

两种状态钨合金球力学性能 及损伤模式对比试验研究^{*}

孔庆强, 周 涛, 沈 飞

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用静态与动态加载试验的方法, 研究了同一牌号、相同尺寸的烧结态与精磨态两种状态的钨合金球的力学性能。同时通过电镜扫描的手段, 观察了两种状态的钨合金球试验前表面与内部金相结构及静态试验后表面的损伤模式, 并分析了两种状态钨合金球产生力学性能差异的原因。研究表明: 烧结态钨合金球表面因其钨颗粒与黏结相分布均匀, 静态条件下其极限压溃载荷是精磨态钨合金球的 2.02 倍, 动态条件下其性能也明显优于精磨态钨合金球。

关键词: 钨合金球; 力学性能; 损伤模式; 扫描电镜

中图分类号: O389

文献标识码: A

钨合金因具有耐高温、穿甲能力强、密度高、储能性好等材料特性^[1-2], 使其在武器系统中作为杀伤破片而被大量使用, 又因球形结构具有飞行阻力衰减系数小的特点, 使钨合金球型破片的应用最为广泛^[3]。目前国军标上对钨合金球的供货状态要求有烧结态与精磨态两种^[4], 精磨态钨合金球是将烧结态钨合金球再经过研磨工序后获得。烧结态钨合金球较精磨态钨合金球在生产制造上具有工艺简单、制造成本低等优点, 但因其尺寸与质量较难控制, 故在武器系统中的使用没有精磨态钨合金球广泛, 同时国内、外对钨合金球力学性能的相关研究也主要是以精磨态钨合金球为研究对象^[5-6]。本研究以烧结态与精磨态钨合金球为研究对象, 通过静态与动态加载试验, 对比两种状态的钨合金球的力学性能及损伤模式的差异, 并对其原因进行分析。

1 试验研究

1.1 试样材料

选用某钨合金制造厂家所生产的同一批次直径为 7 mm、牌号为 W252(化学成分如表 1 所示)的烧结态与精磨态钨合金球为试验研究对象。

由于制造工艺限制, 烧结态钨合金球较精磨态钨合金球在外表上多了一道宽度约为 2 mm 的凸起环带(如图 1 所示)。

为降低环带对试验结果的影响, 试验前挑选尺寸相近的两种状态的钨合金球各 6 枚(如表 2 所示), 其中 No. 1、No. 2、No. 3 用于静态加载试验, No. 4、No. 5、No. 6 用于动态加载试验。

表 1 钨合金球化学成分
Table 1 Chemical composition
of tested tungsten alloy spheres (%)

Ni	Fe	Co	W
4.3	2.2	0.4	93.1

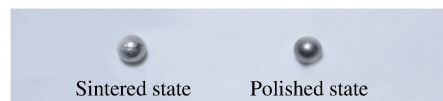


图 1 两种状态钨合金球外形结构

Fig. 1 Two structural states of tungsten alloy spheres

^{*} 收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2017-12-21

作者简介: 孔庆强(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事战斗部结构设计及加工工艺研究. E-mail: colinkqq@163.com

通信作者: 周 涛(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事战斗部设计研究. E-mail: 33222800@163.com

表 2 参试钨合金球外径尺寸
Table 2 Diameter of tested tungsten alloy spheres

State	Diameter/mm					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
Sintered	7.00-7.09	7.01-7.04	7.00-7.08	7.02-7.10	7.01-7.04	7.03-7.09
Polished	7.00-7.02	7.00-7.01	7.00-7.01	7.00-7.01	7.00-7.02	7.00-7.01

1.1.1 静态加载试验方法

静态加载试验使用国产 WDW-300E 微机控制电子万能试验机进行。将两种状态的钨合金球(共 6 枚)依次放置在试验机上并以 5 mm/min 压缩速度缓慢施加压力,待试验钨合金球压溃时记录其极限压溃载荷及变形量^[7]。

1.1.2 动态加载试验方法

动态加载试验利用 $\varnothing 40\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的 JH-14C 炸药对单枚钨合金球进行爆轰加载,使其高速撞击 4 mm 厚 Q235 钢板,其中钨合金球距钢板距离为 250 mm,在钢板的上方布设两层测速靶(两层测速靶之间距离为 50 mm),用以测量钨合金球的触靶速度^[7-8],在钢板的下方布设回收用的多层橡胶板,用以回收穿透钢板的钨合金球。试验后对钨合金球进行回收,观察其变形及破碎情况。试验方法示意图及现场布局如图 2 所示。

