

钢纤维混凝土抗冲击试验研究^{*}

焦楚杰¹, 孙伟², 高培正², 周云¹

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006;
2. 东南大学材料科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 采用 SHPB 装置对不同钢纤维体积率 (V_f) 的钢纤维混凝土 (SFRC) 进行多应变率动态力学性能试验研究, 测出其应变率敏感阈值。试验表明, 当应变率在阈值内升高时, SFRC 峰值应力增长缓慢, 弹性模量基本不变, 应变率超过阈值后升高时, 材料动态强度和弹性模量均增长较快, 而且, V_f 越大, 动态强度提高幅度越大。在冲击条件下, 钢纤维对 SFRC 最显著的贡献是增韧, 当应变率较高时, 基体试件破碎成渣, 而同应变率时的 SFRC 试件还能够基本上保存中间的主体, 呈现出“微裂而不散, 裂而不断”的破坏形态。

关键词: SFRC; SHPB; 冲击; 动态力学性能

中图分类号: TU377 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 06-0041-04

钢纤维混凝土 (SFRC) 具有优良的物理力学性能, 可以满足工程中的高拉应力、复杂受力、高耐久性、抗裂、阻裂和增韧等普通混凝土难以达到的性能要求, 从而被广泛地应用于土木、水利、交通、军事工程领域^[1-2]。有关 SFRC 的静态力学性能的文献报道较多^[3-9], 其动态力学性能方面的文献相对少一些^[9], 而实际上绝大多数工程都承受动荷载作用, 所以 SFRC 的动力性能研究对工程设计的安全性及经济性非常重要。由此, 本文采用分离式霍普金森压杆 (SHPB), 对基体强度为 C40、钢纤维体积率 (V_f) 为 0、2%、3% 的 SFRC (3 种材料分别简称为 C40V₀、C40V₂、C40V₃) 进行抗冲击试验研究。

1 试验概况

1.1 原材料

硅酸盐水泥; 钢纤维; 普通天然砂; 玄武岩碎石, 高效减水剂; 自来水。

1.2 试件

V_f 分别为 0、2%、3%, 每种 V_f 各制备 12 个 $\varnothing 70\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 和 6 个 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 试件, 分别用于测试 SFRC 的冲击与静态力学性能。

1.3 试验装置与原理

采用直径为 74 mm 的变截面 SHPB 装置, 如图 1 所示。其基本原理是^[7]: 高压氮气驱动子弹撞击

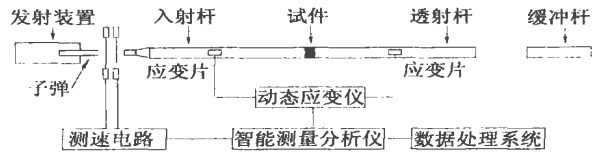


图 1 SHPB 装置示意图

Fig 1 Sketch of SHPB

入射杆, 在入射杆中产生一维应力波, 波传播到达试件后在入射杆中产生反射波, 透射杆中产生透射波。试件在冲击过程中近似保持一维平面应力状态, 动态应变仪记录了入射杆、透射杆中应变随时间变化的曲线, 通过专业程序处理^[8], 可得出试件在冲击过程中的应变率与应力—应变曲线。

2 试验结果

经测试, C40V₀、C40V₂、C40V₃ 的静态抗压强度分别为: 58.7 MPa、63.0 MPa、66.8 MPa, 该值稍大于现行规范中 C40 混凝土的强度^[9]。冲击试验结果见表 1—3, 典型的冲击应力—应变曲线见图 2—4, 用于冲击试验的试件见图 5, 典型的试件破坏形态见图 6。

3 试验结果分析

3.1 SFRC 在冲击条件下的强度

在 SHPB 冲击试验中发现, 当应变率小于临界

* 收稿日期: 2005—04—01

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (59938170)

作者简介: 焦楚杰 (1974 年生), 男, 博士, 讲师; E-mail: jiaochujie@sina.com

表 1 C40V₀ 动态力学性能

Tah 1 Dynamic mechanical properties of C40V₀

应变率	抗压强度	峰值应变	弹性模量
s	MPa	× 10 ⁻³	GPa
15	44.1	1.241	41.7
16	44.7	1.270	41.7
35	58.9	2.000	41.9
51	64.0	2.038	47.0
59	67.1	2.041	51.5
79	74.0	2.092	56.6
80	74.4	2.103	56.7
88	77.3	2.114	60.1

