 然后进行脱模并编号, 将试件小心转移至标准养护室中养护 28 d。养护完成后将圆柱体切割, 然后打磨为 $\Phi 72\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的圆柱体试件, 用于动态力学性能测试。

1.2 试验方法

为了分析高温后 SFRC 力学性能, 本研究依次开展了立方体抗压试验、劈裂抗拉强度试验、SHPB 冲击压缩试验, 并通过扫描电镜观察了试件微观结构变化。

高温加热装置使用型号为 LYL-17LBT 的高温箱式电阻炉, 最高设置温度为 1 200 °C。SFRC 及 NC 两类试件的目标温度分别设置为 25 °C、200 °C、400 °C、600 °C。升温速率为 10 °C/min, 加热至目标温度后在电阻炉中恒温 2 h, 待自然冷却至室温后取出。

立方体抗压试验与劈裂抗拉强度试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[18]和《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)^[19]规定的试验方法开展, 使用型号为 YAW-2000D 的微机电液伺服压力试验机完成。抗压试验加载速度控制在 0.5 MPa/s, 劈裂抗拉试验加载速度为 0.05 MPa/s。每组试件在同一条件下各进行 3 次抗压与 3 次劈裂抗拉加载试验。SHPB 冲击试验采用直径为 76 mm 的 SHPB 装置, 其中, 入射杆、透射杆、撞击杆的长度分别为 3 200 mm、3 200 mm 和 400 mm, 杆件均为合金钢, 弹性模量为 210 GPa。动态冲击压缩试验中, 通过调整压缩氮气的冲击气压来测试不同应变率下材料的动态力学性能, 本研究中冲击气压分别设置为 0.10 MPa、0.15 MPa、0.20 MPa、0.25 MPa。每组试件在同一条件下进行 3 次冲击压

缩试验。

对混凝土微观结构的研究普遍采用扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 的方式观察并分析其变化^[20-21]。电镜采用型号为 TESCAN MIRA4 的场发射扫描电子显微镜。

2 试验结果分析

2.1 高温后试件表观形态变化及质量损失

经过不同温度处理后, 混凝土表观发生了明显变化, 不同种类的混凝土经过相同高温处理后, 表观颜色变化基本一致。

经 200 °C 加热并自然冷却至室温后, 所有混凝土试件表面由暗灰色变为灰色, 且试件表面均未出现裂缝, 打开高温炉时可明显看出炉腔内往外冒出少量水蒸汽。经 400 °C 加热并自然冷却至室温后, 试件表面由原来的暗灰色变为灰色且有微微泛黄, 试件上的编号全部消失 (后重新标号), 打开高温炉时炉腔内往外冒出微量水蒸汽; NC 试件表面的裂缝从试件边沿向中部发展, 裂缝长度一般达到试件边长的一半, 裂缝的宽度相较于其他种类混凝土试件较宽; SFRC 试件表面的裂缝从试件边沿向中部发展, 裂缝分支较少, 试件表面裂缝并不长。600 °C 加热并自然冷却至室温后, 混凝土试件表面由暗灰色变为白灰色, 所有试件表面都出现了更加明显的裂缝; NC 试件表面裂缝从试件边沿开始扩展, 长度约为试件边长的三分之二, 部分裂缝贯通试件表面; 大部分 SFRC 试件表面出现了贯通的宽裂缝, 虽然其表面裂缝较宽, 但其向内部发展并不深。试件加热过程中, 温度升至 400 °C 后, 高温炉内不断冒出大量水蒸汽, 并凝结在高温炉开合门上方, 打开高温炉时并未发现可见水蒸汽, 试件经不同温度加热后表观如图 1 所示。

高温加热后混凝土的质量变化可通过质量损失率来表示, 质量损失率 α 的表达式为

$$\alpha = \frac{m_a - m_b}{m_a}$$

式中: m_a 为试件加热前质量; m_b 为试件加热冷却后质量。

采用电子秤对各试件加热前后的质量进行称重, 并计算出 NC 及 SFRC 的平均质量损失率, 如表 1 所示。

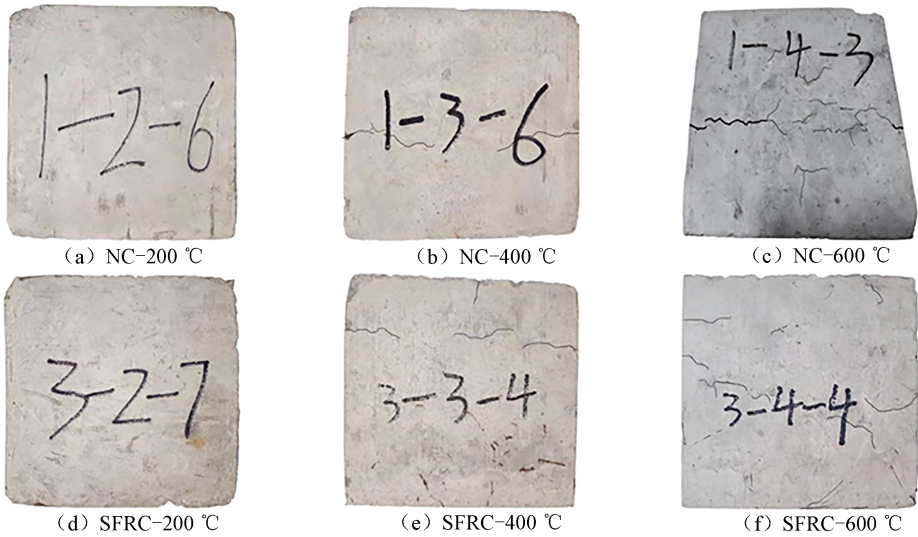


图 1 试件经不同温度加热后的表现

Fig. 1 Specimen appearances post-temperature treatments

表 1 SFRC、NC 在不同温度作用后平均质量损失率

Tab. 1 Average mass-loss rates of SFRC and NC post-heating at different temperatures 单位: %

类型	平均质量损失率		
	200 °C	400 °C	600 °C
NC	3.24	6.91	8.08
SFRC	2.90	6.47	7.60

加热温度为 200 °C 时, 试件的质量损失主要为试件内的自由水; 加热温度为 400 °C 及 600 °C 时, 混凝土内部结构发生变化, 部分物质发生高温分解, 结合水开始蒸发, 导致混凝土试件的质量下降。加热温度为 400 °C 时, 混凝土试件的质

量损失约为 200 °C 时的 2 倍, 加热温度从 400 °C 升至 600 °C 时, 混凝土的质量损失量明显减小。试验发现, 混凝土加入钢纤维后, 其高温质量损失率有所降低, 但效果并不明显。

