文章编号：1001-1455(2014)01-0075-05

内聚滑移爆轰加载下金属圆管压缩过程的工程分析*

刘文祥，谭书舜，刘冠兰
（西北核技术研究所，陕西 西安 710024）

摘要：对内聚滑移爆轰加载下圆管压缩运动过程进行工程分析，分析解与数值模拟结果吻合。利用工程模型得到了不同管道参数（包括内径、厚度）下管道封闭所需要的炸药量和封闭时间表达式，可为相关研究工作提供参考。

关键词：爆炸力学；管道压缩；工程模型；内聚滑移爆轰
中图分类号：O382.3　　**国标学科代码**：1303520　　**文献标志码**：A

美国 Lawrence Livermore 国家实验建立了 JASPER 装置[1]，该装置的一项关键技术是超快速密封技术，利用包裹在管道外面的炸药爆轰产生向内聚合的爆炸载荷压缩圆管，进而实现管道在 100 μs 内封闭。内聚滑移爆轰压缩圆管还在金属管道焊接等领域得到应用[2-5]。工程分析在相关研究中起着非常重要的作用，可以提供快捷的参考，也可以加深对物理问题的认识。针对内聚爆轰压缩管道的研究较少，邵炳璜等[6]做了这方面的工作，但管道压缩量较大时，分析解与数值模拟结果、实验结果相差较大。

本文中，对内聚滑移爆轰加载下圆管压缩运动过程进行工程分析，分析结果由数值模拟结果验证。

1 工程模型

1.1 模型假设

图 1 为内聚滑移爆轰压缩圆管的示意图，管道外面均匀包裹炸药，炸药由端部截面起爆，炸药进行滑移爆轰，压缩管道进行封闭。设 r_{00} 为炸药初始外半径，r_{10} 为管壁的初始外半径，r_{20} 为管壁的初始内半径，r_1、r_2 为管壁的流动外半径和内半径。ρ_1 为管道材料密度，ρ_0 为炸药装药密度。

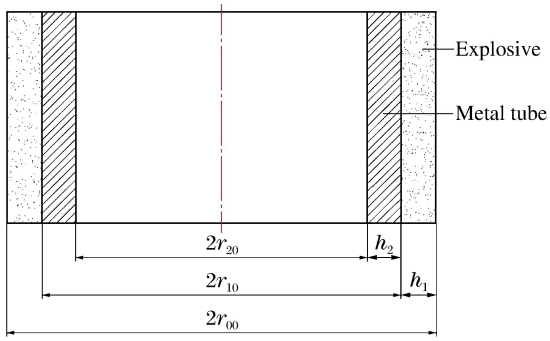


图 1 内聚滑移爆轰压缩管道示意图
Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical tube compression movement under inward sliding detonation

内聚滑移爆轰压缩圆管工程模型的假定条件：(1)忽略应力波在管道壁内的传播和反射过程，即管壁内应力波传播时间为零；(2)管道外壁爆炸载荷随时间呈指数衰减，衰减特征时间与管壁最大径向速度呈指数减少的关系；(3)仅考虑管道材料径向运动，忽略轴向运动；(4)管道材料不可压缩，为理想刚塑性材料，在管道压缩瞬间周向应力达到屈服值；(5)管壁内速度呈线性分布；(6)管道不发生层裂。

1.2 管道外壁载荷

炸药进行稳定爆轰后，炸药 CJ 爆轰压力为：

* **收稿日期**：2012-07-04；**修回日期**：2012-08-28
作者简介：刘文祥（1982— ），男，博士研究生，助理研究员。

$$p_{\mathrm{CJ}}=\frac{\rho_0 D^2}{\gamma+1} \tag{1}$$

问题的处理遵循从简单到复杂的方法。首先假设管道壁为刚性壁面,以便得到未受管壁运动干扰情况下的管壁外载荷情况。根据爆炸载荷衰减特征,认为管道外壁面爆炸载荷随时间呈指数衰减,则管壁外压力和冲量可以表示为:

$$p_{\mathrm{p}}(t)=p_{\mathrm{CJ}}\mathrm{e}^{-t/T_0} \tag{2}$$

$$I_{\mathrm{p}}(t)=2\pi r_1 p_{\mathrm{CJ}} T_0(1-\mathrm{e}^{-t/T_0}) \tag{3}$$

