

高压喷水设备在空心叶片脱芯工艺中的应用

A Study on Application of High Pressure Water-jetting Equipment in De-core Processes for Hollow Turbine Blades

顾国红 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

GU Guo-hong (Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了内腔形状比较复杂的涡轮叶片铸件脱芯方法。结果表明: 在化学腐蚀法脱芯的基础上辅之以高压喷水设备, 可以较有效地清除叶片内通道的残芯, 通过试验得出了合适的工艺参数。

关键词: 熔模铸造; 空心叶片; 脱芯; 设备

中图分类号: TG249.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 04-0038-02

Abstract: A de-core method for hollow turbine blades having complex inner cavity has been studied. It is showed that the combination of a high pressure water-jetting method with the original chemically etching method may effectively eliminate the residual core in the inner passage of blades. The suitable processing parameters are obtained by a series of experiments.

Key words: investment casting; hollow blade; de-core of casting; equipment

众所周知, 内腔较复杂的空心涡轮叶片大多采用预制陶瓷型芯以形成其空腔。随着航空发动机性能的提高, 气冷涡轮叶片的内腔愈来愈复杂, 致使陶瓷型芯愈来愈复杂, 随之带来叶片铸件脱芯愈加困难的问题。当前普遍采用的脱芯方法有化学腐蚀法和机械清除法。前者是利用化学物质与型芯材料的化学反应使型芯分解而去除, 适用于较复杂的型芯。机械法是对型芯施加外力, 破坏型芯的完整性而去除型芯, 但只适用于较简单的型芯。对于内腔形状复杂的涡轮叶片, 采用上述任一种方法都有可能产生残芯。如能将两者结合起来, 可高效去除叶片内腔型芯。本研究目的是针对某型号的复杂叶片铸件采用专门的高压喷水脱芯设备与原有的化学腐蚀工艺相结合, 高效地脱除叶片内腔的残芯。

1 试验条件和方法

本研究对象为航空发动机高压涡轮叶片。该叶片的设计采用了对流、冲击、喷射、气膜等复合冷却方式, 故具有相当复杂的气冷通道, 见图1。

该叶片采用XD-1陶瓷型芯形成内腔。这种型芯以二氧化硅为基体, 添加适量的氧化锆和增塑剂, 成型后在1200℃左右焙烧, 并进行强化, 使之具有足够的热强性和热稳定性^[1]。加之陶瓷型芯焙烧后十分致密, 与铸件又有很大的附着力, 故型芯从叶片内腔中去除是相当困难的。

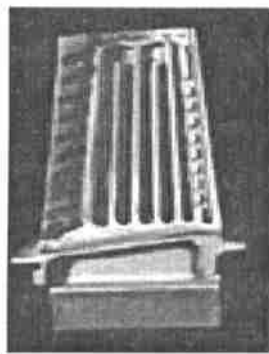


图1 某发动机涡轮叶片内腔通道

Fig. 1 The inner cavity of a aero-engine turbine blade

本试验是对叶片先进行化学法脱芯, 然后进行高压喷水处理。化学法是将叶片置于有一定浓度(~60%)的KOH溶液的脱芯罐内, 并在高温高压下“碱煮”一段时间(9~14h)。此时已有大部分型芯经化学反应而脱除, 其余的型芯也变为软糊状态。然后取出叶片洗净后置于专用的高压喷水设备中对叶片内通道进行冲洗。图2示出本试验所用的高压喷水脱芯设备组成示意图。该设备可以根据需要通过调节阀调节水压, 或调节喷嘴口径并配置相应的夹具以适应不同叶片的脱芯作业。

2 试验结果和讨论

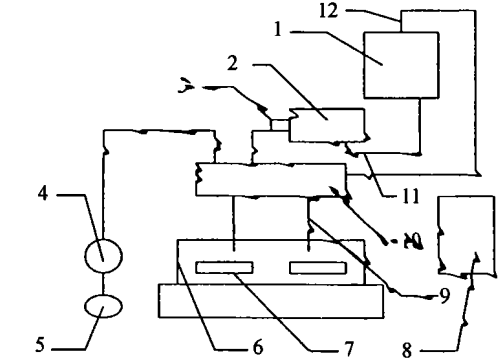
2.1 化学腐蚀参数的影响

表 1 示出了本试验选用的脱芯工艺参数。可以看出, 1 号、5 号和 6 号叶片在有一定浓度的 KOH 溶液的脱芯罐中脱芯, 由于溶液温度较高、罐内压力较大、且“碱煮”时间较长, 故比另一组叶片的脱芯效果好, 即在随后的高压喷水处理时完全脱除残芯的喷水次数较少。

