

文章编号:1000-8055(2011)03-0617-05

基于云纹干涉法与钻孔法的等离子 热障涂层残余应力实验

齐红宇, 刘金龙, 杨晓光, 王井科

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 应用云纹干涉法与钻孔法结合的光测力学实验方法,研究了等离子热障涂层基体材料镍基高温合金 DZ125 的残余应力.通过实验和计算获得了等离子喷涂工艺下基体 DZ125 的残余变形场、残余应变场和残余应力,并描述了其主要特征.结果表明,采用云纹干涉法与钻孔法结合测定热障涂层残余应力具有全场测量和高灵敏度等优点,这对于采用光学手段研究热障涂层残余应力有着积极的意义.

关 键 词: 热障涂层; 残余应力; 云纹干涉法; 钻孔法; DZ125

中图分类号: V231.91

文献标识码: A

Investigation on residual stress of plasma sprayed thermal barrier coatings based on moire interferometry and hole drilling method

QI Hong-yu, LIU Jin-long, YANG Xiao-guang, WANG Jing-ke

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Moire interferometry technique and hole drilling method were applied to study the residual stress of DZ125 in thermal barrier coatings (TBCs). The residual deformation, residual strain, and residual stress were obtained experimentally and computationally. The results show that moire interferometry combined with hole drilling method has the advantage of full field measurement and high sensitivity in measuring residual stress of TBCs. It has positive significance to study residual stress of TBCs using optical measurement method.

Key words: thermal barrier coatings; residual stress; moire interferometry;
hole drilling; DZ125

涡轮进口温度是发动机和部件重要的性能参数与设计参数,提高涡轮进口温度能增大涡轮输出功率,提高发动机的热效率,降低耗油率.提高涡轮进口温度除了改进冷却技术、发展新型耐高温材料外,在高温合金热端部件表面喷涂热障涂层也是有效的手段,它可达到 170℃ 或更高的隔热效果,以满足高性能航空发动机的要求^[1-4].热

障涂层一般由金属黏结层和隔热陶瓷层双层系统组成,其中黏结层成分为 MCrAlY (M 为 Ni 或 NiCo),它的作用是确保基体和陶瓷层能够很好地黏结在一起,同时又具有防腐蚀、抗氧化的作用;陶瓷层的成分为 6%~8% (质量分数) Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂,是热障涂层隔热的主体,对基体主要起到热防护作用.

收稿日期:2010-01-27; 修订日期:2010-04-28

作者简介:齐红宇(1969—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,主要从事航空发动机结构、强度与振动研究.

在等离子热障涂层的制备过程中,由于材料的热膨胀系数不一样必然会产生残余应力,而涂层的残余热应力对热障涂层的性能有着直接的影响^[5],较大的残余热应力可导致涂层工件的变形及涂层的脱落失效,同时对涂层的结合强度、热疲劳性能及抗腐蚀性能均有直接的影响.因此研究等离子热障涂层的残余应力对于提高涂层的耐久性、可靠性具有重要意义.最经典的残余应力测量方法是应变片钻孔法.但这种方法由于应变片的位置距离孔周有一定距离,而且应变片本身还有一定宽度,这使得测量的结果精度不高^[6-7].近年来,光测力学得到了很大的发展,比如云纹干涉法等,由于光学方法具有全场测量的优点,可以得到靠近孔周围的残余变形信息,因此精度更高.

本文探讨用光测力学方法研究航空发动机热端部件的等离子热障涂层残余应力问题,采用云纹干涉法与钻孔法结合的方法测量等离子热障涂层钻孔所释放的位移场,进而得到释放的应变场,然后得到残余应力.

1 云纹干涉法与钻孔法的测量原理

云纹干涉法是应用高密度衍射光栅和激光干涉技术进行位移和变形测量的一种现代力学实验方法,可进行全场的高灵敏度分析,通常使用光栅频率为 600~2400 线/mm 的高密度光栅,其测量位移灵敏度比传统云纹法高几十倍至上百倍^[8-11].

云纹干涉法原理如图 1 所示.当两束经过准直的波长为 λ 的平面波 A 和 B 对称地以入射角 α 投射到光栅频率为 f 的试件栅上,将获得沿试件表面法向传播光波 A 的正一级衍射光波 A' 和 B 的负一级衍射光波 B'. 试件未受力时, A' 和 B' 可视为平面光波,此时成像面上不出现干涉条纹,仅为均匀的光强分布;试件受力变形后,平面光波变为与试件表面位移有关的波前翘曲 A'' 和 B'', 通过成像系统后,在 CCD(charge coupled device)靶面上产生干涉条纹.云纹干涉法所得到的条纹图为等位移线.

