

热障涂层残余应力的相移云纹法测试

北京航空航天大学 史训清* 聂景旭 张学仁

【摘要】 本文针对的热障涂层(TBC)的细微结构和微小变形特点,提出了一种新的高精度的相移云纹图像处理实验技术,把它同释放法相结合,利用高温云纹光栅,对电子束—物理气相沉积(EB-PVD)热障涂层的残余应力分布进行了测试研究,并与其它方法进行了比较分析。

主题词: 热障 涂层 残余应力 相移 云纹法
分类号: V416.4

1 前言

随着航空发动机向高性能方向的发展,对航空构件的温载承受能力的要求也越来越高(目前世界上先进航空发动机涡轮前进口温度已超过 1437°C),热防护问题已成为航空发动机向高性能方向发展的关键问题之一。传统的改进高温合金材料提高熔点,优化冷却流路,改善冷却方式等诸多降温保护方法也都基本趋于成熟,进一步发展已受到一定限制。热障涂层技术是目前正在发展的新的热防护技术,其基本思路是:在热端部件上喷涂一层很薄的隔热陶瓷膜,使航空构件本体在较低的温度下工作。已有成果表明^[1]:这一方法在某些情况下,可获得高达 167°C 的温降,这相当于过去二十年里采用改进合金材料方法获得收效的总和。因此热障涂层制备工艺、力学特性、质量评价等问题正成为航空领域的研究热点之一。残余应力分布是评定热障涂层质量的一个重要指标,准确而有效地测定热障涂层中的残余应力分布规律又将为涂层制备工艺优化和涂层使用特性失效机理及寿命预测分析提供理论依据。为此,我们提出了一种新的高精度的相移云纹干涉技术,对目前正在发展的一种新的电子束—物理气相沉积(EB-PVD)工艺所制备的、 ZrO_2 陶瓷膜/Cu 金属基涂层的、热残余应力分布了测试研究。

2 残余应力的特性及测试原理

由图 1 可见,涂层膜中的残余应力由喷涂温度 T_c 向室温 T_m 沿着路径 I 冷却的过程中其变化是非线性的,所以直接测

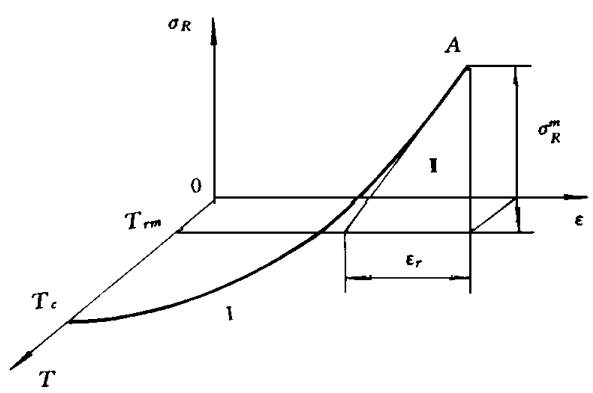


图 1 EB-PVD 涂层膜的 $\sigma_R - T - \epsilon$

量应力是困难的。残余应力的独特特征就是处于亚稳态,所以在解除约束的情况下就可使残余应力得以释放。所谓释放就是在室温下解除试件某处的约束条件使残余应力沿路径 II 按线弹性规律释放而使该处变为无应力状态,从而可以通过测量残余应力释放而产生的残余应变来确定它。如图 2(a),对涂层而言,其长度和宽度远大于厚度,可认为其残余应力沿厚度方向上

