

文章编号: 1004-0609(2004)10-1637-05

金属铍的微屈服行为及机理^①

钟景明^{1, 2}, 高 勇¹, 王东新², 王学泽², 王零森³

(1. 西安理工大学 电子工程系, 西安 710048; 2. 西北稀有金属材料研究院, 石嘴山 753000;
3. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 为研究金属铍的微屈服行为, 通过透射电镜观察了 1×10^{-6} 、 50×10^{-6} 和 200×10^{-6} 3 种不同微屈服阶段材料位错的变化, 初探了铍的微屈服机理。通过 130 多个铍试样的微屈服强度与屈服强度的比较试验证明, 用常规简单的屈服强度试验代替冗长的微屈服强度试验是可能的。

关键词: 铍; 微屈服强度; 位错; 屈服强度

中图分类号: TF 824; TF 124.32

文献标识码: A

Micro-yield behavior and mechanism of beryllium metal

ZHONG Jing-ming^{1, 2}, GAO Yong¹, WANG Dong-xin², WANG Xue-ze², WANG Ling-sen³

(1. Department of Electronic Engineering,
Xi'an Technology University, Xi'an 710048, China;
2. Northwest Rare Metal Materials Research Institute, Shizuishan 753000, China;
3. State Key Laboratory for Powder Metallurgy,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study the micro-yield behavior of beryllium metal, the dislocation changes of the material were observed at three kinds of micro-yield region with strain of 1×10^{-6} , 50×10^{-6} and 200×10^{-6} by TEM and the micro-yield mechanism of beryllium was approached. Through comparison between the micro-yield strength value of and the corresponding yield strength value of more than 130 samples, it is shown that the tedious micro-yield tests can be replaced by common and simple yield tests.

Key words: beryllium; micro-yield strength; dislocation; yield strength

惯性导航仪表和光学系统对部件精度和尺寸稳定性要求严格, 国外通常用微屈服强度来表征材料的尺寸稳定性^[1, 2]。微屈服强度 (micro-yield strength, 本文简称 σ_{mys}) 是在短期负载作用下产生一个微应变 (10^{-6}) 所需要的应力值^[3, 4]。

金属铍由于其密度低、刚度、尺寸稳定性好等特点, 被认为是惯性导航陀螺仪和光学镜体的最佳候选材料。从 20 世纪 60 年代开始, 美国的不少学者就一直对惯性器件和光学镜体用铍材的微屈服强度进行研究^[5-7]。影响铍材微屈服强度的因素较多, 一般认为微屈服强度的大小很大程度上取决于

材料的初始状况, 如晶粒尺寸、杂质含量(尤其是 BeO)、热处理和预变形等, 这些因素中影响最大的当属晶粒尺寸和 BeO 含量^[4, 8-10]。

本文作者着重对我国真空热压铍材、热等静压铍材的微屈服强度与屈服强度关系以及微屈服机理进行研究。

1 实验

从真空热压 ($1\ 100\ ^\circ\text{C}$, 1 h) 和热等静压 ($1\ 050\ ^\circ\text{C}$, 3 h) 铍材中选取 $d\ 60\ \text{mm}$ 的圆柱形单肩

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59764002)

收稿日期: 2004-02-24; 修订日期: 2004-05-25

作者简介: 钟景明(1963-), 男, 教授级高工, 博士。

通讯作者: 钟景明, 博士; 电话: 0952-2098003; 传真: 0952-2098889; E-mail: zhongjingming@mail.china.com

拉伸试样, 试样的标距长度为直径的 4 倍。用化学腐蚀办法将试样表面剥离 0.1~0.12 mm, 去除机械加工造成的表面损伤层。在试样标距范围内沿圆周均匀粘贴 3 片电阻应变片, 焊上引线, 接到应变测试仪上。在 Instron 试验机上用 0.2 mm/min 速度进行单轴拉伸, 从低载荷到高载荷进行重复加载卸载, 记录残余应变。在应力与残余应变关系图上, 读得对应于 1×10^{-6} 残余应变的应力即为 σ_{mys} 值^[1, 11]。之后, 进行常规拉伸试验, 测量出屈服强度值。用透射电镜观察不同微屈服状态下材料的位错变化情况。

