

文章编号: 1001-1455(2003)05-0442-06

# 爆轰波对碰区产物驱动金属圆管的研究\*

陈 军, 孙承纬, 蒲正美, 张光升, 高 宁

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用闪光 X 光照相、光学高速分幅照相实验, 测得了金属圆管在两个爆轰波对碰后产物驱动外壳的膨胀、变形过程, 该过程表明爆轰波对碰作用使得对碰处金属圆管相对贯穿断裂时间明显提前, 对碰处金属圆管径向膨胀速度较非对碰处明显增加。利用拉格朗日二维流体动力学程序 TTD2C, 数值模拟了对碰驱动过程, 计算结果与实验结果符合很好, 且用 Taylor 断裂判据得到的金属圆管相对贯穿断裂时间也明显提前。

关键词: 爆炸力学; 动态断裂; 爆轰波相互作用; 爆轰驱动圆管; 爆轰

中图分类号: O381 国标学科代码: 130.3520 文献标志码: A

## 1 引 言

平面、柱和球对称爆轰波后产物膨胀驱使平面飞片、柱或球壳运动是炸药实际应用的重要方面, 是多种炮弹、炸弹和导弹战斗部设计的基础。爆轰产物驱动平板和金属圆管的运动, 在军事工程和材料动态研究中具有重要的实际应用价值。早在 1943 年, R. W. Gurney<sup>[1]</sup>就给出了金属薄壁管破片初始速度的估算方法。许多学者针对金属圆管在内部爆炸作用下的膨胀破坏问题进行了研究<sup>[2~5]</sup>。但大多数的研究工作集中于一点起爆下金属圆管的运动过程。由于爆轰波的对碰, 使得两点起爆爆轰波对碰处金属圆管较一点起爆情况, 运动规律明显不同, 如运动超前、断裂时间提前等。目前国内外均未见对此类问题研究的报道。

本文中, 利用闪光 X 光照相实验、光学高速分幅照相实验, 研究金属圆管在爆轰波对碰驱动作用下的膨胀、变形过程。利用拉格朗日二维流体动力学程序模拟爆轰波对碰驱动过程, 结合 Taylor 断裂判据<sup>[6]</sup>, 介绍了爆轰波对碰后产物驱动金属圆管的膨胀和破坏行为, 以加深对爆轰波对碰驱动的认识。

## 2 实验装置与实验技术

### 2.1 实验装置

实验装置 1 用于 X 光测试, 实验装置 2 用于高速分幅照相。分别用 24-1-C 雷管起爆特屈儿传爆药柱, 爆轰波经平面波透镜整形后, 在 45 钢圆管中部对碰, 驱动金属圆管运动。实验装置 2 加爆轰产物挡板是为防止爆轰产

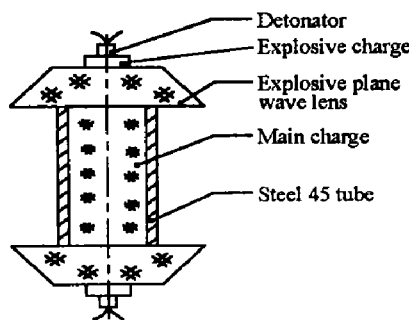


图 1 实验装置 1

Fig.1 Experimental setup 1

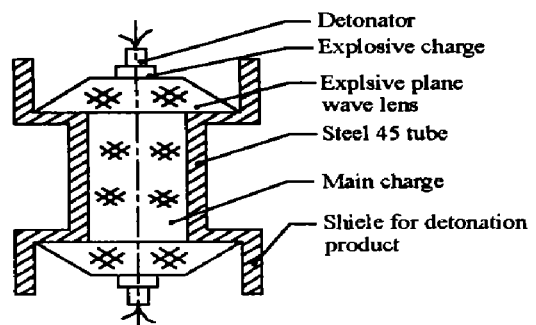


图 2 实验装置 2

Fig.2 Experimental setup 2

\* 收稿日期: 2001-08-31; 修回日期: 2003-05-06

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室基金项目(00JS75.1.2.ZS7503)

