

大着速范围长杆弹侵彻深度变化及其影响因素的数值模拟^{*}

徐晨阳, 张先锋, 刘 闯, 邓佳杰, 郑应民

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 高速/超高速侵彻问题一直是武器设计者和防护工程专家关注的焦点问题之一。随着撞击速度的提高, 弹体可能进入流体侵彻阶段, 侵彻深度不再随速度的增大单调上升。针对撞击速度增加侵彻深度可能出现增量逆转的现象, 开展了大着速范围长杆弹侵彻深度变化的数值模拟研究, 分析了弹体硬度、头部形状、弹体材料及靶体材料对侵彻转变点的影响。结果表明: 随着长杆弹冲击速度的提升, 侵彻深度先上升后下降; 同时, 弹体硬度提高, 到达侵彻转变点对应的撞击速度提高; 尖卵形头部弹体到达侵彻转变点的撞击速度比球形头部弹体高; 此外, 弹靶材料对侵彻深度转变也有较大的影响。

关键词: 超高速侵彻; 长杆弹; 侵彻深度; 转变点

中图分类号: O385

文献标识码: A

高速/超高速侵彻问题一直是武器设计者和防护工程专家关注的焦点问题之一。随着撞击速度的提高, 弹体可能产生变形甚至进入流体侵彻阶段, 侵彻深度 (Depth of Penetration, DOP) 随速度不再呈单一上升趋势。随着撞击速度的提高, 弹体对典型靶体的侵彻行为可以分为 3 个阶段, 即刚性侵彻阶段、变形侵彻阶段和侵蚀侵彻阶段。在变形侵彻阶段, 侵彻深度出现随侵彻速度增大而下降的现象, 极大地影响了侵彻毁伤效果, 因而得到研究者的广泛关注。针对大着速范围的侵彻问题, 国内外学者开展了深入的研究。Forrestal 等^[1-2]进行了 0.5~3.0 km/s 的卵形及球头钢弹侵彻铝靶的实验研究, 发现随着撞击速度的增加, 侵彻体由刚体向侵蚀弹体转变的现象, 且不同头部形状弹体的转变速度也存在差异。兰彬等^[3-5]和楼建锋等^[6-8]针对大着速范围侵彻问题进行了数值分析及理论研究, 给出了描述变形侵彻阶段的理论模型。陈小伟等^[9]对高速侵彻弹体的质量侵蚀现象进行分析, 并建立了工程模型, 可以对弹体侵蚀后的头形和质量侵蚀进行预测。张凤国等^[10]应用仿真程序 LZT-2D 分析了钨合金长杆弹 (Long Rod Projectile, LRP) 超高速侵彻混凝土靶作用过程, 认为增加长径比有利于侵彻。Rosenberg 等^[11]对 Forrestal 的实验进行数值仿真, 仿真结果与实验结果吻合较好, 但该仿真模型的推广和应用有一定局限性。王猛等^[12]对钨合金杆弹侵彻 45 钢靶的变形失效机制进行了数值分析。王政等^[13]利用 LS-DYNA 软件研究弹体侵彻岩石、混凝土的问题, 分析了不同撞击速度下的弹体响应及靶体抗侵彻能力。练兵等^[14]采用数值模拟方法对长杆弹高速侵彻混凝土问题进行了深入研究。

综上所述, 随着撞击速度的增大, 长杆弹侵彻典型靶体过程存在由刚性体侵彻向变形体甚至流体侵彻转变的过程, 侵彻深度增量也可能出现逆转。这一过程受撞击速度、角度等撞击条件以及弹体和靶体材料、结构等弹靶条件的综合影响。本研究针对大着速范围长杆弹侵彻典型靶体侵彻深度变化规律问

^{*} 收稿日期: 2017-06-15; 修回日期: 2017-06-25

基金项目: 中共中央组织部青年拔尖人才支持计划 (2014); 中央高校基本科研业务专项基金 (30917011104, 30916011305); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金 (U1730101)

作者简介: 徐晨阳 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: xcynjust@126.com

通信作者: 张先锋 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事高效毁伤与防护研究. E-mail: lynx@njust.edu.cn

题,参考 Forrestal 等^[1]开展的大范围着速下的长杆弹侵彻实验,建立长杆弹侵彻典型靶体数值仿真模型。在验证数值仿真模型可靠性的基础上,分别对不同弹体硬度、弹体头部形状、靶体及弹体材料条件下长杆弹高速侵彻靶体的问题进行仿真计算,分析典型弹靶参数对侵彻深度变化的影响规律。

