

# C30 混凝土冲击绝热关系和 Grüneisen 型 状态方程的实验研究\*

王永刚<sup>1)†</sup> 张远平<sup>2)</sup> 王礼立<sup>1)‡</sup>

1) 宁波大学力学与材料科学研究中心, 宁波 315211)

2) 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

(2008 年 4 月 1 日收到, 2008 年 7 月 21 日收到修改稿)

采用一级气炮加载技术和锰铜压力计测试技术, 对含初始空隙的 C30 混凝土在一维应变条件下的冲击特性进行了实验测量和分析. 基于锰铜压力计测量的压力波形, 确定了 C30 混凝土材料的冲击绝热关系, 即冲击波速度  $D$  与波后粒子速度  $u$  之间满足线性关系. 再从 C30 混凝土的冲击绝热数据出发, 获得了计及初始空隙度  $\phi_0$  影响的多项式形式 Grüneisen 型状态方程中的各项系数. 实测压力波形还显示: 不同位置处的压力波形在迅速上升至峰值后均随时间逐渐衰减, 而冲击波峰值又随传播距离而衰减, 从而表明 C30 混凝土材料的率相关特性不能忽略, 呈现出明显的应力松弛特征和耗散特征.

关键词: Grüneisen 型状态方程, 冲击绝热关系, 混凝土

PACC: 6250, 6220D, 6220F, 6220M

## 1. 引 言

混凝土材料是最为广泛应用的工程材料之一, 前人对其中准静态力学性能曾作过大量研究. 然而, 不论在国防还是民用建设中, 现代混凝土结构还往往要承受爆炸和冲击等强动载荷. 例如, 常规战争中混凝土建造的指挥所和通讯掩体要承受敌方炸弹摧毁性的打击, 机场跑道要承受飞机降落时产生的强冲击载荷作用. 因此, 人们还需要对强动载荷下混凝土材料的冲击特性进行研究. 已有较多学者采用分离式霍布金森压杆技术对混凝土材料的动态力学性能进行了实验研究, 确认混凝土是应变率敏感材料<sup>[1-4]</sup>.

近年来, 随着数值模拟技术的迅速发展和广泛应用, 对材料本构模型的建立提出了更高的要求. 目前, 关于强动载荷下材料的高压高应变率本构模型的建立, 主要考虑描述其形状变化的偏量部分(畸变律)和描述其容积变化的球量部分(容变律). 人们对金属材料的高压高应变率本构模型已经进行了比较多的研究<sup>[5,6]</sup>. Holmquist, Johnson 和 Cook<sup>[7]</sup>在 1993 年

第 14 届国际弹道会议上针对混凝土动态大变形计算提出了 H-J-C 高压高应变率本构模型, 现在已得到了比较广泛的应用. H-J-C 本构模型把原来适用金属材料的 Johnson-Cook 本构方程推广到混凝土, 用于描述畸变律部分, 同时忽略了原方程中的应变硬化效应和温度效应, 保留了应变率效应. 而 H-J-C 本构模型中的容变律部分则采用固体高压状态方程来描述, 最常用的是 Grüneisen 型状态方程. 本构模型中的有关参数需要通过材料力学性能实验来确定. 本文拟采用一级轻气炮加载, 对 C30 混凝土在一维应变条件下的冲击绝热关系和 Grüneisen 型状态方程进行实验研究, 确定有关材料参数, 为相关数值模拟工作提供一定的基础物理数据.

## 2. 一维应变条件下 C30 混凝土气炮 试验

样品原材料选用 325 # 普通硅酸盐水泥、细度模数为 2.9 的天然砂、粒径为 4 mm 左右的石子作为细骨料, 按照一定的配合比(水、水泥、砂石的质量之比为 0.5:1:2)混合搅拌均匀, 注模后振动排气, 凝

\* 中国工程物理研究院科研基金、国家自然科学基金(批准号:10572066)和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

† E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

固硬化 24 h 后脱模,放在常温水中(20—25 °C)养护 29 d,即得混凝土样品.实测混凝土密度为 2.246 g/cm<sup>3</sup>,混凝土的抗压强度为 32.8 MPa.

气炮试验在冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室的一级气炮(内径 100 mm)上进行,试验装置如图 1 所示.飞片由压缩气体驱动对靶板进行平面撞击,利用撞击产生一维应变冲击波对 C30 混凝土样品进行加载.飞片和靶板的材料均为 LY12 铝,其厚度分别为 10 和 5 mm,直径均为 95 mm. C30 混凝土样品由 5 片厚度为 10 mm,直径为 100 mm 的试样片组成,在各试样片间夹入压力传感器(锰铜压力计),以便测量样品中不同位置处的压力.组装完成的 C30 混凝土样品如图 2 所示.实验中,通过调整飞片撞击速度使得样品承受不同初始压力的加载.利用样品中在不同位置处夹入的压力传感器进行实时测量,可以实现通过一发试验测得多点位置处的应力波传播信息,并可进一步考察是否存在由材料率型本构响应所引起的应力波衰减特性.

