

doi: 10.7690/bgzdh.2015.07.007

爆炸罐模拟仿真优化设计技术研究

陈慧能¹, 杜龙飞¹, 李鹏², 杨树彬¹

(1. 中国兵器工业第 213 研究所 6 室, 西安 710061; 2. 第二炮兵驻西安地区代表室, 西安 710066)

摘要: 针对目前对含能装置内部含能材料作用过程的模拟开展得不多的问题, 以爆炸罐结构为例进行仿真优化设计技术研究。利用 LS-DYNA 有限元软件对 2 种结构形式爆炸罐的作用过程进行模拟仿真计算, 研究分析爆炸罐罐内火炸药的作用过程、罐壁应力分布和变形, 及最大应力和变形所处的位置。以此为依据, 通过对 2 种结构形式爆炸罐的应力和变形进行分析得出爆炸罐的最佳结构形式, 并在此基础上提出应开展的研究方向。结果表明: 该方法能使含能结构的研制方法从工程估算、实验研究提升到数字模拟优化设计, 还能提供准确的应力分布和变形结果。

关键词: 爆炸罐; 优化设计; 模拟仿真; LS-DYNA

中图分类号: TJ510.3 **文献标志码:** A

Study on Optimize Design Technical with Numerical Simulation for Explosive Tank

Chen Huineng¹, Du Longfei¹, Li Peng², Yang Shubin¹

(1. No. 6 Department, No. 213 Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China;

2. Military Representatives Office of Second Artillery in Xi'an District, Xi'an 710066, China)

Abstract: Because of the problem about fewer to develop the research on numerical simulation of the function process of the energetic material in energetic device, the study was make here on the optimize design technical with numerical simulation for the explosive tank. The function processes of two styles explosive tank were numerically simulated with finite element code LS-DYNA in the paper. The analysis was down on the acting process of explosive in the tank, and the study on the stress distribution and the transformation of the tank wall at different moment were down and just as to the position of the maximum stress and the transformation. Upon this the optimize structure style was get through to compare the stress and transformation of two structures. On the basis of above, the need of developing researching faction was proposed. It was indicated that this method in the thesis not only to promote the study and manufacture of the energetic structure from the engineering estimating or testing manufacture to the optimize design technical with numerical simulation, but also to give the exact result of the stress distribution and the deformation of the explosive tank after working.

Keywords: explosive tank; optimize design; simulation; LS-DYNA

0 引言

爆炸罐的设计通常采用工程算法, 依靠经验公式和各种假设建立理论模型进行估算, 无法准确地分析罐壁受力状况, 对罐壁的结构设计误差较大。采用非线性动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对其作用过程进行模拟仿真计算, 则可以模拟爆炸罐内火炸药作用的全过程和各瞬态内压与罐壁的相互作用结果, 准确获知罐内各位置的瞬态压力分布、罐壁的应力和变形的动态分布数据。该技术可以对爆炸罐的设计提供直观、准确的设计参考依据, 节约工程试验费用, 提高爆炸罐设计、制造的安全性、可靠性和经济效益。

笔者利用模拟仿真方法, 在容积、所用材料等其他条件一致的情况下, 对圆柱形爆炸罐和球形封头爆炸罐的受力和变形进行模拟仿真计算和结果对比, 从而选取爆炸罐的最佳结构参数, 实现优化设计。计算结果证实: 结构改变对应力和变形的影响

巨大。

目前, 仿真技术在武器战斗部研究中主要应用于弹靶侵彻问题, 而对含能装置内部含能材料作用过程的模拟开展的不多^[1], 国外有药剂在空气和水中这些开放环境中传播过程的模拟研究报告, 笔者是研究容腔内含能材料作用后期对周边结构的做功过程的模拟。通过对前人在该领域的研究成果进行分析、综合, 拟使用 ANSYS-LS/DYNA 大型非线性有限元分析软件对火炸药在罐体内作用过程进行仿真计算的研究。

