文章编号：1000-5773(2013)01-0069-07

陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土的强韧化效应*

苏灏扬[1]，许金余[1,2]，高志刚[1]，李志武[1]，杨　坤[1]

（1.空军工程大学机场建筑工程系，陕西西安　710038；
2.西北工业大学力学与土木建筑学院，陕西西安　710072）

摘要：采用液压试验机和∅100 mm分离式霍普金森压杆实验装置，研究了体积分数为0.1%、0.2%和0.3%的陶瓷纤维混凝土的准静态和动态力学性能，分析了陶瓷纤维的增强机理，并将其与相同纤维体积分数的碳纤维混凝土进行对比。结果表明：陶瓷纤维改善了普通硅酸盐混凝土的准静态力学性能；纤维体积分数为0.3%时，抗压强度提高15.0%，劈裂抗拉强度提高8.5%，抗折强度提高12.7%。冲击荷载作用下，陶瓷纤维混凝土的动态抗压强度和比能量吸收随平均应变率的增加近似线性增长；体积分数为0.2%时，陶瓷纤维的增强、增韧效果最佳。陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土的增强、增韧效果总体上优于碳纤维。

关键词：陶瓷纤维；应变率；动态抗压强度；比能量吸收；增强机理
中图分类号：O347.3；TU528.572　　**文献标识码**：A

1　引　言

混凝土作为最常用的人造建筑材料，发展至今已有170多年的历史。社会的不断进步、大跨度结构和高层建筑需求量的日益增加，对混凝土的安全性能提出了更高的要求。多年来高强度、超高强度一直是众多学者追求的目标，然而混凝土的强度越高，其结构延性、抗裂、抗震、防火等性能越低。在这一背景下，纤维混凝土应运而生。实验表明[1-3]，纤维材料的加入可以有效改善混凝土的抗拉、抗弯、抗冲击及耐久性等性能。强度和韧性是混凝土材料的两个重要指标，现有的纤维很难同时改善这两方面的要求，迫切需要寻找一种既能增强又能明显增韧的高强高弹模纤维。

陶瓷纤维是一种纤维状轻质耐火材料，具有重量轻、耐高温、热稳定性好、热导率低、比热小、高比强、高比模、抗氧化及耐机械震动等优点，有“第五能源产品”的美称[4-8]。目前，关于陶瓷纤维混凝土(Ceramic Fiber Reinforced Concrete，CRFRC)的准静态和动态力学性能研究较少。马一平等人[9]研究了陶瓷纤维增强普通硅酸盐水泥基复合材料的力学性能，结果表明：在水泥砂浆中掺入长度为5 mm、质量分数为5%的陶瓷纤维时，其抗弯增强效果可达40%左右；若掺入硅灰，使基体颗粒粒度降低，则抗弯增强效果可提高近100%。

本研究采用液压试验机和∅100 mm分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)实验装置，研究体积分数为0.1%、0.2%和0.3%的陶瓷纤维对普通硅酸盐混凝土的增强增韧效果，并将其与相同纤维体积分数的碳纤维混凝土(Carbon Fiber Reinforced Concrete，CFRC)进行对比分析。

* **收稿日期**：2011-12-12；**修回日期**：2012-03-12
基金项目：国家自然科学基金(51078350)；陕西省自然科学基金(SJ08E210)
作者简介：苏灏扬(1986－)，男，博士，主要从事防护结构研究. E-mail：suhaoyang117@126.com

2 实 验

2.1 原料选取及配比

为提高纤维与混凝土之间的界面黏结强度，充分发挥陶瓷纤维抗拉强度和弹性模量的优势，用粉煤灰和微硅粉分别取代 20%和 5%的水泥，以提升胶凝材料的细度。具体实验材料包括：P. O 42.5R 水泥，陕西秦岭水泥股份有限公司生产；一级粉煤灰，韩城第二发电厂生产；微硅粉，西安霖源微硅粉有限公司生产，平均粒径 0.10～0.15 μm，比表面积为 15～27 m^2/g，SiO_2 的质量分数为 92%；石灰岩碎石，产自陕西省泾阳县，其中粒径为 5～10 mm 的碎石占 15%，粒径为 10～20 mm 的碎石占 85%；灞河中砂，细度模数为 2.8；FDN 高效减水剂，广州建宝新型建材有限公司生产，减水率 20%；Nextel 610 陶瓷纤维，3M 公司生产，其物理、力学性能指标见表 1，其中 $w_{Al_2O_3}$ 为 Nextel 610 陶瓷纤维中 Al_2O_3 的质量分数，E_c 为弹性模量，f_t 为抗拉强度，T_{max} 为最高使用温度。表 2 为 C50 素混凝土配合比。

