

# 电液束加工对 DD6 单晶高温合金气膜孔的损伤行为研究

胡春燕, 刘新灵, 陶春虎, 孔志强

(北京航空材料研究院 航空材料检测与评价北京市重点实验室 材料检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 电液束加工主要是电化学阳极溶解的过程, 对单晶高温合金会造成孔边材料的腐蚀损伤, 进而在服役条件下影响单晶叶片的性能。通过宏、微观形貌观察、微观组织结构分析等方法研究电液束加工对单晶高温合金气膜孔的损伤行为, 通过高温原位疲劳试验分析打孔损伤对疲劳裂纹萌生机制的影响。结果表明: 在入口侧孔边及孔壁的腐蚀区域形貌均为 DD6 单晶高温合金电解腐蚀组织的特征, 部分  $\gamma$  相被腐蚀掉,  $\gamma'$  相突出。入口侧孔边的电解腐蚀层厚度在 15~30  $\mu\text{m}$  范围内, 中间孔壁的电解腐蚀层厚度在 6~9  $\mu\text{m}$  范围内; 带单孔的 DD6 单晶高温合金试样疲劳裂纹萌生有两种情况: 一是从孔边的疏松缺陷处萌生裂纹; 二是从孔边的电解腐蚀损伤层附近的应力集中处起源。

**关键词:** 气膜孔; DD6 单晶高温合金; 电液束加工; 损伤行为; 原位疲劳

中图分类号: TG132.3<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)10-3190-05

随着对航空发动机性能要求的不断提高, 发动机热端部件已广泛采用气膜冷却技术, 如何有效地减少涡轮等重要部件气膜冷却孔的再铸层(厚度)对保证发动机的质量有重大意义。

目前, 叶片气膜冷却孔的加工方法主要采用传统的激光加工、电火花加工和电液束加工, 各种方法均各有特点。在中国, 对于先进型号发动机涡轮转子单晶叶片已主要采用电液束加工。电液束加工主要是电化学阳极溶解的过程, 系冷态加工法, 理论上不会产生再铸层和微裂纹, 对延长发动机叶片使用寿命有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

单晶高温合金在定向凝固制备过程中, 凝固组织一般都为枝晶组织, 枝晶是由于合金非平衡凝固中固/液界面失稳造成的。单晶高温合金虽然没有晶界, 但枝晶间与枝晶干化学成分的差异导致两者的抗腐蚀性存在一定的差异, 枝晶间相对易被腐蚀。电液束加工外观上看不出明显的损伤, 但由于电液束加工属于一种电化学腐蚀加工方法, 对单晶合金会造成孔边材料腐蚀损伤, 进而在服役条件下影响单晶叶片的性能。近年来, 出现了多起与涡轮叶片气膜孔损伤有关的故障。

目前, 大多报道的涡轮叶片气膜孔加工导致的再铸层或微裂纹问题<sup>[4,5]</sup>, 仅有少量提及不同气膜孔数量、孔的圆度、再铸层厚度对疲劳性能的影响<sup>[6-8]</sup>; 而对于电液束加工对单晶高温合金气膜孔的损伤行为的

研究报道极少。

本工作以 DD6 单晶高温合金为研究对象, 采用电液束加工方法, 通过宏、微观形貌观察、微观组织结构分析、高温原位疲劳试验等方法研究电液束加工对单晶高温合金气膜孔的损伤行为, 并分析加工损伤对疲劳裂纹萌生机制的影响。

## 1 实验

本实验所用的 DD6 单晶高温合金由北京航空材料研究院提供, 名义化学成分(质量分数, %, 下同)如下: Cr 4.3, Co 9, Mo 2, W 8, Ta 7.5, Re 2, Nb 0.5, Al 5.6, Hf 0.1, C 0.006, 其余为 Ni。采用螺旋选晶法在高温梯度真空定向凝固炉中制取单晶试棒, 试样晶体取向为[001], 按照标准制度进行热处理, 所有毛坯均采用 X 射线劳厄背衍射法进行晶向检查, 其偏角控制在 10°之内。

