

大长径比杆条对钢板高速斜侵彻过程 及其应力波传播特性研究

蔡中兵

(盐城工学院 力学课程组,江苏 盐城 224051)

摘要:利用非线性动力有限元分析程序,对大长径比杆条高速斜侵彻钢板的过程进行了数值模拟,分析了侵彻过程中重要物理量的变化情况,并探究了侵彻过程中应力波的传播特性,得到了一些符合实际的结果。

关键词:大长径比杆条;斜侵彻;应力波;数值模拟

中图分类号: O313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2011)01-0012-05

空空导弹可控离散杆式战斗部的核心结构由一组大长径比杆条组成。战斗部在目标附近爆炸后,杆条受到爆轰后得到了非常高的初始速度,并以不同的倾角攻击目标,属于典型的斜侵彻。同时当杆体冲击目标时,在杆体和靶板中将会产生弹塑性应力波的传播,从而对侵彻过程会产生一定的影响。但是对于斜侵彻问题,因为其受力的不对称性,要想通过理论分析准确得出弹塑性应力波的传播非常困难。现阶段,国内的理论分析主要集中在普通弹丸^[1]上以及大长径比杆条垂直入侵的特定情况下^[2],对于斜侵彻过程以及其应力波的研究涉及较少。

1 计算模型的选取

1.1 计算假设

杆条和靶板为均匀连续介质,整个侵彻冲击过程考虑为绝热过程。侵彻过程非常短暂,都是以微秒作为计量单位,整个过程可以不考虑重力。弹丸和靶板的初始应力都取为零。

1.2 材料模型

1.2.1 屈服准则

描述材料在大变形、高应变率和高温条件下的本构模型选用 Johnson-Cook^[3]材料模型,该模型适用于多种材料,包括大部分金属材料。该模型典型应用于金属爆炸成型、弹道侵彻和冲击。

对 Von-Mises 屈服应力模型,Johnson-Cook 把材料屈服应力表示为:

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\bar{\epsilon}}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

1.2.2 破坏准则

破坏准则模型采用了一个与应变、应变率、温度和压力相关的常数值来表明了不同参数的相对影响。

该模型定义了一个单元的损伤为

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\bar{\epsilon}_f} \quad (2)$$

式中, $\Delta \epsilon$ 是一个积分循环中的等效塑性应变增量, $\bar{\epsilon}_f$ 是在当前应变率、温度、压力和等效应力条件下断裂时的等效应变,当 $D=1.0$ 时,出现断裂。

2 侵彻模型的建立

2.1 几何模型与初始条件

斜侵彻是侵彻现象中最为普遍的,我们以侵彻角为 45° 时举例,研究斜侵彻的过程。首先可以建立如图 1 的几何模型,杆条的运动主要由平动和绕杆条的转动组成,靶板保持固定。

杆条为圆柱形,尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,初始平动速度为 $2\,000 \text{ m/s}$,初始转动速度为 600 rad/s ;靶板为立方体,尺寸为 $400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

收稿日期:2010-11-24

基金项目:盐城工学院人才引进资助项目(XKR2010047)