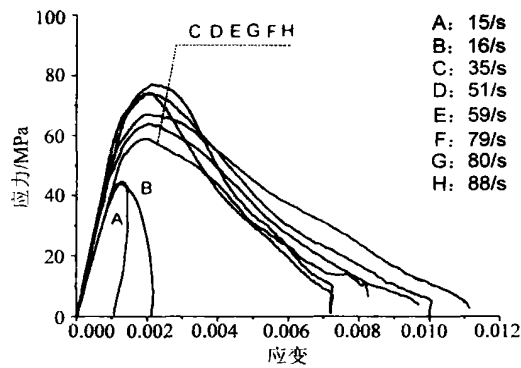


图 2 C40V₀ 应力—应变曲线

Fig 2 Stress-strain curves of C40V₀

表 2 C40V₂ 动态力学性能

Tah 2 Dynamic mechanical properties of C40V₂

应变率	抗压强度	峰值应变	弹性模量
s	MPa	× 10 ⁻³	GPa
16	45.2	1.213	42.5
17	45.7	1.326	42.6
35	63.8	2.150	43.7
56	75.3	2.198	52.0
61	81.3	2.208	53.6
67	85.4	2.215	57.6
77	91.1	2.241	60.9
90	93.3	2.301	63.3

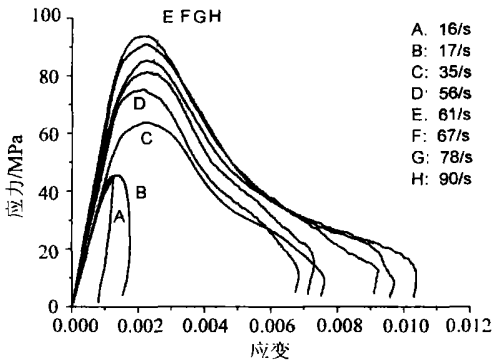


图 3 C40V₂ 应力—应变曲线

Fig 3 Stress-strain curves of C40V₂

表 3 C40V₃ 动态力学性能

Tah 3 Dynamic mechanical properties of C40V₃

应变率	抗压强度	峰值应变	弹性模量
s	MPa	× 10 ⁻³	GPa
15	46.8	1.396	44.1
16	48.1	1.244	44.1
35	66.9	2.251	44.5
56	84.7	2.291	53.2
59	87.2	2.300	56.8
69	92.1	2.315	60.7
78	95.5	2.320	62.1
85	100.1	2.351	63.6

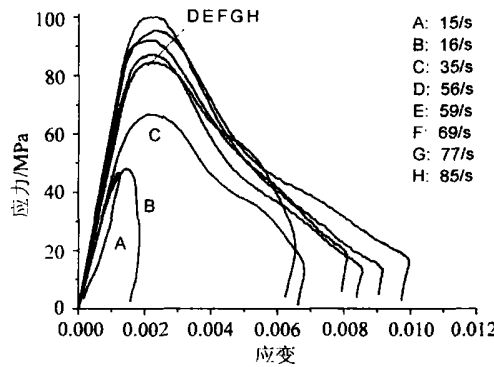


图 4 C40V₃ 应力—应变曲线

Fig 4 Stress-strain curves of C40V₃

值（应变率敏感阈值）时，测出的 SFRC 峰值应力小于其静态抗压强度，并且随着应变率的改变，峰值应力变化不大，试件无可见损伤；当应变率达到阈值时，峰值应力达到或略超过静态强度，试件破坏；当应变率再提高时，峰值应力提高较快。反复测试表明，本文 C40 系列 SFRC 的应变率敏感阈值为 35/s。

Ross 和 Tedesco^[10-11] 采用直径为 51 mm 的 SHPB 装置对 C30—C50 混凝土进行冲击压缩试验，测出应变率敏感阈值为 60/s，超过该值后，峰值应力

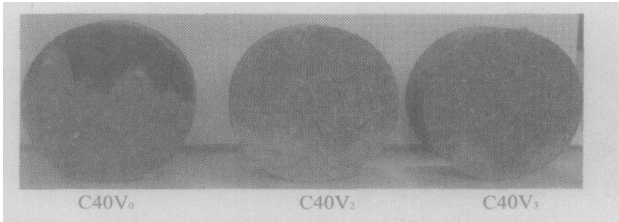


图 5 用于冲击试验的试件

Fig 5 Specimens for impact compression tests

随应变率的对数呈线性增长。严少华^[12] 采用直径为 74 mm 的 SHPB 装置对 C60 混凝土和 C80 级 SFRC

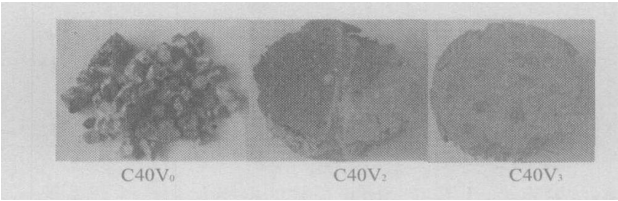


图 6 相同应变率下的 C40V₀、C40V₂、C40V₃ 的破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of C40V₀, C40V₂, C40V₃ at same strain rate

