DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0496-05

滑移爆轰密封的初步数值模拟*

袁 帅,柏劲松,张汉钊,李 平
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 利用有限元方法,通过数值模拟得到爆炸密封铝、铜封管密封所需炸药药量;在此基础上,利用光滑粒子法对爆炸密封模型进行优化,分析炸药、保护外壳等形状等对封管密封性能的影响。基于对计算结果的分析,确定实验模型。实验回收结果和数值模拟结果符合较好,表明数值模拟结果对实验设计有指导作用。

关键词: 爆炸力学;光滑粒子方法;爆炸密封;封管;滑移爆轰
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

利用常规密封技术可以实现机械设备在秒量级的密封。而实际工程应用中需要毫秒级、微秒级的快速密封技术,因此发展此项实验技术就显得十分迫切。利用滑移爆轰内爆压缩圆管实现管道密封的技术,由于管内壁产生层裂现象,影响封管密封闭合的完整性、气密性;冲击波在中轴线附近的对称碰撞,容易产生射流,存在屈曲不稳定性,也使得密封更困难。E. L. Ruden 等[1]利用爆炸驱动钛合金杵体从相反方向碰撞黄铜管实现密封,用内径 8 mm 的黄铜管,相对泄漏率可达到 10^{-9} h^{-1}。

C. H. Conrad 等[2]利用 joint actinide shock physics experiment research(JASPER)装置在 2001 年开始研究超铀元素及其他有毒材料在高温、高压、高应力和高应变率等极端条件下的状态方程,取得了较好的结果,同时没有有毒材料泄露。图 1 为 C. H. Conrad 等[2]首轮正式实验的爆炸密封 X 光照片和密封件剖切照片,由图可知爆炸密封中心对撞区虽然存在密封缺陷区域,但由实验结果得知,密封管的密封效果非常好,达到了微秒量级的密封需求。

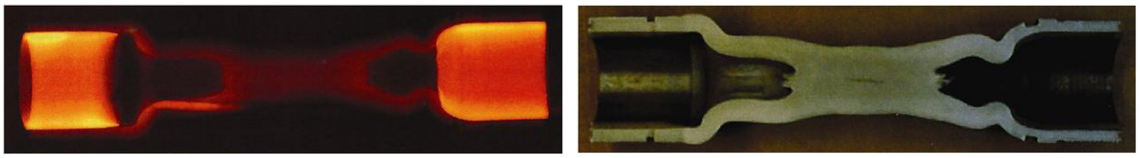

图 1 JASPER 爆炸密封照片[2]

Fig. 1 The picture of blast shutter with JASPER[2]

陈军等[3]设计的火药燃烧气体推动高压聚乙烯柱塞密封的实验装置,可以实现毫秒级快速密封,且密封性好;火药燃烧气体被完全密封在装置本体内,工程防护结构简单,具有很高的实用价值。而关于滑移爆轰驱动封管达到密封的报道很少。

基于实验设计和研究工作需求,本文中通过数值模拟研究炸药爆炸驱动封管密封模型,探讨装药量及形状和保护外壳形状对封管密封性能的影响,在分析数值模拟结果的基础上,确定实验模型。并在实验完成后,将实验结果和数值模拟结果进行比较。

1 计算方法的确定

基于爆炸密封模型的物理、力学过程特性,整个物理、力学过程持续时间较长,材料变形很大,由于结构网格的拉格朗日方法一般不能计算大变形的物理过程,欧拉方法不能得到清晰的物质界面,而光滑

* **收稿日期**: 2014-03-31; **修回日期**: 2014-05-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(11372294)
第一作者: 袁 帅(1972—),男,硕士,工程师; **通讯作者**: 柏劲松,bjsong@foxmail.com。

粒子方法在计算大变形问题和得到物质界面问题都有较好的结果。综上所述，本文中选用光滑粒子法对爆炸密封模型进行数值模拟。

2　药量的确定

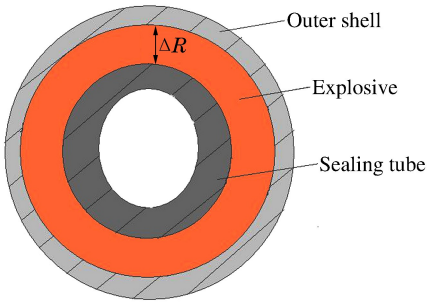

图 2 计算模型

Fig. 2 The model for simulation

由于爆炸密封模型中封管在密封时，封管材料的内壁发生对碰，所以利用封管材料对称碰撞的压力大于或等于其熔化压力，此时封管材料处于熔化状态，封管材料在冷却过程中发生凝固，从而达到更好的密封目的。

