

# 弹体材料参数对侵深影响规律数值模拟研究

王向东<sup>1</sup>, 肖艳文<sup>2</sup>, 韩用<sup>2</sup>, 王海福<sup>2</sup>

1. 晋西工业集团有限责任公司技术中心, 太原 030027
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 模拟弹侵彻靶板的物理行为研究强冲击波产生的高温高压复合环境下的材料物性, 其力学行为极其复杂。本文以 AUTO-DYN-2D/3D 非线性动力学软件为仿真平台, 采用逐个变量分析法, 仅改变其中一个参数研究其对动能弹侵彻能力的影响。通过对模拟弹侵彻靶板力学行为的数值模拟研究, 获得了剪切模量、屈服强度、硬化常数及硬化指数对侵彻深度的影响规律。数值模拟结果表明, 剪切模量对侵深的影响并不明显; 屈服应力对侵深影响最明显, 当弹体材料屈服应力小于等于靶板材料屈服应力时, 弹体在侵彻时发生严重变形而不能侵入靶板; 硬化常数和硬化指数对侵彻深度也有较大影响, 侵彻深度与硬化常数呈正比关系, 与硬化指数呈反比关系。

**关键词** 模拟弹; Johnson-Cook 强度模型; 材料参数; 侵深

中图分类号 TJ410.33

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.31.004

## Numerical Simulation for the Effect of Material Parameters on Penetration Depth

WANG Xiangdong<sup>1</sup>, XIAO Yanwen<sup>2</sup>, HAN Yong<sup>2</sup>, WANG Haifu<sup>2</sup>

1. Technology Center, Jinxi Industries Group Co. Ltd., Taiyuan 030027
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

**Abstract** The physical action of simulated bullet penetrating target board is a research on the material physical property under High Temperature and High Pressure (HTHP) environment caused by strong shock wave. Its mechanical action is very complicated. The nonlinearity dynamics software of AUTODYN-2D/3D is adopted as a simulation platform. The each variable is analyzed one after another. The influences of variables on kinetic bullets penetrating ability are studied by changing only one variable. Numerical simulation researches have been conducted on the physical action of simulated bullet penetrating target plate. The impact rules of shear modulus, yield strength, regular pattern of hardening constants, and hardening exponent on penetration depth are obtained. Numerical simulation results indicate that the impact of shear modulus on penetration depth is not obvious. However, the impact of yield strength on penetration depth is most notable. When the yield strength of projectile body materials less than or equal to the yield strength of target board materials, projectile bodies would seriously deform instead of penetrating the target board. Both rigidification constant and rigidification index have a quite big affect on penetration depth. The penetration depth is proportional to rigidification constant. However, when rigidification index has reached at a certain value, the changes of penetration depth tend towards stability. At this time, penetration depth and rigidification index are inversely proportional to each other.

**Keywords** simulated projectile; Johnson-Cook strength model; material parameters; penetration depth

### 0 引言

模拟弹侵彻靶板是极端条件下的一种物理行为, 其力学

行为极为复杂。对它的研究主要是针对强冲击波产生的高温高压复合环境下的材料物性的研究。影响侵彻效果的因素主

收稿日期: 2012-08-17; 修回日期: 2012-09-05

作者简介: 王向东, 高级工程师, 研究方向为战斗部毁伤, 电子邮箱: wtssx@126.com; 王海福 (通信作者), 教授, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、空间攻防技术, 电子邮箱: wanghf@bit.edu.cn

要有模拟弹的着速及着角、弹靶材料、结构、形状和几何特性等。2005年,金丰年等<sup>[1]</sup>基于冲击波理论对钻地武器极限侵深进行近似分析,计算了引信和装药结构过载屈服时钻地武器垂直侵彻不同介质的极限侵彻深度。2009年,楼建峰等<sup>[2]</sup>利用LS-DYNA程序,模拟研究长杆侵彻中材料参数对侵彻性能的影响,仿真结果表明失效应变是影响侵深的主要参数,而屈服强度和剪切模量对侵深的影响较小。本研究以AUTODYN-2D/3D非线性动力学软件为仿真平台,通过对模拟弹侵彻靶板过程的力学行为进行数值模拟,确定弹体材料对侵彻深度的影响规律,为选择合适的弹体材料提供理论依据,对弹体的设计有一定的参考价值。

