

文章编号: 1001-1455(2008)03-0193-07

混凝土材料的层裂特性*

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科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 利用 Hopkinson 压杆作为实验设备, 通过试件后面吸收杆上应变波形研究了混凝土材料的层裂特性。不同强度混凝土在不同加载率下的实验结果表明, 混凝土层裂强度与其压缩强度以及加载速率有关, 给出了层裂强度和压缩强度以及加载率之间关系的经验公式, 并指出不同加载速度下混凝土裂纹扩展方式不同是层裂强度率效应的主要原因。加载压缩波损伤的影响、重复加载实验以及多次层裂的顺序都表明, 损伤对混凝土的层裂过程有重要影响。

关键词: 爆炸力学; 层裂; Hopkinson 压杆; 混凝土; 损伤

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引 言

层裂是承受爆炸和高速冲击加载的混凝土防护结构容易发生的破坏现象, 对武器毁伤效应评估和防护结构设计等具有重要意义, 正受越来越多的关注。对混凝土层裂的早期研究主要采用爆炸和直接撞击加载, 只能进行一些定性分析^[1-3]。Hopkinson 压杆具有操作方便、测量巧妙等优点, 利用 Hopkinson 压杆进行混凝土层裂的实验研究得到广泛应用^[4-7], 一般通过 Hopkinson 压杆或者试件上的应变测量得到不同加载速率下的层裂强度, 但层裂强度的确定方法是间接的, 无法直接测量到反映层裂发生的信号, 也无法反映层裂过程中损伤演化等信息。张磊等^[8]提出了一种直接测量层裂强度的实验方法, 利用三维有限元模拟分析了实验可行性, 并对实验中一些注意事项进行了分析。

本文中采用张磊等^[8]提出的实验手段, 在 $\varnothing 100$ mm 的 Hopkinson 杆上分别测量压缩强度分别为 30、60 和 80 MPa 的混凝土在不同加载率下的层裂强度, 并通过高速摄影记录多次层裂的顺序, 分析损伤对混凝土层裂的影响。

2 实验方案

图 1 为实验装置简图, 子弹和 Hopkinson 杆材料为钢, 子弹设计为如图 2 的梭形^[8], Hopkinson 杆尺寸为 $\varnothing 100$ mm \times 4 500 mm, 混凝土试件尺寸为 $\varnothing 100$ mm \times 1 600 mm, 吸收杆为工业尼龙材料, 尺寸为 $\varnothing 100$ mm \times 1 000 mm。在试件上距离加载端 500 和 750 mm 位置处粘贴应变片用于测量试件中应力波, 并可根据两者时间间隔得到混凝土波速。吸收杆上距离加载端 60、90 和 120 mm 位置处粘贴应变片, 用来测量层裂波形并分析波在吸收杆中的变化规律^[8]。

根据文献^[8], 可以由接触面压力波形得到层裂强度

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \left[(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) - \frac{\rho_c c_c}{\rho_b c_b} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \right] \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别为接触面压力最大值和最小值, $\rho_c c_c$ 和 $\rho_b c_b$ 分别为混凝土和吸收杆的波阻抗, $n = (\rho_c c_c) / (\rho_b c_b)$ 为两者波阻抗比。

