

文章编号:1673-5005(2008)04-0114-04

# 油气井套管射孔有限元动态仿真

李玉坤, 叶贵根, 仝兴华, 黄小光

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**对油气井射孔作业中射孔弹发射和弹体挤进过程进行了动态有限元数值模拟和分析。弹丸挤进过程是一个高速冲击、大变形、带过盈配合的接触问题,以弹丸穿甲有限元模拟为基础,采用 ANSYS 软件的 LS-DYNA 模块对实体模型进行试算,运用 Ls-Prepost 模块进行瞬态分析,形成了一套弹丸完井射孔动态模拟方法。模拟结果与实际地面的打靶试验结果基本一致,从而验证了仿真方法的有效性。

**关键词:**油气井; 套管; 射孔; 动力学; 有限元法; 动态模拟

**中图分类号:**TE 257.1      **文献标识码:**A

## Dynamic simulation of oil and gas well casing perforation by finite element method

LI Yu-kun, YE Gui-gen, TONG Xing-hua, HUANG Xiao-guang

(College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

**Abstract:** The dynamic finite element simulation and analysis of the bullet lurching and guided missile bodies engraving in the procedure of perforation work were studied. This procedure of bullet engraving is a contact question concerning with a high speed concussion, a big distortion and an excessive copulation. Based on the armor-piercing dynamic finite element simulation, a set of perforation dynamic simulation methods were presented. A 3D full scale model was established by the pre-processor of ANSYS software producing a k-file. The k-file was modified based on the material property and introduced to the LS-DYNA computation module. The model was computed, and the result was displayed by Ls-Prepost software. The result of perforation simulation is close to the numerical value of the practice ground experiment. The validity of the simulation method was verified.

**Key words:** oil and gas well; casing; perforation; kinetics; finite element method; dynamic simulation

井底孔眼是沟通产层和井筒的惟一通道,是油气井采油、注水、酸化等许多工艺措施都必须通过的关键环节。同时,射孔也是目前油田增储上产的一项重要措施。从整个钻井、开采过程来看,射孔完井是这个大系统中的一个子系统,而就射孔完井本身而言,所要考虑的因素也很多、很复杂,因此必须把射孔作为一个系统工程,针对不同储层和油气井特性,优化射孔设计和射孔工艺。研究油气井套管射孔的动态力学过程,以及子弹的穿甲侵彻过程,对优化射孔和跟踪射孔质量有重要意义<sup>[1,2]</sup>。动能弹体冲击套管、

水泥层以及岩层的过程涉及高温、高压、高速等条件,是非常复杂而又难以处理的问题,其严格的理论分析采用材料力学、弹性力学的常规解法已不能得到合理的结果。由于这些困难,射孔过程的动态强度分析多年来只是停留在实弹射击试验的基础上,这既浪费了大量人力物力,又拉长了设计开采周期<sup>[3]</sup>。因此,寻求一种有效的数值模拟方法来解决该问题显得很重要。笔者运用瞬态有限元分析方法研究射孔过程中射孔弹高速冲击挤进过程。采用 ANSYS/LS-DYNA 软件仿真射孔弹穿透套管、水泥环和地层的动态过

收稿日期:2008-04-18

基金项目:国家“973”计划重点基础研究发展计划项目(2006CB202400)

作者简介:李玉坤(1973-),男(汉族),山东新泰人,博士,主要从事油气工程力学方面的研究工作。

程,并研究该过程中射孔弹速度的变化情况以及套管、水泥环、地层的应力、应变变化规律。

## 1 射孔有限元分析方法及模型的建立

### 1.1 显式动力学有限单元法

射孔过程中弹体对套管、水泥层以及岩层的作用,是一个依赖时间现象的冲击问题<sup>[4-10]</sup>。其显式动力学基本方程可表示成

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} = [K]\{u\} = \{F\}. \quad (1)$$

式中,  $[M]$ ,  $[C]$  和  $[K]$  分别为质量、阻尼和刚度矩阵;  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  和  $\{u\}$  分别为加速度、速度和位移矢量;  $\{F\}$  为载荷矢量。

