

文章编号: 1001-1455(2009)02-0119-06

钢纤维混凝土的层裂特征*

张磊^{1,2}, 胡时胜², 陈德兴^{1,2}, 张守保¹, 余泽清^{1,2}, 刘飞^{1,2}

(1. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023;

2. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 design 重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用大直径 Hopkinson 压杆作为实验设备, 通过试件后面的吸收杆应变波形分析了钢纤维增强混凝土的层裂特征。实验结果表明, 钢纤维混凝土的层裂强度与钢纤维含量、混凝土压缩强度以及加载速率有关, 并给出了经验公式。和素混凝土相比, 钢纤维混凝土具有更高的层裂强度和更好的阻止损伤演化和裂纹扩展的能力。高速摄影结果表明, 钢纤维混凝土层裂时, 层裂段的飞离是由于陷在层裂段中应力波的动量效应, 而且在层裂段中不易出现再次层裂的现象。这些现象和相同加载条件下素混凝土的层裂破坏有明显差别, 说明钢纤维可以很好地提高混凝土抗层裂能力, 其结论对相关的数值模拟和防护工程设计有重要意义。

关键词: 爆炸力学; 层裂; Hopkinson 压杆; 钢纤维混凝土; 损伤; 高速摄影

中图分类号: O347.4 **国标学科代码:** 130 · 3530 **文献标志码:** A

1 引言

混凝土作为防护工程中最常用的结构材料, 由于其抗拉能力低, 在承受爆炸和冲击加载时, 压缩波在自由面反射形成的拉伸波容易使其产生层裂(震塌)破坏。而钢纤维的加入可以有效提高材料的抗拉强度, 从而改善其抗层裂能力, 使钢纤维增强混凝土在防护工程中得到广泛应用。对钢纤维混凝土层裂破坏特性的研究主要通过爆炸和射弹加载方式^[1-6], 将实际结构简化成板、梁等构件, 通过试件最终破坏形态来对其抗爆炸冲击性能给出评价。此类实验主要依据试件在爆后的总体破坏形貌来对其抗震塌能力进行分级, 而由于试件最终破坏形态会受结构动态响应和材料动态响应的综合影响, 而对科学研究、数值模拟和工程设计中最关心的混凝土材料的层裂强度以及层裂过程中损伤演化等信息缺少足够的实时测量和分析手段^[7]。

当试件为细长杆状时, 试件中应力状态为准一维应力状态, 波传播过程和实验数据分析处理相对简单。江水德等^[8]利用爆炸对混凝土杆件加载研究了钢纤维混凝土的层裂问题, 假定爆炸载荷为直线衰减的三角形脉冲, 根据第 1 次层裂的厚度与材料的层裂强度呈正比的关系, 比较了不同钢纤维含量混凝土和普通混凝土层裂强度的差别, 指出钢纤维可以提高混凝土的层裂强度, 但没有给出其层裂强度具体结果。近年来, 利用大直径 Hopkinson 杆研究混凝土层裂问题得到广泛应用^[9-12], 但只能利用对试件的加载压缩应力波形间接得到混凝土的层裂强度, 缺乏对层裂过程信号的直接测量, 也无法获得层裂过程中损伤演化等信息。

张磊等^[13-14]提出了一种新的测量混凝土层裂强度的方法, 利用大直径 Hopkinson 杆对混凝土试件加载, 通过试件后方吸收杆上应变波形得到层裂强度。本文中采用此实验手段, 研究不同强度等级(C30、C60 和 C80)、不同钢纤维含量(0%、2% 和 4%)的混凝土在不同加载速率下的层裂强度, 给出层裂强度的经验公式。利用高速摄影记录层裂过程, 分析钢纤维混凝土和素混凝土层裂过程的差别, 讨论钢纤维在提高混凝土抗层裂能力中所起的作用。

