

## 热障涂层皱曲现象的数值模拟研究\*

何伶俐<sup>1,2</sup>, 张 坤<sup>1</sup>, 陈光南<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

**摘 要:** 对装机使用后的热障涂层叶片进行观察, 发现电子束物理气相沉积涂层和等离子喷涂涂层表面均出现皱曲, 不同于通常意义上的陶瓷层/粘接层界面皱曲。为了解释这种皱曲伴生的涂层断裂以及与皱曲特征参数的关系, 利用 ANSYS 进行了数值模拟, 表明皱曲波长对涂层断裂位置产生影响。短波长时面层凹陷处等效应力更大, 属危险点。长波长时面层凸起处应力更大, 在面层/底层界面处属危险点。

**关键词:** 热障涂层; 皱曲; 数值模拟

中图分类号: TB35

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0046-04

### Numerical Simulation on Wrinkling Phenomenon of Thermal Barrier Coatings

HE Ling-rong<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, CHEN Guang-nan<sup>1</sup>

(1. MAM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** Two types of thermal barrier coatings prepared by EB-PVD and PS respectively present surface wrinkling after service. This characteristic is different from that of conventional interface rumpling in that both top coat and bond coat develop undulation. In order to explain the behavior of TC fracture, a new wrinkling mode is established and analyzed through numerical simulation. It is believed that undulation wavelength affect the stress field and fracture location of TC.

**Key words:** thermal barrier coatings; wrinkling; numerical simulation

## 0 引 言

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 大量应用于航空航天领域, 有两层和梯度层等结构形式, 目前大量使用的为两层结构, 包括表面陶瓷层 (top coat, TC) 和起过渡作用的粘结层 (bond coat, BC), 厚度从几十微米到几百微米不等。面层主要是 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 稳定的 ZrO<sub>2</sub> (yttria-stabilized zirconia, YSZ), 粘结层 (底层) 采用 NiCrAlY、NiCoCrAlY 等合金。电子束物理气相沉积 (electron beam-physical vapor deposition, EB-PVD) 和等离子喷涂 (plasma spray, PS) 是热障涂层的两种主要制备方法<sup>[1]</sup>。

热障涂层在使用时有时会出现粗糙度增加的现象, 称为皱曲, 以前多关注界面粗糙度增加即界

面皱曲 (rumpling)。模型分析表明, 在皱曲的波峰和波谷处, 界面存在横向拉应力, 从而诱导涂层破坏。Tolpygo 等人<sup>[2, 3]</sup>的热循环模拟试验表明, 热障涂层表面也会出现粗糙度增加的现象, 称为表面皱曲 (wrinkling), 但未建立模型进行分析。文中对叶片 EB-PVD 和 PS 热障涂层表面皱曲特征进行观察, 提取特征参数, 并进行数值模拟分析, 以期进一步认识表面皱曲成因、特征及其效应。

## 1 试验观察

叶片经装机使用后, 无论是 EB-PVD 和 PS 热障涂层 (ZrO<sub>2</sub>), 都能在某些部位观察到明显的表面皱曲特征。图 1 (a) 为 PS 涂层, 在叶背冷却孔前方存在皱曲, 紧靠冷却孔处, 涂层已经脱落。涂层相对完好处的显微图片见图 1 (b), 可以看出面层为典型的喷涂组织, 疏松多孔。

图 2 (a) 为 EB-PVD 涂层, 使用时间相对较长,

收稿日期: 2009-12-15; 修回日期: 2010-03-10

基金项目: \*国家自然科学基金重点项目 (50531060) 和面上项目 (50471087)

作者简介: 何伶俐(1985—), 女(汉), 湖南益阳人, 硕士研究生。

在叶盆排气边存在长波长皱曲, 紧靠排气边处涂层脱落。观察涂层横截面, 发现上述皱曲与 Tolpygo 等人<sup>[3]</sup>的试验结果不同。在 1 h 热循环试验中, 皱曲是由于热障涂层面层 (陶瓷层) 和底层 (粘接层) 界面存在多处分离, 在界面分离处面层屈曲