射孔过程属于极短时间内的冲击问题。振型叠加方法不能够适用于高阶振型分量特殊的冲击问题和极短时间的动力响应问题,此类问题可以采用差分法求解<sup>[11-12]</sup>。将时间分割成小的差分  $\Delta t$ , 利用中心差分方法对式(1)逐次直接时间积分。在中心差分法中,速度、加速度可以用位移表示,即

$$\{\dot{u}\} = \frac{1}{2\Delta t}(u_{i+\Delta t} - u_{i-\Delta t}), \{\ddot{u}\} = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{i+\Delta t} - 2u_i + u_{i-\Delta t}). \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到求解各离散时间点位移的递推公式为

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\Delta t^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C] \right) \{u\}_{i+\Delta t} = \{F\} - \\ & \left( [K] - \frac{2}{\Delta t^2}[M] \right) \{u\}_i - \\ & \left( \frac{1}{\Delta t^2}[M] - \frac{1}{2\Delta t}[C] \right) \{u\}_{i-\Delta t}. \end{aligned} \quad (3)$$

中心差分法是条件稳定的,但在利用它求解具体问题时,时间步长  $\Delta t$  必须小于由该问题求解方程性质所决定的某个临界值  $\Delta t_{cr}$ , 否则算法将是不稳定的<sup>[13-15]</sup>。中心差分法的稳定性条件为

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_n}. \quad (4)$$

式中,  $\omega_n$  为系统的最高阶固有频率。

虽然射孔问题的控制方程式和一般运动问题的相同,但是射孔问题是由于外力急速变化时引起结构物的短时响应,在碰撞过程中有应力波传播、局部区域的弹塑性变形、短时响应以及局部破坏等现象,冲击力引起的应力-应变关系一般是非弹性关系,相应的变形速度很大。如果采用数值计算分析方法进行求解,则要使用较小的单元网格分割,对时间间隔也需取得很小。对于工程中的三维问题,计算量相

当大。

### 1.2 模型的建立

根据胜利油田某一实际射孔完井参数建立三维分析模型(图1)。模型分为射孔弹和穿越层,穿越层由里到外分别为套管、水泥环和岩层。射孔弹直径为1 cm,长为1.7 cm,穿越层高度为5 cm,宽度35 cm;套管外径8.7 cm,壁厚0.6 cm;水泥环外径11.2 cm,壁厚2.5 cm;岩层外径26.2 cm,厚度15 cm。模型参数见表1。由于模型的对称性,建立四分之一模型以减少计算量。为降低沙漏产生的可能性,模型均采用映射网格划分。套管与水泥环、水泥环与岩层间的接触面采用共结点网格划分,在弹丸直接作用区域加密网格。模型的网格划分效果如图1所示。划分后弹丸结点数为471,单元数为324;套管结点数为7 168,单元数为5 766;水泥环结点数为26 624,单元数为24 025;岩层结点数为154 624,单元数为144 150。

表1 模型材料参数

名称	分析模型	弹性模量 E/GPa	泊松 比 $\nu$	密度 $\rho$ / ( $t \cdot m^{-3}$ )
射孔弹	ELASTIC	210	0.28	10.0
套管	JOHNSON-COOK	196	0.26	7.85
水泥环	DRUCKER-PRAGER	18	0.22	2.60
岩层	DRUCKER-PRAGER	20	0.24	2.50



图1 网格划分效果图

### 1.3 边界条件处理

根据模型对称性,定义各层对称面约束,约束除套管内壁以外所有外表面的法向位移。其中对称面约束包括法向位移和相应的转角约束。弹丸与套管、弹丸与水泥环、弹丸与岩层间的接触类型均为面面侵入接触。

定义弹丸初速度,赋予子弹纵向初速度为1.4 km/s。设置求解时间为400  $\mu s$ ,结果文件每1  $\mu s$  输出一次。

## 2 ANSYS 仿真结果分析

### 2.1 射孔效果

射孔效果如图 2 所示。整个射孔深度为 10.3225 cm,平均孔径大约为 1.08 cm。由于材料性质的差异,塑性材料套管的射孔区域较为平滑,而脆性材料水泥和岩层所形成的射孔区域较为粗糙。

