

# W - Mo - Ti 功能梯度材料的断口形貌研究

钟卫, 雍岐龙, 潘俐

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 目前, 金属-金属功能梯度材料的研究开发是材料科学领域的一大热点, 但对采用共沉降法制备的金属-金属功能梯度材料微观组织的研究还很少, 因而对此种功能梯度材料进行显微分析显得尤为重要. 采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS), 对共沉降法制备的 W - Mo - Ti 系功能梯度材料的显微组织、断口形貌进行了较详细的研究.

**关键词:** 功能梯度材料; 显微组织; 断口形貌

**中图分类号:** TG111.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)06-0043-03

## Fracturegraphy Research of Functionally W - Mo - Ti Graded Materials

ZHONG Wei, YONG Qi-long, PAN Li

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The study and development of metal-metal FGM is now a big hotspot. However, the study about the microstructure property relationships of FGM prepared by co-sedimentation is insufficient. So it is very important to study microstructures. Microstructure characteristics and morphology of the fracture of W - Mo - Ti FGM are studied systematically in this paper by scanning electron microscopy (SEM) and other equipments.

**Key words:** functionally graded materials; microstructure; fracture shape

### 0 引言

功能梯度材料(Functionally Graded Materials 简称 FGM)是指构成材料的要素(组成、结构)沿厚度方向由一侧向另一侧呈连续梯度变化,从而使材料性质和功能也呈梯度变化的一种新型材料.这种材料的概念是由日本学者平井敏雄等人于1987年首先提出的,该材料的应用目标主要是航天飞机的防热系统和发动机,最初用于缓和热应力,应用于高温环境特别是用于两侧温差较大的环境,其耐热性、再用性和可靠性是以往使用的陶瓷基复合材料无法比拟的<sup>[1]</sup>.

进入20世纪90年代后,功能梯度材料受到国际材料界的广泛重视,其研究发展也十分迅速,功能梯度材料通过金属、陶瓷、塑料等无机物和有机物的巧妙结合,在航空航天、生物工程、机械工程、光电工程、电磁工程、核工程、民用及建筑、能源工程等领域都有广泛的应用<sup>[2]</sup>.

对材料断口的研究已经有很长的历史,也积累了相当丰富的经验.断口是指材料断裂后所形成的自然表面.尽管实践中的断裂因环境、条件的不同而有不同的断裂方式,但不管方式如何,其断口总是如实地记录着断裂动态变化过程(从裂纹萌生、扩展直到最后分离的整个断裂过程)的信息.对于粉末冶金法制备的材料,分析其断口形貌,可以获得粉末的结晶形态和粒度,粉末颗粒间的结合情况等有用的信息,对粉末冶金过程一些控制因素和烧结质量进行评价.本文就是利用扫描电子显微镜(SEM),对共沉降法制备的 W - Mo - Ti 系功能梯度材料的断口形貌进行研究,从而获得相关资料,帮助在金相、金属物理和断裂力学之间架起联系的桥梁.

收稿日期:2004-04-16. 基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:59961002).

第一作者简介:钟卫(1972~),男,硕士研究生.主要研究方向:新材料与新工艺. E-mail: kmzw\_1972@163.com.

## 1 实验方法及样品制备

### 1.1 实验方法

考虑到制造成本的控制以及不同材料应用背景的需要,本实验采取共沉降法<sup>[3]</sup>.这种方法制备的功能梯度材料的性价比较高,并且能在更宽的密度范围内成功制备出 W - Mo - Ti 系功能梯度材料,这对进一步开展对功能梯度材料的研究有着很强的理论和实际意义.

### 1.2 样品制备

实验材料选用新鲜、高纯度的钨、钼、钛金属粉末,见表1.样品的制备过程如下:首先按设计的配比称取各种金属粉末,将金属粉末放入无水乙醇中配比成浓度为0.6%的均匀悬浮液,然后在 $\phi 45 \times 1000$  mm的玻璃管中进行沉降.沉积体经烘干,压制成型后,移至石墨模具中,在1473 K、30 MPa压力下,真空热压烧结1 h.经加压随炉冷却,即得到 W - Mo - Ti 系 FGM 样品.烧结样品的尺寸为 $\phi 45$  mm,厚3 mm.样品已经镶嵌在树脂上,先用金相砂纸由粗(120号)到细(1600号)研磨,然后用 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 水溶液在抛光机上抛光,制成金相样品.因为钛比较难腐蚀,其腐蚀剂一般选用氢氟酸及硝酸的混合溶液,氢氟酸的主要作用是侵蚀组分,硝酸的作用是去除腐蚀产物并使表面光洁.因此在本实验中我选用的腐蚀剂是( $\text{HNO}_3$  25 mL,  $\text{HF}$  15 mL, 水60 mL),腐蚀时间为8 min.腐蚀后的样品均用水清洗,并滴上无水乙醇脱水,最后用电吹风吹干.

