

文章编号: 1001-1455(2004)05-0425-06

对碰波作用下金属圆管材料参数 对其运动特征影响的数值模拟*

张世文, 刘仓理, 华劲松

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 基于两点起爆实验, 采用动力学有限元程序, 在不考虑圆管破裂的前提下, 详细分析了同一炸药爆轰下金属圆管各材料力学参数对其运动的影响规律。计算结果表明: 弹性模量越大, 泊松比越大, 金属圆管的膨胀速度越大, 但它们对圆管膨胀的位移和速度影响极小, 在工程中可以忽略; 屈服应力对金属圆管的运动有一定影响, 屈服应力越大, 对碰部位的鼓包范围越宽, 鼓包峰值越小, 但圆管各处的膨胀量均落后于屈服应力较小的情况; 密度对圆管运动有较大影响, 密度越大, 受鼓包影响范围越宽, 鼓包峰高越小。

关键词: 爆炸力学; 运动规律; 有限元; 金属圆管; 爆轰波

中图分类号: O383 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 引言

从 20 世纪 40 年代开始, R. W. Gurney^[1] 和 G. I. Taylor^[2] 对内部爆炸加载金属圆管的膨胀与断裂进行了研究, 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, 这些工作多数研究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粗略研究较多, 韩长生等^[6]、王德生等^[7] 为推迟两端起爆作用下金属圆管断裂时间, 采取在对碰部位加铝内垫套的结构措施, 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。S. Manjit^[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。而在数值模拟方面, 一端起爆的计算与实验大多吻合较好, 而对于两端同时起爆情况, 特别是在对碰部位, 或不能计算出鼓包现象, 或鼓包计算结果与实验差别较大。张世文等^[10] 对两端起爆下的金属圆管运动规律进行了数值模拟, 无论是爆轰波运动图像还是金属圆管对碰部位的鼓包情况, 计算结果与高速摄影和 X 照相技术实验结果均吻合较好。本文中打算在此计算方法下, 通过数值模拟方法分析材料各参数在金属圆管运动过程中所起的不同作用及影响大小。

2 影响圆管运动规律的材料参数讨论

采用理想流体弹塑性本构模型能够较好地反映爆轰条件下材料的力学特性。流体弹塑性波理论是沿着两个不同的途径发展起来的: 一是在较低载荷下的线弹性波理论基础, 随载荷强度增加逐步考虑塑性变形, 进而再考虑非线性弹性影响; 二是把很高压力下的固体冲击波理论及弹塑性剪切变形的影响, 推广到次高压非线性波理论中去。流体弹塑性模型通常表述为两部分: 描述体积变化的球量部分(容变律)和描述形状变化的偏量部分(畸变律)。在爆炸高压下, 实验研究发现畸变律中包含最基本的两个材料特性参数, 即表征材料抗弹性畸变特性的剪切弹性模量 G 和表征材料抗塑性畸变特性的屈服强度 Y 。容变律中最重要的参数为体现材料抗容变能力的体模量 K ^[11]。在不考虑容变律与畸变律的耦合作用下, 泊松比 ν (在材料的变形过程中, 始终将泊松比 ν 作为不变常数)、剪切弹性模量 G 和体模

* 收稿日期: 2003-09-01; 修回日期: 2004-02-24

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。

量 K 、杨氏弹性模量 E 均可通过下式相互换算^[12]

$$E = G \frac{3\bar{\lambda} + 2G}{\bar{\lambda} + G}, \quad \nu = \frac{\bar{\lambda}}{2(\bar{\lambda} + G)}, \quad \bar{\lambda} = \rho_0 c_0^2 - \frac{2G}{3}, \quad K = \rho_0 c_0^2 \quad (1)$$

式中: c_0 为材料体声速。

但是, K 和 G 一般都是应变或应力的函数, 材料的体模量 K (或杨氏模量 E) 和 G 均为非线性。在数据不足的情况下以及次高压载荷作用下, 工程中常忽略压力对它们的影响。本文中将通过改变弹性模量 E 、泊松比 ν (间接改变剪切模量 G), 分析两参数对金属圆管运动规律的影响。同时, 改变参数有以下目的: 第一, 不同参数代表不同材料, 可以通过此方法分析其它材料在相同载荷作用下的运动规律; 第二, 参数的适当改变也间接体现了他们对压力的依赖关系; 第三, 材料的力学参数在动态加载下特别是冲击加载条件下测试精度并不太高。通过适当改变参数, 分析不计压力的影响或参数测试误差 (比如弹性模量、泊松比的测试结果均有一定的误差) 是否会对整个圆管的运动造成严重影响。

