

文章编号: 1001-1455(2004)03-0219-07

金属圆管内爆轰波相互作用效应的数值模拟研究*

张世文, 华劲松, 刘仓理, 韩长生, 王德生, 孙学林, 张振涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用动力学有限元程序, 针对大变形带来的网格扭曲造成计算的锁死现象进行了 ALE 技术处理, 结合高速摄影和 X 光照相实验结果, 对金属圆管内爆轰波的相互作用效应进行数值模拟, 给出了爆轰波对碰作用下金属圆管运动计算结果, 复现了金属圆管对碰区鼓包现象, 计算结果与实验吻合较好。可以预见, 基于该方法能够初步分析影响金属圆管运动规律的诸多因素。

关键词: 爆炸力学; 爆轰波; ALE 算法; 金属圆管

中图分类号: O382

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

1 引言

金属圆管作为一种轴对称结构, 是武器中应用最具代表性的结构, 各种装药炮弹的主体结构均属此类。从 20 世纪 40 年代开始, R. W. Gurney^[1]、G. I. Taylor^[2] 开始对内部爆炸加载金属圆管的膨胀与断裂进行了研究, 美国 Los Alamos 实验室的 R. L. Martineau 等^[3~5] 进行了内部炸药爆轰加载下圆柱壳体膨胀行为的实验研究。这些大多数为内装炸药的一端起爆对其运动规律的影响。炸药两端同时起爆对金属圆管运动规律的研究, 粗略的实验不少。韩长生等^[6]、王德生等^[7] 对在两端起爆作用下金属圆管推迟断裂时间, 采取了在对碰部位加铝内垫套的措施, 抑制了对碰部位的鼓包, 但仍可观察到鼓包现象。陈军^[8] 采用两端平面起爆方式, 获得了对碰部位的鼓包现象。M. Singh 等^[9] 获得了对碰部位的 X 光图像, 并对其断裂模式进行了分析。在数值模拟方面, 一端起爆的计算与实验大多吻合较好, 但对于两端同时起爆情况, 特别是在对碰部位, 或是不能计算出鼓包现象, 或是鼓包的计算结果与实验差别较大。本文中拟采用数值模拟的方法, 结合 X 光照相和高速摄影的实验结果, 分析影响金属圆管运动规律的因素。

2 数值模拟

2.1 计算模型

采用高速摄影观测的实验装置如图 1 所示。金属管材为 78 钨, 钨管外径为 36mm, 内径为 32mm, 管长为 130mm; 主装炸药为 10[#]-159, 长度为 90mm; 传爆药柱为太安, 高为 5mm; 有机玻璃高为 10mm。两端同时起爆。

采用如图 2 所示的轴对称模型, 将传爆药柱与主装炸药合为一体, 认为主装炸药为 100mm 长的 10[#]-159, 有机玻璃只是对装置起定位作用, 去掉它后可以忽略稀疏波对结果的影响。同时, 金属圆管也取 100mm。模型对分析圆管对碰部位的运动规律应该是合理的。

考虑到 78 钨管厚为 2mm, 沿厚度方向五等分, 即圆管沿厚度方向单元尺寸为 0.4mm, 以利于观测在爆轰驱动下应力波在厚度方向来回反射引起金属圆管外表面的运动历史。炸药单元尺度为 1mm, 模型共有 2100 个单元。计算采用两点起爆方式。

* 收稿日期: 2003-07-10; 修回日期: 2003-09-04

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金项目(1999Z0101)

作者简介: 张世文(1971—), 男, 博士研究生。

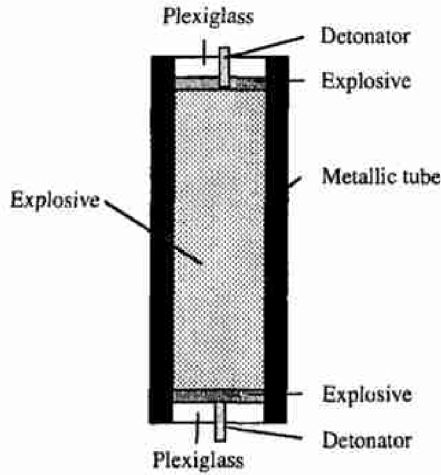


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

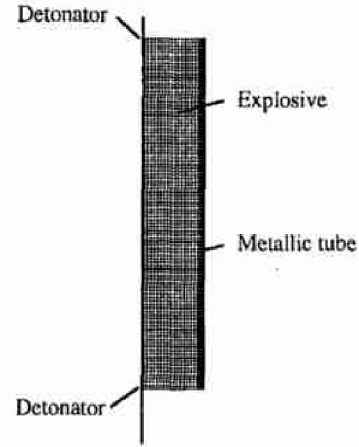


图2 计算模型图

Fig. 2 Model of calculation

2.2 材料参数

2.2.1 炸药参数

主装药的物态方程采用标准形式的JWL物态方程

$$p(E, \bar{\nu}) = Ae^{-R_1 \bar{\nu}} + Be^{-R_2 \bar{\nu}} + C\bar{\nu}^{-(\omega+1)} + \frac{\Gamma}{\bar{\nu}} \left[E - \left[\frac{A}{R_1} e^{-R_1 \bar{\nu}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 \bar{\nu}} + \frac{C}{\omega} \bar{\nu}^{-\omega} \right] \right] \quad (1)$$

取 $\Gamma = \omega$ 上式化为

$$p(E, \bar{\nu}) = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\nu}} \right] e^{-R_1 \bar{\nu}} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\nu}} \right] e^{-R_2 \bar{\nu}} + \frac{C}{\bar{\nu}} \quad (2)$$

在DYNA3D程序中,不含系数 C ,并不影响其它的拟合系数。事实上,JWL方程的CJ等熵线方程的三项 $Ae^{-R_1 \bar{\nu}}$ 、 $Be^{-R_2 \bar{\nu}}$ 、 $C\bar{\nu}^{-(\omega+1)}$,依次在高、中、低的压力范围内起主要作用。系数 C 所含项即使 $\Gamma \neq \omega$ 也可以忽略。

主装炸药10[#]-159的参数分别为: $\rho_0 = 1.86\text{g/cm}^3$, $D = 8.862\text{km/s}$, $p_J = 36.8\text{GPa}$, $k = 2.97$, $A = 934.77\text{GPa}$, $B = 12.723\text{GPa}$, $C = 0.95153\text{GPa}$, $R_1 = 4.6$, $R_2 = 1.1$, $\omega = 0.37$ 。

2.2.2 金属材料参数

本工作涉及的金属材料78钨合金和HR-2钢的参数见表1。

表1 78钨合金及HR-2钢实验结果

Table 1 Experiment results of 78W and HR-2 steel

材料	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$C_0 / (\text{km/s})$	λ	$C_1 / (\text{km/s})$	$C_t / (\text{km/s})$	G_0 / GPa	Y_0 / GPa
78W	15.73	4.093	1.34	5.538	2.942	150	1.7
HR-2	7.806	4.693	1.339	5.708	3.12	78.4	0.67

在爆轰波对碰情况下,不同的本构关系对金属圆管运动的计算结果可能有些影响。但是,材料的几个关键参数起主要作用,比如杨氏弹性模量、泊松比、屈服应力等。本文中采用较为普通的流体弹塑性模型,通过提供的参数换算成普通的杨氏弹性模量、泊松比等,换算公式^[11]

$$E = G \frac{3\bar{\lambda} + 2G}{\bar{\lambda} + G}, \quad \nu = \frac{\bar{\lambda}}{2(\bar{\lambda} + G)} \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \rho_0 C_0^2 - \frac{2G}{3} \quad (4)$$

初步计算78钨合金的杨氏弹性模量为378.23GPa,泊松比为0.26078。屈服应力取为1.7GPa。HR-2钢的杨氏弹性模量为204.09GPa,与提供的203GPa差别不大,泊松比为0.28。在这里,屈服应力的选取相对粗糙,更精细的本构模型中的参数可在以后进一步通过实验来获得。

2.3 ALE 方法简介及应用

Lagrangian 描述是指参考构形(网格)为物质坐标属性,即网格的节点固定在相应的物质点上,物质的变形引起网格的变形。在单元变形过程中积分点始终是同一物质点,但若物质变形过大,引起网格变形很大,容易导致网格的扭曲、翻转以及负体积的出现,造成计算的崩溃。图3(a)为本计算模型 Lagrangian 算法的结果。两爆轰波相互作用后反向传播,引起对碰区附近区域的网格产生扭曲、翻转现象,最终导致计算终止,从而造成无法分析对碰后圆管的运动规律。