作者简介: 陈军(1973—), 男, 博士研究生。

物外逸影响照相结果。具体的实验装置设计参数见表 1。

表 1 实验装置概况

Table 1 Experimental assemblies

实验号	主装药	金属圆管厚度/mm	实验装置	实验测量
1	JOB-9003, $\phi 25.4\text{mm} \times 75\text{ mm}$	3	1	闪光 X 射线
2	JOB-9003, $\phi 25.4\text{mm} \times 75\text{ mm}$	3	1	闪光 X 射线
3	JB-9014, $\phi 50\text{mm} \times 153\text{ mm}$	5	1	闪光 X 射线
4	JB-9014, $\phi 50\text{mm} \times 153\text{ mm}$	5	1	闪光 X 射线
5	JOB-9003, $\phi 25.4\text{mm} \times 75\text{ mm}$	3	2	高速摄影
6	JOB-9003, $\phi 25.4\text{mm} \times 75\text{ mm}$	4	2	高速摄影

### 2.2 闪光 X 射线照相布局

本研究中采用 X-II 型闪光 X 射线机, 贮能 6 kJ, 脉冲半高宽 50 ns, 1 m 处剂量 2 C/kg, 透射钢板 50 mm, 焦斑 6 mm。

实验时使用三台闪光机, 从不同角度在不同时刻对被测爆炸样品进行拍照。利用延迟同步机, 启动 X 光照相系统记录不同时刻圆管的变形过程, 可以得到三个不同时刻的照片(图 3)。

### 2.3 高速分幅摄影布局

采用 FJZ-250 型高速分幅相机, 幅频取 125 f/s。脉冲氙灯的成本较低, 电源技术简单, 光谱范围合适, 比炸药和氙气弹光源有更高的亮度。本测试系统利用闪光灯电源控制氙灯发光能量和脉宽(闪光持续时间为 350  $\mu\text{s}$ ), 利用方盒式反射箱, 使这些氙灯既作为阴影照相的背景光源, 也作为正面照相的投射光源(图 4)。为了更清晰地分辨爆轰过程中圆管外轮廓的变化规律, 采用 24 锭高感彩色摄影底片。

### 2.4 实验装置

实验测试方法以及实验装置的有关参数列于表 1。

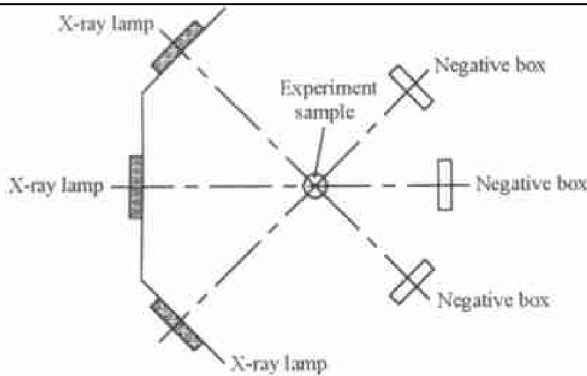


图 3 X 射线实验布局图

Fig.3 X-ray experiment diagram

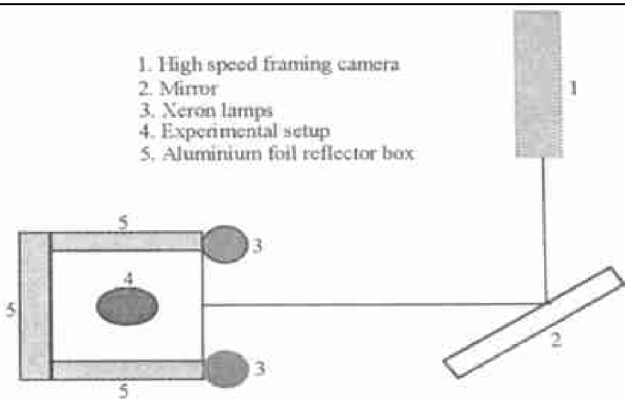


图 4 高速摄影测试布局图

Fig.4 High-speed photography diagram

## 3 数值模拟

使用二维流体力学有限差分拉格朗日编码 TTD2C 对实验模型中金属圆管的运动过程进行模拟。

### 3.1 流体力学方程组

$$\text{动量守恒方程} \quad \begin{cases} \rho A_x = \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial z} + (\alpha - 1) \frac{t_{xx} - t_{yy}}{x} \\ \rho A_z = \frac{\partial t_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} + (\alpha - 1) \frac{t_{xz}}{x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{能量守恒方程} \quad \rho \frac{\partial e}{\partial t} = P_s + P_d + Q_s + Q_d + Q \quad (2)$$

