

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0092- 06

90W 和 93W 钨合金动加载下微(细)观响应分析^①

焦 彤, 张宝钊, 张海涛, 刘长林
(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

[摘 要] 通过实验分析了 90W 和 93W 钨合金在动加载时其断裂机理及特性以及侵彻时其微观结构响应的异同点。通过对比发现, 二者的断裂机理基本相似, 但侵彻时, 由于 90W 钨合金中存在较多的粘结相而使得其蘑菇头较小, 其中的钨颗粒变形也较小; 只在 93W 钨合金中发现了绝热剪切现象的征候。

[关键词] 钨合金; 动态断裂; 侵彻; 绝热剪切

[中图分类号] TG 146. 411

[文献标识码] A

钨合金是一种由近似于球形的钨颗粒和钨、镍、铁及少量的钴组成的粘结相在高温下烧结而成的一种双相合金, 由于具备了高密度、高强度和较好的韧性等优异性能而成为穿甲弹的主要弹芯材料。但据资料报道^[1], 钨合金穿甲弹的侵彻能力不及贫铀合金制成的穿甲弹。究其原因, 是由于钨合金穿甲弹在侵彻过程中头部将形成蘑菇头, 不利于穿甲, 而贫铀合金穿甲弹在侵彻过程中将形成绝热剪切带, 钝化的头部不断脱落, 即产生所谓“自锐化”效应, 从而提高穿甲能力。但贫铀合金由于有辐射问题, 因而不是最佳的穿甲弹弹芯材料。而 90W 和 91W 等低钨含量钨合金, 由于其更可能在侵彻中形成绝热剪切带而日益受到人们的注意。

穿甲弹在侵彻装甲时, 其头部将遭受到数十乃至近百个 GPa 的冲击压力, 材料内部将发生应变率高达 10^5 s^{-1} 的高速变形和破坏, 因此对钨合金断裂机理、断裂性能的分析, 以及对其在侵彻过程中头部的微细观结构响应的分析是十分重要的。本文作者通过实验对比, 分析了 90W 和 93W 在动加载时发生断裂的机理和侵彻时微观结构响应的特点, 为寻找更好的穿甲弹的弹芯材料提供了依据。

1 90W 和 93W 动态断裂特性

作者利用一级轻气炮分别对 90W 和 93W 钨合金进行了动加载实验, 加载峰值压力在 10 GPa 左右。将受载后软回收的试件沿径向剖开, 磨制成金相试样, 在扫描电镜下对其断裂特征进行了观察。图 1 所示为 90W 和 93W 合金中裂纹的金相照片。

从图 1 可以看出, 两种材料的断裂方式十分类似, 大致可分为以下 4 种:

1) 钨颗粒(W)-钨颗粒(W)界面分离; 2) 钨颗粒(W)-粘结相(M)界面分离; 3) 粘结相(M)的韧断; 4) 钨颗粒(W)的解理断裂。

钨合金是由钨颗粒(W)和 W-Ni-Fe 及少量的钴组成的粘结相(M)构成双相合金^[2], 粘结相在合金中起着粘结钨颗粒、阻止裂纹扩展、提高合金韧性以及在受载情况下调整合金的应力分布等作用。由于在高温下钨溶于 Ni-Fe 相中形成 W-Ni-Fe 固溶体对 W-M 界面起到固溶强化作用, 并且合金中钨颗粒与基体相的界面浸润好, 接触面积大, 因此 W-M 界面则粘结强度高, 在受载时较难于分离。但由于大量存在的 W-W 界面间仅有很薄的一层基体相起粘结作用, 因而容易脱粘分离(见图 1(a), (b)), 故 W-W 界面是合金中结合最弱的部分, 它们会首先脱粘形成微裂纹。

在载荷的作用下, 脱粘形成的微裂纹会进一步扩展, 由于位错堆积等原因, 在 W-M 界面处以及粘结相中形成了许多的微孔洞。粘结相中的微孔洞不仅仅为裂纹的扩展起了直接的导向作用, 而且有些孔洞之间也发生了汇合(如图 1(c)所示), 形成了贯穿裂纹。从图中可看到, 裂纹的扩展大多是沿 W-W 界面或 W-M 界面进行的, 而且这些裂纹并不平直, 往往呈现锯齿状(见图 1)。

