

一种简便的隔热涂层残余应力 分析方法及结果讨论

北京航空航天大学 杨晓光** 耿 瑞 熊昌炳

【摘要】 从涡轮叶片隔热涂层等离子喷涂的工艺过程中残余应力形成机理为出发点, 通过对喷涂过程进行合理的分析和简化, 并结合有限元方法, 给出了一个可行的隔热涂层残余应力分析简便方法。最后通过算例, 进行了分析讨论。

主题词: 隔热层 残余应力 有限元法

分类号: V214.32 V254.2

1 残余应力形成机理

等离子喷涂时, 残余应力的形成是个复杂的过程, 基体和涂层的厚度、涂层原料的组成、喷涂速率、喷枪的距离等诸多因素都决定了最终残余应力的结果。一般来说, 喷涂时涂层的形成可分成 3 个阶段^[1-3]: 第 1 阶段为涂层的凝固过程, 由于熔化的涂层物质与基体温度有一定的温差, 所以涂料凝固在基体表面; 第 2 阶段类似第 1 阶段的重复, 所不同的是基体上已覆盖初始冷却的涂层, 同时新的一层又凝固伸长; 第 3 阶段是在喷涂结束后, 熔融的涂料已冷却为固体的涂层, 整个涂层系统冷却到室温的过程。在这个过程中, 由于基体的热膨胀系数大于涂层的热膨胀系数, 所以收缩量要比涂层大, 这最终会在涂层中产生残余应力。以上 3 个阶段合在一起就决定了涂层系统的残余应力。从喷涂过程可知: 第 1 阶段包括第 2 阶段, 粉料从熔融状态凝固为固体, 过程非常复杂, 其物理过程与第 3 阶段不完全一致。熔融的涂料在凝固成固体涂层时, 基体从涂层中吸热膨胀, 由于这时固体涂层还未完全形成好, 同时基体原来就加热在很高温度, 因此该热膨胀量不应很大, 可认为在热膨胀的过程中未受到约束; 同理对涂层来说可认为此过程基体和涂层内未产生内应力, 是应力自由的。这样可忽略第 1、2 阶段对残余应力的影响。据以上所述, 使得残余应力可进行分析的核心是: 残余应力的产生是由于已形成固体的涂层与基体在从高温的无内应力状态冷却到室温时, 其热膨胀不匹配而造成的。

2 残余应力估算

目前, 涂层体系通常由基体加 $M\text{CrNiAlY}$ (M 为 Ni 或 CoNi) 的粘接层及加氧化锆陶瓷隔热层组成。涂层厚度为: 粘接层在 $0.12\sim 0.25\text{ mm}$ 之间, 陶瓷隔热层在 $0.1\sim 0.13\text{ mm}$ 之间。喷涂粘结层时通常基体加热到某一温度 (如 982°C), 这时熔融的涂料覆盖在基体表面并冷却成涂层^[4,5]。由上所述, 该过程不产生内应力, 当基体和凝固成固体的涂层从高温冷却到室温的过程中, 产生热膨胀不匹配的残余应力。以基体为基准参考, 该热膨胀不匹配的应变量为: $(\alpha -$

$\alpha_r)(T_{SF} - T_R)$ 。其中 α_r 为 T_{SF} 温度下涂层的热膨胀系数; α 为 T_{SF} 温度下基体的热膨胀系数; T_{SF} 为无应力温度, 也就是喷涂时的基体加热后的控制温度; T_R 为给定的温度, 即所要分析残余应力的那个温度, 通常为室温。为了可以结合有限元方法进行残余应力分析, 考虑一下有限元采用了无应力参考温度来计算结构有温度分布时的热应力。因此和这样的原理相似, 以基体为热膨胀基准, 确定一自由应力参考温度, 表明以此温度计算的粘结层热膨胀量和热膨胀不匹配的应变变量 $(\alpha_r - \alpha)(T_{SF} - T_R)$ 相同。该方法可称为自由应力参考温度法。其计算表达式为:

$$(\alpha_r - \alpha)(T_{SF} - T_R) = \Delta T_{NR} \alpha_{NR} = (T_{NR} - T_R) \alpha_{NR} \quad (1)$$