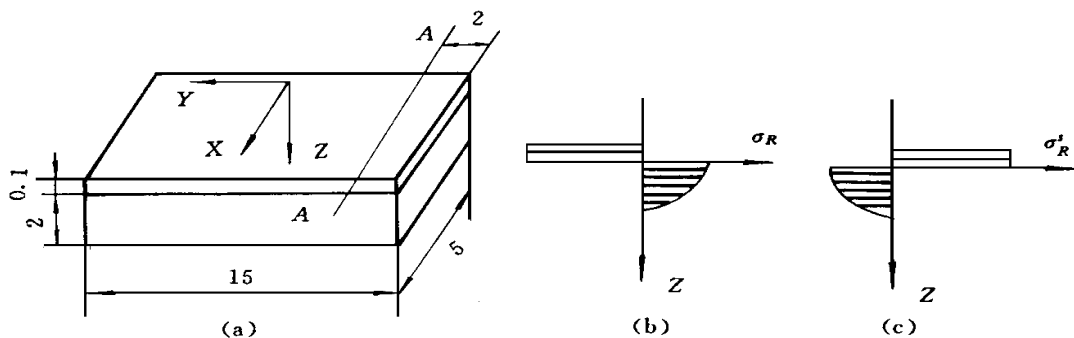


图 2 (a) 试件尺寸图(b) A-A 截面厚度方向上的残余应力分布(c) A-A 截面厚度方向上的叠加应力分布

的非自由边界区是均匀分布的,应力为位置的函数。根据残余应力自平衡条件,可知厚度方向的残余应力分布规律如图 2(b) 所示。如果叠加一个大小相等符号相反的应力分布(图 2(c)),在满足边界自由条件的情况下,将试件沿 A-A 截面切开,根据弹性理论有 σ_R 所引起的形变为 ϵ_x 和 ϵ_y , 则 A-A 截面的残余应力为 σ_y , 分别用(1)和(2)式表示:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

$$\sigma_y = E(\epsilon_x + \mu \epsilon_y) / (1 - \mu^2) \quad (2)$$

式中: E 为材料的弹性模量, μ 为泊松比。

3 相移云纹干涉理论

云纹干涉法是全场实时观测直接获得面内变形场的高灵敏度方法。图 3 为双光束对称入射云纹干涉光路,两束对称入射光波 A 和 B 以入射角 θ ($\sin \theta = \lambda/p$, λ 为入射光波长, p 为试件栅节距) 照射到一个平整的表面制有衍射光栅的试件上。其正、负一级衍射波 A' 和 B' 均沿试件栅法线方向出射。如果试件栅十分规整,试件也未受力,则两个正、负一级衍射波 A' 和 B' 可视为平面波,试件受力变形时,平

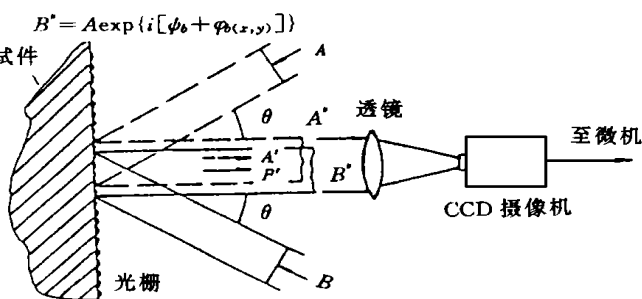


图 3 相移云纹干涉光路

面波 A' 和 B' 变为和表面位移有关的翘曲波 A'' 和 B'' :

$$A'' = A \exp[i(\psi_a + \varphi_{a(x,y)})], \quad B'' = A \exp[i(\psi_b + \varphi_{b(x,y)})] \quad (3)$$

式中: A 为振幅, 初始位相 ψ_a 和 ψ_b 皆为常数。 $\varphi_{a(x,y)}$ 和 $\varphi_{b(x,y)}$ 是由

$$\varphi_{a(x,y)} = 2\pi[w(x,y)(1 + \cos \theta) + u(x,y) \sin \theta] / \lambda$$

$$\mathcal{Q}(x, y) = 2\pi[w(x, y)(1 + \cos\theta) - u(x, y)\sin\theta]/\lambda \quad (4)$$

两束衍射波前 A'' 和 B'' 经过成像系统后在相平面上干涉叠加光强为:

$$I(x, y) = (A'' + B'')(A'' + B'')^* = 4A^2\cos^2[\delta(x, y) + \alpha]/2 \quad (5)$$

其中 $\alpha = \psi_a - \psi_b$ 为常数, $\delta(x, y)$ 为试件变形后两束翘曲波前的相对位相变化:

$$\delta(x, y) = \mathcal{Q}_{(x, y)} - \mathcal{Q}_{(x, y)} = 4\pi u(x, y)\sin\theta/\lambda \quad (6)$$

显然只要测定 $\delta(x, y)$, 就可由 (6) 式求得位移场 $u(x, y)$ 。但由于切割释放法变形小, 应变梯度大, 造成变形信息提取困难, 为此引入相移法。相移法是直接测量各点与位移场相关的位相差的方法^[2], 可弥补这一缺点。考虑到照明不均匀性及杂散光等因素的影响, 可将 (5) 式改写为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + A(x, y)\cos[\delta(x, y) + \delta_i] \quad (7)$$