式中:T_0 为衰减特征时间。通过数值模拟研究发现,衰减特征时间与装药厚度的关系为线性关系:

$$T_0=a(r_{00}-r_{10}) \tag{4}$$

式中:a 为常数,只与炸药性质有关。

爆炸载荷驱动下管道向内压缩,这使衰减特征时间 T_0 更短。由于管道壁运动速度在极短时间(相对于管道密闭时间来说)内到达峰值,可以认为衰减特征时间与管道外壁速度峰值存在关联,修正后的衰减特征时间为:

$$T_0'=T_0(d+b\mathrm{e}^{-v_{\max}/c}) \tag{5}$$

式中:b、c 和 d 为常数。利用管道外壁最大速度对爆炸载荷衰减特征时间进行修正,修正公式系数与管道材料有关。

1.3 管壁速度

设管道壁内速度呈线性分布,存在关系:

$$v(r,t)=\frac{v_1(t)+v_2(t)}{r_1(t)-r_2(t)}r-\frac{v_1(t)r_2(t)+v_2(t)r_1(t)}{r_1(t)-r_2(t)} \tag{6}$$

式中:$v_1(t)$为管壁压缩过程中外表面的速度,$v_2(t)$为管壁内表面的速度。

由管道材料的不可压缩性得到:

$$r_{10}^2-r_{20}^2=r_1^2-r_2^2 \tag{7}$$

进而得到:

$$v_1 r_1=v_2 r_2 \tag{8}$$

由式(6)、(8),得到管道的动量表示式:

$$I_{\mathrm{m}}(t)=\int_{r_1(t)}^{r_2(t)}2\pi r\rho u(r,t)\mathrm{d}r=2\pi\rho v_2(t)\left[\frac{(r_1^2(t)-r_2^2(t))(r_1(t)+r_2(t))}{2r_1(t)}-\frac{r_1^3(t)-r_2^3(t)}{3r_1(t)}\right] \tag{9}$$

1.4 管壁内部应力

爆炸载荷加载下管道获得动量,这些动量在后续的管道压缩过程中不断被管道变形的内部应力(主要是周向应力)消耗掉。

假设管道材料为理想刚塑性材料,管道周向应力瞬间达到材料屈服强度 Y_0。为了简化问题,可以把内部应力等效为虚拟的、加载在管道外壁的载荷,方向与爆炸载荷相反:

$$p_Y=Y_0(r_1-r_2)/r_1 \tag{10}$$

内部应力消耗的管道动量为:

$$I_Y(t)=2\pi r_1 Y_0(r_1-r_2)t/r_1 \tag{11}$$

1.5 动量守恒关系

依据动量守恒关系,爆炸载荷施加在管道外壁的冲量等于管道的动量与管道内部应力消耗的动量之和。求解式(1)~(12),可得出管道的运动过程:

$$I_{\mathrm{p}}(t)=I_Y(t)+I_{\mathrm{m}}(t) \tag{12}$$

2 数值模拟验证及分析讨论

对爆炸压缩管道的过程进行数值模拟,采用二维轴对称模型(见图 2)。模型中炸药为 PETN,爆轰

产物采用 JWL 状态方程，初始密度 $\rho_0=1\ 770\ \mathrm{kg/m^3}$，$A=617\ \mathrm{GPa}$，$B=1.692\ 6\ \mathrm{GPa}$，$R_1=4.4$，$R_2=1.2$，$\omega=0.3$，比内能 $e_0=5.7\ \mathrm{MJ/kg}$。管道材料为紫铜，初始密度 $\rho_0=8\ 900\ \mathrm{kg/m^3}$，屈服强度为 120 MPa。管道采用拉氏网格，网格尺寸为 1.2 mm×1.2 mm，炸药和空气采用欧拉网格，网格尺寸为 1 mm×1 mm，爆炸产物、空气与管道之间相互作用采用流固耦合模拟。