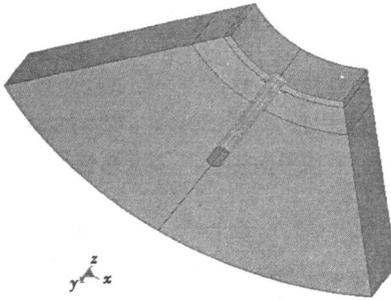


图 2 1/2 射孔模型效果

### 2.2 应力

图 3 展示了第 400 μs 时的 misess 应力分布。该时刻弹丸基本静止,应力主要分布在塑性材料一套管的射孔附近,等应力面基本呈现较为平滑的圆形分布,如图 4 所示。

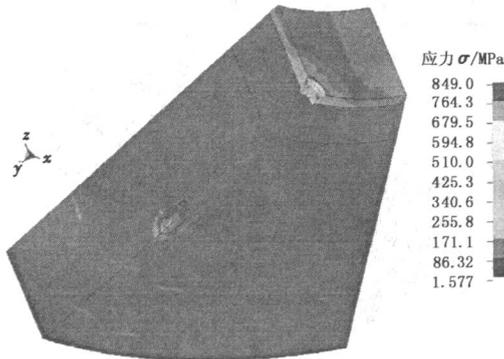


图 3 400 μs misess 应力

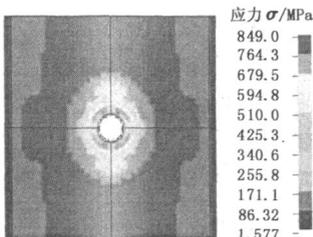


图 4 套管应力

### 2.3 应变分析

图 5 为射孔区域的横向位移图。由于弹丸的积

压,材料发生一定的塑性应变,在弹道附近形成较为明显的压实带。在套管和水泥环的接触面附近,由于套管的塑性变形较大,在弹丸的作用下向下挤压水泥环,使得在水泥与套管的接触面上产生了较大范围的应变。

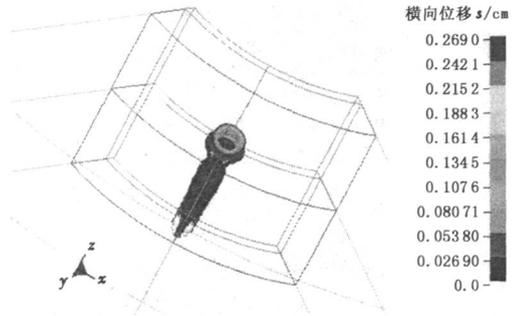


图 5 射孔区域的横向位移

### 2.4 子弹速度

子弹射出后不同距离内速度下降曲线如图 6 所示。由于子弹在射孔过程中克服各种阻力做功,速度迅速减小,大概在  $t = 300 \mu s$  (图 6(a)) 时速度减小到零。其中 AB 段(图 6(b))是子弹穿越套管时的曲线段,该段速度降低最快,这是由于套管刚度大、延伸率高,子弹在穿透套管过程中速度减小得最快。

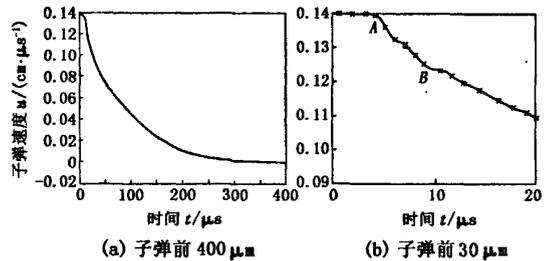


图 6 子弹前不同距离内速度曲线

在地面打靶试验中,相同规格的射孔弹平均穿透深度为 11.2236 cm,平均孔径大约为 1.23 cm,而在模拟试验中,整个射孔深度为 10.3225 cm,平均孔径约为 1.08 cm,射孔深度的误差仅为 8.028%,数值模拟结果能满足工程需要。