1 计算模型

1.1 物理模型

LS/DYNA 大型非线性有限元分析软件是利用有限元基本原理, 将研究对象的结构离散化, 划分成细小单元, 每个单元材料与实际结构相同, 变形满足变形协调一致条件, 单元越小计算结果越接近

收稿日期: 2015-03-10; 修回日期: 2015-04-04

作者简介: 陈慧能(1962—), 女, 陕西人, 学士, 研究员, 从事飞机结构、工业 TC 应用技术、火工品作用过程模拟仿真技术研究。

真实结果。爆炸罐是罐壁和内部火炸药尺寸相差悬殊的特殊结构，建模和单元划分时需要特殊处理，火炸药在产品内部作用过程不是均匀稳定的爆轰传播过程。而有限元计算时变形与载荷是在单元与单元之间传递，单元与单元之间的爆轰传播是稳定的，恰好可以满足对火炸药作用过程不稳定传播的计算分析。

研究用模型由封闭的金属罐体、位于罐内中心的炸药组成，再引入空气域构建仿真计算模型。罐体材料采用不锈钢 1Cr18Ni9Ti，炸药为 TNT。本次仿真采用多物质 ALE 算法，该算法适用于燃烧爆轰产生大变形的仿真分析，将传统的 Lagrange 和 Euler 相结合进行仿真分析，计算精度提高到前所未有的高度，是一种国际国内目前最新的仿真分析方法^[2]。本模型中，炸药与空气采用多物质流体欧拉单元，而罐体则用拉格朗日实体单元^[3]。

为简化计算和节约计算时间，利用结构的对称性可选取实际结构的 1/8 用来计算。柱形爆炸罐结构尺寸如图 1 所示。球形封头爆炸罐结构尺寸如图 2 所示，同样，利用结构的对称性取实际结构的 1/8 用来计算。封头球半径为 1 600 mm，球心位于罐体中心，这样可以与圆柱形爆炸罐内部容积近似一致。

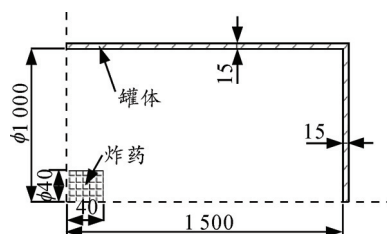


图 1 柱形爆炸罐示意图

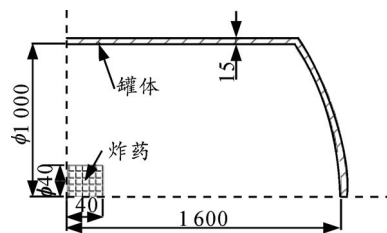


图 2 球形封头爆炸罐示意图

1.2 数学模型

利用 LS-DYNA 软件对爆炸罐进行仿真研究，首先要建立仿真用的几何模型。为方便计算，笔者通过试算，尽量选用能够满足罐体变形计算需要的最小空气域范围作为计算的数学模型用尺寸。简化后的计算用数学模型如图 3、图 4 所示。