如上所述, 本试验叶片所用型芯是以二氧化硅为基体的陶瓷型芯, 型芯经过 1200 左右焙烧, 型芯强度高达 10~13MPa, 随后在叶片定向凝固过程中于 1500 左右温度下保持 0.5h。型芯材料发生方石英相变, 体积发生变化使其与叶片金属强烈附着。化学脱芯的实质就是型芯材料与 KOH 溶液之间发生化学反应, 使二氧化硅分解而去除, 其反应式如下:



如温度较高、压力较大时, 有利于反应向右进行, 因



1-水箱; 2-高压水泵; 3-安全阀; 4-压力表; 5-调压阀;
6-工作室及移动系统; 7-叶片夹具; 8-控制柜;
9-喷嘴; 10-分流器; 11-进水管; 12-回水管

图 2 高压喷水设备组成示意图
Fig. 2 Sketch of high pressure water-jetting equipment

表 1 叶片脱芯参数及效果

Table 1 De-core param etrs and effects of the high pressure water-jetting

叶片号	KOH 腐蚀参数				高压喷水参数		
	浓度/ %	温度/	压力/ MPa	时间/h	压力/ MPa	时间/ min	喷水处理次数/ 次
1	40 ~ 80	160 ~ 220	0.2 ~ 0.5	11 ~ 15	25.3 ~ 28.3	3	2
5	40 ~ 80	160 ~ 220	0.2 ~ 0.5	11 ~ 15	28.3 ~ 31.4	3	1
6	40 ~ 80	160 ~ 220	0.2 ~ 0.5	11 ~ 15	28.3 ~ 31.4	3	1
2	40 ~ 80	140 ~ 160	0.2 ~ 0.5	9 ~ 10	25.3 ~ 28.3	3	3
3	40 ~ 80	140 ~ 160	0.2 ~ 0.5	9 ~ 10	28.3 ~ 31.4	3	2
4	40 ~ 80	140 ~ 160	0.2 ~ 0.5	9 ~ 10	25.3 ~ 28.3	3	3

此脱芯较快。

但是, 由于叶片内腔复杂, 通道细长, 还有“U”形拐弯段, 反应产物难以出来, 溶液难以进入, 使反应困难, 脱芯作业往往进行不下去, 延长时间也无法清除残芯, 此时就要取出叶片重新进行新一轮作业, 或辅之以机械法后再行处理而影响进度。所以, 提高脱芯罐温度和压力 (在设备允许的条件下) 虽然有一定作用, 但有时也无济于事, 仍留下残芯 (图 3a 箭头所指处是残芯)。应采用其它方法解决。

2.2 高压喷水参数的影响

叶片在经过了化学腐蚀法脱芯后, 脱除了大部分的型芯, 其余的型芯也已处于软糊状态。此时采用本试验的高压喷水专用脱芯设备进行处理可获得满意结果。试验表明, 喷水压力是最重要的参数。从表 1 看出, 1 号、5 号和 6 号叶片在相同条件下进行化学脱芯后, 5 号和 6 号叶片采用较高压力的喷水处理, 其脱芯效果就比喷水压力较低的 1 号叶片好, 完全脱去了残芯 (见图 3b)。

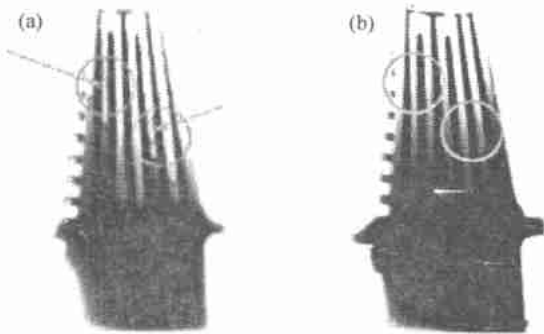


图 3 高压喷水前后叶片内通道情况
(a) 喷水前; (b) 喷水后

Fig. 3 The cavity status in blade before and after high pressure water-jetting

(a) before water-jetting; (b) after water-jetting

因此, 采用高压喷水脱芯时, 应在设备和人员操
(下转第 42 页)

由图1可见, 喷丸和未喷丸试样的残余应力场的主要差别在于喷丸强化处理后次表面存在最大残余压应力, 而未喷丸的不存在且残余压应力容易被疲劳应力抵消。未喷丸试样表面残余应力为 -630MPa , 这是磨加工产生的应力, 其深度一般约为 $30\mu\text{m}$, 而GH909合金达到 $55\mu\text{m}$ 。