作者简介:蔡中兵(1983-),男,江苏盐城人,讲师,硕士,主要研究方向为弹塑性力学及其工程应用。

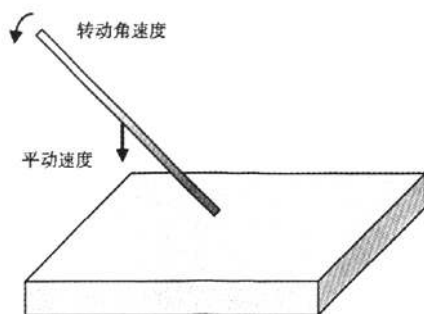


图1 杆板侵彻的几何模型

Fig.1 Geometric model of the penetration

触位置一定距离的远处则采用相对较粗的网格,如图2所示。



图2 杆靶侵彻的离散模型

Fig.2 Discrete model of the penetration

2.2 离散模型

由于侵彻问题的高压力和大变形效应局限在杆与靶板接触位置附近的区域内,因此在划分单元时对靶板接触区域采用较密的网格,而在离接

2.3 边界条件及材料参数

靶板四周采用非反射边界,吸收膨胀波和剪切波,这可以避免边界处应力波的反射对求解域的影响,同时也限制了靶板的法向位移。

杆靶材料参数来源于文献[4],见表1。

表1 杆、靶材料参数

Table 1 Material parameter of the rod and plate

符号	ρ	G	A	B	n	C	m	T_m	T_r	C_r	$\dot{\epsilon}_0$
杆条 4340 钢	7.83	0.77	$7.92e-3$	$5.10e-2$	0.26	0.014	1.03	1 793	283	$4.77e-6$	$1.0e-6$
靶板 45 号钢	7.83	0.77	$5.07e-3$	$3.20e-3$	0.28	0.064	1.06	1 793	283	$4.77e-6$	$1.0e-6$

注:表中单位采用 $\text{cm} - \text{g} - \mu\text{s}$, 温度单位采用 K。

3 结果分析

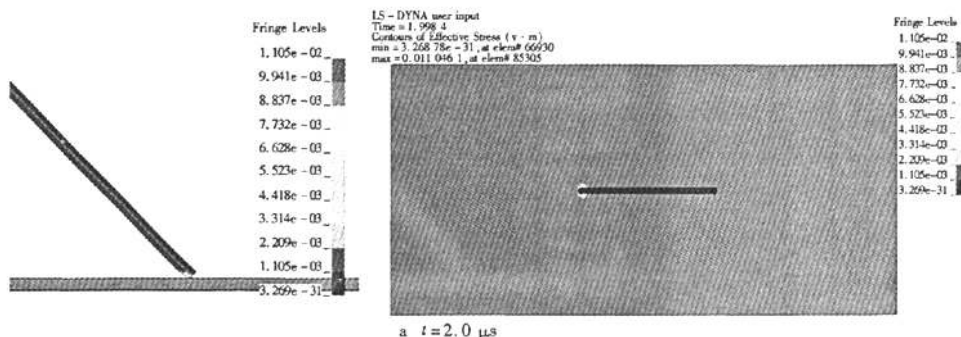
3.1 侵彻过程研究

图3显示的是长杆对靶体侵彻过程中不同时刻的 Von-Mises 应力云图。杆体对靶板的斜侵彻过程因为受力的非对称性,其破坏过程与一般的垂直侵彻和水平侵彻有着明显的区别。该斜侵彻过程持续约 $58.2 \mu\text{s}$,大致可以划分为4个阶段:

(1)开坑侵蚀阶段($1.8 - 2.0 \mu\text{s}$)。如图3a所示阶段,杆体撞击靶板,由于是斜侵彻,杆体头

部与靶板接触的非同时性,杆体受力面积不对称导致抗力作用不在轴线上,杆条头部发生弯曲,杆体轴线同时向着靶板平面方向偏转,接触面底部呈弧形。

(2)挤凿侵入阶段($2.0 - 10 \mu\text{s}$)。如图3b所示阶段,杆体和靶板材料逐渐达到失效应变而失效,杆体和靶板材料不断破坏、飞溅,使得杆条长度缩短,弹坑不断扩大,杆条的继续侵彻和碎片的反挤作用使靶体背面的鼓包不断增大,并且出现裂纹,靶板背面出现少许破碎。



