

# 氧化铍对铍材微屈服强度的影响\*

付晓旭 钟景明 王东新 王学泽 王零森

(西北稀有金属材料研究院 石嘴山 753000)

**摘 要** 用粒度相同、不同 BeO 含量的铍粉开展了 BeO 对铍材微屈服强度( $\sigma_{mys}$ )的研究;结果发现,与 BeO 含量相比,BeO 在铍中的分布状态对  $\sigma_{mys}$  的影响更大。在晶界及晶内较细小弥散分布的 BeO 对基体铍有弥散强化作用,使  $\sigma_{mys}$  较高;如果 BeO 较粗大地成簇状聚集在晶界,反而对  $\sigma_{mys}$  有不良的影响。

**关键词** 铍,氧化铍,微屈服强度

## Influence of BeO on Microyield Strength of Beryllium Material

Fu Xiaoxu Zhong Jingming Wang Dongxin Wang Xueze WangLingsen

(Northwest Rare Metal Materials Institute Shizuishan 753000)

**Abstract** Influence of BeO on microyield strength ( $\sigma_{mys}$ ) is studied using beryllium material made from beryllium powders with same particle size but different contents of BeO. Experimental results show that distribution of the BeO in beryllium has more influence on  $\sigma_{mys}$  compared with the content of BeO. Dispersed fine BeO particles on grain boundaries can strengthen the beryllium matrix, and result in a high  $\sigma_{mys}$ , but clustered coarse BeO particles may result in negative influence on  $\sigma_{mys}$  on the contrary.

**Key words** Beryllium, Beryllium oxide, Microyield strength

### 前言

航天器的惯性导航系统或光学系统要求其关键部件具有良好的尺寸稳定性。国外一般用微屈服强度( $\sigma_{mys}$ ),即在负载作用下产生一个微应变( $1 \times 10^{-6}$ )所需要的应力值来表征<sup>[1,2]</sup>。

铍是陀螺仪和光学镜体良好的候选材料<sup>[3,4]</sup>。晶粒尺寸和 BeO 含量是影响铍  $\sigma_{mys}$  的主要因素<sup>[2,5]</sup>。对传统工艺制粉(圆盘磨、球磨)来说,晶粒细小常常伴随着 BeO 含量的增加<sup>[6]</sup>,因此 BeO 对  $\sigma_{mys}$  的影响是和晶粒尺寸的影响是交织在一起的。本文采用相同粒度细铍粉预烧结酸洗工艺制备了不同 BeO 含量的铍粉,研究了 BeO 含量单独对铍材  $\sigma_{mys}$  的影响。

### 1 实验及结果

#### 1.1 实验用粉末性能

实验制备的 3 种不同 BeO 含量的铍粉,其主要化学成分(质量分数)和颗粒尺寸见表 1。

表 1 不同 BeO 含量铍粉的化学成分和颗粒尺寸

Tab.1 Chemical compositions and particles size of beryllium powder with different BeO contents

材料	BeO/ 10 <sup>-4</sup> %	Fe/ 10 <sup>-4</sup> %	Al/ 10 <sup>-4</sup> %	Si/ 10 <sup>-4</sup> %	粒度/ μm
GY-1	2.47	1 350	310	466	3.5
GY-2	3.46	950	208	137	3.5
GY-3	7.60	1 250	176	215	3.3

收稿日期:2001-10-26

\*国家自然科学基金资助项目:59764002

付晓旭,1943 年出生,教授,主要从事铍粉末冶金的研究工作

## 1.2 不同 BeO 含量热压铍材的力学性能

粉末在间接加热式真空热压机中,以 1 050 温度和 5 MPa 压力,在  $1 \times 10^{-4}$  Pa 真空度下热压固结,材料的力学性能见表 2。

表 2 不同 BeO 含量热压铍材的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of hot pressed beryllium materials with different BeO contents

材料	BeO/ % (质量分数)	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{ms}$ / MPa	$d$ / $\mu\text{m}$
GY-1	2.50	480	102	4.5
GY-2	3.60	464	95	4.8
GY-3	8.20	370	39	5.5

从表 2 可以看出,随着 BeO 含量的增加,  $\sigma_{ms}$  减小,宏观强度  $\sigma_b$  也减小。由于 BeO 含量较高,三种铍材屈服均不明显,延伸率接近为零。