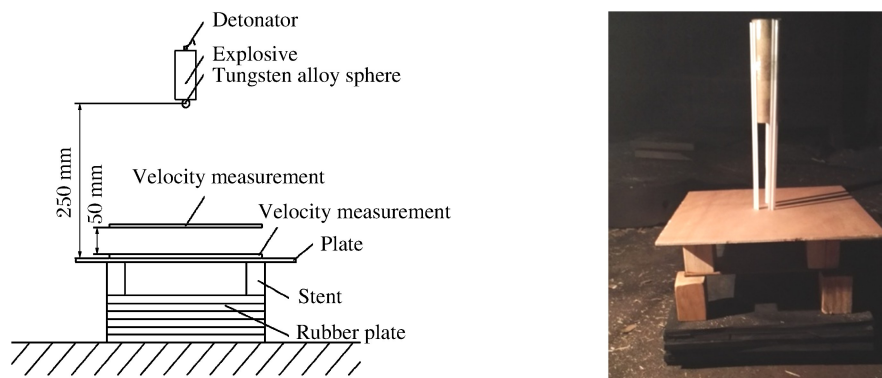


图 2 动态加载试验示意图及现场布局图

Fig. 2 Illustration of dynamic loading test

1.2 电镜观察

使用美国 FEI 公司生产的 QUANTA600F 电镜对两种状态的钨合金球试验前及试验后的表面进行微观组织观察。

2 试验结果

2.1 静态加载试验结果

静态加载试验后,两种状态的钨合金球表面均出现肉眼可见的裂纹,如图 3 所示,试验结果见表 3。通过试验结果可以得到烧结态钨合金球的极限压溃载荷是精磨态钨合金球压溃载荷的 2.02 倍。

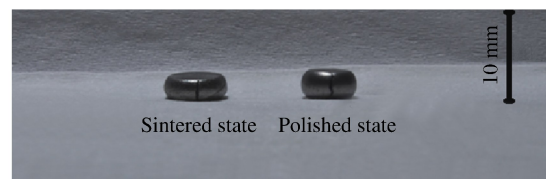


图 3 静态加载试验结果

Fig. 3 Quasi-static loading test results

表 3 静态加载试验结果
Table 3 Results of quasi-static test

State	No. 1		No. 2		No. 3	
	Crushing load/kN	Deformation/%	Crushing load/kN	Deformation/%	Crushing load/kN	Deformation/%
Sintered	157	66.54	163	67.01	155	65.86
Polished	77	50.39	85	51.05	73	51

2.2 动态加载试验结果

爆轰加载试验钨合金球终点速度如表 4 所示,试验后的钨合金球均镶嵌在钢板上,未能穿过钢板,结果如图 4 所示。

表 4 动态加载试验钨合金球触靶速度
Table 4 Terminal velocity of tungsten alloy spheres

State	Terminal velocity/(m · s ⁻¹)		
	No. 4	No. 5	No. 6
Sintered	468	492	446
Polished	430	447	506