1 大着速范围长杆弹侵彻深度变化规律分析

综合国内外学者的相关工作发现,侵彻转变点的影响因素较为复杂。理论研究方面,许多学者提出侵彻转变点与弹体及靶体的动态强度有关。随着冲击速度的增大,弹体的侵彻形式会发生转变,当冲击速度到达某一值时,弹体由刚性侵彻转变为变形侵彻,此时的冲击速度称为第一转变速度,现阶段理论主要是通过引入头部形状 K_s 并结合弹体动态强度改变原有刚性侵彻模型中的弹体阻力,以解释侵彻深度的改变。楼建锋等^[7]给出了侵彻转变阶段长杆弹等效强度及靶体对弹体阻力,并建立了其与侵彻临界压力的关系,最终确定了第一转变速度,具体形式为

$$v_t = \sqrt{\frac{2[Y_p - (R_t - 3Y_t)/2]}{\rho_t}} \quad (1)$$

式中: v_t 为刚性-变形侵彻转变速度, Y_p 为弹体动态强度, Y_t 为靶体动态强度, R_t 为靶体阻力项, ρ_t 为靶体密度。随着冲击速度的增大,弹体由变形侵彻变为侵蚀侵彻,此时的冲击速度称为第二转变速度。对于第二转变速度,兰彬等^[4]针对球头弹体引入弹体侵彻方向分量,并与弹体强度相联系,通过数值方法求解出转变速度,具体形式为

$$F(v_R) = f(v_R)A_0 = Y_p A_0, \quad v_R = f^{-1}(Y_p) \quad (2)$$

式中: v_R 为变形-流体侵彻转变速度, A_0 为弹体横截面积。采用上述方法确定侵彻深度-速度曲线的两个转变速度,并在不同阶段采用刚性侵彻经验公式以及 A-W 流体侵彻模型^[15]即可得到大范围着速下球头长杆弹侵彻深度变化曲线,如图 1 所示,其中 v 为弹体速度, P 为侵彻深度, L_0 为弹体长度。

从上述结果可以看出,尽管工程模型能够描述侵彻深度的变化趋势,但缺乏对侵彻转变点的影响因素的分析。工程模型中侵彻转变点的分析是独立于侵彻深度计算的,且理论上仅从动态强度上对侵彻转变的影响因素进行分析。另外,由于技术手段和成本等原因,很难开展大着速范围的长杆弹侵彻实验研究。采用数值仿真手段开展大着速范围侵彻深度变化规律及影响因素研究可以弥补工程模型的不足。根据已有的研究工作,阻力与强度是影响侵彻转变点的重要因素,而动态强度与材料种类和硬度有关,弹体阻力与头部形状有关,因此本研究采用数值仿真方法分析弹体材料硬度、头部形状、弹体材料、靶体材料 4 个因素对侵彻转变点的影响。

2 数值仿真模型

2.1 几何模型及材料本构模型

数值模拟时主要参考 Forrestal 等^[1]开展的大着速范围下长杆弹侵彻实验研究,弹体为具有不同头部形状的长杆形弹。长杆弹弹体长为 L_0 , 直径为 d , 头部曲径比为 φ ; 圆柱形靶体厚度为 H , 直径为 D 。仿真模拟过程中,弹体为金属材料,采用 Johnson-Cook(J-C)模型进行模拟;靶板材料为金属材料、混凝土材料或岩石材料,金属材料采用 J-C 模型^[16]或 Steinberg 模型描述,混凝土材料采用 RHT 模型^[17]描述,岩石材料采用 JH-2 模型^[18]描述。

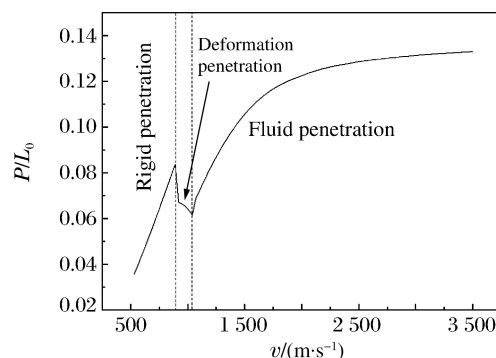


图1 长杆弹侵彻深度理论计算曲线

Fig. 1 Theoretical DOP results of LRP at elevated impact velocity

2.2 算法及有限元模型

在高速撞击下弹体将呈现拟流体特性,弹体材料将软化破碎并伴随塑性流动,传统的网格算法对于大变形下材料行为的描述效果不理想。光滑粒子法(Smooth Particle Hydrodynamics,SPH)是一种纯 Lagrange 无网格算法,其主要特点在于对质量的离散,不使用节点和单元,而代之以有确定质量、通过“核函数”相互作用的粒子。由于粒子本身便代表材料,不同材料的粒子自然地构成界面,不同材料粒子的相对运动形成所谓的“界面滑移”^[19]。因此,弹体采用 SPH 算法进行描述,而靶体则选用 Lagrange 算法描述。

