

混凝土材料的平板撞击实验与数值模拟研究

张忠孝, 董海威, 陈江瑛*, 朱 珏

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过实验和数值模拟研究了混凝土材料在强冲击载荷(平板撞击)下的动态特性. 采用内径 57 mm 的一级轻气炮实验结合高阻锰铜压阻计的动态测试技术, 得到了 C40 混凝土试样的原始电压-时间波形曲线, 并换算得到相应的应力-时间波形; 分析应力波传播速度, 得到材料的最大应变率约为 $5.40 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 压力峰值区间为 0.340~2.702 GPa. 实测结果表明: 不同位置处的压力在快速上升至峰值后均随时间衰减, 且冲击波峰值随传播距离快速衰减, 呈现出明显的粘弹性特征和耗散特性. 并利用 LS-DYNA 程序对混凝土试样的平板撞击实验过程进行了数值模拟, 模拟的应力-时间曲线与实测压力波形走势完全一致, 峰值很接近, 整体吻合较好.

关键词: 混凝土; 轻气炮; 平板撞击实验; 数值模拟; 粘弹性特征

中图分类号: O347.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 03-0080-06

混凝土是目前军事与民用建筑中最常用的结构工程材料, 对强冲击载荷下混凝土材料动态特性的了解一直是许多研究者关注的热点^[1-3]. 轻气炮和分离式霍普金森压杆(SHPB)是目前最常用的研究材料动态特性的设备. 很多学者采用 SHPB 技术开展混凝土材料的动态性能实验, 得到了一大批研究成果, 研究表明混凝土材料是一种应变率敏感的材料^[4-7]. 不少学者利用轻气炮技术开展的混凝土材料动态力学行为实验研究, 其研究内容涉及混凝土材料的状态方程、冲击绝热关系等相关特性^[8-9], 其中, 冲击压力值的测量一般采用锰铜压阻计^[10-11], 根据实验压力范围不同, 一般在 3.0 GPa 以下可用高阻锰铜压计, 而在 2.0 GPa 以上用低阻锰铜压计. 文中实验的压力不高, 因此采用双螺旋型的高阻锰铜压阻计可以简单方便地测量出样品中的压力.

随着数值模拟技术的迅速发展和广泛应用, 一方面, 理论模拟技术的发展为实验测试提供了有效的指导, 可以更加经济、有效甚至连续地获取需要的相关量值. 另一方面, 要求通过实验给出更加反映真实条件下的材料本构模型, 这需要实验

提供更多的材料特性参数. 目前, 关于强冲击载荷下材料的高压高应变率本构模型的建立, 主要考虑了描述材料形状变化的偏量和其容积变化的球量部分. 其中 Holmquist, Johnson 和 Cook^[12]于 1993 年针对混凝土动态大变形计算提出考虑了应变率效应的 Holmquist-Johnson-Cook 高压高应变率本构模型(HJC 模型)应用最为广泛. 另一种应用于混凝土材料的 RHT 模型考虑了材料的应变硬化和第三应力不变量的相关性, 独立的断裂强度曲面的引入提供了更合适的材料软化反应模型^[13-14], 此模型在 AUTODYN 软件中可以直接应用于模拟. 而笔者利用 HJC 模型对实验结果进行了数值模拟和分析.

1 试样与实验装置

1.1 试样制作与试样参数

混凝土试样采用 325 号水泥、中砂, 碎石和水按 1:1.08:2.2:0.42 比例经混合搅拌、注模、振动、凝固而成, 脱模后, 养护 28 d 后打磨成尺寸约 $\Phi 52 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 的混凝土试样, 端面平行度为 0.05 mm, 混凝土的密度实测约为 $\rho = 2.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 利用 ZBL-

收稿日期: 2010-09-09.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(10972109, 10932001, 10802039); 宁波市自然科学基金(2009A610144); 宁波大学王宽诚幸福基金.

第一作者: 张忠孝(1986-), 男, 黑龙江宁安人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 材料冲击动力学. E-mail: zhangzhongxiao520@163.com

*通讯作者: 陈江瑛(1964-), 女, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: 材料冲击动力学. E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

U520 非金属超声波检测仪测量混凝土试样得到一维弹性波速值, 表1为编号为P5~F2的1组试样的相关参数, 表中从上到下每3个试样为1组, 组成实验编号为001、002、003、004的4组试样. 每组试样中单个试样的厚度相近.