## 1 数值方法

### 1.1 材料模型和状态方程

数值模拟采用拉格朗日计算方法,并通过Shock状态方程、Johnson-Cook强度模型及Johnson-Cook失效模型描述弹靶材料动态响应过程。弹头材料侵彻能力主要由状态方程和Johnson-Cook强度模型控制<sup>[3-10]</sup>。要得到材料参数对侵深的影响规律,首先需要分析影响材料性质的相关参数。

材料状态方程用于描述流体静压力、局部密度(或比容)及局部比能(或温度)之间关系,即压力 $P$ 与密度 $\rho$ 及比内能 $e$ 的关系,一般形式为 $P=f(\rho, e)$ 。对于低速侵彻问题,一般采用Shock状态方程描述,表达式为

$$P=P_H+\Gamma\rho(e-e_H)$$

其中, $\Gamma$ 为Gruneisen系数,下标H为Hugoniot态。假设 $\Gamma\rho=P_H/\rho_0$ 为常数,且

$$P_H=\frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1+\mu)}{[1-(s-1)\mu]^2} \quad e_H=\frac{1}{2} \frac{\rho_H}{\rho_0} \left( \frac{\mu}{1+\mu} \right)$$

其中, $\rho_0$ 和 $c_0$ 分别为固体材料初始密度和声速, $\mu$ 为固体材料的压缩比, $s$ 为冲击Hugoniot参数。

Johnson-Cook强度模型适用于应变率变化范围较大,主要考虑温度和应变率对材料屈服应力作用,不考虑外部压力环境作用情况。Johnson-Cook屈服应力表述为

$$\sigma_y=[A+B\varepsilon_p^n][1+C\ln\dot{\varepsilon}_p^*][1-T_H^m]$$

式中, $\sigma_y$ 为材料屈服应力,Mbar; $T$ 为温度,K; $\varepsilon_p$ 为等效塑性应变;参考应变率 $\dot{\varepsilon}_p^*=1s^{-1}$ ;A、B、n、C、m为材料常数,其中A为材料在准静态下的屈服强度,B和n为应变硬化的影响,C为应变率敏感指数,m为温度软化系数;相应温度 $T_H=(T-T_{room})/(T_{melt}-T_{room})$ ,其中 $T_{room}$ 为室温, $T_{melt}$ 为熔点。

Johnson和Cook还开发了与三轴性、应变率和温度效应相关的损伤失效准则,该准则目前应用较为广泛。Johnson-Cook模型定义的单元损伤为<sup>[11]</sup>

$$D=\sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f}$$

式中,D为损伤参数, $D \in [0, 1]$ ,初始时 $D=0$ ,当 $D=1$ 时材料失效; $\Delta\varepsilon_p$ 为时间步的塑性应变增量; $\varepsilon_f$ 为当前时间步的应力状

态、应变率和温度下的破坏应变,其表达式为

$$\varepsilon_f=(D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)) (1+D_4\ln\dot{\varepsilon}^*) (1+D_5T_H^m)$$

式中, $D$ 为材料参数; $\sigma^*=p/\sigma_{eff}=-\sigma_{kk}/\sigma_{eff}$ , $p$ 为压力, $\sigma_{eff}$ 为等效应力,为应力三轴度,下角 $kk$ 为主应力方向; $\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率。

从Shock状态方程和Johnson-Cook强度模型表达式可以看出,材料模型涉及参数较多,主要参数如图1所示。对AUTODYN材料模型分析可知,影响侵深的主要参数为强度模型中的4个参数。

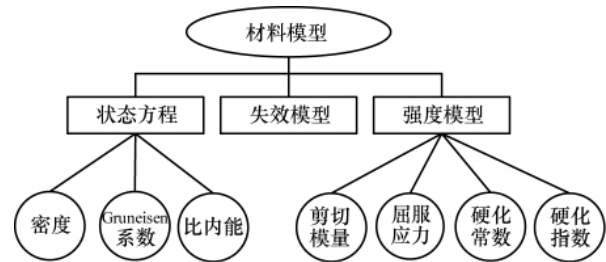


图1 材料模型参数

Fig. 1 Material model parameters

### 1.2 计算模型

靶板采用国产调质603装甲钢,厚度60mm。弹体材料选用超高强度合金钢30CrMnSiNi2A,全弹重6kg,弹体后部为配重,结构如图2所示。采用AUTODYN-3D分析软件对模拟弹以250m/s速度垂直侵彻靶板作用行为进行数值模拟,计算型

