

文章编号: 1001-1455(2005)03-0265-06

卵形杆弹对铝靶的斜侵彻*

王 峰¹, 王肖钧¹, 胡秀章¹, 刘文韬²

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 在 Lagrange 有限元基础上, 扼要介绍了一种适用于三维斜侵彻数值模拟计算的滑移面处理技术。该方法放弃了传统滑移计算中从单元的设置, 而代之以预设从节点, 从而避免三维斜侵彻数值计算中主从单元的相交、滑移面的识别、修正与再定义的困难。在确保计算精度的同时, 有效地提高了计算效率。卵形杆弹对铝靶侵彻的系列数值模拟计算表明, 无论对于正撞击或斜撞击, 本文中所获结果与实验结果都有良好的一致性, 这说明本文中所述方法和所建程序的合理性和有效性, 为侵彻贯穿过程的数值分析提供了一种实用和有效的手段。

关键词: 爆炸力学; 侵彻和贯穿; 滑移面; 卵形杆弹; 剩余速度; 有限元

中图分类号: O385

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

高速侵彻问题的理论与实验研究始终是新武器研制和高科技领域中的重要课题, 一直受到国内外学者的高度重视^[1~2]。无论进攻或防御, 可靠预测侵彻效果、提高侵彻能力始终是常规武器研究中的核心。实验研究的诸多限制以及解析方法的有效性和局限性, 使数值模拟成了高速侵彻理论研究中一种主要和广泛认同的方法而获得长足发展^[3~4]。然而, 与通常意义下的接触间断不同, 侵彻贯穿计算中的显著特点是弹体在靶板中的高速推进, 它伴随着接触面两侧材料的剧烈畸变以及由此引起的严重消蚀。正确描述这种滑移行为常成为数值计算的瓶颈。在二维计算中, 滑移面只是一条滑移线, 可以通过各种近似方法对它作出有效描述。然而在三维斜侵彻中, 滑移面成了一个动态的, 其形状和大小需要不断调整和修正的空间曲面, 数值仿真的难度显然提高了。本文中在二维有限元数值计算方法的基础上, 采用一种简易滑移面处理技术^[5], 对卵形钢杆弹正侵彻和斜侵彻铝靶进行系列数值模拟计算, 为三维斜侵彻数值模拟计算寻求更多的依据和选择。

2 计算方法简介

在 Lagrange 有限元里, 质量守恒方程是自动满足的。能量方程通过随体导数“ $\dot{\cdot}$ ”被表示成

$$\dot{E} = -p\dot{v} + vS_{ij}\dot{e}_{ij} \quad (1)$$

式中: E 为比内能, p 和 v 为静水压和比容, S_{ij} 和 \dot{e}_{ij} 分别表示偏应力分量和偏应变分量。式(1)不出现空间偏导数, 因此可以直接进行增量计算, 于是运动方程成了唯一需要进行有限元离散的守恒方程。采用集中质量法后, 运动方程被离散为通过节点力表示的质量运动方程

$$m_I \dot{v}_I = f_I^{\text{ext}} - f_I^{\text{int}} \quad (2)$$

式中: m_I 表示节点 I 的集中质量; v_I 表示节点 I 的速度;

$$f_I^{\text{ext}} = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T(x_i) \mathbf{b}(x_i, t) d\Omega + \int_{\Omega_e} \mathbf{N}^T(x_i) \mathbf{t}_n(x_i, t) d\Omega$$

* 收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272097); 计算物理实验室基金项目(51479010303ZK0102)

作者简介: 王 峰(1976—), 男, 博士研究生。

表示节点外力,其中, \mathbf{N} 为有限元的插值函数, \mathbf{b} 和 \mathbf{t}_n 分别表示单元 Ω_e 上的体力和表面力;

$$\mathbf{f}_I^{\text{int}} = \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T(x_i) \boldsymbol{\sigma}(x_i, t) d\Omega$$

为节点内力,其中, \mathbf{B} 为梯度矩阵,由插值函数 \mathbf{N} 的空间导数构成, $\boldsymbol{\sigma}$ 是以行向量表示的应力张量。

