

粉末烧结钨合金材料的绝热剪切研究^{*}

魏志刚 胡时胜 李永池 李凡庆

(中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 在分离式霍普金森压杆装置上对斜圆柱粉末烧结钨合金试件进行了冲击实验,由于斜圆柱结构中剪切分量在冲击压缩中的持续作用,实验中观察到了宏观破断现象。利用光学显微镜和扫描电子显微镜分别对试件断面和试件的纵截面进行了分析,观察到了贯通钨颗粒的绝热剪切带这一变形局部化现象。对粉末烧结钨合金绝热剪切破坏机制进行了分析。

关键词 绝热剪切带 粉末烧结钨合金 分离式霍普金森压杆

中图法分类号 O346.1

1 引言

绝热剪切破坏是冲击载荷作用下金属材料破坏的一种重要机制,尤其在长杆弹对金属靶板的穿甲和侵彻过程中起着重要作用。贫铀和钨合金是目前动能穿甲弹的主要用材。Magness^[1-2]通过大量的实验研究指出,之所以贫铀弹比普通钨合金弹具有更强的穿甲侵彻威力,其根本原因在于贫铀独特的热力学性质。它使得弹体头部在撞击过程中很容易发生绝热剪切引起的破坏,始终保持小的弹头截面积和尖税的形状,出现“自锐”现象,弹体运动阻力小,开坑口径小而穿深大。而一般钨合金是绝热剪切不敏感材料,其弹头在撞击过程中始终保持大的“蘑菇头”,穿甲侵彻威力明显低于贫铀弹。

由于贫铀具有化学毒性和放射性,目前世界各国学者关注的焦点是如何提高钨合金的威力,尤其是如何提高其绝热剪切能力。霍普金森压杆是研究材料在一维应力条件下变形破坏的有效方法,而实验表明,在此条件下很难观察到通常钨合金材料的绝热剪切现象。在近年来发展起来的“帽式”试件和斜圆柱试件实验^[3]中,因试件处于复杂应力状态,可观察到钨合金中的绝热剪切带。由于穿甲弹的钨合金是由近乎球形的钨颗粒(30~60 μm)和镍、铁粘结相均匀混合后在高温下烧结而成的两相合金,人们开始关注钨合金各相在材料变形和破坏中的作用。Yadav^[4]、Zhao^[5]对各相在高应变率下的变形、破坏机制,尤其在绝热剪切带形成中的作用进行了大量的研究。Zhou^[6]通过实验和计算指出,由于扰动的影响,钨颗粒和粘结相组成的合金比任一单一相具有更强的绝热剪切能力。

我们以往的实验表明,由于绝热剪切机制的作用,钨合金预扭转弹比未扭转弹具有更强的穿甲与侵彻威力。在一维动态应力条件下,观察到了预扭转钨合金迥然不同的性质,指出了在微观层次上各组元的独特作用。但没有观察到贯通于钨颗粒的绝热剪切现象。

我们在此基础上,在分离式霍普金森压杆装置上对预扭转斜圆柱粉末烧结钨合金试件进

* 国防科技重点实验室试点项目(批准号 96JS33.4.1.ZK0101)。

魏志刚:男,1969年6月生,博士,讲师。

1998-07-03 收到原稿。

行冲击实验,用光学显微镜和扫描电子显微镜分别对试件进行分析,实验中观察到贯通钨颗粒的绝热剪切带这一变形局部化现象。对粉末烧结钨合金绝热剪切破坏的机制进行分析。

2 实验方法

2.1 实验材料

实验所用的钨合金为 93W。钨粉以镍-铁为粘结剂,均匀混合,高温烧结后,经锻造而成钨合金棒。棒材在扭转实验机上经过预扭转,再加工成直径为 7mm、长为 4mm 的试件。预扭转后钨合金材料的形貌如图 1 所示。球形的钨颗粒被拉成椭球状,椭球长轴和加载方向成一定角度。为了考察钨颗粒取向与加载方向(或最大剪应力方向)之间夹角对绝热剪切的影响,将实验用预扭转钨棒切割成倾斜角分别为 10°、20°、30°试件。

