

文章编号: 1001-1455(2006)06-0537-06

混凝土层裂强度测量的新方法^{*}

张 磊^{1,2}, 胡时胜¹

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 总参谋部工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 提出了利用 Hopkinson 压杆测量混凝土层裂强度的新实验方法: 用高聚物材料取代传统的金属材料透射杆, 混凝土试件为细长杆, 由于高聚物波阻抗比混凝土小, 试件中压缩波在试件/吸收杆界面反射后形成拉伸波使试件产生层裂破坏, 通过吸收杆上透射波形可以确定混凝土层裂强度。由于波在粘弹性材料中的弥散效应, 吸收杆中透射波形会发生变化, 但三维有限元分析表明, 在利用吸收杆上透射波确定混凝土层裂强度时弥散产生的影响可以忽略。按照一维特征线理论, 可以由吸收杆上的应变波形确定出混凝土材料的层裂强度。

关键词: 爆炸力学; 层裂强度; 有限元分析; 混凝土; 层裂

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引 言

作为典型的脆性材料, 混凝土具有明显拉压不对称性, 静态轴向拉伸加载条件强度为压缩强度的 0.07~0.11^[1], 所以爆炸、冲击载荷作用下的混凝土建筑物最主要的破坏形式是层裂破坏, 研究混凝土层裂问题在学术和工程上都具有重要价值。

目前对层裂问题的实验方法主要是气炮加载产生一维应变状态下层裂, 利用 VISAR (velocity interferometer system for any recorder) 测量样品自由面速度从而获得层裂强度和层裂损伤演化等相关信息。但这种方法用于混凝土材料存在以下困难: (1) 混凝土骨料尺寸要求气炮有足够大的口径; (2) 混凝土样品加工精度及混凝土表面镀膜技术无法满足平板撞击实验中 VISAR 技术的测量要求。然而混凝土拉伸强度低, 可以利用 Hopkinson 杆作为加载设备来产生层裂, 所以近年来 Hopkinson 杆已经成为研究混凝土层裂的主要手段^[2~5], 但目前在层裂强度的确定方法上还存在有待商榷的地方。

本文中提出通过测量试件后低阻抗吸收杆上应变波形的方法来获得混凝土材料的层裂强度的实验方法, 并通过三维有限元分析讨论实验的可信性, 分析可能影响实验结果的主要因素。

2 实验方案和原理分析

如上所叙, VISAR 技术用于混凝土试件自由面速度测量还存在一定的困难。而其他的速度测量方法比如电容器法、电磁感应法都已经证明存在问题, 而传统的商用加速度传感器由于频响较低也无法用于冲击条件下自由面速度的测量。当试件后有软材料时, 层裂强度可以通过试件/吸收杆接触面压力历史获得, 但薄膜型压力传感器的选择及测量精度等限制了这一方法的应用, 但可以通过吸收杆上的应变测量来得到接触面压力。

基于上面讨论, 提出如图 1 所示的实验方案, 利用长混凝土杆作为试件, 在混凝土试件后放置软材料吸收杆, 通过吸收杆上的应变测量来确定材料的层裂强度。为了能在试件中产生拉应力, 要求 $l_s/c_2 > l_p/c_1$, 其中 l_p 和 l_s 为子弹和混凝土杆的长度; c_1 和 c_2 分别为子弹和混凝土的弹性纵波波速。当子弹以

