文章编号：1000-5773(2008)03-0245-08

钨合金长杆弹侵彻半无限钢靶的数值模拟及分析*

兰 彬，文鹤鸣

（中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计国家重点实验室，安徽合肥 230027）

摘要：利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA，采用 ALE 方法和 Steinberg 本构模型，对钨合金长杆弹侵彻半无限厚钢靶进行了数值模拟，给出了侵彻过程 4 个阶段的完整图像和相关物理量的时程变化曲线，分析了弹、靶的压力分布、质点速度以及材料的流动特性。结果表明：在较大速度范围内，模拟计算的侵彻深度与实验结果吻合得很好；沿侵彻轴线，弹靶交界面附近的材料行为主要由静水压力控制。

关键词：长杆弹；半无限靶；侵彻；Steinberg 模型；数值模拟

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

长杆弹形状细长，单位截面积的动能很高，常用的材料有高强度合金钢、钨合金和铀合金（贫化铀），侵彻和贯穿能力很强。由于这些特点，长杆弹在高新武器装备研发和战争中受到广泛应用。自 20 世纪 60 年代以来，长杆弹侵彻一直是各国学者的研究热点，在实验[1-4]和理论模型[5-9]方面有大量成果发表。

然而由于受高速、甚至超高速实验技术的限制以及物理现象本身的复杂性，人们对其机理的认识还不够深入。随着计算机硬件和计算力学的发展，各种模拟冲击侵彻问题的数值计算理论和方法日益完善，越来越广泛地应用于研究中。数值模拟从描述方法可分为 Langrange 型和 Euler 型两种，Zukas[10]和 Johnson[11]曾全面而系统地评述了用于高速碰撞的各种数值计算方法，介绍了一些二维或三维冲击动力学计算程序，如 LS-DYNA、ADINA、EPIC、MSC-DYTRAN 等。由于用拉格朗日网格处理材料在高速冲击下的大变形问题比较困难，研究者多应用欧拉计算程序（如 CTH、PISCES 等）、ALE 方法（Arbitrary Lagrange-Euler）[12]或光滑粒子法等。

数值模拟分析成本相对较低、且较方便使用，在很大程度上弥补了高速侵彻实验中测量质点速度、压力等物理量方面存在的缺陷，能观测到材料变形的过程，这些对认识侵彻机理和建立理论模型有重要作用。Rosenberg[13]对钨合金长杆弹侵彻半无限装甲钢靶进行了数值模拟，研究了不同打击速度下弹体强度对侵彻深度的影响，值得注意的是弹体尾部减速由材料强度控制，因而并非弹体强度越大，侵彻能力越高。之后，Rosenberg[14]又研究了弹体其它物理量对侵彻深度的影响，发现热软化效应明显，而弹性模量和失效强度的影响可忽略。Mchenry 和 Choo[15]通过计算弹靶均为 1100 铝的侵彻，考察了弹体长径比对不同阶段（见下一段对侵彻阶段的划分）的侵彻深度的影响。Walker 和 Anderson 根据数值模拟结果提出了一种时程模型[9]的 3 个基本假设。还有一些学者从数值方法的角度对尺度效应等问题进行了探讨[16-19]。另外，关于侵彻后期靶体材料惯性扩展的理论并不成熟，数值模拟是对其研究的重要手段[20-23]。

* **收稿日期**：2008-02-08；**修回日期**：2008-04-17

作者简介：兰 彬（1980—），男，博士研究生，主要从事冲击动力学研究. E-mail：lanbin@mail.ustc.edu.cn

通讯作者：文鹤鸣（1965—），男，教授，博士生导师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：hmwen@ustc.edu.cn

然而,过去对长杆弹的数值模拟大多集中在终点效应方面的研究,包括杆弹剩余长度、侵彻深度和开坑直径,以及侵彻速度、弹尾速度的变化,对弹、靶的瞬时响应形态和材料的流动特性关注不够,而后者是认识长杆弹侵彻机制、建立分析模型的重要基础。

另一方面,当打击速度达到 4～5 km/s 甚至更高时,弹靶界面附近的材料流动行为近似为流体,准定常阶段压力高达数十吉帕。显然,对如此高压情况下材料行为的描述依赖于由平面冲击波实验所确定的材料本构模型,这其中最著名的是 Steinberg 等人[24]提出的模型。与描述低压区的本构模型(如 Johnson-Cook 模型)不同,Steinberg 模型还考虑了材料的压缩性、剪切模量和流动应力对压力的依赖性。陈大年等[25]的研究表明,对钨材料,压力在 10 GPa 以下时,由 Johnson-Cook 模型计算的流动应力才能与实验数据相近,压力更高时流动应力只能用 Steinberg 模型估算。近年来,Steinberg 模型被应用于聚能射流[26]、爆炸成型弹丸[27]和空间碎片超高速撞击[28]的数值模拟,在长杆弹侵彻方面的应用则鲜见报道。

