

文章编号: 1000-8055(2002) 04-0432-05

带热障涂层导向器叶片二维温度场 及热应力分析

杨晓光, 耿 瑞
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 本文针对某型发动机带涂层导向器叶片在设计状态时的温度和应力分布进行了有限元分析与研究。陶瓷热障涂层的本构模型采用了先进的 Walker 粘塑性本构理论, 并在分析中考虑到了由于电子束物理起相沉积(EB-PVD)涂层柱状结构在结构分析时的处理方法。分析比较不同陶瓷隔热层厚度(0.25, 0.125 mm)、不同类型涂层(等离子、EB-PVD)的隔热效果及应力分布情况。

关键词: 热障涂层; 导向器叶片; 热应力; 有限元

中图分类号: V 231. 91

文献标识码: A

The Analysis of 2D Temperature and Thermal Stress of TBC-Coated Turbine Vane

YANG Xiao-guang, GENG Rui

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper used the FEM to carry out the analysis of 2D temperature distribution and thermal stress of a TBC-coated turbine vane under design condition. The thermal barrier coatings include the plasma sprayed and electrical beam physical vapor deposition (EB-PVD) coatings. The constitutive equation is the advanced viscoplastic constitutive theory (Walker type). The typical "column type" structure of EB-PVD TBC can be dealt with and was implemented into the user-defined subroutine of MARC FEM software. The different cooling effects were analyzed according to different TBC types and different thickness of the TBC. The effects of stress distribution and direction on the bonding strength were discussed. The results are beneficial to build the strength design and evaluation methods for hot-section components with TBC.

Key words: thermal barrier coating; vane; thermal stress; FEM

1 有限元模型

选取某型发动机导向器叶片中间截面进行二维计算, 其位置距根部58.3%叶片高度, 截面轮廓见图1。金属叶片壁厚约1.0 mm左右, 由3层单元组成, 基体之上为粘结层及陶瓷隔热层, 前者厚度为0.125 mm, 后者选取0.125 mm和0.25 mm两

种厚度。采用平面应力单元。之所以选用二维分析, 一方面是传热边界条件的不够, 另一方面也是为了简化分析。二维分析虽然不能考虑沿叶高方向的应力, 但可以说明涂层平面内应力状况对涂层强度的影响。涂层系统组成为: 陶瓷层 ZrO_2 (7% Y_2O_3), 粘结层 NiCoCrAlY, 基体 K3。3种材料数据参见文献[1], 所有材料参数都是温度相关

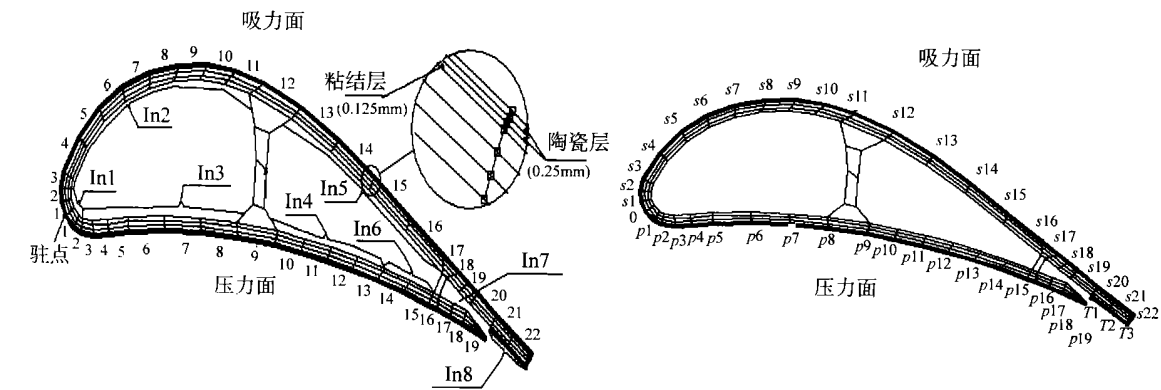


图1 一级导向器某横截面有限元模型及边界条件示意图

的。

1.1 边界条件和初始条件

传热边界条件: 选取发动机设计状态。原始热边界数据来自内部分析报告, 为燃气、冷却气的温度和叶片内外表面的对流换热系数。以图1中前缘驻点为分界确定上下表面(叶盆和叶背)弧长, 经过插值可得外表面和内表面单元相应边界的换热数据(参见文献[1])。

