

# EBPVD 法制备 NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub> - 8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微层复合板的拉伸力学性能研究 \*

史丽萍 赫晓东 李

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 采用电子束物理气相沉积(EBPVD)工艺制备了 NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub> - 8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微层复合板,测试了该材料在不同温度下的拉伸力学性能,初步探讨了拉伸强度与延伸率随温度变化而变化的可能机理。结果表明:该材料的屈服极限、强度极限和最大延伸率均随温度的升高而降低,在室温时它是一种脆性材料而在高温时则是延性良好的塑性材料。

**关键词** 电子束物理气相沉积,微层复合板,拉伸力学性能

## Research on Tensile Properties of NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub>-8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Micro-layer Composite Laminate Manufactured by EBPVD

Shi Liping He Xiaodong Li Yao

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The micro-layer composite laminate whose compound is NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub>-8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can be manufactured by electron beam physical vapor deposition (EBPVD). The tensile properties of this material are examined at different temperatures. Then the possible mechanism is discussed about the relationship how its strength and elongation have changed with the temperatures. It is found that the yield strength, ultimate tensile strength and the largest elongation decrease with increase of temperature. At room temperature this material is a kind of fragile one, while at high temperature it becomes plastic with good ductility.

**Key words** Electron beam physical vapor deposition (EBPVD), Micro-layer composite laminate, Tensile property

### 1 前言

电子束物理气相沉积(EBPVD)是一项较新的电子束加工技术,与传统的粉末冶金方法相比,它可以实现低杂质含量,结构、晶粒可控,具有膜层致密、成分组织均匀,可形成柱状多晶体的显微结构,物料沉积速率高以及热效率高等优点<sup>[1~5]</sup>。利用此工艺制备了微层复合板,并拟将这种新型材料大面积地应用于航空航天领域中某些高温环境,根据高温环境应用及材料设计的原则<sup>[6]</sup>,该微层复合薄板材料的

拉伸性能特别是高温拉伸性能具有十分重要的地位。为此,本文详细研究了 NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub> - 8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微层复合材料在不同温度下的拉伸力学性能,探讨了温度对其强度和延伸率的可能影响,并对该复合材料在不同温度下的形变规律进行探讨。

### 2 实验

#### 2.1 NiCrAlY/ ZrO<sub>2</sub> - 8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 微层复合板的制备

所选原材料为耐高温的镍基合金 NiCrAlY 和性能稳定的陶瓷 ZrO<sub>2</sub> - 8 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其化学组成(质量分数)

收稿日期:2002-12-12;修回日期:2003-03-25

\*黑龙江省自然科学基金(E01-07)和中国博士后科学基金资助(LB0047)

史丽萍,1976年出生,博士研究生,主要从事高马赫数飞行器热防护系统的研究工作  
宇航材料工艺 2003年 第6期

为:18%Ni,22%Cr,5%Al,0.6%Y,0.3%Fe,0.2%Si,1.5%Co和ZrO<sub>2</sub>-8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。制备过程简述如下:在一定工作压力的真空室中,以电子枪所发出的电子束流作为热源,使各原材料依次经过升温、熔融、气化这一过程,最终气相原子将逐层沉积在基板上。