* 收稿日期: 2005-09-10; 修回日期: 2006-02-07

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。

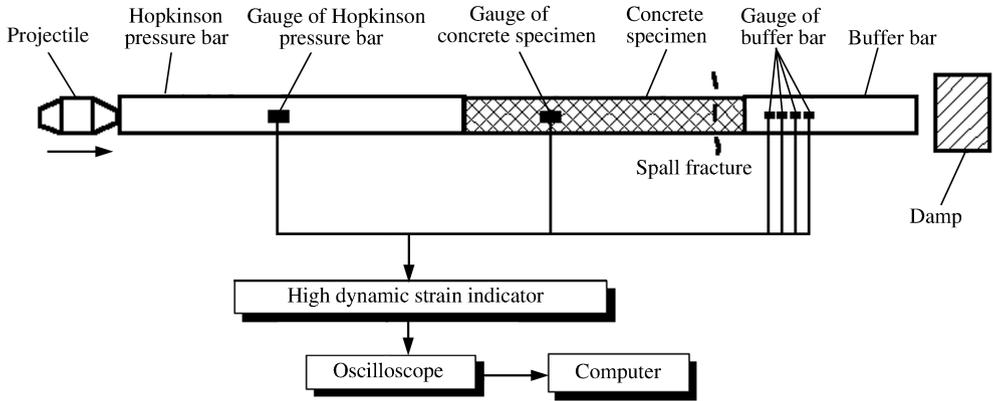


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Scheme of experimental facility

速度 v_1 撞击 Hopkinson 杆时, 压应力波将沿 Hopkinson 杆向前传播, 如图 2 所示, 部分 (对应图 3 中的 σ_4) 透入混凝土杆对它加载, 当该加载波传播到试件/吸收杆接触面时, 部分压缩波透射到后面的吸收杆, 使得该面上应力从 0 增加到 σ_6 , 同时部分反射到混凝土试件中与从子弹自由面反射来的稀疏波在 F' 点相互作用, 在 F' 点所表示的时间和位置产生拉伸应力区, 至 F 点该拉应力达到层裂强度 σ_F , 试件发生层裂形成层裂断面, 同时产生一个强间断的拉伸卸载波, 使该区的应力从 $\sigma_8 = \sigma_F$ 突变为零, 这个强间断于 D 时刻传播到试件/吸收杆交接面, 使该处应力突变为 σ_{10} 。在一维应力情况时, 在吸收杆上也可以获得同样的应力 (应变) 波形。

在一维应力情况下, 作线弹性近似, 采用特征线方法可以推导出利用交接面应力计算层裂强度的公式。

沿左行特征线 CF' 有

$$\int_C^{F'} d\sigma = \sigma_{F'} - \sigma_C = \sigma_{F'} - \sigma_6 = - \int_C^{F'} (\rho c)_2 dv = (\rho c)_2 (v_6 - v_{F'}) \quad (1)$$

