

# 射孔弹聚能射流侵彻钢靶的数值仿真与实验分析<sup>\*</sup>

吴焕龙<sup>①</sup> 杜明章<sup>①</sup> 杨 超<sup>②</sup> 王庆兵<sup>①</sup>

<sup>①</sup>四川石油射孔器材有限责任公司(四川内江,642177)

<sup>②</sup>中国石油大学(华东)机电工程学院(山东青岛,266555)

[摘 要] 应用 ANSYS/LS-DYNA3D 显式非线性有限元软件,采用 ALE 多物质算法对某型石油射孔弹装药结构下聚能射流形成、侵彻钢靶过程进行了数值模拟及分析,并与实验数据作了对比。结果表明,数值仿真与实验结果均值间的穿深误差为 8.31%,孔径误差为 15.16%,这完全满足设计需要,为今后数值计算在射孔弹装药结构优化设计方面的应用提供了参考依据。

[关键词] 石油射孔弹 聚能射流 侵彻 数值模拟 结构优化

[分类号] O241 TE319

## 引言

在石油射孔弹设计领域,传统方法主要依赖于经验,采用结构初步设计—加工—打靶—优化这种成本高、周期长且过程控制不确定因素多的方法,产品往往要经过多次反复的结构优化试验才能达到预期的性能指标<sup>[1-2]</sup>。加之射流的形成及破甲过程短暂,且伴随着高温、高压、大应变率,是一个十分复杂的瞬态过程,应用解析方法对聚能射流的形成过程进行求解时通常需要简化模型,这就使得求解结果与实际物理问题之间误差大,可信度低。此外,随着药型罩结构的多样化发展,对传统的设计方法更是提出了挑战<sup>[3]</sup>。显示动力学分析软件 ANSYS/LS-DYNA 可以对炸药的爆轰、药型罩的压垮及射流的形成等过程有一个比较全面完整的精确描述,同时它假定少、适用范围更广,可为进一步设计分析提供清楚、具体的瞬变过程图像。本文应用 ANSYS/LS-DYNA3D 有限元分析软件,采用多物质流固耦合方法,对聚能射孔弹射流侵彻钢靶这种最常见的射孔弹性能检测方法的过程进行数值模拟计算,并通过打靶实验与仿真结果进行对比验证分析。

## 1 数值仿真计算

### 1.1 几何模型及算法选择

石油射孔弹聚能装药结构由药型罩、成型装药、壳体 3 部分组成,加上检测钢靶和 ALE 算法所需的空气介质,整个射流侵彻钢靶的几何模型由 5 部分组成,如图 1 所示。

ANSYS/LS-DYNA3D 有限元程序提供 Lagrange、Euler 和 ALE 算法<sup>[4]</sup>。本文将采用 ALE 算法对

炸药、药型罩和空气 3 种材料进行建模,采用 Lagrange 算法对壳体和靶板进行建模,钢靶及弹壳与药型罩、炸药、空气组成的流体组耦合,整个数值计算模型采用流固耦合算法。对空气施加无反射边界条件以模拟无限空气域,对射流的形成与侵彻过程进行沙漏控制。