2 实验原理

图 1 为实验装置简图, 根据文献^[13], 可以由试件和吸收杆的接触面压力波形得到层裂强度

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\max} + \sigma_{\min} - \frac{(\rho c)_C}{(\rho c)_B} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \right] = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min} - n \sigma_{\text{pull-back}}) \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 和 σ_{\min} 为接触面压力最大值和最小值, $n = (\rho c)_C / (\rho c)_B$ 为混凝土对吸收杆的波阻抗比。

* 收稿日期: 2007-10-29; 修回日期: 2008-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372097)

作者简介: 张磊(1974—), 男, 博士, 副研究员。

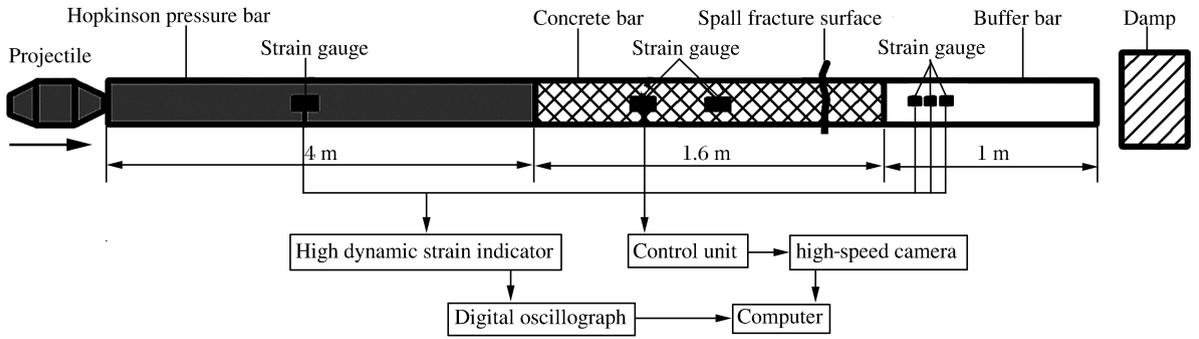


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Scheme of the experimental facility

层裂是试件在反射拉伸波和入射压缩波相互作用下微裂纹等损伤的演化最终导致断裂的过程。图 2 给出了层裂过程中波的传播过程和试件/吸收杆接触面压力波形,其中加载波简化为直线衰减三角脉冲,入射波于 A 点传播到接触面,部分透射入吸收杆,使接触面压力从 0 增加到 σ_{max} ,同时反射卸载波向后传入试件中,增加试件拉伸应力。在 F 点,试件内拉伸应力达到材料层裂强度 σ_F ,材料开始拉伸损伤演化,其损伤演化产生一个弱间断的拉伸卸载波,即一个弱间断压缩波向右传播并于 B 点传到接触面,接触面压力从 $\sigma_B = \sigma_{min}$ 开始增加,在 D 点损伤积累到一定程度使材料断裂。从 F 到 D 的过程是材料损伤演化至断裂的过程,产生的弱间断压缩波在接触面压力波形上体现为从 B 到 C 的断裂信号(又称层裂脉冲)。断裂信号的幅值取决于该弱间断压缩波的强度,因而反映了层裂过程中拉伸损伤积累的程度;而断裂信号上升沿的斜率体现了层裂过程中损伤演化的快慢^[15]。