Eulerian 描述是指网格具有空间坐标属性。网格节点不动,物质在网格间运动、变形。节点或积分点的物质随时间推进而改变。对于炸药驱动圆管运动问题,采用此方法将无能为力,一旦圆管运动离开炸药的初始网格较远,压力的传递变得非常困难。从图3(b)明显看出依靠 Eulerian 算法在滑移接触问题上难以进行,在约 $5\mu\text{s}$ 后计算终止。

ALE 方法是指网格独立于物质坐标和空间坐标,即网格节点可随物质运动而运动。同时,网格点与物质点可以分离,节点的位置因算法而定。ALE 方法的综合特点是:网格可以运动,物质在网格中输运。任一积分步包含 Lagrangian 步和 Eulerian 步,在 Lagrangian 步,网格随物质点运动而运动,在 Eulerian 步自动优化网格形态。图3(c)为 ALE 方法计算到 $19.5\mu\text{s}$ 时的炸药网格图。可以看出,网格分布良好。通过此方法,初步解决了网格畸变造成的计算终止问题。

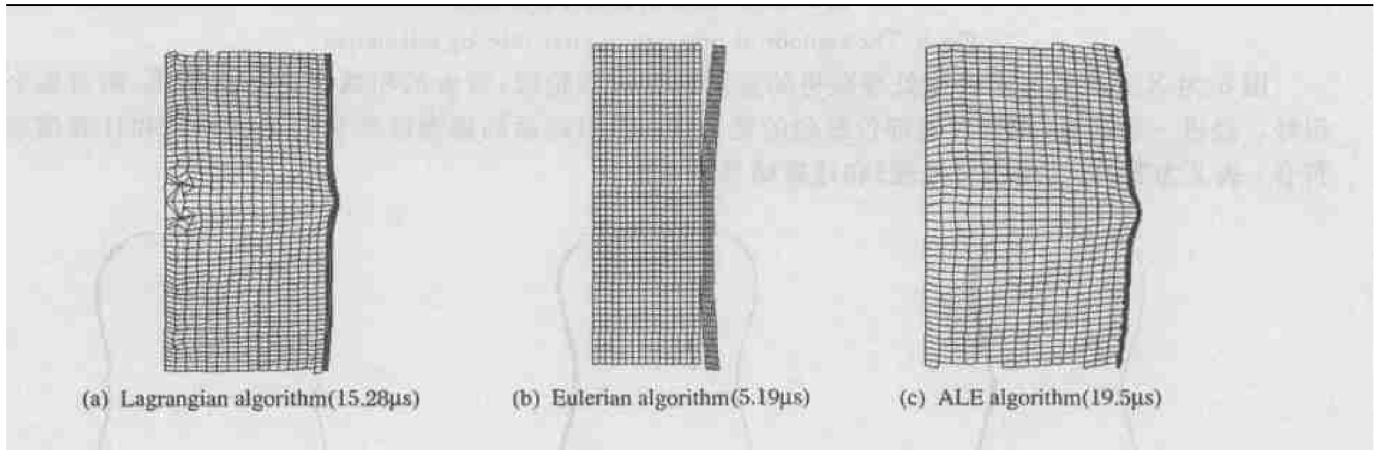


图3 不同算法对应的网格图

Fig.3 Mesh shapes by different algorithm

3 计算与实验结果对比分析

3.1 X 光照相与计算结果

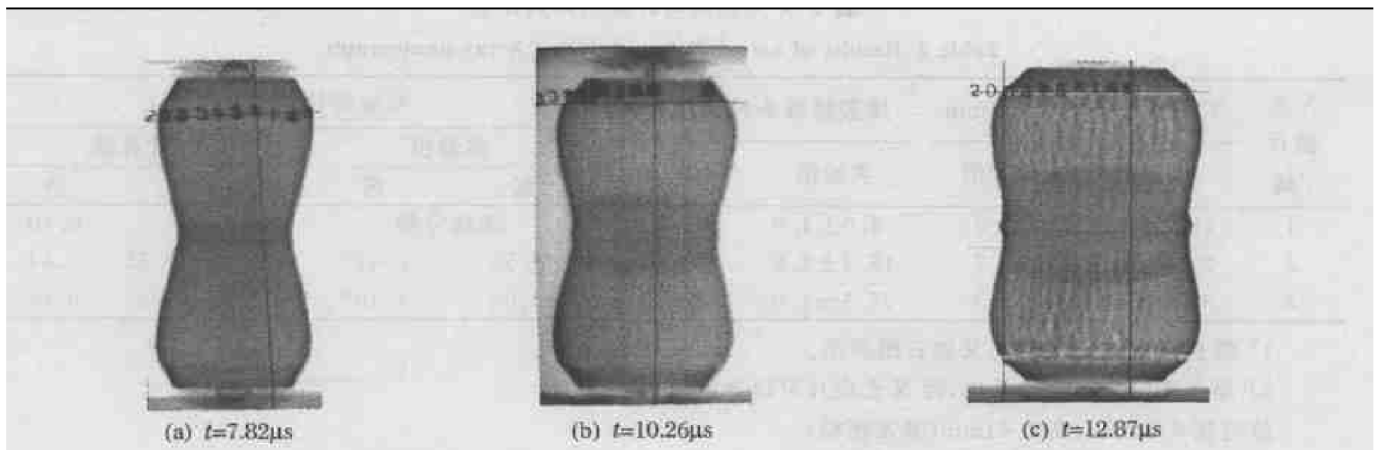


图4 单层 HR-2 钢管的 X 光照片

Fig.4 The typical pulsed X-ray photograph of steel tube

为了更好的观测金属圆管内部的图像,采用 1MeV 闪光 X 光机,改用 HR-2 钢,利用现存炸药,尺寸与 78 钨略有不同,炸药长为 105.84mm,两个 5mm 的传爆药柱,共计 115.84mm。计算模型中金属圆管和炸药也作相应调整。图 4 为 X 光照相结果,图 5 为经过纵向对称映射后的计算结果(扣除两种炸药在 0.5cm 距离的传播时间差 64ns)。

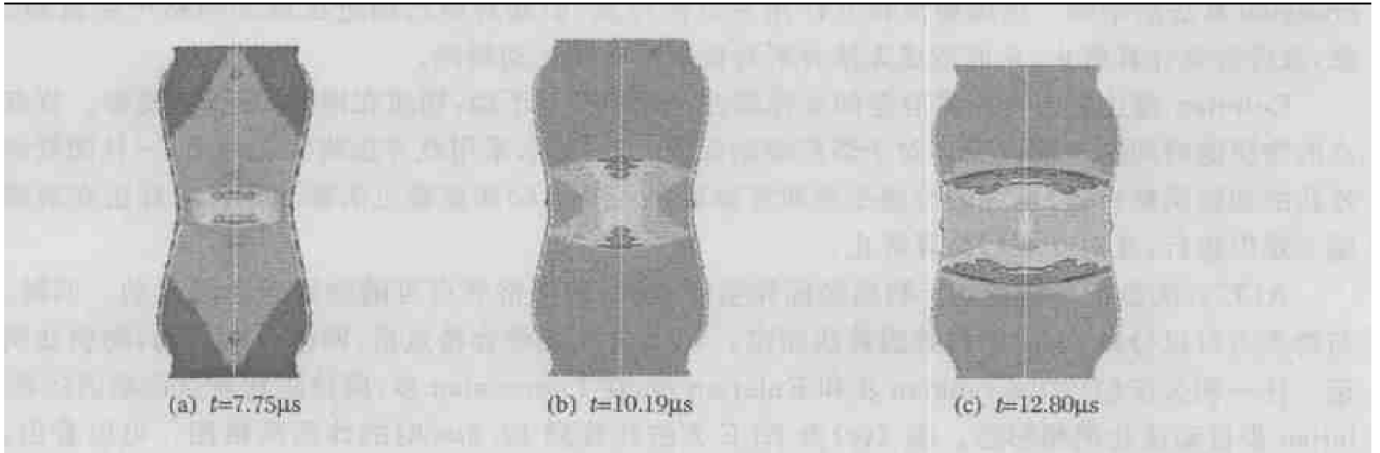


图 5 单层 HR-2 钢管的计算云纹图

Fig.5 The contour of pressure of steel tube by calculation

图 6 为 X 光底片经黑密度处理获得的金属圆管边界轮廓,带★的粗曲线为计算结果,两者重合得很好。经进一步测量,钢管对碰部位鼓包的宽和高以及对碰后的爆轰波波头的测试结果和计算值非常符合。表 2 为实验(经黑密度处理)和计算结果的对比如表。