约束边界条件: 为保证有限元模型不发生刚体移动及转动, 在叶片根部选某一结点完全固定, 另选一节点使其某一方向位移固定。热应力分析时单元节点上的温度通过读取热分析的后处理文件获得。

初始条件: 计算热应力时, 单元初始温度为400℃, 它表示该温度下整个涂层系统处于无应力状态。其大小的选取与喷涂工艺及残余应力的考虑有关, 具体可参见文献[2]。

1.2 EB-PVD 结构在叶片分析中的实现

EB-PVD 在结构上呈现‘柱状晶’的特点, 其受力后变形与等离子涂层有所不同(参见文献[1])。即受力垂直于结晶方向时, 柱状晶分离, 相互间无作用力。因此计算中要考虑此现象。首先需要判断出涂层平面(界面)方向, 然后将该涂层内的应力、应变分量进行坐标转换, 进而根据‘柱状晶’结构作用机理将应力进行2次计算, 最后再将结果转回到整体坐标上并返回到主程序中。

使用 MARC 非线性有限元软件进行上述分析时, 根据带涂层叶片结构的具体特点, 编制了计算单元指定方向应力的子程序, 该程序添加到 Hypela 的 Walker 模型接口中, 最终达到实现 EB-PVD 在复杂型面上的有限元计算。

2 Walker 本构模型

分析中陶瓷隔热涂层采用了先进的 Walker 粘塑性理论。它使用背应力 Ω 和阻应力 K 来描述材料的本构特征。为说明方便, 简单列出如下, 具体可参见文献[1, 3]。非弹性应变率为:

$$C_{ij} = \left\{ \frac{\left[\frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_j \right) \right] \left[\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_j \right]}{K} \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_j}{\left[\frac{2}{3} \left(\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_j \right) \right] \left[\frac{3}{2} S_{ij} - \Omega_j \right]} \right]^{\frac{1}{2}}$$

阻应力 K 的表达式为:

$$K = K_1 - K_2 e^{(-n_7 R)}$$

背应力分量 Ω_j 的变化率表达式为:

$$\dot{\Omega}_j = (n_1 + n_2) \dot{C}_{ij} + \dot{C}_{ij} \frac{\partial n_1}{\partial T} \dot{T} - (\Omega_j - \Omega_j^0 - n_1 C_{ij}) \left[\dot{G} + \frac{1}{n_2} \frac{\partial n_2}{\partial T} \dot{T} \right]$$

其中:

$$\dot{G} = [n_3 + n_4 \exp(-n_5 R)] \dot{R} + n_6 \left[\frac{2}{3} \Omega_j \dot{\Omega}_j \right]^{\frac{n-1}{2}}$$

Ω_j^0 为背应力初始值:

$$\Omega_j^0(t) = -\delta_j^0 \Omega + 3 \Omega^0 \frac{C_{jk}(t) C_{kj}(t)}{C_{pq}(t) C_{qp}(t)}$$

式中: S_{ij} 为应力偏量, R 为累积等效非弹性应变。

$K_1, K_2, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, m$ 及 Ω_j^0 均为与温度相关常数, 反映的是材料硬化与恢复的特性。

所给出的本构理论通过 MARC 非线性有限元软件的用户子程序 Hypela 编进 MARC, 其方法可参见文献[1, 4]。陶瓷隔热涂层 Walker 材料参数参见文献[1]。

3 计算结果及分析

3.1 稳态温度场分析

温度场分析包括2个方面: (1) 涂层类型(等离子、EB-PVD) 对基体温降影响; (2) 涂层厚度的影响(0.125 mm, 0.25mm)。计算结果见图2和图3。