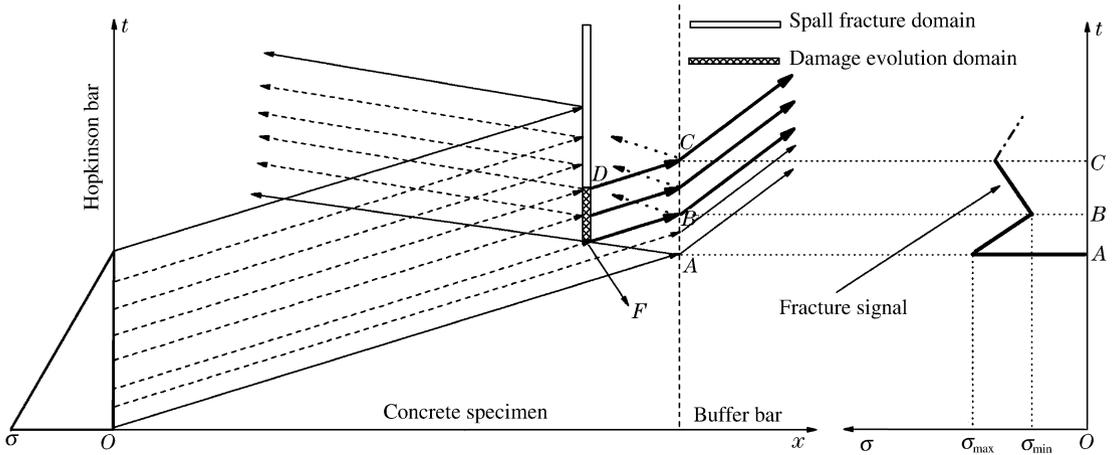


图 2 层裂过程的 $x-t$ 图和接触面压力波形

Fig. 2 $x-t$ diagram of spallation and profile of interface pressure

3 实验过程和结果

实验中采用的 Hopkinson 杆直径为 100 mm,混凝土试件尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1\,600 \text{ mm}$,吸收杆为尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ 的尼龙杆。在吸收杆上距离试件/吸收杆接触面 60、90 和 120 mm 处粘贴应变片,用来测量层裂强度^[13-14]。为减少试件与吸收杆之间非理想接触对波传播的影响,在试件和吸收杆接触面涂抹少许黄油并用力挤出。钢纤维为冷拉扁头型,长 15 mm,长径比为 25。材料种类分别表示为 C30-0、C30-2 和 C30-4 等。

分别进行了撞击速度 v 为 6、8、11 和 14 m/s 的层裂实验,根据吸收杆上应变波形可以获得混凝土在不同加载率 $\dot{\sigma}$ 下的层裂强度 σ_F ^[14],实验结果列于表 1。在文献[14]给出的素混凝土层裂强度经验公式的基础上,给出了钢纤维混凝土层裂强度经验公式

$$\sigma_F = \frac{0.92 f'_c}{0.10 f'_c + 7.11} + 0.1 \sqrt{f'_c} + (22 - 1.65 \sqrt{f'_c}) \dot{\sigma} + 100 \varphi_f \quad (2)$$

式中: φ_f 为钢纤维体积分数(0%、2%和 4%), f'_c 为混凝土的压缩强度, $\dot{\sigma}$ 为加载率, σ_F 、 f'_c 、 $\dot{\sigma}$ 的单位分别为 MPa、MPa、TPa/s,拟合时取所有量的量纲一值。

图 3 给出了层裂强度的实验结果和经验公式的对比,从图中可看出经验公式(2)的预测结果与实验结果吻合较好。

表 1 层裂强度实验结果
Table 1 Experimental results of spall strengths

$v/(m/s)$	$\dot{\sigma}/(TPa/s)$	σ_F/MPa								
		C30-0	C30-2	C30-4	C60-0	C60-2	C60-4	C80-0	C80-2	C80-4
6	0.50	10.8±0.2	12.8±0.5	14.3±0.7	12.5±0.6	14.0±0.7	16.4±0.5	13.7±0.7	15.3±0.5	17.6±0.6
8	0.67	12.5±0.5	14.6±0.6	17.0±0.3	13.6±0.8	16.0±0.6	17.9±0.6	14.6±0.5	17.0±0.5	19.0±0.8
11	0.92	11.4±0.5	14.3±0.5	16.7±0.5	16.1±0.8	18.0±0.5	19.8±0.6	16.8±0.6	18.7±0.3	20.2±0.5
14	1.16	10.7±0.6	13.6±0.6	15.9±0.2	12.3±0.5	15.9±0.3	17.3±0.5	18.0±0.6	19.9±0.6	22.1±0.8