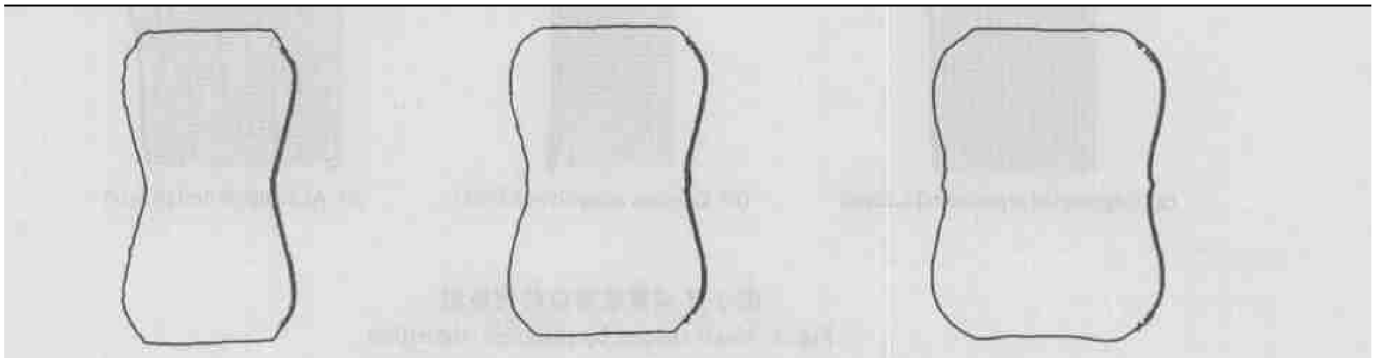


图 6 经黑密度处理的单层 HR-2 钢管 X 光底片与计算结果轮廓比较

Fig.6 The outer contour of steel tube by pulsed X-ray photograph image processing

表 2 X 光照相与计算结果对比表

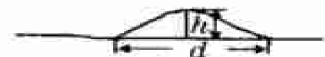
Table 2 Results of calculation and pulsed X-ray photograph

X 光 照片 /幅	对碰部位膨胀半径/mm		爆轰波波头峰高/mm		对碰部位鼓包/mm ¹⁾			
	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值		计算值	
					宽	高	宽	高
1	18.7±0.5	19.3	6.0±1.0	6.4	无法分辨		4.35	0.10
2	24.3±0.5	24.7	18.3±1.0	18.3	8.55	0.41 ²⁾	8.23~10.35	0.44
3	31.3±0.5	31.3	25.5±1.0	25.8	13.04	1.10 ³⁾	11.70~13.84	0.95

1) 鼓包宽 d 和高 h 的定义如右图所示。

2) 黑密度处理后没有鼓包,但 X 光底片可以看出鼓包,鼓包宽 8.55mm、高 0.41mm(非常粗略)。

3) 黑密度处理后有鼓包,鼓包宽 13.04mm、高 0.66mm,但 X 光底片可以看出鼓包明显偏高,约 1.1mm。



3.2 高速摄影与计算结果

X 光照相可以避免爆轰产物对测试结果判读的干扰,但获得的信息相对较少。对于密度较大的金

属圆管, 同样不能获得圆管内部的变形信息, 除非提高 X 光功率。X 光照相只能拍摄几张底片。我们采用高速摄影观察 78 钨金属圆管外表面在对碰区的运动情况。

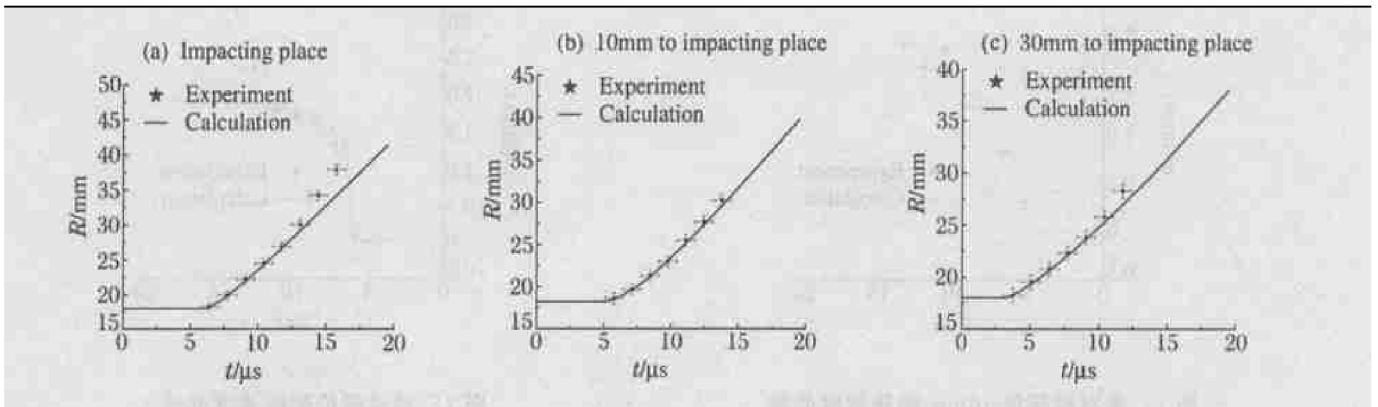


图 7 不同部位膨胀曲线

Fig.7 The $R-t$ curves of different places

在炸药两端同时起爆产生的相向爆轰波对单层 78 钨管作用的半径膨胀曲线如图 7 所示。在炸药爆轰 $10\mu\text{s}$ 左右, 三个部位计算结果与实验符合都较好。由图 8 可以看出, 离对碰部位越近, 膨胀速度越快, 这正反映了对碰区的压力因对碰而产生的非线性叠加效果; 随着时间的推移, 对碰部位和离对碰部位 30mm 处的膨胀规律逐渐发生偏移, 半径膨胀的实验结果大于计算结果。下面对这两种现象进行分析。

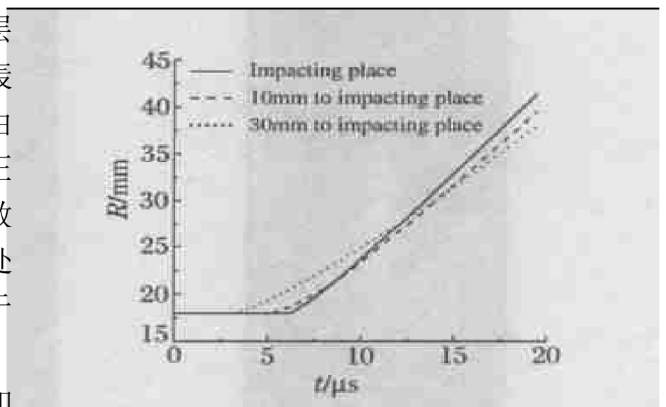


图 8 离对碰部位不同位置的膨胀曲线

Fig.8 The $R-t$ curves of different place

离对碰部位 30mm 位置的膨胀速度与时间关系如图 9 所示, $10\mu\text{s}$ 前的计算与实测结果符合较好, $10\mu\text{s}$ 后的实测与计算结果差别越来越大。这是因为该处圆管外表面产生了纵向裂纹(不过爆轰产物溢出还需要一定时间, 压力不会因产物泄漏而突然下降), 使得环向应力部分释放。在内压力推动下, 环向应力的束缚将会减少, 圆管表面就会以更快速度膨胀。从图 10 的高速摄影照片和图 4(c)的 X 光照片图像可见圆管外表面产生了纵向裂纹。