2 结果与讨论

2.1 铍的微屈服过程

金属铍的微屈服强度试验是通过对拉伸试样从低载荷到高载荷不断加载卸载累计残余应变来实现的, 典型的负载—时间曲线见图 1。

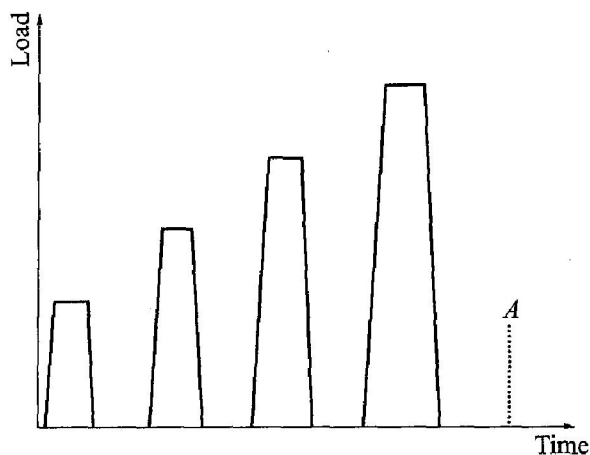


图 1 微屈服强度试验加、卸载过程

Fig. 1 Load and unload process for micro-yield strength test

图 2 所示为铍材典型的微屈服强度试验的应力—应变曲线。从图 2 中可以看出, 曲线的斜率很大, 说明随应力增加, 应变的增加十分缓慢。如在 40 MPa 以下几乎没有任何屈服的迹象。这表明这种材料中阻碍位错运动的力很大, 位错的启动十分困难, 从而导致微屈服强度提高, 当应力高达 100 MPa 后, 应变才有所加速, 呈直线增加趋势, 此时, 有不少位错挣脱 BeO 钉扎, 越过晶界运动。该材料在一个微应变的 σ_{mys} 达到 127 MPa。

2.2 铍的微屈服机理

铍是密排六方结构, 只有 4 个独立滑移系, 且

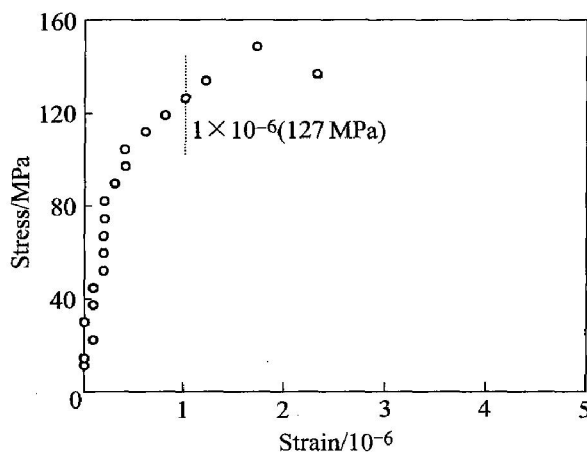


图 2 微屈服强度试验曲线

Fig. 2 Curve of micro-yield strength test (HIP-LS-6 HIPed Be material)

基面滑移占主导地位, 尽管六方金属的单晶表现出相当低的应变硬化, 但多晶体并非如此。晶界成为一个晶粒向另一个晶粒滑移的障碍, 从而产生硬化。由于铍的变形基本上发生在基面, 特别要求相邻晶粒的合作以容纳位移。