在  $x, y, z$  坐标系中,  $y$  坐标轴为旋转轴;  $\alpha=1, 2$  分别对应平面、柱面几何;  $\rho$  为密度;  $A$  为加速度;

$t_{xx}$ 、 $t_{xz}$ 、 $t_{yy}$  及  $t_{zz}$  为有效应力(即应力+人为粘性)。  $e$  为比内能,  $P_s$ 、 $P_d$  分别表示压力对体积变化的功率及应力偏量对形变的功率;  $Q_s$ 、 $Q_d$  分别代表体粘性功率及粘性偏量功率,  $Q$  是由外源做功的比功率, 方程(2)中未计及热传导的影响。

$$\text{人为粘性} \quad q = \begin{cases} \rho b_1^2 \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2 + b_2 c \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} > 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $c$  为声速,  $b_1$ 、 $b_2$  是具有长度量纲的常数。

### 3.2 本构关系

45 号钢的本构关系采用流体弹塑性模型描述。与弹性应变相关的应力服从 Hooke 定律。屈服条件使用 Von Mises 屈服条件。对于炸药, 其产物状态由 JWL 状态方程描述。炸药的爆轰由一简单的开关函数  $F$  控制。某一位置处炸药的起爆时刻  $\tau$  由此处与引爆点的距离与炸药爆速  $D$  确定。当  $t < \tau$  时,  $F = 0$ ; 当  $t \geq \tau$  时,  $F = 1$ 。考虑到模型的对称性, 在这里为节省计算机时, 只取结构的四分之一来计算。圆管外壁及起爆面均取自由边界条件。

### 3.3 物质参数

计算网格按实验模型中不同的物质区域自动生成, 计算时炸药金属界面设置滑移线。计算的材料参数和状态方程参数见表 2、表 3。表 2 中,  $c_0$ 、 $S$ 、 $\nu$ 、 $\Gamma$ 、 $Y$  分别为声速、冲击雨贡纽参数、泊松比、格林乃森参数、屈服强度; 表 3 中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $w$  分别为标准 JWL 状态方程参数。

表 2 金属圆管材料参数

Table 2 Data for metallic tube material

材料	$\rho_0 / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$c_0 / (\text{km}/\text{s})$	$S$	$\nu$	$\Gamma$	$Y / \text{GPa}$
45 钢	7.92	4.580	1.510	0.290	2.02	0.75

表 3 JWL 产物状态方程系数

Table 3 Parameters of JWL EOS

炸药	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$C / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$w$
JOB9003	1.85	842.04	21.81	0.75	4.6	1.35	0.28
JB9014	1.88	545.63	8.52	1.25	4.2	1.62	0.47

