

文章编号:1000-6893(2003)02-0178-05

# EB-PVD 热障涂层对激光打孔孔径及热循环后孔径变化影响的研究

刘福顺<sup>1</sup>, 徐惠彬<sup>1</sup>, 宫声凯<sup>1</sup>, 孙锡军<sup>1</sup>, 王健<sup>2</sup>, 巴瑞章<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 中航总 625 研究所, 北京 100024)

## Investigation on Effect of EB-PVD Thermal Barrier Coatings on Diameters of Gaseous Envelope Cool and Thermal Circles

LIU Fu-shun<sup>1</sup>, XU Hui-bin<sup>1</sup>, GONG Sheng-kai<sup>1</sup>, SUN Xi-jun<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, BA Rui-zhang<sup>2</sup>

(1. Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Aeronautical and Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**摘要:** 在试样上用激光打了不同孔径、不同方向的冷却孔,采用电子束物理气相沉积(EB-PVD)的方法在已打孔的试样上涂覆 MCrAlY 粘接层和 ZrO<sub>2</sub>陶瓷层,观察和计算其孔径大小变化;然后对试样进行了热循环处理,以比较热循环前后的孔径变化。初步实验结果表明:激光打孔的入射角,对孔径变化影响不大;原始孔径增大,施以涂层后其相对变化就较小,采用 EB-PVD 的方法在已打孔的试样上涂覆 ZrO<sub>2</sub>陶瓷层后其孔径比原始孔径至少减少了 15%;在热循环试验前后,绝大部分孔径变化较小,而其总趋势是由大变小,孔径减少约 5%左右。

**关键词:** 电子束物理气相沉积;热障涂层;激光打孔;热循环

**中图分类号:** V254.2; TG174.453 **文献标识码:** A

**Abstract:** This paper emphasizes the effect of electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) thermal barrier coatings on the diameters of the punctures by laser puncturing. The specimens were initially punctured with different punctures in diameter and direction by the laser puncturing method and then deposited with MCrAlY bond coat and ZrO<sub>2</sub> ceramic topcoat by means of EB-PVD. Thereafter, the changes of the pores were evaluated. It is found that the angles of incidence of the pores have little influence on the diameters of the punctures. The bigger the original punctures, the smaller the relative changes of punctures after being coated with thermal barrier coatings. The diameters of the punctures coated with the EB-PVD ZrO<sub>2</sub> ceramic topcoat were decreased by approximately 15% compared with those of the original punctures. The results show that the changes of punctures in diameter can be ignored after 100 thermal circles.

**Key words:** EB-PVD; thermal barrier coatings; the cooling punctures; thermal circles

现代高科技的发展,特别是航空航天技术领域的高速发展,使得在某些高温环境下,现有的金属材料的单独使用已不能满足设计及使用要求。在航空燃气涡轮发动机叶片上涂覆陶瓷热障涂层(Thermal Barrier Coatings 简称 TBCs),不仅起到降低叶片表面温度的作用,还兼具有抗氧化腐蚀、耐磨损等作用。目前作为发动机叶片热障涂层使用的陶瓷材料为 YSZ(Yttria Stabilized Zirconia),制备方法主要为等离子喷涂(PS)与电子束物理

气相沉积(EB-PVD)。由于 EB-PVD 制备的陶瓷涂层具有柱状晶结构,其抗热冲击、抗剥落性能远优于等离子喷涂制备的陶瓷层,燃气涡轮发动机工作叶片的热障涂层均采用 EB-PVD 的方法制备<sup>[1~4]</sup>。而涡轮导向叶片等的热障涂层的制备仍然普遍采用成本低、效率高、简单易行的等离子喷涂。

对于航空发动机涡轮叶片,气膜冷却技术和热障涂层技术是改善工件工作环境的两种行之有效的办法,两者缺一不可。热障涂层的隔热效果直接与气膜冷却条件有关。当涂层厚度,导热系数等条件一定时,气膜冷却状态将直接影响隔热效果<sup>[5~7]</sup>。目前,激光打孔是制备冷却孔道实现

收稿日期:2002-03-06; 修订日期:2002-06-10  
基金项目:国防科技重点实验室基金(98J550.1.3.HK01)资助项目  
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/02/0178/>