基于上述两方面的背景,本研究利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA,采用 ALE 方法和 Steinberg 本构模型,对长径比为 10 的平头钨合金长杆弹侵彻半无限厚钢靶进行了三维数值模拟,给出了侵彻过程的完整图像,将模拟的侵彻深度和实验数据进行了比较,并分析了超高速撞击下弹和靶的瞬态力学行为。

2 数值模拟方法及模型

2.1 ALE 方法

ALE 方法的网格和 Euler 方法一样,也是系于空间的,但它能以任意的形式运动,允许自由地定义区别于材料和空间构型的参考构型,它的计算网格是基于参考构形而划分的,可以独立于物质构形和空间构形运动。ALE 方法能以相对较少的网格模型处理譬如整个物体有空间上的大位移,并且本身有大变形的问题,能得到清晰的材料界面,克服了纯 Langrange 描述和纯 Euler 描述的缺陷[29]。

本研究采用 LS-DYNA 软件的 ALE 法进行计算。其计算步骤[30]为:首先,物质网格以一个或数个 Lagrange 步变形,进行 Lagrange 显式计算,只考虑压力梯度分布对速度和能量改变的影响,动量方程中的压力取前一时间步的值;然后用隐式格式求解动量方程,将显式计算得到的速度分量作为迭代求解的初始值;最后进行一个输运步,包括确定要移动的结点、移动边界结点、移动内结点、计算单元中心变量的输运、计算动量输运和更新速度,需要输运计算的变量为:单元解变量(密度、内能、应变等)和节点速度。输运步大多数的时间用于计算相邻单元之间的材料运输,只有小部分时间耗在计算网格的调整。

ALE 方法可以用较粗糙的网格来获得较高的精确度。本研究的计算采用二阶精度的单调输运算法(van Leer 算法)。

2.2 本构模型、状态方程及参数

Steinberg 等人于 1980 年提出了一种适用于高压区的本构模型,不考虑应变率效应,只考虑应变及温度效应,实验中发现,应变率增加,温度上升,屈服强度下降。在应变率大于 $10^5\ \mathrm{s}^{-1}$ 的情况下,可以忽略应变率效应[24]。

LS-DYNA 软件中 Steinberg 本构模型的形式为[30]:材料未熔化(熔化能量大于内能,即 $e_\mathrm{m}>e$)时,其剪切模量为

$$G=G_0\left[1+\frac{G'_p}{G_0}pV^{1/3}+\frac{G'_T}{G_0}\left(\frac{e-e_\mathrm{c}}{3R'}-300\right)\right]\cdot\exp\left(-\frac{fe}{e_\mathrm{m}-e}\right) \tag{1}$$

屈服强度为

$$\sigma_\mathrm{Y}=\sigma_0[1+\beta(\gamma_\mathrm{i}+\overline{\varepsilon}_\mathrm{p})]^n\left[1+\frac{\sigma'_p}{\sigma_0}pV^{1/3}+\frac{G'_T}{G_0}\left(\frac{e-e_\mathrm{c}}{3R'}-300\right)\right]\cdot\exp\left(-\frac{fe}{e_\mathrm{m}-e}\right) \tag{2}$$

材料熔化后,G 和 σ_Y 都为零。(1)式和(2)式中:G_0 为初始剪切模量,σ_0 为初始屈服强度,V 为相关体积,也即 ρ_0/ρ,β 为材料常数;钨合金和钢的修正系数 f 参照文献[31]取为 0.001;G'_p、σ'_p 分别为剪切模量和屈服强度对压强的偏导数,G'_T 为剪切模量对温度的偏导数,文献[32]中的高压冲击实验表明,

$\sigma'_p/\sigma_0=G'_p/G_0$;$p$ 为压力,γ_i 为初始塑性应变;e、e_c、e_m 分别为比内能、比冷能和比熔化能,e_c 和 e_m 由(3)式[30]确定

$$\begin{cases} e_c(x)=\int_0^x p\mathrm{d}x-\dfrac{900R\rho\exp(\alpha x)}{A(1-x)^{2(\gamma_0-\alpha-1/2)}} \\ x=1-V \\ e_m(x)=e_c(x)+\dfrac{3R\rho T_m(x)}{A} \\ T_m(x)=\dfrac{T_{m0}\exp(2\alpha x)}{V^{2(\gamma_0-\alpha-1/3)}} \end{cases} \tag{3}$$