根据所得条纹级数可以确定试件表面 x 和 y 方向的位移,如公式(1),(2)所示.

$$U = \frac{N_x}{2f} \quad (1)$$

$$V = \frac{N_y}{2f} \quad (2)$$

相应的 x 和 y 方向的应变,如公式(3)和公

式(4)所示.

$$\epsilon_x = \frac{1}{2f} \frac{\partial N_x}{\partial x} \quad (3)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{2f} \frac{\partial N_y}{\partial y} \quad (4)$$

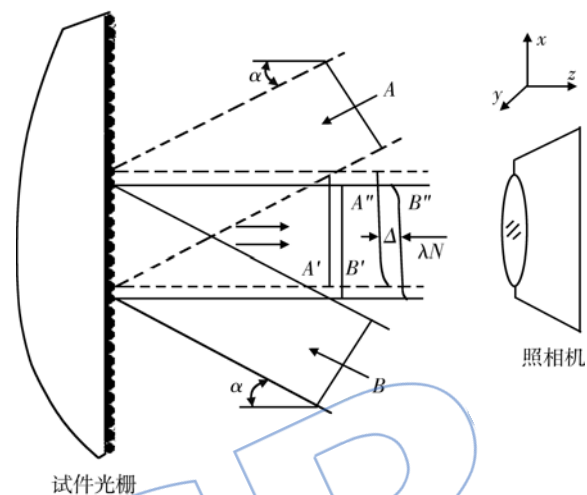


图1 云纹干涉原理图

Fig.1 Principle diagram of moiré interferometry

钻孔法是通过释放孔边的残余应变,而云纹干涉法对面内位移测量具有很高的灵敏度,可分析很小一个区域的变形,适用于应变梯度很大的区域.因此云纹干涉法与钻孔法结合很适合测量残余应力.

2 实验过程

2.1 等离子喷涂实验件

实验中选用的基体材料为镍基定向凝固高温合金 DZ125,尺寸为 40 mm × 8 mm × 1.5 mm. DZ125 是一种先进的国产定向凝固镍基铸造高温合金,具有良好的中、高温综合性能及优异的热疲劳性能.与同类合金相比,该合金具有优异的铸造性能,铸件表面光洁.

喷涂前为满足喷涂对于表面光洁度的要求,在喷前对试件要进行打磨.喷涂前还要进行吹砂工作,目的是使工件表面的机械性能得到改善,提高了工件的抗疲劳性,同时增加了它和涂层之间的附着力^[12].最后采用大气等离子喷涂方法制备双层结构的涂层,喷涂工艺采用与涡轮转子叶片相同的工艺参数,其中黏结层成分为 NiCrAlY (Ni-25Cr-5Al-0.5Y),厚度为 150 μm;陶瓷层成分为 YSZ(7%(质量分数)Y₂O₃ 稳定的 ZrO₂),厚度为 250 μm.喷涂后的试件如图 2 所示.

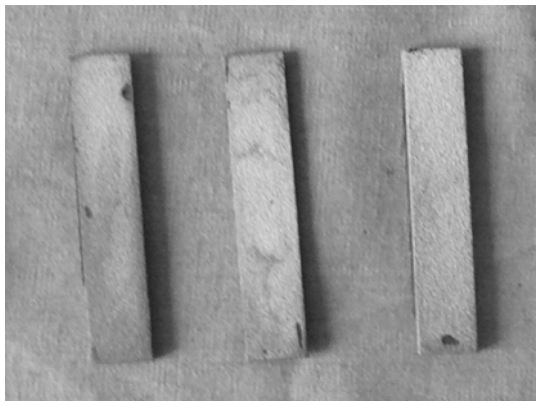


图2 等离子喷涂试件
Fig. 2 Test specimen of plasma spray

2.2 制作云纹光栅

云纹光栅的制作是云纹干涉法的重要内容,实验采用光栅复制法进行制栅.这种方法需要一块高质量的标准云纹光栅,称为光栅模板.将光栅模板转移到试件表面的过程是:首先将固化胶和固化剂按一定比例均匀混合,浇注在光栅模板的光栅表面;然后将清洗干净的试件表面覆盖在胶层上,施加一定压力,挤出多余的胶液并使胶层均匀;胶层完全固化后启模,由于固化后的胶层与试件之间以及胶层与光栅模板表面反射膜之间的黏附力大于光栅模板上光刻胶与反射膜之间的黏附力,因此反射膜和胶层一起粘在试件表面而形成试件栅.本实验制作的光栅频率为600线/mm,误差不超过0.5%.制作的光栅试件如图3所示.