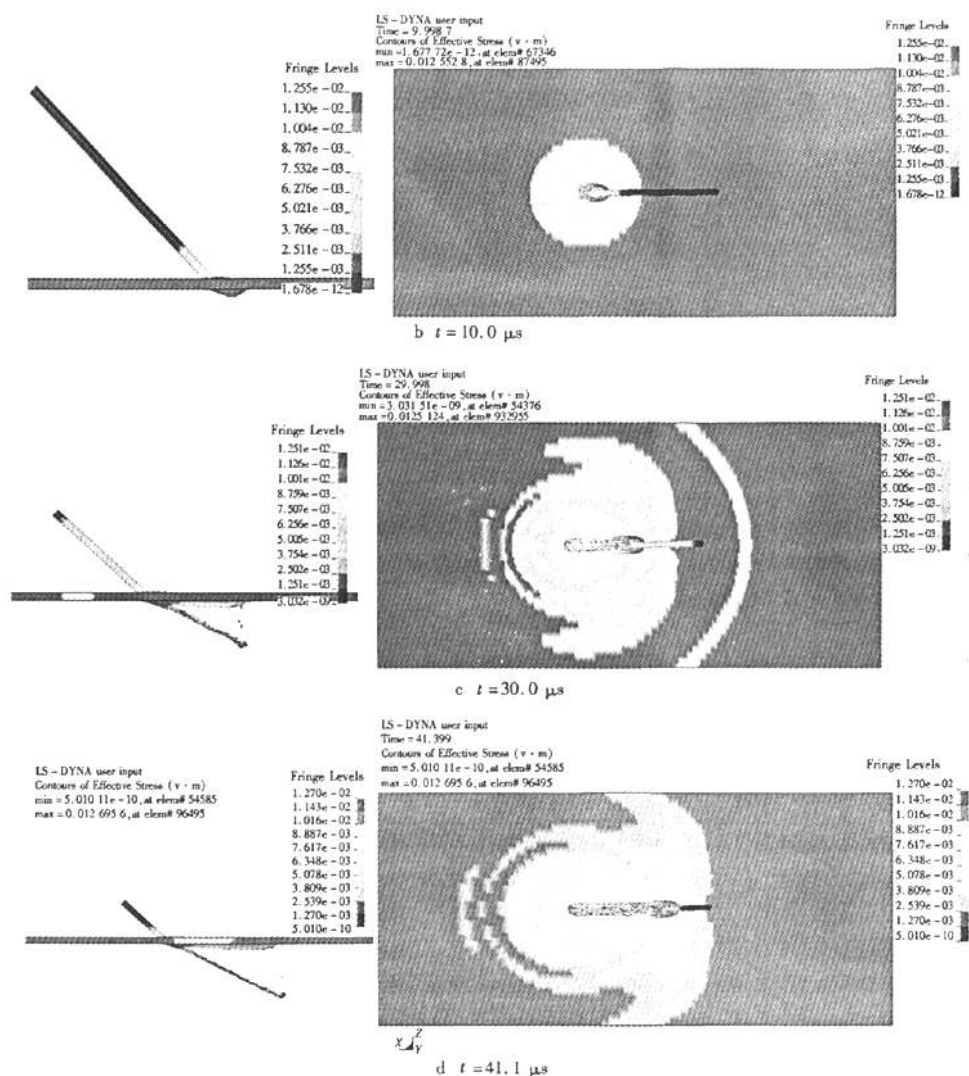


图3 杆板变形和应力波传播过程

Fig. 3 Process of deformation and stress wave propagation of the rod and plate

(3) 崩落贯穿阶段($10.2 \mu\text{s}$)。在弹芯头部的冲击压力和靶板应力波的作用下,鼓包内部逐渐碎裂,并在背面出现崩落;杆体在挤压作用下,体部也逐渐达到失效应变而不断破碎,当其前部靶板碎裂后,剩余杆体从靶板中穿出。

(4) 继续侵入阶段($10.2 - 58.2 \mu\text{s}$)。如图3cd所示阶段,杆体较长,杆件前端穿透后,由于还存有较大的速度,所以杆体的后部继续与靶板发生侵入。杆体由于侵入的影响,体积和质量不断减小;靶板在挤压作用下,其毁伤面在不断增加,质量损失也在持续增加。

整个侵入过程中,高应力区始终集中在杆和

靶板的接触处。同时由于杆受力的不对称性,杆的前部在开坑侵蚀阶段受到的阻力较大,后部受到的阻力相对较小,造成杆的前段有了弯曲现象,并使杆在 x 方向也有了一定的位移和速度,造成杆的入侵角和穿出角的不相等。