如图 2 所示,为了确保计算精度和合理的运算时间,弹体 SPH 粒子直径为 0.2 mm;靶体采用渐变网格,在靠近靶体中心 20 mm 的区域内网格大小为 0.2 mm×0.2 mm,外侧部分网格逐步增大。

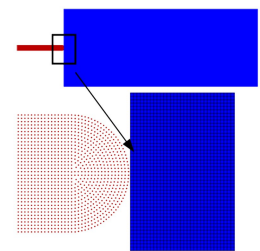


图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

3 大着速范围侵彻深度转变影响因素

由实验结果可知,大着速范围侵彻转变点与头部形状、弹体硬度及弹靶材料等因素有关,因此本节采用数值仿真方法分析弹体硬度、弹体头部形状、弹体材料、靶体材料 4 个因素对侵彻转变点的影响。

3.1 典型长杆弹侵彻模型仿真分析

相对于给定速度范围的撞击过程仿真模拟,大着速范围的冲击侵彻问题涉及弹靶的低应变率到高应变率变形过程,对其作用过程进行数值仿真的难度更大。选取典型长杆弹侵彻模型,对其侵彻过程及侵彻深度的变化规律进行数值仿真分析。设弹体结构为球头长杆弹,长杆弹弹长为 71 mm,弹体直径为 7.1 mm;靶体采用直径为 120 mm,长度为 300 mm 的圆柱。弹体采用 J-C 本构模型,铝靶采用 Steinberg-Guinan 强度模型描述,具体弹靶参数如表 1 和表 2 所示,其中: A 为屈服强度, B 、 β 、 n 为应变硬化常数, C 为应变率常数, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为损伤参数; G 为剪切模量, Y 为 Steinberg-Guinan 模型中的屈服强度, T 为温度, G_T 为 G 对 T 的一阶偏导数, G_p 、 Y_p 分别为 G 、 Y 对压力 p 的一阶偏导数。

表 1 弹体仿真模型主要参数
Table 1 Basic parameters of projectile

A/MPa	B/MPa	n	C	D_1	D_2	D_3	D_4
1 069	710.1	0.459	0.047	0.239	8.593	6.67	0.009

表 2 靶体仿真模型主要参数
Table 2 Basic parameters of target

G/MPa	Y/MPa	β	n	G_p	$G_T/(\text{MPa} \cdot \text{K}^{-1})$	Y_p	T/K
2 760	680	125	0.1	1.8	-17	0.018	1 220

图 3 给出了弹体着靶速度为 967 m/s 时侵彻过程的仿真结果。由图 3 可知,在变形侵彻阶段,弹体开坑后弹体头部材料达到屈服极限,开始出现变形;之后,尽管速度衰减,但由于弹体受力仍未下降到屈服极限以下,因此弹体继续变形;当某一时刻弹体受力小于材料屈服极限时,弹体不再变形,剩余阶段均可视为刚性侵彻。图 4 为侵彻深度与撞击速度变化关系。由图 4 可知,随着冲击速度的增大,侵彻深度呈先上升后下降而后再上升的变化趋势。实验得到的侵彻转变点为 932 和 1 037 m/s,数值仿真得到的侵彻转变点为 926 和 1 042 m/s,表明数值模拟计算结果与实验结果吻合较好。