表 1 Nextel 610 陶瓷纤维的物理、力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of Nextel 610 ceramic fiber

$w_{Al_2O_3}$	Diameter/(μm)	Length/(mm)	Density/(g/cm^3)	E_c/(GPa)	f_t/(GPa)	T_{max}/(℃)
>99%	10～12	12.7	3.88	380	3.00	1 204

表 2 C50 素混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of C50 concrete (kg/m^3)

Cement	Water	Sand	Limestone	FDN water reducing agent	Fly ash	Silicon powder
371	180	672	1 008	5	99	25

2.2 准静态力学性能实验

按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081－2002)，在 2 000 kN 的液压试验机上进行准静态力学性能实验。抗压、劈裂抗拉、抗折强度实验的加载速率分别控制在 0.5～0.8 MPa/s、0.05～0.08 MPa/s 和 0.05～0.08 MPa/s。

2.3 SHPB 实验

采用∅100 mm SHPB 系统，测试混凝土材料的动力学性能。圆柱形试件直径为(98.0±0.5)mm，长(49.0±0.5)mm。实验时在试件端面涂抹润滑油，以减小摩擦效应。在入射杆端黏贴厚度为 1 mm，直径分别为 20、22、25、27 和 30 mm 的 H62 黄铜波形整形器，使入射脉冲上升沿的升时延长 1～2 倍，保证试件的应力均匀性，并极大程度地消除了高频振荡和弥散效应。

采用三波法[10]进行数据处理。由弹性杆中的应变波形，计算试件应力 σ_s、应变 ε_s 及应变率 $\dot{\varepsilon}_s$，即

$$\sigma_s(t)=\frac{E[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t+\tau_1)+\varepsilon_t(t+\tau_2)]A}{2A_s} \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t)=\frac{[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t+\tau_1)-\varepsilon_t(t+\tau_2)]c}{l_s} \tag{2}$$

$$\varepsilon_s(t)=\int_0^t\dot{\varepsilon}_s(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

式中：E 为杆的弹性模量，c 为杆中波速，A、A_s 分别为杆、试件的横截面积，l_s 为试件的初始厚度，ε_i、ε_r、ε_t 分别为杆中的入射、反射及透射应变，τ_1、τ_2 分别为反射波和透射波相对于入射波的时间延迟。由于混凝土实验数据的离散性较大，在数据处理时剔除了个别偏差较大的数据，研究其统计规律。

3 结果分析

3.1 准静态力学性能

表 3 给出了 CRFRC 的准静态力学性能，其中 φ_{CRF} 为陶瓷纤维体积分数，f_c 为抗压强度，f_{ts} 为劈裂

抗拉强度,f_{cf}为抗折强度。可以看出,CRFRC 的抗压强度随陶瓷纤维体积分数的增加分别提高 7.4%、13.8%和 15.0%,劈裂抗拉强度分别提高 6.5%、1.5%和 8.5%。当陶瓷纤维体积分数为 0.1%时,抗折强度降低 2.5%;体积分数为 0.2%和 0.3%时,抗折强度分别提高 5.1%和 12.7%。其原因在于:对于体积相对较大的长方体试件,低掺量时,陶瓷纤维分布相对不均,由于纤维与混凝土基体之间存在薄弱环节,使得在准静态荷载作用下纤维相对密集处易产生应力集中,从而导致破坏;当陶瓷纤维掺量较高时,纤维相对均匀地分布于混凝土中,形成空间支撑体系,增强效果明显。以应力-应变曲线下的面积表征混凝土的能量吸收特性,即韧性。由表 3 可知,CRFRC 的能量吸收随陶瓷纤维体积分数的增加而递增,且纤维体积分数越高,增长幅度越明显,当体积分数为 0.3%时,韧性提高约 37.0%。