表1 实验原料的有关参数

Tab.1 The relevant parameters of test materials

原料名称	纯度 (质量分数)	平均粒径 $\mu\text{m}$	理论密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点 $/^\circ\text{C}$
W	> 99.8%	1.7	19.30	3 410
Mo	> 99.5%	2.4	10.22	3 168
Ti	> 99%	20	4.51	1 678

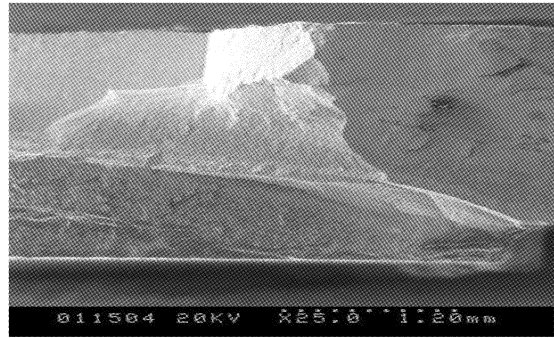


图1 W - Mo - Ti 系功能梯度材料的断口形貌

Fig.1 The fracture shape of W - Mo - Ti functionally graded materials

## 2 功能梯度材料的断口形貌研究

研究所用的样品的断口是重锤敲击形成的.图1是 W - Mo - Ti 系功能梯度材料的断口形貌.整个断面分为五层,界面明显.处于图中上部分的是钨层,第二层是钨 - 钼层,第三层是钼 - 钛层,钼占主要位置,第四层是钛 - 钼层,钛占主要位置,最下面的是钛层.富钨区的断口很平整,紧挨着的钨 - 钼层突起的部分有一些棱角,钼 - 钛层以及钛层看起来比较平缓,但存在撕裂的痕迹.

图2(a) ~ (e)是 W - Mo - Ti 系各梯度层和界面的断口形貌.图2(a)所显示的是钨层的断口形貌,图中的黑洞经能谱分析是钛.这一层很明显是沿晶断裂,部分区域在断裂时发生撕裂.就整个来看,钨的颗粒细小并且排列紧密大小均匀.

图2(b)是钨 - 钼层的断口形貌,从图中可以看出这一层断裂表面凸凹不平,颗粒的大小也不均匀.它依然是以沿晶断裂为主<sup>[4]</sup>.但从图片中可以看出在这一区中除了沿晶断裂外还存在撕裂.界面断口处还可见到抛物线型韧窝,这是由于界面处存在显微孔洞,部分金属在撕裂应力作用下产生塑性变形使显微孔洞不断长大形成了韧窝.

图2(c)显示的是过渡层,上面部分是钼 - 钛层,钼占主要位置;下面部分是钛 - 钼层.从图中比较可以看出,上面部分主要是沿晶断裂,颗粒相对而言细小些,但是粘结不够紧凑.下面部分明显比上面部分要紧凑些,但颗粒要大些.

图2(d)是以钛为主的钛 - 钼层.这一层具有明显的解理断裂特征.除了穿晶解理断裂外,从断口形貌可以看出在晶界上有很多的撕裂棱,属于延性断裂.这是因为元素 Mo 的加入能使  $\beta$  - Ti 在室温下存在.而  $\beta$  - Ti 的塑性比  $\alpha$  - Ti 要好.从图中我们还可以看到有一些韧性断裂,这是由于钨和钼产生的固溶体部分