材料的屈服应力 Y 作为独立于上述参数的变量, 无论是 Johnson-Cook 模型或是 SCG (Steinberg-Cochran-Guinan) 模型, 均表明 Y 不是一成不变的, Johnson-Cook 模型体现了 Y 与应变 ϵ 、温度 T 和应变率的关系, SCG 模型则体现了 Y 与应变 ϵ 、温度 T 和压力的关系。因此, 采用某一给定的动态屈服应力 Y 能否较好地模拟圆管的运动规律, 值得进一步探讨和分析。另外, 屈服应力还是反映不同材料抗塑性变形能力的重要指标, 通过变化屈服应力, 可以分析它对金属圆管运动规律的影响。

本文中还将分析材料密度对圆管运动规律的影响。

3 计算结果分析

3.1 不同的弹性模量

计算模型 (本文中采用三维模型) 及炸药和金属材料的参数参见文献 [10]。由于文献 [10] 计算与实验结果相当吻合, 因此将在此基础上在合理的物理现象范围内变换参数分析它们对金属圆管运动的影响规律。

78 钨弹性模量 $E = 378.23 \text{ GPa}$, 取弹性模量为 $0.25E$ (94.5575 GPa , 接近铝合金弹性模量)、 $0.5E$ (189.115 GPa , 接近钢的弹性模量)、 E 、 $2E$ (756.46 GPa , 超硬金属), 分析不同弹性模量对圆管运动规律的影响 (其余参数为 78 钨参数)。

图 1 为不同弹性模量对碰部位的 $R-t$ 和 $v-t$ 曲线, R 、 v 分别为圆管的膨胀位移和速度。由图可以看出, 不同弹性模量对金属圆管的膨胀影响较小, 也就是说, 弹性模量 (基本覆盖大于铝合金弹性模量的金属) 对此类问题并不敏感, 即使模量相差较大, 对圆管的位移和速度影响仍很小。由此可以认为, 在计算过程中将弹性模量视为定值仍可很好地描述爆轰冲击下圆管的运动规律。这是因为, 模量的改变只会影响应力波波速, 从而影响力波在圆管壁厚方向来回反射的振荡周期, 弹性模量越大, 振荡频率越高。应力波经过几个来回反射后很快达到均匀化, 管壁沿厚度方向的应力和速度趋于一致, 于是圆管相当于刚体结构在外加载荷下飞行, 飞行过程中只受到环向应力 (其值等于屈服应力) 的约束, 弹性模量不