对式(2)进行时间积分便得到节点速度 \mathbf{v}_I , 通过几何关系求出单元应变率及相应的应变增量。再由质量守恒、能量守恒和本构方程便可求出应力张量、内能、密度等全部物理量。从计算思想说来,三维计算与二维计算无任何实质区别。

然而,在三维斜侵彻数值模拟里,弹体在靶板中的滑移计算往往是数值计算中的关键和难题。与通常意义下的接触间断不同,高速侵彻中的滑移面具有变形剧烈、相对运动大、材料破坏和消蚀严重等特点,任何试图从物理上或数学上准确描述高速滑移面的演化过程都将遇到严重的挑战。为了避免将计算精力过多地置于滑移面上,本文中采用了一种简化的滑移处理技术,有效地提高了计算效率。对于八节点六面体立方元,该方法的基本思想可归纳为如下几点。

(1)放弃二维滑移计算中的从单元设置而代之以预设从节点。在三维滑移计算中,弹体和靶板分别被视为主单元和从节点。从节点只能在主单元外表面(称之为主面)上滑移,不能侵入主单元。于是全部含有从节点的主面的集合便形成了滑移面。

(2)定义主节点向量 \mathbf{n}_I 为该点所在所有主面外法线 \mathbf{n}_s^I 的向量和,即

$$\mathbf{n}_I = \sum_{s=1}^N \mathbf{n}_s^I \quad (3)$$

式中: \mathbf{n}_s^I 表示节点 I 所在某主面 s 上外法线, N 为与该点有关的主面个数。当主面节点按局部编号逆向排列时,主面外法线 \mathbf{n}_s 可由下式求得

$$\mathbf{n}_s = \mathbf{x}_{13} \times \mathbf{x}_{24} / \|\ \ \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_{13} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3$, $\mathbf{x}_{24} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_4$, $\|\ \$ 是归一化算符。显然,对于内节点,主节点向量 \mathbf{n}_I 必为零向量。只有位于边界面上的主节点, \mathbf{n}_I 才不为零。由此可以判定滑移面。

(3)对每一时间步 Δt , 搜索从节点是否侵入主单元。从节点一旦侵入主单元,则将被重置于主面上。重置方向 \mathbf{n} 取为该单元 8 个主节点向量的合向量方向,即

$$\mathbf{n} = \left(\sum_{I=1}^8 \mathbf{n}_I \right) / \|\ \quad (5)$$

于是,对于只含一个边界面的主单元, \mathbf{n} 便是该边界面上 4 个主节点向量的向量和(其余 4 个节点为内节点, $\mathbf{n}_I = \mathbf{0}$)。当主单元含有多个边界面时,从节点将沿某一平均意义上的方向被重置在主面上。一旦 \mathbf{n} 确定,从节点的新位置

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \eta \mathbf{n} \quad (6)$$

式中: \mathbf{x}_0 表示调整前从节点的位置。 η 由重置方向 \mathbf{n} 和主面交点的几何位置插值确定。

(4)从节点被重置于主面后,需对其速度作出调整,以保证时间步 Δt 内从节点正好到达主面。速度调整量由从节点调整前后位置确定,即

$$\Delta \mathbf{v} = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) / \Delta t \quad (7)$$

于是调整后从节点的速度

$$\mathbf{v}_{\text{new}} = \mathbf{v}_{\text{old}} + \Delta \mathbf{v} \quad (8)$$

为保证系统总动量守恒,在对从节点速度进行调整的同时,需对其所在主面上的主节点速度作出相应调整。由动量守恒方程知

$$m_s \Delta \mathbf{v} + m_I \Delta \mathbf{v}_I = \mathbf{0} \quad (9)$$

式中: m_s 和 $\Delta \mathbf{v}$ 分别表示从节点质量和速度调整量; m_I 和 $\Delta \mathbf{v}_I$ 分别表示主节点质量和速度调整量。式(9)是矢量式, $\Delta \mathbf{v}$ 和 $\Delta \mathbf{v}_I$ 均指向从节点重置方向 \mathbf{n} 。为计算简便,假定每个主节点的动量调整依主节点向量 \mathbf{n}_I 沿重置方向 \mathbf{n} 投影的大小确定,即

$$m_I \Delta v_I = - \frac{\mathbf{n}_I^T \mathbf{n}}{r} m_s \Delta v \quad (I \text{ 不作和}) \quad (10)$$