2.2 高温后试件抗压破坏形态及性能分析

2.2.1 抗压破坏形态分析

试件在立方体抗压试验后的破坏形态如图 2 所示。试验过程中, NC 试件被破坏时, 裂缝由中下部向上剧烈发展, 从出现裂缝到试件达到破坏荷载的时间很短, 达到破坏荷载时 NC 试件几乎完全破碎, 试验后可轻易将试件完全破坏。SFRC 试件被破坏时, 试件下部和上部均发现有裂缝发展, 此时试件所承受的负荷也在不断升高, 间隔一段

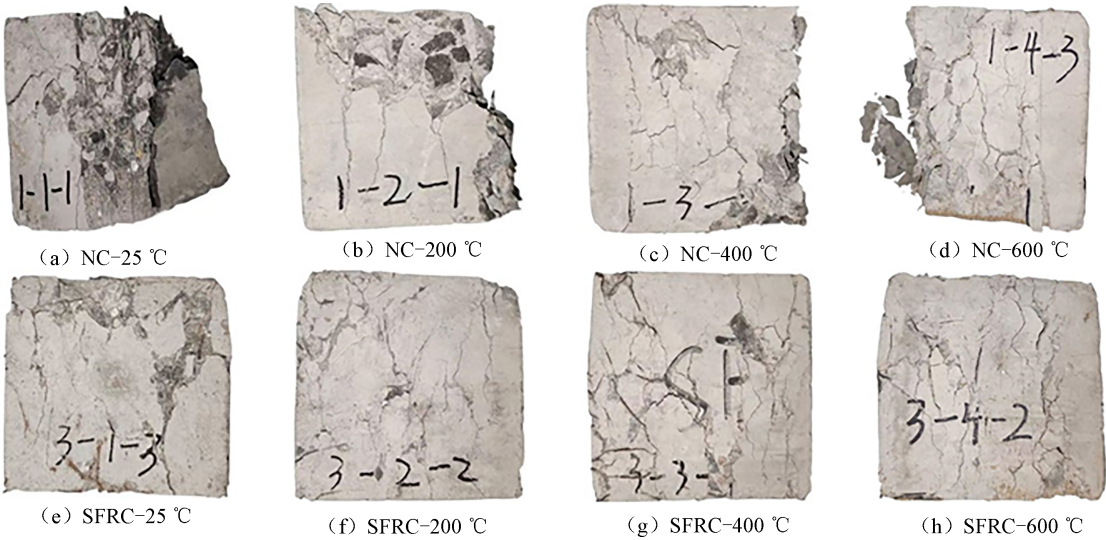


图 2 试件抗压试验后的破坏形态

Fig. 2 Failure mode of specimens after compression tests

时间可发现试件表面的混凝土有轻微的剥落，在钢纤维的作用下，达到破坏荷载时试件的整体性保持较好。总体来说，NC 比 SFRC 的破坏程度更严重，且温度越高试件被破坏的程度越大。

2.2.2 抗压性能分析

不同温度作用后，NC 与 SFRC 试件的抗压试验数据分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同温度作用后 NC 试件的抗压试验数据
Tab. 2 Compression test data of NC post-heating at different temperatures

温度/℃	试件破坏荷载/kN	抗压强度/MPa	平均破坏荷载/kN	平均抗压强度/MPa
25	307.71	29.2	318.47	29.9
	314.69	29.9		
	322.24	30.6		
200	265.30	25.2	270.62	25.7
	278.88	26.5		
	267.67	25.4		
400	243.79	23.2	240.98	22.9
	230.55	21.9		
	248.59	23.6		
600	133.85	12.7	148.73	14.1
	185.44	17.6		
	126.91	12.1		

表 3 不同温度作用后 SFRC 试件的抗压试验数据
Tab. 3 Compression test data of SFRC post-heating at different temperatures

温度/℃	试件破坏荷载/kN	抗压强度/MPa	平均破坏荷载/kN	平均抗压强度/MPa
25	356.31	33.8	356.65	33.9
	331.52	31.5		
	382.12	36.3		
200	349.30	33.2	334.03	31.7
	350.44	33.3		
	302.36	28.7		
400	309.78	29.4	300.50	28.5
	311.76	29.6		
	279.96	26.6		
600	204.51	19.4	199.93	19.0
	215.10	20.4		
	180.18	17.1		

为更加直观地看出温度与混凝土抗压强度之间的关系，作 SFRC 与 NC 的抗压强度与温度的曲线，如图 3 所示。可以看出，NC 及 SFRC 试件的抗压强度值都随着温度升高呈现出明显的下降趋势。以 NC 试件在 25 ℃时的抗压强度为基准值，其在 200 ℃、400 ℃、600 ℃时抗压强度的下降率分别为 14.05%、23.41%、52.84%；以 SFRC 试件在 25 ℃时的抗压强度为基准值，其在 200 ℃、400 ℃、600 ℃时抗压强度的下降率分别为 6.49%、15.93%、43.95%。当温度由 400 ℃升至 600 ℃时，NC 试件与 SFRC 试件的抗压强度值都出现了骤降，主要原因是此时混凝土内部的微观结构发生变化，自由水大量蒸发，混凝土结构水泥水化产物发生高温分解，部分结合水释放，混凝土内部孔隙不断扩展，导致其抗压强度值发生骤降。

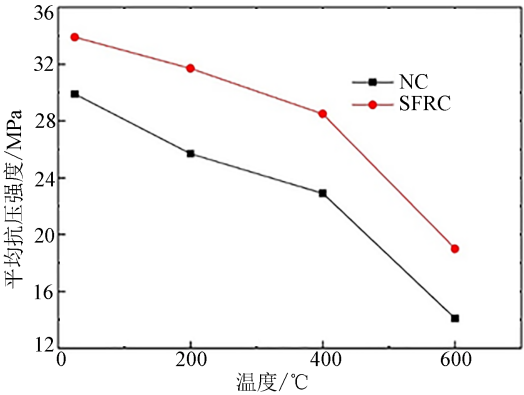


图 3 SFRC、NC 试件在不同温度作用后的平均抗压强度曲线

Fig. 3 Average compression strength curves of SFRC and NC post-heating at different temperatures

对比 NC 试件与 SFRC 试件在同样处理温度下的抗压强度，以 NC 试件的平均抗压强度为基准，SFRC 试件在 25 ℃、200 ℃、400 ℃、600 ℃时的平均抗压强度与 NC 试件相比，分别提高了 13.38%、23.35%、24.45%、34.15%。说明混凝土中加入钢纤维后，其抗压强度有了明显提升；在相同温度处理条件下，SFRC 试件的抗压强度值均大于 NC 试件，随着温度的升高，其对混凝土抗压强度退化的改善效果逐渐明显。