表1 $\Phi 52\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 混凝土试样参数

编号	质量/ g	厚度/ mm	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	体积/ cm^3	一维弹性 波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
P5	42.92	8.84	2.29	18.73	4 420
P6	43.00	8.88	2.29	18.84	4 422
P7	43.50	8.89	2.31	18.82	4 421
C1	42.82	8.82	2.29	18.72	4 421
C2	43.21	8.82	2.31	18.72	4 421
C3	44.13	8.82	2.36	18.72	4 424
C4	43.40	8.83	2.32	18.74	4 422
C5	43.71	8.82	2.33	18.72	4 421
C6	42.74	8.81	2.28	18.70	4 420
F1	40.60	8.34	2.29	17.70	4 149
F3	40.70	8.44	2.27	17.92	4 152
F2	41.25	8.41	2.31	17.85	4 150

1.2 实验设备与测试方法

实验在一级轻气炮上完成. 气炮口径 $\Phi 57\text{ mm}$, 炮管长为 4 m , 弹速范围: $40\sim 350\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 碰撞平面度 10^{-3} rad , 真空度 0.1 Pa , 试验布置简图如图1所示. 使用的仪器设备主要有 TDS754D 型数字示波器、DL-32 型时间间隔测量仪、多路程控网络讯

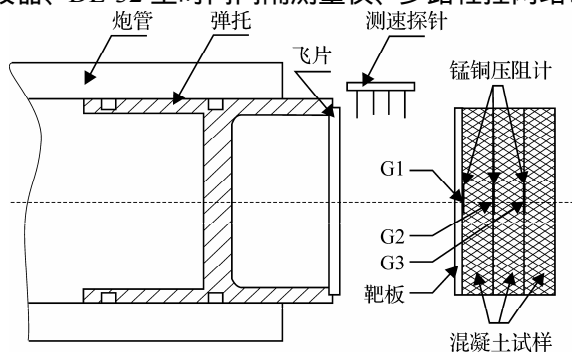


图1 混凝土平板撞击实验布置简图

号源及 MPS2000 锰铜压阻应力仪等.

实验时, 高压气体突然释放推动粘贴飞片的弹托沿抽真空炮管高速运行碰撞靶体, 产生1个较高的压力脉冲, 并在靶体中产生一维应变波. 为测量应力波传播特性, 沿靶体的厚度方向依次埋入3片锰铜压阻计(图1所示 G1、G2、G3处), 所采集的数据由示波器记录. 飞片速度由速度探针及时间间隔仪测定. 锰铜压阻计采用阻值为 $50\ \Omega$ 双螺旋型锰铜压阻计, 采用 MPS2000 锰铜压阻应力仪对锰铜计输出的电压变化信号进行转换并放大 20 倍. 实验参数见表 2.

实验过程中, 锰铜压阻计可测量到 G1、G2、G3 处的电压-时间波形, 由 MPS2000 锰铜压阻应力仪和高阻锰铜压阻计标定值转换成应力-时间信号. 其中 MPS2000 锰铜压阻应力仪的工作原理如图2所示. 对于幅度较低动态压力测量, 压阻计的 $\Delta R/R_g$ 值很小, 需采用低压力量程的压阻法测试系统来测量, 测量电路由6个固定电阻 $R_1 \sim R_6$ 、1个平衡电阻 R_e 、1个 $50\ \Omega$ 的锰铜压阻计 R_g 、直流电源 E 组成. 正常实验条件下直流电源的输出电压 E 约为 5 V . 实验时, 锰铜压阻计 R_g 处于通电状态, 在冲击波作用下, 压阻计电阻的变化将会引起电桥电压输出的变化. 设电桥电压输出变化为 ΔU , K 为应力仪系统灵敏度, 则有:

$$\Delta R/R_g = \Delta U/K. \tag{1}$$

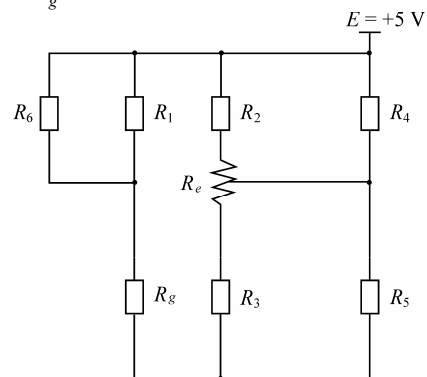


图2 电桥测量电路

表2 实验参数

编号	气压/MPa	弹速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	飞片材料(厚度/mm)	垫片材料(厚度/mm)	R_1/Ω	R_2/Ω	R_3/Ω
001	3.50	264.90	铝 (3.22)	混凝土 (8.84)	50.1	50.2	-
002	3.50	245.60	铝 (3.14)	铝 (1.92)	50.3	50.1	50.1
003	4.00	277.50	铝 (3.19)	铝 (1.88)	50.2	50.2	50.2
004	4.00	298.50	铝 (3.16)	铝 (1.86)	49.9	49.9	49.9