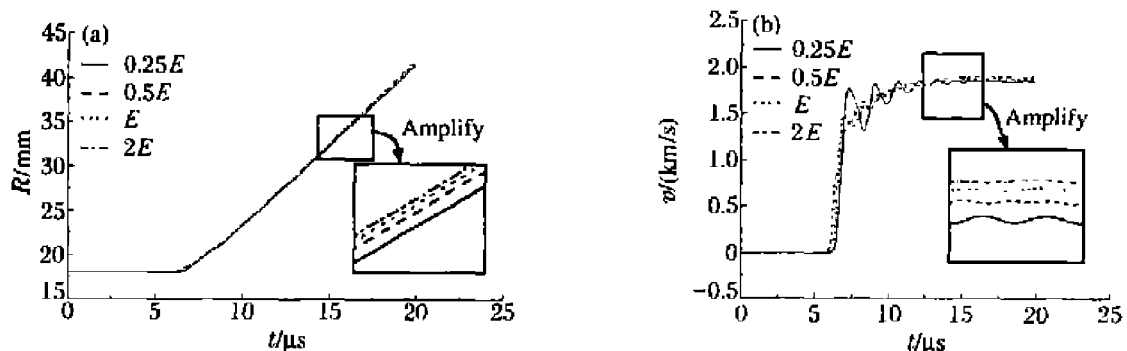


图 1 不同弹性模量对碰部位 $R-t$ 和 $v-t$ 曲线

Fig. 1 $R-t$ and $v-t$ curves of impacting place under different Young's modulus

再起作用,因此参数 E 对圆管的位移和速度影响仍很小。但是,当管壁较厚或考虑材料的损伤(比如层裂等)过程时,弹性模量的影响则另当别论。

从图 1 还可看出,弹性模量越大,圆管膨胀位移和速度仍有增加的趋势。图 2 为不同弹性模量下对碰部位圆管内壁塑性应变-时间曲线,由图可知,弹性模量越高,塑性应变越小,消耗的塑性功越少。在提供相同能量的前提下,金属圆管的速度随弹性模量的增加而增加。随着弹性模量的增加,各塑性应变-时间曲线之间的差别越来越小,当模量取为 E 、 $2E$ 时,两条塑性应变-时间曲线的差别可以忽略不计。从速度-时间曲线(图 1(b))和塑性应变-时间曲线(图 2),均可看出应力波在壁厚方向来回传播引起的速度振荡和塑性变形的阶跃递增,尽管如此,由于塑性变形只占很小一部分,因此对圆管的运动不造成大的影响。

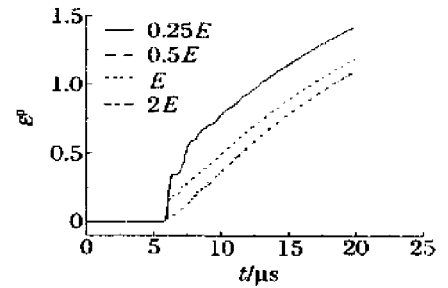


图 2 不同弹性模量对碰部位圆管内壁塑性应变-时间曲线
Fig.2 Plastic strain-time curves in the inside wall of the cylinder under different Young's modulus

3.2 不同的泊松比

分别取泊松比为 0.25、0.35、0.45、0.48,分析不同泊松比(间接改变剪切模量 G)对计算结果的影响(其余参数为 78 钨参数),图 3 为不同泊松比计算结果。

由图 3 可以看出,泊松比的变化对 $R-t$ 和 $v-t$ 曲线影响较小,在计算过程中对泊松比的精度要求可以适当放宽。不过,仍可从图中看出影响趋势:泊松比越大,金属圆管的径向膨胀速度越大。泊松比越大,储存弹性应变能的本领相对越强,由此产生的塑性变形反而较低(比如橡胶($\nu=0.47$)和金属铅($\nu=0.42$)),消耗的塑性功较低,随着应力波的回反射达到均匀化,储存的弹性应变能最终转化为飞行动能,于是随泊松比的增加,圆管的膨胀速度也稍有增加。

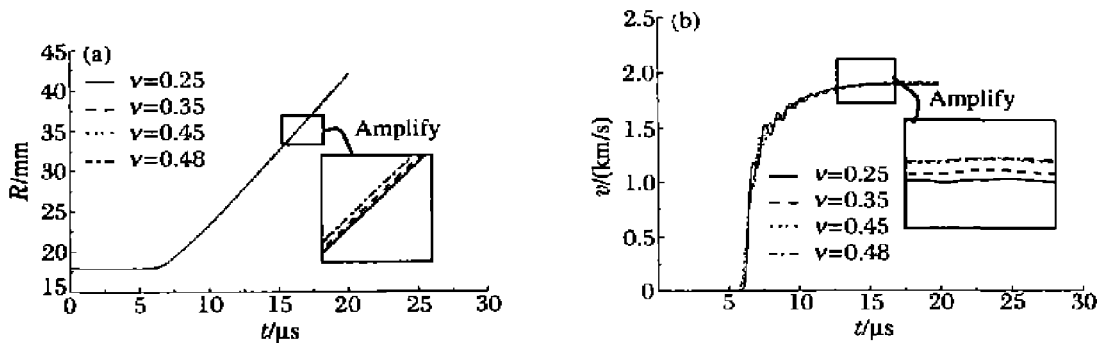


图 3 不同泊松比对碰部位 $R-t$ 和 $v-t$ 曲线

Fig.3 $R-t$ and $v-t$ curves of impacting place under different Poisson ratio

3.3 不同的屈服应力

分别取屈服应力为 0.13、0.67、0.85、1.20、1.70、2.20、3.40GPa,分析不同屈服应力对计算结果的影响(其余参数为 78 钨参数),图 4(a)、(b)为不同屈服应力情况下对碰部位的 $R-t$ 曲线和 $v-t$ 曲线。