T_{NR} 为自由应力参考温度; α_{NR} 为 T_{NR} 温度下涂层的热膨胀系数。

无应力温度根据实际的喷涂过程确定, 如喷涂中, 基体加热到某一温度后, 熔化的涂层材料覆盖在它的表面, 这时无应力温度就是当涂层覆盖到基体表面时, 基体的温度; 如果喷涂结束后涂层系统做了退火处理, 则无应力温度为退火温度。

方程(1)中有两个未知数 α_{NR} 、 T_{NR} , 但 α_{NR} 是温度的函数, 通常情况下可通过插值得出, 插值公式为:

$$(\alpha_r - \alpha_{TR}) / (T - T_R) = (\alpha_{NR} - \alpha_{TR}) / (T_{NR} - T_R) \quad (2)$$

这里: T 为任取的一个已知该温度下热膨胀系数的温度。 α_r 为该温度下的热膨胀系数。方程(1)、(2)联立求解可得出 T_{NR} 。

举例说明如下: 假设喷涂粘结层时, 基体的温度控制在 982°C (T_{SF}), 则该温度即是涂层系统的无应力温度; 现在要计算温度是 21°C (T_R) 时的自由应力参考温度 T_{NR} , 有关参数为:

$$\alpha_r(982^\circ\text{C}) = 15.66 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}, \quad \alpha(982^\circ\text{C}) = 16.04 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{将数值代入方程(1) 得到: } \Delta T_{NR} \alpha_{NR} = -365.18 \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\text{另外有: } \alpha_{TR}(21^\circ\text{C}) = 16.04 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}, \quad \alpha_r(T = 204^\circ\text{C}) = 16.04 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{由方程(2) 可得: } \alpha_{NR} = 0.00344 \times 10^{-6} \Delta T_{NR} + 11.16 \times 10^{-6} \quad (4)$$

方程(3)、(4)联立得: $0.00344 \Delta T_{NR}^2 + 11.16 \Delta T_{NR} + 365.18 = 0$ 。解方程选适当的根, 得粘结层的自由应力参考温度 T_{NR} 为 -12.4°C 。当加上第3种涂层(陶瓷层, 基体温度控制在 204°C , 此温度即为计算 T_{NR} 的无应力温度)时, (1)、(2)式中所有与基体相关的参数用粘结层的参数替代, 其余同上, 最后得 21°C 时陶瓷层的自由应力参考温度 T_{NR} 为 -60.1°C 。需要说明的是, 无应力温度是一喷涂工艺控制参数, 一般由工艺给出。

因此, 用有限元分析喷涂完后涂层在室温 21°C 的残余应力, 其计算条件为: 涂层系统各部分温度均为 21°C , 系统各部分自由应力参考温度为: 基体 21°C , 粘结层 -12.4°C , 陶瓷层 -60.1°C 。通过这种方法就可以计算涂层系统的残余应力。