式中:T_m 为熔化温度,T_{m0}为常压下的熔化温度,γ_0 是 Grüneisen 常数,α 为修正常数,R 为气体常数,A 为原子量。状态方程采用 Grüneisen 方程[30]

$$p=\begin{cases} \dfrac{\rho_0C^2\mu[1+(1-\gamma/2)\mu-a\mu^2/2]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\dfrac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\dfrac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2}+(\gamma_0+a\mu)e & \mu\geqslant 0 \\ \rho_0C^2\mu+(\gamma+a\mu)e & \mu<0 \end{cases} \tag{4}$$

式中:p 为压力,e 为材料比内能,ρ 为当前密度,ρ_0 为初始密度,C 为 v_s-v_p 曲线的截距,S_1、S_2、S_3 为 v_s-v_p曲线的系数,v_s 为冲击波速度,v_p 为质点速度,二者可近似取线性关系(即 S_2 和 S_3 为零),$\mu=\rho/\rho_0-1$ 为压缩比,γ_0 是 Grüneisen 常数,a 是 γ_0 的一阶体积修正系数,本文中取为零。钨合金和钢的材料参数见表 1,参数主要取自文献[33],其中 σ_m 为最大容许屈服强度。

表 1　材料模型参数

Table 1　Parameters of material model

Material	ρ/(kg/m^3)	G_0/(GPa)	σ_0[34]/(GPa)	T_{m0}/(K)	C/(m/s)	S_1	A
Tungsten alloy	17 600	160	1.51	2 766	4 040	1.23	183.85
Armor steel	7 890	77	0.792	1 578	4 580	1.49	55.85
Material	$\frac{G'_p}{G_0}$/(GPa^{-1})	$\frac{G'_T}{G_0}$/(K^{-1})	β	n	γ_0	α	σ_m/(GPa)
Tungsten alloy	0.009 4	0.000 14	7.7	0.13	1.67	1.3	3
Armor steel	0.026	0.000 45	43	0.35	1.93	1.4	2

2.3　几何模型

本计算模型中,杆弹长径比为 10,直径 1 cm,弹头为平头。如图 1 所示,长杆弹、半无限厚钢靶和空气均用 ALE 网格,杆弹整体和靶板上表面被空气覆盖,不同材料之间的界面共节点,这使得材料在变形时可在不同的空间网格流动,其中空气网格覆盖了坑口靶体材料隆起的区域。模型外表面设定为应力无反射界面,以模拟无限域。由于模型具有轴对称性,故可只计算 1/4,两个互相垂直的剖面设置为对称面。

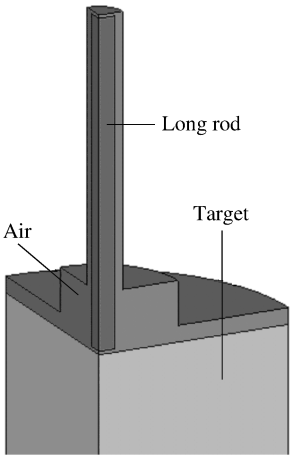


图 1　钨合金长杆弹侵彻半无限厚钢靶的计算模型

Fig. 1　Numerical model for a long rod of tungsten alloy penetrating a semi-infinite armor steel target

3　数值模拟结果及分析

3.1　侵彻深度计算结果

计算了不同打击速度时的侵彻深度,并与实验数据[2,35]进行了对比,如图 2 所示。数值模拟结果和实验数据在整个计算范围(1.0～5.0 km/s)都很

接近，在 1.0、1.5、2.5、3.5、4.5 km/s 处分别相差约 13.9%、8.7%、3.5%、3.9% 和 1.3%，这表明打击速度越大，二者越接近。在长杆弹侵彻问题的数值模拟中，Steinberg 本构模型在打击速度大于 3.0 km/s 时非常适用，而在速度不太高时(1.0～3.0 km/s)也是适用的。数值模拟结果和实验数据体现了相同的变化趋势，打击速度小于 2.0 km/s 的范围，侵彻效率很高，打击速度大于 2.0 km/s 后，侵彻深度曲线逐渐平缓，而到更高速度(大于 4.5 km/s)时，侵彻深度几乎不增长，趋近于某个稍大于 $(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ 的值，$(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$ 被称为流体动力学极限，ρ_p、ρ_t 分别为弹、靶材料密度。