* 收稿日期: 2006-12-05; 修回日期: 2007-03-01

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。

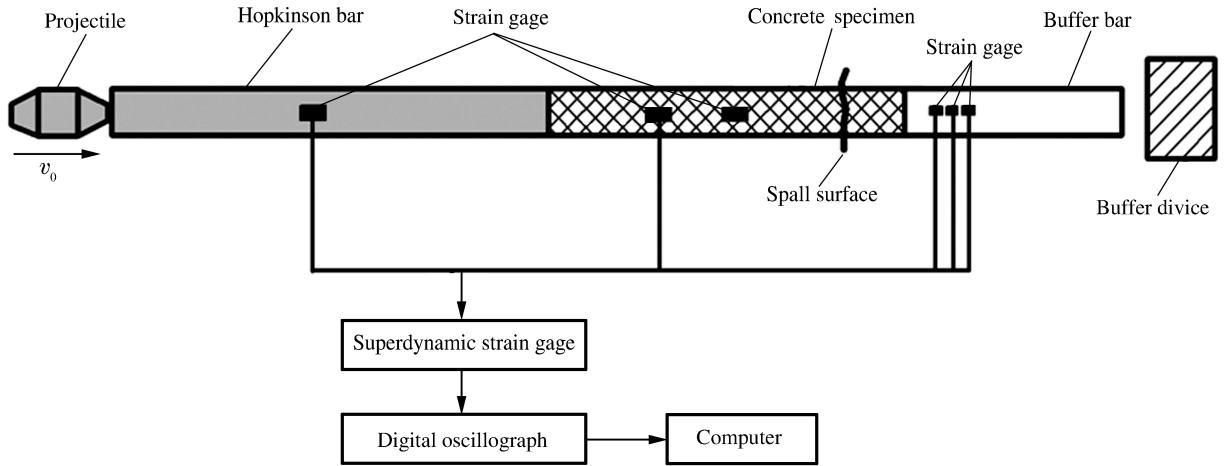


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Scheme of the experimental facility

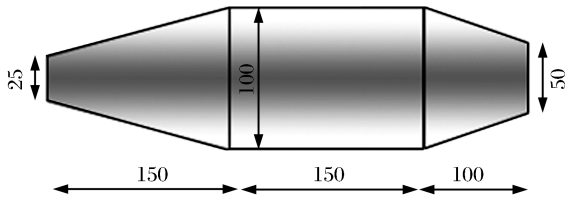


图 2 梭形子弹

Fig. 2 Scheme of a shuttle-shaped projectile

3 实验过程和数据处理

吸收杆材料本构关系采用标准三参数固体单元模型描述,用不同应变率下应力应变实验曲线拟合本构参数,得积分型本构关系

$$\sigma(t) = 2\ 057\varepsilon(t) + 1\ 680 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{96}} d\tau \quad (2)$$

式中: σ 、 $\dot{\varepsilon}$ 、 t 和 τ 的单位分别为 MPa、 s^{-1} 、 μs 和 μs 。

混凝土试件的强度等级分别为 C30、C60 和

表 1 混凝土材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of concrete materials

强度等级	$\rho_c/(t/m^3)$	$c_c/(km/s)$	E/GPa	$(\rho_c c_c)/(MPa \cdot s/m)$	n
C30	2.45	4.220	43.6	10.34	4.99
C60	2.40	4.330	46.1	10.39	5.02
C80	2.40	4.435	48.2	10.64	5.14

C80,细骨料采用洛阳伊河天然细沙,细度模数 2.3,级配良好,粗骨料采用石灰岩碎石,粒径 8~12 mm,连续级配。表 1 给出养护好的混凝土试件有关力学参数。

层裂时吸收杆上三个不同位置的应变片记录层裂信号,根据(2)式得到对应的应力波形如图 3。由文献[8]可知:在 Hopkinson 杆撞击层裂实验中一维应力假定仍成立,由接触面压力波形通过(1)式可得到材料层裂强度;但由于考虑到薄膜型压力传感器的选择和测量精度等原因,在实验中通过吸收杆应变波形确定层裂强度。由于波在粘弹性材料中传播的弥散和衰减效应,吸收杆上不同位置的应变波形会有差别,而(1)式是根据接触面处压力波形得到层裂强度,如果近似处理可以直接采用靠近接触面

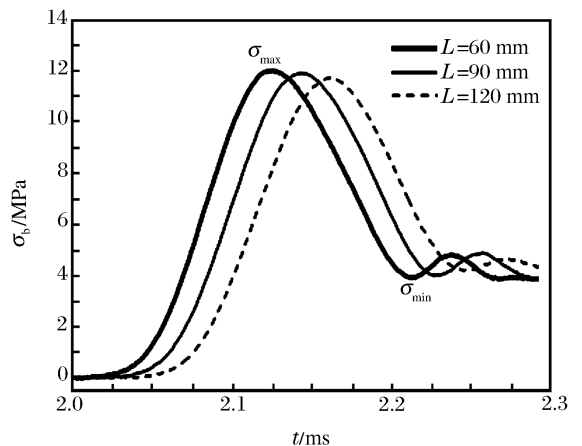


图 3 吸收杆上不同位置应力波形

Fig. 3 Stress wave profiles at the different locations of the buffer bar

的吸收杆上某点应力波形作为接触面压力波形,而更精确同时也不失简洁的方法是在吸收杆靠近接触面位置多点测量应变信号,通过对不同位置应力波形的最大值和最小值进行拟合,得到接触面压力波形的最大值和最小值。虽然这样的反推过程会与真实情况有所偏离,但可以尽量减小实验测量误差。王礼立等^[9]指出,应力波在粘弹性材料中传播时按指数规律衰减,据此对层裂波形最大值进行拟合