3.2 应力波传播特性研究

从穿透过程来看(见图3),在接触处始终存在着极高的接触应力。随着侵入的进行,应力区从接触处逐步向远处发展,显示了应力波的传播过程。对于杆条,应力波传播到杆条后端后,又产生了反向传播,使得杆条上端的应力值有所降低,而在接触处的杆条材料,一部分发生侵蚀,一部分

发生塑性流动;对于靶板,应力区随时间由侵入点向四周扩散,也可以清晰地观察到应力波的运动过程,由于靶板所选择的边界类型是非反射边界,所以应力波到达边界后被吸收,观察不到波的反射现象。

弹性纵波速度、塑性波速度的理论公式^[5]

$$c_1 = \sqrt{\frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \quad (3)$$

弹性纵波的速度与应力无关,可由理论公式(3)直接算出约为 5 500 m/s,而塑性波的速度与应力有关,随着应力的增大而减小,一般不易求出精确值,但两者在同一个数量级上,且塑性波波速总比弹性波的波速低。对本例中应力的传播测定,应力波从 1.8 μs 时开始传播,在 23 μs 时传播到了距初始位置处约 104.824 mm 处,由此可以估算出弹性波速度约为 4 944.5 m/s。对结构塑性应变的传播测定,塑性应变从 1.8 μs 时开始传播,在 6.6 μs 时传播到了距初始位置处约为 9.626 34 mm 处,由此估算出弹性波速度约为 2 005.5 m/s。这验证了在侵彻过程中同时存在了弹性波和塑性波,两者在同一数量级,但弹性波的速度远比塑性波的速度要快。同时这也证明了本文计算结果的正确性。

3.3 物理量变化特性研究

由图 4 知:杆 y 方向的速度在 1.8 μs 时开始减小,在 60 μs 时侵彻结束,速度保持稳定,为 1 360.9 m/s。图 5 显示了杆 x 方向的速度变化曲线,由于斜侵彻时的不对称性,杆的横向速度有了较大的增加,最后稳定为 426.7 m/s,这个速度相对于杆的 y 方向的速度已经很大,与水平和垂直侵彻时的速度有明显的区别。

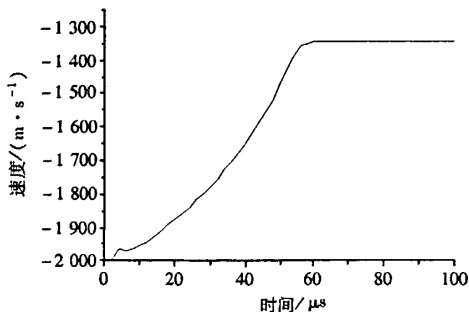


图 4 杆条 y 方向速度曲线

Fig. 4 Velocity curve in y direction of the rod

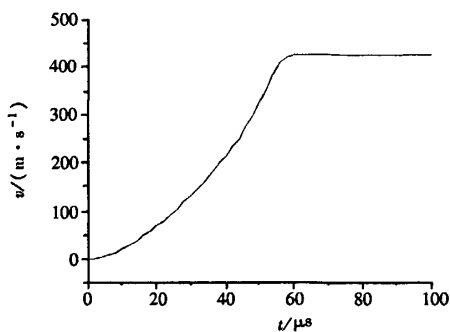


图 5 杆条 x 方向速度曲线

Fig. 5 Velocity curve in x direction of the rod

图 6 显示了杆的质量变化曲线,杆的质量在 1.8 μs 时开始下降,在侵彻结束时稳定为 10.286 9 g。杆条的质量和速度都不为零,说明该杆还有着继续侵彻的能力。而图 7 显示靶板的质量在 1.8 μs 时开始减少,到侵彻结束时质量减少了 27.56 g,这个质量损失比杆条的总质量要大的多,这说明杆条的侵彻能力较强,对钢板造成了较大的毁伤。