(buckling), 众多屈曲构成表面波纹状皱曲。但在观察中, 面层皱曲往往对应于底层皱曲 (图 2 (b) 为 EB-PVD 的短波长皱曲, 图中箭头处指示了 6 个波动)。涂层相对完好处的显微图片见图 3, 可以看出面层为典型的物理气相沉积组织, 呈柱状晶结构。

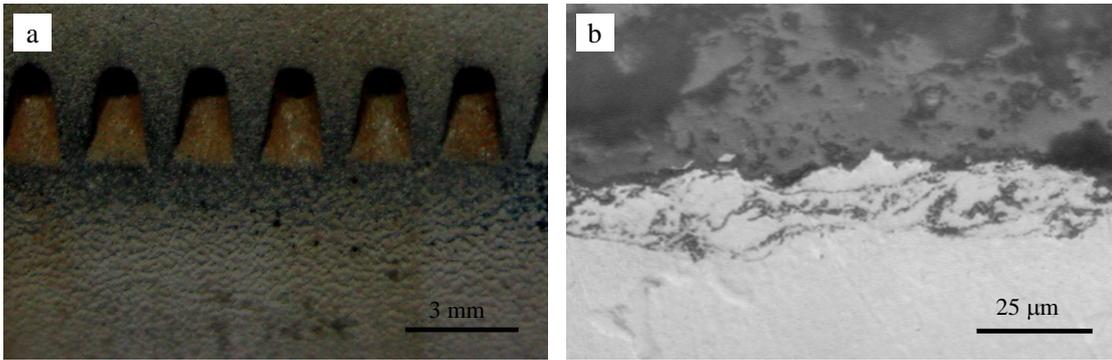


图 1 等离子热障涂层的表面皱曲 (a) 及其显微组织 (b)

Fig.1 Surface wrinkling of plasma sprayed TBC (a) and its cross-section optical micrograph (b)

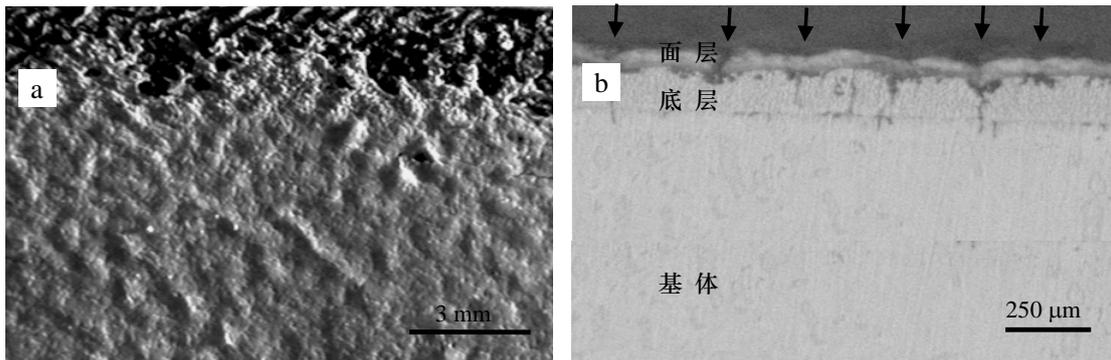


图 2 EB-PVD 热障涂层的表面皱曲 (a) 及其横截面特征 (b)

Fig.2 Surface wrinkling of EB-PVD TBC (a) and its cross-section optical image (b)