沿右行特征线 $F'D$ 有

$$\sigma_{F'} - \sigma_D = (\rho c)_2 (v_{F'} - v_{10}) \quad (2)$$

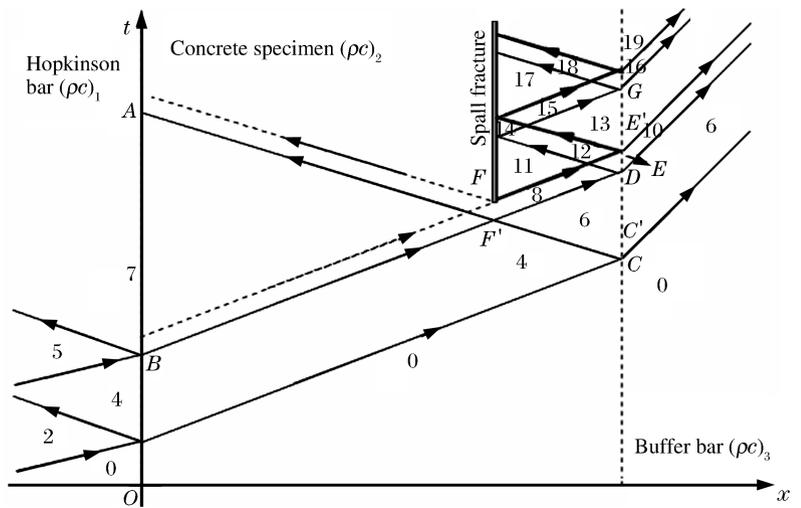


图 2 层裂发生时的 $x-t$ 图

Fig. 2 $x-t$ diagram when spalling

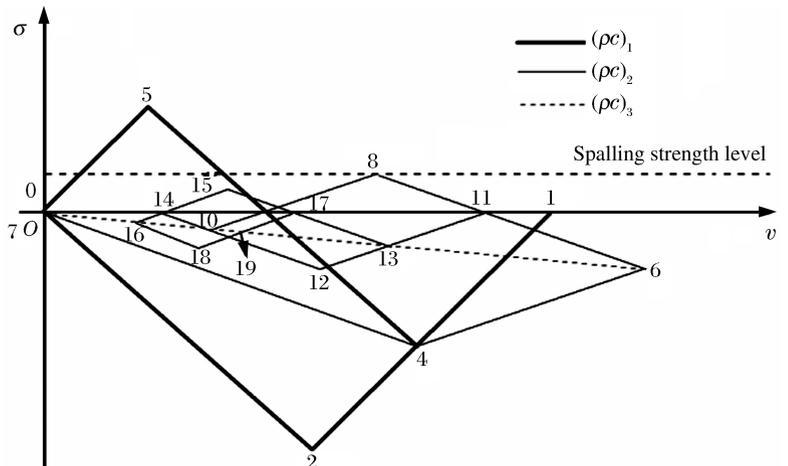


图 3 层裂发生时的应力-速度图

Fig. 3 Stress-velocity diagram when spalling

式中： $\sigma_C = \sigma_6 = \sigma_{\max}$ 为交接面上应力历史最高点， $\sigma_D = \sigma_{10} = \sigma_{\min}$ 为位于层裂强间断到达前的应力。他们的差定义为 $\sigma_{\text{pull-back}} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。

$$2\sigma_F = \sigma_6 + \sigma_{10} + (\rho c)_2(v_6 - v_{10}) = \sigma_{\max} + \sigma_{\min} + (\rho c)_2(v_6 - v_{10}) \tag{3}$$

又从 6 到 10 是跨越右行特征线，所以有

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = -(\rho c)_3(v_6 - v_{10}) \tag{4}$$

从式(3)和式(4)中消去速度项，就可以得到带有软材料吸收杆的层裂强度计算公式

$$\sigma_F = \frac{1}{2} \left[\sigma_{\max} + \sigma_{\min} - \frac{(\rho c)_2}{(\rho c)_3} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \right] = \frac{1}{2} \left[\sigma_6 + \sigma_{10} - \frac{(\rho c)_2}{(\rho c)_3} (\sigma_6 - \sigma_{10}) \right] \tag{5}$$

在混凝土试件后面没有吸收杆时，用类似方法可得到层裂强度和自由面速度的关系

$$\sigma_F = \frac{1}{2}(\rho c)_2(v_6 - v_{10}) = \frac{1}{2}(\rho c)_2(v_{\max} - v_{\min}) = \frac{1}{2}(\rho c)_2 v_{\text{pull-back}} \tag{6}$$

公式(5)、(6)与 S. A. Novikov^[6] 提出的一维应变条件下层裂强度计算公式形式一样。不同之处是这里的弹性纵波波速 c 是一维应力状态下的，而 S. A. Novikov 的公式中 c 是一维应变条件下的。由式(5)可见，通过直接测量混凝土试件和吸收杆接触面压力历史，可以计算该材料的层裂强度。而混凝土试件和吸收杆的接触面的应力历史可以通过吸收杆上应变片所测得的应变波形反推获得。