由文献[4-5]可知，实验得到铝和铜的冲击熔化压力分别约为 125 和 230 GPa。由 $p=\rho_0(c_0+\lambda v)v$ 可得到封管铝和铜达到冲击熔化压力的碰撞粒子速度 v 分别为 4.19 和 3.04 km/s。

确定炸药量的计算模型如图 2 所示，在外壳与炸药接触的圆周上均布 5 个点作为起爆点。炸药起爆后，爆轰产物驱动封管向内运动，某个时刻，封管内壁在爆轰产物驱动下相互碰撞，碰撞压力到达材料的熔化压力，使得材料熔化，在随后的过程中冷却凝固，从而达到密封目的。调节炸药的径向厚度 ，使得封管内壁上的点的速度在碰撞时达到由上文计算得到的速度值，从而确定炸药的药量。

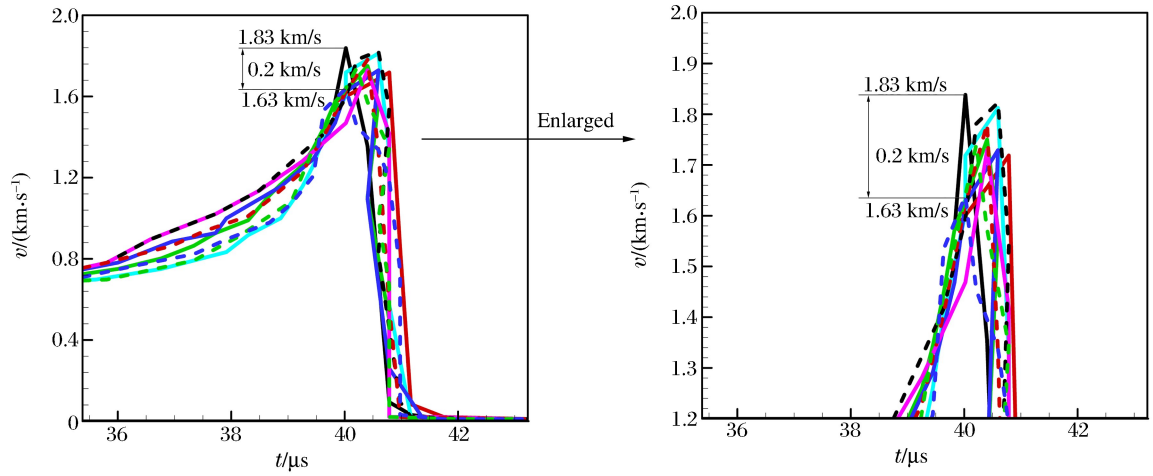

图 3 铝封管内壁上均布的 10 个位置的粒子速度历史曲线

Fig. 3 Particle velocity-time curves of ten points at the inwall of the aluminum sealing tube

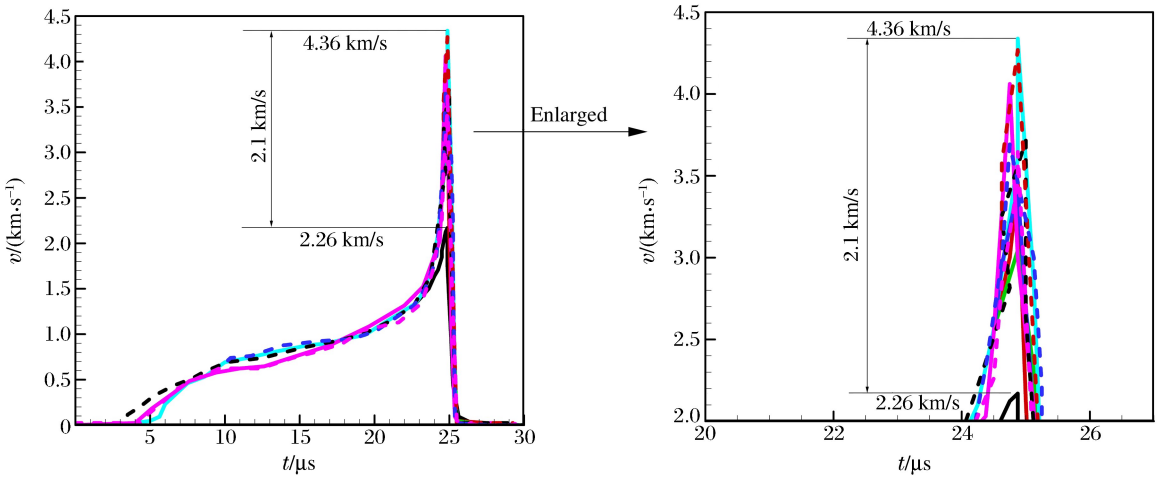

图 4 铜封管内壁上均布的 10 个位置的速度历史曲线

Fig. 4 Particle velocity-time curves of ten points at the inwall of the copper sealing tube