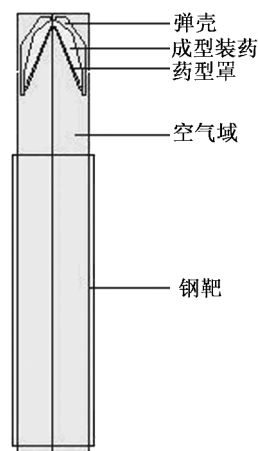


图 1 石油射孔弹侵彻钢靶几何模型

### 1.2 网格划分

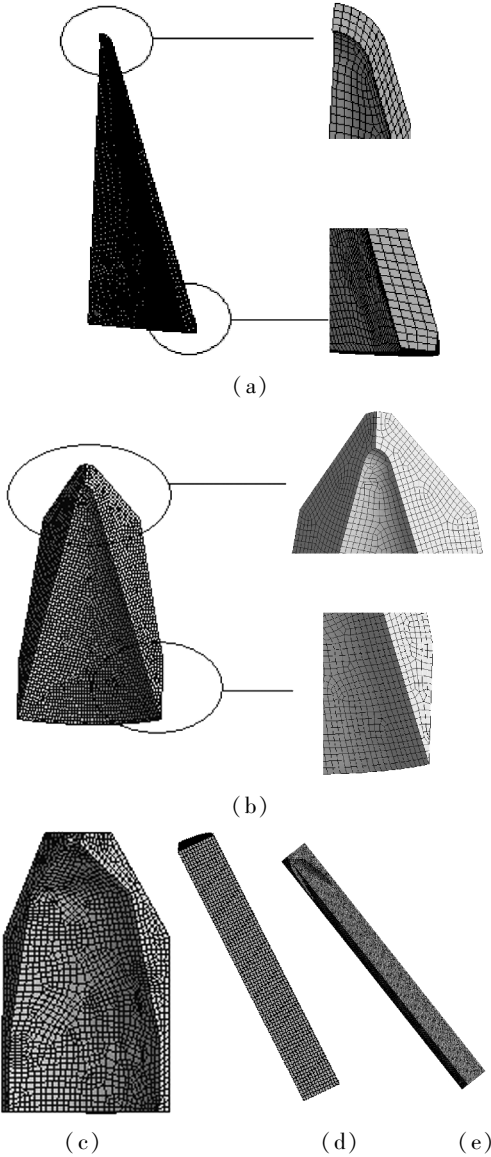
石油射孔弹聚能装药

侵彻钢靶的整个结构具有轴对称性,为节约计算资源,将采用 1/4 有限元计算模型,同时简化了对分析结果影响甚微的壳体顶部结构,整个模型的尺寸完全参照实物尺寸,其中钢靶为  $\varnothing 60\text{mm} \times 180\text{mm}$ ,建模采用  $\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \mu\text{s}$  单位制。

为保证计算精度和防止计算过程中负体积的出现,网格划分作为一个重点环节来控制,主要控制了网格划分时的疏密布局和网格质量两方面。具体做法就是,药型罩作为射流形成的关键部件,在厚度方向划分了 4 层;成型装药作为药型罩形成金属聚能射流的能源,以及要重点分析的部位钢靶中心轴 2 cm 范围内也采用了较密的网格;石油射孔弹壳体与其余部位采用较疏的网格,除几何尖角处少数的四面体外,网格尽可能地采用了八节点六面体单元,模型各部分的网格划分见图 2<sup>[5-7]</sup>。

\* 收稿日期:2011-10-03

作者简介:吴焕龙(1985~),男,助理工程师,主要从事射孔器材制造研发工作。E-mail:whlliangtian@163.com



(a) 药型罩;(b)成型装药;(c)壳体;  
(d) 钢靶;(e)空气域

图2 模型各部分网格划分

1.3 材料模型及计算参数

1.3.1 药型罩材料模型及计算参数

文中紫铜药型罩材料选用适合大部分金属材料的 Johnson-Cook 模型,由 Johnson 与 Cook 在 1983 年首先提出,该模型的典型应用实例包括金属爆炸成型和弹道侵彻,状态方程选 Gruneisen,其形式为:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s_1 - 1) \right] \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

(1)

式中: $c$  是  $v_s - v_p$  曲线(即剪切—压缩波速曲线)的截距; $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  是  $v_s - v_p$  曲线的斜率系数; $\gamma_0$  是 Gruneisen 常数; $a$  是  $\gamma_0$  的一阶体积修正量, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} -$