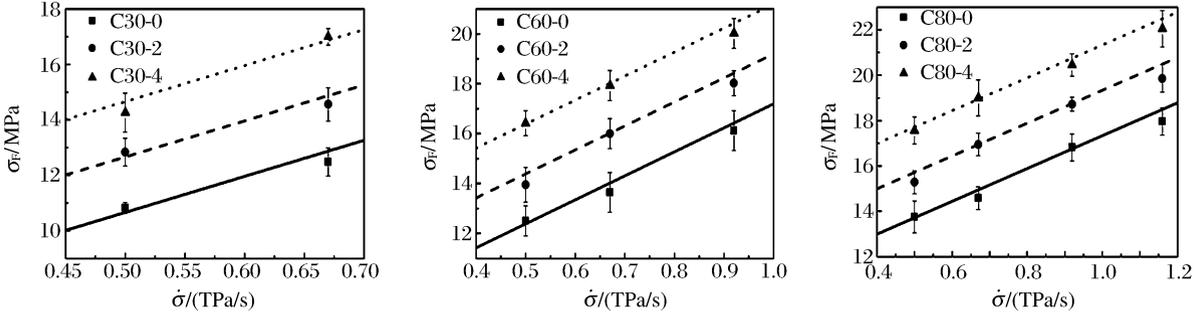


图 3 钢纤维混凝土层裂强度和经验公式对比

Fig. 3 Spall strengths of steel-fiber-reinforced concrete compared with the empirical formula

4 分析

4.1 钢纤维增强抗层裂能力分析

公式(2)指出,钢纤维能明显提高混凝土的层裂强度。钢纤维混凝土为由砂浆基体、骨料和钢纤维组成的复合材料^[16],在钢纤维没有从基体中滑动和松脱时,两者是紧密结合在一起一致变形的,通过纤维与基体间剪应力传递拉伸荷载。根据复合材料力学理论可以合理解释钢纤维的增强作用,王亚波等^[17]得到轴向拉伸应力状态下钢纤维水泥基复合材料的强度随钢纤维体积含量线性增加的结论,这与公式(2)的结果一致。另外文献^[14]中素混凝土的层裂实验结果表明,当对试件的加载压缩波强度超过一定阈值时,会对混凝土产生压缩损伤,从而降低混凝土的层裂强度;钢纤维混凝土的层裂实验中也发现了类似现象。图 4 给出了 C30 混凝土在不同加载速度(加载率)时的层裂强度,和素混凝土一样,C30 钢纤维混凝土也在加载速度为 8 m/s 时具有最大的层裂强度,而加载速度为 11 和 14 m/s 时层裂强度降低,但钢纤维混凝土层裂强度的降低明显小于素混凝土的。说明在压缩波对混凝土产生压缩损伤后,素混凝土的骨料可以在很低的拉应力作用下从基体中脱落而发生层裂破坏^[14];而对钢纤维混凝土,由于钢纤维的存在一方面钢纤维和基体间的粘结力仍使混凝土具有较高的层裂强度,另一方面钢纤维可以进一步阻止损伤演化,使材料仍具有较高的抗层裂能力。