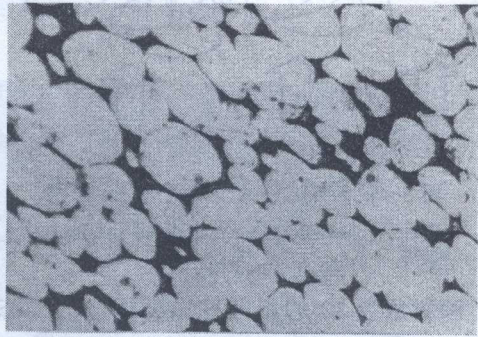


图 1 预扭转钨合金的微观形貌

Fig.1 The typical section of a pretorqued WHA

2.2 冲击加载装置

压/剪复合加载实验是在分离式霍普金森压杆装置上进行的,整个装置和试件位置如图

2 所示。子弹撞击所产生的弹性波分别由输入杆和输出杆上的应变片记录,经过数据处理,可得到在一定应变率下的应力应变关系^[9]。由于试件是斜圆柱形的,剪切应力分量和试件实际承载面积难以准确测量,因而不能准确测得真实应力值。但可通过分析曲线的走势,观察承载能力的变化。实验中近似以圆柱初始横截面积为承载初始面积。

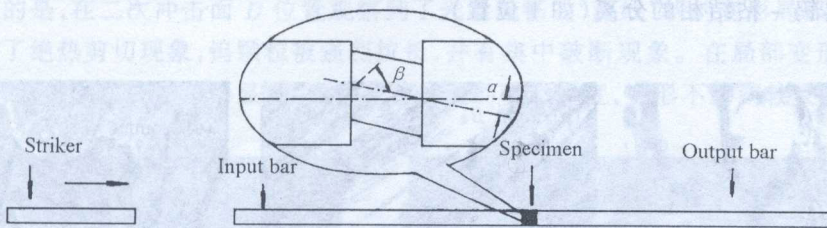


图 2 霍普金森压杆装置及试件位置示意图

Fig.2 Schematic split Hopkinson's pressure bar set-up

2.3 微观观察实验

利用中国科技大学结构分析中心的扫描电镜对所有冲击后试件的断口进行了观察,同时在金相显微镜下对断裂后试件和冲击未断裂的试件进行了观察。

3 实验结果与讨论

图 3 是试件冲击破坏过程示意图。试件剪切破断后,输入杆中仍有一部分压缩波,会对一

些破断后的试件造成再次撞击,因而造成了 D 面的产生。实验中还观察到了二次撞击断裂现象。图 4 是斜圆柱试件在冲击作用下剪切破断的形貌照片。

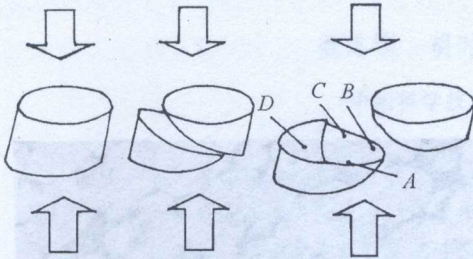


图 3 斜圆柱试件冲击断裂过程示意图

Fig.3 Shear-fractured cylindrical specimen divided into two parts

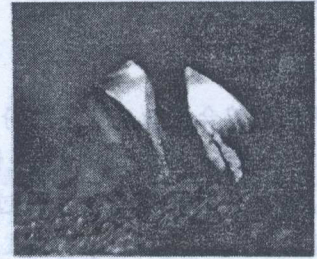


图 4 试件冲击断裂形貌

Fig.4 A fractured specimen

倾斜角为 10°的斜圆柱试件近似的动态应力应变曲线如图 5 所示,其平均应变率为 2210s⁻¹。从图中可看到,经过一定的塑性变形之后,试件的应力随应变的增大而降低,呈现一定的软化趋势,当应变达到约 11.2%时,应力陡然下降,这是材料出现变形局部化和断裂的结果。

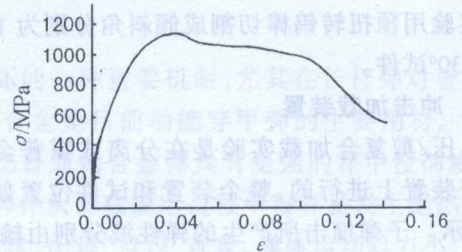


图 5 斜圆柱试件的应力应变曲线

Fig.5 Approximate true stress-strain behavior of an inclined cylindrical specimen

图 6 分别是断面上 A、B、C 处在扫描电镜下的形貌。从图中可以看出, B 比 A、C 光滑许多,这是 B 经历更多摩擦的结果。从图 6(a)可以明显地看出钨 - 粘结相的分离(如 1 位置)。