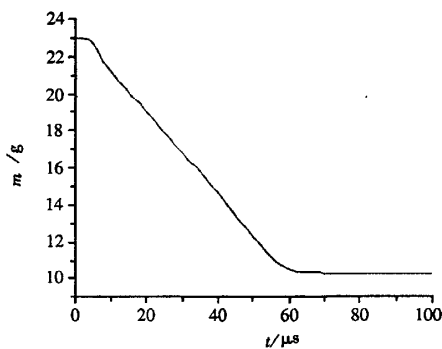


图 6 杆的质量历程曲线

Fig. 6 Quality process curve of the rod

图 8 显示了杆条侵彻结束后,靶板的破口及塑性变形区呈现不规则的形状和分布,也可以作为衡量杆条的侵彻能力和靶板的防护能力的重要指标。

4 结束语

(1) 由于前人所作工作都是研究杆水平和垂直侵彻靶板,斜侵彻的研究相对较少。本文通过建立合理的计算模型,对大长径比杆条斜侵彻靶

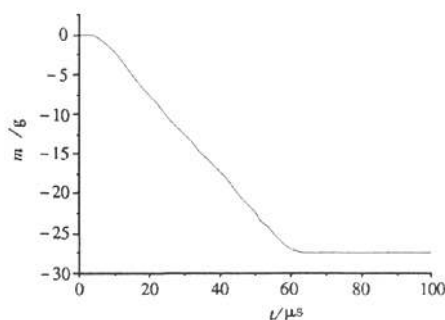


图 7 板的质量损失历程曲线

Fig. 7 Quality process curve of the plate

板的过程进行了详细研究,所得结果基本能反映杆、板的变形破坏情况。

(2) 侵彻过程呈现出明显的应力波传播特

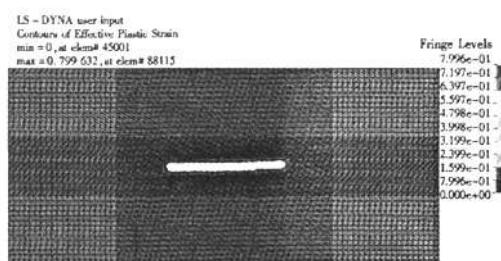


图 8 靶板破口及塑性变形区分布图

Fig. 8 The crevasse and plastic deformation distribution of the plate

性,并且同时存在弹性波和塑性波。弹性波的速度慢于塑性波,但在同一数量级。这一结果与弹性纵波、塑性波理论值基本吻合。

参考文献:

- [1] 徐坤博,龚自正,侯明强,等.超高速撞击中的弹丸形状效应数值模拟研究[J].航天器环境工程,2010,27(5):570-575.
- [2] 兰彬,文鹤鸣.钨合金长杆弹侵彻半无限钢靶的数值模拟及分析[J].高压物理学报,2008,22(3):245-251.
- [3] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[A]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics[C]. Netherlands: The Hague, 1983:541-547.
- [4] HU Changming, HE Honglinag, HU Shisheng. A study on dynamic mechanical behaviors of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2):188-192.
- [5] 王礼立. 塑性波、动态屈服准则和动态塑性本构关系[M]. 固体力学进展及应用——庆贺李敏华院士 90 华诞文集. 北京:科学出版社,2007:20-28.

A Study on Oblique Penetration of Big Length - to - Diameter Ratio Rod into Metal Plate at High Speed and Propagation Characteristics of its Stress Wave

CAI Zhong - bing

(Mechanics course group, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: In this paper, oblique penetration of big length - to - diameter ratio rod into metal plate at high speed is simulated with LS - DYNA. Some important physical changes in the Penetration process are studied. The research also explores some propagating characteristics of stress wave in the penetration, and gets some practical results.

Keywords: big length - to - diameter ratio rod; oblique penetration; stress wave; numerical simulation

(责任编辑:张英健;校对:沈建新)