表 3 CRFRC 的准静态力学性能

Table 3 Quasi-static mechanical property of CRFRC

φ_{CRF}/(%)	f_c/(MPa)	f_{ts}/(MPa)	f_{cf}/(MPa)	Peak strain/(10^{-3})	Energy absorption/(J/cm^3)
0	56.6	3.99	7.9	1.67	0.113
0.1	60.8	4.25	7.7	1.60	0.120
0.2	64.4	4.05	8.3	1.73	0.134
0.3	65.1	4.33	8.9	2.14	0.155

3.2 动态增强效应

表 4 列出了 CRFRC 和素混凝土的 SHPB 实验结果,其中 e_{SEA}为比能量吸收。CRFRC 的动态抗压强度 $f_{c,d}$随平均应变率 $\dot{\varepsilon}_{ave}$ 的变化情况如图 1 所示。可以看出,CRFRC 的动态抗压强度随平均应变率的增加近似呈线性增长,表现出显著的应变率相关性。定义动态抗压强度增长率 $\dot{f}_{c,d}$ 为 CRFRC 与素混凝土的动态抗压强度的差值与素混凝土动态抗压强度的比值。图 2 给出了CRFRC动态抗压强度增

表 4 CRFRC 与素混凝土的 SHPB 实验结果对比

Table 4 Comparison of SHPB experimental results of CRFRC and plain concrete

φ_{CRF}/(%)	$\dot{\varepsilon}_{ave}$/(s^{-1})	$f_{c,d}$/(MPa)	Peak strain/(10^{-3})	Limit strain/(10^{-3})	e_{SEA}/(J/cm^3)
0	26.5	86.5	4.79	11.52	0.25
	37.7	100.6	7.07	11.97	0.32
	47.9	104.6	6.93	16.73	0.44
	69.9	106.5	7.85	26.30	0.60
	98.6	122.5	9.62	34.88	0.74
0.1	35.0	82.2	7.28	9.26	0.20
	47.3	86.5	7.00	18.95	0.40
	66.6	103.3	6.67	26.17	0.59
	77.6	106.8	7.25	30.46	0.63
	94.6	115.8	8.32	36.85	0.70
0.2	28.3	92.1	6.11	7.69	0.21
	49.6	101.2	7.32	12.45	0.50
	61.7	106.5	6.80	26.03	0.58
	73.6	110.2	6.97	29.23	0.65
	91.4	134.3	8.47	34.30	0.85
0.3	28.6	89.7	7.20	7.40	0.15
	39.0	100.9	6.92	8.58	0.20
	51.1	107.0	7.91	18.45	0.46
	60.6	114.8	9.52	19.73	0.49
	75.5	115.6	7.62	28.39	0.71

长率 $\dot{f}_{c,d}$ 随平均应变率 $\dot{\varepsilon}_{ave}$ 的变化关系。由图 1、图 2 可知，纤维的掺入，较大程度地提高了混凝土的动态抗压强度，且应变率越高，增强效果越明显。在应变率为 20～130 s^{-1} 范围内，陶瓷纤维的体积分数为 0.1%、0.2%和 0.3%时，动态抗压强度最大提高 27.9%、34.2%和 34.5%。

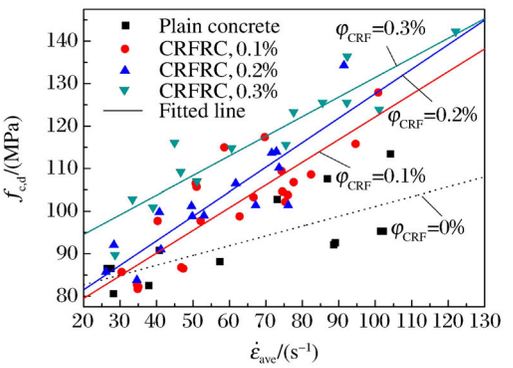


图 1 CRFRC 动态抗压强度随平均应变率的变化

Fig. 1 Dynamic compressive strength versus average strain rate for CRFRC

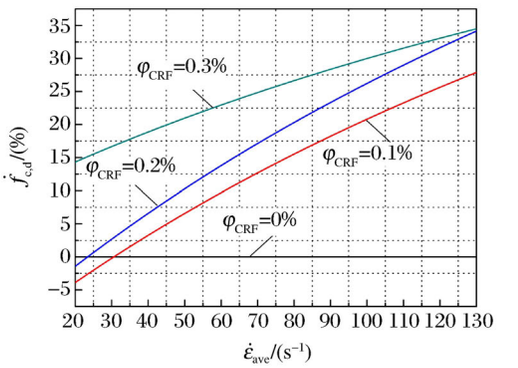


图 2 CRFRC 与素混凝土的动态抗压强度比较

Fig. 2 Comparison of dynamic compressive strength between CRFRC and plain concrete