图 6 试件断面的扫描电镜观察结果

Fig.6 Scanning electron micrographs of the fracture surfaces

钨颗粒的断裂(如2位置)、粘结相破碎分离的现象。由于变形的不均匀性,因变形不协调钨颗粒-粘结相的分离很可能发生。

图7是倾斜角为 10° 的试件在冲击后无宏观破坏时的微细观形貌,此照片取自试件的一个外侧表面,右图取左图的方框放大。绝热剪切带的形成清晰可见,绝热剪切带的方向和加载方向近似成 45° ,这和其它试件的断裂方向是类似的。从剪切带放大图可以看到,椭圆形的钨颗粒发生了强烈的塑性变形,而且相当多的钨颗粒被拉断,并呈雨滴状。图8是断面B处纵向剖面图,没有观察到剪切带有绕过钨颗粒或与钨颗粒取向一致的趋势。

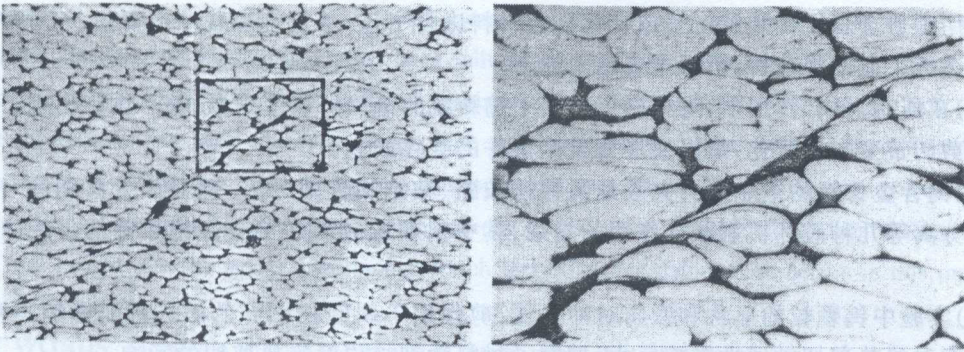


图7 绝热剪切带形貌

Fig.7 Shear deformation and shear zone in a pretorqued tungsten alloy

从上述观察可以总结出,粉末烧结钨合金材料的绝热剪切破坏是钨颗粒的破断、镍-铁粘结相的失效、钨-钨分离、钨-粘结相的分离等几种破坏机制的综合结果。从图7~8可以看出,由于钨颗粒超塑性破裂在整个视野中所占的比例最大,因而钨颗粒的破断是绝热剪切破坏的主要机制。

有趣的是,在二次冲击面D位置观察到了光滑流畅的“流线”状的变形局部化区(见图9),明显看到了绝热剪切现象,钨颗粒被强烈拉长,并有集中破断现象。在局部变形区的两侧,尤其是在底部,钨颗粒变形不明显,因而存在着巨大的变形梯度,变形不协调较大。

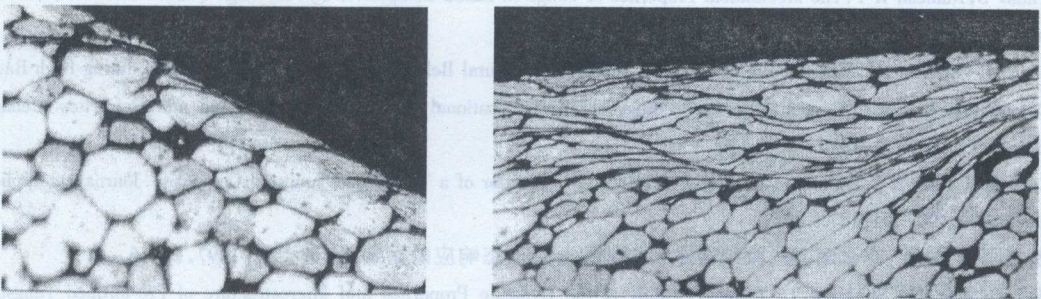


图8 断面B点处的断裂形貌

Fig.8 Micrograph of deformed grains near the shear fractured surface

图9 “流线”的形貌

Fig.9 Photograph of 'streamline'