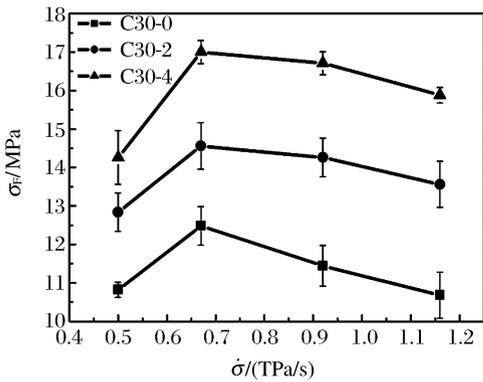


图 4 不同加载率时 C30 的层裂强度

Fig. 4 Spall strengths of C30 at different loading rates

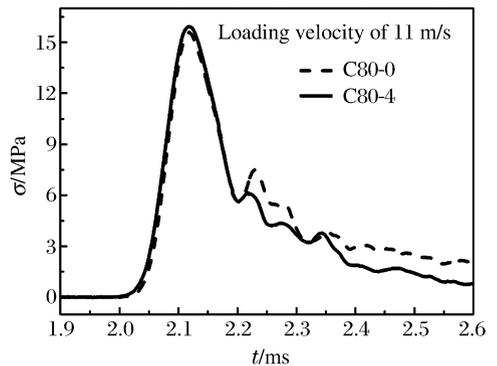


图 5 吸收杆上的应力波形

Fig. 5 Profiles of stress pulse in the buffer bar

除可提高材料层裂强度外,钢纤维还具有阻止裂纹扩展的能力,即可以延缓层裂损伤的演化发展,提高混凝土的韧性。在拉伸荷载作用下,混凝土中骨料和基体间过渡区的微裂纹首先扩展,与基体中微裂纹贯通导致基体开裂破坏,在高应变率(高加载率)情况下,裂纹会直接穿透骨料导致骨料断裂^[11,14]。对素混凝土,这些微裂纹的贯通意味着材料的

断裂,使材料呈现明显的脆性破坏特征,即一裂就断。而对钢纤维混凝土则不同:首先,在基体裂纹扩展过程中,由于存在大量随机乱向分布的钢纤维,在裂纹通过这些纤维时,裂纹将受到纤维的阻挡而缓慢发展或者改变方向,这样一方面在细观上会衍生出许多细小裂纹,另一方面会使裂纹扩展路径更复杂;所以,钢纤维混凝土表现出裂纹扩展缓慢的特点。当载荷持续增加时,砂浆基体中微裂纹贯通导致基体出现解体破坏,这时钢纤维混凝土仍具有一定的承载能力,纤维继续通过与砂浆基体间的粘结力把载荷传给基体,使钢纤维逐渐从基体中拔出,从而导致钢纤维混凝土的完全破坏。所以在同样的加载条件下,钢纤维混凝土的层裂损伤演化比素混凝土的慢,这可以从同样加载速度时吸收杆的波形得到证实(见图5)。素混凝土的断裂信号比钢纤维混凝土的幅值更大,且上升沿斜率更高,结合图2的分析可知这意味着素混凝土层裂过程中损伤演化更快^[15]。试件破坏的形状也能充分说明钢纤维能够增强混凝土的抗层裂能力。在6~14 m/s的实验加载速度范围内,素混凝土会发生一次到多次的断裂^[14];而钢纤维混凝土在相同的加载速度下,只产生宽度不同的裂纹,没有出现层裂与试件完全脱开的现象,如图6所示。

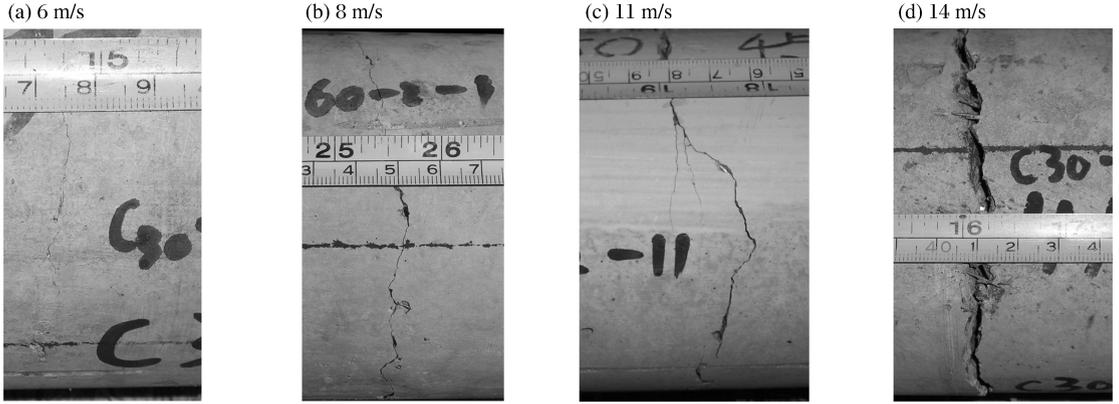


图6 钢纤维混凝土在不同加载速度下的破坏形状

Fig. 6 Fracture patterns of steel-fiber-reinforced concrete at different loading velocities