3 有限元分析实例

分析中使用的模型是正在进行实验的圆棒试样结构, 工作段直径为 13 mm 。圆形是为了模拟叶片叶型曲面形状, 使得喷

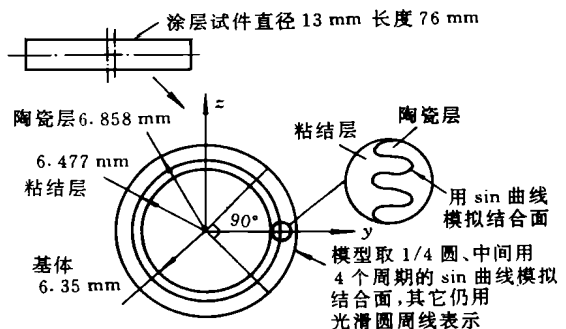


图1 平面应变计算模型示意图

涂工艺过程更接近叶片实际喷涂工艺。基体为 DZ4 定向结晶材料, 粘接层为 NiCrAlY, 由于实际喷涂过程中, 涂料颗粒是变化的, 因此两者的结合面呈波形, 一般可认为具有正弦形状。因此分析采用了 MODEL1(正弦波形界面, 周期 0.05 mm, 峰值为 0.015 mm)、MODEL2(平滑界面) 两种模型, 以考虑两者的残余应力状态差别。考虑到对称性, 采用平面应变方法, 见图 1。假设计算粘结层残余应力时无应力温度(基体温度) $T_{SF}=982^{\circ}\text{C}$, 计算陶瓷层残余应力时的无应力温度(这时粘接层相当于基体) 分为 $T_{SF}=204^{\circ}\text{C}$ 及 $T_{SF}=650^{\circ}\text{C}$ 两种情况, 计算涂层系统在两种给定温度下(高温 1093°C 、室温 21°C) 的残余应力。这里所给出的温度值基本上是目前喷涂工艺中的典型值。在分析中, 涂层系统的组成材料假设为均匀、各向同性及线弹性的, 每种材料都有自己的弹性模量、波松比和热膨胀系数。

热膨胀系数见表 1。根据上述原理计算的 T_{NR} 见表 2。

表 1 热膨胀系数($\times 10^{-6}$)

温度	21℃	204℃	650℃	982℃	1093℃
DZ4	12. 4	12. 7	13. 6	16. 0	17. 2
NiCrAlY	11. 1	11. 7	13. 6	15. 6	16. 7
ZrO ₂	7. 6	8. 5	10. 3	11. 7	12. 2

表 2 计算参考温度状态(单位: $^{\circ}\text{C}$)

给定计算温度 T_R	21	21	1093	1093
无应力温度 T_{SF} 喷涂陶瓷层时基体控制温度	204	650	204℃	650
粘接层 T_{NR}	- 14. 0	- 14. 0	1095. 7	1095. 7
陶瓷层 T_{NR}	- 60. 3	- 333. 2	1310. 1	1208. 1

4 结果分析讨论

根据以上条件计算得到的涂层残余应力, 选取了陶瓷层与粘接层结合界面靠近陶瓷层的一面的最大应力点的数值, 见表 3(σ_x 为轴向应力, σ_r 为径向应力)。从涂层总体结构区域看, 该结合面处也是最大的残余应力区。表 3 的应力结果很好的说明了该区域是一强度危险区。

表 3 有限元应力计算结果

MODEL1 (正弦界面)		正弦界面			平滑界面		
MODEL2 (平滑界面)		$\sigma_z/\text{M Pa}$	$\sigma_y/\text{M Pa}$	$\tau_{yz}/\text{M Pa}$	$\sigma_z/\text{M Pa}$	$\sigma_y/\text{M Pa}$	$\tau_{yz}/\text{M Pa}$
21℃	(204℃)	- 21. 07	3. 79	0. 41	- 27. 0	1. 55	4. 70
21℃	(650℃)	- 139. 81	62. 52	10. 06	- 126. 78	7. 03	21. 93
1093℃	(204℃)	62. 20	- 32. 20	5. 18	54. 10	- 2. 97	1. 08
1093℃	(650℃)	32. 70	- 16. 80	2. 70	28. 62	- 1. 57	4. 96

从表中可以看到: 在计算给定室温 21°C 的残余应力时, 轴向应力 σ_x 是压缩状态, 径向应力 σ_r 拉伸状态, 该应力状态的趋势是使得陶瓷层与粘接层分离, 在两层的结合界面处产生裂纹。

尤其是轴向压力很大,使得脆性的陶瓷层产生一种崩离(Spalling)的趋势。无论是 MODEL1 的正弦界面还是 MODEL2 的平面结合面的残余应力结果都是如此(MODEL2 的径向应力由于无波峰的影响,数值要小)。这种状态是所有应力状态中最危险的。也和目前实验所观察到的现象吻合。对给定高温(1093℃)下的残余应力,虽然应力也不小,但应力状态正和室温相反,它的趋势是使得陶瓷层本身开裂,但不脱落,因此还可以起部分隔热作用。危害没有前一种那么大。计算这两种给定温度(室温、高温)的残余应力,可以给工艺提供一很好的参考数据,即喷涂完的结构件应进行热处理,使其内部残余应力状态发生变化,减少危险的残余应力。