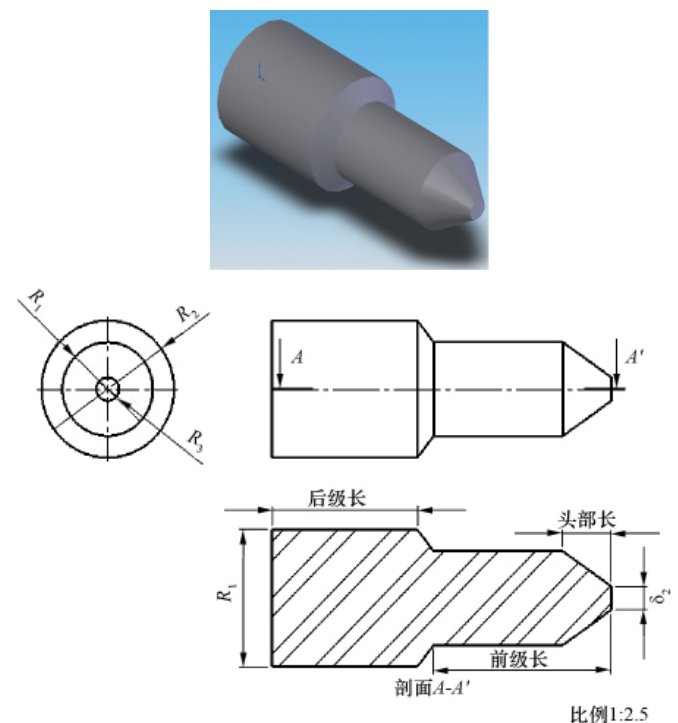


图2 模拟弹结构示意图

Fig. 2 Scheme of simulated projectile

见图3,有限元模型见图4。弹靶材料状态方程、材料模型和主要参数列于表1。根据模型对称性,建模时只建立1/4模型,通过施加对称边界条件保证计算的准确性。综合考虑计算的准确性和经济性,对弹靶作用区域网格划分较细,其他区域由近及远逐渐稀疏,整个模型共计232928个网格。

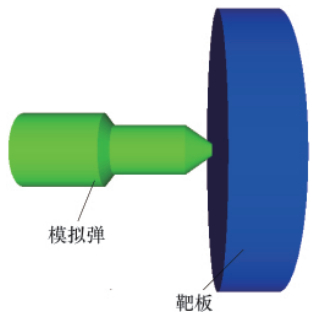


图3 模拟弹侵彻靶板计算模型  
Fig. 3 Calculation model for simulated projectile penetrating target

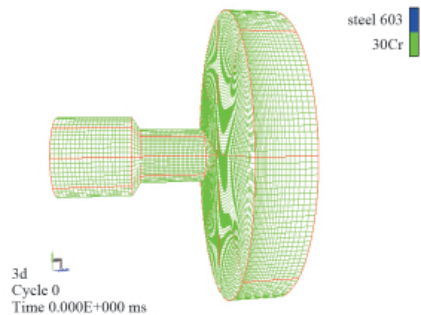


图4 模拟弹和靶板有限元模型  
Fig. 4 Finite element models for simulated projectile and target

表1 数值模拟材料参数

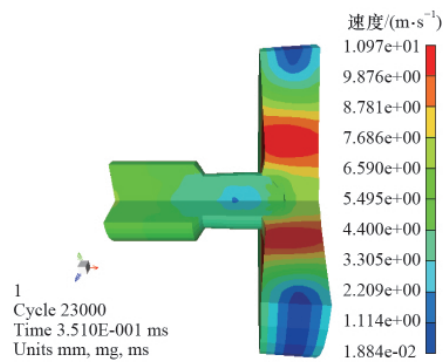
Table 1 Material parameters of numerical simulation

弹靶参数	强度模型	失效模型	状态方程	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	剪切模量 /GPa	屈服强度 /GPa
模拟弹	Johnson-Cook	Johnson-Cook	Shock	7.85	80	1.6
装甲靶板	Johnson-Cook	Johnson-Cook	Shock	7.85	40	0.9