4.2 高速摄影结果

为进一步说明钢纤维在混凝土层裂过程中阻止裂纹扩展的作用,利用高速摄影记录了钢纤维混凝土的层裂过程,拍摄帧间隔为0.4 ms。

图7给出了C60-2去掉吸收杆时层裂过程(即自由面反射层裂)的高速摄影结果。照片1显示试件没有产生裂纹,0.4 ms后的照片2显示试件上产生宽度为毫米量级的裂纹,由于加载脉冲宽度约为0.3 ms,层裂过程到此已经结束,而所用钢纤维长度为15 mm,所以此时仅混凝土基体发生开裂而钢纤维没有完全从混凝土基体中拔出。随后的过程中,层裂段则依靠陷在其中的应力波动量而向右继续运动,使钢纤维不断从基体中拔出,裂纹宽度不断增大。照片4的裂纹宽度已经达到厘米量级,此时钢纤维已经完全从混凝土基体中拔出,试件已经完全断裂。可见,和素混凝土一样,钢纤维的层裂破坏也是在反射拉伸波与加载压缩波的相互作用过程中完成的,但试件最终的破坏形态不同,这是由于层裂破坏后钢纤维还有一定的阻止裂纹扩展的能力,随钢纤维被从混凝土基体中拔出而能量被不断消耗,层裂段的速度降低或出现层裂段无法与试件脱离的现象,从而有利于保持材料的完整性。同时,钢纤维大大减缓损伤的发展,所以,钢纤维混凝土不易出现像素混凝土那样的多次层裂^[14]。

图8给出了C60-2在有吸收杆时层裂过程的高速摄影结果。照片1显示应力波尚未传播到试件和吸收杆的接触面;照片2中接触面间涂抹的黄油溅出,表明应力波传播到接触面。照片3中在试件上出现肉眼可见裂纹,若试件为素混凝土,则试件已经完全断裂。照片4显示裂纹宽度稍微增加,而由于层裂段中部分应力波透入吸收杆使层裂段的速度降低,裂纹宽度增加不如图7中的明显。从照片6开始裂纹宽度逐渐减小,到照片8(对应时间为2.8 ms)时,裂纹已经完全闭合。由此可以解释为何在相同的实验条件下素混凝土会完全断裂而钢纤维混凝土仅出现裂纹:存在吸收杆时,层裂段中的应力波部分透入吸收杆降低了层裂段的飞离速度,从而只能产生一定宽度的裂纹而无法把钢纤维从混凝土中完全拔出,无法形成完全断裂。

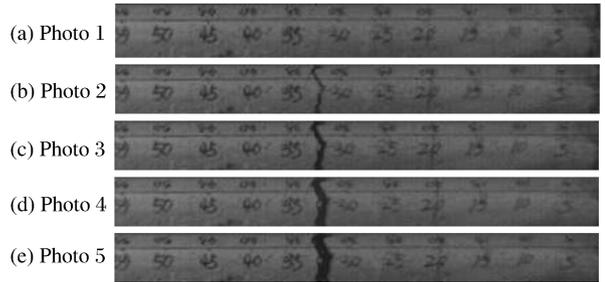


图7 无吸收杆时钢纤维混凝土的层裂过程

Fig. 7 Spalling process of steel-fiber-reinforced concrete without the buffer bar