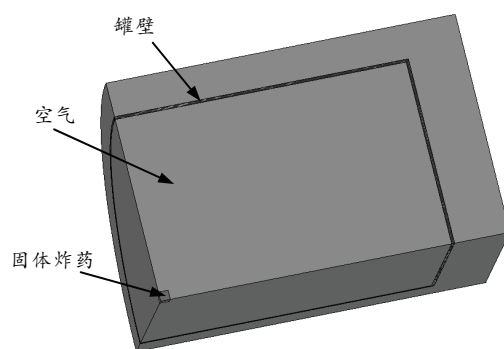


图 3 柱形爆炸罐计算模型

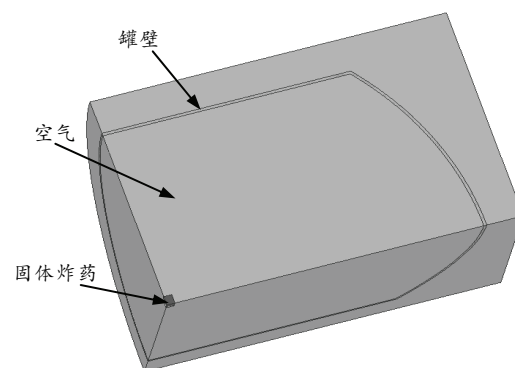


图 4 球形封头爆炸罐计算模型

该典型含能装置物理模型的结构、约束条件、发火点等均具有对称性特点，为了节约计算时间，同时又不影响计算结果，笔者利用结构的对称性，设置对称边界条件，只用 1/8 模型进行计算。计算模型如图 3、图 4 所示^[4-5]。

创建好仿真计算模型后，需要进行结构离散化操作，即对模型进行网格划分。在网格划分时应明确网格单元的类型和各单元材料的特性并将其赋予每个单元。网格划分是其中关键的步骤，网格划分的好坏直接影响到计算的精度和速度。划分网格时应根据模型的要求选择合适的网格类型和网格密度。划分网格时应注意尽量避免使用 Smartsizing (自由划分) 方法进行控制可能导致的网格形状不规则，以免影响计算结果。一般模型采用映射或扫掠划分方法，可以得到边长较接近，大小相对较均匀的单元网格^[6-7]。但是在本研究项目中，由于固体炸药尺寸与爆炸罐结构尺寸相差悬殊，采用映射或扫掠划分方法得到的单元数量巨大，计算时间过长且没有必要，所以不能使用边长尺寸较接近的单元，需要人为控制同类材料单元的几何形状和单元几个方向上的尺寸，将计算用单元数量控制在合理范围内，仿真计算的时间控制在合理的时长内^[8]。爆炸罐具体的网格划分方法和划分结果见文献^[9]。

本计算中采用 SOLID164 六面体单元，定义炸药、空气为欧拉网格，结构为拉格朗日(lagrange)网格。因网格太密集，图示比例无法全面看到，在此不再列图示出。采用映射方法划分的六面体网格相对比较规则，在计算中一般不会产生因单元奇异变形导致的错误计算。

1.3 材料数据

计算中 2 种结构罐体材料均为不锈钢 1Cr18Ni9Ti，性能采用塑性随动(MAT_PLASTIC_KINEMATIC)本构关系来描述。空气均采用 LS-DYNA 软件提供的(MAT_NULL)空物质模型结合线性多项式状态方程来描述。固体炸药也均使用密度为 1.63 g/cm³ 的 TNT，采用高能炸药燃烧(HIGH_EXPLOSIVE_BURN)材料模型和 JWL 状态方程来描述。TNT 的基本材料参数如表 1。

表 1 TNT 的材料模型参数

名称	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(cm \cdot \mu s^{-1})$	$p_{CJ}/(10^2 GPa)$	$A/(10^2 GPa)$	$B/(10^2 GPa)$	R_1	R_2	ω	E_0
TNT	1.63	0.693	0.21	3.737 7	0.037 47	4.15	0.9	0.35	0.06

2 作用过程模拟计算

2.1 初始条件及设置

传统火工品起爆方式一般包括点、线和面起爆。不同起爆方式对爆轰波传播有一定影响，但对火炸药的输出性能影响不大。为了更接近研究对象的真实状态，笔者使用点起爆形式进行仿真计算，其计算模型如图 3、图 4 所示，计算中起爆点的设置为固体炸药的中心位置。

边界条件为各对称面依照其对称条件进行设置，空气单元外端面输出按照爆轰产物无反射设置。

计算时根据计算机性能设置相应时间、内存和输出间隔等条件即可。笔者采用综合了拉格朗日算法和欧拉算法优点的 ALE 算法来进行仿真计算。

2.2 计算结果

计算结束后，利用后处理软件对计算结果进行后处理分析，观察起爆后爆轰波传递、压力变化等各瞬态压力分布状态，以及对指定单元应力-时间曲线、位移-时间曲线等结果进行显示。图 5~图 7 为火炸药作用过程中不同瞬态的压力分布云图。其中图 5 为点起爆起始发火时的压力分布云图，火炸药内爆轰波球形传播，最大压力处于火炸药作用前沿；图 6 为火炸药作用完成后，爆轰波在罐内空气中传播时的压力分布云图，同样爆轰波在罐内空气中以球形波传播，最大压力处于爆轰波传播前沿；图 7