进行冲击压缩试验，测出应变率敏感阈值为 $43\text{ s}^{-1} \sim 47\text{ s}^{-1}$ 。本试验结果与后者相对比较接近。

从表 1 至表 3、图 2 至图 4 可看出，当应变率超过阈值后，材料峰值应力与弹性模量均增长较快，这是 SFRC 的应变率硬化现象。应变率硬化原因可从两个方面给予解释：

一方面，混凝土材料的破坏是由于内部裂纹的产生和发展，而裂纹形成过程所需的能量远比裂纹发展过程中所需的能量高^[13]。撞击的速度越高，产生的裂纹数目就越多，因而需要的能量就越多，又因为高速度撞击的荷载作用时间很短，材料变形缓冲小，根据冲量定理或功能原理，只能通过增加应力的途径来抵消外部冲量或能量，结果材料的破坏强度随应变率的增大而提高。

另一方面，类似于 Bracc W F^[14] 和 Janach W^[15] 对岩石应变率硬化的分析，混凝土的应变率硬化效应可以看作材料由一维应力状态向一维应变状态转换过程中的力学响应。在超过阈值后的较高应变率时，混凝土试件受力不同于静态单轴受压的一维应力状态，尤其试件中间部位的侧向变形由于惯性作用而受到限制，应变率越高，则限制作用越大，材料近似于处于围压状态，即一维应变状态，从而其破坏强度随应变率的增大而提高。

SFRC 与基体混凝土动力性能的区别在应变率超过阈值之后表现出来。从 35 s^{-1} 至 90 s^{-1} ，C40V₀、C40V₂、C40V₃ 的强度增幅分别为：31.24%、46.24%、49.63%，可见对于 C40 系列的 SFRC，在 35 s^{-1} 至 90 s^{-1} 区段，随着应变率升高， V_f 越大的 SFRC 峰值应力提高幅度越大。钢纤维所起的作用是阻止基体开裂，另外，纤维网包络约束基体，使试件中间部位受到的围压更大，结合应变率硬化的两方面因素，所以随着应变率升高，SFRC 的峰值应力提高幅度比基体混凝土的提高幅度大，而且， V_f 越大，峰值应力提高幅度越大。

3.2 SFRC 在冲击条件下的韧性

与静态力学性能类似，在冲击条件下，钢纤维对基体最显著的贡献是增大其韧性。从图 2 至图 4 可看出，SFRC 应力—应变曲线比基体混凝土的曲

线丰满。冲击持续的时间虽然很短，但在试件破坏之前还是有一个裂缝扩展的过程，钢纤维仍然起到了阻裂增韧的作用。

3.3 SFRC 在冲击条件下的弹性模量

从表 1 至表 3 和图 2 至图 4 可看出，应变率小于阈值时，弹性模量变化微小，当应变率超过阈值继续增长时，弹性模量提高较快。从 35 s^{-1} 至 90 s^{-1} ，C40V₀、C40V₂、C40V₃ 的弹性模量增幅分别为：43.4%、44.9%、42.9%。当应变率小于阈值时，应力—应变曲线的上升段基本上为同一直线，所以弹性模量几乎不变；而当应变率超过阈值增长时，应力—应变曲线的上升段应力增长快，应变增长相对比较缓慢，从而弹性模量提高较快。

3.4 SFRC 破坏形态

试验结果表明，在相同或相近应变率条件下，SFRC 试件的破坏程度都要比基体混凝土轻得多，从图 6 可看出，普通混凝土试件碎成了一堆残渣时，而同应变率的 SFRC 试件还能够基本上保存中间的主体。SFRC 在冲击条件下“微裂而不散，裂而不断”的破坏模式是其区别于普通混凝土之重要特点，该特点尤其适合于承受强动载的工程结构，如防护工程、存放易爆危险品的建筑物。

SFRC 破坏形态机理一方面在于钢纤维的阻裂增韧增强，另一方面，从应力波的角度分析，试件可能出现拉伸破坏。SHPB 试验中的混凝土试件侧面为自由面，经侧面反射的波为拉伸波，这个拉伸波的强度虽然不是很强，但混凝土的抗拉强度也很小，因此，它可能使材料在压缩过程中产生了拉伸破坏。所以 SFRC 试件的破坏程度远轻于基体混凝土试件的原因之一是由于在试件内部大量的无规则分布的钢纤维形成了一个纵横交错的网状结构，有效地阻碍混凝土的拉伸破坏。