该制备过程中所涉及到的电子束物理气相沉积设备为哈尔滨工业大学复合材料研究所从乌克兰引进。图1为电子束物理气相沉积设备的双源蒸发工艺原理示意图。

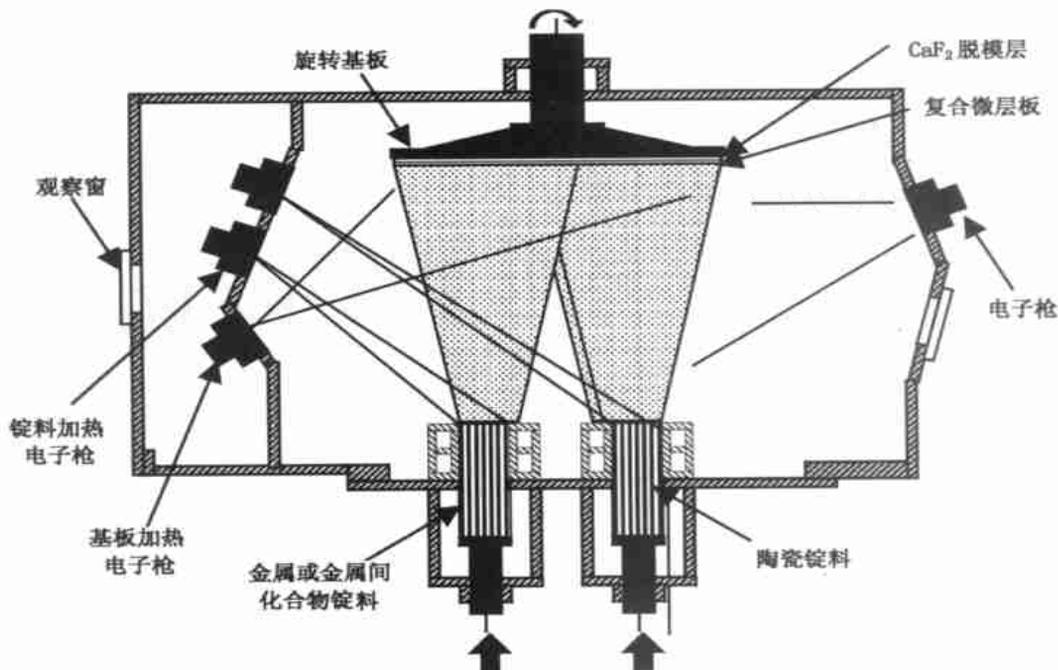


图1 电子束物理气相沉积的双源蒸发工艺原理示意图

Fig.1 Principle schematic of double source evaporation by EBPVD

## 2.2 拉伸力学性能的测试

对未经过任何后处理的沉积制品,采用线切割技术按国家标准制备室温与高温拉伸试样。室温拉伸强度测试采用了 INSTRON5569 电子万能材料试验机,第一横梁速度为 0.5 mm/min,而高温拉伸测试采用的设备则是 GLEEBLE1500 热/力模拟试验机,拉伸速度为 0.5 mm/min,测试温度分别为 800、1000 及 1200,试验气氛为空气。

## 3 结果与分析

### 3.1 室温拉伸性能分析

图2是NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>微层复合材料在室温时的拉伸应力—应变曲线。由图2可知,该复合材料在室温时的断裂强度较高,达到727.6MPa,而其最大延伸率则相当小,还不到0.3%,远远小于5%。事实上在实验过程中可发现,该材料在拉伸测试时不出现屈服阶段,故可认为这种复合材料在室温时完全是一种脆性材料。

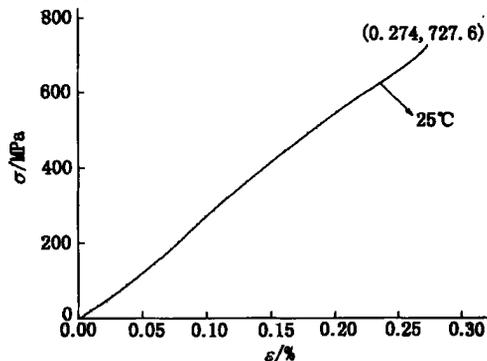


图2 NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>微层复合材料的室温拉伸力学性能

Fig.2 Tensile properties of NiCrAlY/ZrO<sub>2</sub>-8Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> micro-layer composites at room temperature

根据在EBPVD工艺过程中的晶体生长机制,每层晶体的生长过程是一个瞬态降温的过程,即在短时间内,存在着一个由高温气态转变为温度较高的液态,再转变成温度较低的固态或者直接从高温气态转变为固态的热力学变化过程。显然不仅在高温宇航材料工艺 2003年 第6期

蒸气与旋转基板间必定存在一个巨大的温度差,而且在逐层生长的新老晶体之间也将存在不均匀的温度分布。则由残余热应力  $R$  与温差  $T$  之间的关系式:

$$R = a \cdot T \cdot \frac{E_r \cdot E_m}{E_r + E_m}$$

式中:  $a$  为 NiCrAlY 合金与陶瓷层  $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  的线膨胀系数之差;  $T$  为旋转基板与高温蒸气的温度差;  $E_r$  为 NiCrAlY 合金的弹性模量;  $E_m$  为陶瓷层  $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  的弹性模量。

$R$  随着温差的增大而成正比地增大,所以在逐层生长的新老晶体之间必定要产生较大的残余热应力,它的存在会使晶体的断裂强度降低,并增加破坏的可能性。由于制备过程中残余热应力的存在,在室温拉伸时,该微层复合板就表现出较大的脆性。