$$\sigma_{\max}(x) = \sigma_{\max}(0)e^{-\alpha x} \tag{3}$$

式中: $\sigma_{\max}(x)$ 为实验得到的吸收杆 x 位置处应力波形最大值, α 为拟合得到的衰减系数, $\sigma_{\max}(0)$ 为拟合得到的接触面压力波形最大值。同时实验中发现层裂波形最小值变化基本符合线性增加规律,据此对其最小值进行线性拟合

$$\sigma_{\min}(x) = \sigma_{\min}(0) + bx \tag{4}$$

式中: $\sigma_{\min}(x)$ 为实验得到的吸收杆 x 位置处应力波形最小值, b 为拟合系数, $\sigma_{\min}(0)$ 为拟合得到得接触面压力波形的最小值。根据拟合得到的接触面压力波形最大值 $\sigma_{\max}(0)$ 和最小值 $\sigma_{\min}(0)$,利用(1)式即得到混凝土材料层裂强度 σ_F 。

表 2 实验结果

Table 2 The experimental results

$v_0/(m/s)$	$\dot{\sigma}/(GPa/s)$	C30		C60		C80	
		σ_F/MPa	D/MPa	σ_F/MPa	D/MPa	σ_F/MPa	D/MPa
6	500	10.82	0.2	12.50	0.6	13.75	0.7
8	670	12.48	0.5	13.64	0.8	14.58	0.5
11	920			16.12	0.8	16.82	0.6
14	1 160					17.96	0.6

分别进行了撞击速度为 6、8、11 和 14 m/s 的层裂实验,实验结果见表 2。加载率 $\dot{\sigma}$ 为试件上距加载端 500 mm 位置上应力波加载段的平均值,层裂强度 σ_F 为三次实验数据的平均值,同时表 2 给出实验数据的标准差 D ,用于衡量实验结果离散性。对表 2 中实验结果进行拟合,得到层裂强度经验公式

$$\sigma_F = 0.92 \frac{f_c}{0.10f_c + 7.11} + 0.1 \sqrt{f_c} + (22 - 1.65 \sqrt{f_c})\dot{\sigma} \tag{5}$$

式中: f_c 为混凝土压缩强度, σ_F 、 f_c 和 $\dot{\sigma}$ 的单位分别为 MPa、MPa 和 TPa/s。拟合时取所有量的无量纲值,图 4 给出了实验结果和经验公式的对比,其中误差带表示实验数据的标准差,可见经验公式(5)与实验数据吻合较好。

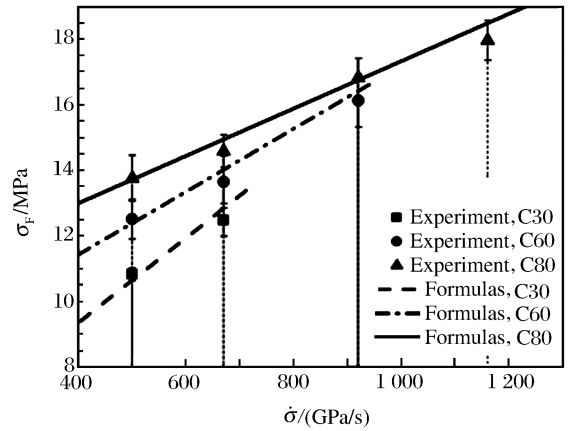


图 4 实验结果和经验公式比较

Fig. 4 Comparison between experimental results and empirical formulas

4 实验结果分析

4.1 层裂强度的率效应

实验结果表明,混凝土层裂强度具有明显的率效应,即层裂强度随加载速度提高而提高,结合层裂试件的断口形貌(见图 5),可对此现象进行较好解释。当 $v_0 = 6$ m/s 时,断口形状主要特征是粗骨料,没有被拉断,而是从基体中脱落,断面不平直;而 $v_0 = 8$ m/s 时,断口处的骨料已被拉断,断口平直,类似破坏现象在 $v_0 = 11, 14$ m/s 时也同时出现。众所周知,混凝土中存在强度较弱的过度区相^[10],这样在静态和较低加载速率条件下,混凝土破坏模式主要是过度区的微裂纹扩展合并,直到整个裂纹贯通使试件断裂。但当加载速率增加时,由于作用时间更短,这些微裂纹来不及绕过骨料作相对远距离传播,而