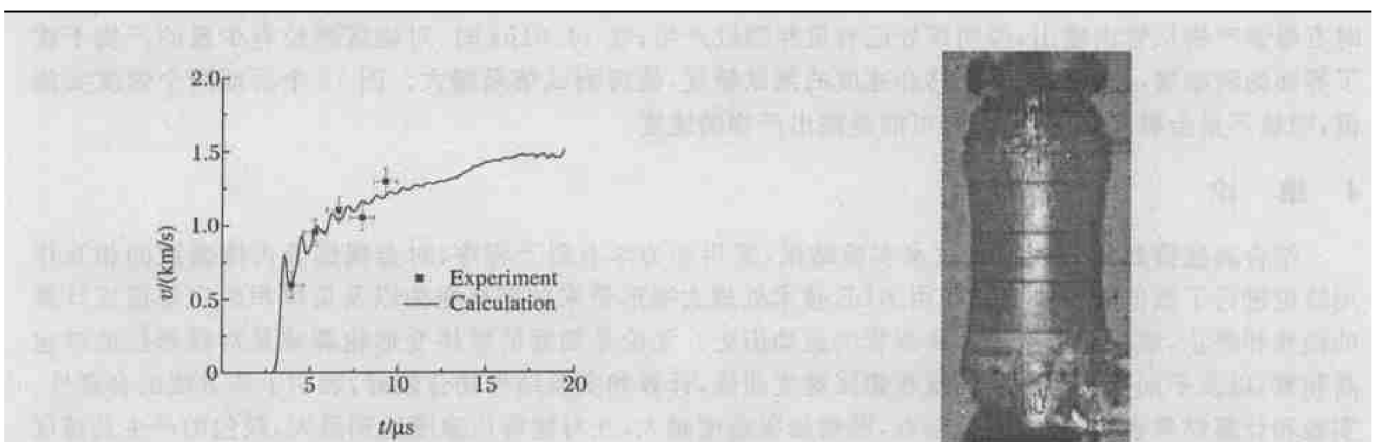


图 9 离对碰部位 30mm 处的膨胀速度曲线

Fig.9 The $v-t$ curve of 30mm to impacting place

图 10 炸药起爆 $10.01\mu\text{s}$ 的高速摄影照片

Fig.10 The typical high-speed photograph ($t=10.01\mu\text{s}$)

离对碰部位 10mm 的膨胀速度曲线如图 11 所示, 实测与计算结果符合相当好; 图 12 为对碰部位的膨胀速度曲线, 在 $13\mu\text{s}$ 左右实测和计算结果差别较大, 特别是后面两个速度实测值有明显的跃迁, 为此

对高速摄影的图像进行分幅分析。

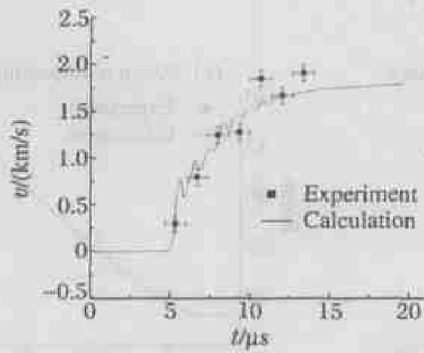


图 11 离对碰部位 10mm 膨胀速度曲线

Fig. 11 The $v-t$ curve of 10mm to impacting place

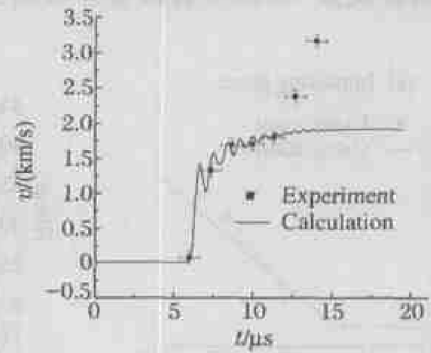


图 12 对碰部位膨胀速度曲线

Fig. 12 The $v-t$ curve of impacting place



(a) $t=11.34\mu\text{s}$



(b) $t=12.67\mu\text{s}$



(c) $t=14.01\mu\text{s}$

图 13 炸药起爆后不同时刻高速摄影照片

Fig. 13 The high-speed photographs of different times

图 13 为炸药起爆 11.34、12.67、14.01 μs 时刻的高速摄影照片。在 12.67 μs 时, 离对碰部位 10mm 处的钨管有少许浅裂纹, 但仍然基本完好, 实验与计算结果符合较好; 离对碰部位 30mm 处, 在 11.34 μs 时有爆轰产物从管内喷出, 说明该处已有贯穿裂纹产生; 在 14.01 μs 时, 对碰区部位有少量的产物干扰了界面的清晰度, 严重影响到位移和速度的测试精度, 使得测试结果偏大。图 12 中后面两个速度实测值, 明显不是金属圆管的速度, 有可能是溢出产物的速度。

4 结 论

结合高速摄影和 X 光照相技术实验结果, 采用动力学有限元程序, 对金属圆管内爆轰波的相互作用效应进行了数值模拟。通过采用 ALE 技术处理大变形带来的网格扭曲以及负体积的出现造成计算的锁死和终止, 成功地再现了金属圆管的运动历史。无论是圆管的整体变形轮廓或是对碰部位的鼓包高和宽, 以及不同部位的膨胀曲线和膨胀速度曲线, 计算和实验结果吻合较好, 表明了该方法的合理性。实验和计算结果表明: 离对碰区越近, 圆管膨胀速度越大, 在对碰部位速度达到最大, 鼓包的产生是速度差造成的。通过计算, 可以推测圆管内部通过实验难以观测的更多信息。对于圆管的膨胀速度历史, 计算结果比离散的实验点在早期更能反映出圆管的膨胀规律以及应力波在厚度方向的来回反射历程。可以预见, 基于该方法能够初步分析影响金属圆管运动规律的诸多因素。

感谢王慧、郜玉栋、李延年、谷新蓉、王晓、金山、张小琳等在实验过程中的大力支持。

参考文献:

- [1] Gurney R W. The initial velocity of fragments from bombs, shells and grenades[R]. BRL Report, 1943.
- [2] Taylor G I. Fragmentation of tubular bombs[A]. Science Papers of Sir G I Taylor[C]. London: Cambridge University Press, 1963: 387—390.
- [3] Martineau R L, Anderson C A. A viscoplastic model of expanding cylindrical shells subjected to high explosive detonations[R]. Los Alamos National Laboratories, CONNF-981009, 1998.
- [4] Martineau R L, Anderson C A. An explicit model of expanding cylindrical shells subjected to high explosive detonations[R]. Los Alamos National Laboratories, CONNF-9990504, 1999.
- [5] Martineau R L, Anderson C A. Expansion of cylinder shells subjected to internal explosive detonations[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(2): 219—225.
- [6] HAN Chang-sheng, LIU Guang-zuo, DONG Yu-bing, et al. Expansion movement and fracture of a cylindrical shell due to internal explosion[A]. Shock Compression of Condensed Matter[C]. USA, 1991: 357—361.
- [7] 王德生, 韩长生, 马松合, 等. 推迟内装炸药爆轰作用下金属圆管断裂时间的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(增刊): 360—364.
- WANG De-sheng, HAN Chang-sheng, MA Song-he, et al. On studies of delaying fracture time of cylindrical metallic tubes under detonation of inner explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(Suppl): 360—364.
- [8] 陈军. 滑移爆轰驱动金属圆管及对碰区的研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2001.
- [9] Singh M, Suneja H R, Bola M S, et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 939—954.
- [10] 孙承纬. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 283—309.
- [11] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1999: 59—66.

A numerical simulation of the metallic tube expansion induced by inside head-on hitting two detonation waves

ZHANG Shi-wen^{*}, HUA Jin-song, LIU Cang-li, HAN Chang-sheng,
WANG De-sheng, SUN Xue-lin, ZHANG Zhen-tao
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, china)

Abstract: Employing the two-dimensional ALE algorithm, the expansion of metallic tubes induced by inside head-on hitting two detonation waves has been numerically simulated with a modified finite-element hydrodynamic code. The simulated contours of deformed metallic tubes are in agreement with the results measured by flash X-ray cineradiography and high-speed photography. Especially, the swelling of expanded tubes at the place of two detonation waves hitting has been properly predicted. Some factors affecting tube movements can be analyzed with the simulation method.

