

# 钨合金高速侵彻低碳钢板失效行为实验研究

徐豫新<sup>1</sup>, 韩旭光<sup>1</sup>, 赵晓旭<sup>1,2</sup>, 王树山<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

(2. 首都师范大学, 北京 100048)

**摘要:** 研究了钨合金破片对低碳钢板高速侵彻过程中的失效行为及诱发机制。通过弹道枪实验获得 93W、95W 2 种球形钨合金破片以大于 1500 m/s 的速度对 Q235A 钢板侵彻后的物理形态, 对侵彻后受损破片进行了扫描电镜 (SEM) 观察与分析。结果表明: 对于 Q235A 钢板, 钨合金破片以大于 1500 m/s 的速度侵彻后, 93W 钨颗粒是韧窝型穿晶断裂, 而 95W 钨颗粒是准解理型穿晶断裂; 93W、95W 合金破片局部均会发生熔化, 50 μm 钨颗粒熔化冷凝后生成 10 μm 以下的微米、亚微米尺度球形颗粒紧密排列, 宏观上表现为破裂碎块的整体侵彻。

**关键词:** 钨合金; 侵彻; 高速; 失效行为

中图分类号: TG146.4<sup>+</sup>11

文献标识符: A

文章编号: 1002-185X(2016)01-0122-05

W-Ni-Fe 钨合金由于密度大、硬度高, 已逐渐成为杀爆弹配用预制破片的主要材料。破片因炸药爆炸驱动, 速度高于常规杆式穿甲弹, 此外再与弹体的速度相叠加具有 2000 m/s 以上的初速, 在飞抵目标时速度虽有所衰减, 但也常大于 1500 m/s; 因此, 钨合金材料以 1500 m/s 以上速度冲击装甲等目标时的失效行为及关联机制的揭示可支撑破片威力的优化设计, 具有重要的应用价值。

20 世纪 90 年代, 美国陆军科学研究中心 (army research laboratory, ARL) 的 L. S. Magness<sup>[1]</sup> 等的研究工作表明: 钨合金与贫铀合金穿甲弹侵彻能力的差别是由于侵彻过程中两种合金失效行为的不同所引起。自此, 钨合金弹体在侵彻过程中的失效行为及机制的研究开始成为热点。Subramanian<sup>[2,3]</sup> 进行了直径 0.76 mm 长/径比 20 的纯钨 (19.3 g/cm<sup>3</sup>) 杆以大于 1500 m/s 的速度对 6061-T651 厚铝板和陶瓷的冲击实验, 通过脉冲 X 射线测试获得了钨杆冲击速度与侵彻速度、消耗速度之间的线性关系; L. Westerling<sup>[4]</sup> 采用相同的方法获得了 93W 合金长杆以 1400~2600 m/s 速度冲击碳化硼时, 冲击速度与侵彻速度之间的线性关系; 上述研究均表明大长/径比钨合金杆在高速冲击低密度材料时可看作不可压缩流体侵彻。此外, Rick L. Martineau<sup>[5]</sup> 通过实验研究了钨含量为 94% 的合金球体对高强度 HSLA-100 合金钢的侵彻, 发现随着冲击速

度的增加, 侵彻深度并不是线性增加, 同时分析了靶体内的残余应力。U. Ravi Kiran<sup>[6]</sup> 通过夏比钟摆冲击试验研究了 5.24 m/s 冲击速度下锻造钨合金材料内微结构与构件整体断裂行为的关系。

国内, 午新民<sup>[7]</sup> 针对 2~4 g 的 93W 合金破片对高硬度装甲钢的常规弹速<sup>[8]</sup> (500~1300 m/s) 侵彻失效机制进行了实验研究, 发现 93W 合金在动态剪切和挤压条件下的破坏 (工程) 应变约在 150%~200% 之间, 且为韧性断裂, 初始状态存在缺陷处易于发生解理型脆性断裂; 杨超<sup>[9]</sup> 针对 93W 合金穿甲弹以 1400 m/s 速度对高硬度装甲钢靶的侵彻行为进行了实验研究, 发现 93W 合金弹体内部分区域的粘结相和钨颗粒发生了熔化, 并认为钨合金内的温升是由于高应变率剪切引起的; 王迎春<sup>[10]</sup> 采用 Hopkinson 压杆对钨合金 (10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>) 动态剪切实验发现高应变率时钨合金断口为钨颗粒的劈裂和粘结相的撕裂。兰彬<sup>[11]</sup>、董平<sup>[12]</sup> 采用有限元仿真软件 Ls-Dyna 分别研究了大长/径比钨杆对半无限铝靶的超高速 (>3000 m/s) 流体侵彻动力学行为和钨合金性能对其弹速侵彻的影响规律。李学林<sup>[13]</sup>、汪庆桃<sup>[14]</sup> 分别通过实验研究了球形钨合金对中厚铝板和钢板的侵彻特性。