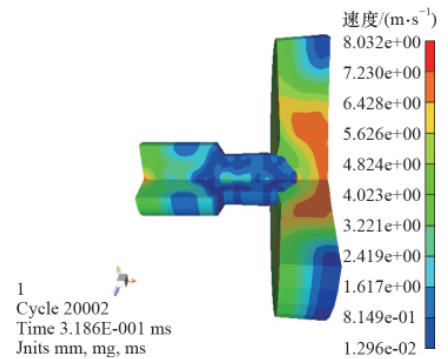
## 2 数值模拟结果

### 2.1 剪切模量对侵深的影响

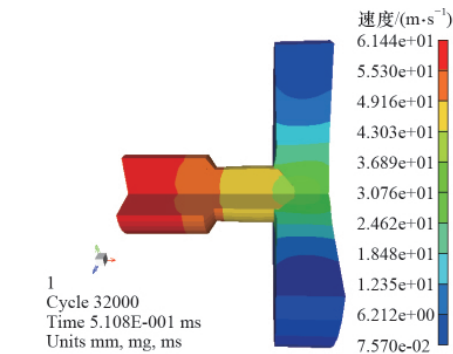
为了研究材料各个参数对动能弹侵彻装甲靶板侵彻效果的影响规律,采取逐个变量分析法,即保持其他参数不变,仅改变其中一个参数研究该参数对动能弹侵彻能力的影响。首先,固定其他参数,仅改变剪切模量研究剪切模量对侵深的影响规律。数值模拟结果如图5所示,侵深随剪切模量变化曲线如图6所示。可以看出,不同剪切模量模拟弹侵彻靶



(a) 100GPa



(b) 60GPa



(c) 20GPa

图5 剪切模量对侵深的影响数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of the impact of shear modulus on penetration depth

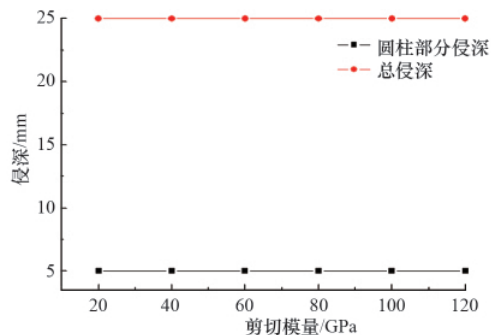


图6 侵深-剪切模量变化曲线

Fig. 6 Curves of penetration depth vs shear modulus

板深度均为圆柱部分侵深 5mm,总侵深 25mm,说明剪切模量对侵深的影响并不明显。

### 2.2 屈服应力对侵深的影响

为了研究屈服应力对动能弹的影响规律,固定其他参数,仅改变屈服应力进行数值模拟。侵深随屈服强度变化曲线如图 7 所示,典型模拟结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,随着屈服应力减小,侵彻深度迅速减少。在弹体材料屈服应力为 1.8GPa 时,弹体基本不发生变形;随着屈服应力减少到 1.5GPa 时,圆柱部分侵深为 3mm,总侵深为 21mm,材料发生明显墩粗变形;而当屈服应力与靶板材料的屈服应力一致时,弹体头部发生巨大变形,被完全压扁,无法侵入靶板。因此,针对 603 靶板选择弹体材料时,屈服应力不能小于 1.5GPa。