Key words: mechanics of explosion; detonation wave; ALE algorithm; metallic tube

* Corresponding author: ZHANG Shi-wen
Telephone: 0816-2493874

文章编号: 1001-1455(2004)03-0219-07

金属圆管内爆轰波相互作用效应的数值模拟研究*

张世文, 华劲松, 刘仓理, 韩长生, 王德生, 孙学林, 张振涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用动力学有限元程序, 针对大变形带来的网格扭曲造成计算的锁死现象进行了 ALE 技术处理, 结合高速摄影和 X 光照相实验结果, 对金属圆管内爆轰波的相互作用效应进行数值模拟, 给出了爆轰波对碰作用下金属圆管运动计算结果, 复现了金属圆管对碰区鼓包现象, 计算结果与实验吻合较好。可以预见, 基于该方法能够初步分析影响金属圆管运动规律的诸多因素。

关键词: 爆炸力学; 爆轰波; ALE 算法; 金属圆管

中图分类号: O382

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

1 引言

金属圆管作为一种轴对称结构, 是武器中应用最具代表性的结构, 各种装药炮弹的主体结构均属此类。从 20 世纪 40 年代开始, R. W. Gurney^[1]、G. I. Taylor^[2] 开始对内部爆炸加载金属圆管的膨胀与断裂进行了研究, 美国 Los Alamos 实验室的 R. L. Martineau 等^[3~5] 进行了内部炸药爆轰加载下圆柱壳体膨胀行为的实验研究。这些大多数为内装炸药的一端起爆对其运动规律的影响。炸药两端同时起爆对金属圆管运动规律的研究, 粗略的实验不少。韩长生等^[6]、王德生等^[7] 对在两端起爆作用下金属圆管推迟断裂时间, 采取了在对碰部位加铝内垫套的措施, 抑制了对碰部位的鼓包, 但仍可观察到鼓包现象。陈军^[8] 采用两端平面起爆方式, 获得了对碰部位的鼓包现象。M. Singh 等^[9] 获得了对碰部位的 X 光图像, 并对其断裂模式进行了分析。在数值模拟方面, 一端起爆的计算与实验大多吻合较好, 但对于两端同时起爆情况, 特别是在对碰部位, 或是不能计算出鼓包现象, 或是鼓包的计算结果与实验差别较大。本文中拟采用数值模拟的方法, 结合 X 光照相和高速摄影的实验结果, 分析影响金属圆管运动规律的因素。

2 数值模拟

2.1 计算模型

采用高速摄影观测的实验装置如图 1 所示。金属管材为 78 钨, 钨管外径为 36mm, 内径为 32mm, 管长为 130mm; 主装炸药为 10[#]-159, 长度为 90mm; 传爆药柱为太安, 高为 5mm; 有机玻璃高为 10mm。两端同时起爆。

采用如图 2 所示的轴对称模型, 将传爆药柱与主装炸药合为一体, 认为主装炸药为 100mm 长的 10[#]-159, 有机玻璃只是对装置起定位作用, 去掉它后可以忽略稀疏波对结果的影响。同时, 金属圆管也取 100mm。模型对分析圆管对碰部位的运动规律应该是合理的。

考虑到 78 钨管厚为 2mm, 沿厚度方向五等分, 即圆管沿厚度方向单元尺寸为 0.4mm, 以利于观测在爆轰驱动下应力波在厚度方向来回反射引起金属圆管外表面的运动历史。炸药单元尺度为 1mm, 模型共有 2100 个单元。计算采用两点起爆方式。

* 收稿日期: 2003-07-10; 修回日期: 2003-09-04

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金项目(1999Z0101)

作者简介: 张世文(1971—), 男, 博士研究生。

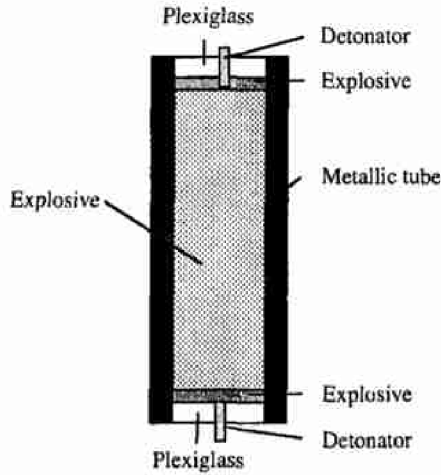


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

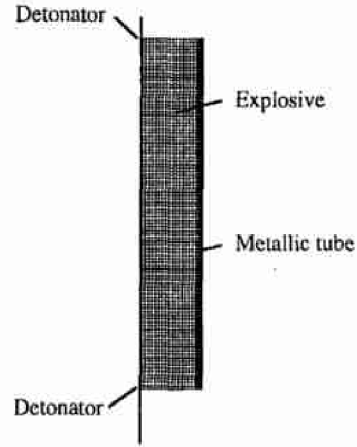


图2 计算模型图

Fig. 2 Model of calculation

2.2 材料参数

2.2.1 炸药参数

主装药的物态方程采用标准形式的JWL物态方程

$$p(E, \bar{\nu}) = Ae^{-R_1 \bar{\nu}} + Be^{-R_2 \bar{\nu}} + C\bar{\nu}^{-(\omega+1)} + \frac{\Gamma}{\bar{\nu}} \left[E - \left[\frac{A}{R_1} e^{-R_1 \bar{\nu}} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 \bar{\nu}} + \frac{C}{\omega} \bar{\nu}^{-\omega} \right] \right] \quad (1)$$

取 $\Gamma = \omega$ 上式化为

$$p(E, \bar{\nu}) = A \left[1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\nu}} \right] e^{-R_1 \bar{\nu}} + B \left[1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\nu}} \right] e^{-R_2 \bar{\nu}} + \frac{C}{\bar{\nu}} \quad (2)$$

在DYNA3D程序中,不含系数 C ,并不影响其它的拟合系数。事实上,JWL方程的CJ等熵线方程的三项 $Ae^{-R_1 \bar{\nu}}$ 、 $Be^{-R_2 \bar{\nu}}$ 、 $C\bar{\nu}^{-(\omega+1)}$,依次在高、中、低的压力范围内起主要作用。系数 C 所含项即使 $\Gamma \neq \omega$ 也可以忽略。

主装炸药10[#]-159的参数分别为: $\rho_0 = 1.86\text{g/cm}^3$, $D = 8.862\text{km/s}$, $p_J = 36.8\text{GPa}$, $k = 2.97$, $A = 934.77\text{GPa}$, $B = 12.723\text{GPa}$, $C = 0.95153\text{GPa}$, $R_1 = 4.6$, $R_2 = 1.1$, $\omega = 0.37$ 。

2.2.2 金属材料参数

本工作涉及的金属材料78钨合金和HR-2钢的参数见表1。

表1 78钨合金及HR-2钢实验结果

Table 1 Experiment results of 78W and HR-2 steel

材料	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$C_0 / (\text{km/s})$	λ	$C_1 / (\text{km/s})$	$C_t / (\text{km/s})$	G_0 / GPa	Y_0 / GPa
78W	15.73	4.093	1.34	5.538	2.942	150	1.7
HR-2	7.806	4.693	1.339	5.708	3.12	78.4	0.67

在爆轰波对碰情况下,不同的本构关系对金属圆管运动的计算结果可能有些影响。但是,材料的几个关键参数起主要作用,比如杨氏弹性模量、泊松比、屈服应力等。本文中采用较为普通的流体弹塑性模型,通过提供的参数换算成普通的杨氏弹性模量、泊松比等,换算公式^[11]

$$E = G \frac{3\bar{\lambda} + 2G}{\bar{\lambda} + G}, \quad \nu = \frac{\bar{\lambda}}{2(\bar{\lambda} + G)} \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \rho_0 C_0^2 - \frac{2G}{3} \quad (4)$$

初步计算78钨合金的杨氏弹性模量为378.23GPa,泊松比为0.26078。屈服应力取为1.7GPa。HR-2钢的杨氏弹性模量为204.09GPa,与提供的203GPa差别不大,泊松比为0.28。在这里,屈服应力的选取相对粗糙,更精细的本构模型中的参数可在以后进一步通过实验来获得。

2.3 ALE 方法简介及应用

Lagrangian 描述是指参考构形(网格)为物质坐标属性,即网格的节点固定在相应的物质点上,物质的变形引起网格的变形。在单元变形过程中积分点始终是同一物质点,但若物质变形过大,引起网格变形很大,容易导致网格的扭曲、翻转以及负体积的出现,造成计算的崩溃。图 3(a)为本计算模型 Lagrangian 算法的结果。两爆轰波相互作用后反向传播,引起对碰区附近区域的网格产生扭曲、翻转现象,最终导致计算终止,从而造成无法分析对碰后圆管的运动规律。