实验中所有试件均在和加载方向近似成 45° 方向上剪切破坏,而且所有的破坏断面都是略有起伏的对称面,断裂面不同位置钨颗粒的长轴和断裂面呈不同的角度,看不出钨颗粒形状和空间取向对绝热剪切断裂方向有明显影响。预扭转钨合金在高应变率、高应变的一维应力条件下很难出现绝热剪切带,而本实验中钨合金在较小的应变和应变率下就出现了绝热剪切现象。可见,由于试件几何形状而引起的受力状态变化对绝热剪切的发生有决定性的影响,与之相比,材料本身的微细观结构的影响却处于较次要的地位。

4 结 论

利用霍普金森压杆装置对预扭转钨合金材料进行了压/剪复合加载冲击实验,并对冲击后的材料进行了微细观分析,所得主要结论如下。

(1)在压/剪复合作用下,观察到了贯通于钨颗粒的绝热剪切带现象,整个试件出现了集中于绝热剪切带变形局部化,最终发展为整个试件的破坏断裂。

(2)钨合金材料的绝热剪切失效是钨颗粒破断、粘结相失效、钨—钨界面分离和钨—粘结相界面分离等几种破坏机制联合作用的结果,其中钨颗粒破断是钨合金绝热剪切失效的最主要机制。

(3)实验中钨颗粒的形状和取向对冲击压/剪作用下斜圆柱试件的破坏机制影响不明显,受力状态对绝热剪切敏感性影响巨大,抑制了材料微细结构对绝热剪切的影响。

参 考 文 献

- 1 Magness L S. Properties and Performance of KE Penetrator Materials. In: Bose A, et al, eds. Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Alloys. Arlington VA, USA: Metal Powder Industries Federation, 1992. 15 ~ 22
- 2 Magness L S. High Strain Rate Deformation Behaviors of Kinetic Energy Penetrator Materials during Ballistic Impact. Mechanics of Materials, 1994, 17: 147 ~ 154
- 3 Meyer. Adiabatic Shear Failure under Biaxial Dynamic Compression / shear Loading. Mechanics of Materials, 1994, 17: 203 ~ 214
- 4 Yadav S, Ramesh K T. The Mechanical Properties of Tungsten-based Composites at Very High Strain Rates. Material Science and Engineering, 1995, A203: 140 ~ 153
- 5 Zhao D, Valencia J J, McCabe T J. Mechanical and Microstructural Behavior of Tungsten Heavy Alloys during High Rates Deformation. In: Bose A, et al, eds. Proceedings of 3rd International Conference on Tungsten and Refractory Metals. Mclean VA: [s. n.], 1995. 123 ~ 130
- 6 Zhou M, Clifton R J. Dynamic Constitutive and Failure Behavior of a Two-phase Tungsten Composite. Journal of Applied Mechanics, 1997, 64: 187 ~ 494
- 7 魏志刚, 胡时胜, 李永池, 等. 微结构对预扭转钨合金动态响应的影响. 弹道学报, 1997, (1): 6 ~ 11
- 8 Wei Zhigang, Hu Shisheng, Li Yongchi. Study of the Dynamic Properties and Microstructure of Pre-torqued Tungsten Heavy Alloys. In: Niekirk C V, ed. Proceeding of the 17th International Symposium on Ballistics. South Africa: The South Africa Ballistics Organisation, 1998. 391 ~ 398
- 9 胡时胜. 应变片技术在动态力学测量中的应用. 实验力学, 1987, (2): 73 ~ 82

STUDY ON ADIABATIC SHEAR FAILURE OF TUNGSTEN HEAVY ALLOY

Wei Zhigang, Hu Shisheng, Li Yongchi, Li Fanqing

(*University of Science and Technology of China, Hefei, 230027*)

ABSTRACT A combined compression/shear testing method was used in order to investigate the propensity of pre-torqued tungsten heavy alloy containing 93%W and the Ni on Fe in a 7:3 ratio. The combined simultaneous loading is applied by a split Hopkinson's pressure bar (SHPB), which generates strain rate as high as 10^3 s^{-1} . The cylindrical specimen has its axis inclined to the loading axis. Adiabatic shear localization has been observed in the high rate compression/shear tests; relatively narrow shear bands are formed, followed immediately by catastrophic fracture. The deformed microstructures are examined using electron microscopy and optical microscopy. Examination of the deformed microstructures supplies new insight into the mechanism through which large dynamic deformation occurs in this pre-torqued tungsten heavy alloy.

KEY WORDS adiabatic shear band, tungsten heavy alloy, split Hopkinson bar