4 结 论

(1) SFRC 具有明显的应变率硬化效应，C40 级 SFRC 的应变率敏感阈值约为 35 s^{-1} 。当应变率小于阈值时，SFRC 峰值应力小于其静态抗压强度，并且随着应变率的改变，峰值应力变化不大，弹性模量几乎不变，试件无可见损伤；应变率超过阈值后升高时，SFRC 的峰值应力和弹性模量提高较快，而且，提高的幅度随 V_f 的增加而增长。

(2) 在冲击条件下，钢纤维对 SFRC 最显著的贡献是增韧。

(3) 在相同应变率条件下，SFRC 试件的破坏程度都要比基体试件轻得多。当应变率较高时，基体试件破碎成渣，而同应变率时的 SFRC 试件还能

够基本上保存中间的主体。SFRC 这种“微裂而不散，裂而不断”的破坏形态机理一方面在于钢纤维的阻裂增韧增强，另一方面，在试件内部大量无规则分布的钢纤维形成了一个纵横交错的网状结构，有效地阻碍混凝土试件侧向的拉伸破坏。

致谢：本文试验得到了宁波大学董兴龙教授、陈江瑛教授以及中国科技大学//中国科学院材料力学行为和重点实验室胡时胜教授、孟益平博士的指导和帮助，参加本项目的还有东南大学秦鸿根教授、张亚梅副教授、蒋金洋博士和赖建中博士。

参考文献：

[1] 赵国藩, 彭少明, 黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 1—6.

[2] 焦楚杰. 高与超高性能钢纤维砼抗冲击和抗爆研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.

[3] DING Yining, WOLFGANG Kusterle. Compressive stress-strain relationship of steel fibre reinforced concrete at early age[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1573—1579.

[4] MANSUR M A, CHIN M S, WEE T H. Stress—strain relationship of confined high—strength plain and fiber concrete[J]. 1997, 9(4): 171—179.

[5] RAMESH K, SESHU D R, PRABHAKAR M. Constitutive behaviour of confined fibre reinforced concrete under axial compression[J]. 25(2003): 343—350.

[6] LOK T S, ASCE M, LI X B et al. Testing and response of

large diameter brittle materials subjected to high strain rate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14 (3): 262—269.

[7] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 42—44.

[8] 唐志平, 王礼立. SHPB 实验的电脑化数据处理系统 [J]. 爆炸与冲击, 1986, 6(4): 320—328.

[9] 中国建筑行业标准, 混凝土结构设计规范 GB50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[10] ROSS C. Allen, JOSEPH W. Tedesco and STEVEN T. Kuennen. Effects of strain rate on concrete strength [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(1): 37—47.

[11] ROSS C A. Fracture of concrete at high strain rate [C]. In: SHAH S F eds. Toughening Mechanism in Quasi—Brittle Materials. Netherland: Kluwer Academic Pulishers, 1991: 577—591.

[12] 严少华, 李志成, 王明洋等. 高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 237—241.

[13] 王道荣, 胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响 [J]. 实验力学, 2002, 17(1): 23—27.

[14] BRACC W F, JONCS A H. Coppairson of uniaxial deformation in shock and static loading of three rocks [J]. Geophysical Research, 1971, 76(20): 4913—4921.

[15] JANACH W. The role of bulking in brittle failure of rocks under rapid compression [J]. Intemational Journal of Rock Mechanical and Mining Science, 1976, 13(6): 177—186.

Experiment and Study on SFRC Subjected to Impact Loading

JIAO Chu jie¹, SUN Wei², GAO Pei zheng², ZHOU Yun¹

(1. School of Civil engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With SHPB testing method, the dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) with different fiber volume fractions (V_f) under impact compression with different strain rates were studied. The rate sensitive rate value of SFRC were acquired by tests. The experiment results showed that the maximum stress raised slowly and elastic modulus almost kept constant when the strain rates raised within the threshold value, whereas the dynamic strength and elastic modulus raised quickly when the strain rates raised beyond the threshold value, moreover, the larger the V_f became, the more rapidly the dynamic strength increased. In addition, when subjected to impacting load, the outstanding contribution of steel fibers towards the SFRC were toughening. That is, SFRC specimen developed cracks but the overall shape of the specimen remained virtually unchanged, however, under the same strain rate, the matrix specimen were broken almost into small pieces.

Key words: SFRC; SHPB; impact; dynamic mechanical properties