2.3 高温后试件劈裂抗拉破坏形态及性能分析

2.3.1 劈裂抗拉破坏形态分析

在劈裂抗拉试验中，被破坏试件均出现与承压面垂直的劈裂面，劈裂面一般出现在试件的中心线上，劈裂抗拉试验试件破坏形态如图 4 所示。

试验中，NC 试件被破坏的时间较短，当试验结束从定位架取下试件时，其已分为两半。SFRC 试件承受加载的时间明显增加，试验结束后试件出现明显的劈裂面，但试件从始至终都保持较好的整体性。试验表明，建筑物承受集中荷载超过破坏荷载时，使用 NC 的建筑物比使用 SFRC 的建筑物更易发生顷刻性倒塌。

2.3.2 劈裂抗拉性能分析

经不同温度作用后，NC 试件与 SFRC 试件的劈裂抗拉试验数据分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同温度作用后 NC 试件的劈裂抗拉试验数据
Tab. 4 Splitting tensile test data of NC post-heating at different temperatures

温度/℃	试件破坏荷载/kN	劈裂抗拉强度/MPa	平均破坏荷载/kN	平均劈裂抗拉强度/MPa
25	57.000	3.09	68.27	3.70
	68.274	3.70		
	73.551	3.98		
200	54.014	2.92	57.05	3.09
	56.960	3.08		
	60.175	3.26		
400	41.968	2.27	41.47	2.25
	42.245	2.29		
	40.182	2.18		
600	14.073	0.76	16.19	0.88
	15.850	0.86		
	18.645	1.01		

表 5 不同温度作用后 SFRC 试件的劈裂抗拉试验数据
Tab. 5 Splitting tensile test data of SFRC post-heating at different temperatures

温度/℃	试件破坏荷载/kN	劈裂抗拉强度/MPa	平均破坏荷载/kN	平均劈裂抗拉强度/MPa
25	70.000	3.79	74.97	4.06
	75.300	4.08		
	79.600	4.31		
200	65.818	3.56	64.68	3.50
	66.818	3.62		
	61.398	3.32		
400	50.085	2.71	47.79	2.59
	44.165	2.39		
	49.120	2.66		
600	20.012	1.08	19.73	1.07
	19.350	1.05		
	19.833	1.07		

为更加直观地看出温度与混凝土劈裂抗拉强度之间的关系，根据试验数据得出温度与平均劈裂抗拉强度的关系，如图 5 所示。可以看出，NC 试件与 SFRC 试件的劈裂抗拉强度随着温度的升高都有明显的降低趋势。以 NC 试件在 25℃ 时的劈裂抗拉强度为基准值，其在 200℃、400℃、600℃ 时劈裂抗拉强度分别下降了 16.49%、39.19%、76.22%。以 SFRC 试件在 25℃ 时的劈裂抗拉强度为基准值，其在 200℃、400℃、600℃

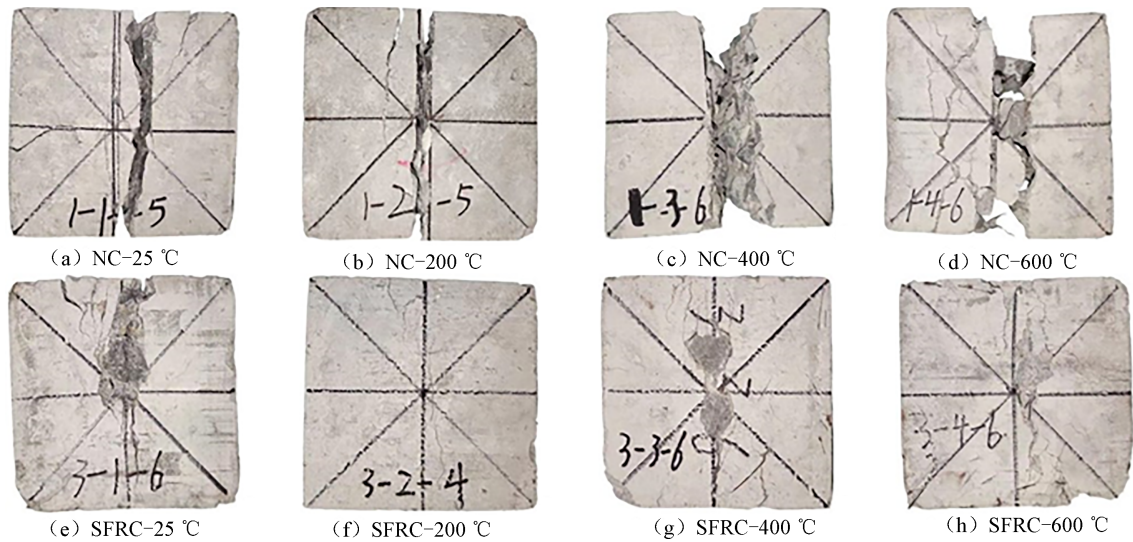


图 4 试件劈裂抗拉试验后的破坏形态
Fig. 4 Failure mode of specimens post-splitting tensile tests

时劈裂抗拉强度分别下降了 13.79%、36.21%、73.65%。对比 NC 试件与 SFRC 试件的劈裂抗拉强度,以 NC 试件的平均劈裂抗拉强度为基准,SFRC 试件在 25 °C、200 °C、400 °C、600 °C 时的平均抗压强度比 NC 试件分别提高了 9.73%、13.27%、15.11%、21.59%。说明在高温条件下,钢纤维对混凝土劈裂抗拉性能增强效果较为明显。总体来说,劈裂抗拉试验结果与抗压试验结果出现的规律较为相似。

2.4 高温后试件冲击压缩破坏形态及受力分析

2.4.1 冲击压缩破坏形态分析

NC 试件与 SFRC 试件在不同温度及不同冲击气压条件下的破坏形态如图 6 及图 7 所示。

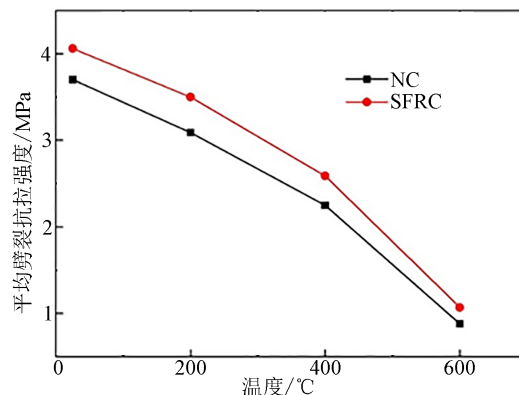


图 5 SFRC、NC 试件在不同温度作用后的平均劈裂抗拉强度

Fig. 5 Average compression strength of SFRC and NC post-heating at different temperatures