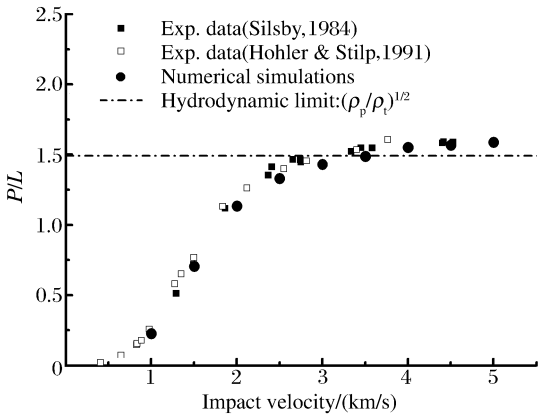


图 2 钨合金长杆弹侵彻半无限厚装甲钢侵彻深度的模拟结果与实验数据的比较

Fig. 2 Comparison of numerically predicted penetration depth with experimental results for a long rod of tungsten alloy penetrating semi-infinite armor steel targets

3.2 时程变化曲线

图 3 和图 4 分别给出了初始打击速度为 5.0 km/s 的坑底压力和侵彻深度随时间变化的曲线以及弹头和弹尾的速度变化曲线。从图 3 和图 4 可以看出侵彻过程经历了 4 个阶段：

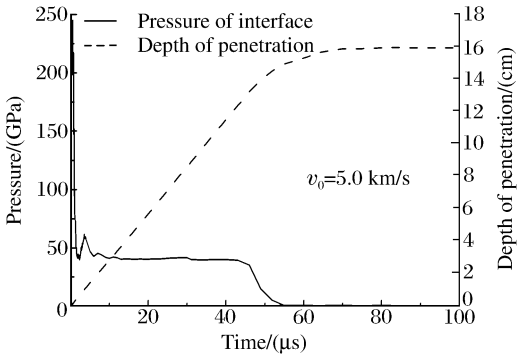


图 3 钨合金长杆弹侵彻半无限装甲钢靶坑底压力和侵彻深度时间历程(v_0=5.0 km/s)

Fig. 3 Pressure-time and penetration-time histories of cratering for semi-infinite armor steel targets struck by a long rod of tungsten alloy at 5.0 km/s

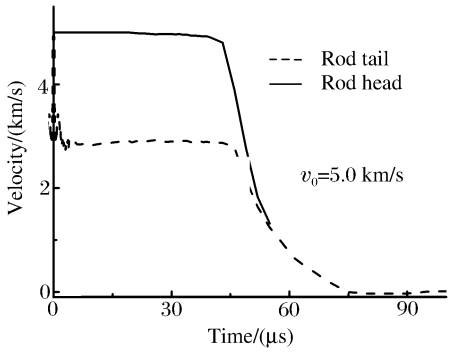


图 4 钨合金长杆弹侵彻半无限装甲钢靶侵彻速度和弹尾速度时间历程(v_0=5.0 km/s)

Fig. 4 Penetration velocity-time and tail velocity-time histories for semi-infinite armor steel targets struck by a long rod of tungsten alloy at 5.0 km/s

(1) 约 0.2～1.5 μs 时间内为瞬态高压段，压力高达 204～244 GPa，弹靶界面和自由表面还未反射稀疏波，影响区域仅限于弹靶界面附近。

(2) 约 1.5～49 μs 为准定常侵彻阶段，压力和侵彻速度较稳定，侵彻深度和杆弹剩余长度曲线接近直线，将 1.5～49 μs 时间内的两个曲线拟合为直线(见图 5)，得侵彻速度为 2.869 3 km/s，杆弹长度缩短(消耗)的速度为 2.090 4 km/s，二者之和约为弹尾速度。本阶段侵彻深度占总侵彻深度的 85%。

(3) 约 49～75 μs 为惯性扩展阶段，弹靶界面压力和侵彻速度下降较快，剩余的弹体材料逐渐平铺在坑底，靶体材料具有动能，在惯性作用下继续产生位移，本阶段侵彻深度占总侵彻深度的 12%。