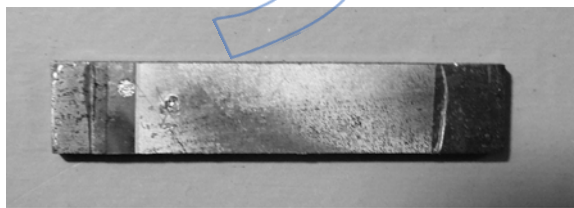


图3 云纹光栅试件
Fig. 3 Test specimen of moiré gratings

2.3 云纹干涉法与钻孔法

钻孔法的原理就是通过钻孔来释放圆孔周边的残余应力,进而通过光栅条纹的变化来测得残余应力的大小.为此,需要在光栅表面钻出一个直径盲孔,直径 d 约为2 mm.由于光栅为常温型(安全使用温度大约为80℃,最高不超过110℃).因此,在钻孔过程中要严格控制温度,并且要避免重新引入附加的残余应力,使测试误差增大.本实验中,钻孔工作采用低转速的钻孔机,没有破

坏光栅.

云纹干涉仪采用的是4M云纹干涉仪,如图4所示.该干涉系统根据四光束云纹干涉原理.本云纹干涉仪中各个反射镜的位置是经过精确计算的,并且其中四面反射镜还可以分别独立进行三维微调.

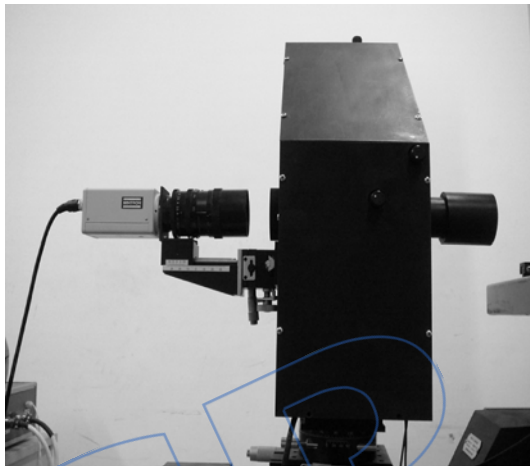


图4 4M云纹干涉仪
Fig. 4 4M moiré interferometry equipment

3 实验结果与分析

3.1 位移场与应变场

通过以上的实验步骤,经过高分辨率的CCD记录下U场和V场的位移云纹图,如图5所示,其中图5(a)为U场的位移云纹图,图5(b)为V场的位移云纹图.根据云纹干涉原理以及试件光栅频率 f 为600线/mm,可以通过计算得知条纹间距代表 $0.833\mu\text{m}$.在钻孔之后,由于孔边的应力得到释放,因而孔边的云纹条纹比远端的云纹条纹密,说明孔边释放部位具有较高的应力梯度.进一步分析,如果在等离子热障涂层制备中,试件

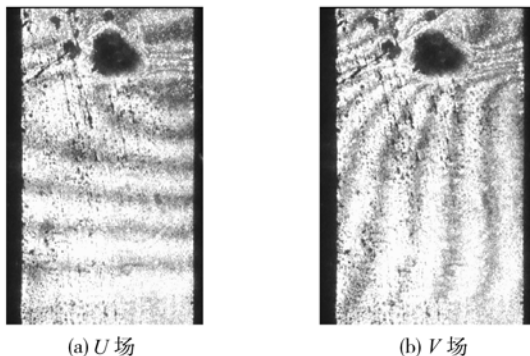


图5 位移云纹条纹图
Fig. 5 Diagrams of moiré fringes of displacement

的残余应力分布是均匀的,那么钻孔周围的云纹条纹应该是对称的,但从实验结果看孔边云纹条纹分布并不对称,这说明喷涂后的平板实验件残余应力分布并不均匀,这些非对称的条纹正是等离子喷涂残余应力梯度的表现。