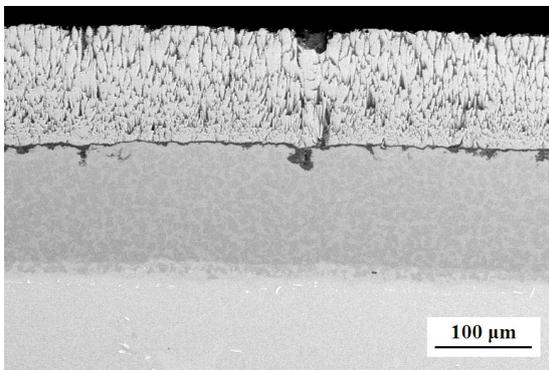


图 3 EB-PVD 热障涂层的显微组织

Fig.3 Cross-section scanning electron micrograph of EB-PVD TBC

## 2 模型分析

热障涂层在实际服役中, 受到热冲击、气动扭矩、振动等作用, 在无面层存在情况下, 底层皱曲是常见现象。起皱的影响因素包括制备和使用过程中在面层和底层之间的热氧化层 (thermally grown oxide, TGO) 的生长、各层之间的热失配、腐蚀作用、塑性变形等, 形成机制复杂。当有面层存在时, Tolpygo 等人<sup>[3]</sup>判断, 陶瓷的刚性对底层皱曲应有抑制作用, 所需条件有二: 界面完好和面层较厚。文中观察到的皱曲处的面层较薄 (对于 EB-PVD, 皱曲处的面层厚度约 50 μm), 未能抑制底层皱曲, 与这一判断相符。

为此提出图4模型。此处未考虑底层断裂和界面断裂,仅考虑底层已皱曲情况下面层应力及其断裂危险点。图4(a)对应图2(b)情况,此时皱曲波长较短,在涂层凹陷处断裂。图4(b)对应图2(a)情况,此时波长较长,在涂层凸起处断裂。

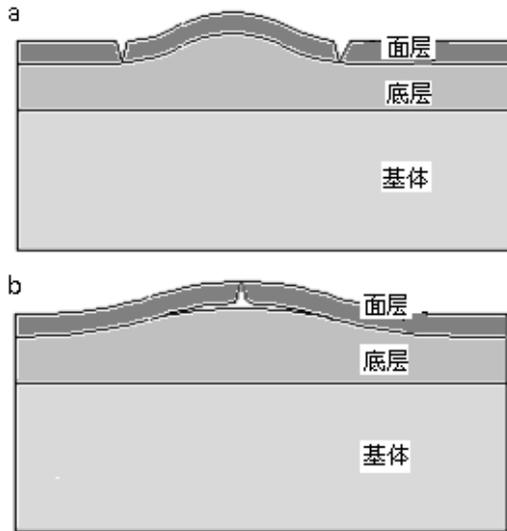


图4 热障涂层面层皱曲开裂模式图(a)短波长(b)长波长  
Fig.4 Cracking mode of TC accompanying BC wrinkling with (a) short wavelength and (b) long wavelength

采用Ansys软件进行模拟,根据实际涂层情况取模型宽度为 $1500\ \mu\text{m}$ ,基体、底层、面层厚度分别为 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $140\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ ,材料分别为镍基高温合金、NiCrAlY和8%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 稳定的 $\text{ZrO}_2$ 。假设初始为零应力状态,考虑起皱的存在对应力分布及断裂行为的影响,皱曲振幅(即凸起高度)取 $20\ \mu\text{m}$ 。模型底部约束y方向位移,左侧对称,右侧耦合x方向位移。整个模型经过一个热循环,在10 min内从 $25\ ^\circ\text{C}$ 升温至 $1100\ ^\circ\text{C}$ 保温40分钟,再在10 min内降至 $25\ ^\circ\text{C}$ 。当实际起皱形貌为条带状时可以应用平面应变假设,不考虑蠕变,采用PLANE13单元,基体与底层考虑塑性性质,均采用双线性等向强化模型。弹塑性计算参数和热参数参见文献<sup>[4-7]</sup>,在此不再列出。

