

高强混凝土气体炮试验与高压状态方程研究*

蒋国平^{1)†} 焦楚杰¹⁾ 肖波齐²⁾

1) (广州大学工程抗震中心, 广州 510405)

2) (三明学院物理与机电工程系, 三明 365004)

(2010年11月4日收到; 2011年5月5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 C100 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, 通过拉格朗日分析得到了各拉氏位置的相关物理量, 实测压力波形显示: 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, 于是将损伤引入状态方程, 再从这些物理量出发, 得到了多项式形式 Grüneisen 型状态方程中的各项系数.

关键词: 状态方程, 冲击, 高强混凝土

PACS: 67.80.Cx

1 引言

高强混凝土在防护工程中有着广泛的应用, 而在防护工程中混凝土材料通常面对的是高速撞击, 通常混凝土对应的高应变率, 因此, 有必要对混凝土材料进行气体炮试验研究^[1-5]. 在武器的强冲击荷载作用下, 防护结构处于 GPa 级甚至更大的高压状态时, 混凝土可当作为无黏性可压缩的流体, 其本构方程就是静水压力与体积应变之间的关系, 即高压状态方程. 在 LS-DYNA 等专业计算软件中, Grüneisen 型状态方程^[1,2]是最常用的状态方程, 已经用于 Johnson-Holmquist-Concrete, Mie-Grüneisen, JOHNSON-HOLMQUIST-CERAMICS 状态方程等^[3-5]模型中的容变律部分, 本文拟采用一级轻气炮加载, 测试 C100 混凝土在一维应变条件下的应力时程曲线, 通过拉格朗日分析, 得到相关参数的时程曲线, 然后对 Grüneisen 型状态方程进行研究, 确定有关的材料参数, 建立数值模拟与试验的桥梁.

2 气体炮实验

理论和试验表明, 在研究动态荷载作用时, 必

须考虑两种基本的动力学效应: 惯性效应(或应力波效应)和材料应变率效应. 前者导致了各种形式的、精确的或简化的应力波传播和其他形式的结构动力学研究; 后者导致了各种类型的、应变率相关的本构关系和破坏准则的研究. 而应力波在材料内的传播和演变规律又受到材料本构行为的支配, 本实验主要研究的是一维平面波问题. 通过在材料内部不同位置处埋入的传感器(拉氏量计), 测量到该处应力波形的变化, 即 $\sigma-t$ (应力与时间) 曲线, 再由拉氏分析方法得到材料 $\sigma-\epsilon$ (应力与应变)、 $\dot{\epsilon}-t$ (应变率与时间) 以及 $u, E-t$ (质速, 能量与时间) 等参数的关系, 从而了解材料不同应变率下的动态行为.

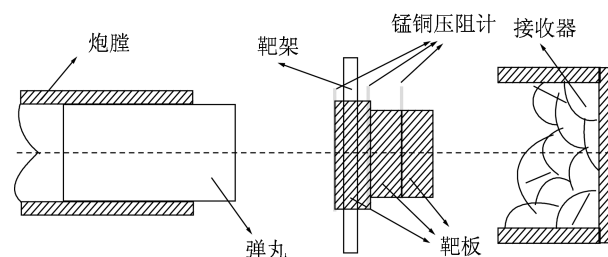


图1 轻气炮实验装置及测试系统示意图

实验时将飞片黏贴于弹丸上, 高压气体的突然释放推动弹丸沿真空的炮管运动. 当高速运行的弹

* 国家自然科学基金(批准号: 51078094, 50708022)资助的课题.

† E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn

丸碰撞靶板时,产生一个较高的压力脉冲,由锰铜压阻传感器记录一组压力信号,不同的撞击速度就会产生不同的压力峰值.根据这一系列的压力信号,就可进行材料动态特性的分析.

图 1 中的组合靶(通常为三片靶进行组合,本次实验为四片靶)及锰铜量计用于测试一维应变情况下的冲击波压力.由于混凝土的阻抗不高,对于对称碰撞,靶中所能实现的冲击压力比较低,为准确测量压力信号,采用了由北京理工大学提供的 $50\ \Omega$ 的大阻值锰铜传感器,图 2 给出了对应的实物照片.该传感器常用于测量幅值比较低的压力信号.北京理工大学对该传感器进行了标定,传感器的电阻变化与压力之间的关系式为

$$\begin{aligned} \sigma &= (0.3252 \pm 0.0679) \\ &+ (40.2733 \pm 0.4164) \left(\frac{\Delta R}{R} \right), \\ &(1.5 - 12.67\text{GPa}), \\ \sigma &= (0.0014 \pm 0.0055) \\ &+ (51.4697 \pm 0.2773) \left(\frac{\Delta R}{R} \right), \\ &(0 - 1.5\text{GPa}), \end{aligned}$$

其中, σ 为标定压力, R 为阻值, ΔR 为试验前后阻值变化.