根据实验得到的云纹条纹图,通过图像处理程序,对云纹条纹的光强分布进行分析,得到分级条纹数从而确定位移场。具体包括以下步骤:①确定孔的位置;②确定整数级条纹的位置;③对条纹进行计算机线性插值处理。得到的U场、V场位移场如图6所示。分析图6的位移场,试件喷涂后产生整体的残余变形,钻孔则将钻孔周边的残余变形释放,因此孔的远端位移场作为零场,孔周边的位移场即为残余应变场,从图6的U场和V场位移场图可以看出孔周边的残余变形梯度还是比较明显的。

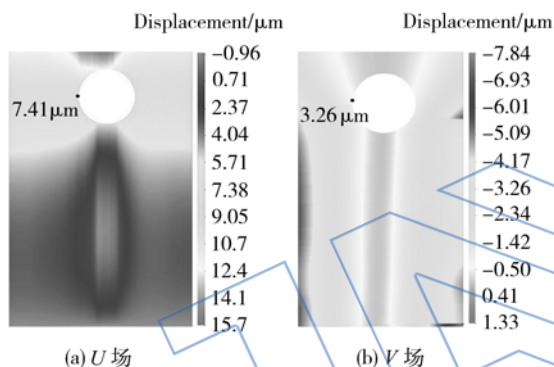


图6 位移场

Fig. 6 Diagrams of displacement field

根据得到的位移场,通过公式(3)和公式(4),对 x, y 方向分别求偏导,即可得到应变场,U和V的应变场如图7所示。由于应变场是由位移场求

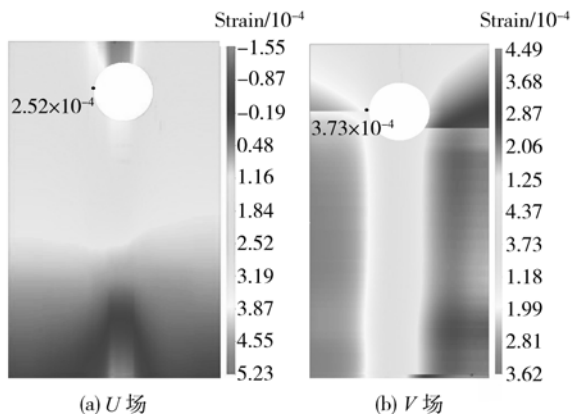


图7 应变场

Fig. 7 Diagrams of strain field

导得出来的,因此图7的应变场分析与图6的位移场分析类似。

3.2 残余应力

由图6分析可得,钻孔处孔边的U场位移为 $7.41 \mu\text{m}$,钻孔处孔边的V场位移为 $3.26 \mu\text{m}$ 。同样由图7可得,残余应变 $\epsilon_1 = 2.52 \times 10^{-4}$,残余应变 $\epsilon_2 = 3.73 \times 10^{-4}$ 。

根据文献[13-14],实际测量应变与残余应力场的关系可表示为

$$\begin{vmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{E_1 E_2}} \begin{vmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

由于是在基体表面钻孔,则实验所测应力应为孔边沿孔深的残余应力的平均值,即为基体的残余应力。根据材料数据手册[15],基体材料镍基合金DZ125的弹性模量为 $E_1 = E_2 = 169\,800 \text{ MPa}$, $E_3 = 127\,800 \text{ MPa}$,由公式(5)则可计算出等离子热障涂层基体的残余应力为: $\sigma_1 = 42.79 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 47.67 \text{ MPa}$ 。分析基体DZ125残余应力的数值并不是很大,这可能跟DZ125优良的抗高温蠕变性能有关系,使得DZ125在从喷涂时的高温到常温过程中,并没有发生太大变形。

4 结论

对于以镍基高温合金DZ125为基体的等离子热障涂层的残余应力问题,应用钻孔法时钻孔周围应力梯度较大,传统的应变片钻孔法并不十分适合。本文提出了一种采用云纹干涉法与钻孔法结合的测试方法检测等离子热障涂层残余应力,是一种较为有效的实验方法,为解决高温合金等离子热障涂层的残余应力问题提供了比较新的手段。

参考文献:

- [1] 齐红宇,王亚梅,杨晓光,等. 等离子工艺热障涂层的热疲劳分析[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(1): 15-18.
QI Hongyu, WANG Yamei, YANG Xiaoguang, et al. Thermal fatigue of atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. Failure Analysis and Prevention, 2008, 3(1): 15-18. (in Chinese)
- [2] 魏洪亮,杨晓光,齐红宇,等. 等离子涂层热疲劳失效模式及失效机理研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 270-275.
WEI Hongliang, YANG Xiaoguang, QI Hongyu, et al. Study of failure mode and failure mechanisms on thermal fatigue of plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 270-275. (in Chinese)