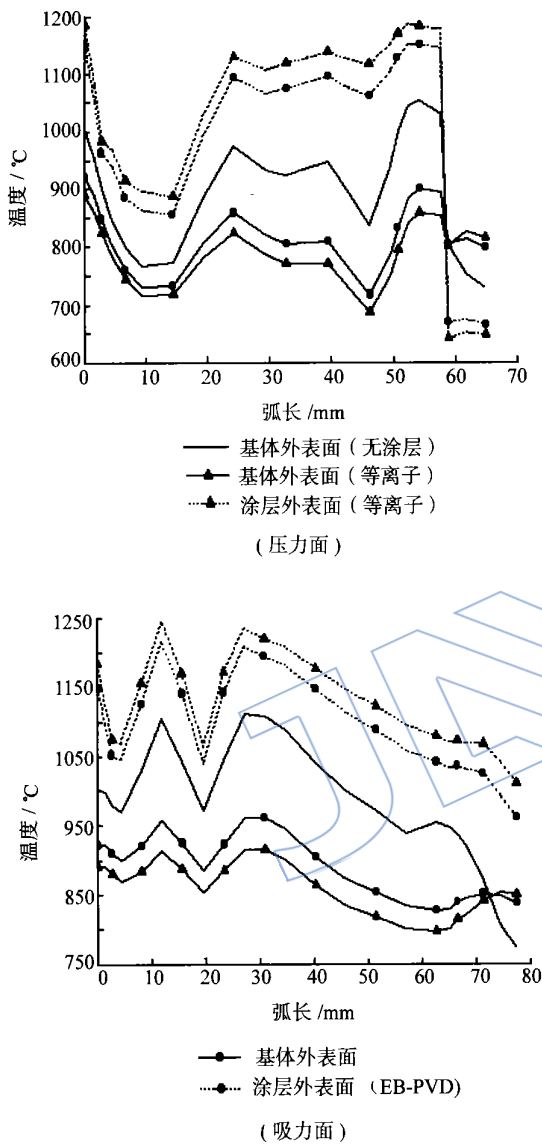


图2 温度场计算结果比较(涂层厚度: 0.25 mm)

虽然陶瓷层的材料都是 $ZrO_2(7\%Y_2O_3)$, 但是由于喷涂工艺的影响, 使得等离子和 EB-PVD 两种类型涂层的隔热性能有所区别的。1000℃左右时, EB-PVD 的导热系数大约是等离子涂层的 1.5~2倍。图中显示的温度结果说明叶片不同位置其温降效果从几十到上百度不等。以叶背最高温度点 S9(见图1) 为例, 陶瓷层厚度从0.125 mm 增加到0.25 mm 引起的基体温降等离子从 118.1℃到 195.2℃, EB-PVD 从 87.8℃到

143.9℃。由此看出涂层厚度增加使得隔热效果提高很大, 且等离子涂层温降效果比 EB-PVD 的大。在基体温度下降的同时, 涂层外表面温度比不加涂层有了提高。仍然以 S9点为例, 没有涂层时该点温度为1110.6℃, 当使用0.125 mm 和0.25 mm 不同厚度的等离子陶瓷涂层时, 其相应的外表面温度为1170.4℃和1214.9℃, 而其下面对应的基体温度分别为992.5℃和915.4℃, 换一角度就是说0.25 mm 厚的涂层中会有近300℃的温差(粘结层中温降很小), 从这一结果可以初步看出, 加上涂层以后叶片整体的危险部位可能会从金属基体转移到涂层中。