综上所述,长杆弹以较高冲击速度侵彻时,侵彻过程中的弹体状态不是恒定的,由此导致了长杆弹在大范围冲击速度下出现了先上升后下降而后再上升的变化规律。

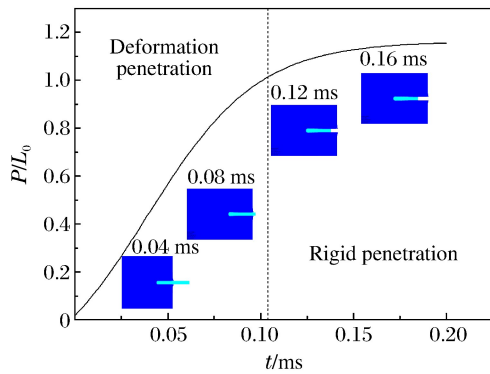


图3 撞击速度为 967 m/s 时弹靶变形过程

Fig. 3 Simulation of normalized DOP and deformation at 967 m/s impact velocity

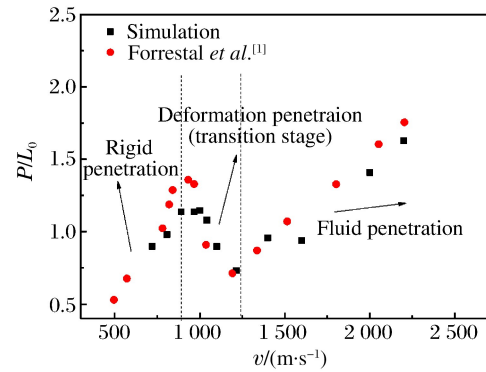


图4 模拟侵深与实验数据对比

Fig. 4 Comparison between simulation normalized DOP and experimental data

3.2 弹体硬度对侵彻转变点的影响

弹体材料强度的影响因素较多,其中材料硬度是材料动态强度重要影响因素之一。本节针对不同弹体材料硬度对侵彻转变的影响规律进行仿真研究。弹体结构为球头长杆弹,长杆弹弹长为 71 mm,弹体直径为 7.1 mm;靶体采用直径为 120 mm、长度为 300 mm 的圆柱。弹体材料分别取洛氏硬度 (H_{RC}) 为 31、36、45、55 的 30CrMnSiNi2A 进行仿真研究,其中本构参数参考了李磊等^[20-21]关于不同硬度 30CrMnSiNi2A 本构参数的研究结果,具体参数取值如表 3 所示。

表3 30CrMnSiNi2A 材料的 J-C 模型参数^[20]Table 3 J-C Parameters of 30CrMnSiNi2A materials^[20]

H_{RC}	A/MPa	B/MPa	n	C	D_1	D_2	D_3	D_4
31	745	623.11	0.424	0.061	0.351	1.650	2.589	0.020
36	814	643.57	0.446	0.055	0.348	2.673	4.333	0.012
45	1269	810.18	0.479	0.040	0.239	8.593	7.867	0.009
55	1516	1537.97	0.610	0.017	0.014	0.015	3.251	0.007

图 5 为数值模拟得到的大着速范围不同硬度长杆弹侵彻铝靶的侵彻深度变化曲线。由图 5 可知:当 H_{RC} 取值为 31 或 36 时,侵彻转变点比较接近, $H_{RC}=36$ 到达侵彻转变阶段时,侵彻转变点略高,撞击速度略大;当 $H_{RC}=45$ 时,弹体材料侵彻到达转变点时的侵彻冲击速度显著增大,且在两个转变速度时的侵彻深度显著提高;当 $H_{RC}=55$ 时,侵彻深度变化曲线并没有出现明显的转变点。当弹体速度大于 2000 m/s 时,不同硬度条件下的侵彻深度逐渐趋于一致。

根据模拟结果可以得到如下结论。(1) 当弹体硬度值为 31、36、45 时,侵彻深度随弹体速度的增大呈先上升再下降而后再上升的变化趋势。这是由于侵彻初始阶段,弹体的受力较小,弹体变形较小,几乎无质量损失,可以看作刚性侵彻;当速度提升时,由于弹体头部开始变形,导致受到阻力增加,侵彻深度下降;而当冲击速度超过第二转变点后,侵彻形式变为流体侵彻,侵彻深度又随着冲击速度的增大而增大。(2) 在低速段,弹体硬度对侵彻深度影响较

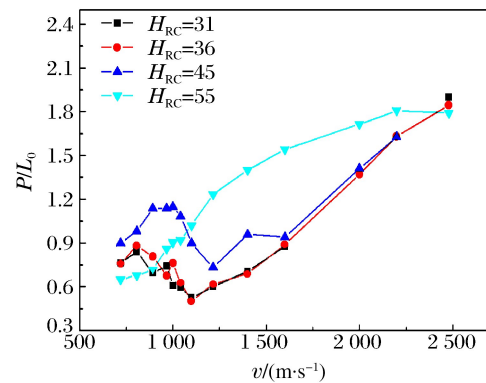


图5 不同硬度弹体侵彻深度-速度曲线

Fig. 5 Normalized DOP versus impact velocity for projectile with different hardnesses

大;而在超高速侵彻过程中,硬度的影响逐渐降低,密度成为主要影响因素,因此随着速度的增大,弹体的侵彻深度逐步接近,当速度达到 2 500 m/s 时,各种硬度弹体的侵彻深度趋于一致。同时,当硬度值为 55 时,曲线未出现侵彻转变点,且此时弹体在低速段的侵彻深度明显低于其他 3 种情况,其原因可能是文献[22]在对高硬度($H_{RC}=55$)30CrMnSiNi2A 的 J-C 参数测定上有误差。(3) 弹体硬度对侵彻转变点有显著的影响。硬度是反映弹体动态强度的一个重要指标。一般来说,弹体硬度越高,其动态强度与屈服强度也越高。因此,随着硬度的提高,侵彻转变点后移,与理论分析相符。但是,当弹靶强度相差较大时,侵彻深度的下降不明显。

表 4 不同硬度条件下侵彻转变阶段的弹体速度范围
Table 4 Range of projectile velocity in the transition stage with different hardnesses