- Chinese)
- [3] 魏洪亮,杨晓光,齐红宇. 等离子涂层涡轮导向叶片热疲劳寿命预测研究[J]. 航空动力学报,2008,23(1):1-8.
WEI Hongliang, YANG Xiaoguang, QI Hongyu. Study on thermal fatigue life prediction for plasma sprayed thermal barrier coatings on the surface of turbine vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] 耿瑞,周柏卓,齐红宇,等. 热障涂层结合强度及失效模式研究[J]. 航空动力学报,2003,18(6):50-53.
GENG Rui, ZHOU Baizhuo, QI Hongyu, et al. The bonding strength and failure modes of thermal barrier coatings [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 50-53. (in Chinese)
- [5] 陈晓鸽,杨树森,张红松,等. 大气等离子喷涂 ZrO_2 与 $Sm_2Zr_2O_7$ 热障涂层的残余热应力分析[J]. 铸造技术, 2009, 30(9): 1148-1152.
CHEN Xiaoge, YANG Shusen, ZHANG Hongsong, et al. Analysis of residual thermal stresses of plasma sprayed ZrO_2 and $Sm_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings[J]. Foundry Technology, 2009, 30(9): 1148-1152. (in Chinese)
- [6] 亚敏,戴福隆,吕坚. 搅拌摩擦焊接头残余应力的试验[J]. 焊接学报,2002,23(5):53-56.
YA Min, DAI Fulong, LÜ Jian. Study on residual stress of friction stir welding by moiré interferometry and hole-drilling method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(5): 53-56. (in Chinese)
- [7] 戴福隆,亚敏,谢惠民,等. 云纹干涉与钻孔法测量残余应力的实验方法与系统[J]. 实验力学,2003,18(3):313-318.
DAI Fulong, YA Min, XIE Huimin, et al. An experimental method and system for residual stress measurement with moiré interferometry and hole drilling[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(3): 313-318. (in Chinese)
- [8] Morita Y, Arakawa K, Todo M. Experimental analysis of thermal displacement and strain distributions in a small outline J-leaded electronic package by using wedged-glass phase-shifting moire interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(1): 18-26.
- [9] Wood J D, Sobolewski P, Thakur V, et al. Measurement of microstrains across loaded resin-dentin interfaces using microscopic moire interferometry[J]. Dental Materials, 2008, 24(7): 859-866.
- [10] Pignatiello F, de Rosa M, Ferraro P, et al. Measurement of the thermal expansion coefficients of ferroelectric crystals by a moire interferometer [J]. Optics Communications, 2007, 277(1): 14-18.
- [11] Mollenhauer D H, Fredrickson B M, Schoeppner G A, et al. Moire interferometry measurements of composite laminate repair behavior: influence of grating thickness on interlaminar response[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(8): 1322-1330.
- [12] 王亮,王铀,田伟,等. 等离子喷涂纳米结构与传统结构热障涂层的残余应力对比研究[J]. 材料保护, 2009, 42(3): 58-62.
WANG Liang, WANG You, TIAN Wei, et al. Comparative study of the residual stress in plasma sprayed nanostructure and conventional structure coatings [J]. Materials Protection, 2009, 42(3): 58-62. (in Chinese)
- [13] 常红,姚河省,候丽丽. 相移云纹法与盲孔法相结合检测复合材料的残余应力[J]. 力学季刊, 2006, 27(3): 511-514.
CHANG Hong, YAO Hesheng, HOU Lili. Combined phase shift moire interference method with blind hole method to expect composite materials' residual stress[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(3): 511-514. (in Chinese)
- [14] 朱甫金,陶宝祺. 小孔法测量正交各向异性材料残余应力[J]. 复合材料学报, 1998, 15(2): 93-97.
ZHU Pujin, TAO Baoqi. Measurement of residual stresses in orthotropic materials by the hole drilling method[J]. Acta Materiea Compositae Sinica, 1998, 15(2): 93-97. (in Chinese)
- [15] 航空材料研究院. 航空发动机设计用材料数据活页手册[M]. 北京:中国航空发动机总公司,2000.