### 3.2 高温拉伸性能分析

图 3 是 NiCrAlY/ $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  微层复合材料在高温时的拉伸应力—应变曲线。

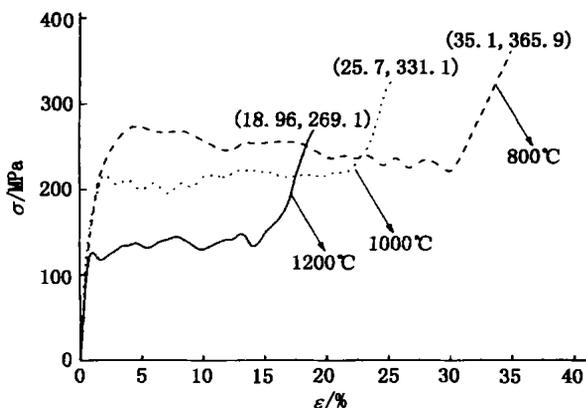


图 3 NiCrAlY/ $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  微层复合材料的高温拉伸力学性能

Fig. 3 Tensile properties of NiCrAlY/ $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  micro-layer composites at high temperatures

由图 3 可知,对于不同温度下的拉伸应力—应变曲线,均具有相似的变化趋势,三曲线均明显地具有弹性阶段、塑性阶段及强化阶段,但该材料在高温下的屈服极限值、强度极限值以及最大延伸率均随着温度的升高而降低。这种现象可能的解释是:在高温拉伸测试过程中同时存在加工硬化和动态再结晶软化两个相反的过程,温度越高,再结晶软化越占主导地位,那么在合金和陶瓷层较好的结合界面处,会有一些杂质元素再结晶长大并且富集于界面处,从而对材料拉伸性能产生了不利的影响。

宇航材料工艺 2003 年 第 6 期

比较图 2、图 3 可以得出:虽然后者的最大断裂强度值有不同程度的降低,尤其是与室温下的强度极限值相比,高温下(800、1000、1200)的强度极限值分别降低了 49.7%、54.5%、63.0%。但在高温拉伸时,该复合材料均表现出了良好的塑性屈服性能,因为其最大延伸率也有了很大程度的提高,分别为室温时最大延伸率的 128 倍、94 倍和 69 倍。显然这种材料在高温下则成为一种延性较好的塑性材料。这种现象可能的原因是:在测试该材料的高温拉伸强度时,温度升高这一过程在一定程度上相当于进行了热处理过程,NiCrAlY/ $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  微层复合板的界面两侧元素互扩散程度加剧,从而界面的冶金结合强度得到提高,故该复合材料就表现出较好的延性。

### 4 结论

采用电子束物理气相沉积工艺可以制备出 NiCrAlY/ $ZrO_2 - 8Y_2O_3$  微层复合板,其室温延伸率还不到 0.3%,呈显著的脆性材料的特征,故对 EB-PVD 工艺制备所得的微层复合板进行退火后处理是相当必要的;该材料高温拉伸延伸率均有了不同程度的提高,最小值为 18.96%,是一种延性良好的塑性材料,能够某些满足航空航天领域高温环境的应用要求;在 800~1200 的温升范围内,该材料的屈服强度与断裂强度均有不同程度的降低。

### 参考文献

- 徐滨士,刘世参.表面工程新技术.北京:国防工业出版社,2001:214~291
- Bi Xianfang, Xu Huibin, Gong Shengkai. Investigation of the failure mechanism of thermal barrier coatings prepared by electron beam physical vapor deposition. Surface and Coating Technology, 2000;130(1):122~127
- Guo Hongbo, Xu Huibin, Bi Xianfang, Gong Shengkai. Preparation of  $Al_2O_3$ -YSZ composite coating by EB-PVD. Materials Science and Engineering: A, 2002;325(2):389~393
- Guo Hongbo, Gong Shengkai, Xu Huibin. Evaluation of hot-fatigue behaviors of EB-PVD gradient thermal barrier coatings. Materials Science and Engineering: A, 2002;325(1):261~269
- Guo Hongbo, Gong Shengkai, Zhou Chungeng, Xu Huibin. Investigation on hot-fatigue behaviors of gradient thermal barrier coatings by EB-PVD. Surface and Coating Technology, 2001;148(2):110~116
- 黄乾尧,李汉康.高温合金.北京:冶金工业出版社,2000:9~150

(编辑 任涛)