1<sup>[8]</sup>。  
仿真所选用的材料模型和状态方程部分参数见表 1<sup>[6]</sup>。

表 1 紫铜材料模型与状态方程参数

$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$G/$ GPa	$n$	$c$	
8.93	0.09	0.292	47.7	0.31	0.025	
$m$	$T_{\text{m}}$	$C_{\text{v}}/$ $10^{-6}$	$C$	$s_1$	$\gamma_0$	$a$
1.09	1790	3.8	0.394	1.49	1.99	0.46

1.3.2 炸药材料模型及计算参数

计算中成型装药选用日常生产常用的 R852,它以 97.5% 的 RDX 为主体。材料模型为高能炸药 (High-Explosive-Burn) 模型,状态方程采用标准的 JWL 状态方程,其形式为:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{r_1 V} \right) e^{-r_1 v} + B \left( 1 - \frac{\omega}{r_2 V} \right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega E}{V}$$

(2)

式中: $P$  为压力; $E$  为爆轰产物的内能; $V$  为爆轰产物的相对体积; $A$ 、 $B$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $\omega$  为试验拟合参数。材料模型与状态方程部分计算参数见表 2。

表 2 RDX 炸药材料模型与状态方程参数

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$p_{\text{ej}}/\text{GPa}$		
1.63	8200	28.08		
$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$r_1$	$r_2$	$\omega$
807	12	4.23	1.21	0.33

1.3.3 空气材料模型及计算参数

空气材料模型采用无偏应力流体动力模型 (NULL),对应的状态方程为 GRUNEISEN。气体常数  $\gamma = 1.4$ , 密度  $\rho = 1.225 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,  $C = 0.344$ <sup>[9]</sup>。

1.3.4 壳体、钢靶材料模型及计算参数

壳体与钢靶均采用各向同性随动硬化塑性模型 (PLASTIC\_KINEMATIC),考虑应变率效应硬化和失效,其材料模型部分参数参见表 3。

表 3 壳体、钢靶材料模型参数

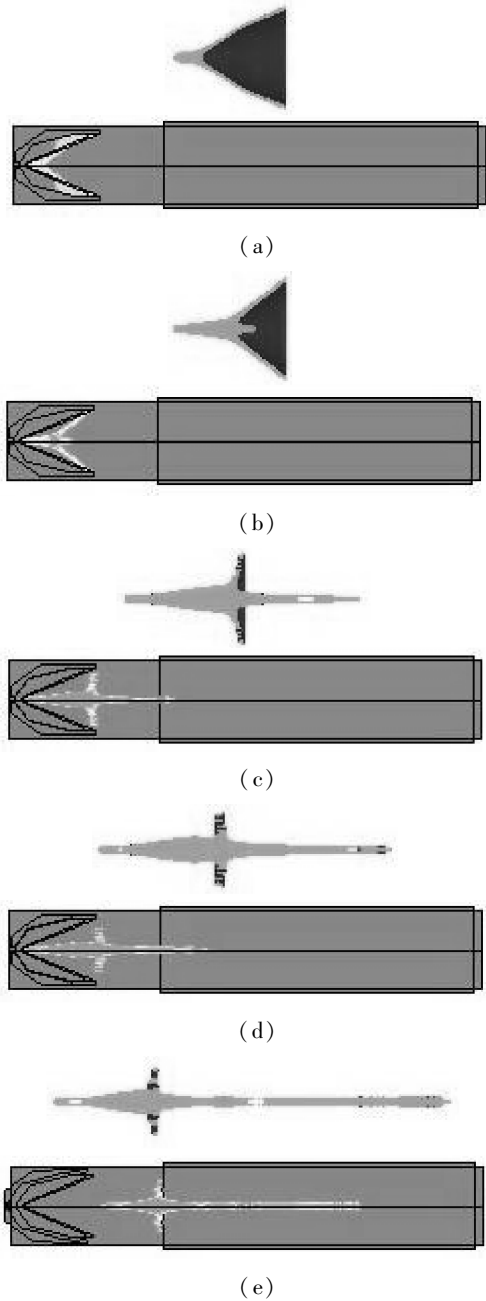
$\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$E/$ GPa	$\mu$	$\sigma_s/$ GPa	$E_{\text{tan}}/$ GPa	$\beta$
7.85	207	0.3	0.355	6.5	1.0