H_{RC}	Velocity range/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	H_{RC}	Velocity range/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	H_{RC}	Velocity range/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
31	806-1 100	36	832-1100	45	967-1 216

3.3 弹体头部形状对侵彻转变点的影响

弹体侵彻过程中,弹靶间压力与弹体头部形状有一定的关系,曲径比 φ 较大(较尖)的弹头侵彻能力优于 φ 较小(较钝)的弹头^[20],因此,弹头形状对侵彻转变点有一定的影响。Forrestal 等^[2]的实验结果也表明弹体头部形状对侵彻转变有显著的影响。选用硬度值为 31 的 30CrMnSiNi2A 作为弹体材料,并分别取球形($\varphi=0.5$)及 $\varphi=2,3,4$ 的尖卵形长杆弹进行仿真模拟,具体参数如表 5 所示,其中: ρ 为密度, R 为弹体头部曲率, m 为弹体质量。靶体材料为铝合金,材料参数见表 2。弹体具有相同的直径和质量,以保证不同头部形状的长杆弹具有相同的初始动能。通过数值模拟获得不同头部形状条件下大着速范围长杆弹的侵彻深度曲线,如图 6 所示。

表 5 不同头部形状弹体参数
Table 5 Geometric size of rod with different nose

Head shape	R/mm	L_0/mm	d/mm	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	m/g
Ball	3.5	71.00	3.5	7.83	21
Ogive, $\varphi=2$	14.2	73.26	3.5	7.83	21
Ogive, $\varphi=3$	21.3	73.61	3.5	7.83	21
Ogive, $\varphi=4$	28.4	74.56	3.5	7.83	21

由图 6 可知,随着冲击速度的提高,不同头部形状的长杆弹对铝靶的侵彻深度均出现先上升后下降而后再上升的趋势,即存在侵彻深度转变阶段。球形与尖卵形头部弹体的侵彻深度及侵彻转变点显著不同。同一冲击速度条件下,尖卵形弹体的侵彻深度明显高于球形头部弹体,尖卵形弹体的转变冲击速度明显高于球形弹体。不同曲径比 φ 的尖卵形弹体之间侵彻转变点相差不大。

从仿真结果中可得如下结论。(1) 在刚性侵彻阶段与变形侵彻阶段,弹体头部形状对侵彻深度有显著影响,球形弹体与尖卵形弹体在相同速度下的侵彻深度不同,头部尖锐的弹体能够更多地将靶体材料推向侧面,减小弹靶间的压力,相对于较钝的弹头,减少了横向开坑动能的转化,提高了侵彻深度。在超高速情况下,由于侵蚀等原因,弹体头部形状对侵彻深度的影响非常小,密度成为影响侵彻深度最

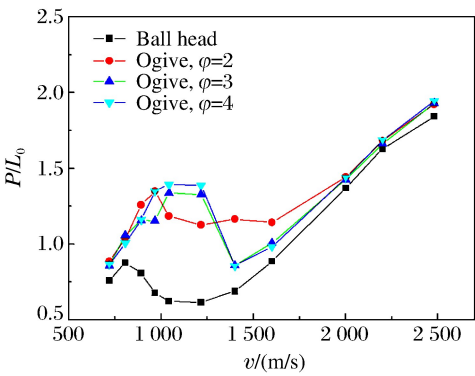


图 6 不同头部形状弹体侵彻深度-速度曲线
Fig. 6 Normalized DOP versus impact velocity for projectile with different nose shapes

重要的因素,因此同一冲击速度下,各种头部形状的弹体侵彻深度非常接近。(2)头部形状对侵彻转变点有影响。相同条件下,尖卵形头部弹体的侵彻转变速度较球形头部弹体高。这是由于在刚性侵彻阶段球形弹体比尖卵形弹体受到更高的靶体阻力,更容易使弹体材料屈服进入变形侵彻阶段,进入变形侵彻后,弹体头部形状的影响减弱,同时从变形侵彻到流体侵彻的转变主要受控于材料特性,因此不同头部形状的弹体第二个侵彻转变点较为相近。(3)不同曲径比 φ 的尖卵形弹体对侵彻转变点的影响不大,其原因主要是 φ 的系数变化较小,导致弹体头部形状区别不明显,弹体所受侵彻阻力差别不大。随着速度的增大,弹体材料特性的影响越来越明显,头部形状的影响逐渐降低,因此不同曲径比的弹体侵彻深度基本相同。