图 3(a)、(b)、(c) 所示分别为压制态铍材在发生微屈服前、产生一个微应变屈服和微屈服试验结束将试样拉伸至断裂后的位错状况。

进行微屈服试验前材料中的位错密度高, 无论晶界还是晶内, 位错分布较均匀, BeO 钉扎位错, 使之固定不能运动; 发生一个微应变屈服后材料中位错开始运动, 位错线被拉直, 但还有不少位错被 BeO 钉扎; 拉伸断裂后, 晶界附近区域的位错数量大大减少, 有些晶界区附近甚至看不到位错, 位错已滑移到晶界处消失。

由图 3(b) 的位错状态可以看出, 金属铍的微屈服是从个别(少数)较弱的晶粒(晶界)开始的, 然后随着应力的增加, 逐渐扩大位错运动的范围。

为进一步了解、分析微屈服期间位错运动情况, 还专门进行了 50×10^{-6} 和 200×10^{-6} 应变实验, 通过透射电镜观察位错运动状况, 并与 1×10^{-6} 和拉断后的位错运动对比。

图 4 所示为热压 HP-LS-3-1 同一试样在 50×10^{-6} 应变后选取 3 个典型区域观察得到的位错分布图。

从图 4(a) 可以看出, 当铍材产生 50 个微应变时, 位错挣脱 BeO 的钉扎, 在多个晶粒上大面积协同运动; 由于位错运动进程的增加, 一些位错逐渐汇集到晶界, 在晶界处产生积聚(见图 4(b)); 局部形成了图 4(c) 所示的十分壮观的位错“瀑布”, 这被

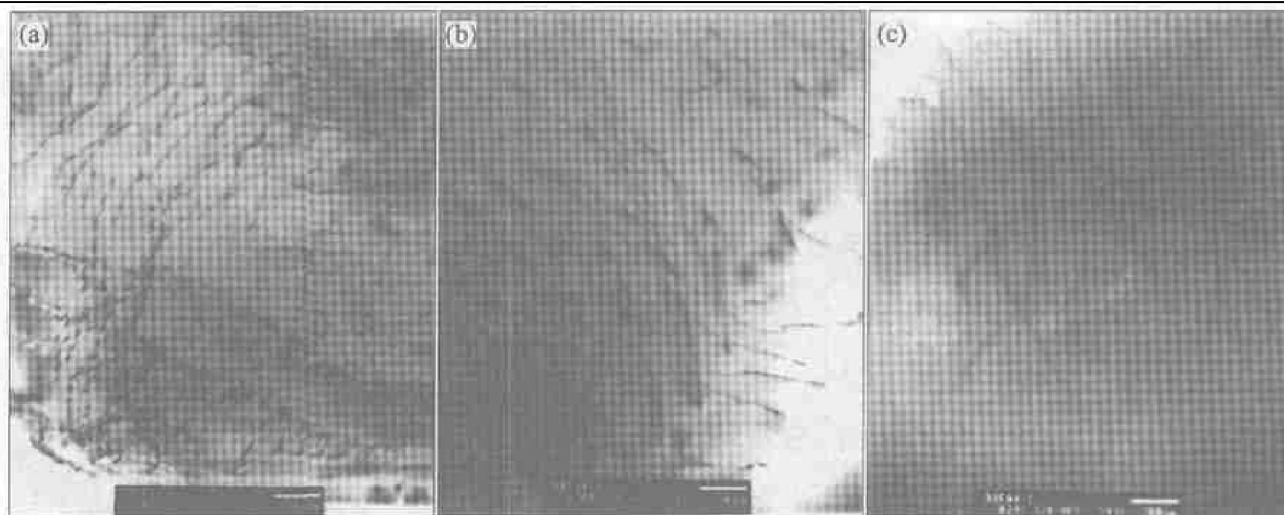


图 3 铍材压制态(a)、一个微应变屈服(b)和拉断后的位错结构(c)

Fig. 3 Dislocation structures of as-pressed(a), micro-yielded(1×10^{-6})(b) and ruptured(c) Be materials