其中: $I_0(x, y)$ 为背景光强, $A(x, y)$ 为云纹图的振幅函数, $\delta(x, y)$ 为相位差, δ_i 为任一相移。利用某一入射光波光程的变动, 可摄取 4 幅不同相移 $\delta_i (i = 1, \dots, 4)$ 的云纹图。取 $F_{42} = I_4 - I_2$, $F_{31} = I_3 - I_1$, 解联立方程有:

$$\delta(x, y) = \tan^{-1}[(\alpha_{42}F_{31} - \alpha_{31}F_{42})/\beta_{31}F_{42} - \beta_{42}F_{31}] \quad (8)$$

其中

$$\alpha_{mn} = \cos\delta_m - \cos\delta_n, \quad \beta_{mn} = \sin\delta_m - \sin\delta_n \quad (9)$$

式中: mn 取值为 42 和 31。由 (8) 式可见, 相位差为若干幅有相移的条纹图的光强表达式, 只要测出各点在不同相移下的光强就可算出其相位差, 同时 (8) 式是一个通式, 可取任一满足精度要求的相移。本文取相移为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 。因为 $\pi/2$ 相当于 $1/4$ 节距, 再加上放大率, 相移可使云纹干涉法的测量精度提高一个量级以上。

4 实验过程及结果

4.1 试件制备

利用电子束—气相沉积技术(EB-PVD), 在康铜基上喷涂一层 ZrO_2 陶瓷涂层制成金属基/陶瓷膜涂层试件。如图 2(a)。为了避免残余应力切割释放时造成光栅的烧蚀, 本文在涂层表面制作一耐高温光栅(800°C)。其工艺过程(如图 4)是: 首先在试件表面镀一薄层($1\mu\text{m}$)耐

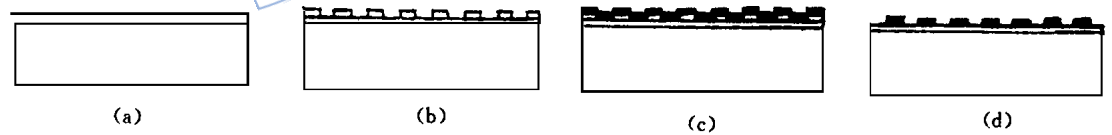
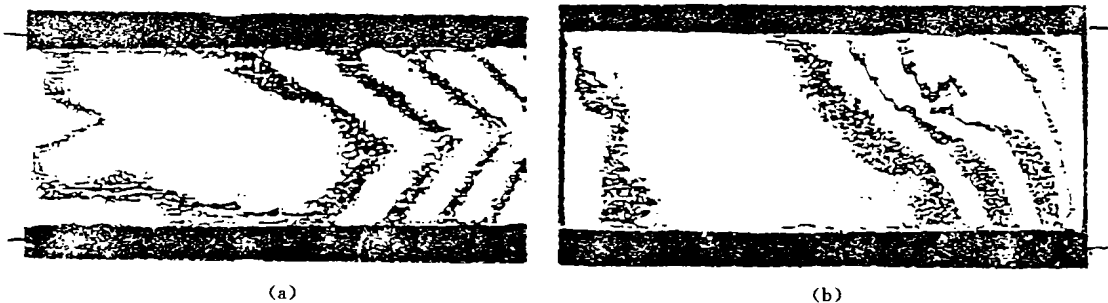


图4 高温栅制作工艺流程: (a) 镀膜 M_1 ; (b) 制光刻胶光栅; (c) 镀膜 M_2 ; (d) 洗去光刻胶

熔金属膜 M_1 , 然后置于全息制栅光路中制作光刻胶光栅^[3], 最后再在上面镀一薄层($1\mu\text{m}$)耐熔金属膜 M_2 , 洗去光刻胶, 即得到由 M_1 和 M_2 构成的高温光栅。光栅频率为 1200 l/mm 。

4.2 实验结果

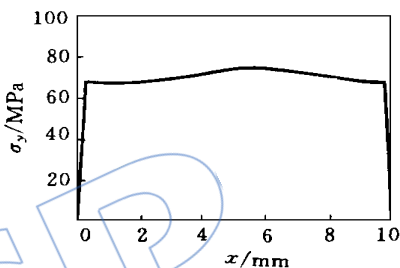
利用陶瓷切割机沿 $A-A$ 截面(图 2(a))将试件切开, 当试件降至室温时, 切割温度所引起的光栅变形将恢复, 所以光栅的变形仅为残余应力释放而引起的变形, 把试件置入图 3 所示光路中, 利用相移云纹干涉技术测量残余应力释放而产生的残余变形如图 5, 利用 (1) 和 (2) 式即可求出 $A-A$ 截面上的残余应力分布(如图 6)。实际上, 残余应力的测试方法有多种, 一般可分为两大类: 有损检测(层移、盲孔)和无损检测(磁、声、射线)。盲孔释放法是一种最常用的残余应力测试方法, 但由于热障涂层很薄, 盲孔的深度很难控制。目前采用的电阻和传感器