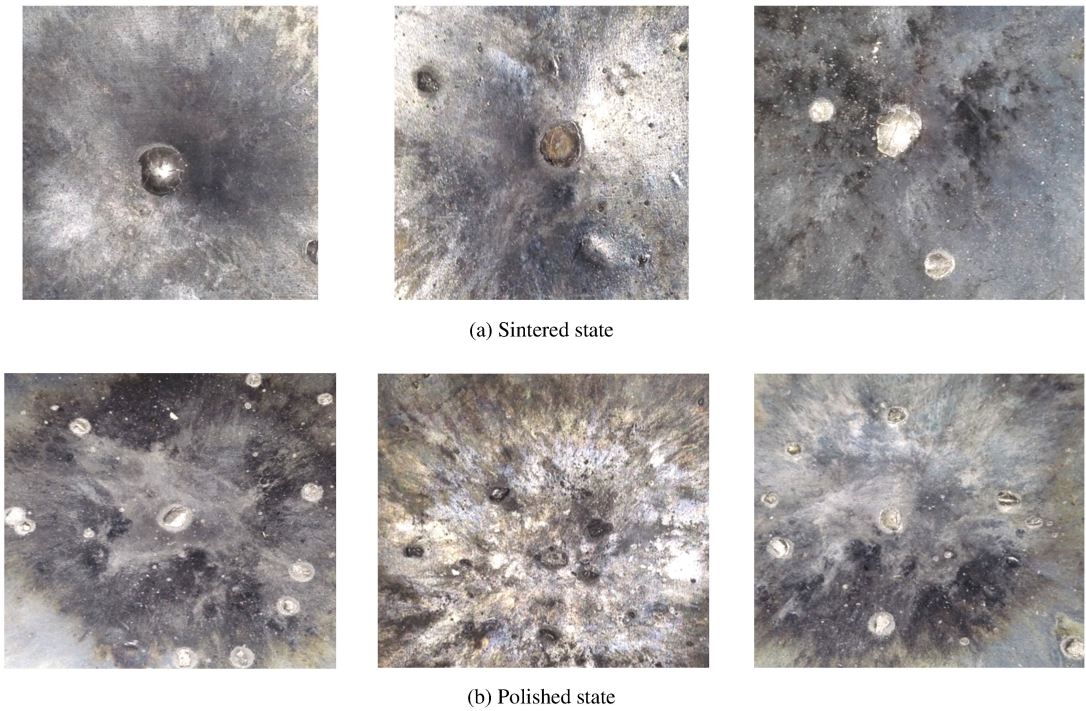


图 4 动态加载试验结果
Fig. 4 Dynamic loading test results

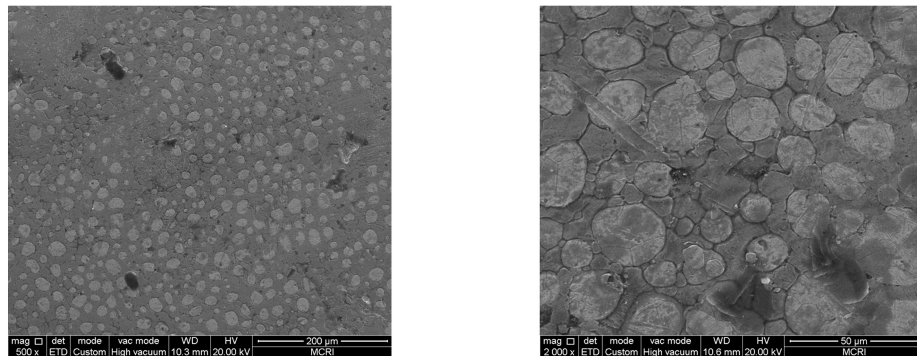
试验后能够非常直观地看到,烧结态钨合金试验后表面有裂纹,或发生局部破碎,但其主体仍然完整;精磨态钨合金球在撞击钢板时发生破碎、解体,最终以碎片的状态镶嵌在钢板上。

通过对比试验结果发现,烧结态钨合金球在经过炸药爆轰与侵彻钢板加载后较精磨态钨合金球完整,可以较为直观地判断烧结态钨合金球动态性能要高于精磨态钨合金球。

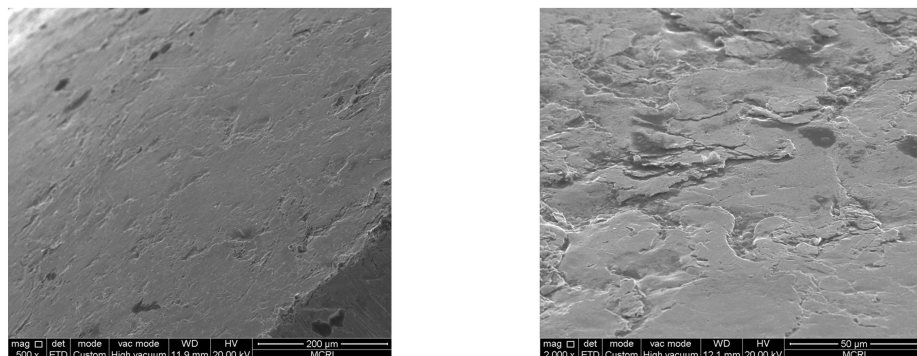
2.3 电镜结果

通过对两种状态的钨合金球表面(图 5)及内部的电镜扫描结果(图 6)可以观察到,烧结态钨合金球表面的钨元素以颗粒的形态被镍-铁元素形成的黏结相包裹,钨颗粒之间通过黏结相连接,精磨态钨合