为药剂反应前沿到达柱形罐壁，开始反射时的压力分布云图，此时最大压力已处于罐壁反射波与球形波交汇处。

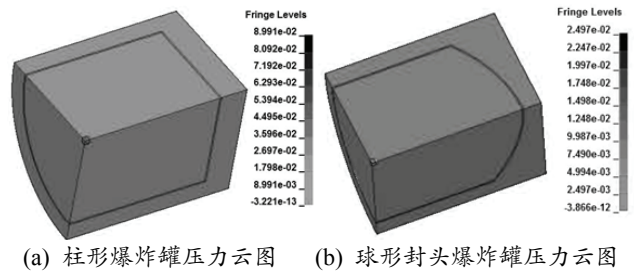


图 5 为起爆瞬间压力云图

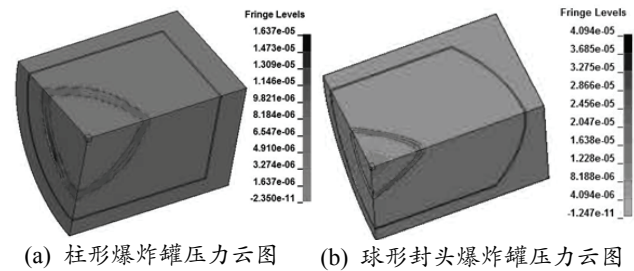


图 6 爆轰波在罐内空气中传播时的压力云图

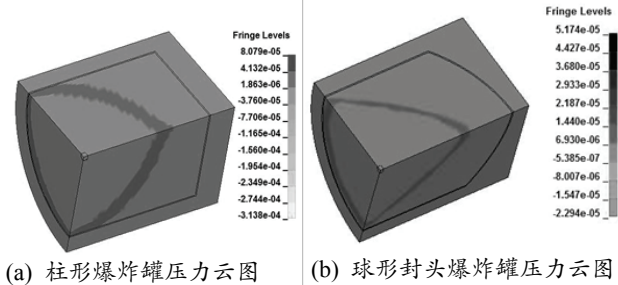


图 7 压力波开始反射时的压力云图

随着爆轰波在罐内迅速传播、充满和反射，在罐内形成多组反射波，该反射波一方面在罐壁上施加压力，使得罐壁产生应力和变形，另一方面随着时间推移，爆轰波经多次反射，其峰值逐渐趋于定值，与罐壁应力平衡。图 8~图 10 分别为爆炸罐壁几个特殊位置的应力(σ)-时间(t)曲线和位移(D)-时间(t)曲线。其中图 8 为中心轴与端面交点处单元的 σ - t 曲线、 D - t 曲线，图 8(a)、图 8(b)为柱形爆炸罐的 σ - t 曲线和 D - t 曲线，图 8(c)、图 8(d)为球形封头爆炸罐的 σ - t 曲线和 D - t 曲线。由图中可以看到，在端盖中心处最大应力值相同，均已达到屈服应力但未达到破坏应力，但是其变形值相差悬殊，其中圆柱形爆炸罐的最大变形达到了 10.5 cm，而球形封头爆炸罐的最大变形仅 1.9 cm。

图 9 为爆炸罐圆柱体中心高度处单元的 σ - t 曲线和 D - t 曲线，图 9(a)、图 9(b)为柱形爆炸罐的 σ - t 曲线和 D - t 曲线，图 9(c)、图 9(d)为球形封头爆炸