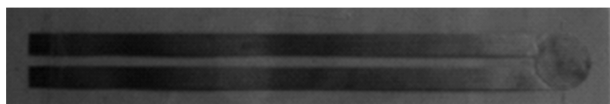


图 2 H 形 $50\ \Omega$ 传感器



图 3 飞片与弹托

飞片与弹托,混凝土试块等实物图见图 3,图 4.试验的试块采用了高强混凝土(C100),试验中考虑了试块的宽厚比以及追赶比,以消除边侧稀疏效应

和追赶稀疏波的影响.试验得到了撞击速度为 $327\ \text{m/s}$ 时混凝土中的压力时程曲线(图 5),取第一个传感器的拉格朗日坐标为 0,根据采用的试块厚度,其余两个位置的拉格朗日坐标为 $8\ \text{mm}$ 与 $16\ \text{mm}$,将压力 p 以及后面通过拉格朗日分析得到的物理量与拉格朗日坐标对应得到图 6,图 7,图 8.



图 4 混凝土试块

3 拉格朗日分析

惰性材料中的 Lagrange 分析方法是一种利用 Lagrange 传感器的记录来计算惰性材料在冲击波作用下的流场分布的一种普遍性方法.也就是利用实验测得的一组时程曲线,通过动量方程,连续性方程,能量方程积分,求得流场中的质速时程曲线,比容时程曲线,内能时程曲线以及比内能变化率.再通过相应的方程求得应力与应变关系曲线.它是实验,理论模型和数值模拟间的重要联系工具.

对于一维流场,有守恒方程

$$u - u_1 = v_0 \int_{\tau}^t \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_t dt, \quad (1)$$

$$v - v_1 = \int_{\tau}^t \left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)_t dt, \quad (2)$$

$$e - e_1 = v_0 \int_{\tau}^t p \left(\frac{\partial u}{\partial h} \right)_t dt, \quad (3)$$

其中, u 为质速, v 为比容, e 为比内能, p 为压力, v_0 为初始比容,下标 1 表示波前状态.

由于沿等时线积分会导致流场信息大量丢失,在实际的计算当中采用路径线法.将各条压力时程曲线上具有相似特性的点^[6,7](用传感器记录到的各波形的特征点(如弹性波终点,塑性波波峰点,卸载起始位置和终点)作为流场控制点来约束径线划分)用光滑曲线连接起来,这些曲线就是径线.由于

拉氏传感器埋在混凝土里面, 假设拉氏传感器与混凝土有相同的运动, 于是迹线则指的是量计记录到的参数 (这里是压力) 随时间的变化 [6].

作微分变换, 将等时线积分转换为对径线和迹线积分.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial h}\right)_t = \left(\frac{dp}{dh}\right)_j - \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_h \left(\frac{dt}{dh}\right)_j, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial h}\right)_t = \left(\frac{du}{dh}\right)_j - \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_h \left(\frac{dt}{dh}\right)_j, \quad (5)$$

其中下标 t 表示沿等时线, p, u 表示需要求解的物理量, 下标 j, h 表示沿径线和迹线.