这样通过桥路输出电压的变化值 ΔU 求得压阻计的阻值变化 ΔR , 再将 ΔR 代入锰铜压阻计标定值公式:

$$P = (0.0014 \pm 0.0055) + (51.4697 \pm 0.2773) \cdot (\Delta R / R_g), \quad (2)$$

即可得到实验冲击波波后压力 P .

2 实验结果

经计算, 将锰铜压阻计测得的典型 003 号实验电压-时间信号如图 3 所示, 转化为应力-时间信号如图 4 所示.

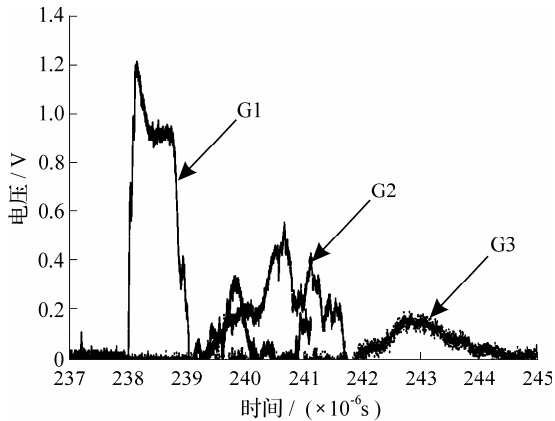


图 3 003 号试样电压-时间曲线

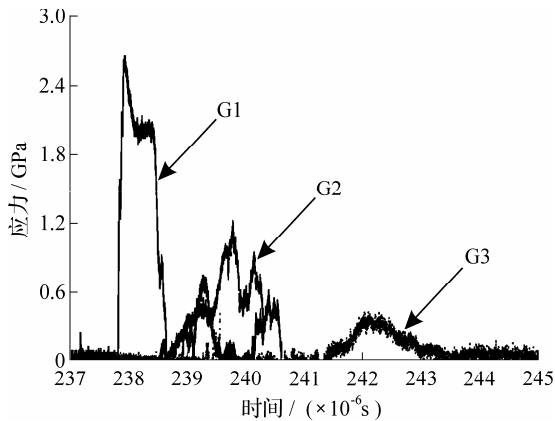


图 4 003 号试样应力-时间曲线

由 G1、G2 和 G3 处的波形曲线得到试样中应力波传播的时间为 Δt , 若样品厚度为 h , 算式为:

$$D = h / \Delta t, \quad (3)$$

由(3)式可得冲击波波速 D . 从图 4 可见, G1 处应力波传播到 G2 处, 应力波峰值衰减, 而且波形展宽, 不同应力波传播速度不一样. G1 处峰值应力的传播时间约为 $2.301 \mu\text{s}$, 对应波速 D_1 为 $3841.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 同样, G2 处应力波传播到 G3 处, 峰值应力的传播时间约为 $2.904 \mu\text{s}$, 对应波速 D_3 为 $3044.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 同理可得其余试样中的冲击波波速, 实验结果及相关数据见表 3.

由冲击波波阵面关系^[15]:

$$[\sigma] = -\rho_0 D[u], \quad (4)$$

$$[u] = -D[\varepsilon]. \quad (5)$$

经计算可以得到 G1 和 G2 处的质点速度 u_1, u_2 和应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

对 003 号实验进行应变率估计, 由图 4 可知, 加载升压时间约为 $0.144 \times 10^{-6} \text{ s}$, 由表 3 可知, 根据实测数据估算的最大应变约为 0.0778, 故应变率近似为 $5.40 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$.

图 4 的实验曲线显示, 不同传播距离处的压力在迅速上升至波峰后均随时间衰减; 同时, 冲击波的峰值随传播距离而衰减, 传播速度也在下降, 而且测点越往后, 达到峰值的历时越长, 应变率越小, 呈现出明显的粘弹性特性和冲击波由强间断波向弱间断波的逐渐转化的特征. 混凝土材料的这种率相关的粘弹性特性及其损伤演化在 SHPB 动态实验中也得到了证实^[4].