由图 4 可以看出,随着屈服应力的增加,对碰部位的膨胀速度在相同时刻有减小的趋势,达到最大速度的时间随屈服应力的增加而逐渐提前,这可以通过对碰部位受力示意图 5 来解释。

由图 5 可知,对碰部位微元段,不单受到内压 p 的作用,还受到轴向力 $N(Y_0)$ 的作用。很明显, $N(Y_0)$ 正比于屈服应力,屈服应力越高, $N(Y_0)$ 越大,其在径向方向的分力越大,对微元段沿径向方向飞行的阻力越大,造成径向速度的减小量越大。由于力的相互作用,也带动相近微元段的径向速度的增加,因此鼓包范围有所扩大,鼓包峰值下降。图 6 为炸药起爆 $10\mu s$ 时刻不同屈服应力对应的金属圆管鼓包情况,其中 L 为轴向坐标。从图中可以看出,屈服应力越大,对鼓包的自我平滑能力越强。但是应该看到,即使屈服应力相差几百兆帕,对鼓包的影响在工程范围内仍可接受(比如对同一材料测试的屈服应力的精度不高,只要差别不大,对结果影响可以忽略),对于屈服应力相差较大的材料(或是材料屈

服应力随应力变化极大的情况), 这一影响必须考虑。

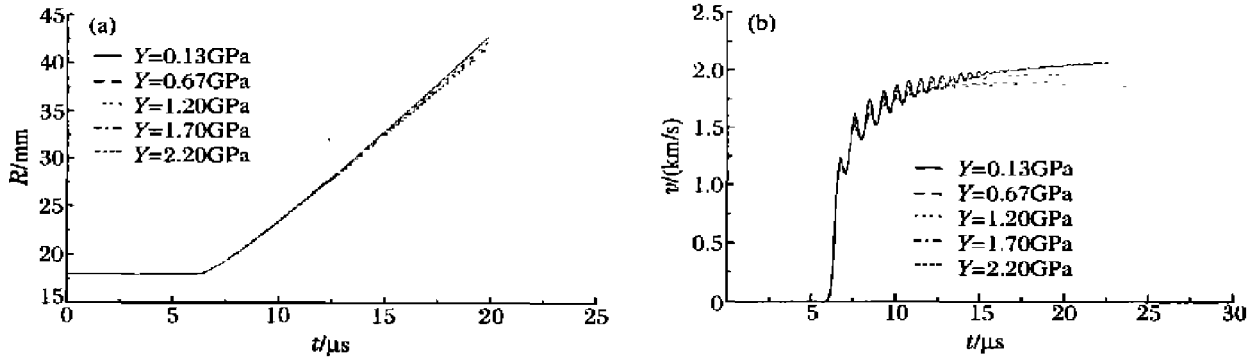


图 4 不同屈服应力对碰部位的 $R-t$ 和 $v-t$ 曲线

Fig.4 $R-t$ and $v-t$ curves of impacting place under different yield stress

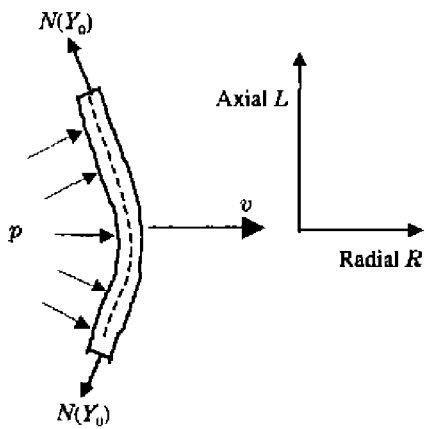


图 5 对碰部位受力示意图

Fig. 5 The forces scheme on the impacting place

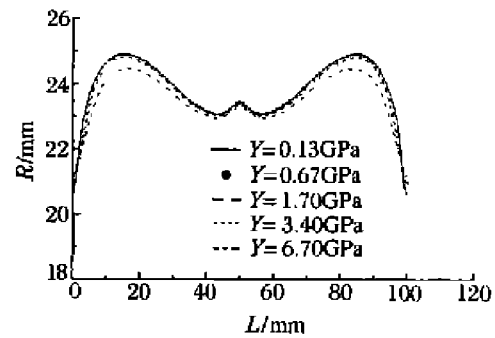


图 6 $10\mu s$ 时刻不同屈服应力对应的 $R-L$ 曲线

Fig. 6 The outer contours of Metallic tube at $10\mu s$ under different yield stress