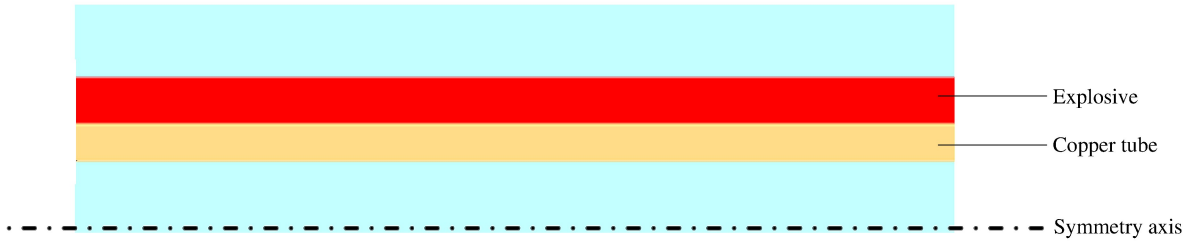


图 2　数值模拟模型

Fig. 2　Numerical model

图 3 为数值模拟和本文工程分析得到的管壁运动过程，v_i 为管道中部速度。数值模拟结果显示，管壁速度曲线存在高频振荡，这是由上升时间极短的爆炸波加载在管壁形成应力波、应力波在壁内来回反射引起的。数值模拟结果还显示，管道内壁速度为零之后外壁速度才为零，这是应力波到达内外壁的时间有先后造成的。工程模型忽略了应力波在管道壁内的传播和反射过程，因此管壁运动曲线不存在这种振荡，管内外壁速度同时为零。数值模拟结果中管壁速度曲线显示速度出现小于零的情况，这是数值模拟中管道内壁碰撞后反弹造成的。从图 3 中可以看出，数值模拟结果与工程分析结果基本吻合。