电液束加工是利用喷嘴喷出带电的电解液进行加工的一种微细电解加工方法<sup>[9]</sup>。目前这种加工方法的机理还不十分清楚, 但可以肯定, 加工中既有阳极金属溶解的过程, 也有化学加工的作用。在实际加工中, 去掉的金属量远远大于按法拉第定律计算的电化学作用去除的金属量和化学作用对金属去除量的总和<sup>[10]</sup>, 在一定程度上必然对单晶高温合金会造成孔边材料的

收稿日期: 2018-10-25

基金项目: 航空科学基金(KZ43150734)

作者简介: 胡春燕, 女, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 北京航空材料研究院, 北京 100095, 电话: 010-62496238, E-mail: fachcy@163.com

腐蚀损伤。

利用 NOVA NANOSEM 450 型场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscopy, FESEM) 对孔边腐蚀损伤特征及微观组织形貌进行观察, 并对电解腐蚀层的厚度进行测量。

采用聚焦离子束技术 (focused ion beam, FIB), 分别在孔壁腐蚀损伤层和基体切取试样薄片, 利用透射电镜 (transmission electron microscope, TEM) 进行观察。使用 JEOL-2010F 型透射电镜对孔壁腐蚀损伤层和基体的微观组织结构进行分析。

利用 SEM-SERVO 550 型带扫描电子显微镜的疲劳试验机对试样进行高温原位疲劳试验。原位疲劳试样均是在原位基本试样的基础上 (图 1), 在工作段的中心位置采用电液束加工一个角度为 45°斜孔, 直径为 0.4 mm, 试验温度为 500 °C, 载荷为 650 MPa。

## 2 结果与分析

### 2.1 孔边及孔壁腐蚀微观组织形貌

图 2 为电液束加工后孔边及孔壁的腐蚀形貌。可以看出, 孔边及孔壁的颜色与其余部位有所差异, 颜色发白, 在入口侧试样表面腐蚀相对较重, 在各孔边缘均可见一圈电解腐蚀特征, 被腐蚀区域形状基本呈椭圆环形, 其中孔上侧腐蚀区域的长度为 200~300 μm (图 2a)。高倍下观察, 可以看出孔边及孔壁腐蚀区域形貌均为 DD6 单晶高温合金电解腐蚀组织的特征<sup>[11]</sup>, 部分 γ 相被腐蚀掉, 细小立方体状的 γ'相突出, 且立方体状的 γ'相局部出现了脱落, 可能是由于 γ'相与 γ 相的结合力较弱导致 (图 2b)。

### 2.2 电解腐蚀层的 TEM 分析

鉴于电解腐蚀层在 TEM 样品制备的过程中存在相当的困难, 采用聚焦离子束 (FIB) 技术制备 TEM 样品。聚焦离子束 (FIB) 技术能够准确、方便地实现对材料微观区域的沉积、刻蚀、减薄等操作<sup>[12]</sup>。

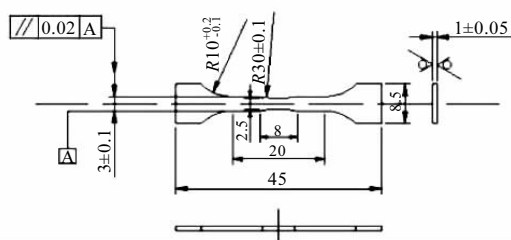
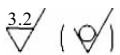