尽管有力的相互作用, 屈服应力越大, 对碰部位带动相近微元段的径向速度的增量越大, 但是, 这种增加并不会使相近微元段的膨胀量超过屈服应力较小的情况, 也就是说, 屈服应力较大时, 圆管的运行将全面落后于屈服应力较小时情况。图 7 为屈服应力为 0.13、1.70、6.70GPa 时 10、12、15、 $18\mu s$ 四个时刻的圆管鼓包情况。由于圆管各部位在爆炸加载下几乎都进入塑性变形阶段, 因此各部位均消耗一定的塑性功, 从而导致当地的运动速度降低, 其降低程度与屈服应力大小成正比, 屈服应力越大, 消耗的塑性功越多。随着时间的推移, 屈服应力较大的金属圆管与屈服应力较小的金属圆管位移差距越来越大。这明显不同于弹性模量和泊松比对金属圆管运动规律的影响, 如图 8 所示, 弹性模量和泊松比的改变基本不会改变金属圆管在特定时刻的整体飞行姿态。

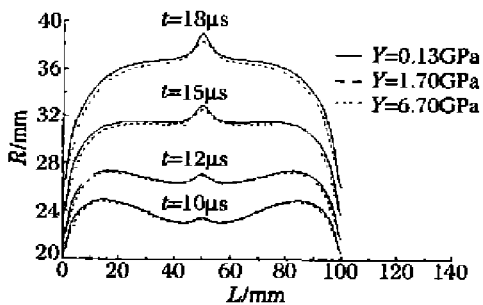


图 7 不同时刻不同屈服应力对应的 $R-L$ 曲线

Fig. 7 The outer contours of Metallic tube at different time under different yield stress

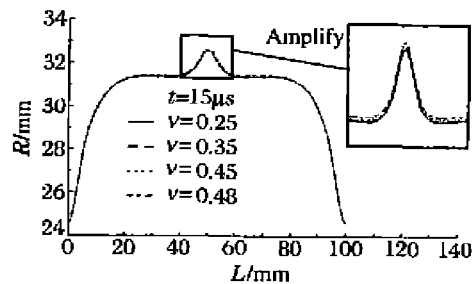


图 8 不同泊松比对应的 $R-L$ 曲线

Fig. 8 The outer contours of Metallic tube under different Poisson ratio

3.4 不同的密度

78 钨密度 $\rho_0 = 15.73 \text{g/cm}^3$, 分别取密度为 $\rho_0/3$ (5.243g/cm^3 , 某种合金)、 $\rho_0/2$ (7.865g/cm^3 , 接近钢的密度)、 ρ_0 三种情况进行计算。

图 9 为不同密度的金属圆管在 $12 \mu\text{s}$ 时刻的轮廓图像, 同一时刻密度越大, 膨胀量越小, 经过对密度为 ρ_0 、 $\rho_0/2$ 的 $R-L$ 曲线的平移处理, 发现密度越大, 圆管各点的膨胀量之差越小, 波形超前量越小。图 10 为 $18 \mu\text{s}$ 时刻不同密度时的轮廓对比图像, 从图中可以看出, 密度越大, 受鼓包影响范围越宽, 鼓包峰高越小, 波形的自我调节能力越强。