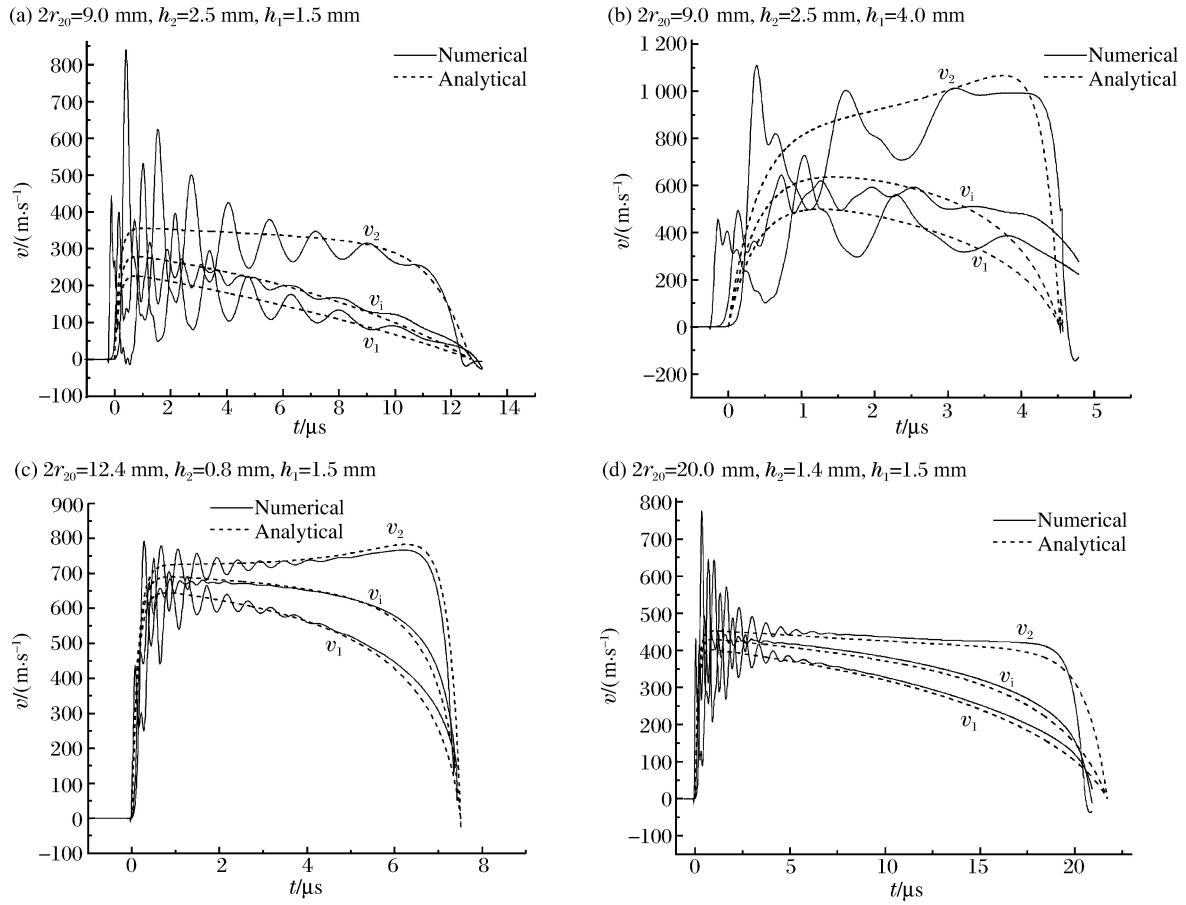


图 3　管壁运动过程的数值模拟结果和工程分析解

Fig. 3　Numerical results and analytical results of tube movement

通过工程模型可以快速得到不同参数管道封闭所需装药量以及管道封闭所用时间等，反过来也可以得到装药量与管道运动速度的关系。这里以内壁绝对径向撞击速度 500 m/s(单边内壁径向速度为 250 m/s)为标准，即认为该速度下管道有效封闭，管道封闭所需炸药量和管道封闭所用时间见图 4～5。