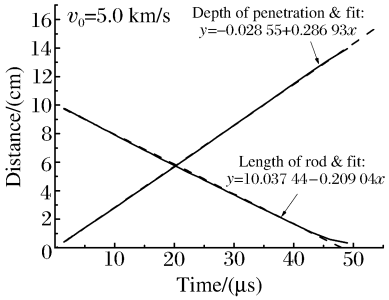
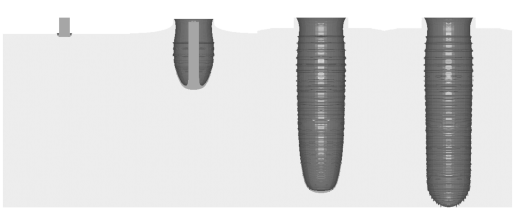


图 5 准定常阶段侵彻深度-时间曲线和杆弹剩余长度-时间历程

Fig. 5 Penetration-time and residual rod length-time histories in quasi-steady phase

(4) 75 μs 以后为回弹阶段,坑壁在拉应力作用下产生与侵彻方向相反的位移,但位移量可忽略。

模拟结果与 Eichelberger 和 Gehring[36] 提出的长杆弹侵彻的 4 个阶段吻合。它们的典型侵彻图像见图 6(不显示空气)。



t=1 μs　　t=18 μs　　t=52 μs　　t=100 μs

图 6　钨合金长杆弹侵彻半无限厚钢靶(v_0=5.0 km/s):4 个阶段典型形态

Fig. 6　Typical configurations of four different phases for the penetration of semi-infinite armor steel targets struck by a long rod of tungsten alloy at 5.0 km/s

3.3　准定常侵彻阶段

准定常阶段占总侵彻深度的主要部分,历来就是长杆弹研究的重点。基于 Bernoulli 方程,Tate[5] 和 Alekseevskii[6] 各自独立提出的修正流体动力学一维模型(A-T 模型)广泛应用于准定常阶段侵彻深度的预测。本节主要分析典型时刻(t=18 μs)的瞬时状态。

如图 7 所示,靶中压力和粒子速度的分布曲线具有相似形态,距弹靶界面约 4.6 cm 之外为弹性区域,距离在 4.6 cm 之内的材料发生塑性流动。接近弹靶界面处的速度梯度明显高于稍远处,而在准定常阶段,图 7 所示的区域以接近恒定的速度移动,说明越接近弹靶界面,材料的横向流动越剧烈,图 8 的速度矢量也显示了这一点。

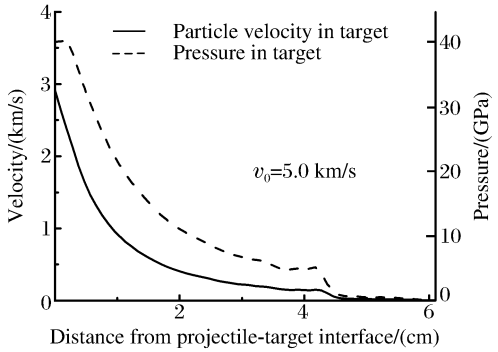


图 7　钨合金长杆弹侵彻半无限厚钢靶靶中侵彻轴线上粒子速度和压力分布(v_0=5.0 km/s,t=18 μs)

Fig. 7　Pressure and particle velocity distributions along penetration axis in semi-infinite armor steel targets struck by a long rod of tungsten alloy at 5.0 km/s, t=18 μs

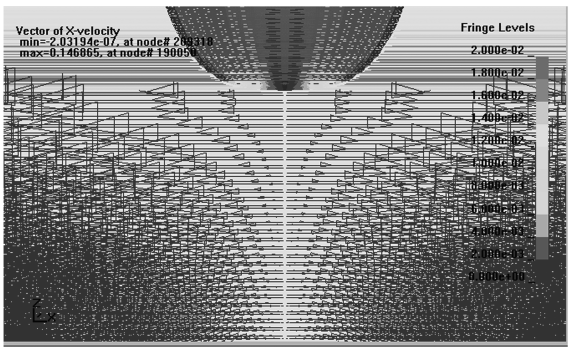


图 8　t=18 μs 时刻靶中垂直于侵彻轴线的粒子速度分量分布(箭头越长,速度分量越大)

Fig. 8　Distribution of particle velocity perpendicular to penetration axis at 18 μs (The longer the arrow, the higher the velocity)

图 9 是在不同打击初速下,靶中沿侵彻轴线的粒子速度分布。显而易见,打击速度越大(即侵彻速度越大),靶中塑性流动区域越小,且粒子速度梯度越大。如果将靶内材料的响应过程看作一种加载过程,则侵彻速度越大,加载过程越短,且加载梯度越大。