由图5可以看出,加热时由于基体和底层膨胀系数大于面层,因此面层大部分区域横向受拉应力。且由于起皱的存在,应力分布不均匀,波长为 $300\ \mu\text{m}$ 时,x方向最大最小应力值相差近180 MPa。振幅一定时,随着波长的增加涂层起伏减弱,接近平面,应力变化趋于平缓,分布区域相对均匀。图6更清楚地显示,对于短波长,面层凹陷处等效应力

更大,属危险点。对于长波长,凸起处应力更大,更重要的是面层底部应力最大,此处优先断裂可诱导界面开裂<sup>[8]</sup>。

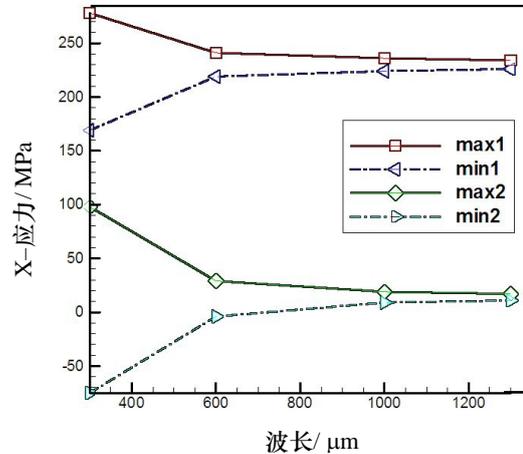


图5 面层x方向最大及最小应力随波长的变化曲线: max1、min1为升温至 $1100\ ^\circ\text{C}$ 时的值; max2、min2为一个循环后残余应力值

Fig.5 The variation of TC stress with wrinkling wavelength: max1 and min1 indicating maximum and minimum stress at  $1100\ ^\circ\text{C}$ , respectively; max2 and min2 indicating the maximum and minimum residual stress after one thermal cycle, respectively.

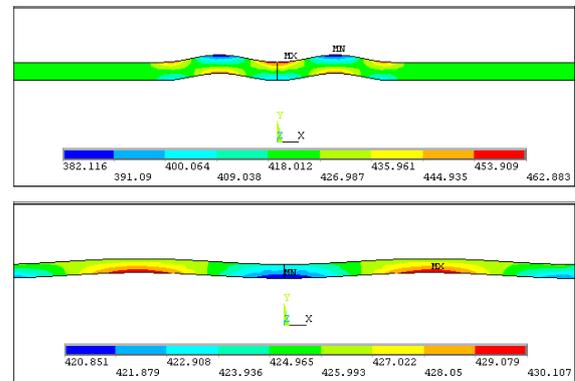


图6 皱曲波长分别为 $300\ \mu\text{m}$ 和 $1000\ \mu\text{m}$ 时面层升温至 $1100\ ^\circ\text{C}$ 的等效应力云图

Fig.6 The von mises stress map of TC with wavelength of  $300\ \mu\text{m}$  (up) and  $1000\ \mu\text{m}$  (bottom) at  $1100\ ^\circ\text{C}$

### 3 结论

(1) 叶片上的热障涂层服役时存在面层和底层同时皱曲的情况。

(2) 数值模拟显示,皱曲波长对涂层断裂位置产生影响。短波长时面层凹陷处拉应力更大,属危险点。长波长时面层凸起处应力更大,在面层/底层界面处属危险点。

## 参考文献:

- [1] 丁彰雄. 热障涂层的研究动态及应用 [J]. 中国表面工程, 1999, (2): 31-37.
- [2] Tolpygo V K, Clarke D R, Murphy K S. Evaluation of interface degradation during cyclic oxidation of EB-PVD thermal barrier coatings and correlation with TGO luminescence [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188-189: 62-70.
- [3] Tolpygo V K, Clarke D R. Morphological evolution of thermal barrier coatings induced by cyclic oxidation [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163-164: 81-86.
- [4] Zhou Y C, Hashida T. Coupled effects of temperature gradient and oxidation on thermal stress in thermal barrier coating system [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 4235-4264.
- [5] 席军, 段祝平. 热障涂层在机械载荷与激光联合作用下的变形与破坏研究 [J]. 机械强度, 2006, 28(1): 088-095.
- [6] 侯平均, 王汉功, 查柏林, 等. 界面粗糙度对双层热障涂层残余应力影响的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(7): 82-85.
- [7] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001. 8.
- [8] Zhang Kun, Peng Qing, Chen Guang-nan. A Special Method to Evaluate the Strong Adhesion between Brittle Coating and Ductile Substrate [J]. Key Engineering Materials, 2007, 353-358: 1749-1752.