1.4 仿真结果分析

数值模拟中石油射孔弹聚能射流的形成过程、侵彻钢靶过程及对应时刻的射流状态如图 3 所示。

由图 3(a)中可见,在引爆炸药后 4  $\mu\text{s}$  这一极短时间内,爆炸产生的爆轰产物挤压药型罩使其在罩顶初步形成闭合,罩的中间部位正在随着爆轰波

的向下传播而向轴线方向运动。图 3(b) 表明聚能装药结构已经爆轰完毕,药型罩闭合区的前端已出现射流,该阶段可持续 9 ~ 14  $\mu\text{s}$ ,主要为射流的形成过程。图 3(c) 状态为射流不断延伸拉长,到一定程度后出现颈缩,尾部逐渐形成“杵”,此时射流开始侵彻钢靶,碰撞点产生高温高压,高速金属流在钢靶表面开坑,有少量钢靶材料翻出形成唇缘,形成的孔道较大。图 3(d) 为射流进一步侵彻钢靶的状态,此时为“准定常阶段”,射流速度基本维持不变,孔径变化缓慢,可持续 70 ~ 90  $\mu\text{s}$ ,为穿孔的主要阶段。



(a)  $t=4\mu\text{s}$ ; (b)  $t=7\mu\text{s}$ ; (c)  $t=18\mu\text{s}$  ;  
(d)  $t=26\mu\text{s}$ ; (e)  $t=153\mu\text{s}$

图 3 石油射孔弹聚能射流形成、侵彻钢靶过程及对应时刻射流状态

图 3(e) 为射流侵彻钢靶已基本结束,表现为射流头部在孔道底部形成堆积附着,射流头部直径变大,后续射流不能接触到孔底。

图 4 给出了射流头部某单元的速度历程曲线,从该曲线可以看出射流侵彻钢靶的瞬间速度高达约 7000m/s。

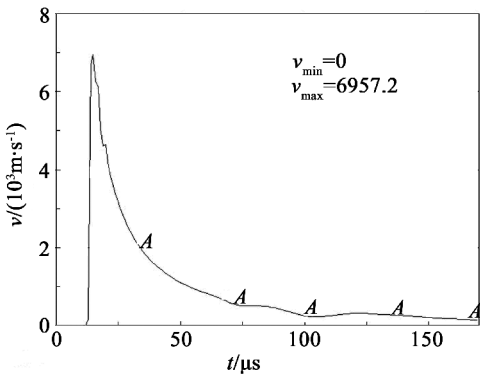


图 4 射流开始侵彻钢靶时刻头部某单元速度历程曲线

最终在模型中测得穿孔深度约 121.13 mm,孔径大小约为 12.14 mm。

2 实验验证

为了验证所建立模型的合理性和今后进一步参考应用的可靠性,抽取 10 发紫铜罩石油射孔弹进行物理试炮过程的实验考核。实验采用与数值仿真模型中尺寸与装药结构完全一致的射孔弹,设置同样的炸高,选用尺寸相同的钢靶,实验原理见图 5,具体的实验装置见图 6。

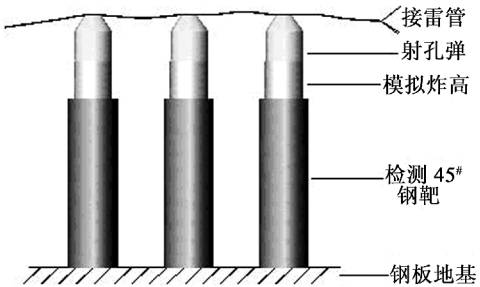


图 5 石油射孔弹试炮原理图



图 6 石油射孔弹侵彻钢靶实验装置

试炮数据见表 4,数值仿真计算结果与打靶结

果的比较见表 5。

表 4 试炮数据			mm
实验编号	穿深	孔径	
1	141	13.2	
2	106	16.5	
3	135	13.3	
4	117	15.9	
5	156	12.1	
6	128	13.7	
7	133	13.6	
8	125	14.2	
9	151	12.5	
10	120	14.8	
平均值	131.2	13.98	