## 4 结果及讨论

图 5 为 1、2 号实验闪光 X 射线实验图像处理结果,  $t = 0$  为雷管起爆时刻。(a)、(b) 分别为  $t =$

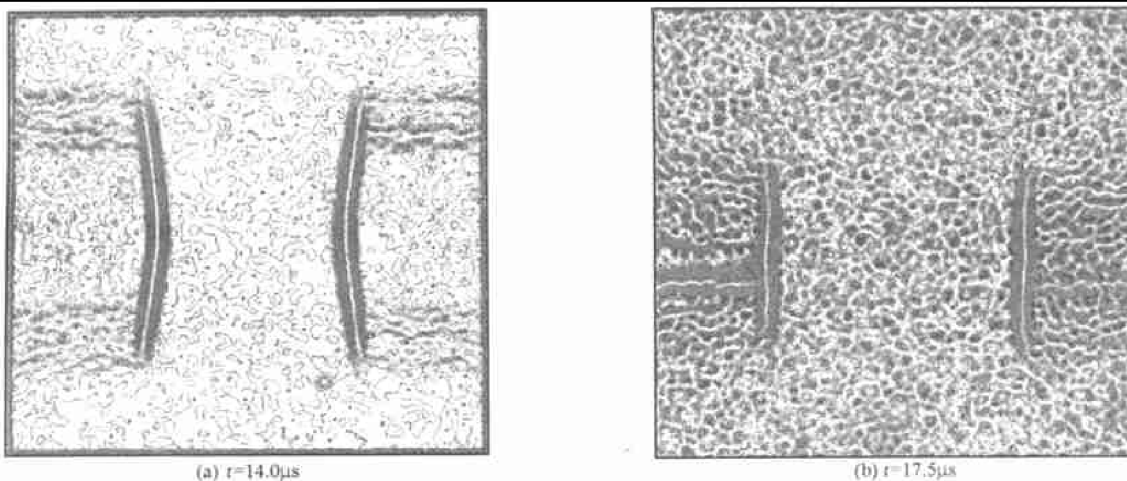


图 5 1、2 号实验的闪光 X 射线照片图像处理结果

Fig. 5 Photograms of X-ray for Shot 1, 2

14.0、17.5  $\mu\text{s}$  时刻的金属圆管外壁膨胀变形过程,  $t=17.5 \mu\text{s}$  时, 爆轰波已发生对碰, 对碰部位已出现明显的超前运动。

实验号 3、4 的结果类似。

在对碰前, 金属圆管即是单端引爆情况下的运动规律, 而对碰后中间部位出现鼓包, 较非对碰区有超前运动趋势。鼓包一直保持, 直到金属圆管发生贯穿断裂。图 6 为 5 号实验的高速分幅照相得到的对碰前后的典型变形图形。

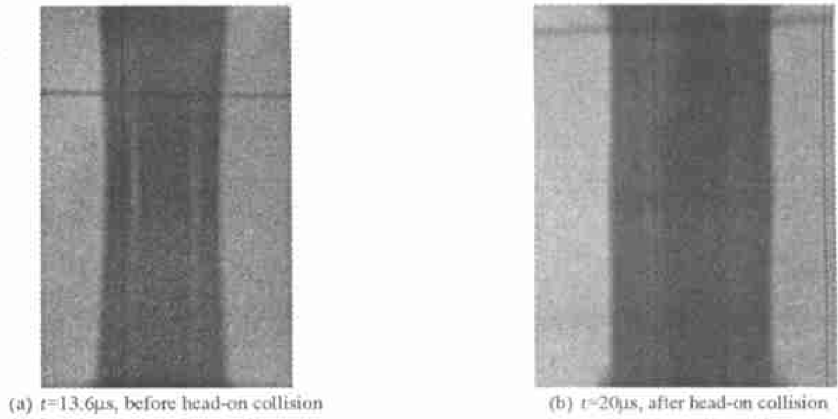


图 6 5 号实验的分幅照相结果  
Fig.6 High speed framing picture of shot 5

由图 7(a)拟合曲线得 5 号实验的距离起爆端 2.17 cm 处 (非对碰部位) 金属圆管平均膨胀速度为  $0.14 \pm 0.01 \text{ cm}/\mu\text{s}$ , 由图 7 (b)拟合曲线得 6 号实验距起爆端 2.2 cm (非对碰部位) 金属圆管平均膨胀速度为  $0.13 \pm 0.01 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 。因为 6 号实验的金属圆管比 5 号实验的厚 1 mm, 所以平均膨胀速度小一些。