综上所述, 国外研究多针对大长/径比钨杆侵彻过程中的速度相关性以及低速冲击下钨合金材料的断裂行为进行, 国内研究多针对常规弹速<sup>[8]</sup> (500~1300 m/s)

收稿日期: 2015-01-24

基金项目: 国防预先研究基金 (00404020304)

作者简介: 徐豫新, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081, 电话: 010-68914557, E-mail: 10802100@bit.edu.cn

和超高速<sup>[8]</sup>(>3000 m/s)研究钨合金侵彻性能及与力学量的关联机制;同时,通过Hopkinson杆实验测试研究了不同应变率条件下钨合金的失效机制。钨合金破片撞击目标时多在1500 m/s以上范畴,此时钨合金在强动载作用下绝热温升而断裂、破碎,其失效行为势必与高温、高压和高应变率共同相关;此外,钨合金材料失效行为也与微观组织的损伤演化有着密切的关联。目前,关于大于1500 m/s撞击速度条件下小长/径比钨合金破片侵彻失效行为与微观组织损伤演化的相关性还未有系统的研究,而这些研究可为制备侵彻性能优异的钨合金材料提供理论支撑。

本工作主要通过实验研究1500 m/s以上冲击速度下,常用预制破片材料93W和95W对典型威力考核靶Q235A钢板的侵彻性能、宏观失效行为和微观组织损伤,分析高弹速侵彻下小质量球形钨合金破片的失效机制,为高侵彻性能钨合金材料的制备和钨合金破片极限侵彻能力的研究提供支撑。

## 1 实验

实验材料为W-Ni-Fe系合金,钨的质量分数分别为93%,95%,其成分及力学性能列于表1中。由表1可见,95W合金材料中粘结相含量(5.4%)低于93W合金(7.2%)达25%,合金韧性理论上应低于93W。

实验用钨合金破片直径为6 mm,93W和95W破片实测质量均值分别为2.008 g(方差:0.003)和2.049 g(方差:0.0045),用12.7 mm滑膛弹道枪加载对16 mm厚Q235A钢板进行垂直侵彻,通过钢板前的测速靶获取钨合金破片的冲击速度,实验布置如图1所示。

## 2 结果和分析

对93W和95W合金破片各进行实验5发,在1800 m/s以下速度2个破片均无法贯穿16 mm厚Q235A。部分破片侵彻嵌入钢板内,典型形貌如图2所示。将从钢板弹孔内回收的侵彻后破片残体进行扫描电镜(SEM)观察,结果示于图3中。

对图2,3中回收钨合金形貌和SEM表面观察结果进行分析如下:

(1) 93W合金破片在以大于1500 m/s速度冲击Q235A钢板后,均呈现灰黑色,如图3a1、b1所示;

以大于1790 m/s速度冲击Q235A钢板后,可观察到明显的熔化再冷凝迹象,如图3b2所示。此外,依据SEM分析可见:弹靶界面产生高温、高压致使破片材料熔化,并生成大量远远小于初始状态(50 μm左右)钨颗粒的(10 μm以下)微米、亚微米尺度球形颗粒紧密排列,如图3a3所示;因此,可知以1790 m/s以上速度侵彻低碳钢板过程中,钨颗粒韧窝型穿晶断裂形貌特征显现,宏观上表现为破片的韧性断裂。

(2) 95W合金破片侵彻钢板后残存破片背面周边均呈现一平整的光滑薄层。当冲击速度达1500 m/s以上时,中间大部分呈蓝黑色多孔形貌(图3c1);当冲击速度达1600 m/s以上时,中间部分几乎均为青蓝色多孔形貌(图3d1),虽不同于93W的灰黑色形貌特征,但熔化再冷凝特征也十分明显。根据SEM分析可见:钨颗粒的穿晶断裂表现为劈裂特征,如图3d3所示,即钨颗粒穿晶断裂面平整,断裂晶粒排列类似河流花样,与王迎春<sup>[10]</sup>基于Hopkinson压杆的钨合金动态剪切断口小刻面形貌一致,但本工作所观察到的小刻面为亚微米尺度(图3d3),要小于王迎春观察到(50 μm左右)的刻面尺寸及钨颗粒初始状态尺寸。此外,破片残体背面裂缝处,发现大面积熔融薄层下方分布着若干微米、亚微米尺度球形和拉长形颗粒,远远小于初始状态的钨颗粒,如图4所示。