钨合金的断裂模式中还有着钨颗粒的穿晶断裂。钨颗粒中原本就存在着微孔洞(见图 1(a)), 这些孔洞状缺陷的存在弱化了钨颗粒的强度, 在外加载作用下, 合金中钨颗粒往往比粘结相承受着更

① [收稿日期] 2000- 03- 02; [修订日期] 2000- 10- 08

[作者简介] 焦 彤(1971-), 女, 博士。

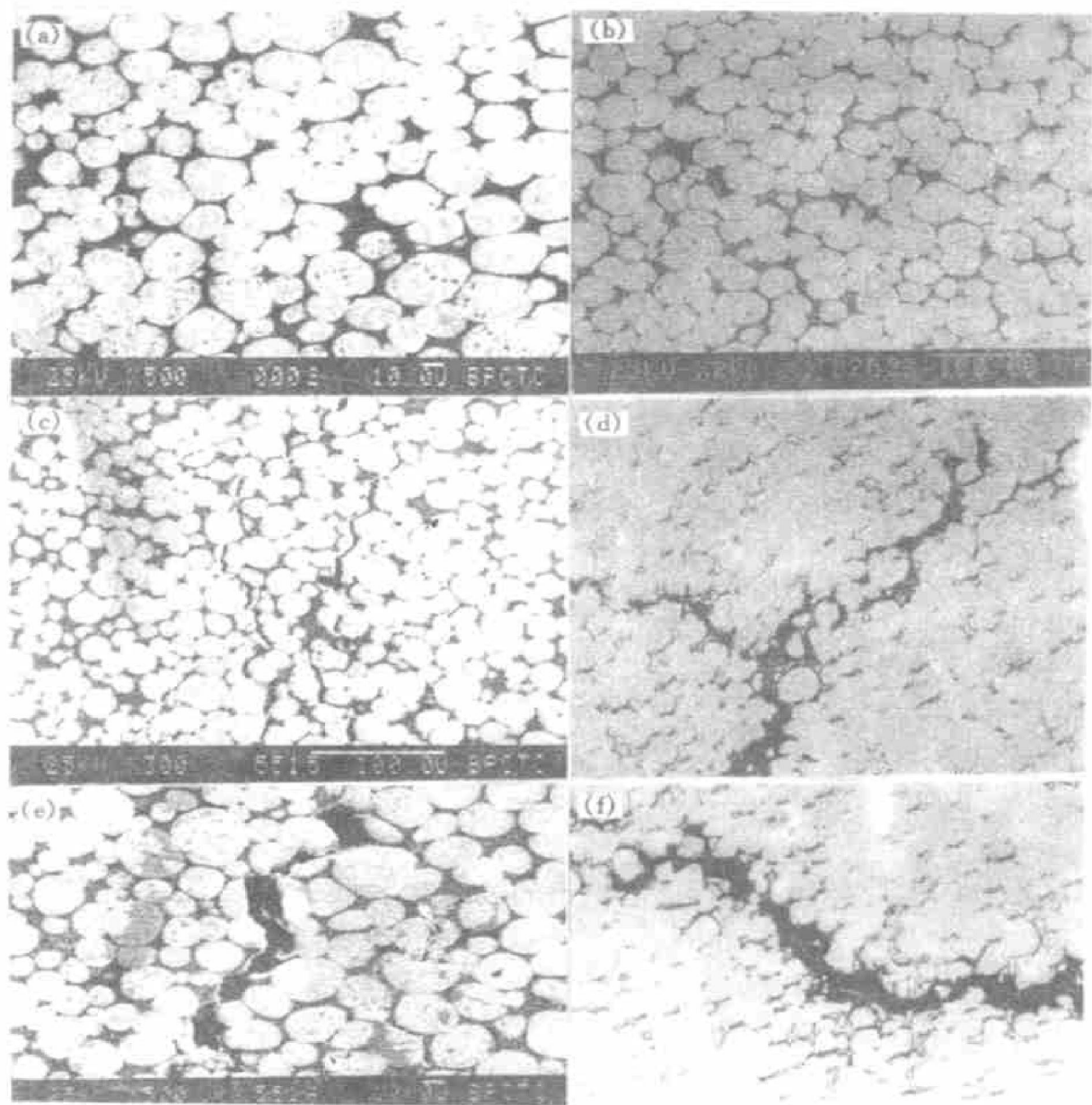


图 1 90W 和 93W 断裂特性金相照片

Fig. 1 Failure character in 90W and 93W

(a) —Original sample of 90W; (b) —Original sample of 93W; (c) —Crack in 90W; (d) —Crack in 93W;
(e) —Crack in 90W; (f) —Crack in 93W

