

穿甲过程中钨合金杆式弹失效模式及数值模拟

王 猛¹, 杨明川¹, 荣 光², 黄德武¹, 罗荣梅¹

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110159)

(2. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘 要: 为深入研究钨合金杆式弹穿甲侵彻过程中的变形、失效模式, 利用扫描电镜和有限元数值模拟, 观测、分析钨合金残余弹芯头部剖面显微组织的变形演化。结果表明: 穿甲侵彻过程中, 钨合金弹芯头部发生剧烈的塑性变形而呈“蘑菇头”形状, 钨晶粒被严重压扁, 表现出良好的动态塑性。弹芯“蘑菇头”前端垂直侵彻方向 1mm 处产生绝热剪切带, 剪切带内 W 颗粒和 W-W 界面上均有微裂纹产生, 并表现出溶化现象。数值模拟表明, 钨合金在侵彻过程中“蘑菇头”不断形成和脱落, 弹芯因此发生销蚀而逐渐变短。弹芯“蘑菇头”处材料剧烈变形如同塑性流动, 变形局部化主要出现在“蘑菇头”两侧边缘或前端垂直于侵彻方向处。

关键词: 穿甲力学; 失效模式; 变形局部化; 塑性流动; 数值模拟

中图分类号: TG146.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)09-2170-05

为提高侵彻威力, 穿甲弹通常设计成杆式结构, 弹芯材料采用高强度、高密度的钨合金或贫铀合金^[1]。试验表明, 同等情况下, 贫铀弹比钨合金弹具有更强的穿甲威力, 原因是贫铀合金在穿甲过程中表现出良好的绝热剪切性, 不断产生“自锐”行为, 从而保持较尖的弹头形状。钨合金材料高速侵彻时首先发生热塑软化, 弹头呈蘑菇状, 极大降低了穿甲性能^[2,3]。然而贫铀材料的化学毒性和放射性污染, 使得贫铀弹的使用受到广泛的舆论谴责^[4]。所以开发新型钨合金材料、提高钨合金的绝热剪切敏感性能和侵彻威力成为目前研发弹用钨合金的主要内容^[5-7]。

研究表明, 钨合金材料的变形特性和受力状态对绝热剪切性能都有重要的影响^[8-13]。目前的研究方式多为实验室手段, 采用的冲击加载手段主要是 Hopkinson 压杆、扭杆及剪切炮等, 试件又多为哑铃形或帽形等形状, 所处的力学环境较为特殊。而对于高速穿甲侵彻来说, 弹靶接触区域处于高温(可达 10^3 K)、高压(几十吉帕)和高应变率($10^5 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$)等复杂状态, 所以研究侵彻过程中钨合金材料的变形、破坏过程对分析穿甲侵彻性能有更直接的意义。

本研究结合靶场穿甲侵彻实验, 利用光学金相显微镜和扫描电镜观察残余弹芯头部剖面显微组织的变形演化; 同时利用 LS-DYNA 有限元动力学程序对钨

合金杆式弹侵彻装甲钢板进行数值模拟, 直观演示了侵彻过程中钨合金弹芯前端“蘑菇头”的形成、销蚀过程, 以及弹芯材料塑性流变表现出的应力、应变特征, 深入理解侵彻过程和穿甲侵彻机理。

1 实验分析

1.1 实验方法

用海 37 滑膛弹道炮发射 95W 钨合金次口径穿甲弹, 垂直侵彻 50 mm 厚的 603 (30CrMnMo) 装甲靶板。钨合金弹芯密度为 17.96 g/cm^3 , 由 W、Ni、Fe 复合粉末通过粉末冶金方法烧结而成。钨合金弹芯直径为 8 mm, 弹长为 88 mm, 其形貌及剖面显微组织如图 1 所示, 平均钨晶粒尺寸为 $30 \sim 35 \mu\text{m}$, 近似等轴晶粒。为研究钨合金弹芯高速侵彻装甲板过程中的变形、破坏特性, 通过调整发射药量来改变弹体侵彻速度, 使弹芯嵌入装甲板中。实验后回收残余弹芯, 沿轴向切开, 经过研磨、抛光、腐蚀后, 在金相显微镜和扫描电镜下观察其剖面显微组织的演化。