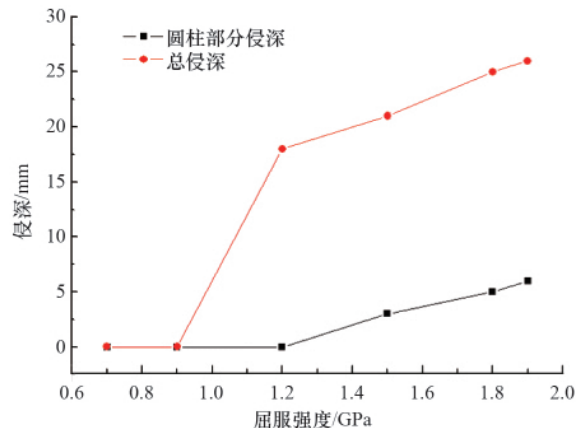


图 7 侵深-屈服强度变化曲线

Fig. 7 Curves of penetration depth vs yield stress

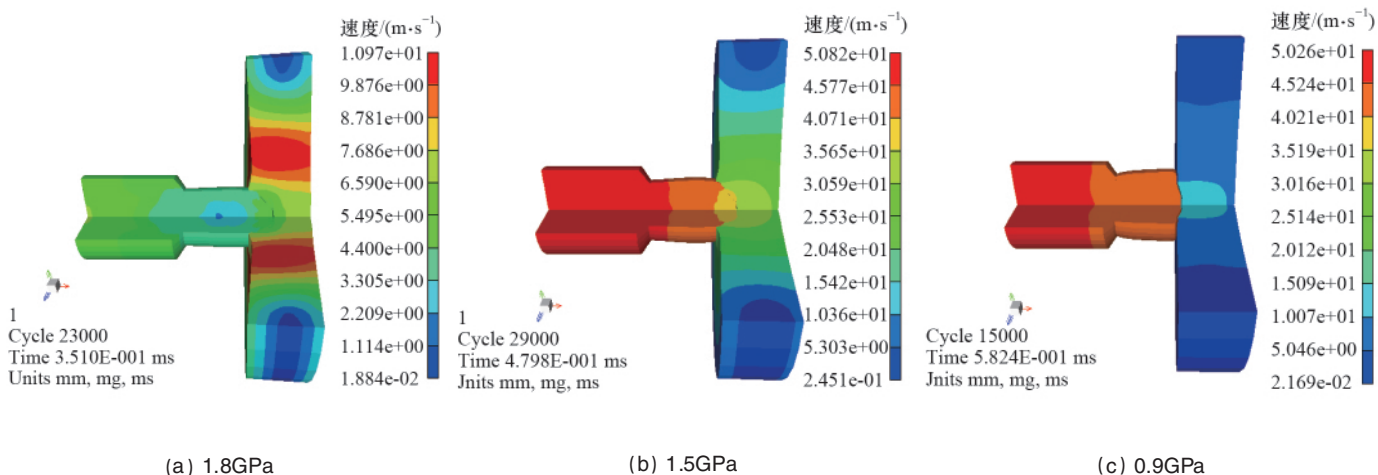


图 8 屈服强度对侵深的影响数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of the impact of yield stress on penetration depth

### 2.3 硬化常数对侵深的影响

通过固定其他参数,仅改变硬化常数研究屈服应力对侵深的影响规律。侵深随硬化常数变化曲线如图 9 所示,典型模拟结果如图 10 所示。可以看出,随着硬化常数的增大,侵彻深度也逐渐增大,但在硬化指数增大到一定值后侵彻深度变化趋于稳定。

### 2.4 硬化指数对侵深的影响

通过固定其他参数,仅改变硬化指数研究屈服应力对侵深的影响规律。典型模拟结果如图 11 所示,侵深随硬化指数变化曲线如图 12 所示。可以看出,硬化指数在 0.484—0.57 时,该弹体材料对 603 靶的侵入深度基本不变,但当硬化指数减至 0.285 时,圆柱部分侵深从 5mm 增至 8mm,总侵深从 25mm 增至 28mm,有了明显提高,且弹体未发现明