金球表面均为钨元素,且钨元素以鳞片状态或相互挤压态覆盖在球体的表面,未看到镍-铁元素形成的黏结相^[9-10];而两种状态钨合金球的内部结构相同,均为镍-铁元素形成的黏结相包裹着钨颗粒。



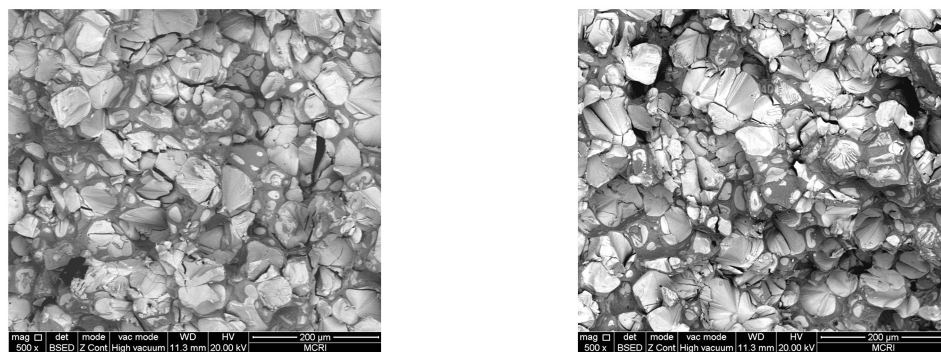
(a) Surface of sintered state tungsten alloy sphere



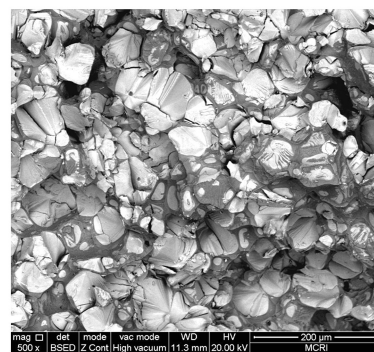
(b) Surface of polished state tungsten alloy sphere

图5 钨合金球表面电镜结果

Fig. 5 Result of SEM on surface of tungsten alloy sphere



(a) Sintered state



(b) Polished state

图6 钨合金球内部电镜结果

Fig. 6 Result of SEM internal of tungsten alloy sphere

由于动态加载试验后两种状态的钨合金球均镶嵌在钢板上,并已经和钢板材料融合,无法观察到微观的破坏形态,因此只对静态试验后的两种状态的钨合金球的破坏处进行电镜扫描,其结果如图7所示。

观察静态加载试验后两种状态的钨合金球的裂纹的电镜结果,可以看到,烧结态钨合金球断裂形式主要为钨颗粒的解理与黏结相撕裂,而精磨态钨合金球断裂形式主要表现为钨-钨界面的开裂,且表层的钨-钨界面层厚度约为10 μm。