1.2 结果分析

图 2a 为钨合金弹芯以 852 m/s 速度垂直侵彻装甲板时, 弹孔中残留的“蘑菇头”弹芯。弹芯头部明显墩粗, 最大直径为 14.8 mm, 是侵彻前的 1.85 倍, 弹芯尾部直径没有发生明显变化。残余弹芯“蘑菇头”

收稿日期: 2014-09-14

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (51453030305QT2802)

作者简介: 王 猛, 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159, 电话: 024-24681246, E-mail: Wangm2050@163.com

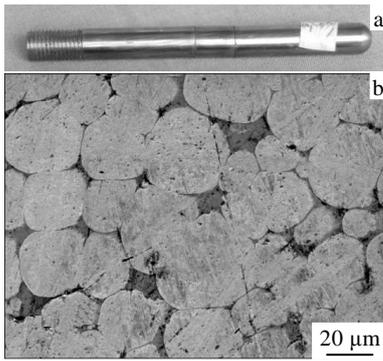


图 1 钨合金弹芯及剖面组织

Fig.1 Tungsten alloy penetrator (a) and initial microstructure (b)

部位表面粗糙，显示出明显的高温、高压和摩擦、销蚀的痕迹。沿“蘑菇头”弹芯轴向剖开，得到纵向剖面如图 2b 所示。可以看到，高速侵彻过程中弹芯头部弹、靶接触区域材料受到强烈的挤压，向周边反挤而产生强烈的塑性变形。

图 3a、3b、3c 分别为对应于图 2b 中标示位置 A、B、C 放大 500 倍的扫描电镜照片。其中 A、B 位于蘑菇头边缘，C 处于残余弹芯尾部。可以看到，蘑菇头处 W 颗粒沿垂直侵彻方向被严重压扁。A 处 W 颗粒平均长/宽比为 6.7，B 处 W 颗粒平均长/宽比为 4。被压扁的钨颗粒之间紧密相连，但钨颗粒没有明显破碎，表明钨合金材料在高速侵彻下表现出良好的塑性。C 处钨颗粒被横向轻微压缩，塑性变形不明显。因此可以认为，高速侵彻过程中，钨合金弹芯头部首先发生较大的塑性变形，形成粗大的“蘑菇头”；但这种剧烈的塑性变形主要集中在弹芯前端 3~4 mm 范围内，其他大部分区域塑性变形较小，而弹芯尾部为卸载区，基本不发生变形。

对于钨合金弹芯的穿甲侵彻，人们更为关注侵彻过程中弹芯的失效行为、破坏模式，是否形成绝热剪切，以及绝热剪切的形成区域^[14]。本实验中，沿残余

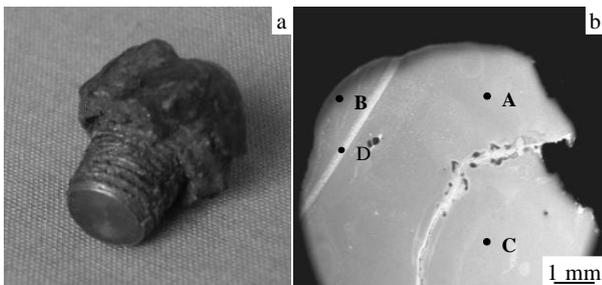


图 2 残余“蘑菇头”弹芯及纵向剖面

Fig.2 Residual mushroom-like-head penetrator (a) and optical micrograph of cross-section (b)