从表 3 的结果可看出,喷涂陶瓷层时,不同的基体(这时基体为粘接层)温度(无应力温度,涂层喷涂的工艺控制参数)对涂层系统影响的差异是非常大的。计算给定室温 21℃的残余应力时,控制基体温度 $T_{SF} = 650^{\circ}\text{C}$ 时的应力要比 $T_{SF} = 204^{\circ}\text{C}$ 时的应力大很多,而且这种轴向压缩、径向拉伸的应力形式最终会导致涂层剥落。在高温(1093℃)时虽然应力状态不同,但情况类似,这种应力在陶瓷层中产生裂纹。当然涂层内无论是产生剥落还是裂纹都是工作中不希望看到的,因此喷涂时,控制基体温度以调整残余应力的大小,使涂层系统始终工作在应力、应变允许范围内看来是非常必要的。

以上的涂层残余分析方法较巧妙,简单而实用,在目前没有很好方法分析或实验得到涂层残余应力时,不失为一个可应用的方法。虽然目前没有实验可以验证,但所得的计算结果,定性上都和涂层强度实验的宏观结果相吻合。并且所得结论给涂层喷涂工艺提供了很好的指导。

参 考 文 献

- 1 Sheffler K D. Current Status and Future Trends in Turbine Application of Thermal Barrier. ASME Journal of Engine for Gas Turbine and Power 1988, 110: 605
- 2 Cruse T A. Thermal Barrier Coatings Life Prediction Model Development. ASME Journal of Engine for Gas Turbine and Power, 1988, 110: 611
- 3 耿瑞. 陶瓷隔热涂层应用研究:[学位论文]. 北京航空航天大学, 1996
- 4 George C Chang, Phucharoen W, Miller R A. Behavior of Thermal Barrier Coatings for advanced gas turbine blades. Surf. Coat. Technol., 1987, 30: 13
- 5 George C Chang, Phucharoen W, Miller R A. Finite Element Thermal Stress for Thermal Barrier Coatings. Surf. Coat. Technol., 1987, 32: 307

(责任编辑 杨再荣)

VIBRATION CHARACTERISTICS ANALYSIS FOR A SHROUDED TURBINE BLADE WITH AIR- COOLING HOLES

Ou Yangde, Kong Ruilian, Song Zhaohong

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

Yu shengzhong and Xiao Bo

(Guizhou Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A finite element model has been established for analyzing vibration characteristics of a shrouded turbine blade with air- cooling holes. The effects of uniform and nonuniform temperature distribution, holes and constraint conditons of the shrouds on the vibration characteristics are considered. According to the resonant fatigue- damage life theory, the optimum clearance between neighboring shrouds is determined to increase the service life. The results of the analysis show that the air- cooling holes have less, but the constraint conditions and temperature distributions have significant effect on natural frequencies of the blades.

Key Words Engines Blade vibration Finite elements

A SIMPLE METHOD FOR CALCULATION OF RESIDUAL STRESS IN THERMAL BARRIER COATING

Yang Xiaoguang, Gen Rui, Xiong Changbing

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

ABSTRACT

The residual stresses are always emerged in plasma sprayed coatings due to their spray method. The accurate calculation of the residual stresses is important for strength evaluation and thermal fatigue prediction of the coatings, as well as for controlling and evaluating the spraying process. First of all, a main process causing residual stress is identified by analyzing plasma spray process and simplified into a model. The residual stresses in the coated part is resulted from the difference in thermal expansivities of the various materials involved. According to the above mentioned, authors bring forward a simple method for calculating residual stresses, which can be easily used with finite element method. Finally, as a demonstration, cylinder- type specimens are chosen to calculate residual stresses with FEM under various calculating conditions.

Key Words Thermal barrier coatings Residual stress Finite element methods

A NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL BENDING DEFORMATION AND ITS INFLUENCE ON ROTOR

Lu Shan, Zhao Ming, Ren Pingzhen, Qi Xianping

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

ABSTRACT

Thermal bending deformation and its influence on an aeroengine's rotor are analyzed numerically, and some useful results for engineering are obtained. On the basis of axial symmetrical static temperture field of engine's rotor, its axial non- symmetrical temperture field is formed by the aid of thermal bending test data, three- dimension thermal elastic FEM is used to calculate the thermal bending deformation, and transfer matrix method