3.4 靶体材料对侵彻转变点的影响

在实际应用中,需要考虑长杆弹对不同靶体材料的侵彻问题。根据工程模型分析,靶体的动态强度是影响侵彻转变点的重要因素,尽管已经有许多学者进行了长杆弹侵彻不同靶体材料的研究^[22-25],但仍缺乏对侵彻转变点的规律性分析和讨论。为了对长杆弹侵彻不同靶体材料时侵彻深度的变化规律进行仿真分析,分别选用 Al6060T6、花岗岩、混凝土及装甲钢作为典型靶体材料。Al6061T6 的材料参数见表1;混凝土采用 RHT 模型,参数见文献[26];装甲钢采用 Shock 状态方程和 von Mises 强度模型描述,参数见文献[27];花岗岩选用 JH-2 模型描述,并采用文献[28]中的参数。弹体采用硬度值为 31 的 30CrMnSiNi2A,参数如表2所示。长杆弹头部为球形,弹长为 71 mm,弹体直径为 7.1 mm。金属靶体直径为 120 mm,长度为 300 mm;地质类材料靶体直径为 240 mm,长度为 800 mm。数值仿真的具体结果如图7所示。

从仿真结果可以看出,靶体材料对高速弹体侵彻深度影响较为显著,且存在侵彻深度转变现象。

(1)靶体材料对侵彻转变点有显著影响,强度较低的靶体材料如铝合金和混凝土靶体,侵彻深度转变阶段下降较为明显,这是由于靶体侵彻阻力较小,使变形侵彻的速度区间增加,而强度更高的靶体材料如岩石等由于弹体很快从变形侵彻过渡到纯流体侵彻,因此侵彻转变阶段的下降就不明显。均质装甲钢强度很高,抗弹能力强,由于弹体强度远远小于靶体强度,在仿真中弹体以较低速度撞击靶体后立刻出现变形,全过程的侵彻都类似于流体侵彻,未出现侵彻转变阶段。(2)弹体高速侵彻金属材料靶体达到转变阶段时冲击速度较高。地质类材料与金属材料在侵彻转变时侵彻深度的变化明显不同,金属材料在转变阶段存在着较大的侵彻深度下降的趋势,而地质类材料(如花岗岩和混凝土)侵彻深度的下降不明显。其原因可能是金属的弹靶交界面在侵彻时由于高温导致弹体头部与靶体出现软化等现象,从而使弹体头部变形较大,因而有较为明显的侵彻深度下降现象;而地质类材料在受侵彻时出现破碎现象,有可能导致侵彻深度下降不明显。

3.5 弹体材料对侵彻转变点的影响

不同材料的动态强度和静态强度不同,在高速冲击下的力学行为也不同,因此弹体材料对大范围着速弹体的侵彻转变点也有显著的影响。目前对不同弹体材料时的侵彻转变点仍缺乏可靠的理论和实验研究。本节对大着速范围不同弹体材料的长杆弹侵彻转变问题进行数值仿真研究。弹体材料选用 30CrMnSiNi2A、铜及钨合金。长杆弹的头部形状为球形,弹长为 71 mm,直径为 7.1 mm;铝靶参数如表2所示,靶体直径为 120 mm,长度为 300 mm。30CrMnSiNi2A 和钨合金采用 J-C 模型描述,具体参数见表6。具体仿真结果如图8所示。

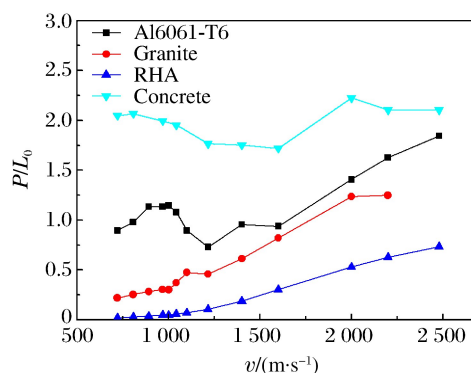


图7 不同靶体材料侵彻规律

Fig. 7 Normalized DOP versus impact velocity for target with different materials

表 6 弹体材料参数
Table 6 Parameters of projectile material

Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	n	C	D_1	D_2	D_3	D_4
30CrMnSiNi2A	7.83	745	623.11	0.424	0.061	0.351	1.650	2.589	0.020
Tungalloy	17.70	631	1 258.00	0.092	0.014	0	0.330	-1.500	0

由图 8 可知,对于不同的弹体材料,大着速范围弹体对靶体的侵彻深度也不同。随着冲击速度的增大,30CrMnSiNi2A 与钨合金弹体的侵彻深度均呈现先上升后下降而后再上升的变化趋势,且 30CrMnSiNi2A 的转变速度较钨合金更高;而铜弹体的侵彻深度仅呈单调上升趋势。另外,相同冲击速度下,钨合金弹体的侵彻深度最深,铜弹体的侵彻深度最浅。