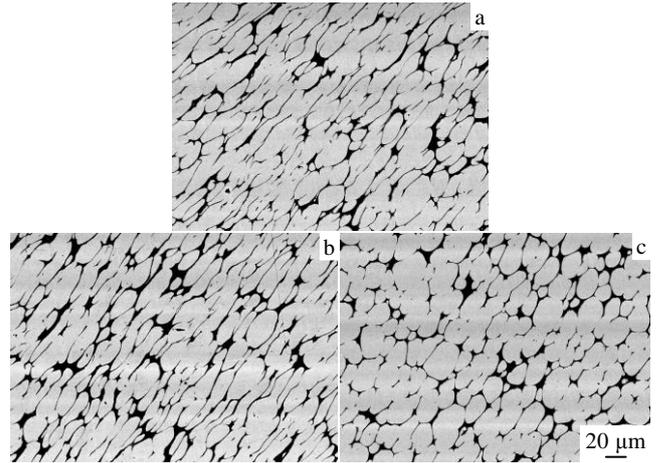


图 3 残余弹芯剖面的各区域钨颗粒变形

Fig.3 Deformation of W grains in the residual mushroom-like-head of Fig.2b: (a) zone A, (b) zone B, and (c) zone C

弹芯的轴向剖面，距离弹芯蘑菇头前端约 1 mm 处，如图 2b 所示位置，产生一条亮白色绝热剪切带，带宽为 100~200 μm。图 4a 为剪切带内 D 点处显微组织的放大照片。可以看出，剪切带内钨颗粒显然是经历了剧烈的塑性变形和破碎，界面不再保持光滑而显示出规则形态。同时，这种不规则的钨晶粒边界又表现出因局部溶化而显现的边缘平滑现象。可以推断：这种边缘平滑现象是由于剪切带内的温度较高，破碎的钨晶粒可能发生了扩散固溶而留下的痕迹；因此绝热剪切带内的温度在局部至少应该达到 W-Ni-Fe 粘结相的共晶温度 1450 °C 以上。破碎的钨颗粒边界上分布大量光滑的球状小颗粒。图 4b 为图 4a 标示位置 I 处球状小颗粒的 X 射线电子能谱图。分析表明，光滑球颗粒中不仅含有 W、Fe，还有较多的 Mo 成分。而这种元素 Mo 只可能解释为来自破碎的 30CrMnMo 靶板，沿着贯穿裂纹进入剪切带内。

另外，如图 4a 中箭头标示位置，W 颗粒和 W-W 界面上均有微裂纹产生。因此，可以进一步推断：随着弹芯“蘑菇头”变形局部化的加剧，剪切带内微裂纹也将进一步长大、汇聚，形成贯穿大裂纹，并最终导致弹芯前端材料的破坏、脱落，杆式弹芯因此而不间断销蚀和变短。

2 数值模拟

2.1 侵彻模型

在实验的基础上，应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元动力学软件对钨合金杆式弹侵彻装甲钢板进行数值仿真。根据穿甲侵彻环境，模拟杆式弹垂直撞击装甲板，建立 1/2 轴对称 2D 侵彻模型。为简化计算，忽略弹芯

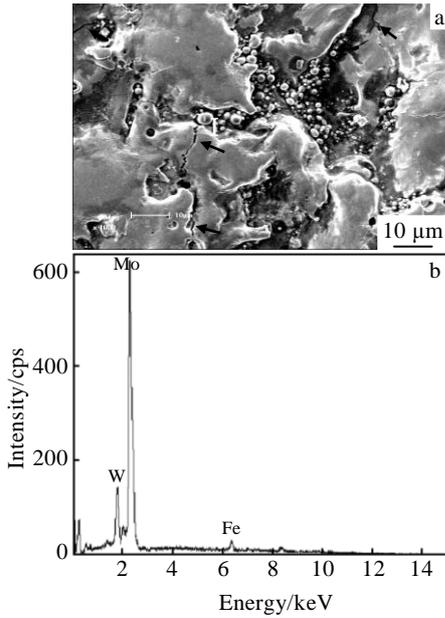


图 4 图 2b 剪切带内 D 处的微结构和能谱分析

Fig.4 Microstructure of zone D in the ASB from Fig.2b (a) and the EDX analysis (b)

尾部的螺纹及尾翼结构。对弹、靶撞击接触区域，进行四边形网格加密，靶板模型两侧边界处理为无反射边界条件。设置弹芯网格尺寸为 150 μm×150 μm，靶板网格为 300 μm×300 μm，整个模型共有 36109 个计算单元。