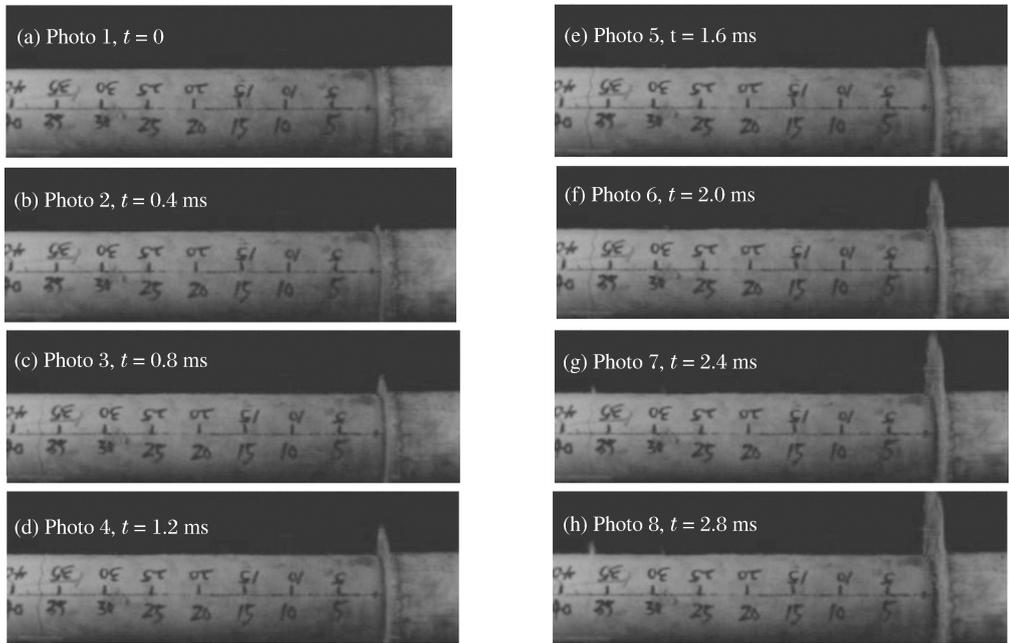


图 8 有吸收杆时钢纤维混凝土的层裂过程

Fig. 8 Spalling process of steel-fiber-reinforced concrete with the buffer bar

5 结 束 语

(1) 利用试件后方吸收杆的应变波形可以确定混凝土材料的层裂强度,并可用于定性分析层裂过程中损伤演化。

(2) 系统测量了不同强度、不同钢纤维含量的混凝土在不同加载率下的层裂强度,实验结果表明,钢纤维混凝土层裂强度与钢纤维含量、混凝土压缩强度以及加载率有关。在实验范围内,层裂强度随钢纤维体积含量增加而线性增加。

(3) 钢纤维可以明显提高混凝土的层裂强度,有效阻止裂纹扩展,延缓层裂损伤的演化,具有明显的增韧作用。压缩损伤后钢纤维混凝土层裂强度的降低明显小于素混凝土的。在同样的实验条件下,素混凝土产生一次或多次完全断裂而钢纤维混凝土仅出现连续裂纹而层裂段无法与试件完全脱离。吸收杆的应力波形也表明钢纤维能延缓损伤的演化。

(4) 钢纤维混凝土完全断裂意味着钢纤维从混凝土基体中完全拔出,高速摄影结果表明,本实验加载条件下,层裂过程中钢纤维混凝土仅产生毫米宽度的裂纹,后继过程中层裂段依靠陷在其中的应力波动量效应而逐渐飞离试件。在吸收杆作用下,可以观察到应力波作用下层裂裂纹的张开与闭合现象,试件最终的破坏形态仅为存在裂纹而无完全断裂。

参考文献:

- [1] Lok T S, Pei J S, Heng L. steel fiber reinforced concrete panels subjected to blast loading[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. McLean, Virginia, 1997:701-711.
- [2] Lok T S, Xiao J R. Steel-fiber-reinforced concrete panels exposed to air blast loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 1999,134(9):319-331.
- [3] Willimson G R. Response of fibrous reinforced concrete to explosive loading[R]. Technical Report 2-48, Army Corps of Engineering, Ohio River Division Lab, 1966.
- [4] Ausi M A, Salih S A, Aldouril K. Strength and behavior of steel fiber reinforced concrete slabs subjected to impact loading[C]//Swamy R N. Proceedings of the 4th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete. London: E & FN Spon, 1992:629-642.
- [5] Sun W, Luo X, Yan H D, et al. Penetration and blast resistance of high performance steel fiber reinforced concrete[C]//Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Specially Conference on Fiber Reinforced Concrete. Singapore, 1999:197-203.
- [6] 郑全平,周早生,钱七虎,等.防护结构中的震塌问题[J].岩土力学与工程学报,2003,28(8):1393-1398.
ZHENG Quan-ping, ZHOU Zao-sheng, QIAN Qi-hu, et al. Spallation in protective structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,28(8):1393-1398.
- [7] 董新龙,洪志权,施绍裘,等.材料和结构的动态响应[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2005:188-199.
- [8] 江水德,任辉启,赵大勇,等.钢纤维高强混凝土杆抗爆炸剥落试验研究[J].防护工程,2004,26(2):103-108.