图 10 表明,在约 4 个弹体直径的范围内,靶体材料的剪切应力与最大主应力的比值小于 10%,接近弹靶界面处小于 4%,材料行为主要由静水压力控制。考虑到在 5.0 km/s 的打击速度下靶板的开坑直径约为 4.5 cm,故该区域略小于开坑直径。

准定常阶段,杆弹头部剧烈变形、消蚀,形成形状相对固定的"流场"(见图 6 中 t=18 μs 时的图像),后面的材料不断补充进来继续对靶板施加压力,产生的碎片从侧面反向抛射,导致靶板中形成大于弹体直径的坑。图 11 和图 12 描述了长杆弹侵彻轴线的状态,显然距弹靶界面 1 倍弹径之外,弹体压力小于其屈服强度,速度仍接近 5.0 km/s,这部分材料可视为刚体。距弹靶界面较近处压力和粒子速度梯度都很大,且剪切应力与静水压力、最大主应力之比很小,材料行为也主要由静水压力控制。由于长杆弹尾部和侧面是自由表面,多个稀疏波和冲击波相互作用使得轴线上的应力出现震荡。

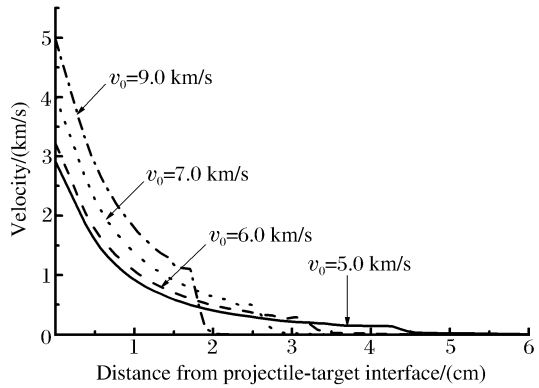


图 9 不同打击初速时靶中相同侵彻深度的轴线粒子速度分布

Fig. 9 Distribution of particle velocity along the axis at the same depth of penetration in target for different impact velocities

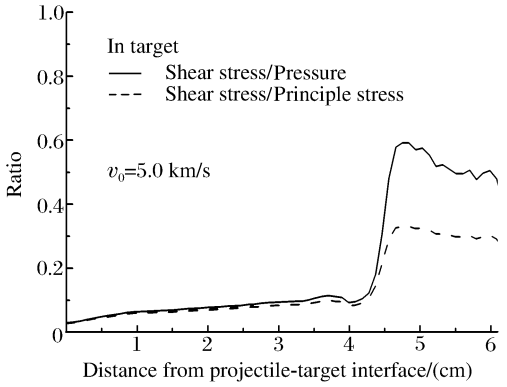


图 10 $t=18\ \mu s$ 时刻靶中侵彻轴线上剪切应力与静水压力、最大主应力之比

Fig. 10 Ratios of shear stress to hydrostatic pressure, shear stress to maximum principal stress along the penetration axis in target at $t=18\ \mu s$

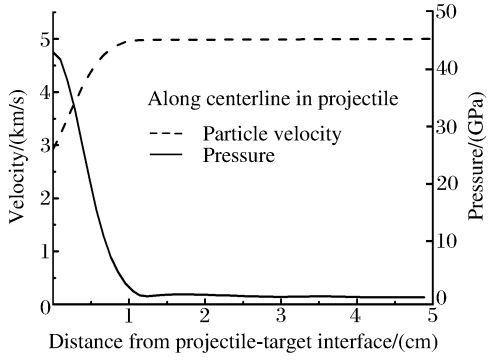


图 11 $t=18\ \mu s$ 时刻弹中侵彻轴线上粒子速度和压力分布

Fig. 11 Distribution of pressure and particle velocity along the axis in penetrator at $t=18\ \mu s$

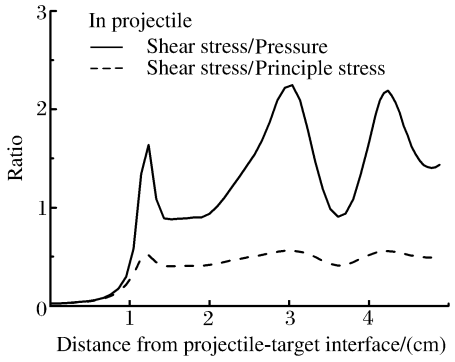


图 12 $t=18\ \mu s$ 时刻弹中侵彻轴线上剪切应力与静水压力、最大主应力之比

Fig. 12 Ratios of shear stress to hydrostatic pressure, shear stress to maximum principal stress along the penetration axis in penetrator at $t=18\ \mu s$