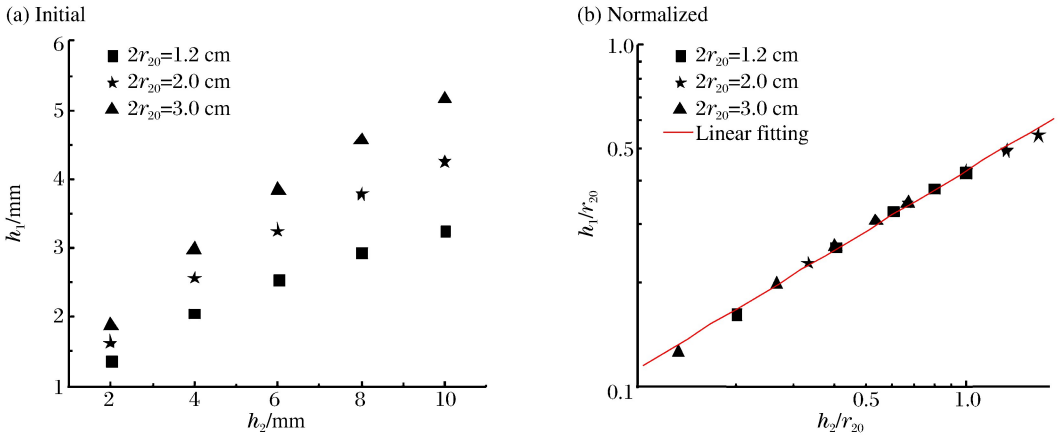


图 4 管道封闭所需炸药量

Fig. 4 Relationship between explosives needed to close tube and tube thickness

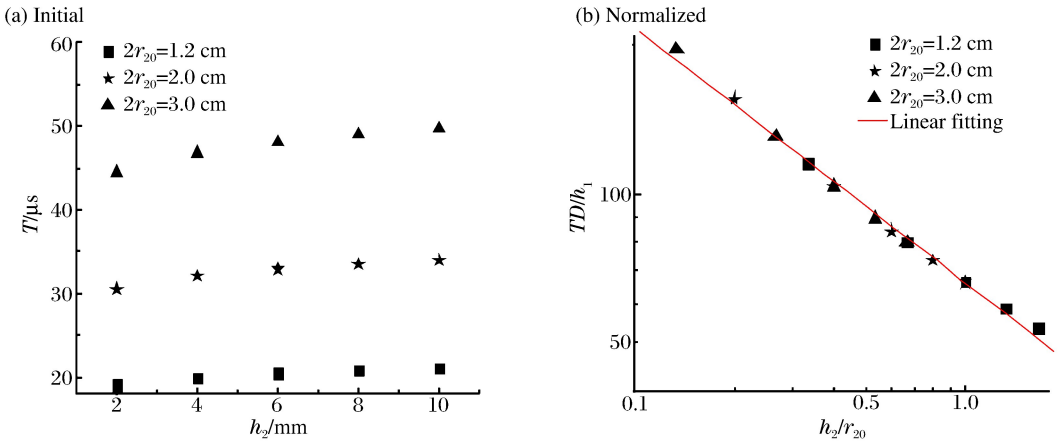


图 5 管道封闭所需时间

Fig. 5 Relationship between tube closing time and tube thickness

拟合数据，得到管道封闭所需炸药量和管道封闭所用时间的表达式为：

$$\frac{h_1}{r_{20}}=0.426\,4\left(\frac{h_2}{r_{20}}\right)^{0.581\,2} \tag{13}$$

$$\frac{TD}{h_1}=66.261\,3\left(\frac{h_2}{r_{20}}\right)^{-0.514\,09} \tag{14}$$

式中：h_1 为炸药厚度，h_2 为管道壁厚，r_{20} 为管道内半径，T 为管道封闭时间，D 为炸药爆速。

3 结 论

对内聚滑移爆轰压缩管道的管壁运动过程进行工程分析，并利用数值模拟进行了验证，通过分析可以得出以下结论：

(1)工程分析结果与数值模拟结果相吻合，验证工程模型是合理的，同时也说明模型的假设条件是物理过程中存在的真实条件或者近似条件。

(2)工程模型得到了不同管道参数下管道封闭所需炸药量和封闭时间的表达式，这些结论可作为相关研究的参考。

参考文献：

[1] Braddy R W, Homes N, Konrad C H, et al. Joint actinide shock physics experimental research (JASPER) facility overview[C]// 52nd Meeting of the Aeroballistic Range Association. Québec City, Québec, Canada, 2001.

[2] 隋国发,李金山,马贝,等.炸药量对双层圆管爆炸焊接影响的数值模拟[J].材料科学与工艺,2010,18(6):741-745.
Sui Guo-fa, Li Jin-shan, Ma Bei, et al. Simulation for the influences of explosive amount on explosive welding of two-layer tubes[J]. Materials Science and Technology, 2010,18(6):741-745.

[3] 陈军.滑移爆轰驱动金属圆管及对碰区的研究[D].四川绵阳:中国工程物理研究院,2001.

[4] 李雪梅,金孝刚,李大红,等.液体炸药滑移内爆加载下钢管的变形与层裂破坏研究[J].爆炸与冲击,2003,23(6):523-528.
Li Xue-mei, Jin Xiao-gang, Li Da-hong, et al. Deformation and spallation of cylindrical steel tube loaded by sliding implosion of liquid explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):523-528.

[5] 李雪梅,汪小松,王鹏来,等.内爆和柱壳条件下无氧铜的层裂特性[J].爆炸与冲击,2009,29(2):162-166.
Li Xue-mei, Wang Xiao-song, Wang Peng-lai, et al. Spall of cylindrical copper by converging sliding detonation [J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):162-166..

[6] 薛丙璜,张凯.爆炸焊接原理及其应用[M].辽宁大连:大连工学院出版社,1987.

An analytical model for compression process of cylindrical metal tube under inward sliding detonation *

Liu Wen-xiang, Tan Shu-shun, Liu Guan-lan

(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi, China*)

Abstract: By making some assumptions, an analytical model was presented to analyze the compression process of the cylindrical metal tube subjected to an inward sliding detonation. And the corresponding numerical simulations were carried out to verify the analytical results. The analytical results agreed well with the numerical ones. So by fitting the analytical data, two expressions were obtained for the explosive thickness needed to close the tube and the tube closing time, respectively, in which involving different tube parameters such as tube inner diameter and wall thickness.

Key words: mechanics of explosion; tube compression; analytical model; inward sliding detonation

* Received 4 July 2012; Revised 28 August 2012

Corresponding author: Liu Wen-xiang, wxliu@ustc.edu

(责任编辑　丁　峰)