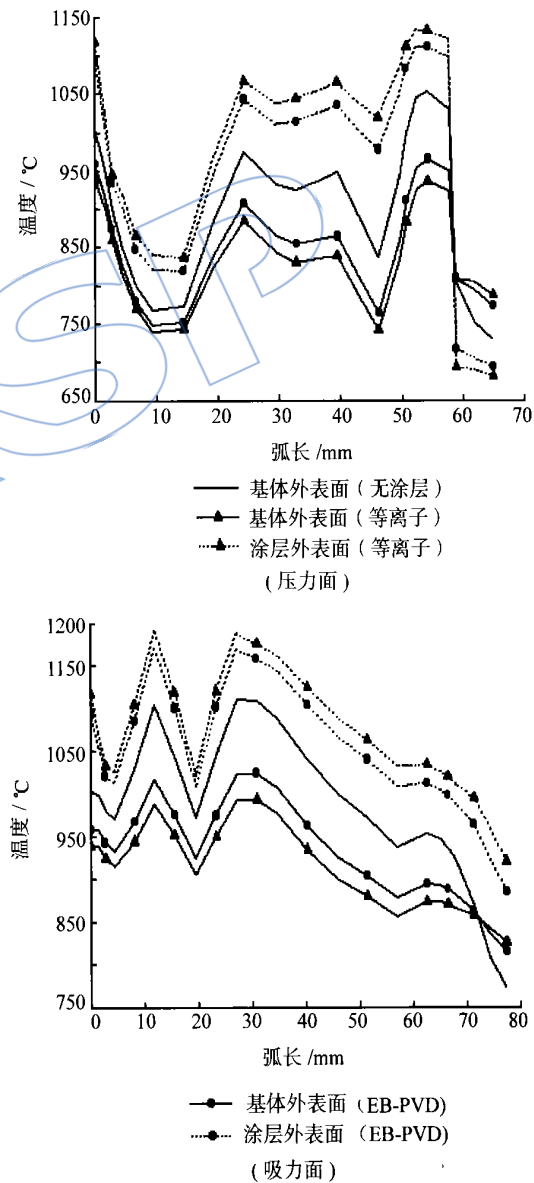


图3 温度场计算结果比较
(涂层厚度: 0.125 mm)

3.2 带涂层叶片热应力分布分析

图4为金属基体表面 Mises 应力沿叶面的分布。计算中考虑了4种情况: 原型(无涂层)、加0.125 mm 等离子陶瓷涂层、加0.25 mm 等离子陶瓷涂层、加0.25 mm EB-PVD 陶瓷涂层。从结果可以看出: 当叶片使用热障涂层后, 其金属基体表面尤其是危险点处的 Mises 应力有所增大, 其中0.125 mm 的等离子涂层应力增加最多。以 K3 的持久蠕变强度为衡量基准, 选取了叶面上的2个最危险点 P8和 S11分析蠕变持久时间(见表1)。从这些结果可以看到效果最好的为使用0.25 mm 厚度的涂层, 而且基体最大当量应力是在陶瓷厚度应用0.125 mm, 而不是0.25 mm 厚度时产生的。

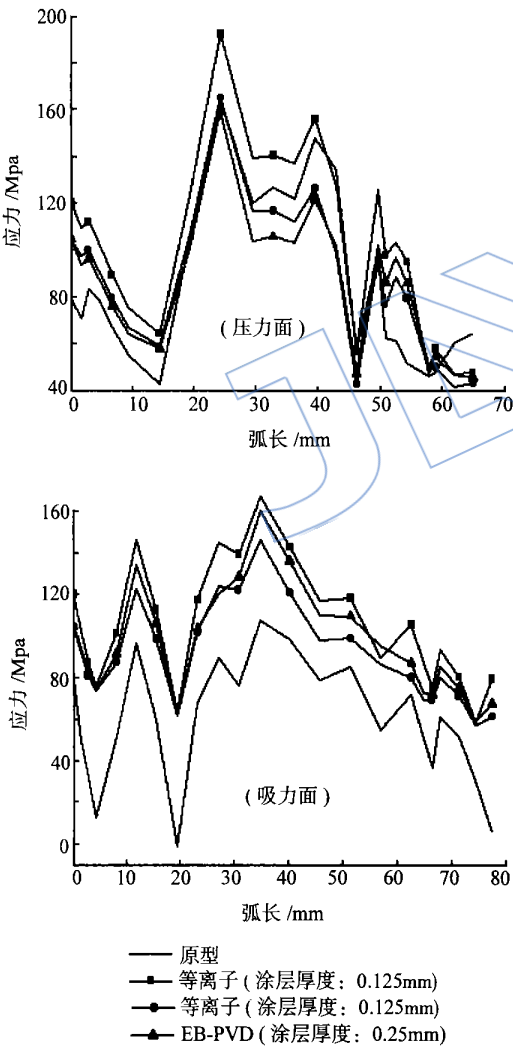


图4 金属基体外表面当量应力分布

上面的结果说明, 以持久蠕变性能作为考核标准, 使用涂层以后金属基体的强度得到了较大的提高, 这样整个系统的危险部位会转移到涂层

上面。

表1 危险点持久蠕变强度的比较

危险点	蠕变持久时间/h		
	原型	等离子 (0.125 mm)	等离子 (0.25 mm)
P8	190	> 3000	> 3000
S11	< 50	210	> 3000