气膜冷却的主要方法之一。对于电子束物理气相沉积热障涂层,如果进行激光打孔后再涂覆热障涂层,可能存在着由于涂层材料的沉积使孔径缩小的问题;如果先涂覆热障涂层后再进行激光打孔,则有可能存在有孔边区损伤缺陷问题。那么,到底是先进行激光打孔再涂覆热障涂层;还是先涂覆热障涂层后再进行激光打孔,这是值得研究的问题。因此,研究激光打孔技术对热障涂层几何尺寸及性能变化,对热障涂层技术能否在航空发动机上应用具有重要意义。

进行的主要研究工作有以下3方面:采用EB-PVD的方法在经激光打孔的试样上涂覆MCrAlY粘接层,观察和计算试样孔径大小变化;

采用EB-PVD的方法在已涂覆MCrAlY粘接层的试样上再沉积ZrO<sub>2</sub>陶瓷层,观察和计算试样孔径的变化;对不同孔径、不同加工角度的气膜冷却孔的试样,进行不同次数的热循环试验,观察和计算试样孔径变化,以找出变化规律。

## 1 实验方法

### 1.1 实验方案

基体材料: DZ22 高温合金, 试样尺寸: 18mm × 9mm × 2mm。

本实验模拟了实际涡轮发动机叶片的气膜冷却孔的情况,设计了不同孔径(0.2, 0.3, 0.5, 0.8mm)的气膜冷却孔。在实验中,把孔径0.2mm定义为1#试样,孔径0.3mm定义为2#试样,以此类推。还设计了不同角度(0°, 15°, 30°, 45°)的气膜冷却孔。此处入射角0°定义为试样表面的法线方向,15°定义为与试样表面的法线方向呈15°,以此类推。

### 1.2 实验工艺流程

准备试样—激光打孔—测试原始孔径—沉积MCrAlY—测试孔径—试样喷砂—测试孔径—沉积陶瓷层ZrO<sub>2</sub>—测试孔径—热循环—测试孔径。

### 1.3 主要实验设备及方法

本实验采用乌克兰Paton焊接研究所的UE205实验室型电子束物理气相沉积(EB-PVD)设备制备MCrAlY粘结层及ZrO<sub>2</sub>陶瓷层。陶瓷层厚度为100μm左右。采用北京航空工艺研究所的瑞士LASAG公司KLS522型脉冲Nd<sup>3+</sup>:YAG激光器对试样进行激光打孔。采用北京航

空材料研究院的德国Leica公司出品的DMRMIE型光学显微镜,放大倍数可从25倍到1000倍,附带有Q500MC图像分析仪,可将光学显微镜视野中所成图像存入计算机硬盘,以TIFF、BMP等文件格式保存,并有相应软件可对其进行图像处理和分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 图像和数据处理

在DMRMIE光学显微镜下用25倍的镜头观察试样上的冷却孔,将所成的像用Q500MC图像分析仪保存为TIFF格式文件。由于TIFF格式的图形文件所占硬盘空间较大,且文件数量众多,故再利用图形软件ACDSee3.0将所有文件转换为JPEG格式,使文件显著变小,大大节约了硬盘空间,有利于后续处理。

由于光学显微镜的景深较小,且冷却孔的入射方向不同,直线光源下成像分辨率较低,孔边缘有些模糊不清,所以图像处理的重点和难点就是定出图片中冷却孔的边缘,计算其面积,并换算出等效孔径。为此,选用Photoshop 5.5,对图形文件进行处理和计算。

### 2.2 实验结果及讨论

为了在叶片表面获得一层均匀的冷却气膜,以提高气膜冷却的效率,用激光打孔技术在叶片上打出各种入射角度、各种孔径大小的孔。尤其是用EB-PVD技术涂敷热障涂层后,冷却孔的大小将发生改变,同时,叶片经高温工作后,冷却孔径也会变化,从而对气膜冷却的效果产生相当的影响。由此,入射角度、原始尺寸、涂层工艺和热循环将是冷却孔径变化的主要因素。

为了便于进行比较,以原始孔径为基准(100%),将经过各涂层工艺步骤后的孔径值换算成不同的百分比。

(1)入射角度对冷却孔大小变化的影响 在同一编号的试样上冷却孔原始孔径大致相同,仅入射角度不同,分别为0°, 15°, 30°, 45°,所以,在此原始孔径的影响可忽略不计,而入射角度对孔径大小的变化起主要影响作用。

在图1中,横坐标为试样状态:“1”为试样孔的原始态;“2”为试样孔再涂覆MCrAlY粘接层;“3”为试样孔再经过喷砂处理;“4”为表示试样孔再涂覆ZrO<sub>2</sub>陶瓷层。