混凝土层裂强度取决于如何判别出层裂信号从而确定 σ_{\max} 和 σ_{\min} ，图 4 给出了利用 LS-DYNA 有限元程序^[7] 计算得到的采用 $\varnothing 37 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 撞击杆时试件与吸收杆接触面压力波形，其中撞击速度为 5 m/s，Hopkinson 杆尺寸为 $\varnothing 37 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ ，试件尺寸为 $\varnothing 37 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ，吸收杆尺寸为 $\varnothing 37 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ，混凝土材料层裂强度为 10 MPa，其他主要材料参数见表 1，其中 ρ 为材料密度， E 为弹性模量， c 为弹性纵波波速， ρc 为波阻抗， μ 为泊松比。吸收杆尼龙材料采用标准线性固体模型

$$\sigma(t) = E_a \epsilon(t) + E_M \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{\theta}} d\tau \tag{7}$$

式中：材料参数 $E_a = 3700 \text{ MPa}$ ， $E_M = 1900 \text{ MPa}$ ， $\theta = 407 \mu\text{s}$ 。

此圆柱体子弹的撞击在层裂试件和吸收杆接触面产生一个带有振荡的近似方型的压力脉冲。这样的波形不易判别确定层裂强度所需要的 σ_{\max} 和 σ_{\min} ，所以此圆柱型子弹不适合于材料的层裂强度研究。为了便于识别层裂信号，还有必要对撞击杆的形状进行选择。图 5 则给出与图 4 相同条件下梭形子弹（具体尺寸见图 6）撞击时所产生的接触面压力历史，很明显梭形子弹产生的波形更容易判别出确定层裂强度所需要的 σ_{\max} 和 σ_{\min} 。

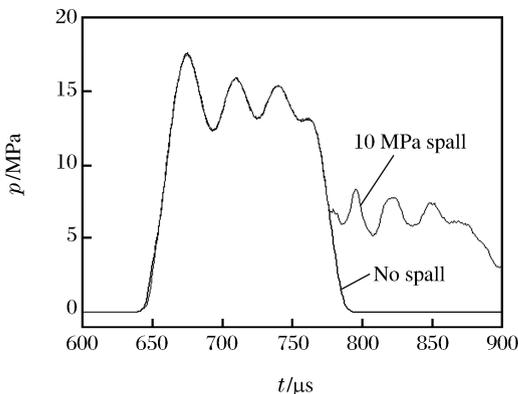


图 4 圆柱体子弹撞击的接触面压力波形
Fig. 4 Pressure wave frame with cylinder projectile

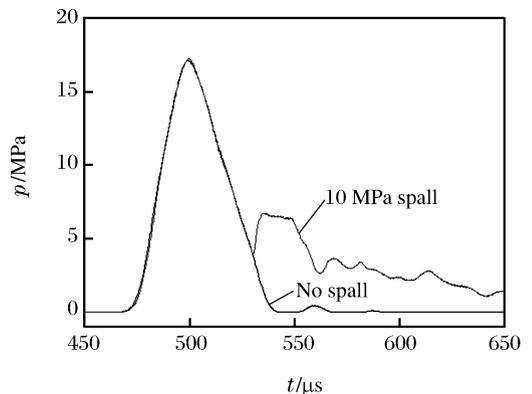


图 5 梭形子弹撞击时接触面压力波形
Fig. 5 Pressure wave frame with shuttle-shaped projectile

采用低阻抗材料的吸收杆是本测试方法的关键之一。选择波阻抗小的高聚物材料作为吸收杆可满足产生层裂破坏的波阻抗条件。由于层裂实验中吸收杆应变较小（小于 1%），可以不考虑材料的非线性^[8]，而采用标准线性固体单元近似表达高聚物材料本构关系。但是由于波在粘弹性杆中传播的弥散

和衰减,应变片所测得的杆中的应力应变并不能真实反映试件/吸收杆接触面的应力应变历史,可以利用特征线方法通过杆上测点的应变波形得到接触面的应力、应变以及速度波形^[9]。为简化实验数据处理,也可采用多点应变测量,根据测点的应变和应变率历史结合粘弹性材料参数利用式(7)得到应力历史,同时考虑到粘弹性波在标准线性固体中按指数规律衰减^[9],可以利用指数函数进行拟合的方式得到接触面的应力波形的最大值和最小值,进而利用式(5)获得混凝土材料的层裂强度。