Eulerian 描述是指网格具有空间坐标属性。网格节点不动,物质在网格间运动、变形。节点或积分点的物质随时间推进而改变。对于炸药驱动圆管运动问题,采用此方法将无能为力,一旦圆管运动离开炸药的初始网格较远,压力的传递变得非常困难。从图 3(b)明显看出依靠 Eulerian 算法在滑移接触问题上难以进行,在约 $5\mu\text{s}$ 后计算终止。

ALE 方法是指网格独立于物质坐标和空间坐标,即网格节点可随物质运动而运动。同时,网格点与物质点可以分离,节点的位置因算法而定。ALE 方法的综合特点是:网格可以运动,物质在网格中输运。任一积分步包含 Lagrangian 步和 Eulerian 步,在 Lagrangian 步,网格随物质点运动而运动,在 Eulerian 步自动优化网格形态。图 3(c)为 ALE 方法计算到 $19.5\mu\text{s}$ 时的炸药网格图。可以看出,网格分布良好。通过此方法,初步解决了网格畸变造成的计算终止问题。

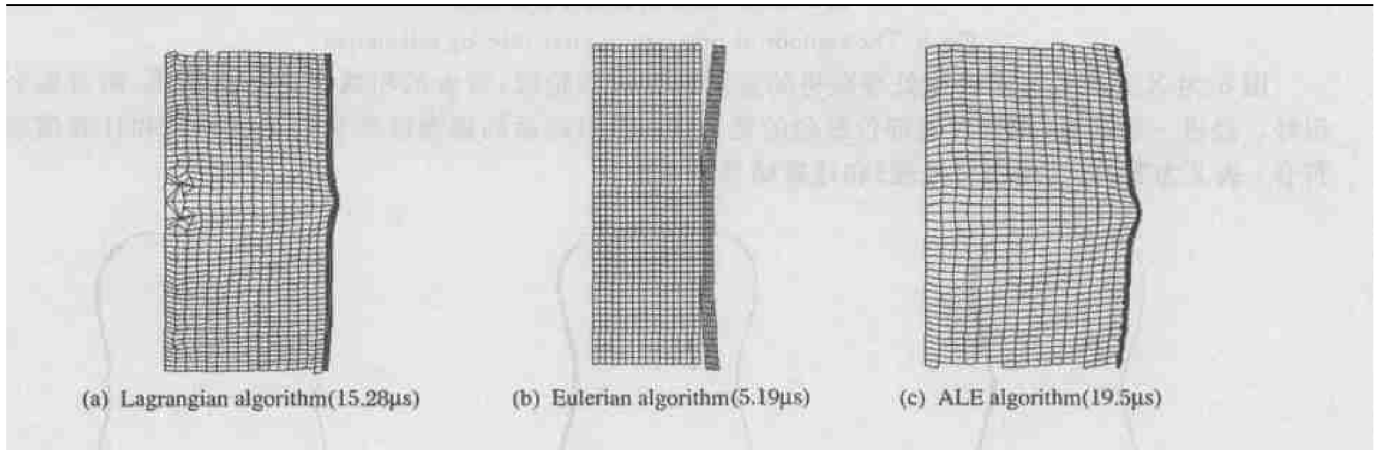


图 3 不同算法对应的网格图

Fig.3 Mesh shapes by different algorithm

3 计算与实验结果对比分析

3.1 X 光照相与计算结果

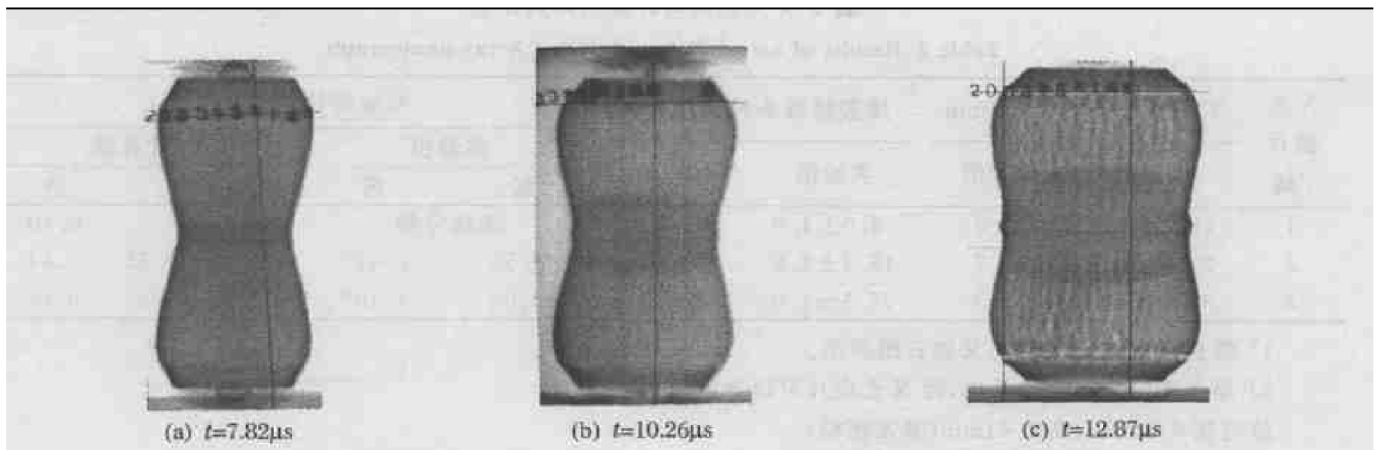


图 4 单层 HR-2 钢管的 X 光照片

Fig.4 The typical pulsed X-ray photograph of steel tube

为了更好的观测金属圆管内部的图像,采用 1MeV 闪光 X 光机,改用 HR-2 钢,利用现存炸药,尺寸与 78 钨略有不同,炸药长为 105.84mm,两个 5mm 的传爆药柱,共计 115.84mm。计算模型中金属圆管和炸药也作相应调整。图 4 为 X 光照相结果,图 5 为经过纵向对称映射后的计算结果(扣除两种炸药在 0.5cm 距离的传播时间差 64ns)。

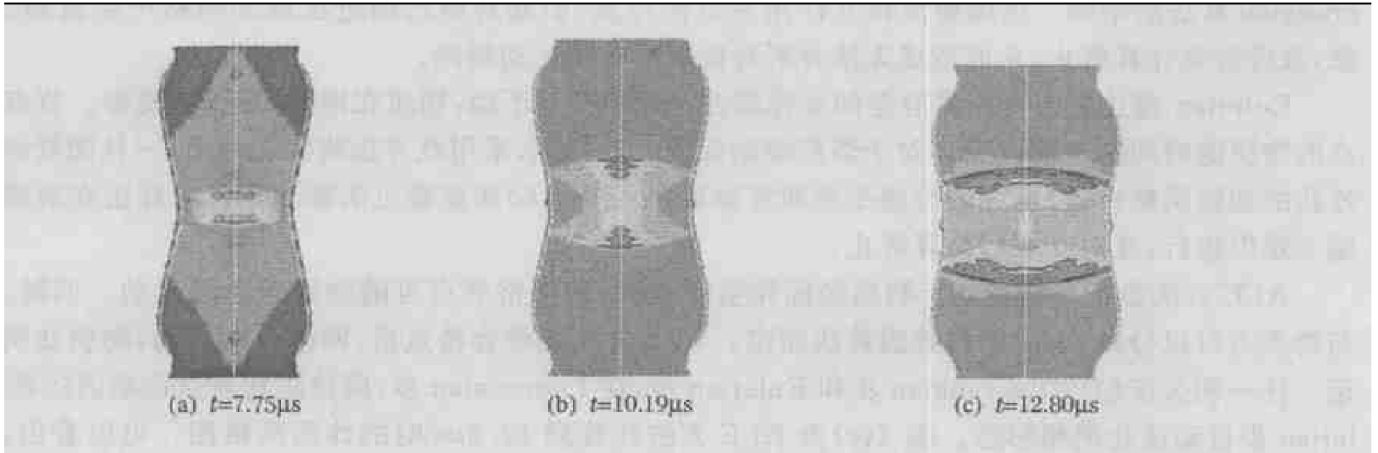


图 5 单层 HR-2 钢管的计算云纹图

Fig.5 The contour of pressure of steel tube by calculation

图 6 为 X 光底片经黑密度处理获得的金属圆管边界轮廓,带★的粗曲线为计算结果,两者重合得很好。经进一步测量,钢管对碰部位鼓包的宽和高以及对碰后的爆轰波波头的测试结果和计算值非常符合。表 2 为实验(经黑密度处理)和计算结果的对比。