高的应力，这样，当粘结相中的裂纹扩展到钨颗粒表面时，由于钨颗粒中微孔洞以及裂纹的存在将会在钨颗粒中产生很强的应力集中，当裂纹的扩展所形成的应力集中远大于钨颗粒的劈裂阻力时，就会发生钨颗粒的解理劈裂。

从以上的分析可以看出，钨合金损伤起源之一是 W-W 界面分离，并沿 W-W 界面和 W-M 界面向前发展。钨合金中既存在着孔洞状缺陷，也存在着裂纹状缺陷，因此它的断裂性态既不同于通常的韧性材料，也不同于通常的脆性材料。但在我们的加载范围内，钨合金中损伤的发展主要是以延性方式在韧性的粘结相中进行的^[3]，因此在这种条件下可以近似地把它看作是一种类延性材料，而且根据对

钨合金断裂模式的统计^[4]，发现 93W 钨合金在 30 GPa 左右还将发生韧脆转变现象。

2 模拟穿甲弹侵彻实验

为更深入地探讨 90W 和 93W 钨合金在穿甲过程中受到强烈冲击时其微细观结构响应的异同，作者将 90W 和 93W 钨合金分别制成直径为 5 mm，长为 25 mm 的小棒。然后利用一级轻气炮驱动钨合金棒去撞击侵彻 45 号钢质靶板，具体的实验装置见图 2 所示。

根据泰特经验公式^[5]计算出直径为 5 mm，长为 25 mm 模拟穿甲弹对 5 mm 厚钢板的极限穿透速

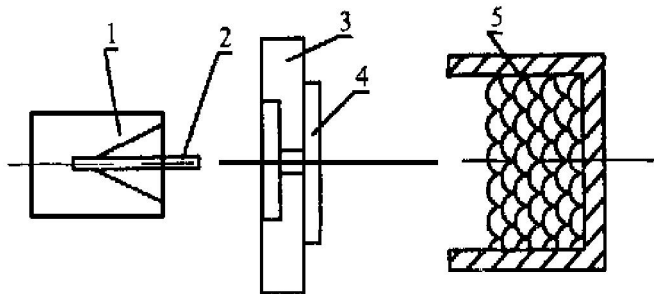


图 2 模拟弹实验装置简图

Fig. 2 Penetration experiment device

度为 609.8 m/s。结合一级轻气炮加载能力，在实验中作者选取 450~ 650 m/s 作为实验弹速，所获得的部分实验数据如表 1 所示。由于轻气炮加载能力的限制，钨合金棒不能做的太粗太长，否则加上弹托的质量后使弹丸变得太重，弹丸速度难于提高。为了防止弹托所携带的动能作用在靶板上，作者设计了一个卡板，只允许钨棒通过，而阻挡弹托。但由于钨棒是固定在弹托上的，故弹托与卡板相撞时会降低钨棒对靶板的撞击速度。表 1 中所列的仅为弹托与卡板碰撞前所测得的弹速。

表 1 钨合金弹侵彻钢靶板的实验数据

Table 1 Penetration experiment data of tungsten alloy into steel target

Test No.	m_1/g	$v/(m \cdot s^{-1})$	m_2/g	Subject	Result
1001	8.360 (90W)	527	8.320	5 mm	See Fig. 3
1002	8.371 (90W)	546	8.316	5 mm	See Fig. 4
1003	8.553 (93W)	650	8.453	5 mm	See Fig. 5