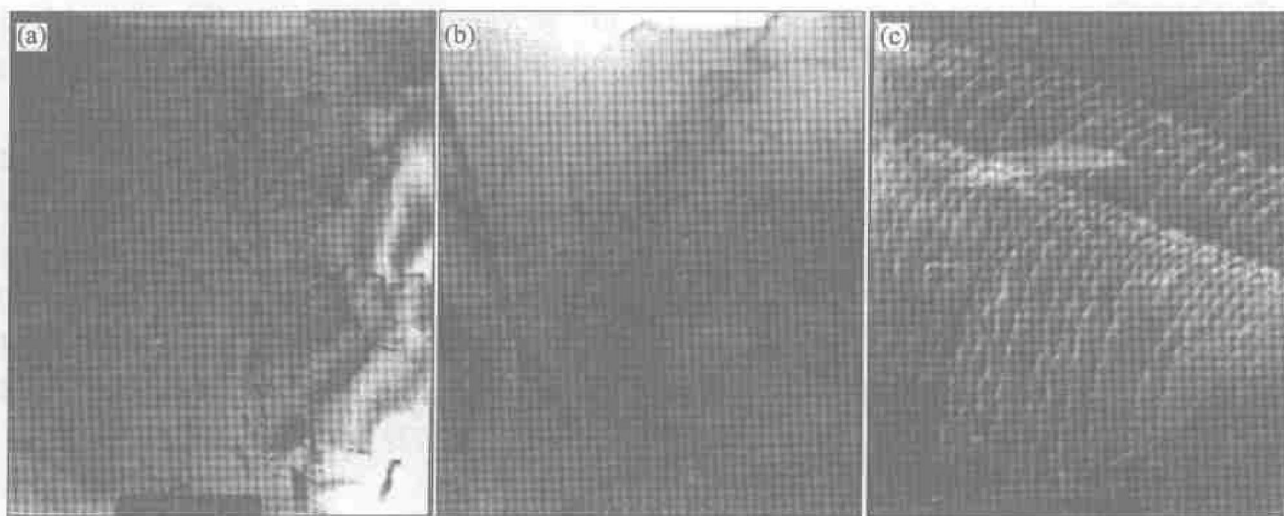


图 4 HP-LS-3-1 热压铍材在 50×10^{-6} 应变后的位错状况

Fig. 4 Dislocation structures of hot pressed Be material(HP-LS-3-1) after 50×10^{-6} strain

认为这是位错墙的前兆。

图 5 所示为热压 HP-LS-2-2 同一试样在 200×10^{-6} 应变后选取 3 个典型区域观察得到的位错分布图。从图 5 可看出, 3 组位错形貌相似。

由上所述, 铍这种密排六方金属滑移系很少, 因此, 在其产生应变的过程中, 位错运动的方式十分有限, 一般仅在有限范围内进行滑移后, 位错的运动就变得平缓; 在施加较大应力后, 位错产生攀移, 向晶界聚集; 随着攀移位错数量的增多, 就在晶界形成一道规则的位错墙(见图 5(a)、(b)、(c)), 这实际上是一个小角度晶界。在应变量进一步增大后, 这一小角度晶界将变成一个新的晶界(见图 5(c)), 位错就此消失。

2.3 屈服强度与微屈服强度

屈服强度即 0.2% 或 2000×10^{-6} 应变, 是工业上规定的一种宏观强度。在普通材料拉伸过程中能较容易测量得到。而微屈服强度测试过程复杂, 测试条件要求苛刻。本试验共测试微屈服强度试样 130 多个, 在测试完微屈服强度后, 又测试了试样的屈服强度, 现将有关结果总结如下。图 6 所示为所有样品 $\sigma_{0.2}$ 与 σ_{mys} 的集合趋势图。

用最小二乘法拟合直线方程为

$$\sigma_{0.2} = 171.0 + 2.728 \sigma_{mys}$$

从图 6 可以看出, 本实验较大量的 σ_{mys} 与 $\sigma_{0.2}$ 对应关系数据, 反映出两者存在较好的线性关系。与文献[12]实验结果比较, 作者所做的实验数据多