对陶瓷纤维的增强效应可以作以下解释。根据复合增强原理，基体开裂前，纤维与基体共同承受载荷，开裂应力为 $f_{cul}=\eta_f\varepsilon_{mu}E_f\varphi_f+f_{mu}(1-\varphi_f)$（其中 η_f 为纤维方向修正系数，φ_f 为纤维的体积分数，E_f 为纤维的弹性模量，ε_{mu} 为基体的极限应变，f_{mu} 为基体应力），可见纤维的弹性模量对开裂载荷具有较大的影响。若陶瓷纤维的弹性模量为 380 GPa，则产生 0.001 的应变时能承担 380 MPa 的应力，因此能较大程度地提高 CRFRC 的开裂应力。基体开裂后，开裂区混凝土卸载，通过与纤维之间的黏结将载荷传递给纤维，此时若纤维的抗拉强度能承受附加载荷，则复合材料的承载能力将继续增加。陶瓷纤维的单丝抗拉强度为 3.0 GPa，远大于开裂应力，因而能大幅度提高开裂后 CRFRC 的承载能力。此外，纤维性能发挥是否充分，很大程度上取决于纤维与混凝土基体之间的黏结强度。本实验选用的陶瓷纤维直径为 10～12 μm，长径比为 1 154，较大程度地增加了纤维与基体间的接触面积，并且亲水性较好，有利于黏结强度的提高；陶瓷纤维较高的弹性模量能有效抑制裂缝的扩展，且在拔出过程中纤维不易发生伸长变形，水泥基体也有紧缩的趋势，增大了拔出阻力，增强了黏结应力；此外，粉煤灰、微硅粉以及减水剂的加入，减少了界面薄弱区厚度，改善了黏结性能。

3.3 动态增韧效应

比能量吸收（Specific Energy Absorption，SEA）是表征 CRFRC 吸能特性的重要指标，其物理意义是：单位体积的 CRFRC 吸收应力波能量的大小，可表示为[11]

$$e_{SEA}=\frac{AEc}{A_s l_s}\int_0^T[\varepsilon_i^2(t)-\varepsilon_r^2(t)-\varepsilon_t^2(t)]\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：T 为 CRFRC 试件完全破坏时间。

定义比能量吸收增长率 $\dot{e}_{SEA}$ 为 CRFRC 与素混凝土的比能量吸收的差值与素混凝土比能量吸收的比值。图 3、图 4 分别给出了 CRFRC 的比能量吸收 e_{SEA} 及其增长率 $\dot{e}_{SEA}$ 随平均应变率的变化情况。可知：CRFRC 的比能量吸收也随应变率的增大近似线性增长；当应变率高于 61 s^{-1} 时，CRFRC 的能量吸收特性明显优于素混凝土，且应变率越高，优势越明显；在 110 s^{-1} 应变率条件下，陶瓷纤维的体积分数为 0.1%、0.2%和 0.3%时，CRFRC 的比能量吸收较素混凝土分别提高 19.7%、30.7%和 21.5%。

根据断裂力学观点，混凝土材料的冲击破坏是由于裂纹的产生和扩展所致。从能量的角度分析，材料中裂纹的产生和扩展都需要耗散能量，而新裂纹形成所需要的能量远比裂纹扩展所需要的能量高。在低应变率条件下，混凝土材料的断裂主要是由固有微裂纹的扩展和贯通所致。高弹模的陶瓷纤维能