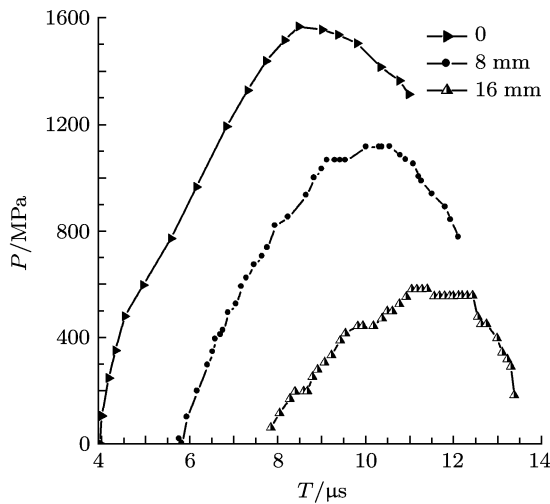


图5 混凝土压力时程曲线

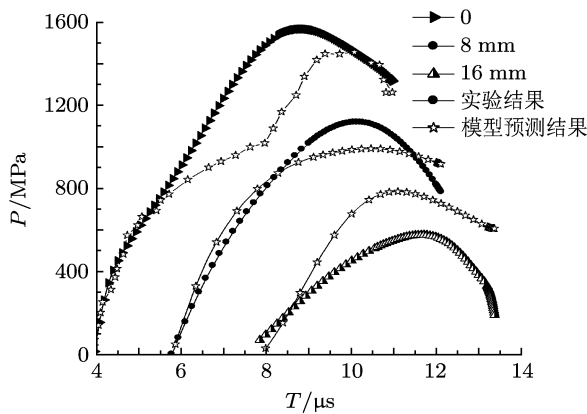


图6 模型预测压力与光滑后的试验压力时程曲线

对实验测得的压力时程曲线 $p(t)$ 曲线积分, 从方程 (1),(2),(3) 计算得到了的质速时程曲线 $u(t)$ 、比容时程曲线 $v(t)$ 和比内能 $e(t)$ 时程曲线, 然后通过比内能 $e(t)$ 时程曲线得到应变率时程曲线 (图 7) 与应变时程曲线, 应变时程曲线与压力时程曲线 $p(t)$ 约去时间变量, 得到混凝土应力与应变

曲线 (图 8), 至此只是利用方程 (4),(5) 将沿迹线的积分转化为沿径线的积分, 并没有做其他的任何假设, 误差的来源主要是来自实验和曲线拟合. 曲线拟合采用三次 B 样条函数作最小二乘拟合, 可以使得局部扰动的影响控制在较少的范围内, 不会扩展到全流场.

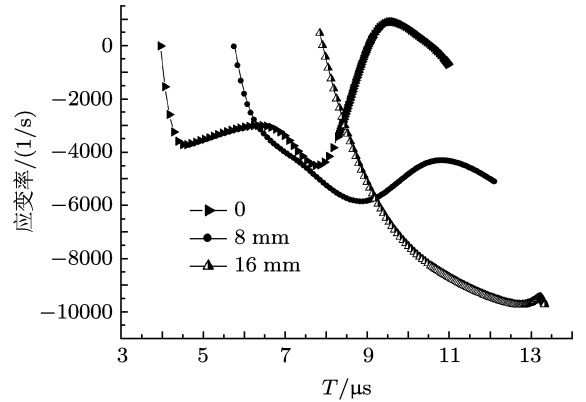


图7 混凝土应变率时程曲线

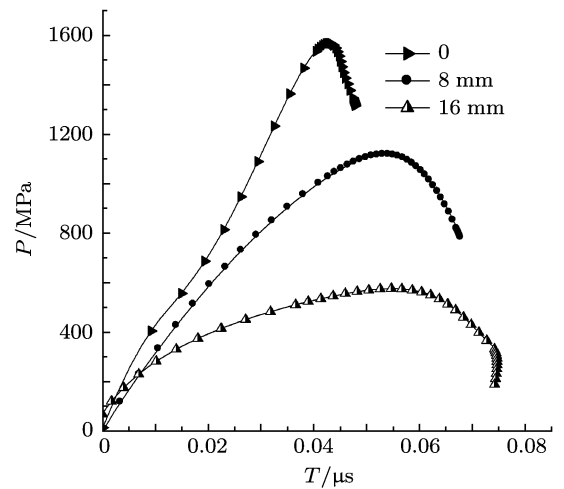


图8 混凝土应力与应变曲线

4 混凝土材料高压状态方程描述

对于损伤材料的压力可以由下式求得 [8]:

$$P = (1 - \varphi)P_s[(1 - \varphi)V, e],$$

其中, φ 为损伤变量, P_s 为无损材料的静水压力, V 为无损材料的体积. 而实际上, 拉格朗日分析得到的体积是有损材料的体积,

无损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, 具体形式如下:

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

其中 A_1, A_2, A_3 为材料常数, 于是

$$P = (1 - \varphi)(A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3),$$

其中, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$. 实际上, 对于一维碰撞, μ 与应变 ε 是相等的 [3], 而损伤变量可以由下面的公式求得 [5]:

$$\varphi = \varphi_0 \varepsilon^a (\varepsilon^*)^b,$$

其中 a, b 为材料常数, $\varepsilon^*(= \varepsilon/\varepsilon_0)$ 为无量纲量. $\varepsilon_0 = 1/s$. 于是拟合试验曲线得到参数, 拟合情况见图 6:

$$A_1 = 46.4 \text{ GPa}; A_2 = -195 \text{ GPa}; A_3 = 416.6 \text{ GPa}.$$

5 分析与讨论

虽然很多专家学者对混凝土材料进行了气体炮实验研究, 由于需要得到较漂亮的信号, 实际测试中被测混凝土通常被设置的很薄, 通常只有 2—5 mm, 混凝土在静态压缩时存在一个压紧的平台阶段, 这个平台对混凝土的性能至关重要, 而在动态压缩中这个现象也存在, 只是由于在以前的实验中, 被测混凝土设计的太薄, 压缩段很快就完成了, 为此, 在实验中, 将单个靶片设计为 8 mm, 同时采用对称碰撞, 使得压缩段较长.

目前研究其高压状态方程的常规方法都是从

冲击绝热线出发该方法利用了统计规律能较好的研究材料的状态方程, 但是该方法试验成本与时间都较高, 采用拉格朗日分析, 然后将损伤引入本构模型中, 能节约试验时间与成本, 为了使得试验处理具有一般意义, 通常将混凝土按配比 C100 制作成为标准试块, 然后通过抽芯的方法制作成混凝土柱, 然后对混凝土柱进行切割, 制作成为混凝土试块, 然后对混凝土试块两端面进行打磨, 使得两端面不平度小于 0.05 mm.

6 结论

1. 一维应变平板撞击试验的实测结果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. 实验研究表明高强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.

2. 利用拉格朗日分析方法得到了不同拉氏位置处各物理量的时程曲线, 得到了各物理量的衰减特征.

3. 从高强度混凝土的压力曲线出发, 经过拉格朗日分析, 将损伤引入体积容变率, 获得了多项式形式 Grüneisen 型状态方程中的各项拟合系数, 架起了试验与数值模拟的桥梁.

[1] Wang Y G, Zhang Y P, Wang L L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7789 (in Chinese) [王永刚, 张远平, 王礼立 2008 物理学报 **57** 7789]
 [2] Yan S H, Qian Q H, Zhou Z S 2000 *Journal of PLA University of Science and Technology* **1** 49 (in Chinese) [严少华, 钱七虎, 周早生, 陆渝生, 尹放林 2000 解放军理工大学学报 **1** 49]
 [3] Xiao Bin L, Hsu C T 2006 *Cement and Concrete Research* **36** 1679
 [4] Yuchun Li, Danyong Shi 2006 ANSYS 10.0/LS-DYNA *theoretical manual and project account* (Beijing: China Water Resources Press) p428 (in Chinese) [李裕春, 时党勇 2006 ANSYS 10.0/LS-DYNA 基础理论与工程应用 (北京: 中国水利出版社) 第 428 页]

[5] Liu H F, Ning J G 2009 *Mechanics of materials* **41** 1298
 [6] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H 1993 *Proc. 14th Int. Symp. Ballistics* (Netherlands: American Defense Preparedness Association) p591
 [7] Hu J B, Yu Y Y, Dai C D, Tan H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 575 (in Chinese) [胡建波, 俞宇颖, 戴诚达, 谭华 2005 物理学报 **54** 5750]
 [8] Hui S R, Tu H J 1995 *Computational Method of explosion mechanics* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p88 (in Chinese) [琿寿榕, 涂侯杰 1995 爆炸力学计算方法 (北京: 北京理工大学出版社) 第 88 页]

High-pressure state equation of high strength concrete investigated with the gas gun experiment*

Jiang Guo-Ping¹⁾ Jiao Chu-Jie¹⁾ Xiao Bo-Qi²⁾

1) (*Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University Guangzhou 510405, China*)

2) (*Department of Physics and Electromechanical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China*)

(Received 4 November 2010; revised manuscript received 5 May 2011)

Abstract

The shock properties of C100 concrete are investigated by the gas gun planar impact technique. The manganin pressure gauge is used to measure the pressure-time curves of the samples. The physical quantities are all obtained by the Lagrange method. 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. The damage factor is introduced into the state equation. The material parameters in the Grüneisen-type equation of state are determined.

Keywords: state equation, impact, high strength concrete

PACS: 67.80.Cx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51078094, 50708022).

† E-mail: lp2002999@yahoo.com.cn