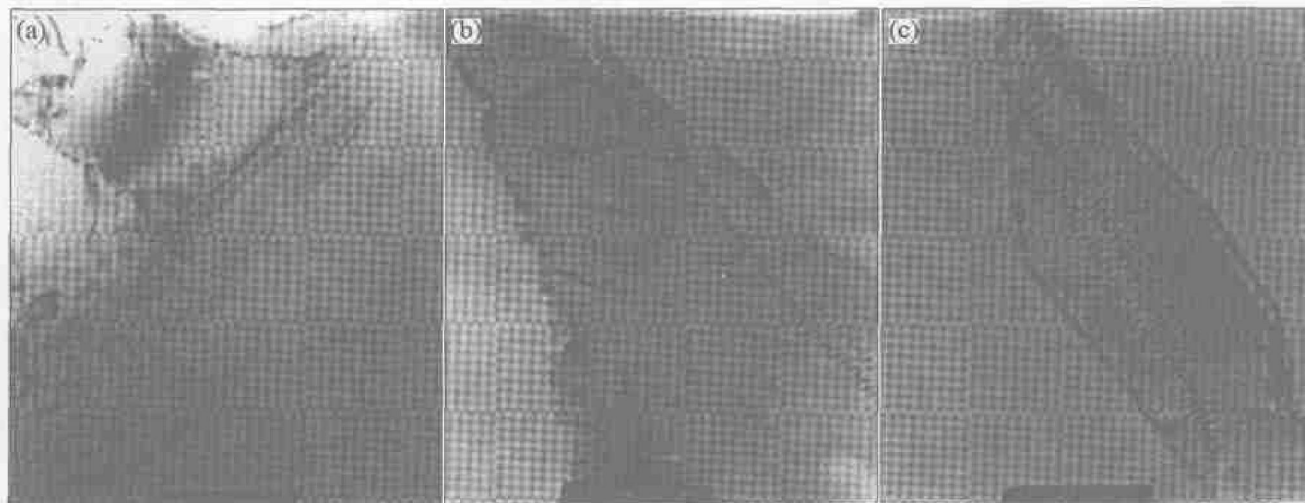


图 5 HP-LS-2-2 热压铍材在 200×10^{-6} 应变后的位错状况

Fig. 5 Dislocation structures of hot pressed Be material(HP-LS-2-2) after 200×10^{-6} strain

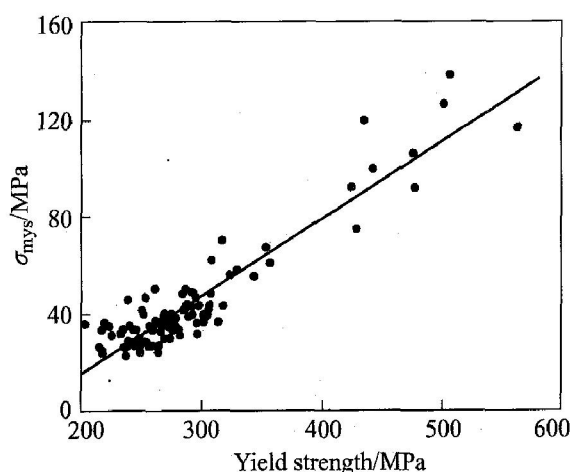


图 6 铍材屈服强度与微屈服强度的关系

Fig. 6 Correlation between σ_{mys} and $\sigma_{0.2}$ for Be materials

2 倍, 数据集中, 线性关系很好。而文献[12]中的实验数据较分散, 如要用 $\sigma_{0.2}$ 代替 σ_{mys} 显得较勉强。本实验的成功将十分有利于今后总结出一个较为准确的定量关系, 以使用相当简捷、常规的 $\sigma_{0.2}$ 试验来替代繁琐、冗长的 σ_{mys} 试验, 满足国防军工对铍材 σ_{mys} 这一重要指标的要求。