从图1可以看出,入射角减小,孔径的变化率增大,但是考虑到仪器误差和人为误差,可以认为入射角对孔径的变化率稍微有些影响。

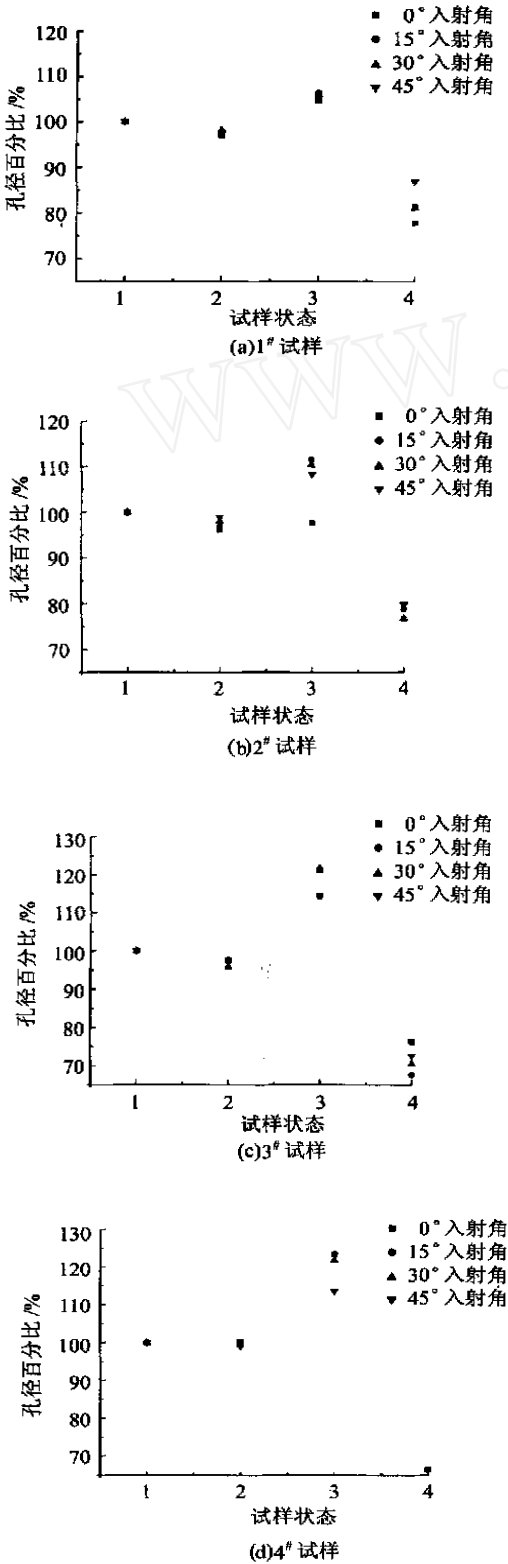


图1 随入射角不同试样冷却孔的孔径变化图

Fig. 1 The change of the pore diameter with different incident angles

(2)热循环试验对不同入射角冷却孔孔径变化的影响 各冷却孔分别在0,25,50,100次热循环后,对不同大小的孔在热循环过程中孔径的变化作图,如图2所示。

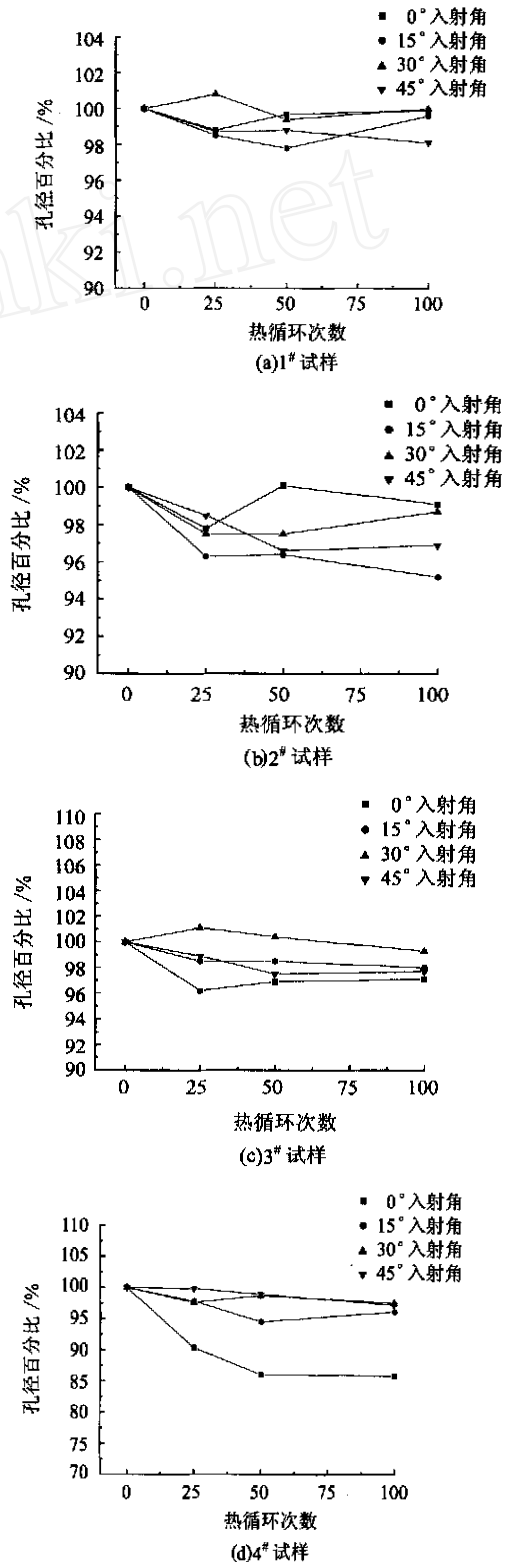


图2 冷却孔热循环孔径变化

Fig. 2 The change of the pore diameter with thermal cycling test

在图2中,把没有经过热循环的试样(定义为0次),作为100%。25次(即经过循环25次),以此类推。从图中可以看出,绝大部分孔在热循环前后的孔径变化并不明显,但总的趋势是变小的,这是因为粘接层在热循环过程中氧化,导致体积增大,向孔的圆心方向延伸,使得孔径略有变小,一般孔径减少都在5%以下。

(3)不同工艺处理后孔径的变化规律 图3为1#试样15的冷却孔经过各涂层工艺后孔径变化图。1#试样15的冷却孔不同的角度经过测量和计算的值如下:以原始状态的孔径作为100%,经过涂覆MCrAlY后,孔径为97.1~98.2;经过涂覆MCrAlY后,再喷砂后,孔径为104.6~106.4;最后涂覆ZrO<sub>2</sub>后,孔径为77.2~82.2。考虑到测试样品为双面涂覆了热障涂层,因而会有些绕射产生。所以,实际孔径至少减少了15%左右。