式中： $r = \sum_{j=1}^4 \mathbf{n}_j^T \mathbf{n}$ 表示 4 个主节点向量 \mathbf{n}_j 沿 \mathbf{n} 方向的分量和。于是每个主节点的速度调整量

$$\Delta v_I = - \frac{\mathbf{n}_I^T \mathbf{n} m_s}{r m_I} \Delta v \quad (I \text{ 不作和}) \quad (11)$$

3 数值模拟计算及结果分析

按上述方法，编制了三维有限元冲击力学计算程序。为确认程序的有效性和合理性，以 A. J. Piekutowski 等^[6]在 12.9 mm 口径火药枪上所做的冲击贯穿实验为依据，开展数值模拟计算。

3.1 计算模型

3.1.1 几何模型

文献[6]详细介绍了速度在 280~860 m/s 范围内的正侵彻和斜侵彻(倾角 $\beta = 30^\circ$)的系列实验结果。实验所用弹丸为带有正切卵形弹头的钢质杆弹，如图 1 所示，其中 $a = 6.45 \text{ mm}$ ， $L = 67.5 \text{ mm}$ ， $l = 21.4 \text{ mm}$ 。靶板为 $304 \text{ mm} \times 304 \text{ mm} \times 26.3 \text{ mm}$ 的铝板。杆弹和靶板的结构形式及加载方式都有某种对称性，因此只需取 1/2 结构进行建模。采用八节点六面体单元对弹体和靶板进行网格剖分。杆弹被划分成 414 个立方元。靶板则视侵彻角不同而变，对于正侵彻，取 40 560 个单元；对于斜侵彻，取 50 700 个单元。为了提高计算效率并确保计算精度，靶板网格被设置成变网格。侵彻通道附近取为细网格，远处则为粗网格。斜侵彻时侵彻通道较长，故细网格应相应增加。在滑移面计算中，弹体单元全部被视为主单元，靶板节点则被取为从节点。靶板被划分为数个体包，计算采用体包搜索法，只有体包内的从节点才进入滑移面计算逻辑，由此可以提高计算效率。

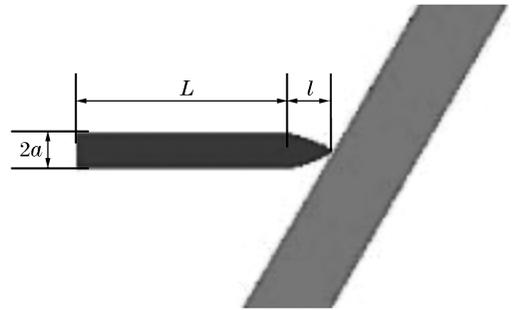


图 1 卵形杆弹对靶板的斜撞击

Fig. 1 Oblique impact of ogive-nosed rod on target

3.1.2 材料模型

(1) 本构模型

无论是钢弹或是铝靶，均被视为流体弹塑性体，其静水压力与体积变形之间用 Grüneisen 状态方程^[7]描述

$$p = (K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3) (1 - 0.5 \gamma \mu) + \gamma \rho E \quad (12)$$

式中： $\mu = v_0/v - 1$ 为压缩比， γ 为 Grüneisen 参数， E 为比内能， ρ 为密度， K_1 、 K_2 、 K_3 为状态方程参数。

应力偏量服从增量型弹塑性应力应变关系，即

$$dS_{ij} = 2G(de_{ij} - de_{ij}^p) \quad (13)$$

式中： G 为剪切模量， de_{ij} 为偏应力增量， de_{ij}^p 为偏应力增量中的塑性部分。

材料服从 Mises 屈服准则，屈服强度取为线性硬化函数

$$Y = Y_0 + (Y_u - Y_0) \bar{\epsilon}_p / \bar{\epsilon}_u \quad (14)$$

式中： Y_0 为初始屈服应力， Y_u 为极限屈服应力， $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变， $\bar{\epsilon}_u$ 为极限应变。