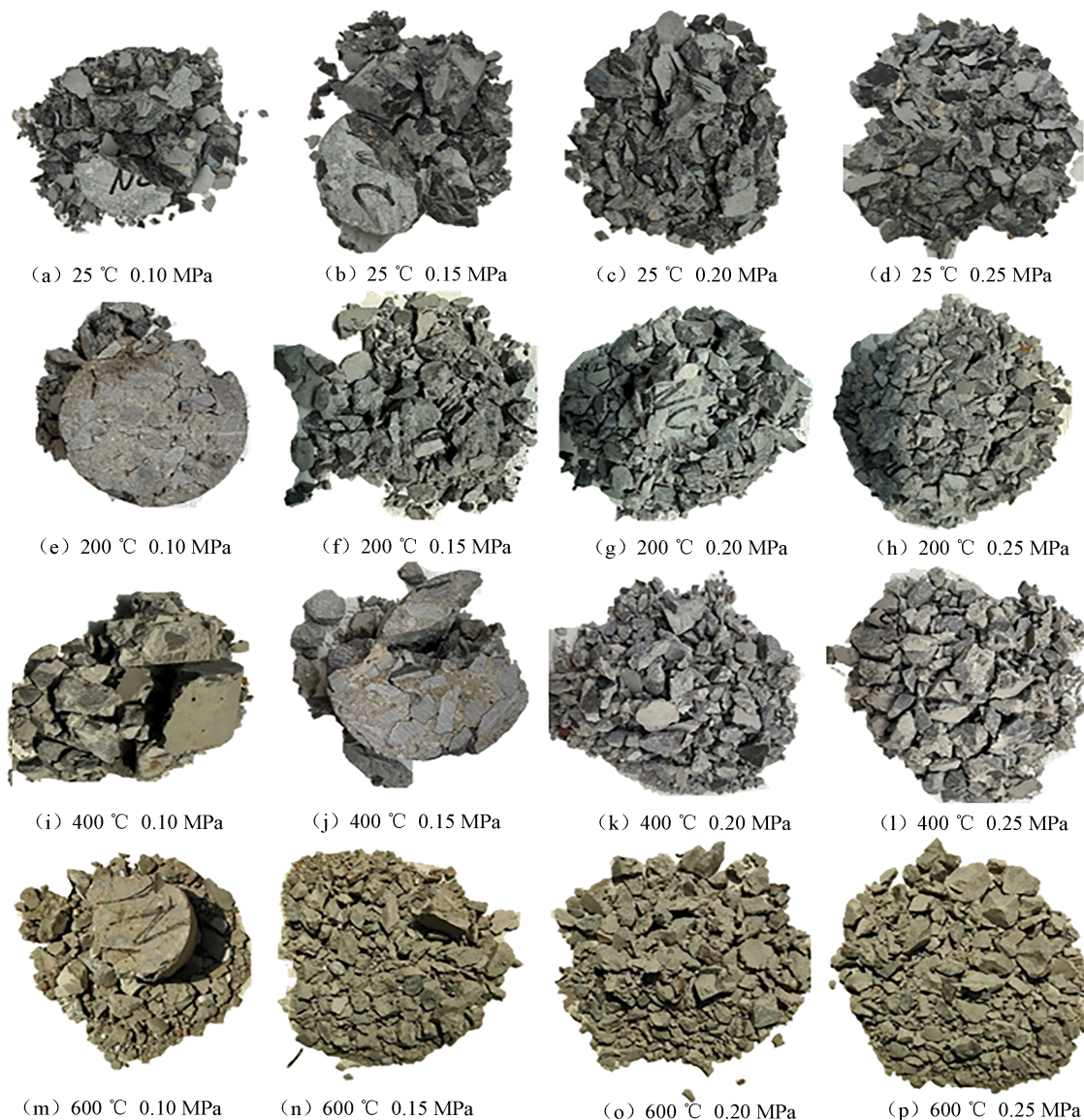


图 6 不同温度及冲击气压下 NC 试件的破坏形态

Fig. 6 Failure mode of NC specimens at different temperatures and impact pressures