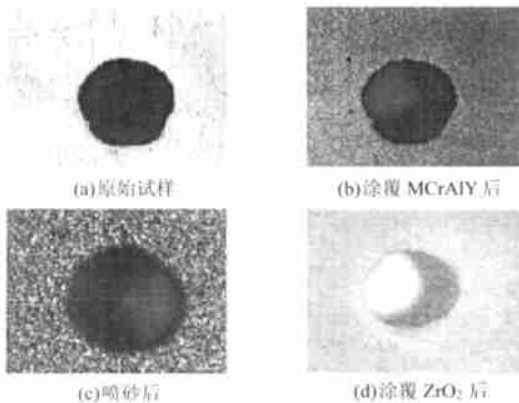


图3 1#试样15冷却孔变化图

Fig. 3 The optical images of the change of pore at 15° with the TBCs preparing process of the 1# specimen

图4示出了1#试样0孔经过涂覆陶瓷层后再经过不同次数的热循环后的孔径变化图。

结果表明,冷却孔经涂覆陶瓷层后再进行不同次数的热循环,绝大部分冷却孔的孔径变化减少5%以下,但总的趋势是变小的。

另外,随着原始孔径的减小,热循环后孔径变化的幅度有所增大,这是因为原始孔径较小,小的变动就会引起较大的相对变化。

所有的打孔试样都承受住了100次的热循环,这说明先激光打孔,后用EB-PVD沉积热障涂层的工艺可能是一种可行的方法。

### 3 气膜孔上涂覆的热障涂层的断面形貌

为了搞清涂层对气膜孔的影响,将不同方向

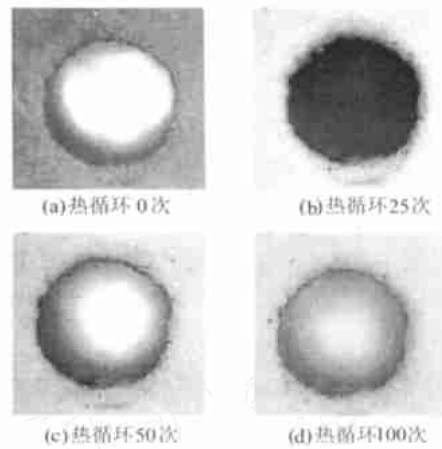


图4 1#试样0孔经涂覆陶瓷层后再经不同次数的热循环后的孔径变化图

Fig. 4 The optical images of the change of pore at 0° with thermal cycling times of the 1# specimen