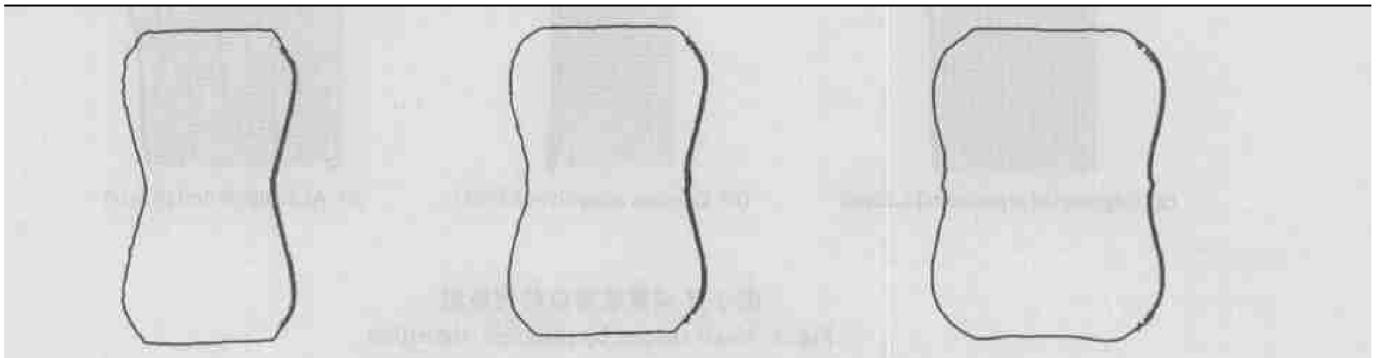


图 6 经黑密度处理的单层 HR-2 钢管 X 光底片与计算结果轮廓比较

Fig.6 The outer contour of steel tube by pulsed X-ray photograph image processing

表 2 X 光照相与计算结果对比表

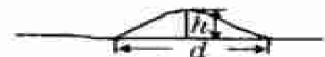
Table 2 Results of calculation and pulsed X-ray photograph

X 光 照片 /幅	对碰部位膨胀半径/mm		爆轰波波头峰高/mm		对碰部位鼓包/mm ¹⁾			
	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值		计算值	
					宽	高	宽	高
1	18.7±0.5	19.3	6.0±1.0	6.4	无法分辨		4.35	0.10
2	24.3±0.5	24.7	18.3±1.0	18.3	8.55	0.41 ²⁾	8.23~10.35	0.44
3	31.3±0.5	31.3	25.5±1.0	25.8	13.04	1.10 ³⁾	11.70~13.84	0.95

1) 鼓包宽 d 和高 h 的定义如右图所示。

2) 黑密度处理后没有鼓包,但 X 光底片可以看出鼓包,鼓包宽 8.55mm、高 0.41mm(非常粗略)。

3) 黑密度处理后有鼓包,鼓包宽 13.04mm、高 0.66mm,但 X 光底片可以看出鼓包明显偏高,约 1.1mm。



3.2 高速摄影与计算结果

X 光照相可以避免爆轰产物对测试结果判读的干扰,但获得的信息相对较少。对于密度较大的金

属圆管,同样不能获得圆管内部的变形信息,除非提高 X 光功率。X 光照相只能拍摄几张底片。我们采用高速摄影观察 78 钨金属圆管外表面在对碰区的运动情况。

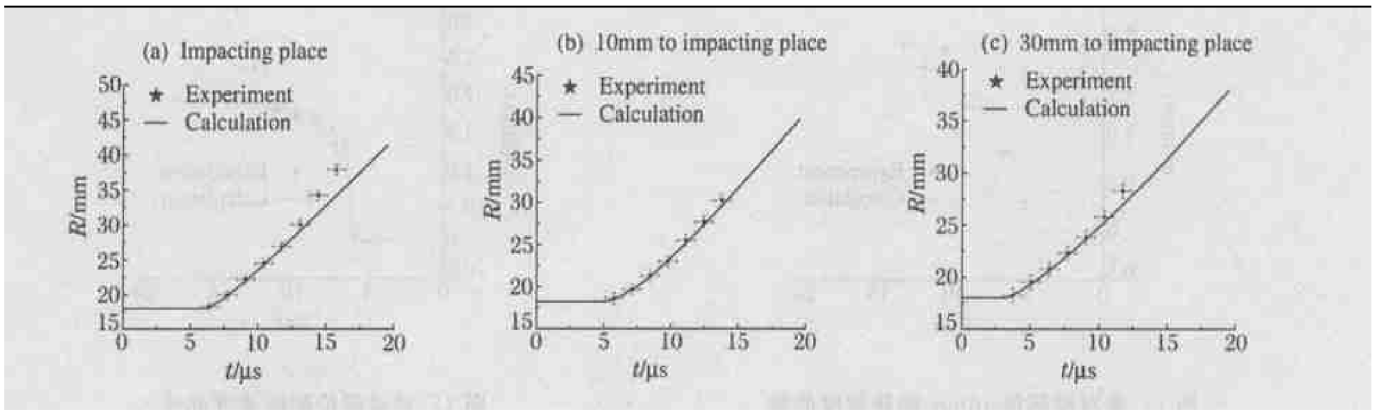


图 7 不同部位膨胀曲线

Fig.7 The $R-t$ curves of different places

在炸药两端同时起爆产生的相向爆轰波对单层 78 钨管作用的半径膨胀曲线如图 7 所示。在炸药爆轰 $10\mu\text{s}$ 左右,三个部位计算结果与实验符合都较好。由图 8 可以看出,离对碰部位越近,膨胀速度越快,这正反映了对碰区的压力因对碰而产生的非线性叠加效果;随着时间的推移,对碰部位和离对碰部位 30mm 处的膨胀规律逐渐发生偏移,半径膨胀的实验结果大于计算结果。下面对这两种现象进行分析。

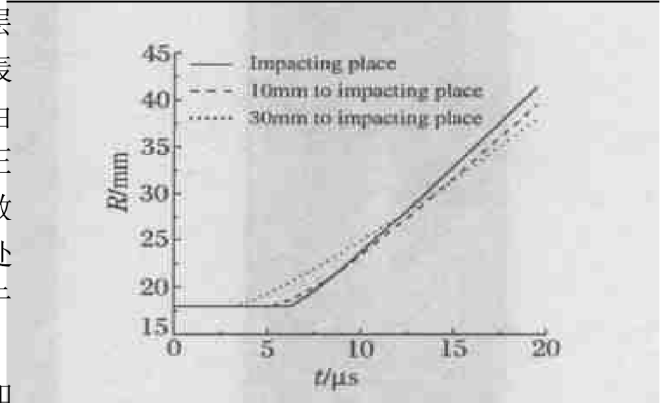


图 8 离对碰部位不同位置的膨胀曲线

Fig.8 The $R-t$ curves of different place

离对碰部位 30mm 位置的膨胀速度与时间关系如图 9 所示, $10\mu\text{s}$ 前的计算与实测结果符合较好, $10\mu\text{s}$ 后的实测与计算结果差别越来越大。这是因为该处圆管外表面产生了纵向裂纹(不过爆轰产物溢出还需要一定时间,压力不会因产物泄漏而突然下降),使得环向应力部分释放。在内压力推动下,环向应力的束缚将会减少,圆管表面就会以更快速度膨胀。从图 10 的高速摄影照片和图 4(c)的 X 光照片图像可见圆管外表面产生了纵向裂纹。