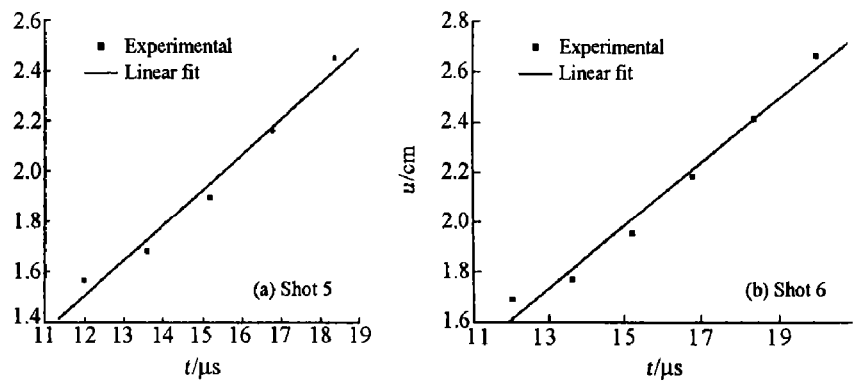


图 7 5、6 号实验非对碰处位移历史

Fig.7 Displacement history at non-head-on collision point of shot 5, 6

由图 8(a)拟合曲线得 5 号实验对碰处金属圆管平均膨胀速度为  $0.22 \pm 0.01 \text{ cm}/\mu\text{s}$  (与 2.17cm 处相比, 大 1.59 倍), 由图 8(b)拟合曲线得 6 号实验对碰处金属圆管平均膨胀速度为  $0.19 \pm 0.01 \text{ cm}/\mu\text{s}$  (与 2.2 cm 处相比, 大 1.51 倍)。爆轰波对碰前 (四分之一药柱高度处, 全长分别为 7.5、15.3 cm), 当产物达到 CJ 压力后, 由于稀疏波的作用, 压力迅速下降, 随后逐渐变缓, 趋于稳定; 对碰后 (对碰处), 由于爆轰波的固壁反射, 产物压力迅速上升, 幅值约为 CJ 压力的 2 倍, 然后衰减。

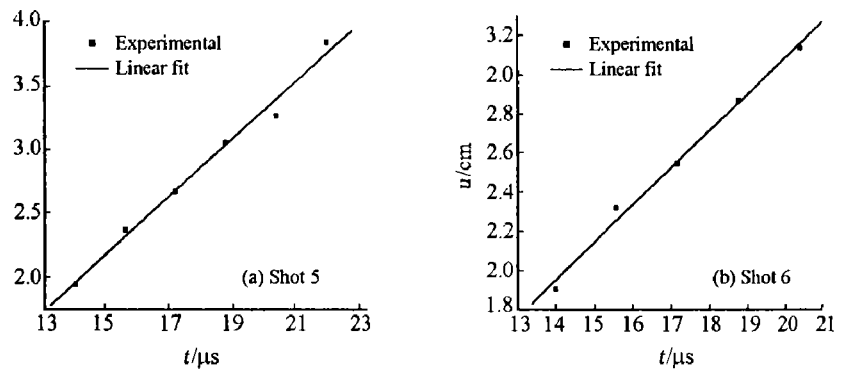


图 8 5、6 号实验对碰处位移历史

Fig.8 Displacement history at head-on collision point of shot 5, 6

金属圆管的弧形段代表了加速过程。在起爆端, 运动呈弧形是因为起爆后, 由于圆管及起爆面的稀疏作用, 压力迅速下降造成的。图 9(a)、(b)是对碰前后闪光 X 射线实验结果 (实验号 3、4) 与二维数值模拟结果的对照, 从图可以看出, 二者符合很好。

图 10(a)、(b)表明, 1、2 号实验爆轰波对碰后, 轴向距起爆面 1.88、3.75 cm (爆轰波对碰处) 处径向速度相差近 1.5 倍, 从而使得对碰处金属圆管发生明显的超前运动, 非对碰处金属圆管平均膨胀速度为

0.15 cm/ $\mu$ s, 高速摄影测得的平均速度为 0.14 cm/ $\mu$ s, 二者基本符合。3、4 号实验爆轰波对碰后, 轴向距起爆面 3.83、7.65 cm (爆轰波对碰处) 处径向速度相差也近 1.5 倍, 由于 3、4 号实验装药与金属圆管质量比较小, JB9014 炸药做功能力弱, 其外壳径向速度幅值小一些。

