

# 空心叶片内孔道防护工艺的研究

## Process to Coat Internal Cooling Passages of Turbine Blades

北京航空材料研究院 杨忠林 胡立明

Yang Zhonglin Hu Liming (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

**[摘要]** 以用于空心叶片外表面的 ASL-5 水溶性扩散型料浆铝-硅涂层工艺为基础,研究了叶片内孔道料浆注入防护工艺。研究表明:ASL-5 料浆采用料浆注入法用于叶片内孔道防护,涂层覆盖率可达 100%,涂层厚度均匀,无烧结、堵孔现象。而且通过适当调整料浆成分可使内孔道的涂层组织、成分和外表涂层完全一致。

**关键词:** 涡轮叶片 Al-Si 涂层 内孔道

**[Abstract]** A slurry injection process to coat internal cooling passages of turbine blades was studied based on the ASL-5 water-based and diffusion type slurry Al-Si coating process employed for external surface protection. The results show that this process can provide coating with 100% coverage and good uniformity, and without cementation and hole blockage using ASL-5 slurry.

**Keywords:** turbine blade Al-Si coating internal cooling passage

### 1 前言

先进的涡轮发动机为追求高的推力,不断提高涡轮进口温度,这就使发动机热端部件,如涡轮导向器叶片和工作叶片的工作条件越来越苛刻,对其用材的性能要求越来越高。

为满足上述要求有两种解决办法:(1)研究在高温下强度更高的耐热合金;(2)发展冷却技术,制造各种形式的空心气冷叶片,降低金属表面温度。

但是表面温度测定表明,某些先进发动机叶片内孔道的温度已达 900~950℃,那里的氧化/热腐蚀已成为限制寿命的因素<sup>[1]</sup>。如 JTBD 发动机 B1900 合金一级空心叶片(无涂层),其内孔道在一个寿命期内的腐蚀损失是叶片壁厚的 10%<sup>[2]</sup>。这样高的腐蚀速率对薄壁空心叶片(有的壁厚仅 0.5mm)有严重威胁。

在叶片内孔道表面施加保护涂层,降低合金的腐蚀速率,是延长空心叶片使用寿命的有效和可行的办法。

从工艺角度出发,一般对叶片内孔道防护涂层工艺的要求是<sup>[3]</sup>:

- (1) 涂层具有 100% 的覆盖能力;
- (2) 层厚度和成分最大变化不超过 20%;
- (3) 涂渗处理后孔道易清理,不堵塞,不烧结;

- (4) 处理后冷却孔道尺寸增加不大于 0.005cm;
- (5) 与叶片外表面涂层工艺具有良好的匹配性。

### 2 工艺方案的选择

国内在叶片内孔道防护工艺的研究工作尚处开始阶段。国外对叶片内孔道防护工艺的研究工作开展较早,采用的主要工艺有固体粉末法<sup>[3]</sup>,化学蒸气沉积法<sup>[4,5]</sup>,化学镀和料浆注入法<sup>[6]</sup>等。有些方法在 70 年代就已在发动机中应用,并取得了显著效果。

根据前述内孔道防护涂层工艺的要求,对比几种涂层工艺:固体粉末法和料浆注入法存在着易烧结、堵孔和渗后难清理的问题;化学镀仅限于镀镍,涂层实际为 Ni-P 合金,P 对耐热合金是有害元素,应严格防止其进入基材;化学蒸气沉积被多数人是理想的内孔道防护工艺,因为该工艺涂层的形成方式属非接触式,渗后无渗剂的清理问题,无烧结、堵孔的危险,但该工艺要实现 100% 的覆盖难度较大。因此不少研究者采取了一些特殊的措施,以求提高涂层的覆盖率。例如研究出不断改变渗涂环境的压力,所谓“脉冲”法<sup>[7]</sup>和气相循环渗铝法<sup>[8]</sup>,据报导渗后涂层较均匀。

然而美国 GE 公司的研究认为:化学镀、料浆注入

4. 1000℃ / 2h 空冷 50 内孔道





料壳本身也是密度高,间隙少。上述因素均会使 Al 元素的提供和其气相传输路径受阻。而实验表明,在 Al-Si 料浆共渗过程中,气相沉积是 Al 渗入的主要方式,而 Si 则主要是靠固相接触扩散注入。当标准的 ASL-5 料浆用于内孔道防护时, Si 的主要渗入条件能予满足,而 Al 的主要渗入途径则受到限制,这便导致内孔道涂层高 Si 低 Al 的特点及 Si 分布规律的改变。