穿甲侵彻过程中，作用时间极短，应变率高，弹、靶接触区域材料表现为高温、高压下的剧烈塑性流变。

所以钨合金弹和装甲板均采用经典的 Johnson-Cook 热粘塑性本构模型和 Mie-Gruneisen 状态方程^[11]。Johnson-Cook 本构模型表现侵彻过程中弹、靶材料的应变硬化、应变率强化和热软化及其耦合效应，其塑性流动应力表达式如下：

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

式中， σ_y 为材料流动屈服强度； A 为静屈服应力； B 为应变硬化系数； n 为应变硬化指数； C 为应变率相关系数； m 为温度相关系数。 $\bar{\epsilon}_p$ 为有效塑性应变； $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ 表示为无量纲有效塑性应变率，取 $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率。其中 $T^* = (T - T_r) / (T - T_m)$ ，其中 T_r 和 T_m 分别对应为室温和材料熔化温度。侵彻模型中材料各参数具体数值如表 1 所示。

2.2 模拟结果分析

为验证本研究数值模拟结果的可靠性，分别计算了弹芯以 805、852、1052 和 1076 m/s 4 种速度垂直侵彻靶板时得到的侵彻深度，并与嵌入弹孔实际测量结果作对比，如图 5 所示。可以看到，数值模拟结果与实验结果基本一致，侵彻速度在 800~1100 m/s 范围内，钨合金弹芯均没有穿透靶板，且随着侵彻速度的增加，穿深也基本呈线性增加。图 6 为钨合金弹芯以 852 m/s 速度侵彻装甲板时，得到的最终残余弹芯与弹孔形状。弹芯头部墩粗成蘑菇头状，而弹芯尾部基本保持完好，弹孔直径为 1.5~2 倍的弹径。破碎的弹芯材料沿坑壁向侵彻的反方向飞溅，模拟得到的残余弹体和弹孔形貌与实验吻合较好。

表 1 Johnson-Cook 模型的主要参数

Table 1 Major parameters of Johnson-Cook model

Material	$\rho/\text{g cm}^{-3}$	G_0/GPa	μ	T_0/K	T_m/K	$c/\text{J (kg K)}^{-1}$	A/MPa	B/MPa	n	C	m
95 W	17.96	125	0.3	293	1723	134	1506	177	0.12	0.016	1.00
603 steel	7.8	75	0.33	293	1793	477	1120	500	0.26	0.014	1.03

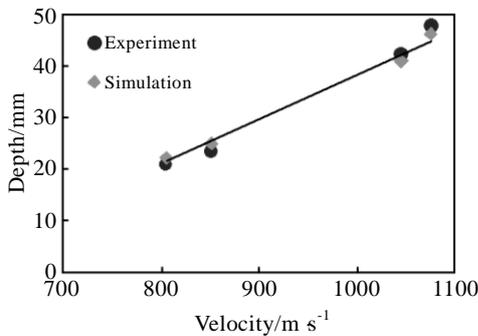


图 5 不同速度时侵彻深度

Fig.5 Penetration depths at different velocities

图 7 为模拟以 852 m/s 速度侵彻装甲钢时，钨合金杆式弹的塑性变形流动及弹芯前端“蘑菇头”的形

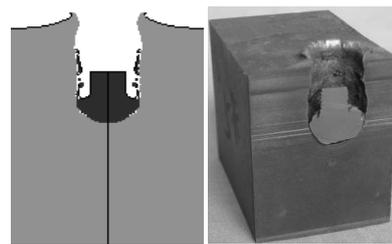


图 6 以 852 m/s 速度侵彻得到的弹孔与残余弹芯

Fig.6 Hole and residual penetrator at 852 m/s

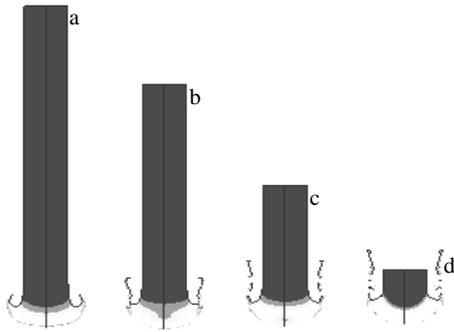


图 7 钨合金弹芯销蚀演化过程

Fig.7 Deforming failure of the tungsten alloy long rod during penetrating: (a) 30 μs, (b) 60 μs, (c) 100 μs, and (d) 150 μs