针对弹体材料对侵彻深度转变影响的数值仿真结果可得如下结论。(1) 弹体材料对侵彻转变速度有显著影响;当弹体强度明显弱于靶体强度时,有可能会出现在刚开始侵彻时弹体头部就已经进入变形或者流体侵彻状态,从而随着撞击速度提高,侵彻深度不出现转变现象。(2) 相同形状弹体在同一冲击速度下,材料密度高的弹体可以获得更大的侵彻深度,但侵彻转变速度与密度相关性较小,而与弹体材料的动态强度关系更大,例如钨合金的密度较高,但其动态强度弱于一些热处理过的特种钢,因而钨合金的转变速度小于 30CrMnSiNi2A。

4 结 论

- (1) 建立了长杆弹侵彻半无限靶数值模型,计算结果显示,随着冲击速度的增大,弹体侵彻深度出现先上升后下降而后再上升的趋势,与文献[2]实验结果趋势相同。侵彻结束后的弹体情况随着侵彻冲击速度的增大呈现刚性-变形-侵蚀的趋势,与实验结果吻合较好,验证了数值计算方法的可靠性。
- (2) 通过数值仿真分析得到,弹体、靶体材料特性以及弹体头部曲径比对于侵彻转变点有明显影响。硬度更高的弹体侵彻转变点的冲击速度更高;动态强度大的材料有更高的侵彻转变速度;当弹靶材料强度相差较大时,不会出现侵彻转变现象;弹头曲径比越大(越尖锐),到达侵彻转变点的速度越高,且在同一冲击速度下侵彻深度也越大。
- (3) 在低速侵彻阶段,弹体头部形状、弹体/靶体材料等多种因素会影响侵彻深度;超高速侵彻时,密度成为影响侵彻深度的最主要因素,此时,无论何种弹体,只要密度相近,侵彻深度就基本相同。

参考文献:

[1] PIEKUTOWSKI A J, FORRESTAL M J, POORMON K L, et al. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nose steel projectiles with striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 723-734.

[2] FORRESTAL M J, PIEKUTOWSKI A J. Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(1): 57-67.

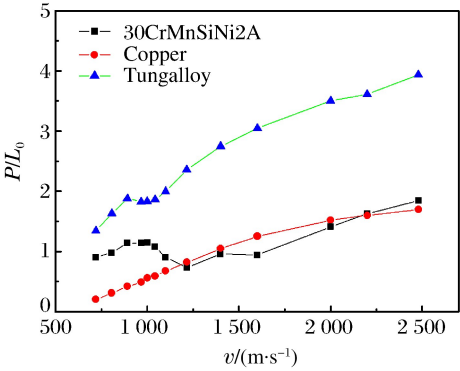


图 8 不同材料弹体的侵彻规律
Fig. 8 Normalized DOP versus impact velocity for projectiles with different materials