表1 数值模拟中主要材料参数

Table 1 The main material constants adopted in numerical simulation

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	E/GPa	$c/(\text{m}/\text{s})$	$(\rho c)/(\text{MPa} \cdot \text{s}/\text{m})$	μ
杆/子弹	7 800	200	5 060	39.0	0.28
混凝土	2 100	25	3 450	7.2	0.20
吸收杆	1 150	5.6	2 200	2.5	0.20

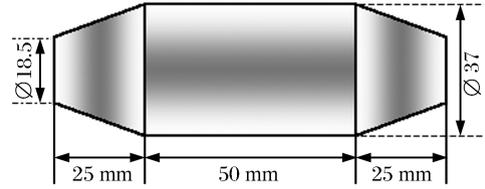


图6 梭形子弹筒图

Fig. 6 Scheme of shuttle-shaped projectile

3 三维有限元分析

公式(5)和(6)的推导中采用一维应力假定,而实际 Hopkinson 杆加载的层裂过程,不是严格的一维应力状态,也不同于平板撞击所产生的一维应变状态下的层裂。一维应变状态的层裂薄片很薄,实验过程中可以避免来自侧面的稀疏波的影响。即使在这种情况下,传统的利用速度的 pull-back 来测量层裂强度的方法也有一定局限性,正如 D. N. Chen 等^[10]的研究结果。Hopkinson 杆加载层裂实验应力波传播过程中的二维泊松效应而引起的波形弥散对层裂信号影响,是一个值得考虑的问题。利用 LS-DYNA 程序,进行三维有限元分析,通过数值模拟得到的混凝土试件/吸收杆接触面压力历史,利用公式(5)计算得到层裂强度,它和给定的混凝土材料层裂强度的差别就可以衡量一维应力条件下公式(5)的可信程度;同时吸收杆不同位置的应力波形和接触面压力波形的比较可以进一步说明波在吸收杆中传播时的弥散效应的影响。数值模拟中采用的主要材料参数见表1,几何尺寸与图6中的相同,子弹撞击速度为5 m/s。图7给出混凝土的层裂强度分别为为5,8,10,12 MPa时混凝土试件和吸收杆接触面的应力波形,图8则分别给出图7中 σ_{\max} , σ_{\min} 和利用公式(5)确定的层裂强度,其中混凝土材料与吸收杆材料的波阻抗比通过表1可以得到为2.9。