图 5 典型的相移条纹图(a) u 场(b) v 场

控制深度的方法精度都不高, 并且仅在较厚的涂层(≥ 1 mm)中有实验结果^[4], 并且精度也比本文方法低一个量级。磁测法是近年发展起来的一种新方法, 它可以测定结构表层及内部的残余应力状态, 但仅适于磁性材料, 对本文所讨论的热障涂层这种弱磁性和无磁性陶瓷试件显然不适用。声弹性是测量残余应力的一种有效方法, 但首先必须解决关于塑性、非均匀性、热导因素对声弹性测量的影响等问题。其应力灵敏度与热弹性和光弹性相近。文献[5]认为它在薄试件(≤ 0.5 mm)中存在测量盲区, 无法获得相应的回波信号。X 射法对晶格的结构和晶面的间距都有特定的要求。材料内部的各种缺陷(位错、夹杂、空穴)及晶界的反射都将影响测量。并且射线辐射对人体的危害, 图像质量、识别, 无应力、无缺陷状态图像标定等问题都使得其在薄涂层残余应力测量中应用产生较大的困难。

5 结 论

实验结果表明: 在电子束—气相沉积制备涂层的过程中所形成的热残余压应力还是比较大的, 且沿 $A-A$ 截面不均匀分布。这是由于气相材料在空间以锥状向基底沉积, 使得沉积涂层膜厚度和温度场的不均匀而造成的。所以残余应力的大小与涂层/基底弹性常数失配、结构组合形式、蒸发源、喷涂压差等因素有关。实验还表明: 相移云纹干涉法是一种行之有效的高精度的热障涂层残余应力测试方法, 可以用于实际热端部件热障涂层的残余应力测试。

图 6 EB-PVD 涂层 $A-A$ 截面上的正应力分布

参 考 文 献

- 1 Sheffler K D. Current Status and Failure Trends in Turbine Application of Thermal Barrier. ASME Journal of Eng. for Gas Turbine and Power, 1988, 110: 605
- 2 Sullivan J L. Phase-Stepped Fractional Moiré. Exp. Mech., 1991, 31: 68-73
- 3 Czarnek R, Wu J J. High-Temperature, High-Sensitivity Moiré Interferometry. Exp. Tech., 1993, 17: 29-33
- 4 付承诵. 搪瓷玻璃—铜层板残余应力的云纹干涉法和有限元分析. 第七届实验力学学术会文集, 1992: 414-417
- 5 周辛庚, 姜云涛. 激光超声无损检测的实验研究. 第八届实验力学学术会文集, 1995: 690-693

creep. This work lays the theoretical foundation for understanding the behaviours of the cycling creeps at varying regimes.

Key Words Monocrystal Turbines Blades Creep

MEASUREMENT OF THERMAL RESIDUAL STRESS IN THERMAL BARRIER COATING BY MEANS OF PHASE- SHIFT MOIRE INTERFEROMETRY

Shi Xuqing, Nie Jinxu, Zhang Xueren

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT There are many difficulties in measuring thermal residual stress in thermal barrier coatings, because of their microstructure and microdeformation. Phase- shift moire interferometry is provided which can precisely measure the deformation of solid bodies under various loading conditions. The fundamental theory and experimental technology of the phase- shift moire image- processing technique are introduced. By combining it with relaxation method, a new technique for measuring thermal residual stress is proposed. With the aid of high temperature moire gratings, the distributions of thermal residual stresses in the EB- PVD (electronic beam- physic vapour deposition) coating has been measured, and compared with those other of methods.

Key Words Thermal barrier Coatings Residual stress Phase- shift Moire method

ADAPTIVE RECTIFICATION OF PARAMETERS IN AEROENGINE SIMULATION MODEL

Xie Guanghua, Zeng Qingfu, Zhang Yandong

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT An adaptive simulation model has been developed by means of modification factors. A modified conjugate gradient algorithm is employed for solving the nonlinear programming problem in the model. According to the parameter measurements of the engine on test rig and in flight, the component characteristics of the engine are rectified by the adaptive model, as a result, outputs of the model are in accordance with the measurements. As an example, the method provided was adopted to rectify the parameters in the simulation model of a given twin- spool reheated turbojet engine, and the simulation achieved satisfactory accuracy.

Key Words Aircraft engines simulation Parameters Nonlinear programming Adaptive control