罐的 $\sigma-t$ 曲线和 $D-t$ 曲线。由图中可以看到：在圆柱体中心高度处球形封头爆炸罐的最大应力值较柱

形爆炸罐的最大应力值大，均处于弹性范围内，其变形值相差不大。

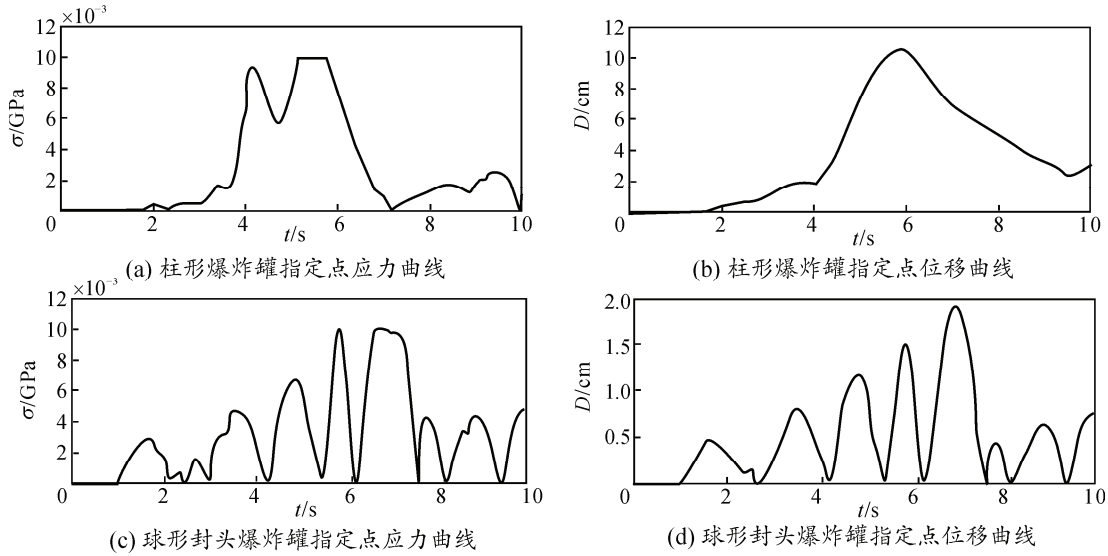


图 8 中心轴与端面交点处单元应力-时间曲线、位移-时间曲线

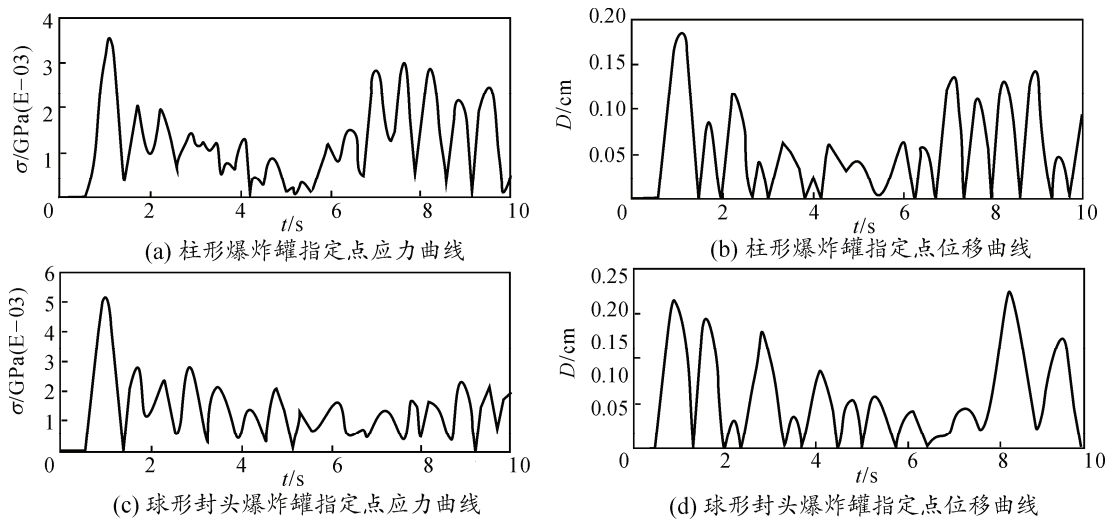


图 9 爆炸罐圆柱体中心高度处单元 $\sigma-t$ 曲线、 $D-t$ 曲线

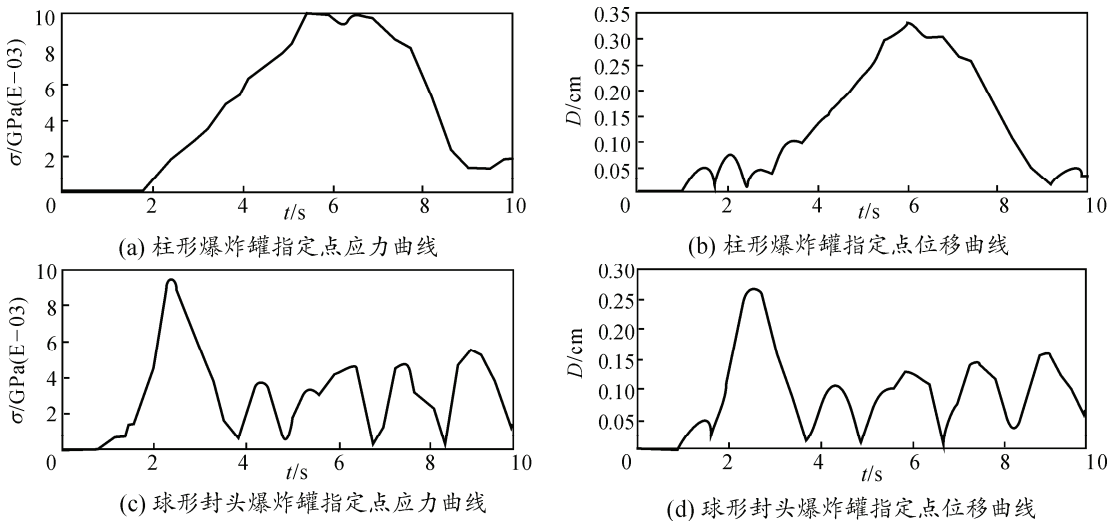


图 10 圆柱体端面相交处单元 $\sigma-t$ 曲线、 $D-t$ 曲线

图 10 为圆柱体与端面交点处单元的 $\sigma-t$ 曲线和 $D-t$ 曲线，同样图中图 10(a)、图 10(b)为柱形爆炸

罐的 $\sigma-t$ 曲线和 $D-t$ 曲线, 图 10(c)、图 10(d) 为球形封头爆炸罐的 $\sigma-t$ 曲线和 $D-t$ 曲线。由图中可以看到, 在圆柱体与端面交点处最大应力值接近或达到屈服应力但未达到破坏应力, 其中圆柱体爆炸罐的交点处的最大应力较大, 这是因为该交点处的应力集中较球形封头爆炸罐的应力集中大, 2 种罐此处的最大变形值相差不大。