实验 1001 的结果如图 3 所示，可以看到靶板已经被穿透，从穿孔边缘被拉断的迹象可看出此时已接近于穿透极限状态，但所测到的实际穿透极限速度小于计算结果。可见泰特经验公式在弹径较小，弹速较低的情况下与实验结果相差较远。实验中，在本实验的速度范围内，钨合金棒的质量损失很小，仅在头部有明显的镦粗现象，而且随着速度的增加、靶板厚度的加大，钨棒头部的镦粗现象越来越严重，靶板的翘屈也越来越小。实验 1003 所采用的是 93W 钨合金制成的钨棒，比较实验 1003 和 1002 可以看出，两实验中的第一块板都被穿透，并形成明显的靶后翻唇，靶板上也都发生了翘曲，但实验 1002 的穿孔明显比实验 1003 要小，且靶板翘曲也要小一些；对于实给 1002 的第二块板，仅在背面有明显的凸起，且凸起部有明显的裂纹，但并未

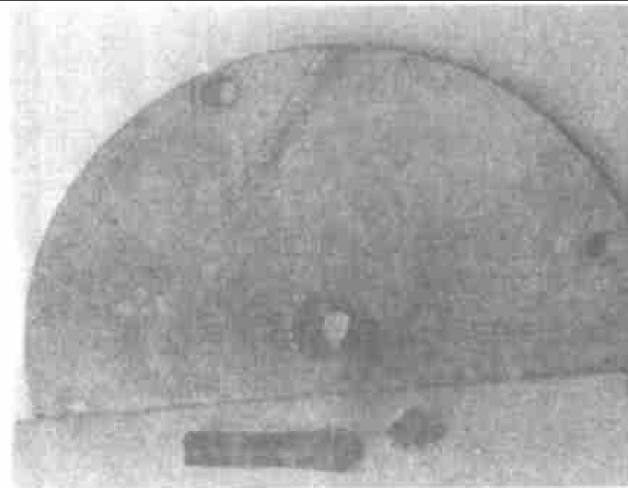


图 3 实验 1001 结果

Fig. 3 Result of test No. 1001

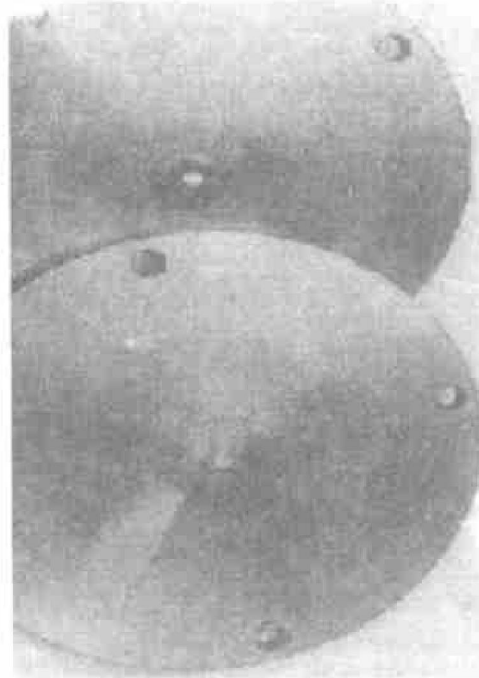


图 4 实验 1002 结果

Fig. 4 Result of test No. 1002

穿透，而在实验 1003 中，第二块靶板不仅被穿透，而且有明显的翘曲，靶后孔边呈明显的花瓣型。从孔边延伸的裂纹、断口表面的形状以及回收到的蘑菇状钨弹头部进行考察分析，作者认为，在实验 1003 中，93W 钨棒在穿透第一块板后头部已呈现明显的蘑菇状，且动能也已损耗了大半，因此在对第二块靶板进行撞击时，已不能再开坑了。作者由于第一块在被钨弹侵彻时，已发生明显的翘曲，因此与它紧密相接的第二块板在受作用前就已被挤压而产生微小裂纹，这样钨弹就凭借剩余的能量和较大的头部将第二块板拱裂。