经过多次调节炸药径向厚度 ΔR，通过数值模拟得到了如图 3～4 所示的铝封管和铜封管内壁上均布 10 个位置的速度历史曲线。由图 3～4 可知，铝封管和铜封管的内壁相互碰撞时的速度都达到了上文计算得到的粒子速度值。又根据实验设计需要的密封段的长度，从而确定铝、铜封管密封需要的药量分别约为 80、150 g。由实验结果验证了计算结果的正确性。从而确定了 2 种封管需要的药量约为 80、150 g。图 5 给出了数值模拟得到的图像和实验回收样品照片，比较实验回收样品照片和数值模拟图像的外形和轮廓，确定计算结果基本正确，因此数值模拟结果可为实验设计提供参考。

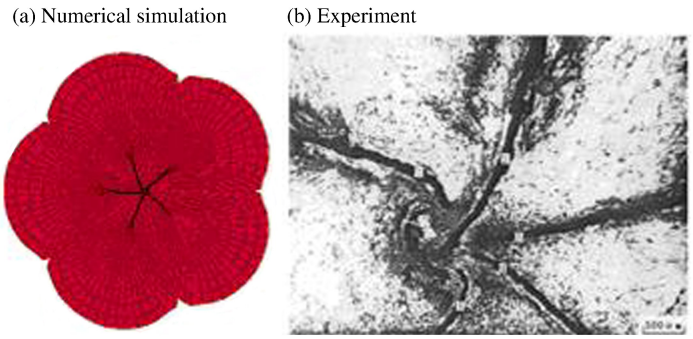

图 5 数值模拟得到的图像和实验回收样品的照片

Fig. 5 The image obtained by numerical simulation and the photo of the recoverd specimen in experiment

3 爆炸密封模型的计算

装药形状设计如图 6(a)所示，设计模型确定了图中 R_1、R_2 和 R_3 的值，需要优化的是 L_1、L_2、L_3 和 x 的值，通过多次数值模拟优化得到了图 6(b)和图 6(c)所示的铝和铜封管所需炸药的形状。

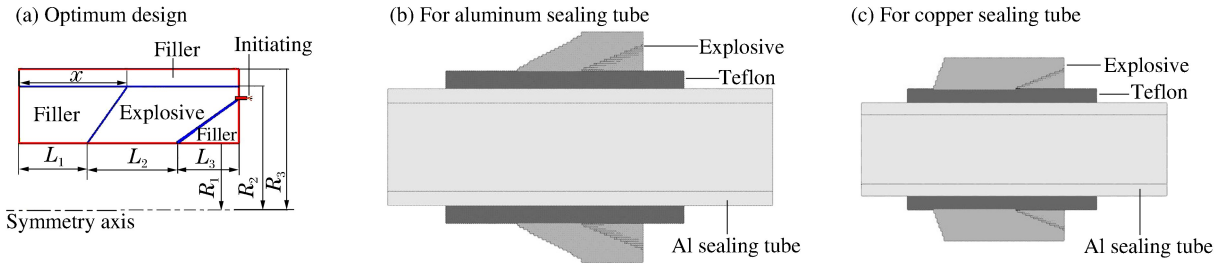

图 6 炸药形状的优化结果

Fig. 6 Optimization of explosive charge shape

起爆方式为堵盖与炸药接触面上半径为 4 cm 的圆周上均布 5 个起爆点。计算了多种炸药形状、保护外壳厚度模型，比较了各种模型的计算结果，确定优化后的数值模拟模型为图 7 所示的模型。模型分为封管(铜 T2 或铝 LY12)、端盖(45_steel)、聚乙烯(CH_2)填充部分、特氟龙(teflon)、炸药(粉状 TNT)、防护筒(45_steel)、圆套(LY12)、堵盖(LY12)和护板(LY12)，共 9 部分，除炸药外的材料参数如表 1 所示，表中 ρ_0 为密度，G 为剪切模量，Y_0 为屈服强度，T_m 为熔化温度。对 T2 、45_steel 和 LY12 采用 SG 本构模型，对特氟龙采用流体弹塑性模型，对 CH_2 采用流体模型。对炸药采用 γ 律状态方程计算爆轰产物压力，相关参数为：密度 $\rho=0.86$ g/cm^3，系数 $\gamma=2.04$，爆速 $D=4.0$ km/s，CJ 压力 $p_{CJ}=4.1$ GPa，初始比内能 $e_0=0.97$ J/mm^3。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	材料参数							状态方程参数		
	ρ_0/(g·cm^{-3})	G/GPa	Y_0/GPa	dG/dp	dG/dT	dY/dp	T_m/kK	c_0/(km·s^{-1})	λ	γ_0
T2	8.93	47.7	0.064	1.35	−1.798	3.396	1.79	3.94	1.489	2.02
LY12	2.703	27.6	0.29	1.8	−1.700	1.890 8	1.22	5.24	1.4	1.97
45_steel	7.9	77	0.34	1.74	−3.504	7.684	2.38	4.57	1.49	1.93
CH_2	0.915							2.901	1.481	1.64
Teflon	2.16	2.33	0.05					1.34	1.93	0.90