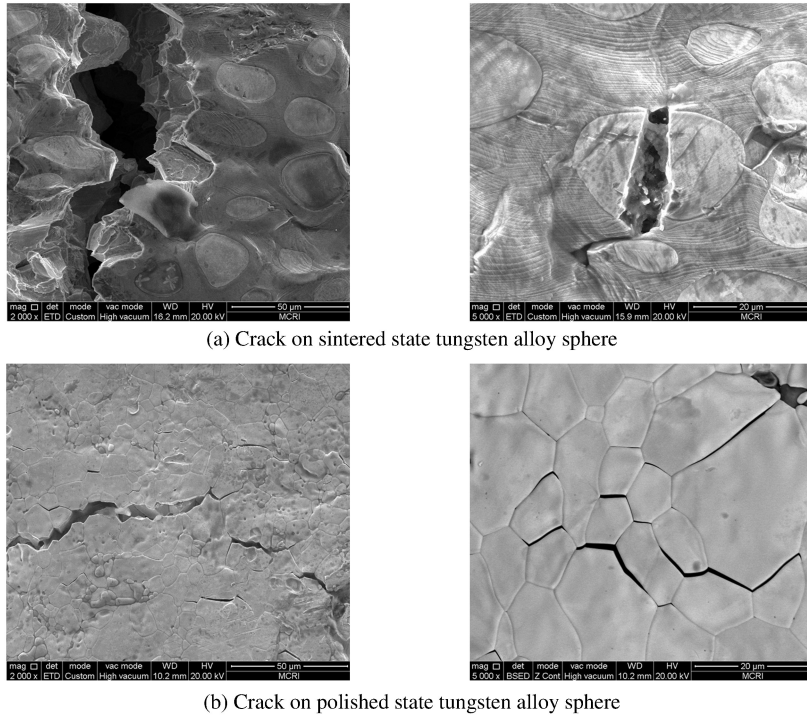


图 7 静态试验后钨合金球表面裂纹电镜结果

Fig. 7 Result of SEM on surface crack of tungsten alloy spheres after quasi-static loading test

3 结果分析

通过电镜扫描结果可以看出,试验前两种状态钨合金球内部的金相结构是相同的,表面金相结构不同,因此可以判定是因表面金相结构的不同,造成了两种状态钨合金球力学性能的差异。目前已知的钨合金的断裂有 4 种形式:钨颗粒的解理、黏结相撕裂、黏结相与钨颗粒的界面剥离及钨-钨界面的开裂^[11]。以往的研究发现,由于钨-钨的结合强度很低,以至往往形成假结合,一旦钨颗粒之间直接接触而形成钨-钨界面,则该界面在变形中常成为裂纹源。German 提出了“钨晶粒连接度”的概念^[12],定义为

$$c_w = \frac{s_{w-w}}{s_w} \quad (1)$$

式中: c_w 为钨晶粒连接度, s_w 为单位体积钨颗粒表面积, s_{w-w} 为同一体积内钨-钨接触面积。研究表明, c_w 越大,该钨合金的抗拉强度与延伸率越低^[12-13]。将两种状态钨合金球表面的电镜扫描结果代入(1)式可以求得,烧结态钨合金球表面因镍-铁元素形成的黏结相包裹着的钨颗粒,所以其 c_w 值不大于 0.2,而精磨态钨合金球表面几乎全部为钨颗粒相互挤压、接触形成的钨-钨界面,故其 c_w 值近似为 1。由此可以证明,因精磨态钨合金球表面力学强度低,在受到载荷作用时,其表面容易提前产生裂纹源,当载荷持续作用时,表面裂纹源会向钨合金球内部扩展,从而造成整个钨合金球的破坏。从理论上说明了为什么烧结态钨合金球的力学性能优于精磨态钨合金球。

图 8 为精磨态钨合金球的精磨过程示意图,其过程为其表面受到挤压与磨削的过程,钨颗粒受到挤压后,向周围变形扩展,把镍-铁元素形成的黏结相向表面及内部挤压,由于钨颗粒的硬度大于黏结相的硬度,因此经过磨

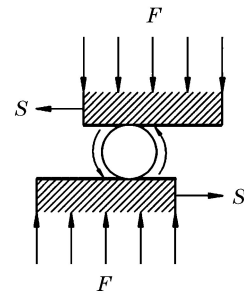


图 8 钨合金球精磨加工示意图

Fig. 8 Schematic diagram of lapping process on tungsten alloy sphere

削后,钨颗粒破碎且之间相互挤压、覆盖,而黏结相则被磨削消失,导致其表面的钨颗粒与黏结相分布不均匀,最终在其表面形成了一个厚度约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 钨-钨界面层,此界面层使精磨态钨合金球表面强度降低,在受到载荷作用时容易开裂形成裂纹源,从而降低了其力学性能。

4 结 论

牌号为 W252、直径为 7 mm 的烧结态钨合金球表面钨颗粒与黏结相分布均匀,而精磨态钨合金球因其受到挤压与研磨的作用,其表面的钨颗粒被挤压变形、黏结相减少,形成了一层钨-钨界面层。这就使烧结态钨合金球在静态条件下其极限压溃载荷是精磨态钨合金球的 2.02 倍,动态条件烧结态钨合金球的力学性能也要优于精磨态钨合金球。在武器系统中使用烧结态钨合金球作为杀伤破片能够增强侵彻能力,从而提高对目标的毁伤效果,同时可以节省加工成本与时间。