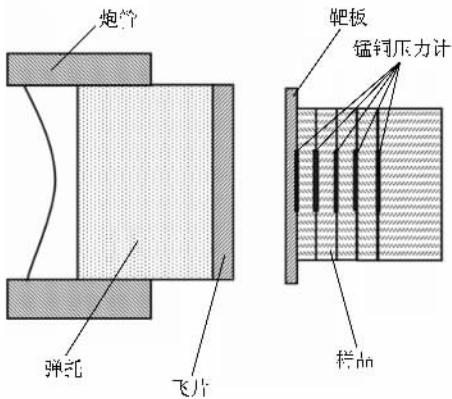


图 1 C30 混凝土气炮加载试验装置示意图



图 2 组装好的 C30 混凝土试样照片

在每一发试验中,使用的锰铜压阻应力传感器(中国工程物理研究院流体物理研究所生产)为 5 个,被分别夹持在铝靶板与混凝土样品间和随后的混凝土各试样片之间,如图 1 所示.通过实测所得电压  $U(t)$ ,可由下述标定式确定相应的压力  $P(t)$ :

$$P = 0.56 + 33.04 \frac{\Delta U}{U_0} + 7.56 \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right)^2 - 2.17 \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right)^3. \quad (1)$$

这里  $\Delta U = U - U_0$ ,其中  $U_0$  为初始的标定电压值, $U$  的单位为 V, $P$  的单位为 GPa.

### 3. 试验结果处理和分析

气炮试验共进行了 4 发,飞片速度控制在 400—700 m/s.典型的实测锰铜压力计电压波形  $\Delta U(t)$ 见图 3(飞片速度为 670 m/s).对电压波形按(1)式进行数据处理后,可以得到压力波形  $P(t)$ ,如图 4 所示.这里需要说明的是,试验中虽然使用了 5 个锰铜压力计,但由于应力波在混凝土中传播时幅值衰减很快,因此样品中最后一个压力计处的压力很小,超过了锰铜压力计的测量范围,因而实验中只有前 4 个锰铜压力计测得有效的压力波形.

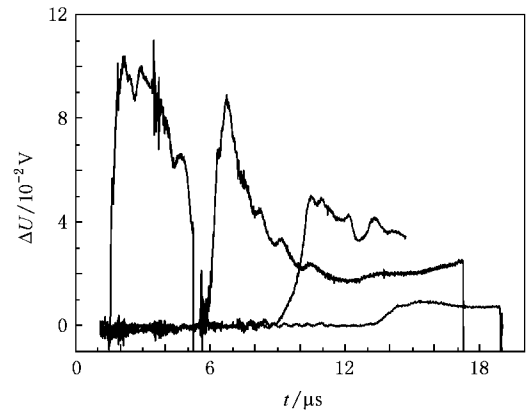


图 3 锰铜压力计实测的典型电压波形

由图 4 可以看出,不同位置处应力波形在迅速上升到峰值后均随时间逐渐衰减.即使是位于铝靶与 C30 混凝土样品间的第一片锰铜压力计所测的压力波形,也不存在率无关材料在恒速撞击下的“压力平台”,而是升至峰值后随时间逐渐衰减.这一现象一方面可能与试验压力范围有关,即当压力从可以忽略材料剪切强度的高压范围内(流体动力学模型)降到必须计及材料抗剪强度的次高压范围时,剪切

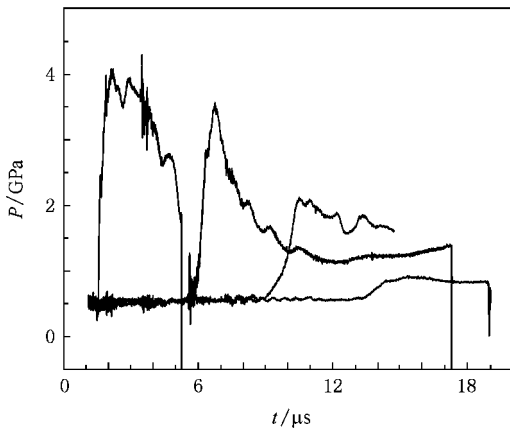


图4 锰铜压力计测得的电压波形经处理得到的典型应力波形

黏性产生了不可忽略的影响;另一方面则与样品本身的本构黏性强弱有关.另外,应力波除了随传播距离的增加而衰减外,应力脉冲的升时也明显地逐渐增大,即由强间断波逐渐转化为弱间断波.这类现象的出现除了与本构耗散引起的冲击波衰减相关以外,还可能与追赶卸载引起的冲击波衰减以及应力波的非线性特性等有关.这些问题需待今后做进一步的研究分析.