图5描述了0.25 mm 和0.125 mm 厚度等离子陶瓷涂层沿叶盆、叶背的应力分布, 0.25 mm 厚度的陶瓷层由2层单元表示。图中所选节点

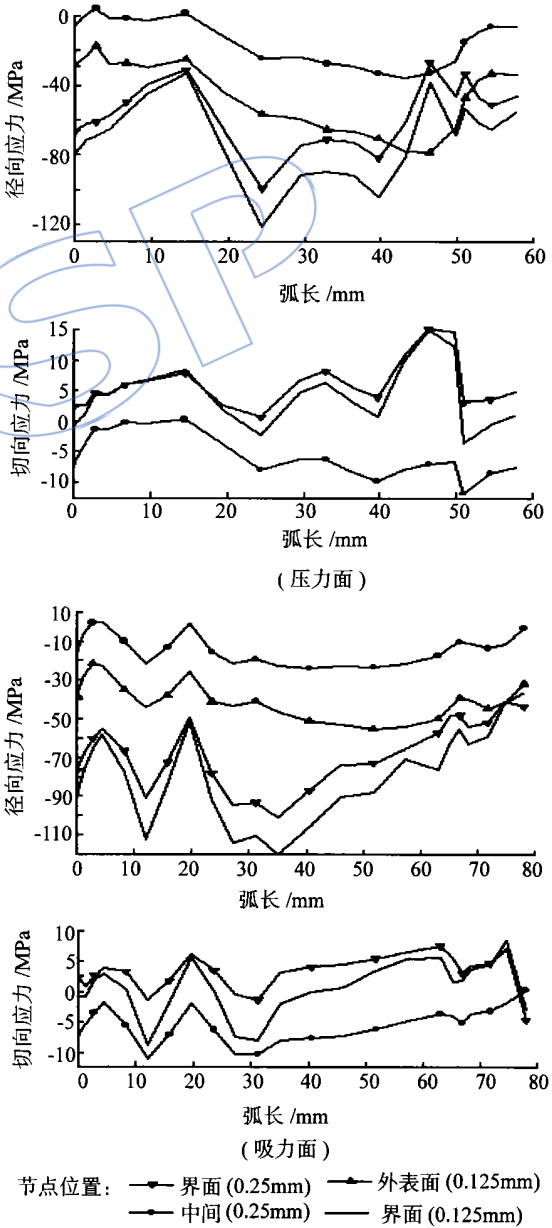


图5 陶瓷层内应力的分布

的位置分别位于陶瓷涂层界面、中间点和外表面上。一般情况下,引起涂层失效有2种主要应力状态:(1)使涂层剥落的平面内裂纹,该裂纹的产生是由于平面内的压应力与垂直于平面的法向拉应力综合作用的结果;(2)沿涂层厚度方向的垂直裂纹(龟裂),该裂纹主要是由于涂层平面内的拉应力造成的,这种裂纹大多是从涂层表面开始逐渐

向内部发展。在均匀温度场下,剥落通常会在冷却过程中产生,而高温时则更容易发生龟裂。尽管后一种裂纹不如前一种危险,但其产生毕竟对涂层部件造成了不利影响。

图中结果显示无论叶盆还是叶背,陶瓷层内的应力大多为负,即涂层平面内基本上都处于压应力状态,应力幅值界面最大,外表面其次,涂层中间部位相对最小。即使有的地方产生了拉应力其数值也不大,因此这种情况下不应该发生龟裂。图中还显示最大压应力位于粘结层/陶瓷层界面附近,其相应的径向应力很小。这是一种危险的状态,正如前所说的第一种涂层失效形式。图6为0.25 mm厚度等离子、EB-PVD涂层中间节点的应力分布。从中可以看出使用EB-PVD后涂层平面内应力得到很大缓解,而径向应力变化相对不是很大。由此看出与等离子相比,使用EB-PVD在高温工况下涂层强度会有很大改善。