4 结 论

利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA，采用 ALE 方法和 Steinberg 本构模型，对长径比为 10 的平头钨合金长杆弹侵彻半无限装甲钢靶进行了三维数值模拟。在较大速度范围内，特别是在较高的打击速度下，模拟的侵彻深度和实验数据吻合得很好，表明 Steinberg 本构模型非常适合于长杆弹高速侵彻的数值模拟。侵彻过程经历了瞬态高压、准定常、惯性扩展、回弹 4 个阶段，本文中给出了清晰的物理图像，分析了一些重要参量的变化规律。

准定常阶段压力稳定，侵彻深度和杆弹长度随时间的变化曲线接近直线，且侵彻速度和消蚀速度之和约为弹尾速度。对准定常阶段的一个典型时刻($t=18\ \mu s$)的状态分析表明：沿侵彻轴线，靶内在约 4 个弹径、弹内小于 1 个弹径的范围，材料行为主要由静水压力控制；越接近弹靶界面，靶体材料的质点速度梯度越大，横向流动越剧烈，且打击初速越大，这种趋势越明显；弹体除头部附近较小区域外的其它部分的行为接近刚体。

References:

[1] Hohler V, Stilp A J. Penetration of Steel and High Density Rods in Semi-Infinite Steel Targets [A]//Proc 3rd Int Symp Ballistics [C]. Karlsruhe, 1977.

[2] Silsby G F. Penetration of Semi-Infinite Steel Targets by Tungsten Rods at 1.3 to 4.5 km/s [A]//Proc 8th Int Symp Ballistics [C]. Orlando, Florida, 1984.

[3] Hohler V, Stilp A J. Hypervelocity Impact of Rod Projectiles with L/D from 1 to 32 [J]. Int J Impact Eng, 1987, 5: 323-331.

[4] Anderson C E Jr, Morris B L, Littlefield D L. A Penetration Mechanics Database [R]. San Antonio, TX: Southwest Research Institute, 1992.

[5] Tate A. A Theory for the Deceleration of Long Rods after Impact [J]. J Mech Phys Solids, 1967, 15: 387-399.

[6] Alekseevskii V P. Penetration of a Rod into a Target at High Velocity [J]. Combus Explos Shock Waves, 1966, 2: 63-66.

[7] Grace F I. Nonsteady Penetration of Long Rods into Semi-Infinite Targets [J]. Int J Impact Eng, 1993, 14: 303-314.

[8] Wang P, Jones S E. An Elementary Theory of One-Dimensional Rod Penetration Using a New Estimate for Pressure [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(3): 265-279.

[9] Walker J D, Anderson C E Jr. A Time-Dependent Model for Long-Rod Penetration [J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(1): 19-48.

[10] Zukas J A. Survey of Computer Codes for Impact Simulation [A]//Zukas J A. High Velocity Impact Dynamics [C]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990: 593-708.

[11] Johnson W W, Anderson C E. History and Application of Hydrocodes in Hypervelocity Impact [J]. Int J Impact Eng, 1987, 5: 423-439.

[12] Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for all Flow Speeds [J]. J Comput Phys, 1974, 14: 227-253.

[13] Rosenberg Z, Dekel E. A Computational Study of the Influence of Projectile Strength on the Performance of Long-Rod Penetrators [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(6): 671-677.

[14] Rosenberg Z, Dekel E. A Computational Study of the Relations between Material Properties of Long-Rod Penetrators and Their Ballistic Performance [J]. Int J Impact Eng, 1998, 21(4): 283-296.

[15] Mchenry M R, Choo Y, Orphal D L. Numerical Simulations of Low L/D Rod Aluminum into Aluminum Impacts Compared to the Tate Cratering Model [J]. Int J Impact Eng, 1999, 23: 621-628.

[16] Pidsley P H. A Numerical Study of Long Rod Impact onto a Large Target [J]. J Mech Phys Solids, 1984, 32(4): 315-333.

[17] Batra R C, Wright T W. Steady State Penetration of Rigid Perfectly Plastic Targets [J]. Int J Eng Sci, 1986, 24(1): 41-54.

[18] Ferguson G L. Replica Model Scaling for High Strain Rate Events [J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(4): 571-583.

[19] Lundberg P, Westerling L, Lundberg B. Influence of Scale on the Penetration of Tungsten Rods into Steel-Backed Alumina Targets [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(4): 403-416.