成、销蚀演化过程。可以看到，整个侵彻过程中，钨合金弹芯变形、失效仅限于头部 3~4 mm 区域内，强烈的撞击压缩使弹芯头部材料发生剧烈的塑性变形，其不断流向两侧而形成“蘑菇头”形状。侵彻 30 μs 左右，弹芯“蘑菇头”两侧边缘开始发生明显的失效、脱落，形成反向飞溅。随后的侵彻过程可以描述为：钨合金弹芯“蘑菇头”前端和两侧边缘材料不断破坏、脱落；同时，相邻区域材料的塑性变形流动又继续补充和形成“蘑菇头”，从而保持了侵彻过程中弹芯前端的“蘑菇头”形状，杆式弹芯因此不断销蚀而逐渐变短。最后，在 150 μs 时刻，弹芯的动能不足以继续侵彻靶板而残留在弹孔中。

图 8 所示为侵彻 150 μs 时刻的等效塑性应变云图。可以看到，弹芯“蘑菇头”内的钨合金材料发生了剧烈变形，但其塑性应变分布却不均匀。蘑菇头边缘处变形最先达到临界塑性应变而发生破坏和销蚀；其中在侧边缘处，如图中沿虚线 A 标示位置，塑性变形流动快速局部化而发生断裂，造成材料的侵蚀脱落。另外，蘑菇头前端垂直于侵彻方向，图中沿虚线 B 标示，此狭长区域内塑性变形程度明显高于其周围材料，如变形进一步加剧，此区域则可能首先发生塑性失稳而形成绝热剪切带。这可以解释图 2b 中弹芯“蘑菇头”前端观察到的绝热剪切带形成机制。

选取图 8 中弹芯“蘑菇头”上 1152 号单元，其等效应力-时间历程曲线如图 9 所示。图中应力演化可描述弹芯材料在侵彻过程中的应力状态变化。可以看到，侵彻过程中弹芯材料的应力状态演变可分为 3 个阶段。第 1 阶段，由于弹芯的塑性变形集中在弹、靶接触区域，其他部分基本不变形，所以来自弹头处的冲击应力波和弹尾卸载应力波在弹体中来回传播，表现为图中所示单元应力的高低波动。第 2 阶段，弹芯头部开始出现塑性变形，由于材料的应变硬化效应和应

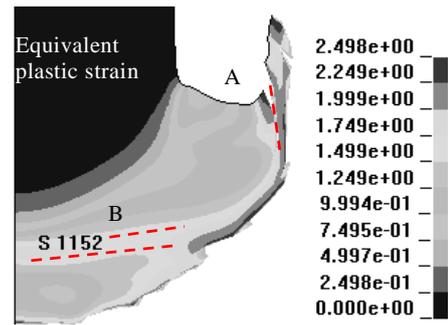


图 8 残余弹芯的等效塑性应变云图

Fig.8 Equivalent plastic strain cloud of residual penetrator

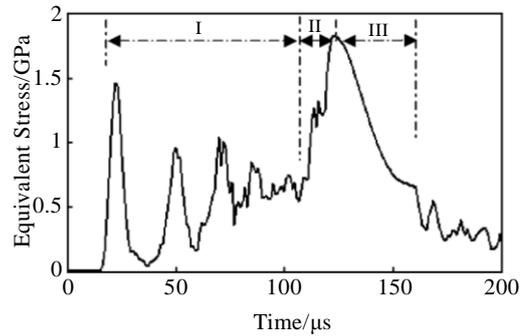


图 9 单元 1152 的等效应力-时间历程曲线

Fig.9 Equivalent stress vs time of element 1152

变率硬化效应，单元应力迅速增加，表现为应力曲线的快速上升，并达到峰值。第 3 阶段，由于弹芯前端塑性变形的局部化发展，使得局部化区域材料的热软化效应显著，并超过应变硬化和应变率硬化，此时单元应力急剧降低，即表现为曲线上的应力塌陷行为。