#### 4. 冲击绝热关系和 Grüneisen 型状态方程

由冲击波的质量守恒、动量守恒以及能量守恒可导出 Euler 坐标系下的三个基本方程<sup>[8]</sup>,即

$$\rho_0(D - u_0) = \rho(D - u), \quad (2)$$

$$P - P_0 = \rho_0(D - u_0)(u - u_0), \quad (3)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0)\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right), \quad (4)$$

式中  $\rho_0, u_0, P_0, E_0$  分别为初始状态的材料密度、粒子速度、压力和内能,  $\rho, u, D, P, E$  分别为冲击状态的材料密度、粒子速度、冲击波速度、压力和内能.从方程组(2)~(4)可知,在已知初始状态参量( $\rho_0, u_0, P_0, E_0$ )的情况下,还有五个待定参数  $\rho, u, D, P, E$ ,因此由实验方法测定其中任意两个量,就能由方程组(2)~(4)求出其余三个量,从而确定冲击绝热线上某一点的状态参数.

实验中,锰铜压力计直接测量了样品中的冲击压力  $P$ .根据样品中不同位置处锰铜压力计记录到的冲击压力波形的不同升沿,可计算冲击波在每一试样片中传播的时间  $\Delta t$ ,结合在实验前测量的每一试样片的厚度  $h$ ,便可求得混凝土样品中的冲击波

速度  $D$  ( $D = h/\Delta t$ )以及相应的混凝土冲击阻抗  $\rho_0 D$ .然后,再由(3)式确定每一试样片中的粒子速度  $u$ ,从而确定混凝土的冲击波速度  $D$  与粒子速度  $u$  之间的冲击绝热关系,即  $D-u$  关系(图5).由图5可见,与大多数材料相同,C30 混凝土的  $D$  与  $u$  间也存在线性关系,按线性公式

$$D = C_0 + \lambda u \quad (5)$$

进行拟合,可得  $C_0 = 2420$  m/s 和  $\lambda = 1.34$ .因而有

$$D = 2420 + 1.34u. \quad (6)$$

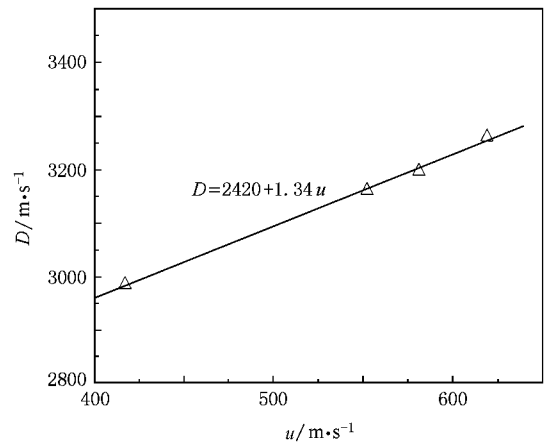


图5 C30 混凝土冲击波速度  $D$  与粒子速度  $u$  的关系

混凝土材料的容变律通常采用多项式形式的 Grüneisen 型状态方程来描述,若计及初始损伤的影响,其方程具体形式为<sup>[9]</sup>

$$P = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3,$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_r} - 1, \quad (7)$$

$$\rho_r = \frac{\rho_0}{1 - \phi_0},$$

式中  $A_1, A_2, A_3$  为拟合系数,  $\mu$  为体应变,  $\rho_r$  为密实材料的密度,  $\phi_0$  为初始空隙度.初始空隙度  $\phi_0$  的确定是先根据质量加权平均,预测出 C30 混凝土的理论密实密度  $\rho_0 = 2350$  kg/m<sup>3</sup>,再由实测的混凝土密度  $\rho_r = 2246$  kg/m<sup>3</sup>,由此估算出混凝土样品的初始空隙度  $\phi_0 = 4.4\%$ .随后由  $D-u$  冲击绝热线性关系,再利用(2)~(3)式便可求得 C30 混凝土的压力与体应变之间的冲击绝热关系( $P-\mu$  关系),结果如图6所示.通过对图6所示的冲击绝热实验数据进行拟合,确定 C30 混凝土的多项式形式的 Grüneisen 型状态方程中各拟合系数,得到  $A_1 = 30.9$  GPa,  $A_2 = -125.6$  GPa,  $A_3 = 437.4$  GPa.