## 1.3 微观组织结构

### 1.3.1 BeO 分布

图 1 和图 2 分别为 GY-2, GY-3 高氧铍材中的 BeO 电子探针分析结果。从图中可以看出, GY-2 中的 BeO 较细小且基本沿晶界分布,而 GY-3 中的 BeO 颗粒比 GY-2 较粗大,数量也较多,且呈簇状分布。

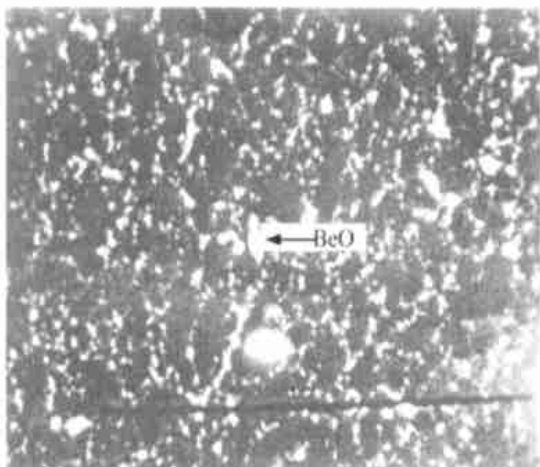


图 1 GY-2 铍材中 BeO 的分布

Fig. 1 Distribution of BeO in hot pressed beryllium material (GY-2)

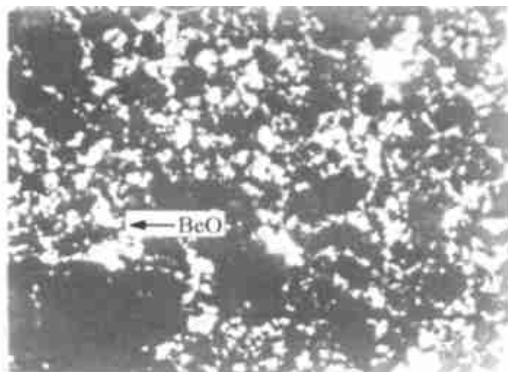


图 2 GY-3 铍材中 BeO 的分布

Fig. 2 Distribution of BeO in hot pressed beryllium material (GY-3)

### 1.3.2 断口形貌

图 3 和图 4 分别为 GY-2、GY-3 高氧铍材断口形貌,从图中发现两种铍材均呈脆性断裂。



图 3 GY-2 铍材断口形貌

Fig. 3 Fractography surface of hot pressed beryllium material (GY-2)



图 4 GY-3 铍材断口形貌

Fig. 4 Fractography surface of hot pressed beryllium material (GY-3)

通过对 GY-3 脆断原因分析,发现其断口周围有大量簇状分布的 BeO [图 5(a)],局部有球状粗大

的 BeO (约 2.5  $\mu\text{m}$ ) 存在 [图 5(b)]。

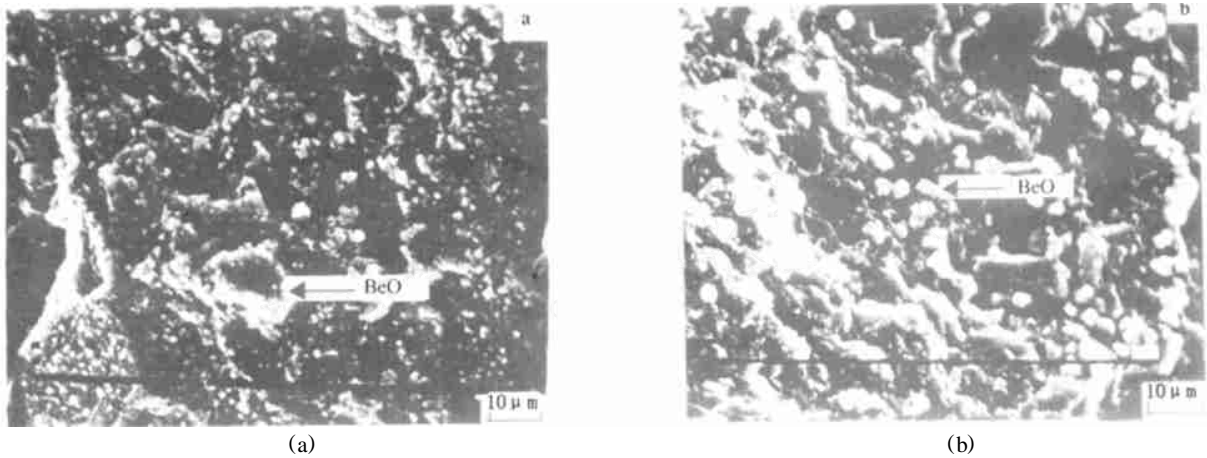


图 5 GY-3 钹材断口 BeO 形貌

Fig. 5 BeO on the fracture surface of hot pressed beryllium material (GY-3)