3 结 论

1) 高速穿甲侵彻过程中，钨合金杆式弹芯头部 3~4 mm 范围内发生剧烈的塑性变形流动而呈“蘑菇头”形状。弹芯头部的钨晶粒被严重压扁，表现出良好的塑性行为。弹芯“蘑菇头”前端约 1 mm 处垂直侵彻方向产生亮白色绝热剪切带，带内钨颗粒经历了剧烈的塑性变形和破碎，界面不再保持光滑而显示出 不规则形态。另外，剪切带内 W 颗粒和 W-W 界面上均有微裂纹产生，微裂纹将长大、汇聚，最终形成贯穿裂纹，弹芯头部材料因此发生破坏、脱落和销蚀。

2) 数值模拟得到的侵彻穿深、残余弹体和弹孔形貌与实验吻合较好，再现了侵彻过程中弹芯“蘑菇头”的不断形成和破坏、脱落动态过程。弹芯“蘑菇头”处材料的剧烈变形如同塑性流动，边缘材料因塑性流动快速局部化而最先发生断裂和侵蚀。由于塑性变形

极不均匀,“蘑菇头”前端形成垂直侵彻方向的变形局部化行为。这可解释钨合金侵彻过程中的绝热剪切形成机制。

参考文献 References

- [1] Cui Jintai(崔金泰). *Acta Armamentarii*(兵工学报)[J], 1987, 4: 70
- [2] Kim D S, Nernat N S, Isaacs J B *et al. Mechanics of Materials*[J], 1998, 28: 227
- [3] Bose A, Couque H, Lankford J. In: Bose A, Dowding R J eds. *Tungsten and Tungsten Alloy 1992*[C]. Princeton, NJ: MPIF, 1992: 291
- [4] Bai Xinde(白新德), Jiang Zuozhong (姜作中), Lin Wei(林伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(6): 412
- [5] Lee K H, Cha S I, Ryu H J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 452-453: 55
- [6] Greger M, Cizek L, Widomska M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 157-158: 683
- [7] Lui Guirong(刘桂荣), Wang Ling(王玲), Zhou Wuping(周武平) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2009, 14(5): 295
- [8] Huang Chenguang(黄晨光), Dong Yongxiang(董永香), Duan Zhuping(段祝平) *et al. Advances in Mechanics*(力学进展)[J], 2003, 32(4): 463
- [9] Fan Jinglian(范景莲), Liu Tao(刘涛), Cheng Huichao(成会朝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(6): 841
- [10] Bless S J, Tarcza K, Chau R *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2006, 33: 100
- [11] Teng X, Wierzbicki T, Couque H. *Mechanics of Materials* [J], 2007, 39: 107
- [12] Zhigang W, Jilin Y, Shisheng H *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2000, 24: 747
- [13] Fan J L, Huang B Y, Song M *et al. Mechanics of Materials*[J], 2010, 42: 24
- [14] Lankford J, Anderson C E, Suzanne A *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 1996, 18: 565

Failure Model and Numerical Simulation of the Tungsten Alloy Long Rod when Piercing into Armor Target

Wang Meng¹, Yang Mingchuan¹, Rong Guang², Huang Dewu¹, Luo Rongmei¹

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

(2. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The purpose of the present work is to investigate the deformation failure behavior of tungsten alloy long rod penetrating into armor target by metallographic analysis and numerical simulation. Microstructure evolution of the residual projectile was studied using SEM and OM. The results show that mushroom-like-head of penetrator is formed during penetration due to severe plastic deformation, and W grains in the mushroom are elongated heavily. An adiabatic shear band is observed perpendicular to the penetration direction in the front mushroom about 1 mm, in which W grains seem dissolving due to local temperature rise, and micro-cracks are developed both in W grains and W-W interface. Numerical simulation shows that the mushroom forms and falls off continuously during penetrating, so the long rod becomes shorter for the erosion. Severe plastic deformation in the mushroom is similar to plastic flow, and the deformation localization occurs mainly upon the both sides or the front of the mushroom.

Key words: perforation mechanics; failure model; deform localization; plastic flow; numerical simulation

Corresponding author: Wang Meng, Ph. D., Lecturer, College of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, P. R. China, Tel: 0086-24-24681246, E-mail: wangm2050@163.com