当将 NiAl : Si 的比例由 1 : 9 调整到 1 : 8~1 : 6 时,内孔道涂层的成分及元素分布规律与标准的 ASL-5 涂层,即外表面涂层相同,成分上 Al 高 Si 低,在 Si 的分布上内高外低。这一结果的出现,是因为调整后的料浆中 Al 含量提高而 Si 含量降低,以此弥补了由于内孔道的结构特点对 Al 渗入的阻碍,并使 Al、Si 元素渗入强度调整到与标准浆用于叶片外表面涂渗时的情况下相一致的缘故。

## 6 结论

(1) ASL-5 料浆通过料浆注入法用于叶片内孔道防护,涂层覆盖率可达 100%,孔道中涂层厚度均匀,无

烧结堵孔现象。

(2) ASL-5 标准料浆用于内孔道防护时,在相同的处理条件下,所获得的涂层与外表面涂层相反,在成分上 Si 高 Al 低,在 Si 的分布上外高内低。

(3) 通过适当调整料浆成分,即将 NiAl : Si 从 1 : 9 调整到 1 : 8~1 : 6,可使内孔道涂层的组织和成分与外表面标准的 ASL-5 涂层相一致。

## 参考文献

- 1 NASA-CR-159574
- 2 NASA-CR-16337
- 3 NASA-CR-195337
- 4 美国专利-4332843
- 5 美国专利-3900613
- 6 NASA- (技术备忘录) TM-75217
- 7 美国专利-4156042
- 8 Циркуляционный метод Получения Диффузионных покрытий на Деталях газотурбинных двигателей и перспективы его развития. ШИШД Г. Б. Строганов.
- 9 NASA-CR-159701

\* \* \* \* \*

(上接第 32 页)

式中  $t \geq \gamma_0$

这就形成了复合 Weibull 分布曲线,由基体模型向纤维模型的累积损伤和失效机理的转化就是复合 Weibull 分布规律的物理特征。

通过 Weibull 分布曲线可以清楚地看到  $F_{1(t)} = F_{2(t)}$  的交点(转折点)时,斜率产生突变  $m_2 > m_1$ ,说明损伤(裂纹)扩展速率加大了几倍,损伤加剧,临近破坏。复合 Weibull 分布了材料力学性能双重性的特征,作为使用者希望  $m_1 \rightarrow m_2$ ,  $m_1 = m_2$  最为理想,也就是复合材料的原材料匹配、工艺性能等均达理想状态。当  $m_1 \neq m_2$  时,不难看出疲劳寿命和强度选择应在转折点附近为宜。这对构件设计和材料研究及其应用(原材料的匹配、铺层设计、工艺研究等)都有重要参考价值。

## 4 结束语

(1) 复合 Weibull 分布规律(函数)的物理特征反映了 CFRP 的失效(破坏)机理,  $F_{1(t)}$  为初期树脂基体损伤的累积失效状态——早期损伤;  $F_{2(t)}$  为纤维损伤和混合损伤模型失效状态——耗损失效。

(2) 采用三参数 Weibull 分布函数对树脂基复合材

料的强度性能进行强度估计和可靠性分析是适宜的, Weibull 分布函数的适应性很强。

(3) 采用 Weibull 概率纸图解法进行 Weibull 分布处理的精度可以满足实际应用要求。

(4) 搞清材料失效(破坏)机理和分布规律函数的物理特征,才能发挥统计处理和 Weibull 分布函数的作用。

## 参考文献

- 1 G. P. Sendeky. ASTM STP. 734. 1981, 245~260
- 2 G. C. Grimes. Experimental Study of compression-Compression Fatigue of Graphite / Epoxy Composites, ASTM STP. 734, 1981
- 3 戴树森等. 可靠性试验及其统计分析. 国防工业出版社, 1983
- 4 ANDERS F. Blom. Fatigue of fibrous composite, FFA TN 1983-30
- 5 秦志敬. 碳纤维树脂基复合材料拉-压疲劳试验方法研究. 北京航空材料研究所(研究报告), 1984
- 6 秦志敬. 航空材料, 1985, No. 4
- 7 李正旺等. 材料工程, 1989, No. 3