### 1.3.3 BeO 的透射电镜观察

图 6 为 GY-2 和 GY-3 两种材料的透射电镜照片,从图可以看出,GY-2 钹材中 BeO 较细小(约

0.3  $\mu\text{m}$  ~ 0.4  $\mu\text{m}$ ) 地沿晶界分布,少量在晶内,而 GY-3 钹材的 BeO 颗粒则均较粗大(约 0.6  $\mu\text{m}$ ),成簇状聚集在晶界。

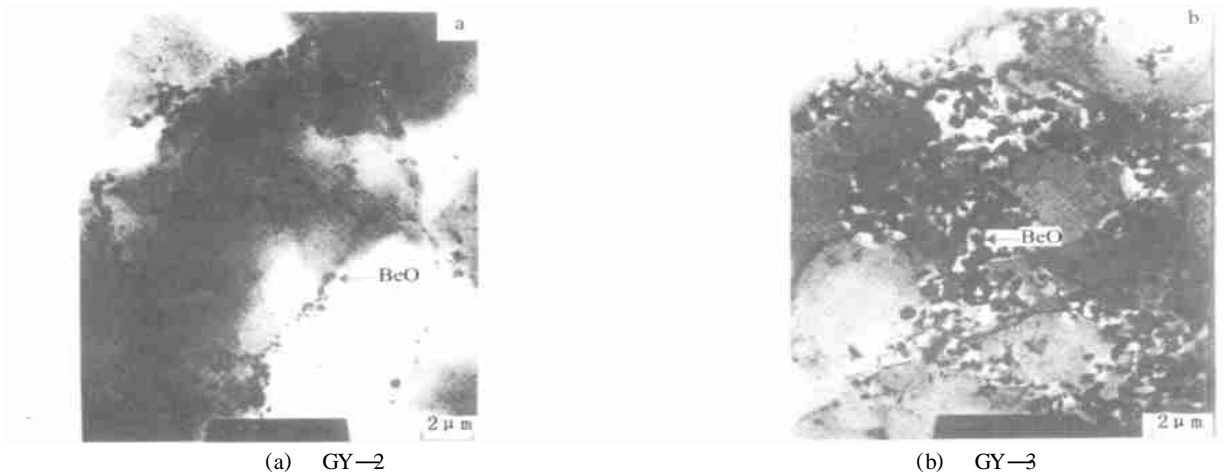


图 6 两种材料的透射电镜照片

Fig. 6 TEM micrographs of GY-2(a) and GY-3(b) hot pressed beryllium materials

## 2 分析与讨论

国外对 BeO 研究认为,BeO 能强化钹的基体,且随 BeO 含量的增加,  $\sigma_{\text{mys}}$  增加<sup>[2,5]</sup>。但本实验的结果表明,并不能单以 BeO 含量来确定其对  $\sigma_{\text{mys}}$  的影响,BeO 对  $\sigma_{\text{mys}}$  的影响还与 BeO 的分布状态有关。

弥散相是位错的障碍,它能钉扎位错,提高位错

密度,从而强化基体。弥散强化材料要求弥散相均匀分布,分布不均匀就会导致弥散相的聚集和粒子间距的增大,结果材料性能下降<sup>[7]</sup>。因此在本实验中细小弥散分布的 BeO 强化效果最好,细小沿晶界分布的 BeO 强化效果视材料基本情况而定;而沿晶界成簇状分布的 BeO 不仅不能强化基体,反而会削

弱基体镀的强度。

本实验三种材料中的 BeO 均沿晶界分布, GY—1, GY—2 由于 BeO 较细小在晶界不连续分布, 因此对材料基体有一定强化作用,  $\sigma_{mys}$  和  $\sigma_b$  均较高。但 GY—3 中的 BeO 在晶界连续呈簇状分布, 断裂方式为脆性断裂。因此, 不仅对强度没有贡献, 反而随其数量的增多, 团聚的加剧, 严重损害了基体强度, 使  $\sigma_{mys}$  和  $\sigma_b$  均大幅度下降。