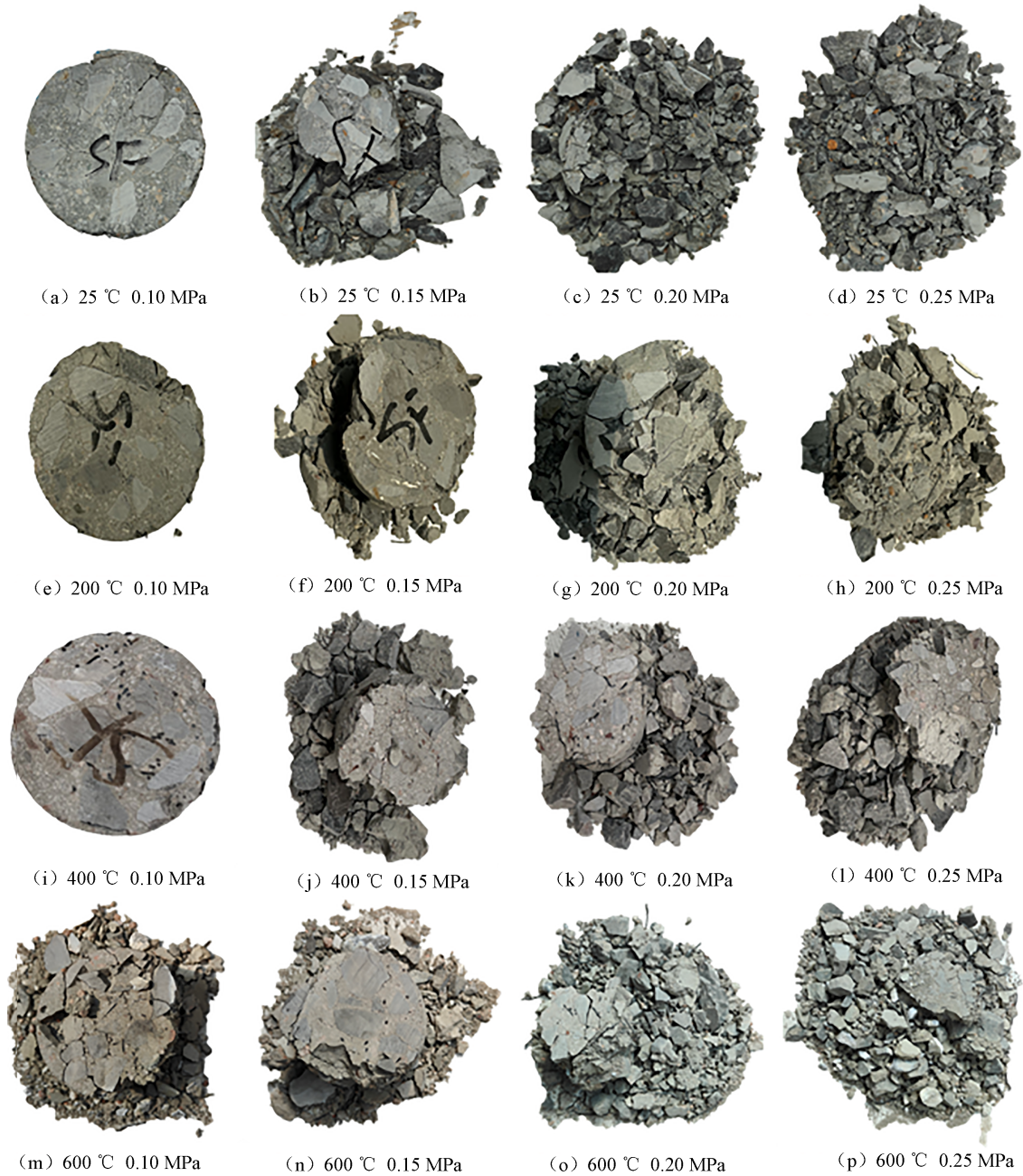


图 7 不同温度及冲击气压下 SFRC 试件的破坏形态

Fig. 7 Failure mode of SFRC specimens at different temperatures and impact pressures

由图6及图7可知，温度及冲击气压变化对混凝土的破碎形态都有较大的影响。与静态压缩试验不同的是，动态冲击压缩试验试件的粗骨料发生了明显的破坏，且当应变率较高时，试件几乎被粉碎。通过各组图片的纵向对比可以发现，随着温度的升高，试件的破坏程度变得严重；通过各组图片的横向对比可以发现，随着冲击气压的增大，NC 试件与 SFRC 试件受荷载作用后破碎程度都会增大。只有冲击气压为 0.1 MPa 时，NC 试件才保持基本的整体性。而 SFRC 试件在加载完

后基本都会“留芯”，即 SFRC 试件破碎后，有大块混凝土存留下来，说明钢纤维发挥了较好的连接作用，此现象说明钢纤维的“桥接”作用能够有效改善混凝土被破坏程度。

2.4.2 冲击压缩应力-应变分析

图 8 为不同温度下，NC 试件与 SFRC 试件在 4 种冲击气压下的动态冲击压缩应力-应变曲线。可以看出，部分工况下试件的应力-应变曲线出现了多个峰值的情况。这是因为，混凝土材料的不均质性导致混凝土不同部位的应力响应不同，同时

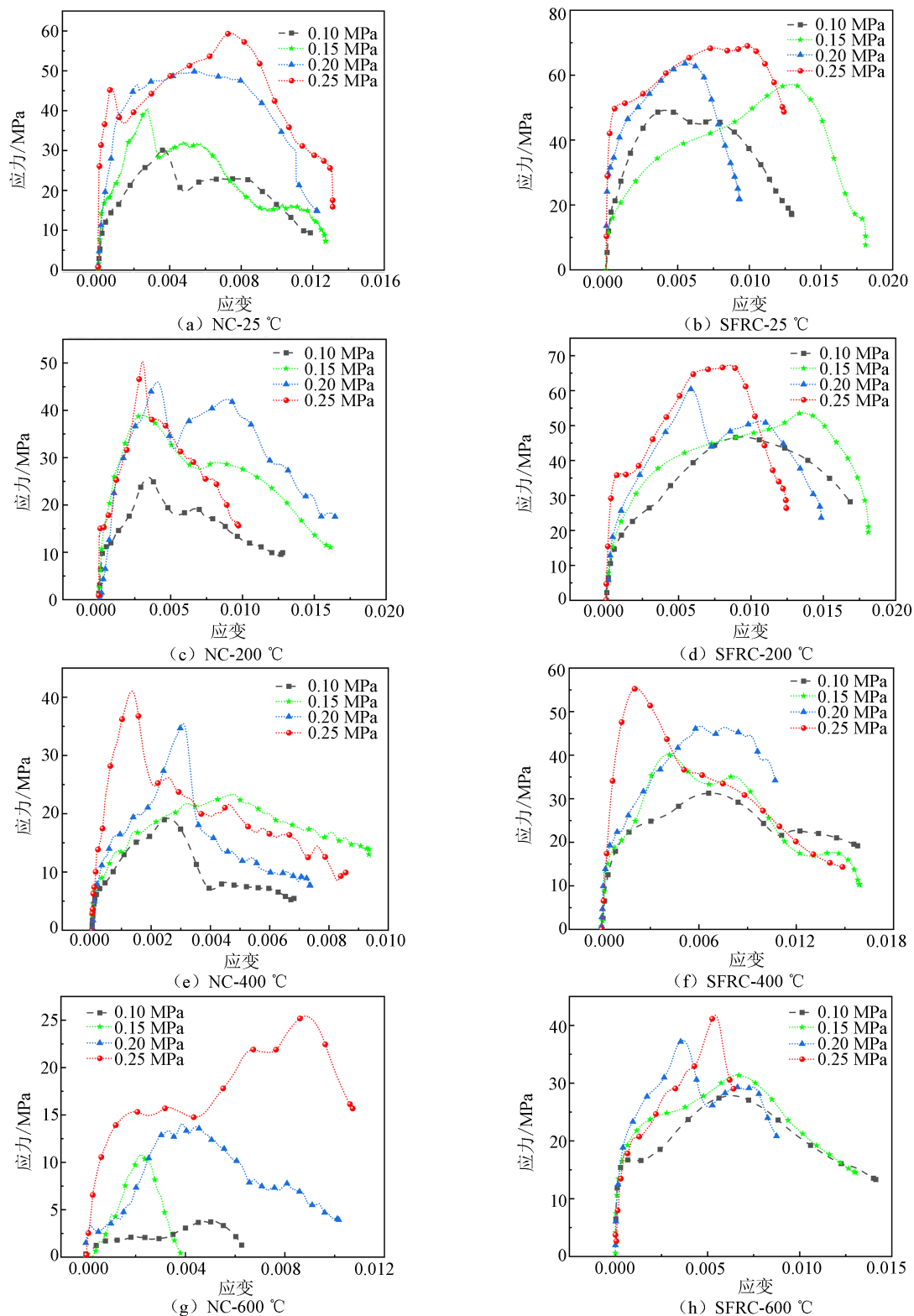


图 8 NC 试件与 SFRC 试件在不同冲击气压下的动态应力-应变曲线

Fig. 8 Dynamic stress-strain curves of NC and SFRC at different impact pressures

SHPB 装置中子弹在撞击入射杆后会产生反射波在入射杆内传播,在试件未发生破坏之前,会再次对试件产生动态冲击。随着冲击气压的提升,此现象会愈加明显。随着加载应变率的提高,NC