4 结 论

综上所述,当叶片使用热障涂层以后,其基体实际温度明显下降,其强度及蠕变寿命会有明显的提高。通常在这种情况下,原来的危险点会转移的涂层中去。不同类型的涂层之间,等离子隔热效果要优于EB-PVD,以0.25 mm厚度为例,在中截面上前者最大温降可以超过190℃,而后者在150℃左右。从涂层强度和降温综合效果上看,0.25 mm厚度的涂层要优于0.125 mm厚度。与等离子涂层相比,高温工况下EB-PVD由于‘柱状晶’结构的作用,其平面内应力要明显小于前者。

参考文献:

- [1] 耿瑞. 热障涂层强度分析及寿命预测研究[D]. 北京: 北京航空航天大学研究生院, 2001.
- [2] 杨晓光. 一种简便的隔热涂层残余应力分析方法及结果讨论[J]. 航空动力学报, 1997, 12(3): 239-242.
- [3] Walker K P. Research and Development Program for Nonlinear Structure Modeling with Advanced Time-Temperature Dependent Constitutive Relationship[R]. NASA - CR - 165533, 1981.
- [4] 杨晓光. 粘塑性材料结构的有限元分析方法[J]. 航空动力学报, 1998, 13(4): 380-384.

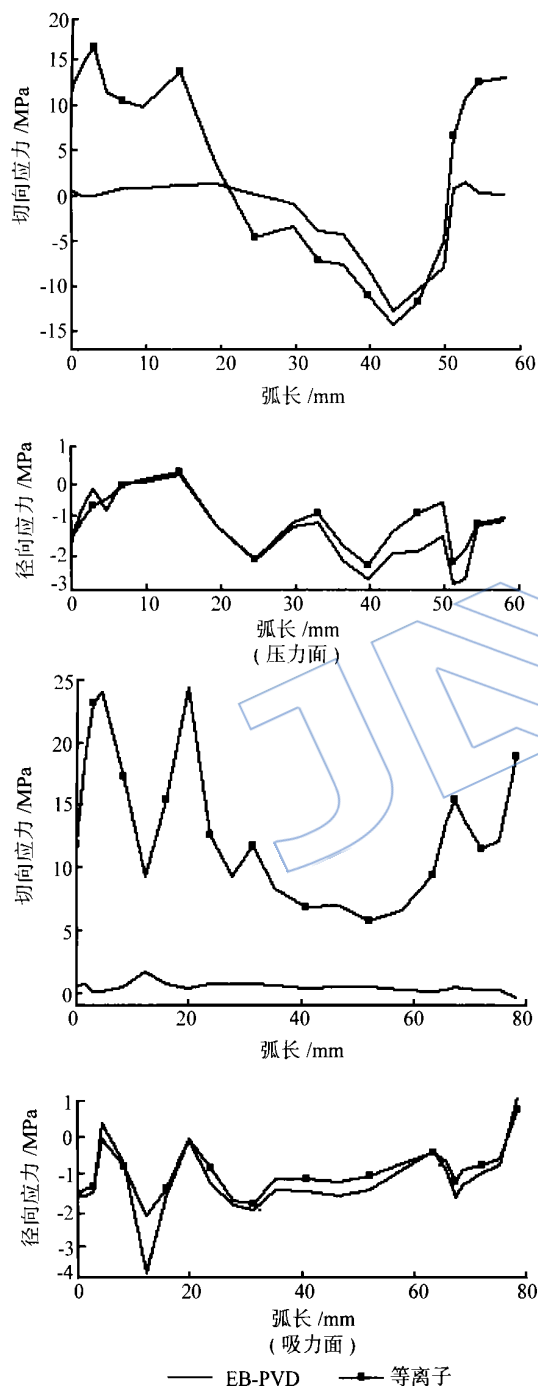


图6 EB-PVD与等离子涂层的热应力分布比较

(责任编辑 王震华)