从回收的钨棒来看，93W(实验 1003)棒镦粗得最严重，蘑菇头也较 90W 棒大。当然，93W 的密度

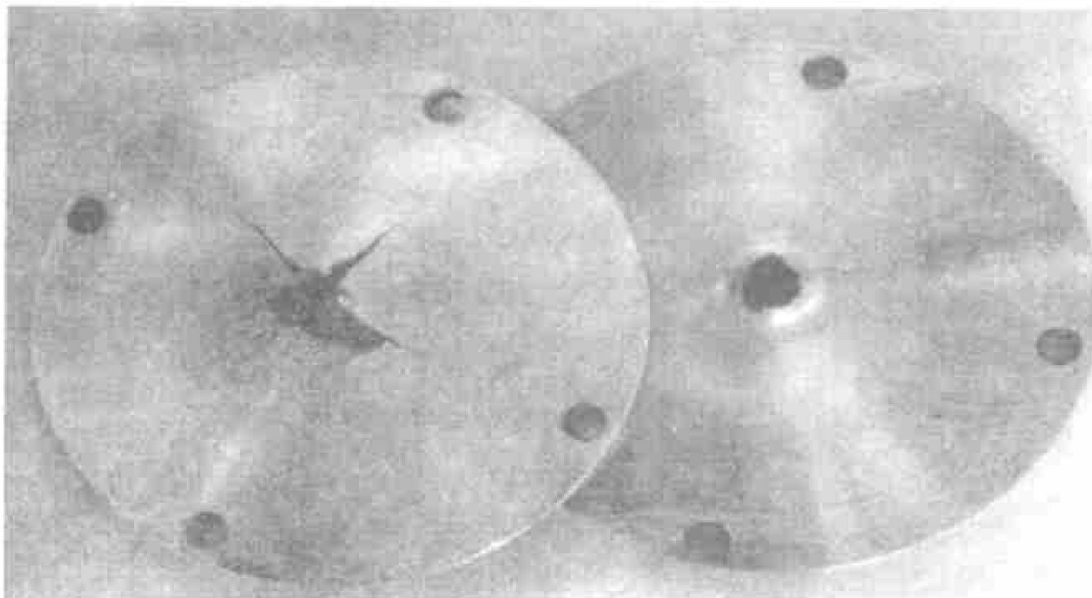


图 5 实验 1003 结果

Fig. 5 Result of test No. 1003

比90W略大,而且实验1003中93W棒的着靶速度也较大,因而侵彻动能也较大,使得93W受到了更强烈的作用,同时90W中粘结相的比例大于93W也是一个重要原因。把回收到的93W钨合金和90W钨合金棒沿轴线切开,制成金相试样后在扫描电镜下观察其微观结构。我们发现,93W棒的头部,钨颗粒变形十分剧烈,由原来的近似于球形变成了椭球形,且椭球的长轴方向基本上是与侵彻方向垂直的。而且,很多地方钨颗粒紧密相连,已分不出W-W界面,似乎融化在一起(见图6)。而90W棒的头部钨颗粒基本未变形,仅在头部的最底层有少量的变形颗粒(见图7)。这主要是由于对钨合金作用后,粘结相中首先发生塑性变形,并迅速硬化。而在开始时,钨颗粒几乎不变形,在一定的整体变形之后,钨颗粒才开始变形,并且在强烈作用下成为变形的形式。而粘结相的作用则随着变形的增大而减小。因此在实验1002和1003对薄靶侵彻的过程中,由于从靶板自由面返回的稀疏波的衰减作用,使得弹靶作用相对较弱,弹杆材料中整体变形较小。因此,变形仍主要由粘结相承担。由于90W中粘结相相对较多,所以由粘结相承担的塑性变形就高于粘结相相对较少的93W,从而钨颗粒“逃避”了变形。而93W中的颗粒的变形程度就会高于粘结相相对较多的90W。虽然图7中底部钨颗粒的变形较严重,但这仅是局部现象而已。

钨合金在侵彻过程中能否形成绝热剪切带是作者关心的重要问题,人们普遍认为钨合金是绝热剪切不敏感材料,许多研究者只观察到钨合金中存在形变型绝热剪切带,而没有看到由绝热产生相变而