发生断裂而产生的。

图 2(e)是富钛区的断口形貌,存在典型的穿晶解理断裂,有河流花样和解理台阶.材料在断裂时发生解理,如果是沿着某一个解理面断开的,则其断口的电子金相应是一个理想的平坦晶面.但在实际中晶体总是存在缺陷的,如位错、夹杂物、沉淀相等,所以,实际上并不是沿着一个晶面解理,而是沿着一族相互平行的(具有相同的晶面指数),位于不同高度的晶面解理.在不同高度的平行解理面之间存在着台阶,即解理台阶<sup>[5]</sup>.解理台阶可以由解理裂纹与螺位错相交截而形成,也可以是通过次生解理或撕裂(剪切断裂)的方式形成.图中的解理台阶的形成方式大部分是后者.另外,在解理裂纹扩展过程中,众多的台阶相互汇合,便形成河流花样,如图片中所示,很形象;同时也可以看到解理裂纹穿过扭转晶界使河流发生激增.由于河流的流向恰好与裂纹扩展方向一致,因此可根据河流花样的流向,判断解理裂纹在微观区域内的扩展方向<sup>[6]</sup>.

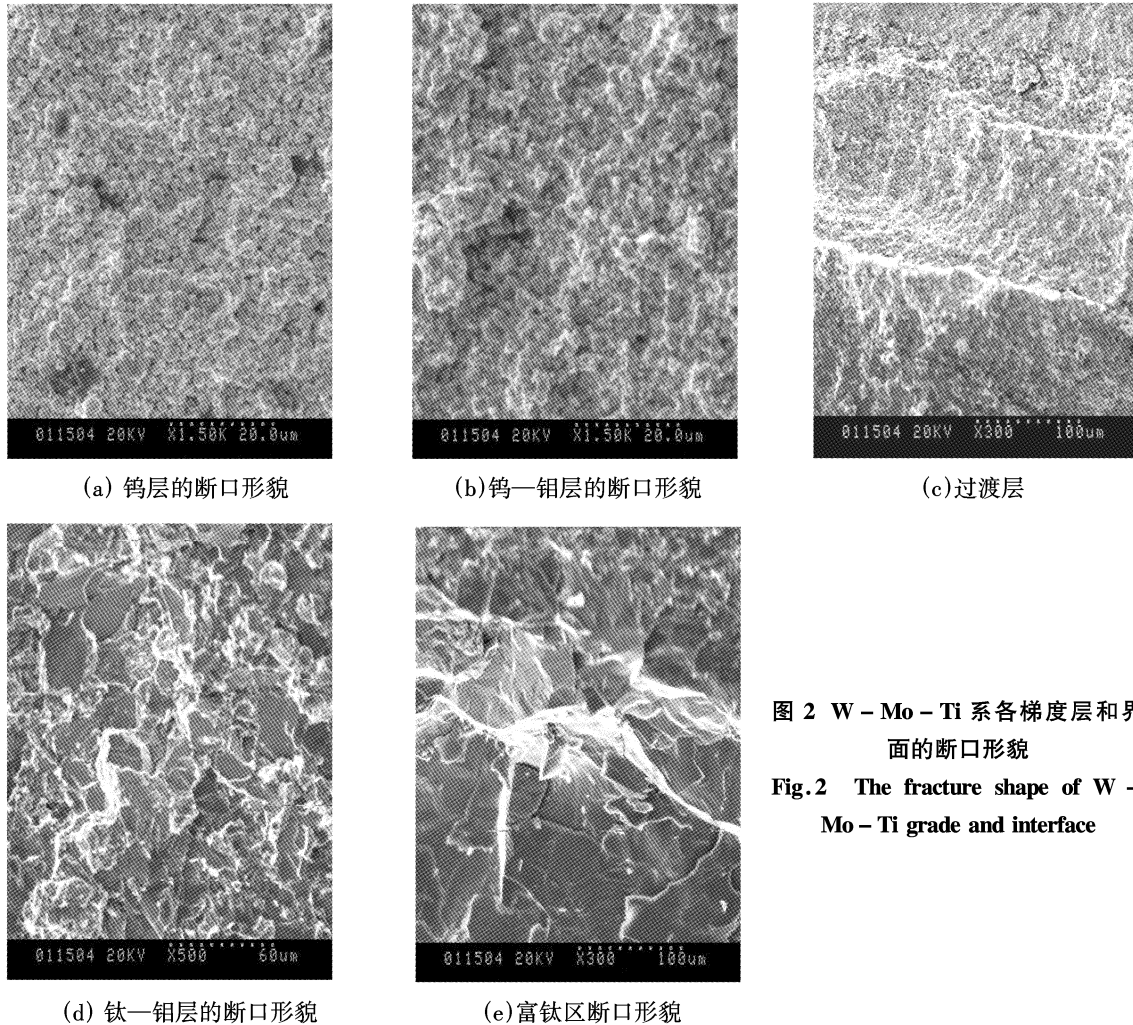


图 2 W - Mo - Ti 系各梯度层和界面的断口形貌

Fig.2 The fracture shape of W - Mo - Ti grade and interface

### 3 结论

采用扫描电子显微镜(SEM)对共沉降法制备的 W - Mo - Ti 系功能梯度材料的断口形貌进行了观察和研究,对断裂特征进行了分析,对断裂机理进行了探讨,得出如下结论:

1) 断裂时功能梯度材料各梯度层的断裂情况并不相同,其断口形貌呈现出明显的连续变化特征,在富钨区和钨 - 钼区以沿晶断裂为主,钼 - 钛区和富钛区则主要是穿晶解理断裂;

2) 功能梯度材料的富钨区和钨 - 钼区主要以沿晶断裂为主,大部分属于脆性断裂,但在不同金属相区也存在小部分的韧性断裂,在钨 - 钼层还出现了韧窝;

(下转第 58 页)

## 5 结束语

在国家计划委员会高科技产业化基金的资助下,自主开发了具有开放式控制系统的拆垛、码垛 SCARA 机器人,且已在某卷烟厂得到了实际应用.该机器人机械结构设计合理,控制系统的硬件和软件具有较高开放性.除了用于拆垛、码垛以外,还可以广泛用于物流自动化行业中的物料搬运、分拣等方面,具有广阔的市场前景.此外,由于该机器人的控制系统具有较好的可扩展性和兼容性,因此极易扩展、移植用于其余类型的机器人,数控机床等自动化设备.

### 参考文献:

- [1] 孙斌,杨汝清.开放式机器人控制器综述[J].机器人,2001,23(4):374~378.
- [2] 谈世哲,梅志千,杨汝清.基于 DSP 的工业机器人控制器的设计与实现[J].机器人,2002,24(2):134~139.
- [3] 彭韬,周学才.基于国产 MCT8000 运动控制卡的开放式结构机器人控制系统[J].制造业自动化,2001,23(2):65~67.
- [4] 戴齐,姚先启.机器人程序设计语言[J].机器人 1997,19(5):390~399.

(上接第 38 页)

(2) 单一的目标来优化轧制规程会对生产产生很多不利因素,因此对于复杂的热连轧过程应采用多目标优化模型;

(3) 模糊学的理论和方法为解决热轧轧制变形规程的多目标优化设计问题提供了一条有效的解决途径,它避免了加权系数法组合的多目标优化问题的人为因素,可以获得令人满意的综合效果.

### 参考文献:

- [1] 刘战英.轧制变形规程优化设计[M].北京:冶金工业出版社,1996.198.
- [2] 孙一康.带钢热连轧数学模型基础[M].北京:冶金工业出版社,1979.107.
- [3] 曹鸿德.塑性变形力学基础与轧制原理[M].北京:机械工业出版社,1981.230.
- [4] 王彩华,宋连天.模糊论方法学[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.121.

(上接第 45 页)

3) 功能梯度材料的钼-钛区以穿晶解理断裂为主,同时由于钼-钛区存在固溶体,使塑性较好的  $\beta$ -Ti 分布在边界上,因而在其颗粒边界发生韧性断裂;

4) 功能梯度材料的富钛区完全是穿晶解理断裂,是典型的脆性断裂.

### 参考文献:

- [1] 陈方明,朱诚意.功能梯度材料的研究现状及发展[J].Electroplating & Finishing, 2000,6:42~48.
- [2] Government Industrial Research Institute Tohoku. Proceedings of Functional Gradient Materials[J]. Japan, Metallurgia, 1998, 57(7):302~304.
- [3] 熊华平,张联盟,李俊国,等.一次烧结制备 W-Mo-Ti-TiAl 系密度梯度材料[J].中国有色金属学报,2000,4:491~496.
- [4] 陈世朴,王永端.金属电子显微分析[M].北京:机械工业出版社,1990.596~598.
- [5] 武汉工业大学等四校合编.物相分析[M].武汉:武汉工业大学出版社,1994.52~60.
- [6] 冶金工业部钢铁研究院编.难熔金属断口分析图谱[M].北京:科学出版社,1988.50~53.