3 结论

1) 较系统地观察了微屈服发生前, 1×10^{-6} 、 50×10^{-6} 和 200×10^{-6} 3 种不同微屈服阶段和拉断后试样的位错运动状况, 发现: 在微屈服试验前, 位错被 BeO 钉扎, 密度高; 1×10^{-6} 应变时, 位错在局部晶粒中挣脱 BeO 钉扎开始运动; 50×10^{-6} 应变

时, 大量位错在许多晶粒中运动, 通过攀移, 在晶界处积聚形成“瀑布式位错幕墙”; 当发生 200×10^{-6} 较大应变时, 到处可见规则的由大量位错塞积产生的“位错墙”; 至试样拉断时, 位错已经较少, 大多在晶界处消失。

2) 经过对 130 多个铍材试样的微屈服强度与屈服强度的比较实验证明: 铍材 $\sigma_{0.2}$ 和 σ_{mys} 有相当好的线性关系, 在本实验条件下得出了线性回归方程为 $\sigma_{0.2} = 171.0 + 2.278 \sigma_{\text{mys}}$ 。与美国现在公布的同类实验结果相比, 本实验的数据多、分布集中, 线性关系更好。这为今后用简便的 $\sigma_{0.2}$ 试验代替繁琐冗长的 σ_{mys} 试验提供了可能。

REFERENCES

- [1] Marshall C W, Maringer R E. Dimensional Instability: An Introduction[M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [2] Ingram A G, Hoskins M E, Sovik J H, et al. Study of microplastic properties and dimensional stability of materials [R]. AD838802. Battelle Memorial Inst Columbus Ohio, 1968.
- [3] Paquin R A. Dimensional stability: an overview[A]. Dimensional Stability[C]. San Diego, California: SPIE-The Inter Society for Optical Engineering, 1990. 2-17.
- [4] Hughel T J. Dimensional Stability of Several Types of Beryllium[M]. London: Chapman and Hall Ltd, 1963. 546-552.
- [5] Bonfield W, Li C H. The Microstrain Characteristics of Beryllium[M]. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, Inc, 1966. 539-567.
- [6] Cattiness W, Fullertir-Batten R C, Paquin R A. Optical application of beryllium [A]. The Metals Society. Beryllium

- 1977: Fourth Inter Conf on Be[C]. London: The Royal Society, 1977. 53.
- [7] Parsonage T B. Selecting mirror materials for high performance optical systems[A]. Paquin R A. Dimensional Stability[C]. San Diego, California: SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1990. 119 - 126.
- [8] Hodge W. Beryllium for structural applications[R]. Defense Metals Information Center Columbus, AD278723 Ohio, 18, 1962.
- [9] ZHONG Jing-ming, WANG Zhan-hong, NIE Da-jun, et al. Influence of grain size on mechanical properties of isostatically pressed beryllium Materials[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 228 - 231.
- [10] 付晓旭, 钟景明, 王东新, 等. 氧化铍对铍材微屈服强度的影响[J]. 宇航材料工艺, 2002(3): 50 - 52.
- FU Xiao-xu, ZHONG Jing-ming, WANG Dong-xin, et al. Influence of BeO on micro-yield strength of beryllium material[J]. Aerospace Materials and Technology, 2002(3): 50 - 52.
- [11] 王学泽, 马立斌, 钟景明, 等. 铍材微屈服强度测试方法[J]. 理化检验—物理分册, 34(10): 20 - 21.
- WANG Xue-ze, MA Li-bin, ZHONG Jing-ming, et al. The testing method of micro-yield strength of beryllium material [J]. Ptca(Part A: Physical Testing), 34(10): 20 - 21.
- [12] Christ B W, Polvani R S. Micromechanical properties of beryllium and other instrument materials [R]. AD-A119187, 1982.
- (编辑 吴家泉)