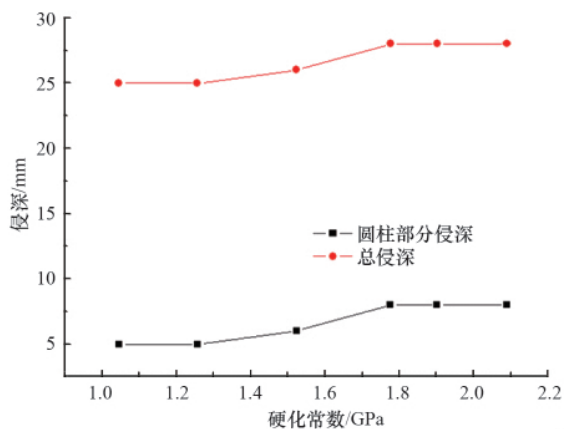


图 9 侵深-硬化常数变化曲线

Fig. 9 Curves of penetration depth vs hardening constants

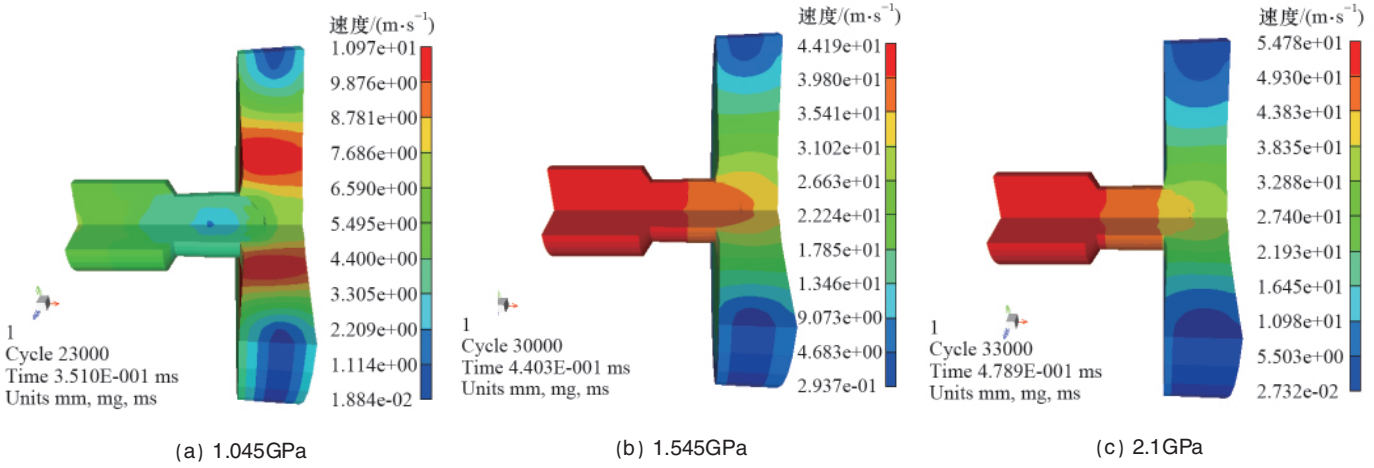


图 10 硬化常数对侵深的影响数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results of the impact of hardening constants on penetration depth

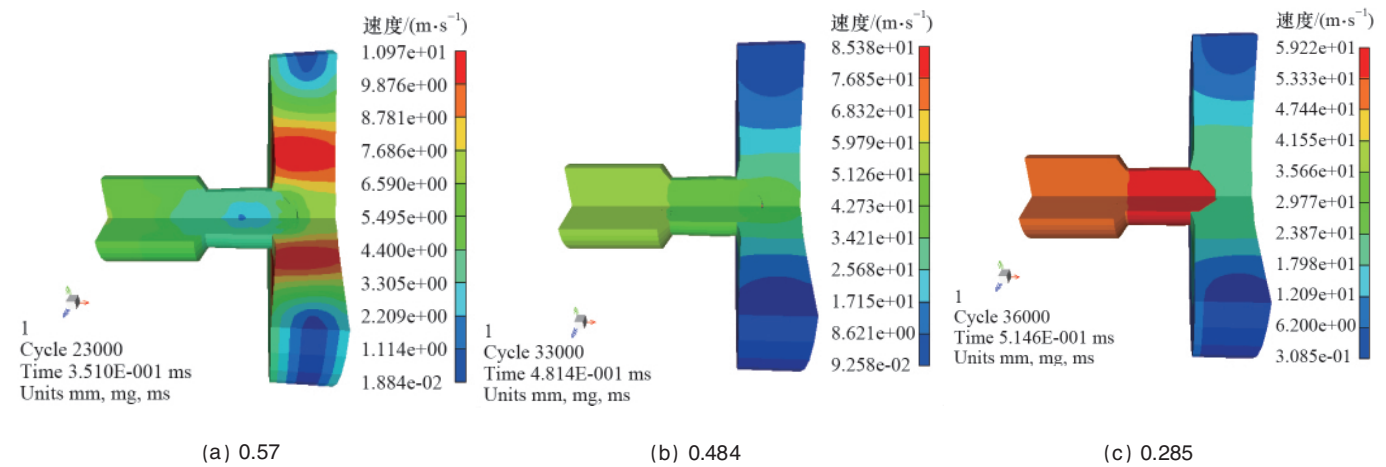


图 11 硬化指数对侵深的影响数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results of the impact of hardening exponent on penetration depth