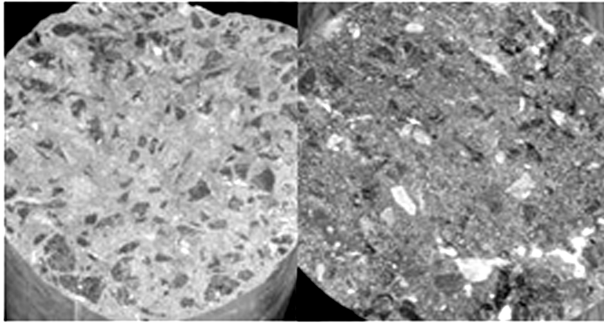
(a) $v_0=6$ m/s (b) $v_0=8$ m/s

图5 不同加载速度下 C80 的断口形状
Fig. 5 Fracture surfaces of C80 concrete at the different impact velocities

4.2.1 压缩加载波损伤对层裂的影响

图6给出不同加载速度下层裂强度,在实验的加载率范围中 C80 层裂强度随加载率单调增加,而 C30 和 C60 却出现加载速度高于某值后层裂强度降低的现象,这种现象与层裂强度的率效应是矛盾的。

众所周知,混凝土中含有一定数量粗骨料,与砂浆基体间过度区是分布众多微裂纹的弱相,当压缩波强度超过压缩损伤阈值时,过度区在压缩载荷作用下会诱发微裂纹扩展,使过度区强度降低。压缩损伤后的过度区会对层裂产生明显影响:在反射拉伸波作用下,已经压缩损伤的过度区会在更低拉伸应力作用下发生层裂破坏,而破坏形式以骨料从基体中剥落为主,从而体现为更低的层裂强度。这时材料所表现的“层裂强度”已经不再是初始材料的特性,而是受压缩波损伤弱化后材料特性。即对混凝土类材料而言,如果加载压缩波超过一定阈值后,会导致材料在更低的拉伸应力作用下破坏。但这种现象是否为破坏波,D. L. Grote 等^[11]对砂浆材料平板撞击实验研究表明,目前还缺少定论。结合图7给出的 C30 混凝土在不同加载速度时断口形状和材料

是直接透入骨料和骨料中的微裂纹合并贯穿从而使材料断裂,其破坏形状主要是骨料被拉断。由于骨料相的抗拉强度大于过度区的强度,所以在宏观上就体现为加载速率提高时混凝土层裂强度增加。

4.2 损伤对层裂的影响

和金属材料不同,混凝土材料内部存在着大量空洞、微裂纹等微缺陷,因此在冲击载荷作用下很容易产生损伤演化。层裂过程又不同于简单拉伸,混凝土材料在层裂破坏之前已承受了冲击压缩,这样混凝土层裂过程会受压缩和拉伸损伤演化的综合影响,而这种损伤演化将影响着层裂过程。下面分别从压缩加载波损伤对层裂的影响、重复加载对层裂影响和多次层裂顺序等三个方面分析损伤演化对混凝土层裂的影响。

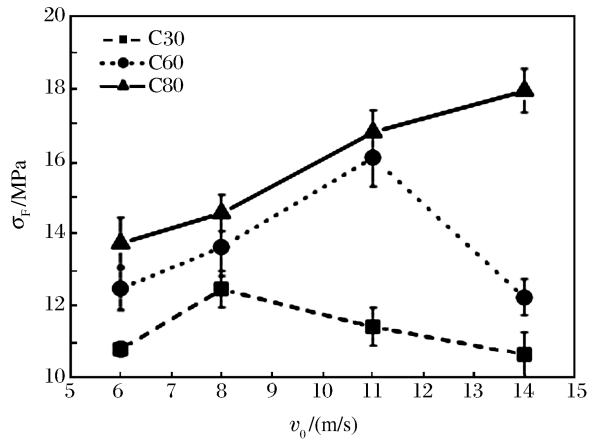


图6 不同加载速度下的层裂强度
Fig. 6 Spall strengths of the different concretes at the different impact velocities