(2) 破坏判据

侵彻过程中滑移面两侧材料处于塑性流动大变形，其破坏行为通过引入最大等效塑性应变破坏判据 $\bar{\epsilon}_{\max}^p$ 进行描述。当滑移面两侧单元的等效塑性应变满足 $\bar{\epsilon}_p \geq \bar{\epsilon}_{\max}^p$ 时，认为该单元因塑性畸变而破坏。

强冲击引发的压应力波,在自由面反射时会造成材料拉伸断裂。程序采用最简单的拉应力破坏准则进行描述,即当 $|\bar{\sigma}| \geq p_\sigma$ 或 $\bar{\epsilon}_v \geq \Delta_b$ 时,认为材料发生拉伸破坏,式中: $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\epsilon}_v$ 分别表示平均应力和体应变, p_σ 为最大许可负压, Δ_b 为剪切和拉伸破坏时的体积应变。

单元一旦满足上述破坏准则则被视为破坏单元,其强度被置为零,只能承受静水压作用。计算中用到的有关物理参数^[7]和计算参数见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters for materials

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	G/GPa	Y_0/GPa	Y_u/GPa	p_σ/GPa	$\bar{\epsilon}_u$	状态方程参数/GPa			γ	Δ_b	ϵ_{max}^p
							K_1	K_2	K_3			
钢	7 823	77.5	1.430	2.50	1.70	0.01	164.0	294	500	2.0	1.1	4.9
铝	2 704	26.5	0.276	0.42	0.43	0.30	76.7	128	125	1.2	1.2	2.1

3.2 计算结果及讨论

3.2.1 卵形钢杆弹对铝靶的正贯穿

A. J. Piekutowski 等^[6]进行的钢质卵形杆弹对铝靶的正贯穿实验给出了杆弹的初始速度 v_0 和穿靶后的剩余速度 v_r ,如图 2 所示。图 2 还给出了按上述方法开展的数值校核计算结果。由图 2 可以看到,计算结果与实测结果吻合良好;当初速较大时,剩余速度 v_r 与初速 v_0 间几乎呈线性关系。

图 3 是初速为 730 m/s 的杆弹,当 $t = 75.0 \mu\text{s}$ 时模拟计算结果与实测闪光 X 照片的比较。由于钢弹与铝靶材料强度差别较大,实验和计算都表明,杆弹贯穿靶板后,不出现质量消蚀,几乎不变形。

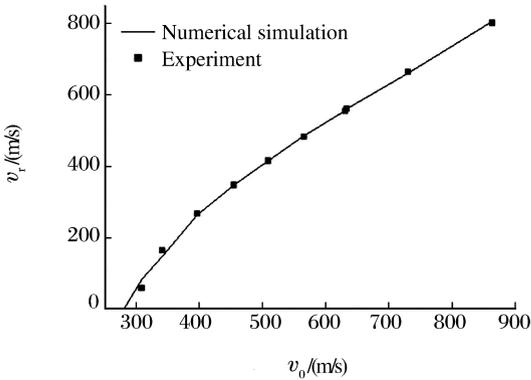


图 2 正撞击下的剩余速度计算结果与实验结果的比较
Fig. 2 Comparison of computational and experimental residual velocities for normal penetration

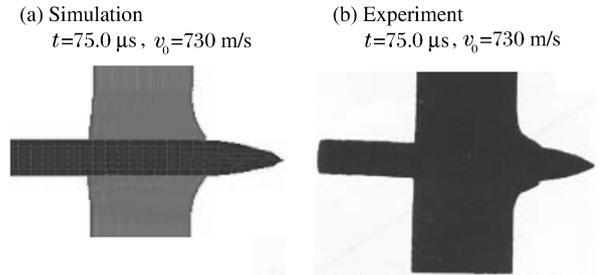


图 3 模拟正侵彻过程与实验结果比较
Fig. 3 Comparison of simulant and experimental normal penetration

3.2.2 卵形钢杆弹对铝靶的斜贯穿

图 4 给出了 A. J. Piekutowski 等^[6]所做的倾角 $\beta = 30^\circ$ 的卵形杆弹斜贯穿铝靶的实验结果和按上述方法获得的有限元计算结果。由图 4 可以看出,与正贯穿数值模拟计算结果类似,计算结果和实验结果很接近。