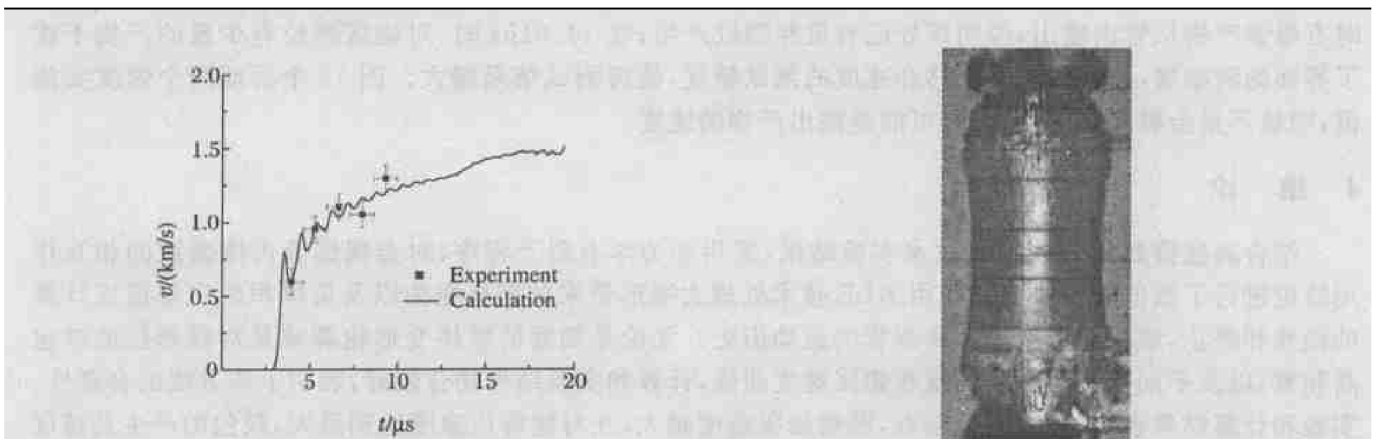


图 9 离对碰部位 30mm 处的膨胀速度曲线

Fig.9 The $v-t$ curve of 30mm to impacting place

图 10 炸药起爆 $10.01\mu\text{s}$ 的高速摄影照片

Fig.10 The typical high-speed photograph ($t=10.01\mu\text{s}$)

离对碰部位 10mm 的膨胀速度曲线如图 11 所示,实测与计算结果符合相当好;图 12 为对碰部位的膨胀速度曲线,在 $13\mu\text{s}$ 左右实测和计算结果差别较大,特别是后面两个速度实测值有明显的跃迁,为此

对高速摄影的图像进行分幅分析。

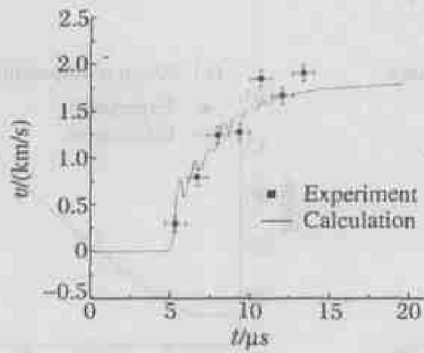


图 11 离对碰部位 10mm 膨胀速度曲线

Fig. 11 The $v-t$ curve of 10mm to impacting place

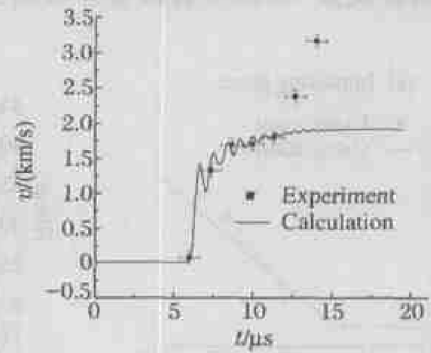


图 12 对碰部位膨胀速度曲线

Fig. 12 The $v-t$ curve of impacting place



(a) $t=11.34\mu\text{s}$



(b) $t=12.67\mu\text{s}$



(c) $t=14.01\mu\text{s}$

图 13 炸药起爆后不同时刻高速摄影照片

Fig. 13 The high-speed photographs of different times

图 13 为炸药起爆 11.34、12.67、14.01 μs 时刻的高速摄影照片。在 12.67 μs 时, 离对碰部位 10mm 处的钨管有少许浅裂纹, 但仍然基本完好, 实验与计算结果符合较好; 离对碰部位 30mm 处, 在 11.34 μs 时有爆轰产物从管内喷出, 说明该处已有贯穿裂纹产生; 在 14.01 μs 时, 对碰区部位有少量的产物干扰了界面的清晰度, 严重影响到位移和速度的测试精度, 使得测试结果偏大。图 12 中后面两个速度实测值, 明显不是金属圆管的速度, 有可能是溢出产物的速度。

4 结 论

结合高速摄影和 X 光照相技术实验结果, 采用动力学有限元程序, 对金属圆管内爆轰波的相互作用效应进行了数值模拟。通过采用 ALE 技术处理大变形带来的网格扭曲以及负体积的出现造成计算的锁死和终止, 成功地再现了金属圆管的运动历史。无论是圆管的整体变形轮廓或是对碰部位的鼓包高和宽, 以及不同部位的膨胀曲线和膨胀速度曲线, 计算和实验结果吻合较好, 表明了该方法的合理性。实验和计算结果表明: 离对碰区越近, 圆管膨胀速度越大, 在对碰部位速度达到最大, 鼓包的产生是速度差造成的。通过计算, 可以推测圆管内部通过实验难以观测的更多信息。对于圆管的膨胀速度历史, 计算结果比离散的实验点在早期更能反映出圆管的膨胀规律以及应力波在厚度方向的来回反射历程。可以预见, 基于该方法能够初步分析影响金属圆管运动规律的诸多因素。

感谢王慧、郜玉栋、李延年、谷新蓉、王晓、金山、张小琳等在实验过程中的大力支持。

参考文献:

- [1] Gurney R W. The initial velocity of fragments from bombs, shells and grenades[R]. BRL Report, 1943.
- [2] Taylor G I. Fragmentation of tubular bombs[A]. Science Papers of Sir G I Taylor[C]. London: Cambridge University Press, 1963: 387—390.
- [3] Martineau R L, Anderson C A. A viscoplastic model of expanding cylindrical shells subjected to high explosive detonations[R]. Los Alamos National Laboratories, CONNF-981009, 1998.
- [4] Martineau R L, Anderson C A. An explicit model of expanding cylindrical shells subjected to high explosive detonations[R]. Los Alamos National Laboratories, CONNF-9990504, 1999.
- [5] Martineau R L, Anderson C A. Expansion of cylinder shells subjected to internal explosive detonations[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(2): 219—225.
- [6] HAN Chang-sheng, LIU Guang-zuo, DONG Yu-bing, et al. Expansion movement and fracture of a cylindrical shell due to internal explosion[A]. Shock Compression of Condensed Matter[C]. USA, 1991: 357—361.
- [7] 王德生, 韩长生, 马松合, 等. 推迟内装炸药爆轰作用下金属圆管断裂时间的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(增刊): 360—364.
- WANG De-sheng, HAN Chang-sheng, MA Song-he, et al. On studies of delaying fracture time of cylindrical metallic tubes under detonation of inner explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(Suppl): 360—364.
- [8] 陈军. 滑移爆轰驱动金属圆管及对碰区的研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2001.
- [9] Singh M, Suneja H R, Bola M S, et al. Dynamic tensile deformation and fracture of metal cylinders at high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 939—954.
- [10] 孙承纬. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 283—309.
- [11] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 1999: 59—66.

A numerical simulation of the metallic tube expansion induced by inside head-on hitting two detonation waves

ZHANG Shi-wen^{*}, HUA Jin-song, LIU Cang-li, HAN Chang-sheng,
WANG De-sheng, SUN Xue-lin, ZHANG Zhen-tao
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, china)

Abstract: Employing the two-dimensional ALE algorithm, the expansion of metallic tubes induced by inside head-on hitting two detonation waves has been numerically simulated with a modified finite-element hydrodynamic code. The simulated contours of deformed metallic tubes are in agreement with the results measured by flash X-ray cineradiography and high-speed photography. Especially, the swelling of expanded tubes at the place of two detonation waves hitting has been properly predicted. Some factors affecting tube movements can be analyzed with the simulation method.

Key words: mechanics of explosion; detonation wave; ALE algorithm; metallic tube

* Corresponding author: ZHANG Shi-wen
Telephone: 0816-2493874