试件与 SFRC 试件的应力峰值都会明显增加,说明混凝土的动态抗压强度值存在应变率强化效应。

NC 试件的应力-应变曲线一般出现 1~2 个应力峰值,在出现最大峰值后曲线急剧下降,说明

此时混凝土几乎被完全破坏。在温度为 600 °C 时, 应力-应变曲线只有 1 个峰值, 说明当入射杆的冲击波第一次作用时, 试件就已被破坏, 表现出明显的脆性。SFRC 试件在 25 °C 的不同冲击气压下应力-应变曲线基本只有 1 个峰值, 且曲线较为平滑, 说明钢纤维在混凝土内起到了动态荷载分配的作用, 成为力传递的“桥梁”, 有效克服了混凝土力学性能的各向异性。此外, SFRC 试件的残余强度明显高于 NC 试件, 在应力-应变“驼峰”过后, 曲线变化幅度也比 NC 试件更加缓慢, 说明此时混凝土还没有完全破碎。但是, 随着温度的增加, 钢纤维传递力的作用逐渐减弱, 曲线变得越来越“尖”且“窄”, 应力值变化的幅度也明显增加, 在 600 °C 时更加明显。

2.4.3 应变率效应分析

本文用混凝土动态压缩增长因子 (Dynamic Compression Increase Factor, DCIF) 来表述混凝土的应变率强化效应, DCIF 的计算式为

$$DCIF = \frac{f_{cd}}{f_c} \quad (1)$$

式中: f_{cd} 为混凝土的动态压缩强度值; f_c 为混凝土静态抗压强度值。

利用式 (1) 计算 NC 试件与 SFRC 试件在各种工况下的 DCIF 值, 并分析 DCIF 与冲击气压的关系, 结果如图 9 所示。可以看出, 经不同温度作用后, NC 试件与 SFRC 试件的 DCIF 值都随着冲击气压的增大而增大。在试验温度范围内, SFRC 试件的 DCIF 值都大于 1, 即在应变率强化效应与高温劣化的共同影响下, 应变率强化效应对于 SFRC 试件仍起了主导作用。在 25 °C 及 200 °C 时, NC 试件的 DCIF 值在不同冲击气压下也均大于 1, 但当温度超过 400 °C 后, NC 试件的 DCIF 值在低冲击气压下出现小于 1 的情况。这是因为, 温度超过 400 °C 后, NC 高温劣化较应变率强化效应起主导作用, 试件脆性特征表现更为明显, 其所承受的动态压缩强度值反而小于静态压缩强度值, 只有冲击气压达到 0.25 MPa 时, 试件才出现应变率强化效应。在本试验的应变率条件下, SFRC 表现出应变率强化效应, 进一步说明了混凝土中加

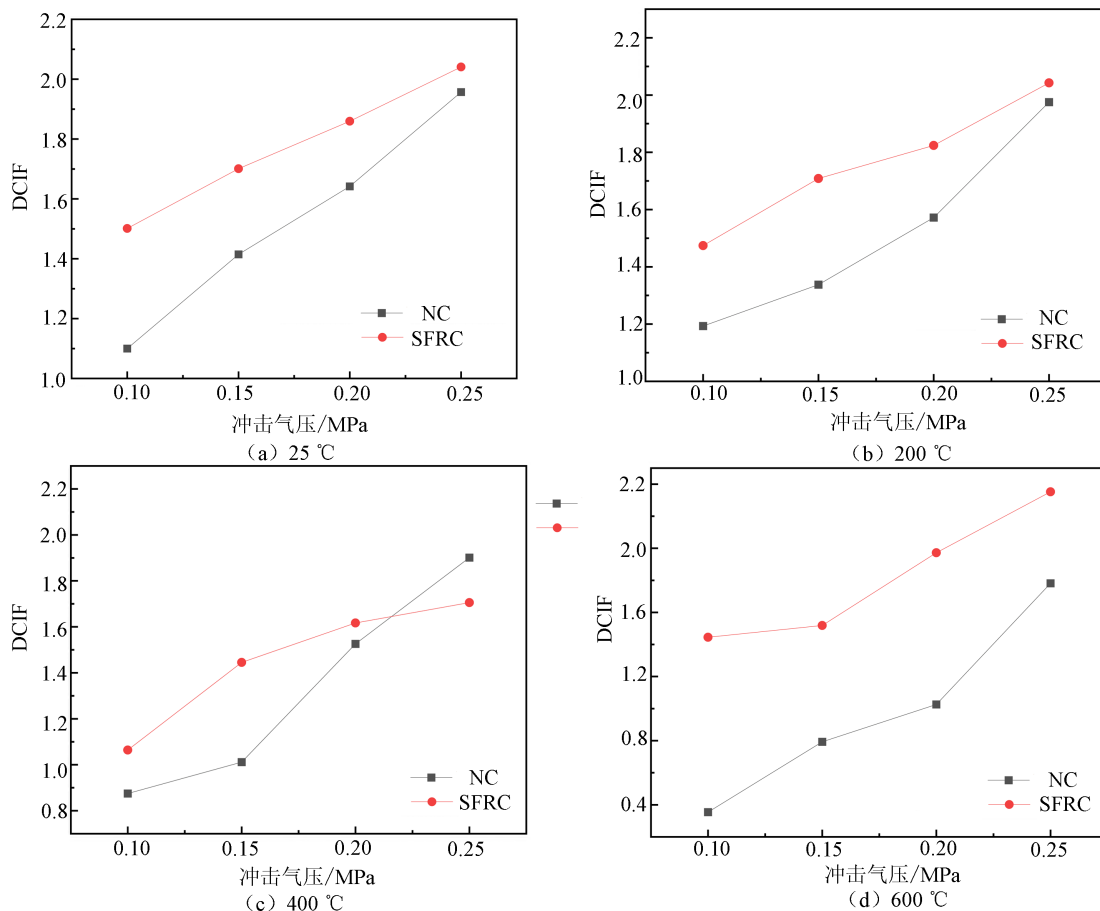


图 9 不同温度作用后 DCIF 与冲击气压的关系

Fig. 9 Relationship between DCIF and impact pressure post-heating at different temperatures