够有效抑制原始裂缝的扩展,然而纤维的掺入使固有裂缝的产生概率增大,在新裂缝形成之前,固有裂缝已发生劈裂破坏,因此 CRFRC 的韧性较素混凝土无明显优势。随着应变率的增加,混凝土材料的断裂逐步转化为新裂纹的产生。在固有微裂纹贯通之前,材料吸收的能量已达到较高水平,更多的微裂纹能够扩展,进而参加破碎过程。陶瓷纤维较高的弹性模量和黏结强度,使高应变率条件下纤维的侨联作用得以充分发挥,裂缝扩展受限,新生裂缝增多,纤维拔出过程中消耗的能量也增多,增韧效果明显。此外,与纤维体积分数为 0.2%时相比,纤维体积分数为 0.3%时的比能量吸收较低,这是因为纤维体积分数为 0.3%时,CRFRC 出现了部分纤维聚集现象(可在混凝土搅拌过程中发现),由于纤维与混凝土基体之间存在薄弱环节,纤维的掺入使得固有裂缝的产生概率增加,且在纤维密集处这些裂缝将在动载作用下迅速贯穿,造成混凝土的破坏。因此,在纤维阻裂和引入新裂缝的共同作用下,其增韧效果低于体积分数为 0.2%的 CRFRC。

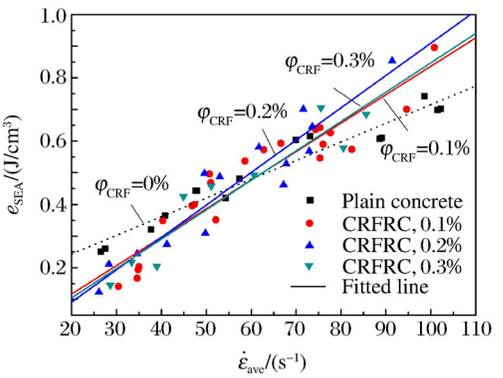


图 3　CRFRC 比能量吸收随平均应变率的变化

Fig. 3　Specific energy absorption versus average strain rate for CRFRC

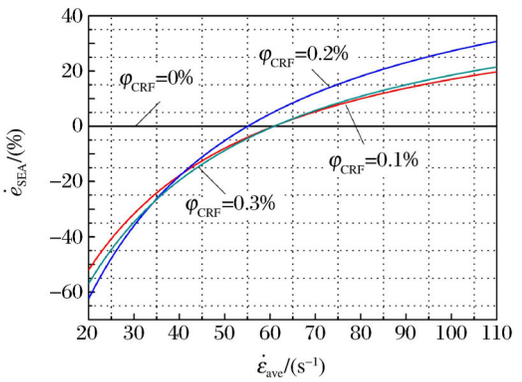


图 4　CRFRC 与素混凝土的能量吸收能力比较

Fig. 4　Comparison of specific energy absorption between CRFRC and plain concrete

4　对比分析

将 CRFRC 的动态力学性能与 CFRC 的实验结果[12](见图 5、图 6)进行对比,如图 7 所示。由图 7 可以看出:在应变率高于 44 s^{-1} 的条件下,CRFRC 的动态抗压强度明显优于 CFRC,3 种陶瓷纤维体积分数下,提高幅度最大分别为 33.4%、37.5%和 48.5%;陶瓷纤维的增韧效果也优于碳纤维,尤其是在高应变率范围内;对于陶瓷纤维体积分数为 0.1%、0.2%和 0.3%的 CRFRC,其比能量吸收较 CFRC 最大提高 31.9%、44.0%和 41.2%。根据第 3 节的分析,陶瓷纤维的弹性模量和抗拉强度优于碳纤维,在黏结强度得以保证的情况下,陶瓷纤维的增强、增韧效果必然好于碳纤维。