图 1 原位疲劳基本试样形状与尺寸

Fig.1 Shape and size of in-situ fatigue basic sample

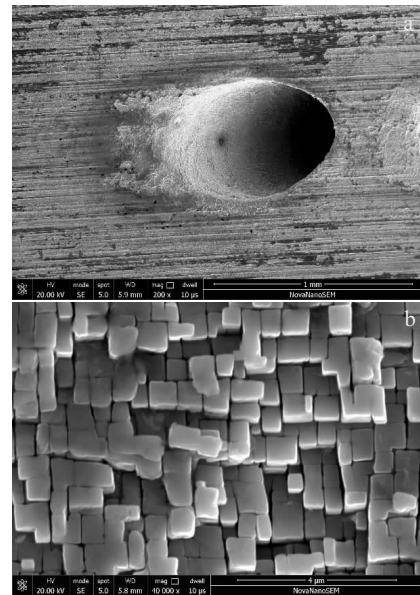


图 2 孔边及孔壁的电解腐蚀形貌

Fig.2 Morphologies of electrolytic corrosion at the edge and the wall of holes: (a) macro morphology and (b) microscopic morphology

图 3a 为 Pt 沉积区两侧刻蚀后的 SEM 像。可以看出, 电解腐蚀层已渗入到单晶高温合金基体内部, 且具有一定范围的厚度。图 3b 为经过多次减薄后用机械手放置铜网的 SEM 像。可见局部立方状的 γ'相已发生了脱落。

图 4a 为腐蚀损伤层组织的 TEM 形貌。可以看出, γ'相与 γ 基体保持共格关系, 部分 γ 相已被腐蚀掉, 局部形成了通道, 导致 γ'相与 γ 相的结合力变低, 因此立方状的 γ'相易出现脱落。进一步对腐蚀损伤层附近区域进行透射分析, 发现腐蚀损伤层与基体之间无明显损伤过渡层。图 4b 为腐蚀损伤层的选区电子衍射花样。腐蚀损伤层和基体均为面心立方结构, 由 γ 相基体及在 γ 相基体上共格析出的大量 γ'相组成, 电子束入射方向为 [011]。

### 2.3 电解腐蚀层的厚度

图 5 为将气膜孔纵剖后孔边及孔壁电解腐蚀层的形貌。可以看出, 入口尺寸明显比名义孔径大, 是因为采用电液束加工在气膜孔入口侧有扩口效应 (图 5a)。入口侧孔边及孔壁的电解腐蚀层已渗入基体, 呈立方化形态, 孔边局部腐蚀层出现脱落。对多个试样的不同部位多次测量后取平均值来代表电解腐蚀层的厚度, 其中入口侧孔边的电解腐蚀层厚度在 15~30 μm 范围内 (图 5b), 中间部分孔壁的电解腐蚀层厚度较均匀, 为 6~9 μm (图 5c); 这是由于电液束加工时,

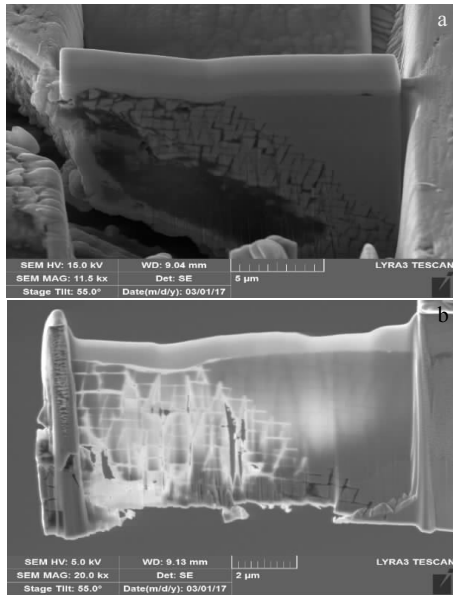


图 3 聚焦离子束减薄过程

Fig.3 Process of thinning by FIB technology: (a) SEM image after etching on both sides of Pt deposition area and (b) SEM image of placed copper mesh