### 3 结论

在镀膜中, BeO 含量、粒子大小及其分布状况对镀膜  $\sigma_{mys}$  都有很大影响, 细小 BeO 粒子沿晶界均匀弥散分布时有利于获得高的  $\sigma_{mys}$ , 而即使 BeO 含量很高, 但成簇状聚集在晶界, 则对  $\sigma_{mys}$  包括对  $\sigma_b$  有害。

#### 参考文献

1 Marschall C W, Maringer R E, Cepollina F J et al. Dimensional stability and micromechanical properties of materials for use in an orbiting astronomical observatory. In: 13th Structure, Structural

Dynamics and Materials Conf., 1972; AIAA: 72 ~ 325

2 Hugel T J. Dimensional stability of several types of beryllium. In: The Institute of Metals ed. The Metallurgy of Beryllium, London: Chapman and Hall Ltd., 1963: 546 ~ 552

3 Kumar K, McCarthy J, Petri F et al. Materials research for advanced inertial instrumentation task 1: Dimensional stability of gyroscope structure materials. AD - A098165, 1980

4 Kishner S J, Gardopee G J, Magida M B et al. Large stable mirrors: a comparison of glass, beryllium and silicon carbide. In: Paguin R A ed. Dimensional Stability. San Diego, California: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1990; 1335: 127 ~ 139

5 Hodge W. Beryllium for structural applications. Defense Metals Information Center, Columbus, AD278723, 1962: B - 32

6 Pinto N P, Keith G H. High-strength beryllium black. In: The Metals Society ed. Beryllium 1977: Fourth Inter. Conf. On Be., London: The Royal Society, 1977: 16

7 黄培云. 粉末冶金原理(第二版). 北京: 冶金工业出版社, 1997: 402

(编辑 任涛)

(上接第 49 页)

的分布曲线结果表明: 滚压试样表层残余压应力数值和层深都较小, 疲劳后应力松弛较小, 且主要发生于次表层(约 50  $\mu\text{m}$  ~ 100  $\mu\text{m}$ )。

用 SURTRONIC3 型接触式表面粗糙度检测仪对试样粗糙度进行了检测(其中 TA2 在测试前经金相砂纸打磨)。TA2 及滚压试样 10 mm  $\times$  100 mm 面的表面粗糙度  $R_a$  分别为 0.40  $\mu\text{m}$  和 0.16  $\mu\text{m}$ 。

### 4 结论

TA2 经表面滚压强化后虽具有表层残余压应力的松弛较小、表面粗糙度降低等有益因素, 但疲劳强度提高幅度仍然不大。这主要是本试验条件下, 滚压试样属于低应力状态, TA2 仍以滑移为主要塑性变形方式, 孪生的作用没有得到充分发挥。表层残余压应力虽未明显松弛, 但压应力数值及层深较小, 故对疲劳强度的贡献并不突出。

#### 参考文献

1 Altenberger I, Scholtes B, Martin U, Oettel H. Cyclic deformation and near microstructures of shot peened or deep rolled

austenitic stainless steel AISI 304. Mater. Sci. Eng., 1999; A264: 1 ~ 16

2 吕永华, 王天宰. 滚压强化对高强螺栓用 35CrMoV 钢疲劳性能的影响. 机械工程材料, 1989; 72(3): 46 ~ 51

3 北京航空材料研究所. 金属材料的表面喷丸强化. 机械工程材料, 1981; 27(6): 7 ~ 11

4 张建斌, 马勤, 樊丁等. 工业纯钛喷丸强化研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2001; 30(5): 365 ~ 368

5 Wagner L. Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. J. Mater. Sci. Eng., 1999; A263: 210 ~ 216

6 Song S G, Gray G T. Structural interpretation of the nucleation and growth of deformation twins in Zr and Ti — TEM study of twin morphology and defect reactions during twinning[J]. Acta. Mater., 1995, 43(6): 2339 ~ 2350

7 Chichilli D R, Ramesh K T, Hemker K J. The high strain rate response of alpha-titanium: experiments, deformation mechanisms and modeling. J. Acta. Mater., 1998; 46(3): 1025 ~ 1043

(编辑 任涛)