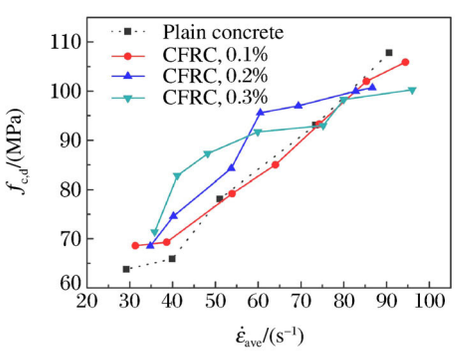


图 5　CFRC 动态抗压强度随平均应变率的变化

Fig. 5　Dynamic compressive strength versus average strain rate for CFRC

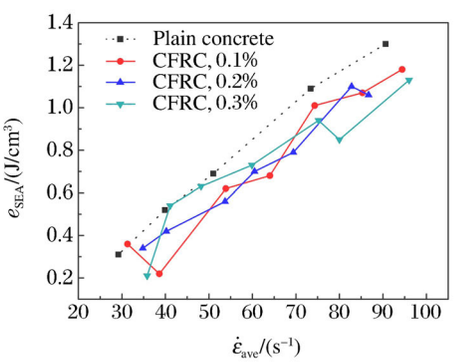


图 6　CFRC 比能量吸收随平均应变率的变化

Fig. 6　Specific energy absorption versus average strain rate for CFRC

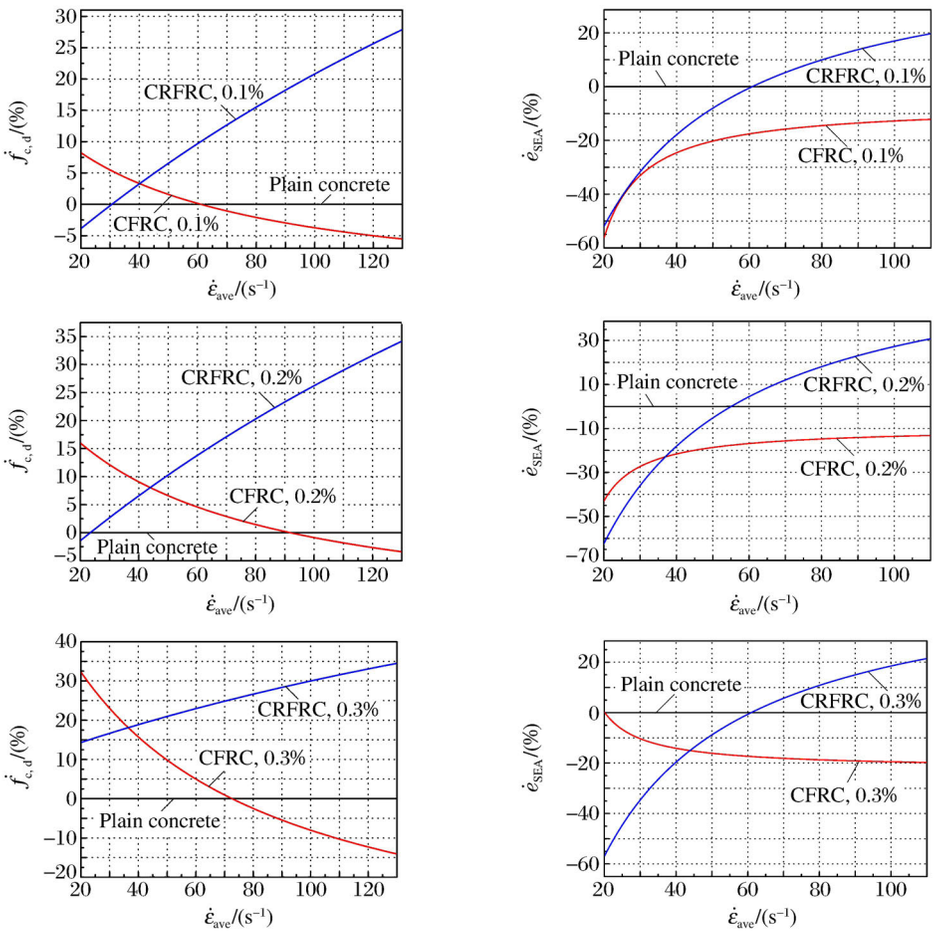


图 7 CRFRC 与 CFRC 的冲击力学性能对比

Fig. 7 Comparison of impact mechanical properties between CRFRC and CFRC

5 结 论

CRFRC 的准静态力学性能较素混凝土有所提高，其中韧性提高尤为明显。当陶瓷纤维的体积分数为 0.3%时，抗压强度提高 15.0%，劈裂抗拉强度提高 8.5%，抗折强度提高 12.7%，韧性提高 37.0%。CRFRC 的动态抗压强度随平均应变率的增加近似呈线性增长，且随着纤维体积分数的增加，动态强度较素混凝土显著提高，尤其是在高应变率范围内。当应变率高于 61 s^{-1}时，陶瓷纤维的增韧效果明显。当陶瓷纤维体积分数为 0.1%、0.2%和 0.3%时，CRFRC 的比能量吸收较素混凝土最大提高 19.7%、30.7%和 21.5%。当陶瓷纤维体积分数为 0.2%时，陶瓷纤维对 C50 水泥基混凝土的增强、增韧效果最佳。对比结果表明，陶瓷纤维对 C50 混凝土的增强、增韧效果总体上优于碳纤维。

References:

[1] Jiao C J, Jiang G P, Gao L. Experimental research on the dynamic split properties of steel fiber reinforced concrete [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(4): 469-472. (in Chinese)
焦楚杰，蒋国平，高 乐. 钢纤维混凝土动态劈裂实验研究 [J]. 兵工学报，2010，31(4)：469-472.