的气膜孔沿断面切开,利用扫描电镜观察孔内部涂覆热障涂层的情况。图5为1#试样0气膜孔上涂覆的热障涂层的断面形貌(所用试样是双面沉积热障涂层),可以看到,采用电子束物理气相沉积涂覆热障涂层,不仅在试样表面沉积了涂层,而且在气膜孔的内部,也沉积上了一定厚度的涂层。从而也证明了为什么气膜孔涂覆热障涂层以后,孔径变小了。

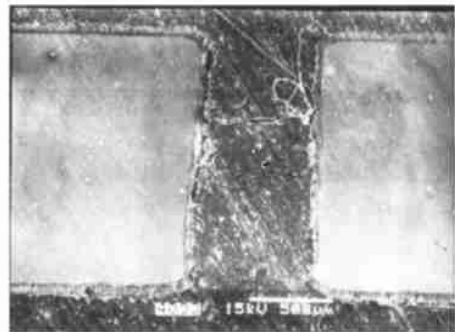


图5 1#试样0气膜孔上涂覆的热障涂层的断面形貌

Fig. 5 Section images for the specimen coated with the TBCs

## 4 结论

(1)入射角对孔径的变化率略有影响,随入射角减小,孔径变化率增大。

(2)原始孔径越大,施加涂层后其孔径相对变化越小。

(3)不同入射角冷却孔的试样,经涂覆粘结层和陶瓷涂层后,与原始状态相比孔径至少减少了15%左右。

(4)冷却孔经涂覆陶瓷层后再进行不同次数的热循环,绝大部分冷却孔的孔径变化减少5%

以下,总的趋势是变小的。

**致谢** 本基金项目得到了高能束流加工技术国防科技重点实验室的大力支持,该实验室的段爱琴高级工程师在孔径处理方面提出了很好的建议;博士生郭洪波在电子束物理气相沉积热障涂层中做了大量工作。在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Miller R A. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions[J]. *J Thermal Spray Tech*, 1997, 6(1): 35 - 42.
- [2] Steven A. High-tech coatings for turbine[J]. *Mechanical Engineering*, 1995, 117(10): 66 - 69.
- [3] Xu H B, Gong S K, Deng L. Preparation of thermal barrier coatings for gas turbine blades by EB-PVD[J]. *Thin Solid Films*, 1998, 334(1-2): 98 - 102.
- [4] 刘福顺, 宫声凯, 徐惠彬. 大功率 EB-PVD 陶瓷热障涂层的研究与应用[J]. *航空学报*, 2000, 21(S): S30 - S34. (Liu F S, Gong S K, Xu H B. Recent development barrier coatings prepared by EB-PVD[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(S): S30 - S34.)
- [5] Movchan B A, Malashenko I S, *et al.* Two-and three-layer coatings produced by deposition in vacuum for gas turbine blade protection[J]. *Surf & Coat Technol*, 1994, 67(1-2): 55 - 63.
- [6] 宫声凯, 邓亮, 毕晓方, 等. 陶瓷热障涂层的隔热效果研究[J]. *航空学报*, 2000, 21(S): S25 - S29. (Gong S K, Deng L, Bi X F, *et al.* Thermal barrier effect of ceramic thermal barrier coatings[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(S): S25 - S29.)
- [7] 郭洪波, 徐惠彬, 宫声凯, 等. EB-PVD 梯度热障涂层的热循环失效机制. *金属学报*, 2001, 37(2): 151 - 155. (Guo H B, Xu H B, Gong S K, *et al.* Failure mechanism of gradient thermal barrier coating subjected to thermal cycling[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(2): 151 - 155.)

#### 作者简介:



刘福顺(1954 - ) 男,副教授。毕业于北京航空航天大学,曾从事 X 射线衍射和无损检测工作,出版教材一部,负责和参加热障涂层和功能材料等方面的科研课题近十项,获得国防科工委科技进步二等奖一项,获得专利一项,发表科研论文十余篇。

(责任编辑:蔡 斐)