## 3 结论

(1) 所建立的弹丸射孔过程的高速挤进模型仿真结果与试验结果相符,从而验证了仿真方法的有效性。

(2) 有效地模拟了射孔的产生过程以及周边的压实带情况,为研究射孔压实提供了参考数据。

(3)对弹体在射孔过程中高速冲击挤进过程的分析可为深入研究优化完井射孔提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 时党勇. 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, 2005:96-330.
- [2] 赵海欧. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社, 2003:1-146.
- [3] 王国强. 数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001:45-67.
- [4] 匡震帮. 非线性连续介质力学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1983:10-24.
- [5] 王礼力. 冲击动力学进展[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1992:5-12.
- [6] 王仁. 塑性力学引论[M]. 北京:北京大学出版社, 1982:9-18.
- [7] 乔纳斯 A·朱卡斯. 碰撞动力学[M]. 张志云,译. 北京:兵器工业出版社, 1989:62-69.
- [8] 唐志平. Lagrange 分析方法及其新进展[J]. 力学进展, 1993, 23(3):348-359.  
TANG Zhi-ping. Lagrange analysis and its recent developments[J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(3):348-359.
- [9] 王肖钧, 胡秀章, 李永池. 高速碰撞中的有限元方法及其应用[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4):296-304.  
WANG Xiao-jun, HU Xiu-zhang, LI Yong-chi. Finite element methods and its use in hypervelocity impact[J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(4):296-304.
- [10] 高占鹏. 爆炸与冲击中的实际物质状态方程[J]. 力学进展, 1991, 21(2):176-189.  
GAO Zhan-peng. The real equation of state of materials in explosion and shock[J]. Advances in Mechanics, 1991, 21(2):176-189.
- [11] 谈庆明. 超高速碰撞效应的数值模拟[J]. 力学进展, 1993, 23(4):487-492.  
TAN Qing-ming. Numerical simulations of hypervelocity impacts[J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4):487-492.
- [12] 王远功. 冲击问题的动态分析方法[J]. 振动与冲击, 1994, 13(1):41-45.  
WANG Yuan-gong. A dynamic analysis of the impact problem[J]. Journal of Vibration and Shock, 1994, 13(1):41-45.
- [13] 孙林松, 王德信, 谢能刚. 接触问题有限元分析方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(3):18-20.  
SUN Lin-song, WANG De-xin, XIE Neng-gang. Summary of contact problem of finite element analysis method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(3):18-20.
- [14] 张济生, 何康渝. 冲击系统的力学模型及其参数识别[J]. 重庆大学学报, 1992, 15(6):25-30.  
ZHANG Ji-sheng, HE Kang-yu. The mechanical model on impact system and its parameter identification[J]. Journal of Chongqing University, 1992, 15(6):25-30.
- [15] 张刚明, 王肖钧, 胡秀章, 等. 长杆弹对金属靶板侵彻的有限元数值模拟[J]. 工程力学, 2000, 12(3):142-147.  
ZHANG Gang-ming, WANG Xiao-jun, HU Xiu-zhang, et al. FEM numerical simulation of long-rod bombs penetration on the target metal[J]. Engineering Mechanics, 2000, 12(3):142-147.

(编辑 沈玉英)

(上接第 113 页)

- [9] 李传宪, 史秀敏. 原油屈服应力的测量特性[J]. 油气储运, 2001, 20(4):44-46.  
LI Chuan-xian, SHI Xiu-min. Characteristics of yield stress of crude in measurement[J]. OGST, 2001, 20(4):44-46.
- [10] VISINTIN R G, LAPASIN R, VIGNATI F, et al. Rheological behaviour and structural interpretation of waxy crude oil gels[J]. Langmuir, 2005, 21(14):6240-6249.
- [11] 侯磊, 张劲军. 大庆原油的粘弹性实验研究[J]. 石油学报, 2005, 26(6):109-112.  
HOU Lei, ZHANG Jin-jun. An experimental study on viscoelasticity of Daqing crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6):109-112.
- [12] 朱英如, 孙骥姝, 李鸿英, 等. 大庆原油凝点温度附近屈服特性研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2006, 21(4):58-60.  
ZHU Ying-ru, SUN Ji-shu, LI Hong-ying, et al. Study on yielding behavior of the waxy crude of Daqing Oilfield near condensation point[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(4):58-60.

(编辑 沈玉英)