综合图 8~图 10 的曲线图可知, 2 种结构爆炸罐的最大应力都出现在端盖中心位置, 如图 8(a) 和图 8(c) 所示, 峰值应力都达到了罐壁材料的屈服极限但尚未达到破坏极限。2 种结构爆炸罐的最大变形也都出现在端盖中心位置, 如图 8(b) 和图 8(c) 所示, 其中圆柱形爆炸罐的最大变形达到了 10.5 cm, 而球形封头爆炸罐的最大变形仅 1.9 cm。由于爆炸冲击波和罐壁反射的相互作用, 应力都呈现多次波动并逐渐衰减的现象。由计算结果可以明显地看到, 2 种爆炸罐罐壁上产生的最大应力均发生在封头的中心点, 球形封头爆炸罐的封头中心点的应变及变形远小于圆柱形爆炸罐的应变和变形, 球形封头爆炸罐的结构形式要优于圆柱形爆炸。由计算结果可以看到, 在圆柱体与端面交点处最大应力值接近或达到屈服应力但未达到破坏应力, 其中圆柱体爆炸罐的交点处的应力较大, 这是因为该交点处的应力集中较球形封头爆炸罐的应力集中大, 当端盖使用直径与圆柱直径相同的球形封头时, 此交点处应力集中存在, 端盖中心处的最大变形可达到最小值, 应是爆炸罐的最佳结构形式。