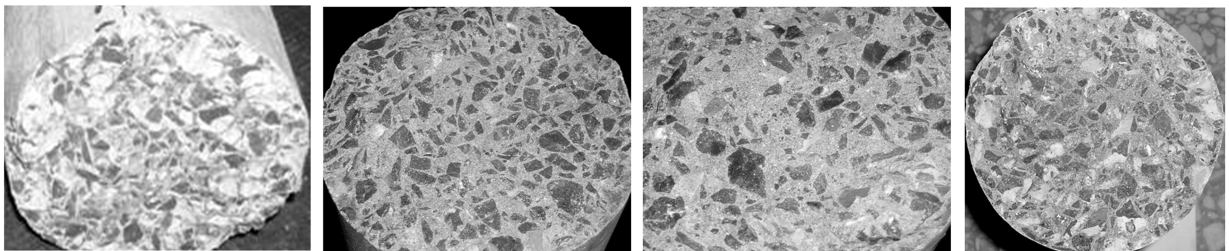
(a) $v_0=6$ m/s (b) $v_0=8$ m/s (c) $v_0=11$ m/s (d) $v_0=14$ m/s

图7 不同加载速度下 C30 的断口形状

Fig. 7 Fracture surfaces of C30 concrete at the different impact velocities

所体现出的“层裂强度”，可以认为混凝土层裂强度随加载速度提高而降低的现象，是由于加载压缩波产生的损伤而引起的：C30 在 $v_0 = 8 \text{ m/s}$ 时具有最大层裂强度，由 $v_0 = 6 \text{ m/s}$ 时试件断口形状，没出现骨料拉断现象，骨料从基体中剥落，属低加载率的破坏方式；由 $v_0 = 8 \text{ m/s}$ 时试件断口，大部分骨料被拉断断口平直，为高加载率破坏方式；而 $v_0 = 11, 14 \text{ m/s}$ 时，大部分骨料从基体中剥落，对应于存在压缩损伤的破坏方式。

4.2.2 重复加载对混凝土层裂的影响

图 8 给出同一试件重复加载时试件和吸收杆的应力波形，对比中可以发现重复加载产生的损伤积累对混凝土材料性能的影响，这里所指的损伤积累包括一次加载后应力波在试件内部来回反射所产生的压缩和拉伸损伤之和。第 1、2 次为几乎相同的较低速度加载，试件表面没出现裂纹，吸收杆波形也无层裂信号，说明此时试件没有产生拉伸损伤，即在低于损伤演化阈值时重复加载对混凝土性能没产生影响。第 3 次对应的加载速度较高，加载后试件表面虽然没产生裂纹，但其吸收杆上存在不明显层裂信号，说明混凝土在拉伸波作用下已产生了损伤，但此时损伤积累比较少，试件内部微裂纹在拉伸波作用下的扩展并不明显，在试件表面没出现可见裂纹。第 4 次的加载速度为与第 3 次几乎相同，此时试件表面出现裂纹，和波形 3 相比试件上的反射波明显减小，同时吸收杆波形的层裂信号十分明显，说明试件内部拉伸损伤演化更快^[12]，利用(1)式得到的“层裂强度”也明显变小，说明第 3 次加载损伤后的材料在更低拉伸应力作用下就可产生层裂破坏。