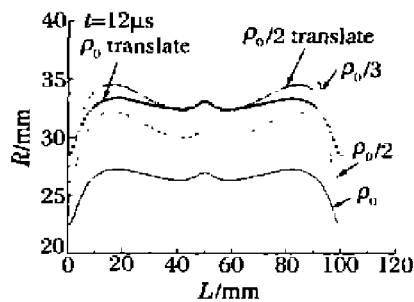


图 9 不同密度对应的 $R-L$ 曲线

Fig. 9 The outer contours of Metallic tube under different density

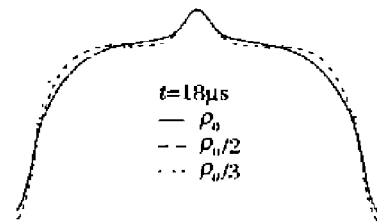


图 10 不同密度对应鼓包图像

Fig. 10 The outer contours of Metallic tube under different density

4 结 论

在对两点起爆实验进行数值模拟的基础上, 采用动力学有限元程序, 分析了金属圆管材料力学参数对其飞行姿态的影响规律。尽管没有考虑带损伤模型的数值模拟, 但由于在工程问题中常要求或希望避免破裂和层裂的发生, 因此研究仍具有现实意义。针对不同材料的金属圆管实验, 其结果通常是多种材料参数综合结果, 难以从实验上分清各种参数的独立影响, 因此本文的分析有助于对材料的选取。

通过对数值模拟计算结果的分析表明:

(1) 在不考虑圆管破裂的前提下, 弹性模量越大, 泊松比越大, 金属圆管的膨胀速度越大, 但它们对圆管运动影响较小, 在工程中可以忽略。

(2) 屈服应力对金属圆管的运动有一定影响, 屈服应力越大, 对碰部位的鼓包范围越大, 鼓包峰值越小, 圆管各处的膨胀量均落后于屈服应力较小的情况; 但是应该看到, 即使屈服应力相差几百兆帕, 对鼓包的影响在工程范围内仍可接受 (比如对同一材料测试的屈服应力的精度不高, 只要差别不大, 对结果影响可以忽略), 对于屈服应力相差较大的不同材料, 或是材料屈服应力随应力变化极大的情况, 这一影响必须考虑。

(3) 密度对圆管运动有较大影响, 密度越大, 受鼓包影响范围越宽, 鼓包峰高越小, 金属圆管自我调节波形的能力越强。

参考文献:

- [1] Gurney R W. The Initial Velocity of Fragments from Bombs, Shells and Grenades [R]. BRL report, 1943: 450.
- [2] Taylor G I. Fragmentation of tubular bombs [A]. Science Papers of Sir G I Taylor [M]. London: Cambridge University Press, 1963, 3(44): 387—390.
- [3] Martineau R L, Anderson C, Fred. A Viscoplastic Model of Expanding Cylindrical Shells Subjected to High Explosive Detonations [R]. CONNF-981009, 1998.
- [4] Martineau R L, Anderson C A. An Explicit Model of Expanding Cylindrical Shells Subjected to High Explosive Detonations [R]. 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]. Schmidt S C, et al. Shock Compression of Condensed Matter—1991[C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V, 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] 张世文, 华劲松, 刘仓理, 等. 金属圆管内爆轰波的相互作用效应的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 219—225.
- ZHANG Shi-wen, HUA Jin-song, LIU Cang-li et al. Research in numerical simulation on the effect under two detonation waves impacted in metallic tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 219—225.
- [11] 王礼立. 爆炸力学数值模拟中本构建模问题的讨论[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 97—104.
- WANG Li-li. On constitutive modeling in numerical simulation of explosion mechanics[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 97—104.
- [12] 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.

Research in numerical simulation on the effect of metallic tube material parameters under two detonation waves impacted

ZHANG Shi-wen^{*}, LIU Cang-li, HUA Jin-song
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: The effect under two detonation waves impacted in metallic tube is numerically simulated with a three-dimensional model. The simulation results of the deformation process, especially the contour of metallic tube impacting distribution are in good agreement with the pulsed X-ray photograph and the high-speed image. By ignoring the metallic tube rupture, the regular pattern of the transient motion effected by the parameters of the tube are analyzed. Simulation with different tube parameters shows that: (1) The effect of the growing of Young's modulus and Poisson ratio ν on the tube expansion velocity is small, which is ignored in engineering application; (2) Yield stress affects the expansion velocity and the outer contours of metallic tube in certain degree, the height of the tube protuberance goes down with the yield stress growing; (3) the density affects velocity and outer contours of metallic tube seriously, the height of tube protuberance goes down with the density growing.

Key words: mechanics of explosion; motion regular; FET (finite element); metallic tube; detonation wave

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