E. H. Lee, S. J. Tupper<sup>[15]</sup>认为,弹高速冲击靶时,弹靶界面后形成一激波驻波,在激波后方压力很高,材料急剧变热升温是引起材料熔化的根本原因;U. Gerlach<sup>[16]</sup>通过研究发现,钨合金在高速冲击产生高压情况下,与靶接触区域的熔点可由正常的3400 °C降低到1650 °C。丛美华<sup>[17]</sup>的实验表明,钨合金弹体以1200 m/s的速度侵彻45#钢靶体后,发现弹体表面有熔化再凝形成的亚微米球状颗粒,但认为该现象只有93W合金才能出现。杨超<sup>[9]</sup>的实验表明,钨合金穿甲弹以1400 m/s的速度冲击侵彻钢板过程中,弹体内局部温度高达1500 °C,部分钨颗粒出现了熔化,推测该现象不是由冲击压缩引起的,而是由高应变率剪切变形引起的;针对高应变率剪切,王迎春<sup>[10]</sup>通过Hopkinson杆实验观察到了断裂试件断口处的钨颗粒劈裂现象,并未提及钨颗粒的熔化现象。

表1 实验用钨合金成分和力学性能

Table 1 Composition and mechanical property of tungsten alloys in the experiment

Material	Chemical composition/%				Density/ g cm <sup>-3</sup>	Elongation/ %	Hardness		Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa
	W	Ni	Fe	Others			HRC	HV10/GPa		
93W	92.8	4.2	2.6	0.4	17.6±0.15	18~26	29	2.70~3.40	600~800	910~1000
95W	94.6	3.4	1.6	0.4	18.1±0.15	14~24	30	2.75~3.50	600~800	900~1000

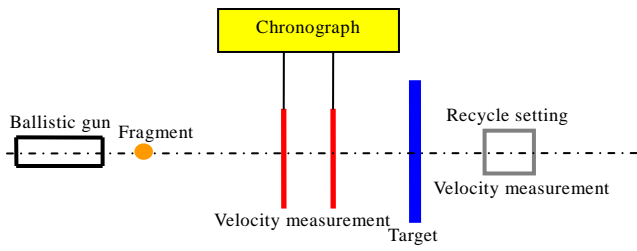


图 1 实验布置示意图

Fig.1 Sketch of the experimental set-up

凝速度阈值可能低于 93W；但高应变率对钨合金的断裂模式具有影响。

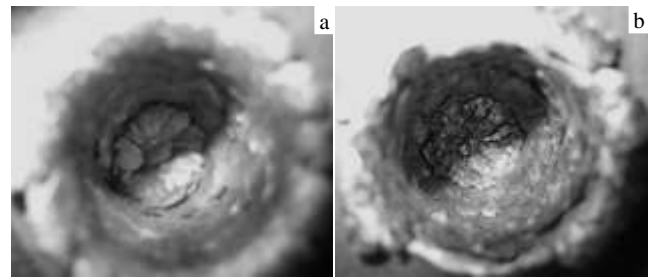


图 2 嵌入靶孔内破损破片的特征

Fig.2 Characteristic of damage fragment in penetrated hole:

(a) fragment of 93W (impact velocity of 1531 m/s) and (b) fragment of 95W (impact velocity of 1815 m/s)

根据上述文献结合本实验工作表明：仅仅高应变率剪切存在无法引起钨颗粒的熔化，钨合金的冲击熔化行为应为高压和冲击产生高温共同耦合造成，95W 合金在高速侵彻下同样会发生熔化再凝现象，熔化再