上面分析说明，在材料产生损伤后，材料抵抗拉伸载荷的能力明显降低，会在再次承载时出现损伤快速演化和积累，导致试件层裂破坏。

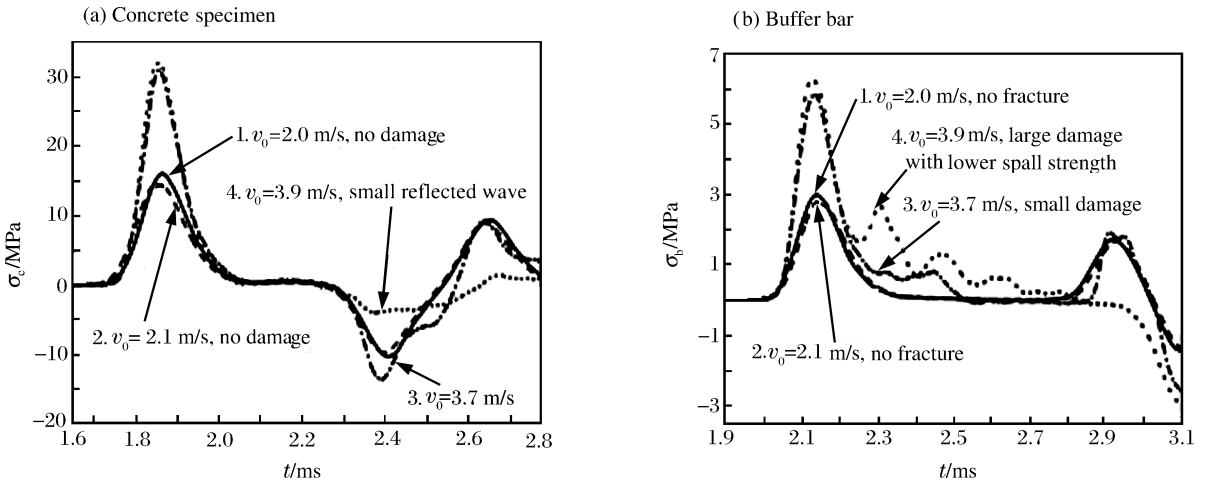


图 8 多次加载试件和吸收杆的波形

Fig. 8 Stress wave profiles of a concrete specimen and a buffer bar subjected to reduplicate loads

4.2.3 多次层裂的实验现象

在入射加载波幅值和波形满足一定条件时，试件可以发生多次层裂，其顺序通常是从自由面开始，向里推进，而且所有层裂都是在入射加载波和反射卸载波第一次相互作用过程中完成的^[12]，然而实验中通过高速摄影却发现完全不同的现象。

图 9 显示了撞击速度 $v_0 = 11 \text{ m/s}$ 时层裂过程高速摄影结果，高速摄影的帧间隔为 $400 \mu\text{s}$ 。图 9(a) 显示离自由端 530 mm 位置处出现第一个裂纹(箭头所示)；图 9(b) 显示在层裂段内出现第二个裂纹；图 9(c) 显示在新的层裂段内又出现第三个裂纹。结果表明，混凝土试件可在层裂段中再次发生层裂。再次发生层裂的层裂段的长度分别为 310 和 240 mm，混凝土波速为 4.330 km/s，波在层裂段中来回反射一次所需时间分别仅为 143 和 111 μs ，这说明第二、三次的层裂远非第一次反射波和入射波相互作用而产生，这种现象已无法用最大拉伸应力准则解释，充分反映了损伤积累对材料层裂强度的影响。在第一次层裂发生前，入射加载波已对材料产生了一定损伤弱化，层裂发生后，陷入层裂段中的应力波幅值