表 5 数值仿真结果与打靶数据对比		
对比项目	穿深	孔径
实验值/mm	131.20	13.98
计算值/mm	121.13	12.14
误差率/%	8.31	15.16

从表 5 中可以看出实验结果与仿真计算结果一致性较好,误差在 20% 以内,可以满足工程设计的需要,说明在数值仿真中所建立的计算模型以及所选用的材料模型和状态方程的参数比较合理,具有参考应用价值。分析整个数值计算和实验的过程来看,在建模仿真计算过程当中对一些材料参数的取值严格按照理论值选取,成型装药结构的装配精度也忽略了实际影响因素,这些方面都应导致模拟计算值大于实验数据。基于表 5 中的数据对比不难发现,仿真计算值比打靶实验数据小,其中孔径误差更为明显,达 10% 以上,这主要是因为 LS-DYNA 模拟射流成型时,药型罩的压垮速度偏低,进而射流撞击靶板时速度偏小,最终导致模拟计算得到的穿深和

孔径偏小<sup>[10]</sup>。

### 3 结论

1)建立石油射孔弹聚能装药侵彻钢靶模型,运用非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA3D 程序对其进行数值仿真计算,逼真地展示了聚能装药射流形成及侵彻钢靶全过程。

2)数值仿真与实验结果均值间的穿深误差为 8.31%,孔径误差为 15.16%,满足设计要求。

### 参 考 文 献

[1] 李晋庆. 几种新型石油射孔弹的研究和讨论[J]. 爆破器材,2003,32(4):27-30.

[2] 王毅,姜伟,刘宏英,等. 聚能装药粉末药型罩材料技术的发展和现状[J]. 爆破器材,2007,36(5):33-36.

[3] 徐全军,白帆,伍睿星. 占据式聚能装药射流形成的数值模拟及试验研究[J]. 爆破器材,2011,40(3):11-13.

[4] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.

[5] 杜平安. 有限元网格划分的基本原则[J]. 机械设计与制造,2000(1):34-36.

[6] 李万全,徐文新,李必红,等. 射孔弹有限元数值模拟网格划分研究[C]//中国石油学会测井专业委员会射孔技术交流会议论文集. 成都:中国石油学会测井专业委员会,2009.

[7] 汪文革,杨世军,韩永要,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的聚能射流侵彻装甲钢的有限元分析[J]. 兵工自动化,2008,27(3):40.

[8] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual[M]. 2003.

[9] 时党勇,李裕春,张胜民,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[10] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

## Numerical Simulation and Experimental Analysis of Shaped Charge Jet Penetrating into Steel Target

WU Huanlong<sup>①</sup>, DU Mingzhang<sup>①</sup>, YANG Chao<sup>②</sup>, WANG Qingbing<sup>①</sup>

①Sichuan Petroleum Perforating Appliances Co., Ltd. (Sichuan Neijiang, 642177)

②College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (Shandong Qingdao, 266555)

[ABSTRACT] Based on the three-dimensional explicit nonlinear FEM software ANSYS/LS-DYNA3D, the numerical simulation and analysis were conducted for the process of a kind of shaped charge jet formation and penetrating steel target with the ALE method. Contrast analysis was made between the simulation results and experiment data. The results show the relative computational error from average experimental data is 8.31% in penetration depth, 15.16% in perforation diameter, which fully satisfied the design requirements. The simulation results could provide design reference for the application of numerical simulation calculation in future optimum design of shaped charge structure.

[KEY WORDS] petroleum shaped charge, jet, penetration, numerical simulation, structure optimization