由图2可知喷丸后高温退火处理 σ_r 减小, 表面 σ_r 由 -900MPa 减小到 $-500\text{MPa} \sim -700\text{MPa}$ 。这表明经过550℃处理后, 虽然残余应力场发生了松弛, 但松弛程度较小, 仍然存在残余压应力场, 残余压应力仍可抵消一部分作用于材料的外加拉应力。

表面残余压应力可有效抑制疲劳裂纹源在表面萌生, 在交变应力的作用下, 裂纹源只有到表面层最薄弱的地方寻找几率, 一般只能产生在压应力场发生变化的地方, 如产生残余拉应力、有夹杂物、缺陷的地方。裂纹成核后虽然有外力继续作用, 但裂纹的扩展又受到压应力场的阻抑, 难以快速扩展, 要想扩展必须达到 $\sigma_a - \sigma_r - \sigma_f$, 即交变的外力 σ_a 要大于材料本身的抗力 σ_f 与残余应力 σ_r 之差。由此可见, GH909合金喷丸强化后获得的表面残余压应力和表面层应力场有助于改善该材料的抗疲劳断裂能力。

3 结论

(1) GH 909合金喷丸后, 表面可获得较大的残余压应力和表面层存在一定深度的残余压应力场。

(2) 喷丸强化后再经550℃热处理, 残余应力场有所松弛, 但表面层仍能存在有益的残余压应力场。

参考文献

- [1] 高玉魁. 化学热处理对结构钢件表象疲劳极限影响的量化研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学硕士论文, 2000.
- [2] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [3] 姚枚, 王声平, 李金魁. 表面强化件的疲劳强度分析及金属的内部疲劳极限 [J]. 金属学报, 1993, 29 (11): A511.
- [4] 何崇智, 郝秀英, 孟庆恩等. X射线衍射实验技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 364.
- [5] 航空材料喷丸强化手册 [M]. 航空航天部系统工程, 1988: 11

收稿日期: 2001-04-04; 修订日期: 2002-01-04

作者简介: 高玉魁 (1973-), 男, 助工, 从事金属材料或构件表面形变强化工艺、残余应力场的测定和模拟及疲劳裂纹萌生和扩展的微细观过程理论研究, 联系地址: 北京 81 信箱 5 分箱 (100095)。

(上接第 39 页)

作条件允许下, 尽可能采用较高的压力, 或者增加喷水的次数。

由于高压喷水脱芯是一种辅助方法, 其清除残芯效果与叶片前期脱芯的情况密切相关。从表1可以看到, 1号叶片和2号叶片在相同压力下喷水处理。结果1号叶片完全脱净的喷水次数比2号叶片少, 这可能是由于1号叶片在化学脱芯时温度和压力较高, 时间较长, 因此前期的型芯脱除和破坏较大, 有利于喷水脱芯。所以, 高压喷水处理前叶片的“前提条件”也是十分重要的。

综上所述, 高压喷水脱芯效果取决于该设备的作业参数, 尤其是喷水压力, 并取决于叶片前一工序即化学腐蚀脱芯的程度。

3 结论

(1) 在原有的化学腐蚀脱芯方法的基础上, 再采用专用的高压喷水设备进行处理, 可以有效地脱除内腔复杂的空心涡轮叶片内通道中的残芯。

(2) 喷水压力越大, 效果越好。次数越多, 脱芯程度越干净。

(3) 高压喷水脱芯的喷水压力大小与化学腐蚀脱芯程度密切相关。

参考文献

- [1] 马德文. XD-1 定向空心叶片用陶瓷型芯 [J]. 航空制造工程, 1984, 2: 11.

收稿日期: 2001-03-22; 修订日期: 2001-11-13

作者简介: 顾国红 (1966-), 男, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱 (100095)。

* * * * *

征文通知

为总结交流近两年来材料技术研究及其工程化应用成果, 并为“十五”发展打好基础, 中国航空学会材料工程专业分会定于2002年11月在广东珠海(航展期间)召开“第六届先进材料技术研讨会”。

征文范围: 1. 金属材料; 2. 非金属材料; 3. 新型材料; 4. 先进工艺技术; 5. 先进测试技术。

论文请寄: 北京 81 信箱 54 分箱 郑运荣 阮中慈
邮编: 100095; 电话: (010) 62458039

2002年5月30日截稿, 论文格式参考《材料工程》杂志, 会前由《材料工程》杂志以增刊形式出版论文集。