与王永刚等^[9]对 C30 混凝土撞击实验的观测结果相似, 从图 4 还可以看出, 不同实测位置处应力波形在迅速上升到峰值后均未出现率无关材料在恒速撞击下的“压力平台”, 而是随时间逐渐衰减. 这表明当飞片撞击速度不高, 样品处于较低压力时, 不能采用高压时使用的完全的流体动力学模型, 即材料的剪切黏性不可忽略, 必须计及材料的抗剪强度. 由此可以更好地理解本构耗散引起的冲击波衰减现象. 但是对于第一片压阻计测到

表 3 实验结果

编号	弹速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	D_1 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	D_2 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ_1 /GPa	ε_1	u_1 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ_2 /GPa	E_2	U_2 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	σ_3 /GPa
001	264.50	2980.00	-	0.787	0.0388	115.53	0.344	-	-	-
002	245.60	3341.14	2880.33	1.996	0.0772	257.96	0.779	0.0402	115.89	0.340
003	277.50	3841.81	3044.08	2.662	0.0778	299.09	1.223	0.0568	173.25	0.442
004	298.50	3993.31	3231.10	2.702	0.0737	294.21	1.303	0.0543	175.34	0.817

的压力衰减是否还包含了冲击波传播中的追赶卸载引起的影响, 这有待于通过不同厚度靶板的进一步实验来区分。

3 数值模拟

由于受实验成本和布片测量位置等实验条件的限制, 实验能提供的信息相对有限, 为此常采用数值模拟的方法对混凝土平板撞击实验做进一步的分析。利用 LS-DYNA 程序模拟一级轻气炮实验条件下混凝土材料强冲击实验, 由于 Holmquist-Johnson-Concrete 模型能较好地描述脆性材料在压缩加载下的挤压破碎行为, 并同时考虑到压缩强度的压力相关性、应变率效应和损伤累积等多方面因素^[16-17], 因此, 混凝土材料的数值模拟多采用此模型。笔者也同样采用此模型。为与实验相比较, 模拟中飞片的速度取典型实验 003 号 $277.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冲击速度。

3.1 计算模型

为减少计算周期, 计算采用 1/4 模型, 并施加对称边界约束, 且模型中所有的实体均采用三维 8 节点实体单元(3D-SOLID164), 利用拉格朗日计算方法, 为了准确模拟混凝土靶板的破坏, 在弹体和混凝土之间, 通过定义侵蚀接触(ERODING)来考

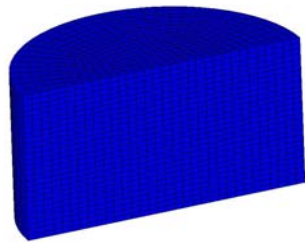


图5 混凝土材料的计算模型

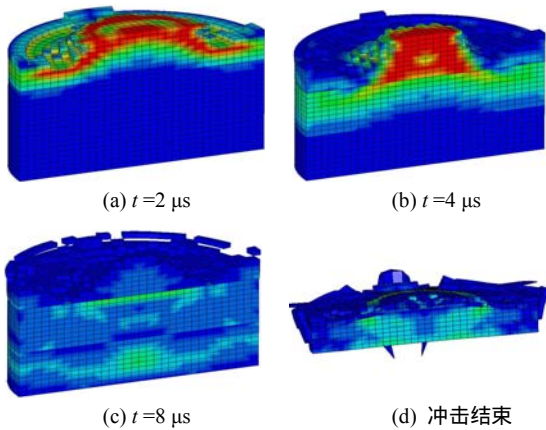


图6 强冲击载荷下破坏的混凝土靶板

虑单元的失效。图5和图6分别显示了强冲击载荷下混凝土材料的计算模型及冲击过程。

计算中弹体材料选用各向同性弹塑性材料模型, 弹体材料参数见表4。

表4 弹体材料参数

材料	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比 λ
铝	2.70	69.00	0.36

采用的 HJC 模型可描述如下: 静水压力 P 为体应变 μ 的函数, 包括了材料压实效应, 其中 $P-\mu$ 关系为 3 个响应区域: 线弹性区、过渡区和密实区。在压缩范围内分 3 段来描述:

$$P = \begin{cases} K_{\text{elastic}}\mu, P \leq P_{\text{crush}}, \\ P_{\text{crush}} + \frac{P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}}}{\mu_{\text{lock}} - \mu_{\text{crush}}}(\mu - \mu_{\text{crush}}), \\ P_{\text{crush}} \leq P \leq P_{\text{lock}}, \\ K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3, P_{\text{lock}} \leq P, \end{cases} \quad (6)$$