Taylor 判据认为在膨胀中的壳体厚度剖面存在着一个环向应力和应变都等于零的中性面, 当中性面移动到壳体内壁, 壳体发生贯穿断裂。由于无法在计算中考虑真实裂纹造成的影响, 我们近似地采用管壁内表面环向应力降为零的时刻作为中性面移动到此处的时刻。图 11 (a)、(b) 分别为金属圆管内壁环向应力历史, 所以 1、2 号实验对碰处 (圆管中部) 金属圆管贯穿断裂时间为 9  $\mu$ s, 从爆轰波到达至断裂的时间为 5.1  $\mu$ s; 非对碰处 (四分之一圆管位置) 金属圆管贯穿断裂时间为 12  $\mu$ s, 从爆轰波到达至断裂的时间为 9.5  $\mu$ s; 类似可以得到 3、4 号实验对碰处 (圆管中部) 金属圆管贯穿断裂时间为 16  $\mu$ s, 从爆轰波到达至断裂的时间为 5  $\mu$ s, 非对碰处 (四分之一圆管位置) 金属圆管贯穿断裂时间为 13  $\mu$ s, 从爆轰波到达至断裂的时间为 7.5  $\mu$ s。爆轰波对碰作用使得断裂时间明显提前。

### 5 结 语

通过闪光 X 射线照相、高速分幅照相以及数值模拟技术研究了爆轰波对碰驱动金属圆管的运动规律, 得出如下结论:

- (1) 两个爆轰波对碰引起波后产物压力幅度和压力梯度增高, 导致对碰滑移爆轰驱动金属圆管较非对碰处圆管平均膨胀速度明显增高, 相对贯穿断裂时间也明显提前。
- (2) 应用 Taylor 断裂判据, 近似给出了不同位置处的金属圆管从爆轰波到达至贯穿断裂的时间。
- (3) 拉格朗日二维流体动力学程序可以比较精确的模拟对碰驱动金属圆管的运动特性, 对爆轰产

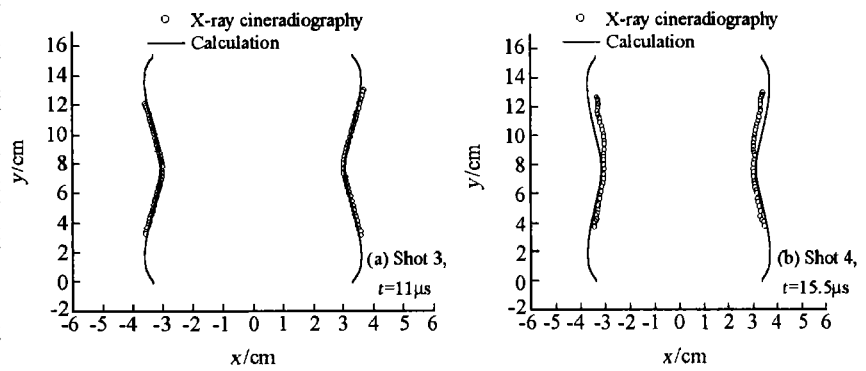


图 9 3、4 号实验金属圆管变形图  
Fig.9 Tube deformation of shot 3, 4

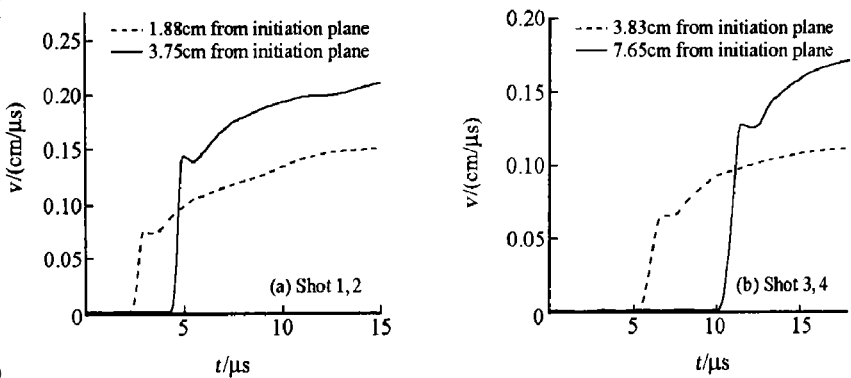


图 10 实验号 1、2、3、4 轴向不同位置金属圆管计算的外壁径向膨胀速度  
Fig. 10 Expanding velocity histories of outer tube wall at different axial position of shot 1, 2, 3 and 4