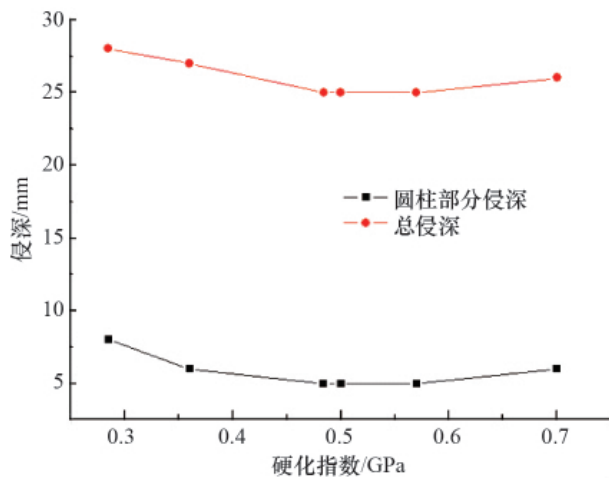


图 12 侵深-硬化指数变化曲线

Fig. 12 Curves of penetration depth vs hardening exponent

显变形。由此可见,动能弹侵彻能力随着硬化指数的减小而提高。

### 3 结论

本研究以 AUTODYN-2D/3D 非线性动力学软件为仿真平台,通过对弹侵彻甲板过程的力学行为进行数值模拟,得到了材料参数对侵深的影响规律。

(1) 屈服应力对侵深影响最为显著,当弹体材料屈服应力小于等于靶板材料屈服应力时,弹体在侵彻时发生严重变形而不能侵入靶板。

(2) 硬化常数和硬化指数对侵彻深度影响较大,侵彻深度与硬化常数呈正比关系,但当硬化指数增大到一定值后侵深变化趋于稳定,硬化指数则与侵彻深度呈反比关系。

(3) 剪切模量对侵深影响不明显。

## 参考文献 (References)

- [1] 金丰年, 韩鹏飞. 基于冲击波理论的钻地武器极限侵深近似分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2005, 6(4): 346-347.  
Jin Fengnian, Hai Pengfei. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2005, 6(4): 346-347.
- [2] 楼建锋, 何长江, 朱建士, 等. 长杆侵彻中材料参数对侵彻性能的影响[J]. 计算物理, 2009, 26(4): 560-561.  
Lou Jianfeng, He Changjiang, Zhu Jianshi, et al. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2009, 26(4): 560-561.
- [3] Dey S, Bórvik T, Hopperstad O S. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(8-9): 1005-1038.
- [4] Dey S, Bórvik T, Hopperstad O S. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 464-486.
- [5] Bórvik T, Hopperstad O S, Langseth M. Effect of target thickness in blunt projectile penetration of Weldox 460E steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(4): 413-464.
- [6] Rusinek A, Rodriguez-Martínez J A, Arias A. Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(10): 2946-2967.
- [7] Arias A, Rodriguez-Martínez J A, Rusinek A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(6): 1635-1656.
- [8] Bórvik T, Langseth M, Hopperstad O S. Ballistic penetration of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22 (9-10): 855-886.
- [9] 程兴旺, 王富耻, 李树奎. 不同头部形状长杆弹侵彻过程的数值模拟[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 930-933.  
Cheng Xingwang, Wang Fuchi, Li Shukui. *Acta Armamentarii*, 2007, 28 (8): 930-933.
- [10] Century Dynamics Inc. Interactive non-linear dynamic analysis software AUTODYNTM user manual [M]. Concord, CA: Century Dynamics Inc, 2003.
- [11] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)

## · 学术动态 ·

## “第五届中国石油地质年会”征文

中国石油学会石油地质专业委员会、中国地质学会石油地质专业委员会, 拟于2013年5月28日在北京联合召开“第五届中国石油地质年会”。

征稿范围:(1)非常规油气地质理论与勘探开发技术;(2)中国陆相盆地油气地质理论与勘探技术进展;(3)中国海相油气地质理论与勘探技术进展;(4)中国海域油气地质理论与勘探技术进展;(5)海外油气地质理论与勘探技术进展;(6)石油地质理论研究与技术探索;(7)石油工业上游面临的挑战与发展战略。

论文提交日期:2013年3月31日

联系电话:010-82282485

电子邮箱:sydz.syky@sinopec.com

大会网站:www.geosociety.org.cn/web/c\_0000000200020015/d\_5033.htm

## · 学术动态 ·

## “中国力学大会-2013”征文



中国力学大会是中国力学界每两年一次的综合性学术盛会,是广大力学科技工作者学术交流的重要平台。“中国力学大会-2013”将于2013年8月21日在西安举行。会议由中国力学学会、西安交通大学联合主办,现征集相关学术论文。

联系电话:010-82543903, 62559209

电子邮箱:liuyang@cstam.org.cn

大会网站:www.cstam.org.cn/templates/lxxh\_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131