其中, K_{elastic} 为弹性体积模量; $P_{\text{crush}}, \mu_{\text{crush}}$ 分别为混凝土材料空隙开始闭合时的临界压力与体应变; $P_{\text{lock}}, \mu_{\text{lock}}$ 为混凝土材料空隙全部闭合时的临界压力与体应变; K_1, K_2, K_3 为常数; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$, 其中, ρ_0 为初始密度; $\bar{\mu} = \rho / \rho_{\text{grain}} - 1 = (\mu - \mu_{\text{lock}}) / (1 + \mu_{\text{lock}})$, 其中, ρ_{grain} 为晶体密度。

归一化的等效应力定义为:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{f_c} = \frac{\sqrt{3J_2}}{f_c}, \quad (7)$$

其中, σ 为实际的等效应力; f_c 为准静态单轴压缩强度; J_2 为偏应力第二不变量。

材料表面未发生破坏时, (7)式可表示为:

$$\sigma^* = [A + BP^{*N}][1 - C \ln(\dot{\epsilon}^*)]. \quad (8)$$

发生破坏后, 引入损伤因子描述材料的破坏行为, (7)式可表示为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}][1 - C \ln(\dot{\epsilon}^*)], \quad (9)$$

其中, A, B, N, C 分别示内聚强度系数、压力硬化系数、压力硬化指数、应变率系数; $P^* = P / f_c$ 为归一化的压力; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 无量纲化的应变率。此模型中的损伤积累来自等效塑性应变和塑性体积应变, 且将 D 定义为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1(P^* + T^*)^{D_2}}, \quad (10)$$

其中, $\Delta \epsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别表示等效塑性应变和塑性体积应变, 塑性体积应变是为了描述混凝土材料

经过体积压缩失去原有稳定的粘合强度的反应。 D_1 和 D_2 为材料相关的系数, $T^* = T / f_c$ 为归一化的最大拉伸准静态压力。

本数值模拟的混凝土材料强冲击实验所使用的相关参数见表 5。

表 5 混凝土材料参数^[16-17]

参数名称	数值
密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.30
弹性模量 E / GPa	44.56
剪切模量 G / GPa	14.86
内聚强度系数 A	0.79
应变率系数 C	0.007
单轴压缩强度 f_c / GPa	0.053 4
断裂前应变	0.001
损伤系数 D_1	0.04
压力硬化系数 B	1.60
压力硬化指数 N	0.61
压力系数 K_2 / GPa	-171.00
压力系数 K_3 / GPa	208.00
损伤系数 D_2	1.0
压力系数 K_1 / GPa	85.00
泊松比 ν	0.20
孔隙开始闭合临界压力 $P_{\text{crush}} / \text{GPa}$	0.016
孔隙开始闭合体应变 μ_{crush}	0.001
孔隙完全闭合临界压力 $P_{\text{lock}} / \text{GPa}$	0.80
孔隙完全闭合体应变 μ_{crush}	0.10
准静态最大拉伸强度 T / GPa	0.004

3.2 计算结果

运行 LS-DYNA 程序, 经过程序计算及后处理, 得到模拟环境下混凝土材料受到强冲击载荷作用

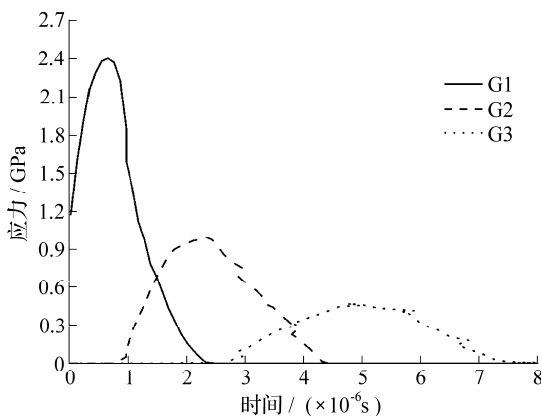


图 7 强冲击载荷作用下混凝土材料的应力-时间曲线

下的应力-时间曲线如图 7 所示。

图 7 给出了 003 号实验各测点的数值计算结果。比较图 4 和图 7 可以发现, 对于各测点的平均峰值都非常接近, 分别在 2.4, 0.9, 0.3 GPa 附近, 时间历程差异稍大一点, 但数值计算与实验结果曲线的走势完全相同。而模拟结果的应力波传播时间比较长, 主要原因可能是因为 HJC 高压高应变率本构模型在应用到混凝土材料的同时忽略了材料的硬化效应和温度效应, 只保留了应变率效应部分。