虽无法使材料再次断裂,但波在层裂段中来回反射而产生的压缩和拉伸损伤(特别是拉伸损伤)使材料再次弱化,能在更低拉伸应力作用下发生再次层裂,形成如图9的断裂顺序。

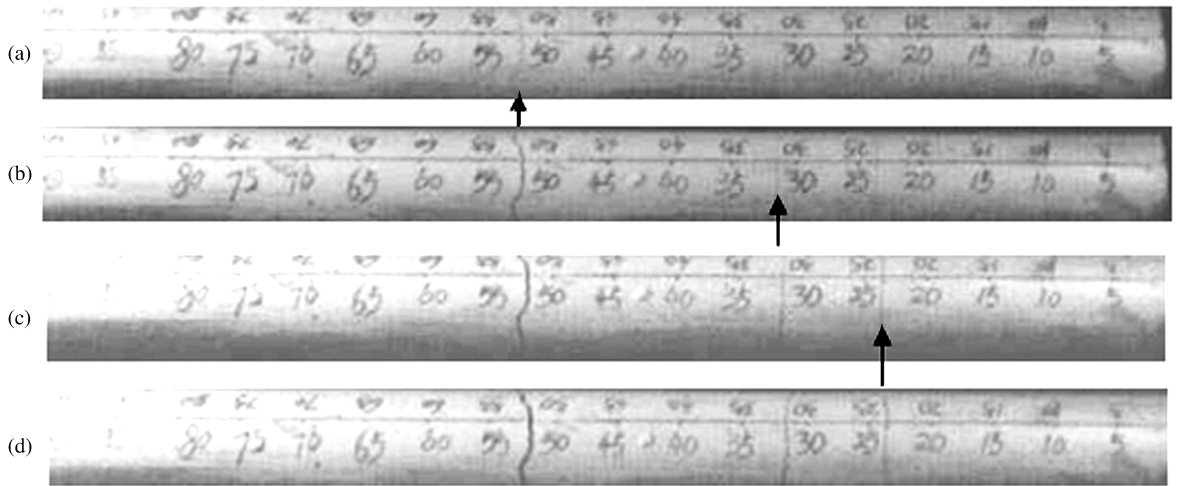


图9 层裂过程的顺序

Fig. 9 Sequences of the spalling process of a concrete specimen

5 结 语

(1)通过测量试件后吸收杆上的应变波形,获得不同强度混凝土在不同加载率下的层裂强度,并给出了层裂强度与压缩强度和加载率之间的经验公式,经验公式和实验结果能很好吻合。

(2)对混凝土层裂强度率效应结合试件破坏形状进行分析,认为导致层裂强度率效应的主要原因是不同加载速度下混凝土裂纹扩展方式不同。高加载率下混凝土层裂破坏以骨料拉断为主要形式,所以会出现比较高的层裂强度。

(3)分别通过压缩加载波损伤对层裂的影响、重复加载对混凝土层裂的影响和多次层裂的顺序等三个方面,说明损伤演化和发展对混凝土层裂有明显的影响。这种现象对可能承受重复打击的军事防护工程设计和武器效应的毁伤评估具有重要意义,在相关科研和设计工作中要充分考虑到此因素。

参考文献:

- [1] London J W, Quinney H. Experiment with the pressure Hopkinson bar[C]//Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences. London: Royal Society of London, 1923:622-643.
- [2] Goldsmith W, Polivka M, Yang T. Dynamic behavior of concrete[J]. Experiment Mechanics, 1966,6:65-79.
- [3] Watson A J, Sanderson A J. The resistance of concrete to shock[C]//Proceedings of the Conference on Mechanics and Physics, Behavior of Materials Under Dynamic Loading. Oxford: The Institute of Physics, 1979.
- [4] 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.
- [5] Brara A, Klepaczko J R. Experimental characterization of concrete in dynamic tension[J]. Mechanics of Materials, 2006,38:253-267.
- [6] 胡时胜,张磊,武海军. 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[J]. Engineering Mechanics, 2004,21(4):128-132.
- [7] 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, 2006,32:605-617.
- [8] 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.

- [9] Wang L L, Huang D J, Gan S. Nonlinear viscoelastic constitutive relations and nonlinear viscoelastic wave propagation for polymers at high strain rates[C]// Constitutive Relation in High/Very High Strain Rates. Noda, Japan: IUTAM, 1995: 16-19.
- [10] Mehta P K. 混凝土的结构性能与材料[M]. 祝永年, 译. 上海: 同济大学出版社, 1991: 11.
- [11] Grote D L, Park S W, Zhou M. Experimental characterization of the dynamic failure behavior of mortar under impact loading[J]. Journal of Applied Physics, 1989(4): 2115-2123.
- [12] Taraby A. Spall Fracture[M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2003: 160-107.
- [13] 王礼立. 应力波基础(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 60-64.

Spall characteristics of concrete materials

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, 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: The Hopkinson pressure bar tests were performed to explore the spall characteristics of concrete materials by analyzing the strain waves of the buffer bar. The experimental results, for concretes with different spall strengths at different load rates, indicate that the spall strength of concrete is related with its compressive strength and load rate. An empirical formula was proposed to describe the functional relationship between spall strength, compressive strength and load rate. The rate effect of spall strength mainly results from the different expanding paths of crack in concrete at different load rates. Some special efforts, which include the effect of the load compressive wave damage on concrete spall fracture, the results of reduplicate load experiments and the sequences of the multiple spall process, explain that damage plays an important role in the spall fracture of concrete.

Key words: mechanics of explosion; spall; Hopkinson pressure bar; concrete; damage

* Corresponding author: ZHANG Lei
E-mail address: lzhang05@ustc.edu
Telephone: 86-379-65986754