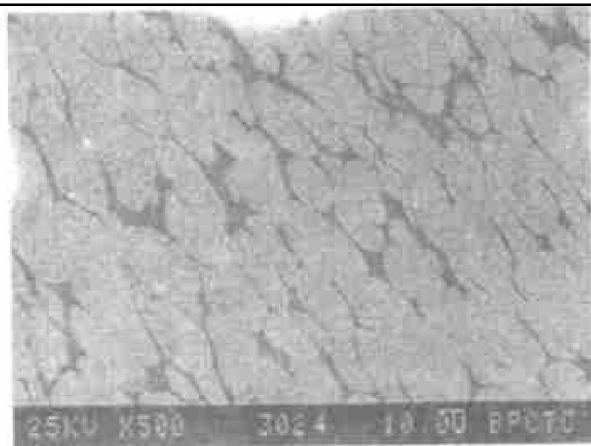


图 6 93W 头部晶粒变形

Fig. 6 Deformation of W grains in 93W

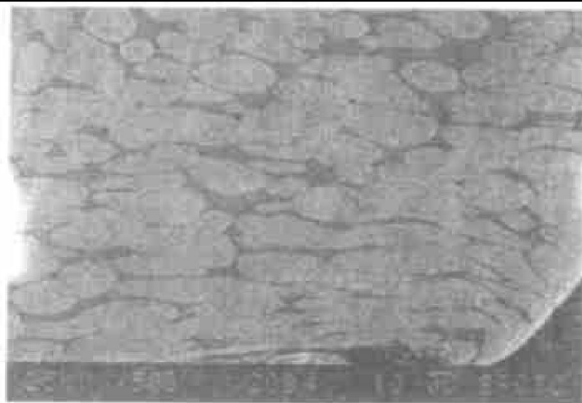


图 7 90W 头部晶粒变形

Fig. 7 Deformation of W grains in 90W

形成的转变型绝热剪切带^[6]。通过对绝热剪切带的金相观测以及对带中钨颗粒的显微硬度的测量,发现钨颗粒在高温下具有极好的塑性变形能力,并未发现钨颗粒的破坏,在带中仅发现显著变形后完整

存在的钨颗粒和熔融的粘结相^[7,8]。因此钨合金中的剪切带是以钨颗粒剧烈变形、软化与粘结相破坏为特征的方式进行的。

对于 93W 钨合金, 将图 8 中的 A 区放大后发现(见图 9), 在一条明显的带状区域(见图 9 中 B 区)中, 晶粒变形更剧烈, 且变形后晶粒的长轴方向与区域外晶粒略有不同, 与侵彻方向大约成 45° 角。作者认为这就是绝热剪切带发生的征候。在 90W 钨合金中, 由于晶粒变形很小, 没有观察到任何发生绝热剪切现象的可能。据 Couque 和 Eches^[9]报道, 他们曾经利用 Hopkinson 压杆加载, 用一根直径为 9 mm 长为 35 mm 的 91W-6Ni-3Co 的棒以 300 m/s 的速度去撞击同样的大小、材料的一根钨棒, 并在其中产生了绝热剪切带。他们认为在这样的材料中产生绝热剪切带的临界条件是压力要达到 2000 MPa 而局部塑性应变应达到 0.5, 并且局部熔化开始时的温度在 400~600 °C 之间。

从上述的观察可以看出, 粘结相的增多虽然使 90W 的韧性增强, 但也同时由于粘结相的增多, 使得其中的钨颗粒变形减小。因此, 在较低的压力下, 90W 中产生绝热剪切带的可能性要低于 93W。



图 8 93W 头部形状

Fig. 8 Form of end of 93W

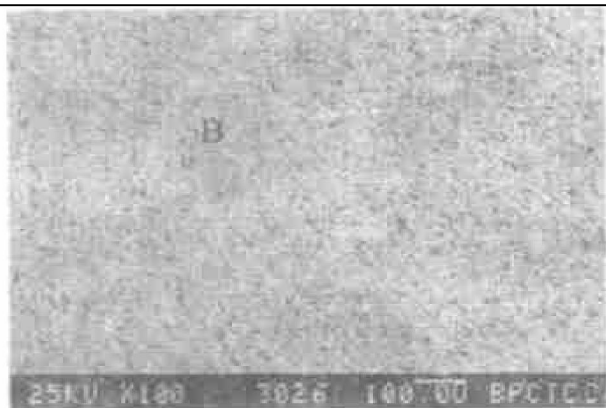


图 9 93W 绝热剪切现象征候

Fig. 9 Adiabatic shearing band in 93W

4 讨论

90W 与 93W 相比, 钨的质量分数下降了 3%, 从而其密度、硬度也有所下降, 韧性却相对提高, 但这样的变化并没有使 90W 的断裂机理有很大的不同。在侵彻时, 90W 头部形成的蘑菇头较 93W 小, 且其头部的硬度也较 93W 小。因此, 就侵彻能力而言, 在本研究这样的低速范围下, 两者相差并不是很大, 但其内部的微细观响应却因 90W 中的粘结相较多而有显著的不同。