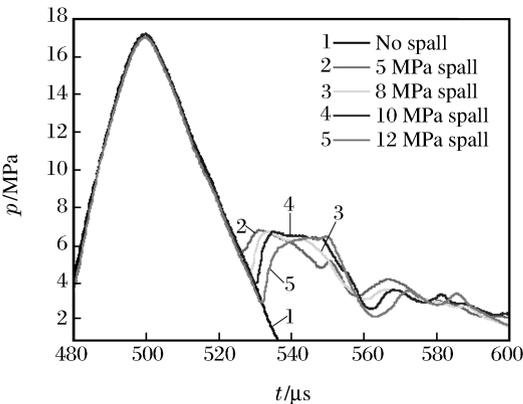


图7 不同层裂强度时接触面压力波形

Fig. 7 Pressure wave frame of contact face with different spall strength

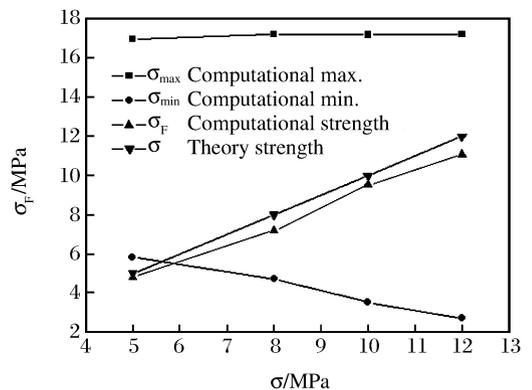


图8 接触面压力的最大值、最小值和层裂强度

Fig. 8 The maximum, minimum of contact pressure and the sequent spall strength

图8的计算结果显示,利用接触面压力波形的最大值和最小值确定的层裂强度都比计算中给定的混凝土材料的层裂强度小,其原因除了有限元方法对连续体离散而引起的高频耗散^[11]外还包括 D. N. Chen等^[10]提到的传统确定层裂强度方法的局限性。但由于计算得到的层裂强度(图8中图示为

computational strength)和给定的混凝土材料的层裂强度(图 8 中图示为 theory strength)差别不大, 不大于 10%, 所以可以认为在 Hopkinson 杆加载的层裂实验中, 弥散效应对层裂信号的影响可以忽略, 这样仍然可以采用一维应力假定下得到的公式(5)和(6)。如果可以测量接触面的压力历史就可以确定出材料的层裂强度, 但薄膜型压力传感器的选择及测量精度等原因限制了这一方法的采用, 所以只能通过吸收杆的应变测量来确定接触面的压力, 进而确定材料的层裂强度。如前所述, 由于波在粘弹性杆中传播时的弥散和衰减使应变测量位置的波形不能真实反映接触面压力波形, 而影响波形在吸收杆中传播的变化的因素包括吸收杆的几何尺寸、吸收杆材料参数以及接触面压力波形等。图 9 给出混凝土层裂强度为 8 MPa 时吸收杆不同位置的应力波形, 从中可以发现虽然波的形状差别不大但不同位置波形得到的层裂强度随距接触面距离增加而减小。如果近似处理可以直接采用靠近接触面的吸收杆上某点的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可以在实验中采用在吸收杆靠近接触面的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, 从而获得材料的层裂强度。虽然这样的反推过程会与真实情况有所偏颇但可以尽量减小实验测量的误差。

4 结 论

- (1) 基于一维应力和线弹性假定, 利用特征线方法得到试件/吸收杆接触面压力波形来获得材料层裂强度的公式。
- (2) 考虑到和一维应变状态的层裂实验不同, 利用三维有限元方法分析了弥散对层裂信号的影响, 结果发现接触面压力波形受弥散的影响可以忽略, 在准一维应力条件仍可以采用传统的计算层裂强度公式由接触面的压力波形来确定材料的层裂强度。
- (3) 波形在吸收杆中传播时波形的变化会使不同测量位置确定的层裂强度不同, 其变化受吸收杆的材料、几何尺寸和接触面压力波形影响。比较简单可行的处理方法可以通过不同位置的应变测量来反推到接触面从而确定层裂强度, 这样可以尽量减少实验误差。
- (4) 有限元分析结果表明, 本文中提出的实验方案是可行的, 但在实验中要注意下列问题:
 - ① 精确获得吸收杆的材料参数, 并利用应力波传播规律实验获得波在其中传播的弥散和衰减规律;
 - ② 混凝土材料和吸收杆材料波阻抗比对实验结果影响很大, 应精确测量;
 - ③ 尼龙杆上应变测量位置应多点而且应尽可能靠近试件/吸收杆接触面。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所贺红亮研究员对本文提供的卓有启发性的建议和帮助。

参考文献:

[1] Kumar Metha P. 混凝土结构、特性和材料[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.

[2] Diamruva M, Kobayashi H. Impact tensile strength and fracture of concrete[J]. Colloque C3 Supplement au Journal de Physique III, 1997, 7: 253-258.

[3] Klepaczho J R, Brara A. An experiment method for dynamic tensile testing of concrete by spalling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 387-409.