- [3] WEN H M, LAN B. Analytical models for the penetration of semi-infinite targets by rigid, deformable and erosive long rods [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26(4): 573-583.
- [4] LAN B, WEN H M. Alekseevskii-Tate revisited: an extension to the modified hydrodynamic theory of long rod penetration [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(5): 1364-1373.
- [5] 兰彬, 文鹤鸣. 半球形弹头钢长杆弹侵彻半无限铝合金靶的数值模拟 [J]. *工程力学*, 2009, 26(10): 183-190.
LAN B, WEN H M. Numerical simulation of the penetration of a spherical-nosed 4340 steel long rod into semi-infinite 6061-T6511 aluminum targets [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(10): 183-190.
- [6] 楼建锋, 王政, 洪滔, 等. 钨合金杆侵彻半无限厚铝合金靶的数值研究 [J]. *高压物理学报*, 2009, 23(1): 65-70.
LOU J F, WANG Z, HONG T, et al. Numerical study on penetration of semi-infinite aluminum-alloy targets by tungsten-alloy rod [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(1): 65-70.
- [7] 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): 559-563.
LOU J F, HE C J, ZHU J S, et al. Ballistic performance of long rods: material properties [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2009, 26(4): 559-563.
- [8] 楼建锋, 洪滔, 王政, 等. 钨合金杆材料属性与侵彻性能的关系 [J]. *计算力学学报*, 2009, 26(3): 433-436.
LOU J F, HONG T, WANG Z, et al. Relations between material parameters of tungsten-alloy rod and its ballistic performance [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(3): 433-436.
- [9] 陈小伟, 杨世全, 何丽灵. 动能侵彻弹体的质量侵蚀模型分析 [J]. *力学学报*, 2009, 41(5): 739-747.
CHEN X W, YANG S Q, HE L L. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 739-747.
- [10] 张凤国, 李维新, 洪涛, 等. 超高速钨合金长杆弹对混凝土侵彻及损伤破坏的数值分析 [J]. *弹道学报*, 2008, 20(3): 64-67.
ZHANG F G, LI W X, HONG T, et al. Numerical simulation for damage and penetration of concrete driven by long-rod projectile of tungsten alloy under super-high speed [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(3): 64-67.
- [11] ROSENBERG Z, DEKEL E. Numerical study of the transition from rigid to eroding-rod penetration [J]. *Journal de Physique IV*, 2003, 110(9): 681-686.
- [12] 王猛, 黄德斌, 曲家惠, 等. 钨合金杆式弹侵彻 45~# 钢变形失效行为的数值分析 [J]. *塑性工程学报*, 2012, 19(2): 102-106.
WANG M, HUANG D B, QU J H, et al. Simulation on the deformation and fracture of long-rod projectile of tungsten alloy penetrating into 45~# steel [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2012, 19(2): 102-106.
- [13] 王政, 楼建锋, 勇珩, 等. 岩石、混凝土和土抗侵彻能力数值计算与分析 [J]. *高压物理学报*, 2010, 24(3): 175-180.
WANG Z, LOU J F, YONG H, et al. Numerical computation and analysis on anti-penetration capability of rock, concrete and soil [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(3): 175-180.
- [14] 练兵, 蒋建伟, 门建兵, 等. 高速长杆弹对混凝土靶侵彻规律的仿真分析 [J]. *高压物理学报*, 2010, 24(5): 377-382.
LIAN B, JIANG J W, MEN J B, et al. Simulation analysis on law of penetration of long-rod projectiles with high speed into concrete [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010, 24(5): 377-382.
- [15] WALKER J D, ANDERSON C E. A time-dependent model for long-rod penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(1): 19-48.
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//*Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. The Hague, 1983, 21: 541-547.
- [17] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//*Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures*. Berlin, 1999.
- [18] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(12): 8060-8073.
- [19] 兰彬. 长杆弹侵彻半无限靶的数值模拟和理论研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [20] 李磊, 张先锋, 吴雪, 等. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢的动态本构与损伤参数 [J]. *高压物理学报*, 2016, 31(3): 239-248.
LI L, ZHANG X F, WU X, et al. Dynamic constitutive and damage parameters of 30CrMnSiNi2A steel with different

- hardnesses [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2016, 31(3): 239-248.
- [21] 李磊. 不同硬度 30CrMnSiNi2A 钢动态本构与损伤参数研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [22] STEINBERG D. Equation of state and strength properties of selected materials [M]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.
- [23] 陈小伟. 穿甲/侵彻问题的若干工程研究进展 [J]. 力学进展, 2009, 39(3): 316-351.
- CHEN X W. Advances in the penetration/perforation of rigid projectiles [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 316-351.
- [24] 王可慧, 耿宝刚, 初哲, 等. 弹体高速侵彻钢筋混凝土靶的结构变形及质量损失的实验研究 [J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 61-68.
- WANG K H, GENG B G, CHU Z, et al. Experimental studies on structural response and mass loss of high velocity projectiles penetrating into reinforced concrete targets [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1): 61-68.
- [25] 沈俊, 徐翔云, 何翔, 等. 弹体高速侵彻岩石效应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4207-4212.
- SHEN J, XU X Y, HE X, et al. Experimental study of effect of rock targets penetrated by high-velocity projectiles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl 2): 4207-4212.
- [26] MATUSKA D A. HULL users' manual; AFATL-TR-84-59 [R]. Florida: Air Force Armament Laboratory, 1984.
- [27] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures, Berlin, 1999.
- [28] AI H A, AHRENS T J. Simulation of dynamic response of granite: a numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1): 1-10.

Depth of Penetration and Its Influence Factors of Long Rod Projectile Impacting on Semi Infinite Target with Elevated Velocity

XU Chenyang, ZHANG Xianfeng, LIU Chuang, DENG Jiajie, ZHENG Yingmin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

Abstract: Hypervelocity penetration is an important issue for a weapon designer and protection engineering experts. With the increase of the impact velocity, a projectile may transition into a fluid penetration phase, and its depth of penetration (DOP) no longer rises monotonously with the velocity. Numerical simulation of the penetration processes of a long rod projectile at an elevated impact velocity was performed to analyze the variation and influencing factors of the transition point. Influences of the hardness, nose shape, material of the projectile and the target on the transition point of DOP were simulated. The simulation results show that, with the increase of the impact velocity, the DOP increases at first and then decreases at a certain velocity (called the transition velocity). The velocity of the transition point improves with the increase of the projectile's hardness. The Ogive-headed projectile has a higher transition point than the spherical-headed projectile. Moreover, the projectile/target material also has significant effects on the transition point.

Keywords: hypervelocity penetration; long rod projectile; depth of penetration; transition point