作者地址: 北京市北四环西路 15 号 100190

中国科学院力学研究所

Tel: (010) 82544270 (张坤)

E-mail: kzhang@imech.ac.cn

\*\*\*\*\*

•本刊讯•

## 《表面工程的理论与技术》出版

由徐滨士院士、朱绍华教授主编的《表面工程的理论与技术》是 99 年版再版后的修订版。书中阐述了表面工程的内涵、学科体系及发展表面工程的意义, 探讨了贯穿于各种表面技术之中的基本科学技术问题, 融入了复合表面工程、纳米表面工程、表面自修复技术和自动化表面技术等方面的最近研究成果。

(魏世丞 供稿)

(上接第 45 页)

## 参考文献:

- [1] Xu J, Zhou Z R, Zhang C H, et al. An investigation of fretting wear behaviors of bonded solid lubricant coatings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 146-151.
- [2] Naofumi Hiraoka. Wear life mechanism of journal bearings with bonded MoS<sub>2</sub> film lubricants in air and vacuum [J]. Wear, 2002, 249: 1014-1020.
- [3] 陈建敏, 冶银平, 党鸿辛. 粘结固体润滑膜及其应用 [J]. 摩擦学学报, 1994, 14 (2): 180-189.
- [4] Langlade C, Vannes B, Taillandier M, et al. Fretting behavior of low-friction coatings: contribution to industrial selection [J]. Tribol. Int. 2001, 34: 49-56.
- [5] Ikezawa Atsushi, Yamaguchi Tetsuji. Aqueous coating agent of hydrophilic resin, MoS<sub>2</sub> and Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> and/or Sb<sub>2</sub>S<sub>5</sub>[P]. United States Patent, 6538051.
- [6] 王均安, 于德洋, 欧阳锦林. 二硫化钼溅射膜在潮湿空气中贮存后润滑性能的退化与实效机理 [J]. 摩擦学学报, 1994, 14(1): 25-32.
- [7] 陈铤, 施雪珍, 顾国芳. 双组分水性环氧树脂涂料 [J]. 高分子通报, 2002, 6: 63-70.
- [8] 陈立庄, 高延梅, 胡翔波, 徐飞. 水分散型水性环氧涂料的制备 [J]. 材料保护, 2005, 38(10): 51-53.
- [9] Randhir Parmar, Kalpesh Patel, Jayant Parmar. High-performance waterborne coatings based on epoxy-acrylic-graft-copolymer-modified polyurethane dispersions [J]. Polym. Int., 2005, 54: 488-494.
- [10] Chen W J, Wang S C, Chen P C, et al. Hybridization of aqueous PU/epoxy resin via a dual self-curing process [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110: 147-155.
- [11] Zabinski J S, Donley M S, McDevitt N T. Mechanistic study of the synergism between Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MoS<sub>2</sub> lubricant systems using Raman spectroscopy [J]. Wear, 1993, 165: 103-108.
- [12] Li X B, Gao Y M, Xing J D, et al. Wear reduction mechanism of graphite and MoS<sub>2</sub> in epoxy composites [J]. Wear, 2004, 257: 279-283.

作者地址: 甘肃省兰州市天水中路 18 号 730000

兰州化学物理研究所

Tel: (0931) 4968284 E-mail: wangyuemei01@163.com