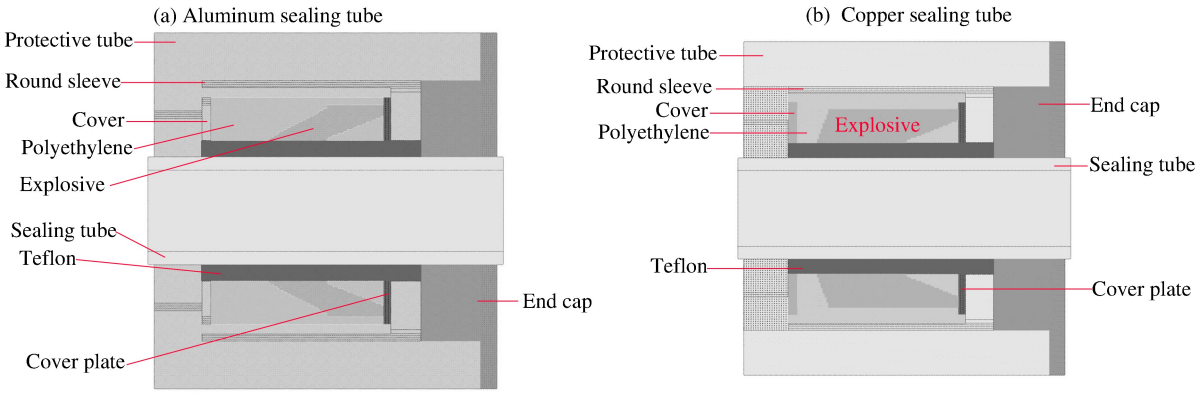

图 7　优化后的数值模拟模型

Fig. 7　Optimization of numerical simulation models

4　实验结果和计算结果的比较

4.1　铝封管的比较

图 8 为实验回收铝封管照片与数值模拟结果外形的比较。实验回收结果的轴向剖面表明：在封管的两端密封较好，中间部位有反弹的痕迹，而最终的结果是封管被拉断。计算结果同样表明了封管内壁碰撞后有反弹发生，在计算结束时同样表现为封管被轴向拉断。当然，实验回收结果为终态，而计算结果并非终态，而且这里仅比较回收结果和计算结果的外形。

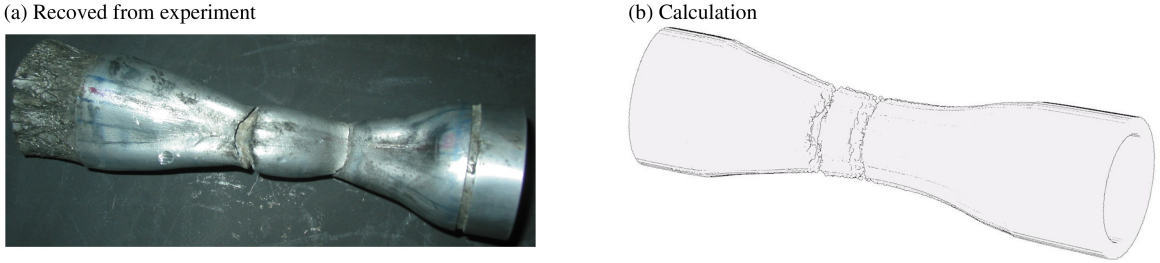

图 8　铝封管实验结果和计算结果的比较

Fig. 8　Comparison between simulation and experiment for the aluminum sealing tube