图 5(a)是初速为 730 m/s 的斜侵彻计算中, $t = 90.6 \mu\text{s}$ 时的侵彻图像,图 5(b)则是同一时刻实测闪光 X 照片。由于实测角度及测量技术等原因,照片上显示的板厚及变形模态与计算结果不尽一致。但总体上说,两者仍有很好的可比性。斜贯穿过程中杆弹表面由于受力不对称而出现弯矩,杆弹会发生弯曲变形,这是斜侵彻的重要特征。但杆弹材料强度远大于铝靶,因此未观察到杆弹的消蚀和破坏。

低速段计算结果和实验结果有一些偏差(见图 2 和图 4),这与本构模型、计算模型、材料参数等有关,这些问题将是下一阶段研究的重点。

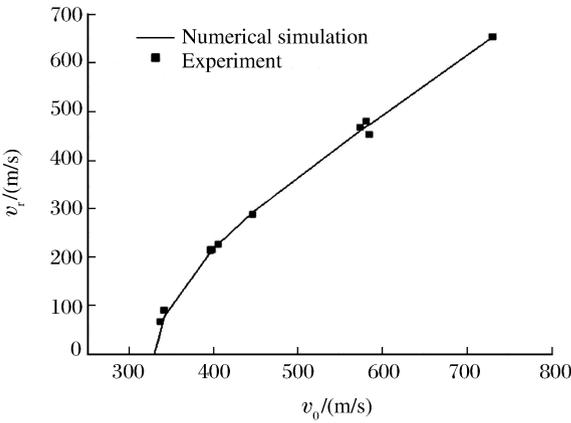


图 4 斜撞击下的剩余速度计算结果与实验结果的比较
Fig. 4 Comparison of computational and experimental residual velocities under oblique penetration

3.2.3 杆弹-靶板侵彻过程分析

图 6 为速度为 400 m/s 的杆弹以倾角 $\beta=0、15、30^\circ$ 侵彻靶板时,杆弹平均侵彻速度的演化规律。由图 6 可以看出,无论正侵彻还是斜侵彻,整个侵彻过程大致可分成:

(1)早期开坑阶段 A。此时弹头开始进入靶板并受到靶板的阻力作用,但是由于弹头并未完全进入靶板,侵彻速度变化较缓慢。

(2)定常侵彻阶段 B。弹头完全进入靶板,靶板对杆弹的侵彻阻力几乎不变,侵彻速度随时间线性下降。这说明杆弹在侵彻过程中所受的阻力主要来自弹头。

(3)贯穿阶段 C。弹头开始贯穿靶板,弹头所受阻力明显降低,侵彻阻力的减小使侵彻速度变化趋缓。

(4)完全贯穿阶段 D。弹头完全贯穿靶板,侵彻阻力完全由杆弹侧面与靶板的切向力所提供,贯穿速度近似为一常数。

图 7 给出了倾角为 30° 时以上各阶段典型时刻的侵彻图像。可见数值计算给出的物理图像与理论分析一致,这说明本文中所述的滑移面处理方法是成功的,能够重现侵彻贯穿的演化过程,因此是斜侵彻数值分析中一种卓有成效的方法。