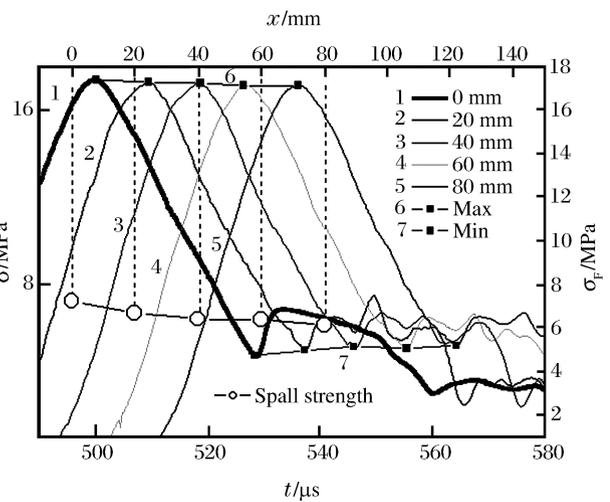


图 9 吸收杆不同位置的应力波形和对应的最大值、最小值和层裂强度

Fig. 9 The stress wave frames and sequent maximum, minimum, spall strength at different locations of butter bar

- [4] Galvez F, Diaz-Rubio, Rodriguez Perez J, et al. The spalling of long bars as a reliable method measuring the dynamic tensile strength of ceramics[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002,27:161-177.
- [5] 胡时胜,张磊,武海军,等. 混凝土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.
- [6] Novikov S A. Spall strength of materials under shock load[J]. *Journal of Applied Mech Tech Phys*, 1967,3:109-120.
- [7] Hallquist John O. LS-DYNA970 Theoretical Manual[M]. Livermore CA: Livermore Software Technology Corporation, 1998:275-276.
- [8] Wang L L, Huang D J, Gan S. Nonlinear viscoelastic constitutive relations and nonlinear viscoelastic wave propagation for polymers at high strain rates, in constitutive relation in high/very high strain rates[A]. Kawata K, Shioiri J. IUTAM Symposium[C]. Springer-Verlag, Tokyo, 1996:137-146.
- [9] Wang L L, Labibes K, Azari Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994,15(5):669-686.
- [10] Chen D N, Yu Y Y, Yin Z H, et al. On the validity of the traditional measurement of spall strength[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005,31:811-824.
- [11] 宗福开. 波传播问题中有限元分析的频散特性及离散化准则[J]. *爆炸与冲击*,1984,4(4):16-23.
ZONG Fu-Kai. Frequency-dispersion characteristics and discretization of the finite element analysis in wave propagation problems[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1984,4(4):16-23.

A novel experimental technique to determine the spalling strength of concretes

ZHANG Lei^{1,2}, HU Shi-sheng^{1*}

- (1. *Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China*;
2. *The Third Engineering Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang 471023, Henan, China*)

Abstract: A polymeric buffer bar is employed to replace the conventional metallic transmission bar in a split Hopkinson pressure bar to determine the spalling strength of a long concrete rod that is placed between the metallic incident bar and the polymer buffer bar. Since the polymer bar material has a lower mechanical impedance than the concrete specimen, spalling can be produced in the concrete rod after the compressive wave in the concrete specimen is reflected back as a tension wave at the concrete/buffer bar interface. The spalling in the concrete is detected by examining the profile of the transmitted pulse in the buffer bar. Even though the profile of the transmitted pulse recorded by the strain gages on the buffer bar may vary due to wave dispersion in such a viscoelastic buffer bar, a 3-D finite element analysis indicates that the wave dispersion correction is not necessary when the transmitted pulse is used to determine the spalling strength of the concrete specimen. The spalling strength is determined by using the records from the strain gages on the buffer bar on the basis of classic 1-D theory of characteristics.

Key words: mechanics of explosion; spalling strength; finite element analysis; concrete; spall

* Corresponding author: HU Shi-sheng
E-mail address: sshu@ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3601249