由对钨合金绝热剪切现象的研究结果可知, 钨合金是一种绝热剪切不敏感材料, 要进一步研究它产生绝热剪切带的临界条件, 还要再做一些增大弹丸直径、长径比, 增强碰撞力度的实验, 而且若在侵彻前对钨合金材料做一些预处理, 比如预扭转, 也会使其在侵彻中更易于产生绝热剪切带, 从而提高侵彻能力。许沐华等^[10]在研究时发现: 经扭转的钨合金杆弹在侵彻过程中头部因受轴向阻力的作用而剧烈变形, 因此容易出现绝热剪切变形而导致剪切破坏。金相分析表明, 剪切带基本上沿最大剪应力方向发展, 因此弹头在侵彻过程中由于剪切破坏而不断有碎片沿最大剪应力方向从弹头剥离, 使杆弹头部保持 45° 的锥角, 从而出现所谓“自锐化”现象。同时预扭转引起的塑性变形主要集中在杆弹的外表面, 轴线附近晶粒变形很小, 弹头外表面材料容易脱离弹体并保持头部尖锐, 而芯部仍保持原有的强度和刚度, 使侵彻威力保持不变。因此, 扭转弹比未扭转弹的侵彻能力强。

[REFERENCES]

- [1] ZHU Xiao-chang(朱晓畅). The foreign development of DU penetrator and the study status of its material [A]. Penetration Technique Corpus [C]. Beijing: The Weapon Industry Publisher, 1995. 4- 9.
- [2] XION Ying-min(熊映明), ZHANG Bao-ping(张宝平), DING Jing(丁 敬). 一种双相合金材料的本构框架 [J]. Acta Armamentarii (兵工学报), 1996, 1(2): 143 - 148.
- [3] ZHANG Chang-suo(张昌锁). 冲击载荷作用下 90% 钨合金损伤断裂研究 [D]. Beijing Institute of Technology, 1999.
- [4] ZHANG Bao-ping(张宝平), YANG Chao(杨 超), XIONG Ying-ming(熊映明), et al. Responsive behavior of 93wt. % tungsten alloy under the intense shock loading

- [A]. Proc IUTAM Symposium on Impact Dynamics (国际冲击动力学学术会议论文集) [C]. Beijing: Pecking University Press, 1993. 283– 297.
- [5] ZHAO Guo-zhi(赵国志). Mechanics of Penetration Engineering(穿甲工程力学) [M]. Beijing: The Weapon Industry Publisher, 1992.
- [6] LI Shi-jun(李世君), LI Xiao-hua(黎晓华), BAI Yu-ing(白玉英), et al. The Study of adiabatic shear phenomenon tungsten penetrator fragment [A]. The 4th Conference on Dynamic Behavior of Weapon Materials [C]. 1995.
- [7] WEI Zhi-gang(魏志刚). 扭转长杆弹的穿甲侵彻及机理研究[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1995.
- [8] Yadav S, Ramesh K T. The mechanical properties of tungsten-based composites at very high rates [J]. Materials Science and Engineering, 1995, A203: 140– 153.
- [9] Couque H, Eches N. Conditions for shear band formation in tungsten alloys [J]. J PHYS IV FRANCE7, 1997: 403– 408.
- [10] XU Mu-hua(许沐华), ZHANG Gang-ming(张刚明), WANG Xiao-jun(王肖军), et al. 钨合金杆弹侵彻实验和机理研究[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(Suppl.): 427– 430.

Micro-behavior of 90W, 93W tungsten alloy under impact dynamics

JIAO Tong, ZHANG Bao-ping, ZHANG Hai-tao, LIU Chang-lin

(College of Electromechanical Engineering, Beijing Institute of Technology,
Beijing 100081, P. R. China)

[Abstract] The difference of micro-behavior between 90W and 93W tungsten alloy under impact dynamics was analysed. Their fracture feature is alike. But when penetrating, because of more matrixes in 90W, the end of penetrator of 90W is smaller and its shape changing of W grains is also smaller. So, only in 93W, the adiabatic shearing bands can be found.

[Key words] tungsten-alloy; dynamic fracture; penetration; adiabatic shearing

(编辑 何学锋)