4 结论

(1) 采用一级轻气炮加载混凝土试样, 进行了一维应变动态力学行为的实验研究, 用高阻锰铜计测量较低压力下的试样压力值, 得到了实测的应力-时间曲线。

(2) 混凝土材料一维应变平板撞击实验的实测结果显示了不同位置处的压力在迅速上升至波峰后均随时间快速衰减, 同时, 冲击波峰值又随传播距离而逐渐衰减, 传播速度也逐渐减小, 而且测点越往后, 达到峰值的历时越长, 应变率越小, 呈现出明显的粘弹性特性和冲击波由强间断波向弱间断波的逐渐转化的特征。混凝土材料的这种率相关的粘弹性特性与 SHPB 上的研究结果相一致。

(3) 可以用 LS-DYNA 程序的 HJC 模型进行实验过程的模拟, 数值模拟曲线与实测的应力-时间曲线的走势完全相同, 峰值非常接近。

参考文献:

- [1] 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料冲击特性的研究[J]. 力学学报, 2006, 38(2):199-208.
- [2] 刘海峰, 宁建国. 强冲击荷载作用下混凝土材料动态本构模型[J]. 固体力学学报, 2008, 29(3):231-238.
- [3] 严少华, 钱七虎, 周早生, 等. 高强混凝土及钢纤维高强混凝土高压状态方程的实验研究[J]. 解放军理工大学学报, 2002, 6(1):49-53.
- [4] 施绍裘, 陈江瑛, 李大红, 等. 水泥砂浆石在准一维应变下的动态力学性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4):326-332.
- [5] 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3):242-246.
- [6] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and Pressures experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engi-

- neering, 2001, 25:869-886.
- [7] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of strain rate on concrete strength[J]. ACI Mater J, 1995, 92(1):37-47.
- [8] Gebbeken N, Greulich S, Pietzsch A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32:2017-2031.
- [9] 王永刚, 张远平, 王礼立. C30 混凝土冲击绝热关系和 Grüneisen 型状态方程的实验研究[J]. 物理学报, 2008, 57(12):7783-7793.
- [10] 段卓平, 关智勇. 冲击载荷下锰铜计的动态屈服强度[J]. 兵工学报, 2003, 24(3):408-411.
- [11] 施尚春, 董石, 黄跃, 等. 镀膜锰铜压阻计结晶问题研究[J]. 高压物理学报, 2001, 15(4):254-258.
- [12] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Proceedings of Fourteenth International Symposium on Ballistics, 1993, 14:591-600.
- [13] Tu Zhenguo, Lu Yong. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for highdynamic response simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36:132-146.
- [14] Tu Zhenguo, Lu Yong. Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(10):1072-1082.
- [15] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992:57-61.
- [16] 孔庆云, 张奇, 白春华, 等. 混凝土板爆破作用数值分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(3):16-21.
- [17] 顾小成, 黄东阳, 殷尧江, 等. 混凝土材料冲击性能的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 14(8):4016-4018.

Study on Planar Impact and Numerical Simulation for Concrete Materials

ZHANG Zhong-xiao, DONG Hai-wei, CHEN Jiang-ying*, ZHU Jue

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The dynamic characteristics of concrete materials under shock loading (planar impact) are studied with experiments and numerical simulation. By taking advantage of the inner diameter 57 mm of light gas gun, the planar impact experiments of C40 concrete samples are conducted. The samples' voltage-time waveforms are recorded by means of high impedance manganin piezoresistive meter. And then the corresponding stress - time waveforms are derived. By analyzing the propagation velocity of stress wave, the maximum strain rate of the material is resulted with about $5.40 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, and the pressure peak is at about 0.340-2.702 GPa. The stress waveforms of different position found in the experiment indicate that the stress wave is on rapid rise to the peak then decays with time and the propagation distance. The results clearly show the rate dependent features of concrete on the viscoelastic characteristics and dissipation. LS-DYNA program is used to simulate the process of impact experiment and stress-time curves of concrete. Experiment stress waveforms are in good agreement with simulated ones.

Key words: concrete; light gas gun; planar impact experiment; numerical simulation; viscoelastic characteristics

(责任编辑 章践立)