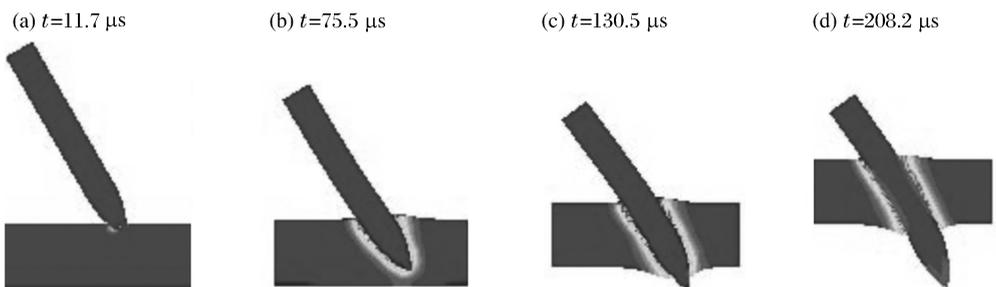


图 7 不同时刻的杆弹侵彻图像

Fig. 7 Configurations of the different rod-projectile penetration stages

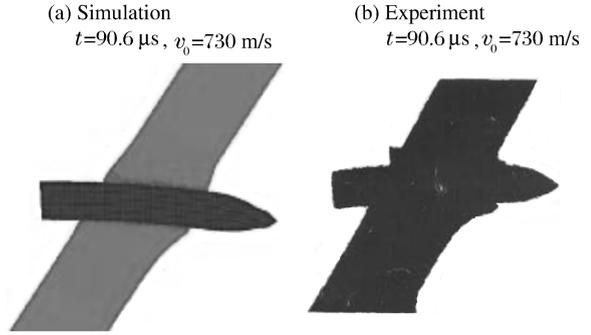


图 5 模拟斜侵彻过程与实验结果比较

Fig. 5 Comparison of simulant and experimental oblique penetration

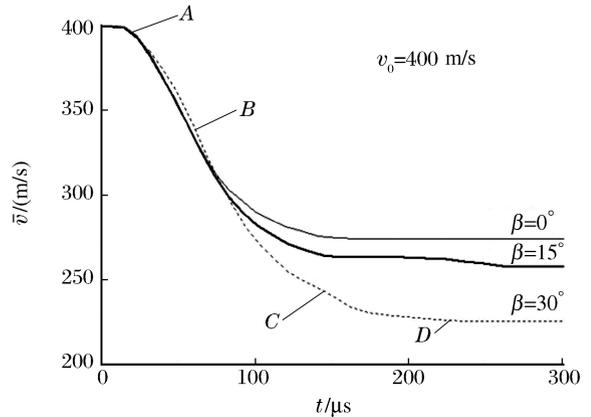


图 6 弹体平均侵彻速度随时间的变化

Fig. 6 Average penetration velocity vs. time for projectile

4 结 论

在 Lagrange 有限元数值计算方法的基础上,提出了一种适用于三维冲击力学数值模拟计算的滑移面简易算法。采用在此方法基础上开发的三维有限元程序,对卵形杆弹正侵彻和斜侵彻铝靶进行了系列数值模拟计算,所获结果与文献[6]的实验结果一致。所述方法和所建程序可以作为侵彻贯过程数值分析的重要手段。

参 考 文 献:

- [1] Goldsmith W. Non-ideal projectile impact on targets[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999,22(2/3):95—395.
- [2] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [3] Znkas J A. High Velocity Impact Dynamics[M]. New York: Wiley,1990.
- [4] Camacho G T, Ortiz M. Adaptive Lagrangian modeling of ballistic penetration of metallic targets[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1997,142(3/4):269—301.
- [5] Belytschko T, Lin J I. A three-dimensional impact-penetration algorithm with erosion[J]. *Computers & Structures*, 1987,25(1):95—104.
- [6] Piekutowski A J, Forrestal M J, Poormon K L, et al. Perforation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996,18(7/8):877—887.
- [7] Robbins J R, Ding J L, Gupta Y M. Load spreading and penetration resistance of layered structures—A numerical study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004,30(6):593—615.

Oblique penetration of an ogive-nosed rod into the aluminum target

WANG Feng^{1*}, WANG Xiao-jun¹, HU Xiu-zhang¹, LIU Wen-tao²

(1. *Department of Mechanics and Mechanical Engineering,*

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Based on the Lagrange finite element method, briefly introduce a computational technique for sliding interface treatment in 3D oblique penetration. The slave elements used in conventional computations are abandoned, and at the same time the slave nodes are advanced. Thereby, the difficulties such as the master-slave element intersection, the sliding interface recognition, modification and redefinition encountered in 3D oblique penetration simulation calculations are avoided to insure high computational precision and efficiency. Numerical computations for the ogive-nosed steel rod penetrating into the aluminum target show that the computational results are in good agreement with the experimental results for both normal and oblique penetrations. Therefore, the method discussed and the program developed are reasonable and effective, and they are resultful for the numerical study on penetration and perforation.

Key words: mechanics of explosion; penetration and perforation; sliding interface; ogive-nosed rod; residual velocity; finite element

* Corresponding author: WANG Feng

E-mail address: wangfeng0706@ustc.edu

Telephone: 0551-3606734