通过仿真计算可以准确得到爆炸罐各部位的应力和应变、变形值, 以此做依据在实际爆炸罐设计中可以明确需要加强的应力裕度薄弱部位和变形较大的部位, 使得爆炸罐整体具备良好的强度和刚度。

3 结论

笔者使用目前最先进的模拟仿真技术和精确的算法, 模拟了爆炸罐中固体炸药作用的全过程, 并得到了爆炸过程中罐壁各个部位的应力分布, 这对于爆炸罐的设计有重要的意义。从 2 种结构爆炸罐的计算结果可证实, 结构优化设计对于改善应力分布、控制最大变形有非常重要的意义。

综上所述: 通过对爆炸罐作用过程模拟仿真技术的研究, 笔者探索了利用大型仿真软件对大型含能结构进行仿真模拟计算的方法和实施细则, 得出 LS-DYNA 软件可以实现大型含能结构作用过仿真模拟计算不仅可以计算出含能结构作用过程中各瞬

间的应力分布状态, 还能对其变形进行计算。由此, 可以通过对不同结构形式的模拟计算, 实现对含能结构的优化设计, 使含能结构的研制方法从工程估算、试验研究提升到数字模拟优化设计, 同时还能提供准确的应力分布和变形结果。

我国的大型含能装置研制技术目前主要采用工程估算和试验研究方法, 大型含能装置的作用过程的模拟仿真技术的研究还应进一步深入开展。首先我国应系统地开展国产药剂的材料性能研究, 上述计算研究用的材料性能参数全部取自国外资料, 我国没有自己的仿真计算用药剂材料性能参数, 所以仿真模拟计算结果与试验结果不能直接准确比对。其次还应进一步开展多层装药含能模拟仿真技术研究, 实际使用的大型含能装置中常有多层装药。再次还应深入开展大型含能装置性能测试技术研究, 火炸药的输出压力测试用传感器也对测试技术提出了更高的要求。总之, 大型含能装置仿真模拟技术有广阔的应用前景, 应该努力提高我国的大型含能装置仿真模拟技术。

参考文献:

- [1] Chen Huineng, Yang Shubin, Yang Qingling, et al. The Research on Analogue Simulation of Action Mechanism of the Typical Squib[C]//ICCAET/2011, 2011 International Conference on Computer Application and Education Technical, SCIENCE TECHNOLOGY PRESS, 2011: 32-35.
- [2] Bouamoul A. High explosive simulation using arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation[M]. CAN: Defense, 2008: 3-14.
- [3] Alia A, Souli M. High explosive simulation using multi-material formulation[J]. Applied Thermal Engineering 26, New York: Elsevier, 2006: 1032-1042.
- [4] 徐学文, 于建平, 曹宗胜, 等. 三种类型爆轰波的实现及其对结构作用过程的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(增刊): 176-180.
- [5] 曹熊. 高能传爆药结构研究及其包过程数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [6] Du Zhiming, Li Xin, PuWeihua, et al. Computer simulation of detonation process inside detonator[OL]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>.
- [7] 汪佩兰, 曾象志, 张松正. 灼热桥式火工品桥温的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 1994, S1: 14-21.
- [8] Li Jing, Chen Huineng, Yang Qingling, et al. Verified the Simulation Result of Explosive's Function Process Based in High-speed Photography[C]//ISTM/2009 7th International Symposium on Test and Measurement, VOLS1-6, Beijing, 2009: 2260-2263.
- [9] 陈慧能, 杜龙飞, 李鹏, 等. 柱形爆炸罐设计中的仿真建模技术研究[C]//第九届中国系统建模与仿真技术高层论坛论文集, 北京: 中国指挥与控制学会, 2014: 39-43.