入钢纤维能够有效提升混凝土的耐高温性能，提高混凝土抵抗冲击荷载的能力。

2.5 微观结构分析

NC 试件经不同温度作用后的扫描电镜微观结构，如图 10 所示。可以看出，25 °C 时混凝土各相之间粘结得比较紧密，骨料和水泥浆体之间几乎看不到间隙，由于试件受到破坏，样品上出现了几条细小的微裂缝；200 °C 时部分自由水挥发，由于温度的升高，混凝土中部分水泥颗粒开始水化，其结构表面的水化物数量明显增多，此时水化产物对混凝土强度有微小的提升作用，但由于自由水的挥发，在表面出现了微小的毛细孔，混凝土承受荷载时容易出现应力集中的现象，导致其强度降低；400 °C 恒温保持一段时间后，混凝土内的自由水几乎完全挥发，氢氧化钙也开始分解，与之结合的部分结合水也渐渐挥发，混凝土内产生的水蒸气开始向混凝土内温度较低的地方移动，产生的压力会使混凝土轻微膨胀，导致微孔隙的裂缝减小，此时混凝土的强度也会有轻微的提升，还有一部分水蒸气不断在孔隙中聚集，当孔隙间的拉力小于水蒸气产生的压力时水蒸气将会溢出，导致混凝土表面的孔隙和裂缝明显增多；600 °C 时

混凝土内的自由水完全挥发，水化物的结构变得更加疏松，几乎丧失了粘结能力，同时水泥浆体之间出现了大量孔隙，孔径也明显增加，水化硅酸钙开始分解导致混凝土的强度出现大幅下降。

SFRC 试件经不同温度作用后的扫描电镜微观结构如图 11 所示。可以看出，SFRC 试件被破坏过程中钢纤维并未被直接拉断，而是与砂浆骨料发生相对位移或被拔出。25 °C 时钢纤维边上的砂浆出现了拉拔裂纹，裂纹边缘清晰可见，断面较为整齐，即使出现了裂纹，砂浆的整体性仍然保持较好，钢纤维与砂浆间产生拉拔间隙，拉拔间隙边上的砂浆断面呈缓坡状，说明砂浆与钢纤维的粘结性较好；200 °C 时砂浆出现了较多的微小孔隙，产生了拉拔裂纹，且裂纹扩展出现了多处分支，砂浆靠近钢纤维的断面坡度明显大于 25 °C 时砂浆的断面坡度，说明此时砂浆与钢纤维之间的粘结力已有所下降；400 °C 时，从钢纤维拉拔出后产生的拔痕微观结构图 11 (c) 可以看出，钢纤维与砂浆接触面上产生了很多晶状物，起到了桥接作用，阻止了微裂缝的发展，水化产物变得疏松，与钢纤维的粘结能力下降；600 °C 时可看出钢纤维的表面也开始变得疏松，砂浆与钢纤维的粘