4.2　铜封管的比较

图 9 为铜封管实验回收封管外形与数值模拟结果及轴向剖面图像。由图 9 可知，实验回收结果和计算结果轮廓相似，而且铜封管的密封效果很好。

从铝、铜 2 种材料的实验和数值模拟密封效果可知，选择铜作为封管材料更合适，这与铜具有良好的金属延展性有关。

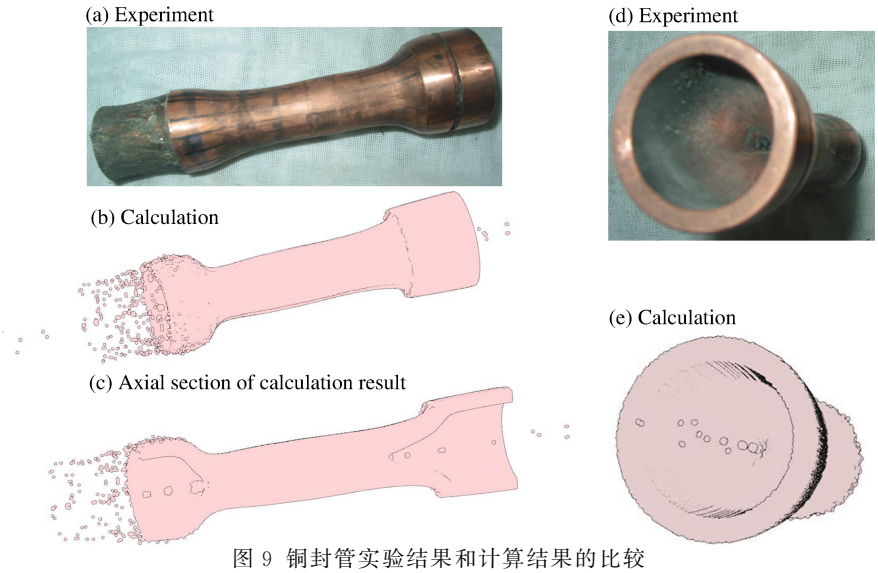

图 9　铜封管实验结果和计算结果的比较

Fig. 9　Comparison between simulation and experiment for the copper sealing tube

5 结 束 语

利用有限元方法,计算得到了爆炸密封 2 种封管(铝、铜)所需要的药量。在此基础上,采用光滑粒子法,对爆炸密封装置进行了三维数值模拟,得到的爆炸密封图像与实验回收结果比较一致。计算模型可为实验药量的确定和装置模型的优化设计提供参考,同时能够节省实验费用和实验时间等。

参考文献:

[1] Ruden E L, Gale D G. Explosively driven fast closing blast shutter[J]. Review of Scientific Instruments, 2000,71(10):3959-3961.

[2] Conrad C H, Miller J, Cowan M, et al. Joint actinide shock physics experimental research (JASPER) facility update[C]// 54th Meeting of the Aeroballistic Range Association. Santa Fe, New Mexico, USA, 2003.

[3] 陈军,张克明,蒲正美,等.火药气体驱动柱塞式阀门密封实验研究[J].爆轰波与冲击波,2003(3):100-112.

[4] McQueen R G, Fritz J N, Morris C E. The velocity of sound behind strong shock waves in 2024 Al[C]// Shock Waves in Condensed Matter—1983. 1984:95-98.

[5] Hayes D, Hixson R S, Mcqueen R G. High pressure elastic properties, solid-liquid phase boundary and liquid equation of state from release wave measurements in shock-loaded copper[C]// Shock Compression of Condensed Matter—1998. 1999:483-488.

[6] Steinberg D J. Equation of state and strength properties of selected materials[R]. LLNL, 1991.

[7] Los Alamos National Laboratory. Selected Hugoniots: LA-4167-MS[R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1991.

[8] Matuska D A. HULL user's manual: AFATL-TR-84-59[M]. US: Orlando Technology INC, 1984.

[9] Roger G F C, Mayhew Y R. Thermodynamic and transport properties of fluids[M]. 5th ed. Blackwell Publishing, 1994.

[10] Davis L L, Hill L G. ANFO cylinder tests[C]// Shock Compression of Condensed Matter—2001. 2002.

Preliminary simulation of blast shutter driven by glancing detonation

Yuan Shuai, Bai Jing-song, Zhang Han-zhao, Li Ping

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: The mass of explosive which the aluminum/copper cylinder shells were blasted shutter was found with finite element methods. And on the basis of this, the blast shutter models were simulated many times by the smoothed particle hydrodynamics method to achieve optimization. Then the experimental models were determined by comparing the simulation results. The experimental results agree with the simulation results. So the simulation results can be helpful for understanding the experimental results, and it saves the time and increases the efficiency.

Key words: mechanics of explosion; smoothed particle hydrodynamics method; blast shutter; sealing tube; glancing detonation

(责任编辑 张凌云)