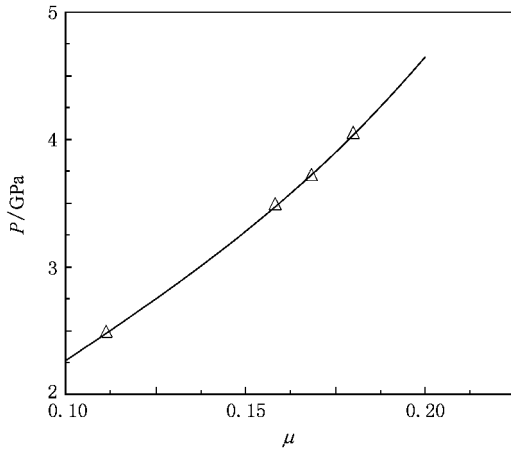


图6 C30混凝土压力  $P$  与体应变  $\mu$  的关系

## 5. 结 论

1) 采用一级气炮加载,对含初始空隙的 C30 混凝土样品进行了一维应变动态力学行为的试验研究,确定了该材料的冲击绝热关系,其冲击波速度  $D$  与波后粒子速度  $u$  之间满足线性关系。

2) 从 C30 混凝土的冲击绝热数据出发,获得了计及初始空隙度  $\phi_0$  影响的多项式形式 Grüneisen 型状态方程中的各项拟合系数。

3) 一维应变平板撞击试验的实测结果还显示了不同位置处的应力波形在迅速上升至峰值后均随时间衰减,同时冲击波峰值又随传播距离而衰减。实验研究表明 C30 混凝土率相关特性不能忽略,呈现出明显的应力松弛特征和耗散特征。

- [ 1 ] Wang L L, Shi S Q, Chen J Y, Huang D J, Shen L J 2003 *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* **3** 419
- [ 2 ] Brara A, Camborde F, Klepaczko J R, Mariotti C 2001 *Mech. Mater.* **33** 33
- [ 3 ] Hu S S, Wang D R 2002 *Explos. Shock Waves* **22** 242 (in Chinese) [ 胡时胜、王道容 2002 爆炸与冲击 **22** 242 ]
- [ 4 ] Klepaczko J R, Brara A 2001 *Int. J. Impact Eng.* **25** 387
- [ 5 ] Peng J X, Jing F Q, Wang L L, Li D H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2194 (in Chinese) [ 彭建祥、经福谦、王礼立、李大红 2005 物理学报 **54** 2194 ]
- [ 6 ] Hu J B, Yu Y Y, Dai C D, Tan H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5750 (in Chinese) [ 胡建波、俞宇颖、戴诚达、谭 华 2005 物理学报 **54** 5750 ]
- [ 7 ] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H 1993 *Proc. 14th Int. Symp. Ballistics* (Netherlands: American Defense Preparedness Association) p591
- [ 8 ] Jing F Q 1999 *Introduction of Experimental Equation of State* (Beijing: Science Press) p83 (in Chinese) [ 经福谦 1999 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社) 第 83 页 ]
- [ 9 ] Schwer L E, Rosinsky R, Day J 1988 *Int. J. Num. Anal. Metho. Geomech.* **12** 235

# Experimental study on the shock Hugoniot relationship and the Grüneisen-type equation of state for C30 concrete \*

Wang Yong-Gang<sup>1)†</sup> Zhang Yuan-Ping<sup>2)</sup> Wang Li-Li<sup>1)✉</sup>

1 *✉ Mechanics and Materials Science Research Center , Ningbo University , Ningbo 315211 , China )*

2 *✉ Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )*

( Received 1 April 2008 ; revised manuscript received 21 July 2008 )

## Abstract

The shock properties of C30 concrete with initial porosity is investigated by gas gun planar impact technique. The manganin pressure gauge is used to measure the pressure-time curves of the samples. It is shown by the experimental studies on the shock Hugoniot relationship and the Grüneisen-type equation of state for C30 concrete that the  $D-u$  shock Hugoniot relationship is described by the linear relation, and the material parameters in the Grüneisen-type equation of state are determined. Moreover, it is observed from the measured pressure-time curves that the rate-sensitivity of dynamic response for C30 concrete is not negligible, showing marked stress relaxation and dissipation.

**Keywords :** Grüneisen-type equation of state , shock Hugoniot relationship , concrete

**PACC :** 6250 , 6220D , 6220F , 6220M

\* Project supported by the Scientific Research Foundation of China Academy of Engineering Physics , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10572066 ) and the K. C. Wong Magna Fund of Ningbo University , China.

† E-mail : wangyonggang@nbu.edu.cn