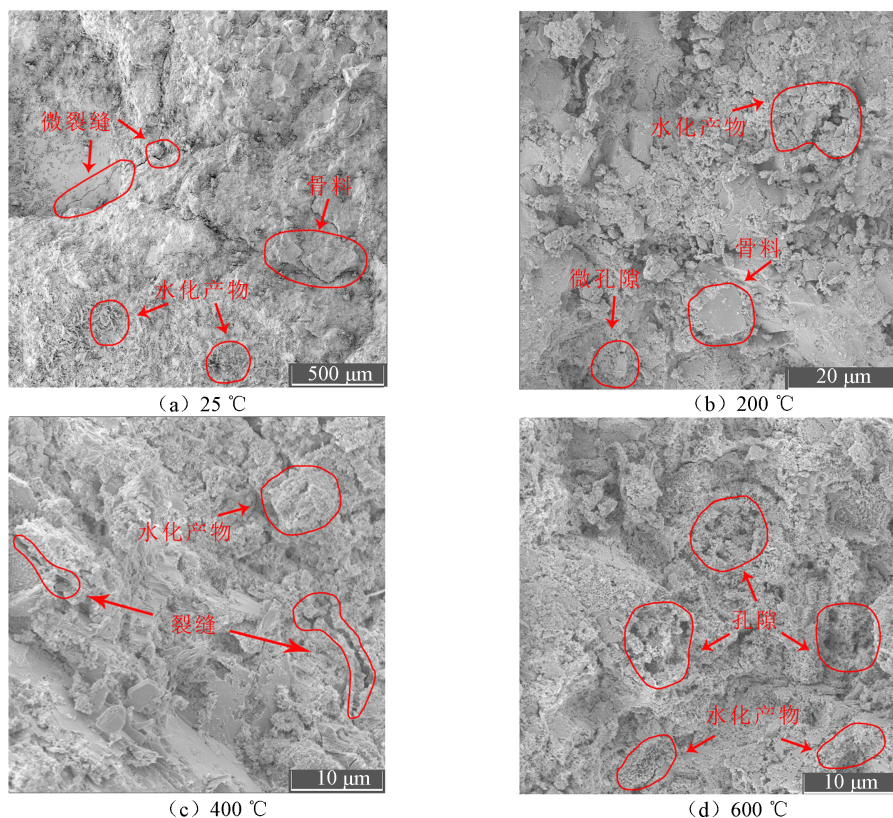


图 10 不同温度作用后 NC 试件的微观结构

Fig. 10 Microstructures of NC post-heating at different temperatures

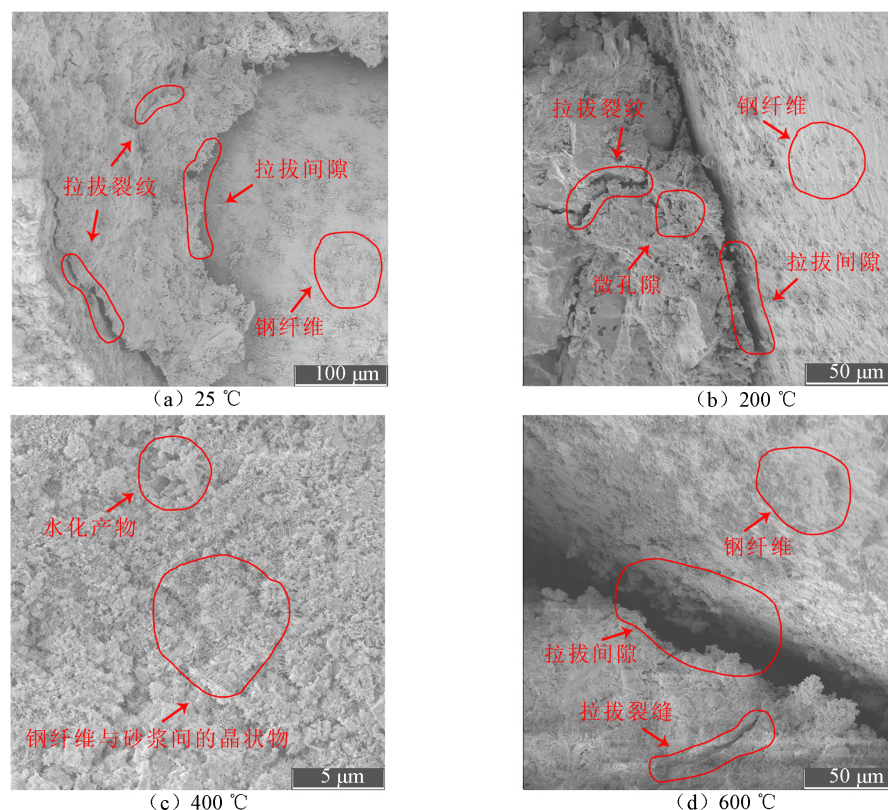


图 11 不同温度作用后 SFRC 试件的微观结构

Fig. 11 Microstructures of SFRC post-heating at different temperatures

结能力急剧下降, 拉拔间隙明显增大, 拉拔裂缝宽度大、距离短, 此时钢纤维更容易在短时间被拔出, 导致 SFRC 试件的强度出现骤降。

3 结论

本文主要研究了高温后体积掺量 1% 的钢纤维混凝土力学性能与微观结构变化, 得出的主要结论如下。

1) 钢纤维的加入可以有效抑制高温后混凝土裂缝的扩展。温度从 25 °C 升高至 400 °C 的过程中, 混凝土的质量损失最快, 加入钢纤维后高温质量损失率有所降低。

2) 在本试验温度范围内, 钢纤维对混凝土的抗压及劈裂抗拉力学性能提升都较为明显。NC 试件及 SFRC 试件在 400~600 °C 时出现了明显的高温劣化效应, 抗压与劈裂抗拉强度均急剧下降。

3) 受动态压缩荷载作用时, SFRC 试件整体性保持较好, 应变率效应起主导作用。NC 试件经 600 °C 高温处理后, 在低冲击气压作用下, 温度劣化效应要强于应变率强化效应。

4) 温度升高时混凝土的孔隙增多, 孔隙直径

逐渐增大, 结构变得疏松。在破坏过程中, 钢纤维与砂浆骨料发生相对位移或被拔出, 随着温度升高钢纤维与砂浆的粘结力下降, 但仍然起了一定程度的桥接作用。

综上所述, 钢纤维的加入可以有效改善高温后混凝土的力学性能。本研究可为钢纤维混凝土结构设计以及国防工程建筑材料选取提供参考。在后续研究中将针对纤维类型及纤维掺量对高温后混凝土力学性能影响开展进一步探索。

参考文献

- [1] BALAGURU P N, SHAH S P. Fiber-reinforced cement composites[M]. New York: McGraw-Hill, 1992, 6-7.
- [2] 白敏, 牛荻涛, 姜磊, 等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 2084-2089.
BAI M, NIU D T, JIANG L, et al. Research on improving the mechanical properties and microstructure of concrete with steel fiber[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(10): 2084-2089.
- [3] PAL S, SHARIQ M, ABBAS H, et al. Strength characteristics and microstructure of hooked-end

- steel fiber reinforced concrete containing fly ash, bottom ash and their combination[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118530.
- [4] 王艳, 牛荻涛, 苗元耀. 碳化与酸雨侵蚀共同作用下钢纤维混凝土的耐久性能[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(4): 579-585, 591.
- WANG Y, NIU D T, MIAO Y Y. Durability of steel fiber reinforced concrete under the combined effects of carbonization and acid rain erosion[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(4): 579-585, 591.
- [5] 王艳, 牛荻涛, 宋占平. 弯曲荷载与酸雨侵蚀共同作用下钢纤维混凝土的耐久性能[J]. *材料导报*, 2014, 28(24): 120-124.
- WANG Y, NIU D T, SONG Z P. Durability of steel fiber reinforced concrete under combined effect of flexural loading and acid rain erosion[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(24): 120-124.
- [6] 栗罡, 巴林, 陈明, 等. 基于数字图像相关法的钢纤维混凝土断裂性能研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2024, 22(1): 25-30.
- LI G, BA L, CHEN M, et al. Fracture properties of steel fiber reinforced concrete based on digital image correlation method[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2024, 22(1): 25-30.
- [7] 方秦, 洪建, 张锦华, 等. 混凝土类材料 SHPB 实验若干问题探讨[J]. *工程力学*, 2014, 31(5): 1-14, 26.
- FANG Q, HONG J, ZHANG J H, et al. Issues of SHPB test on concrete-like material[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(5): 1-14, 26.
- [8] 贾彬, 陶俊林, 李正良, 等. 高温混凝土动态力学性能的 SHPB 试验研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 208-212.
- JIA B, TAO J L, LI Z L, et al. SHPB test for dynamic mechanical performances of concrete at high temperature[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 208-212.
- [9] 王宇涛, 刘殿书, 李胜林, 等. 基于 $\Phi 75\text{mm}$ SHPB 系统的高温混凝土动态力学性能研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(17): 12-17.
- WANG Y T, LIU D S, LI S L, et al. Dynamic performance of concrete based on a $\Phi 75\text{mm}$ SHPB system under high temperature[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17): 12-17.
- [10] LI N, JIN Z Q, LONG G C, et al. Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102212.
- [11] YU R, XU L L, LI K K, et al. Dynamic behaviors assessment of steel fibres in fresh ultra-high performance concrete (UHPC): experiments and numerical simulations[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 59: 105084.
- [12] 朱和国. 复合材料原理[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2021, 10-14.
- [13] MEFTAH H, ARABI N. Effects of elevated temperatures exposure on the properties of concrete incorporating recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134612.
- [14] 李卫文, 高波, 樊亚男. 高温后 C60 纤维混凝土力学性能及超声变化[J]. *混凝土*, 2021(8): 38-41, 46.
- LI W W, GAO B, FAN Y N. Mechanical properties and ultrasonic changes of C60 fiber reinforced concrete after high temperature[J]. *Concrete*, 2021(8): 38-41, 46.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土: JG/T 472-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T 221-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [19] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13-2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [20] 何文昌, 孔祥清, 周聪, 等. 钢纤维再生混凝土力学性能和微观结构研究[J]. *混凝土*, 2020(12): 44-49.
- HE W C, KONG X Q, ZHOU C, et al. Investigation on mechanical properties and microstructure of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete [J]. *Concrete*, 2020(12): 44-49.
- [21] 葛晨, 杨鼎宜, 张军. 高温后纤维混凝土微结构与力学性能研究[J]. *混凝土*, 2022(7): 53-58, 66.
- GE C, YANG D Y, ZHANG J. Study on microstructure and mechanical properties of fiber reinforced concrete at high temperature[J]. *Concrete*, 2022(7): 53-58, 66.

(编辑: 于福兴)