参考文献:

- [1] 王松,陈宏燕,胡洁琼. 高比重钨合金的现状研究 [J]. 贵金属,2011,32(3):85-88.
WANG S, CHEN H Y, HU J Q. Research status of tungsten alloys [J]. Precious Metals, 2011, 32(3): 85-88.
- [2] 吴泽卫,徐英鸽,李明. 高密度钨合金的研究现状 [J]. 热加工工艺,2014,43(12):5-7.
WU Z W, XU Y G, LI M. Research status of high-density tungsten alloy [J]. HOT Working Technology, 2014, 43(12): 5-7.
- [3] 谭多望,王广军,龚晏青. 球形钨合金破片空气阻力系数实验研究 [J]. 高压物理学报,2007,21(3):235-236.
TAN D W, WANG G J, GONG Y Q. Experimental studies on air drag coefficient of spherical tungsten fragments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(3): 235-236.
- [4] 中国人民解放军总装备部. 军用钨合金珠: GJB3793-1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
The General Reserve Department of PLA. Military tungsten alloy pearl: GJB3793-1999 [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 2000.
- [5] 谭多望,李翔,温殿英. 球形钨合金破片终点弹道性能实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(5):425-429.
TAN D W, LI X, WEN D Y. Experimental investigation of terminal effects of spherical tungsten fragments [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 425-429.
- [6] 姜春兰,陈放,李明. 钨球对陶瓷/铝复合靶的侵彻与贯穿 [J]. 兵工学报,2001,22(1):36-40.
JIANG C L, CHEN F, LI M. Penetration and perforation of ceramic/aluminum composite targets by high-speed tungsten alloy sphere [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(1): 36-40.
- [7] 张兆森,熊湘军,王伏生. 钨合金珠性能测试方法的探讨 [J]. 矿冶工程,2002,22(1):96-98.
ZHANG Z S, XIONG X J, WANG F S. Investigation of testing methods of tungsten alloy ball's properties [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(1): 96-98.
- [8] 米双山,张锡恩,陶贵明. 钨球侵彻 LY-12 铝合金靶板的有限元分析 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(5):477-480.
MI S S, ZHANG X E, TAO G M. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 477-480.
- [9] FORTUNA E, ZIELINSKI W, SIKORSKI K. TEM characterization of microstructure of a tungsten heavy alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81: 469-471.
- [10] 陈强,尤清照,葛启录,等. W-Ni-Fe 高比重合金表面强化 [J]. 钢铁研究学报,2000,12(2):33-35.
CHEN Q, YOU Q Z, GE Q L, et al. Surface harding of W-Ni-Fe heavy alloys [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(2): 33-35.
- [11] 刘桂荣,刘国辉,王铁军,等. W-Ni-Fe 高比重合金断口形貌研究 [J]. 中国钨业,2004,19(3):36-38.
LIU G R, LIU G H, WANG T J, et al. Research on fracture surface of W-Ni-Fe tungsten heavy alloy [J]. China Tungsten Industry, 2004, 19(3): 36-38.

- [12] 黄继华,赖和怡,周国安. 高比重钨合金的微观结构和性能的关系 [J]. 粉末冶金技术,1992,1(2):63-68.
HUANG J H, LAI H Y, ZHOU G A. Relation between microstructures and properties of heavy alloys [J]. Powder Metallurgy Technology, 1992, 1(2): 63-68.
- [13] LEE K H, CHA S I, RYU H J, et al. Effect of two-stage sintering process on microstructure and mechanical properties of ODS tungsten heavy alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 458(1/2): 323-329.

Comparison of Mechanical Properties and Damage Mode of Tungsten Alloy Spheres in Two Different States

KONG Qingqiang, ZHOU Tao, SHEN Fei

(Xi'an Institute of Modern Chemistry, Xi'an 710065, China)

Abstract: In this paper, we studied the mechanical properties of tungsten alloy spheres in sintered and polished states using the quasi static test and the dynamic loading test, observed their metallographic structure and damage mode before and after the test using SEM, and analyzed the causes leading to their difference. The result showed that the surface microstructure of the tungsten alloy sphere in the sintered state was more uniform than that in the polished state, which accounts for its better mechanical properties.

Keywords: tungsten alloy sphere; mechanical properties; damage mode; SEM