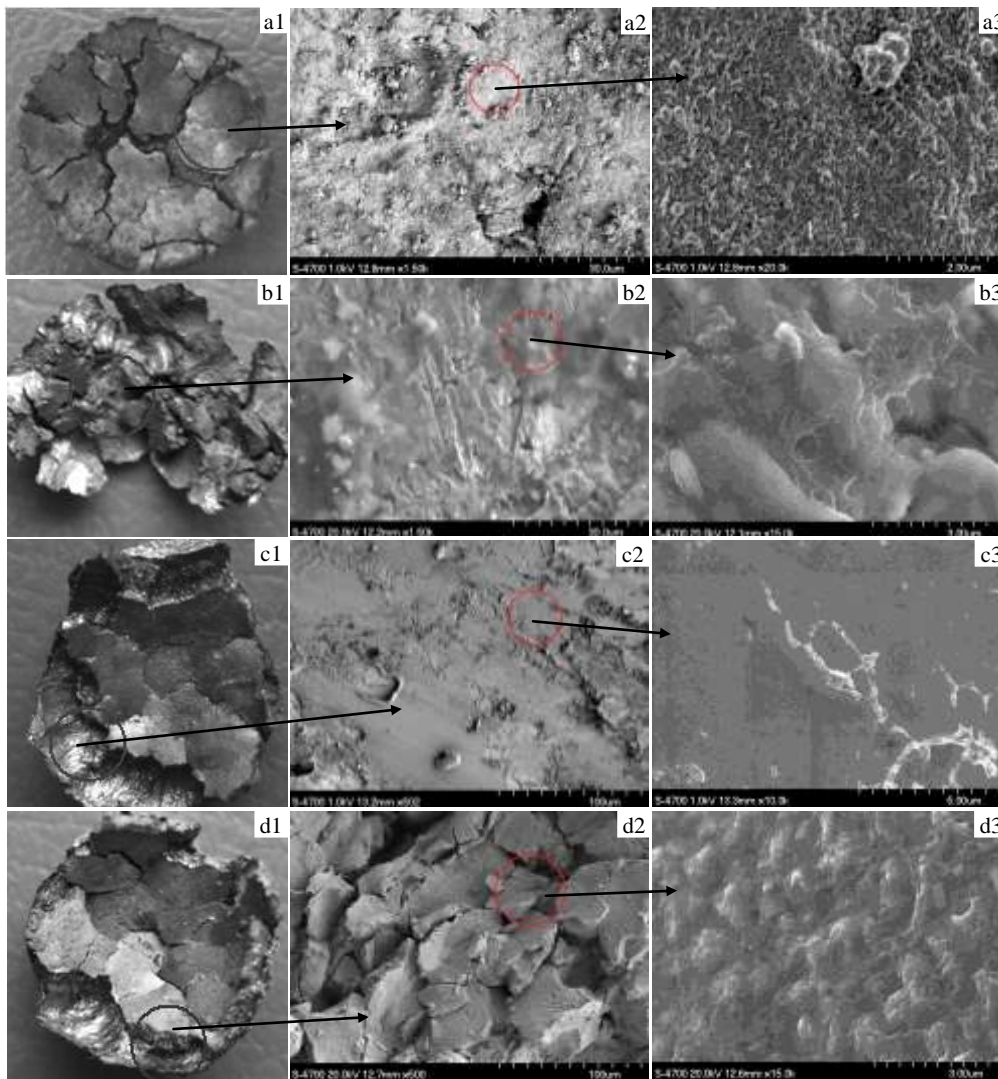


图 3 回收侵彻后的破片残体的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of remaining fragment after penetrating: (a) tungsten alloy of 93W (penetrating velocity of 1534.33 m/s), (b) tungsten alloy of 93W (penetrating velocity of 1790.27 m/s), (c) tungsten alloy of 95W (penetrating velocity of 1502.85 m/s), and (d) tungsten alloy of 95W (penetrating velocity of 1607.97 m/s)

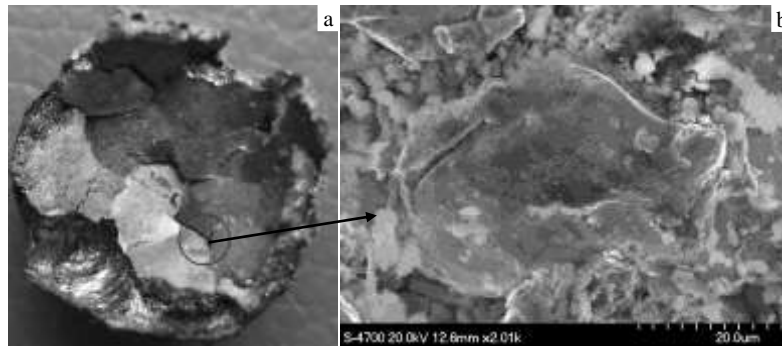


图 4 95W 破片残存体背面裂缝处的 SEM 照片

Fig.4 SEM images of back crack in remaining 95W fragment (penetrating velocity: 1607.97 m/s): (a) observation position and (b) result of observation