[2] Jiang G P, Huan S, Jiao C J, et al. Dynamic performances of polypropylene fiber reinforced concrete based on SHPB experiment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(5): 82-86. (in Chinese)
蒋国平，浣 石，焦楚杰，等. 基于 SHPB 试验的聚丙烯纤维增强混凝土动态力学性能研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版)，2009，41(5)：82-86.

[3] Li W M, Xu J Y, Shen L J, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar [J]. Acta Material Compositae Sinica, 2008, 25(2): 135-142. (in Chinese)
李为民,许金余,沈刘军,等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能 [J]. 复合材料学报,2008,25(2):135-142.

[4] Alkoy S, Yanik H, Yapar B. Fabrication of lead zirconate titanate ceramic fibers by gelation of sodium alginate [J]. Ceram Int, 2007, 33(3): 389-394.

[5] Wei C C, Chen O Y, Liu Y, et al. Ceramic asymmetric hollow fibre membranes—One step fabrication process [J]. J Membrane Sci, 2008, 320(1/2): 191-197.

[6] Chen J X. Synthesis and characterization of organosilicon polymers for SiC-based ceramic fibers [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007. (in Chinese)
陈江溪. 碳化硅基陶瓷纤维用有机硅高分子的合成与表征 [D]. 厦门:厦门大学,2007.

[7] He R A. Synthesis of porous SiC ceramic fibers from polymer precursors [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
赫荣安. 先驱体法制备 SiC 陶瓷多孔吸附纤维的研究 [D]. 长沙:国防科技大学,2008.

[8] Zeng L K, Hu D L. The study on the dispersive property of ceramic fiber and fiber glomeration [J]. Journal of Ceramics, 2008, 29(4): 324-328. (in Chinese)
曾令可,胡动力. 陶瓷纤维分散性能的研究 [J]. 陶瓷学报,2008,29(4):324-328.

[9] Ma Y P, Tan M H. Research on mechanical properties and durability of ceramic fibre reinforced cement composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(2): 105-110. (in Chinese)
马一平,谈慕华. 陶瓷纤维水泥基复合材料力学性能及耐久性研究 [J]. 硅酸盐学报,2000,28(2):105-110.

[10] Wang L L. Foundation of Stress Waves [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese)
王礼立. 应力波基础 [M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[11] Yu T X, Lu G X. Energy Absorption of Structures and Materials [M]. Translated by Hua Y L. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
余同希,卢国兴. 材料与结构的能量吸收:耐撞性·包装·安全防护 [M]. 华云龙,译. 北京:化学工业出版社,2005.

[12] Li W M, Xu J Y. Strengthening and toughening in basalt fiber-reinforced concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(4): 476-481. (in Chinese)
李为民,许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应 [J]. 硅酸盐学报,2008,36(4):476-481.

Strengthening and Toughening Effect of Ceramic Fiber on Plain Concrete

SU Hao-Yang[1], XU Jin-Yu[1,2], GAO Zhi-Gang[1], LI Zhi-Wu[1], YANG Kun[1]

(1. *Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an* 710038, *China*;
2. *College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: A hydraulic pressure testing machine and a 100 mm-diameter split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus are used to investigate the quasi-static and dynamic mechanical properties of ceramic fiber reinforced concrete (CRFRC), which are compared to those of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) at the same volume fractions of 0.1%, 0.2% and 0.3%. The strengthening mechanism of ceramic fiber is analyzed. The experimental results show that the ceramic fiber improves the quasi-static mechanical property of plain concrete effectively. When the volume fraction is 0.3%, the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength enhance by 15.0%, 8.5% and 12.7% respectively. The dynamic compressive strength and specific energy absorption of CRFRC are strain rate-dependent under impact load, and the effect can be expressed by linear approximations. The strength and toughness of CRFRC come to the best at the volume fraction of 0.2%. The strength and energy absorption properties of CRFRC are superior to those of CFRC as a whole.

Key words: ceramic fiber; strain rate; dynamic compressive strength; specific energy absorption; strengthening mechanism