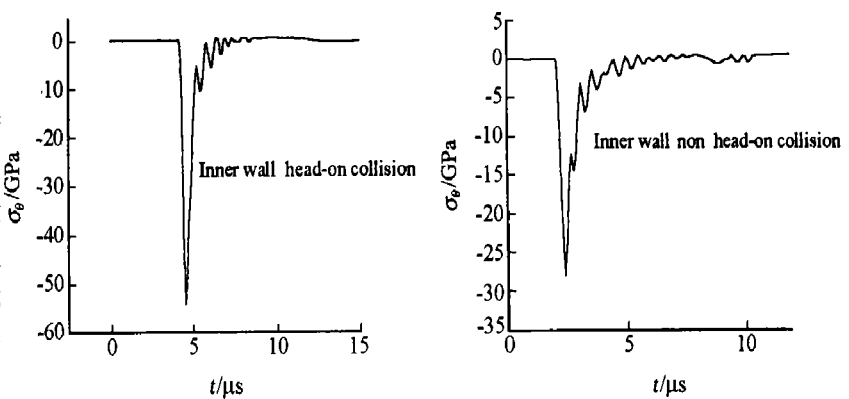


图 11 1、2 号实验内壁对碰处和非对碰处 (距起爆端四分之一) 计算的环向应力历史

Fig. 11 Annular stress history of inner wall at head-on collision point and non-head-on collision point of shot 1 and 2

物流场以及金属圆管膨胀变形形状的计算结果与实验结果符合很好。

### 参考文献:

- [1] Gurney R W. The Initial velocity of fragments from bombs, shells and grenades[R]. BRL Report 450, 1943.
- [2] 张宝平, 段明, 刘长林. 切向爆轰下板转折运动的实验观测分析[J]. 兵工学报, 1988, 38(4): 79—80.  
ZHANG Bao-ping, DUAN Ming, LIU Chang-ling. Experimental measurements and analysis on the deflection motion of a metal plate under sliding detonation[J]. ACTA ARMENTARII, 1988, 38(4): 79—80.
- [3] 李永池, 张伟, 金咏梅, 等. 内部爆轰加载下钢管破裂的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(增刊): 365—370.  
LI Yong-chi, ZHANG Wei, JIN Yong-mei, et al. Numerical simulation on the fracture of steel cylindrical shell under imploded detonation[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(supplement): 365—370.
- [4] 董玉斌, 苏林祥, 陈大年, 等. 滑移爆轰作用下内爆柱形钢壳层裂的数值研究[J]. 高压物理学报, 1989, 3(1): 70—79.  
DONG Yu-bin, SU Lin-Xiang, CHEN Da-nian, et al. Numerical simulation on the spallation of a steel cylindrical shell imploded under slipping detonation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1989, 3(1): 70—79.
- [5] 封家坡, 经福谦, 苏林祥, 等. 对薄层柱壳爆炸膨胀断裂过程的研究[J]. 高压物理学报, 1988, 2(2): 97—103.  
FENG Jiabo, JING Fu-qian, SU Lin-Xiang, et al. Studies of the explosion expanding fracture process of a thin cylindrical shell[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1988, 2(2): 97—103.
- [6] Taylor G I. Scientific papers of Taylor G I (II)[M]. London: Cambridge University Press, 1963.

## Expansion of metallic tubes driven by detonation product behind two head-on colliding detonation waves

CHEN Jun<sup>\*</sup>, SUN Cheng-wei, PU Zheng-mei, ZHANG Guang-shen, GAO Ning  
(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,  
China Academ of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** The data of expansion, deformation and fracture of metallic tube walls driven by detonation product behind two head-on colliding detonation waves have been obtained experimentally with flash X-ray cineradiography and high speed framing photography. It is shown that the head-on collision of two detonation waves greatly reduces the time needed for fracturing, and increases the radial expansion speed at the colliding positions of the tubes, and the fracturing time at colliding positions calculated from the Taylor criterion is indeed significantly reduced compared with that at non-colliding positions.

**Key words:** mechanics of explosion; dynamic fracture; interaction of detonation waves; explosive acceleration of tubes; detonation

---

\* Corresponding author; CHEN Jun      E-mail address: chenjun@caep.ac.cn; Telephone: 0816-2494607