[20] Anderson C E Jr, Orphal D L, Franzen R R, et al. On the Hydrodynamic Approximation for Long-Rod Penetration [J]. Int J Impact Eng, 1999, 22: 23-43.

[21] Rosenberg Z, Dekel E. More on the Secondary Penetration of Long Rods [J]. Int J Impact Eng, 2001, 26: 639-649.

[22] Partom Y. On the Hydrodynamic Limit of Long Rod Penetration [J]. Int J Impact Eng, 1997, 20: 617-625.

[23] Anderson C E, Orphal D L. Analysis of the Terminal Phase of Penetration [J]. Int J Impact Eng, 2003, 29: 69-80.

[24] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High Strain Rate [J]. J Appl Mech, 1980, 51(3): 1498-1504.

[25] Chen D N, Liu G Q, Yu Y Y, et al. The Constitutive Relationship between High Pressure-High Strain Rate and Low Pressure-High Strain Rate Experiment [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 193-200. (in Chinese)
陈大年,刘国庆,俞宇颖,等. 高压、高应变率与低压、高应变率实验的本构关联性 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(3): 193-200.

[26] Cao D Q, Yun S R, Ding G Y, et al. 3-D Numerical Simulation of Jet Penetrate Target Using ALE Method [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20(2): 171-173. (in Chinese)

曹德青,恽寿榕,丁刚毅,等.用 ALE 方法实现射流侵彻靶板的三维数值模拟 [J].北京理工大学学报,2000,20(2):171-173.

[27] Gui Y L, Yu C, Liu C L, et al. 3D Simulation of Over-Turned Explosively Formed Projectile(EFP) with Star-Shaped Fins [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 313-318. (in Chinese)
桂毓林,于 川,刘仓理,等.带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟 [J].爆炸与冲击,2005,25(4):313-318.

[28] Zhang W, Ma W L, Ma Z T, et al. Numerical Simulation of Craters Produced by Projectile Hypervelocity Impact on Aluminum Targets [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 1-5. (in Chinese)
张 伟,马文来,马志涛,等.弹丸超高速撞击铝靶成坑数值模拟 [J].高压物理学报,2006,20(1):1-5.

[29] Zhang X, Lu M W, Wang J J. Research Progress in Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method [J]. Chinese J Comput Mech, 1997, 14(1): 91-102. (in Chinese)
张 雄,陆明万,王建军.任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展 [J].计算力学学报,1997,14(1):91-102.

[30] Livermore. LS-DYNA Keyword User's Manual(970v) [DB]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[31] Lee W H, Painter J W. Material Void-Opening Computation Using Particle Method [J]. Int J Impact Eng, 1999, 22: 1-22.

[32] Hua J S. High Temperature and High Pressure Constitutive Model for Tungsten Alloy [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1999. (in Chinese)
华劲松.高温高压下钨合金的本构方程研究 [D],绵阳:中国工程物理研究院,1999.

[33] Li M S, Chen D Q. A Constitutive Model for Materials under High-Temperature and Pressure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(1): 24-31. (in Chinese)
李茂生,陈栋泉.高温高压下材料的本构模型 [J].高压物理学报,2001,15(1):24-31.

[34] Anderson C E Jr, Hohler V, Walker J D, et al. Time-Resolved Penetration of Long Rods into Steel Targets [J]. Int J Impact Eng, 1995, 16(1): 1-18.

[35] Hohler V, Stilp A J. A Penetration Mechanics Database [R]. San Antonio, TX: Southwest Research Institute, 1992.

[36] Eichelberger R J, Gehring J W. Effects of Meteoroid Impact on Space Vehicles [J]. Am Rocket Soc J, 1962, 32: 1583-1591.

Numerical Simulation and Analysis of the Penetration of Tungsten-Alloy Long Rod into Semi-Infinite Armor Steel Targets

LAN Bin, WEN He-Ming

(*CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: Numerical simulation of the penetration of tungsten alloy long rod into semi-infinite armor steel targets is performed with ALE method and Steinberg constitutive model coupled in ANSYS/LS-DYNA finite element code. The configurations of four different phases in the penetration process and the changes of relevant physical parameters with time are given. The distribution of pressure, particle velocity and the material flow characteristics of both the penetrator and the targets are analyzed. It is revealed that the numerically predicted depth of penetration is in good agreement with available experimental results and that the behavior of materials adjacent to the interface of penetrator and targets is controlled mainly by the hydrostatic pressure.

Key words: long rod penetrator; semi-infinite target; penetration; Steinberg model; numerical simulation