### 3 结 论

1) 冲击速度达到 1500 m/s 以上时, 93W、95W 2 种合金破片均发生了熔化, 熔化冷凝后生成微米、亚微米尺度球形颗粒紧密排列。熔化现象的出现应为高压、高温共同耦合作用结果。

2) 冲击速度达到 1500 m/s 以上时, 95W 合金破片内的钨颗粒为准解理型穿晶断裂, 而 93W 合金破片内的钨颗粒为韧窝型穿晶断裂。

3) 93W、95W 2 种合金破片对钢板的高速冲击侵彻中虽发生了破裂, 但因侵彻过程发生熔化仍表现为一个整体的侵彻。

#### 参考文献 References

- [1] Magness L S. *Proceedings of the Third International Conference on Tungsten and Refractory Metals*[C]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1995: 133
- [2] Subramanian R, Bless S J. *International Journal of Impact Engineering*[J], 1995, 17(1-3): 807
- [3] Subramanian R, Bless S J, Cazamiaz J *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 1995, 17(1-3): 817
- [4] Westerling L, Lundberg P, Lundberg B. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2001, 25(7): 703
- [5] Martineau Rick L, Prime Michael B, Duffey Thomas. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2004, 30(5): 505
- [6] Kiran U Ravi, Panchal A, Sankaranarayana M *et al.* *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2013, 37(2): 1
- [7] Wu Xinmin(午新民). *Research on Penetration Theory and Experiment of Tungsten Alloy Spherical Fragment Against Finite Thickness Target*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999: 28
- [8] Qian Weichang(钱伟长). *Perforation Mechanics(穿甲力学)*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 6
- [9] Yang Chao(杨超), Zhang Baoping(张宝平), Li Canbo(李灿波) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering(兵器材料科学与工程)*[J], 2003, 26(1): 29
- [10] Wang Yingchun(王迎春), Wang Fuchi(王富耻), Li Shukui(李树奎). *Rare Metal Material and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2006, 35(7): 1132
- [11] Lan Bin(兰彬), Wen Heming(文鹤鸣). *Chinese Journal of High Pressure Physics(高压物理学报)*[J], 2008, 22(3): 245
- [12] Dong Ping(董平), Liu Tingting(刘婷婷), Zhang Pengcheng(张鹏程) *et al.* *Rare Metal Material and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2011, 40(10): 1748
- [13] Li Xuelin(李学林), Xiang Xin(项鑫), Huang Guangyan(黄广炎) *et al.* *Acta Armamentarii(兵工学报)*[J], 2010, 31(S2): 51
- [14] Wang Qingtao(汪庆桃), Zhang Qingming(张庆明), Zhai Zhe(翟喆) *et al.* *Journal of Vibration and Shock(振动与冲击)*[J], 2013, 32(23): 121
- [15] Lee E H, Tupper S J. *Journal of Applied Mechanics*[J], 1954, 21: 63
- [16] Gerlach U. *Metallurgical Transaction*[J], 1986, 17(3): 435
- [17] Cong Meihua(丛美华), Huang Dewu(黄德武), Duan Zhanqiang(段占强) *et al.* *Journal of Beijing Institute of Technology(北京理工大学学报)*[J], 2002, 22(5): 594

## Experimentation Research on Failure Behavior of Tungsten Alloy Penetrating Low Carbon Steel Plate at High Velocity

Xu Yuxin<sup>1</sup>, Han Xuguang<sup>1</sup>, Zhao Xiaoxu<sup>1,2</sup>, Wang Shushan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The failure behavior and inducement mechanism of tungsten alloy fragments penetrating low carbon steel plate at high velocities were investigated. The physical forms of 93W and 95W fragments after penetrating the low-carbon steel target at the velocities higher than 1500 m/s were obtained by ballistic gun experiments. Scanning electron microscope (SEM) was used to analyze damaged tungsten alloy fragments after the penetration. The result shows that for low-carbon steel plate, when the penetration velocity of the tungsten alloy fragment is higher than 1500 m/s, 93W tungsten particle is dimple-type transgranular fracture, while 95W tungsten particle is quasi-cleavage transgranular fracture. Both 93W and 95W fragments melt partially, and the 50  $\mu\text{m}$  tungsten particles melt and condense as less than 10  $\mu\text{m}$  spherical particles and arrange tightly. The macro phenomenon is the penetration of the whole damaged particles.

**Key word:** tungsten alloy; penetration; high velocity; failure behavior

---

Corresponding author: Xu Yuxin, Ph. D., Lecturer, State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68914557, E-mail: 10802100@bit.edu.cn