- JIANG Shui-de, Ren Hui-qi, ZHAO Da-rong, et al. Experimental study on spallation of steel fiber reinforced high strength concrete subjected to blasting load[J]. *Protective Engineering*, 2004,26(2):103-108.
- [9] Klepaczko J R, Brara A. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001,25:387-409.
- [10] Brara A, Klepaczko J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension[J]. *Mechanics of Materials*, 2006,38:253-267.
- [11] 胡时胜,张磊,武海军,等. 混凝土材料层裂强度的实验研究[J]. *工程力学*,2004,21(4):128-132.
HU Shi-sheng, ZHANG Lei, WU Hai-jun, et al. Experiment study on spalling strength of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2004,21(4):128-132.
- [12] WU Hai-jun, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005,32:605-617.
- [13] 张磊,胡时胜. 混凝土层裂强度测量的新方法[J]. *爆炸与冲击*,2006,26(6):537-542.
ZHANG lei, HU Shi-sheng. A novel experimental technique to determine the spalling strength of concretes[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006,26(6):537-542.
- [14] 张磊,胡时胜,陈德兴,等. 混凝土材料的层裂特性[J]. *爆炸与冲击*,2008,28(3):193-199.
ZHANG Lei, HU Shi-sheng, CHEN De-xing, et al. Spall characteristics of concrete materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008,28(3):193-199.
- [15] Antoun T, Seaman L, Curran D R, et al. Spall fracture[M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 2003:160-170.
- [16] 罗立峰,周建春,黄培彦. 聚合物钢纤维混凝土的增强机理分析[J]. *复合材料学报*,2002,19(3):46-51.
LUO Li-feng, ZHOU Jian-chun, HUANG Pei-yan. Reinforced mechanism with the polymer latex added in the steel fibre reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002,19(3):46-51.
- [17] 王亚波,李秋义,李建国. 钢纤维水泥基复合材料的初裂强度[J]. *吉林建筑工程学院学报*,1999(4):7-11.
WANG Ya-bo, LI Qiu-yi, LI Jian-guo. The initial crack strength of composite material in steel fiber cement base[J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 1994(4):7-11.

Spall fracture properties of steel-fiber-reinforced concrete

ZHANG Lei^{1,2*}, HU Shi-sheng², CHEN De-xing^{1,2},

ZHANG Shou-bao¹, YU Ze-qing^{1,2}, LIU Fei^{1,2}

(1. *The Third Engineering Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, Henan, China;*

2. *CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)*

Abstract: A large-size Hopkinson pressure bar equipment was used to explore the spall fracture properties of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC) by analyzing the strain wave profiles in the absorption bar behind the specimen. The experimental results indicate that the spall strength of the SFRC is related to the steel-fiber volume fraction, the compressive strength of concretes and the load rate. And the proposed empirical formula shows the above relationship. Compared with the plain concretes, the SFRC has higher spall strength and more ability to prevent damage evolution and crack growth. The spall fracture processes of the SFRC recorded with a high-speed camera display that the flaking-off of scabs are due to the momentum effect of stress wave trapped in scabs and there lie few multiple fractures in scabs. These fracture phenomena of the SFRC differ distinctly from those of the plain concretes under the same loading conditions. It explains that steel fibers can improve the ability of concrete to prevent spall fracture. Investigated conclusion is helpful to the corresponding numerical simulation and engineering design.

Key words: mechanics of explosion; spallation; Hopkinson pressure bar; SFRC; damage; high-speed photography

* Corresponding author: ZHANG Lei

E-mail address: ustczhanglei@163.com

Telephone: 86-379-65986754