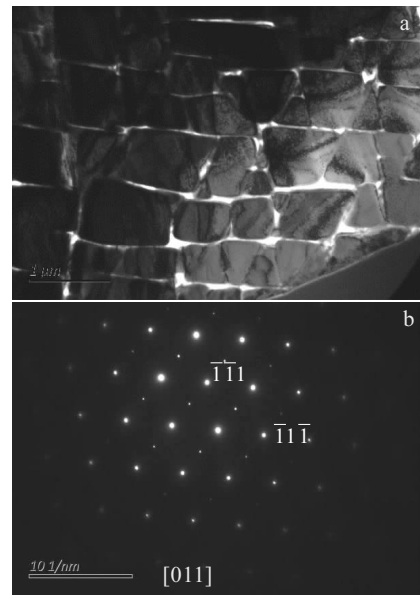


图 4 腐蚀损伤层 TEM 分析

Fig.4 TEM morphology (a) and selected area electron diffraction pattern (b) of the corrosion damage layer

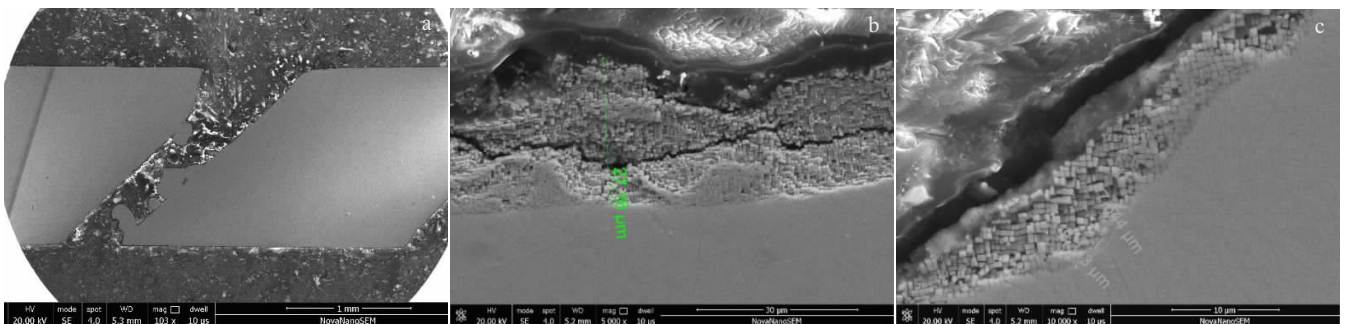


图 5 纵剖后的电解腐蚀组织形貌

Fig.5 Morphologies of electrolytic corrosion after vertical slitting: (a, b) at the edge of hole and (c) on the wall of hole

将具有一定压力的电解液经绝缘喷嘴形成一束射流喷向工件，到达孔中间时的能量较为集中，去除材料能力较强，而在孔边缘处能量逐渐出现衰减，去除能力变弱，导致入口侧孔边的电解腐蚀层厚度相对大一些。气膜孔的出口侧电解腐蚀形貌不明显，腐蚀层厚度较浅。

### 2.4 高温原位疲劳行为

#### (1) 疲劳裂纹从孔边萌生的演变过程

图 6 为带单孔的原位疲劳试样在加载过程中疲劳裂纹从孔边萌生的演变过程。图 6a 为试样未加载时的形貌。在入口侧孔边可见一圈电解腐蚀特征，颜色发白。当循环至 107131 周时，在孔边可见一条细小的裂纹，长度约为 164  $\mu\text{m}$ ，裂纹与加载方向约成 45°（图

6b）。继续循环至 114192 周时，裂纹进一步扩展，且孔壁腐蚀层发生脱落，裂纹尖端附近出现了较多的沿着  $\gamma$  相形成的微裂纹（图 6c）。当循环至 114565 周时，试样发生断裂。

#### (2) 加工损伤对疲劳裂纹萌生机制的影响

对原位疲劳试样断口源区进行微观观察可知，裂纹萌生有两种不同的情况：

一是从孔边的疏松缺陷处萌生裂纹（图 7a）。与粉末高温合金、定向凝固高温合金相比，DD6 单晶高温合金疲劳裂纹起源处的疏松缺陷较多，尺寸相对较小。从缺陷处萌生裂纹其失效机制也是滑移，缺陷加快了滑移的进行<sup>[13,14]</sup>。

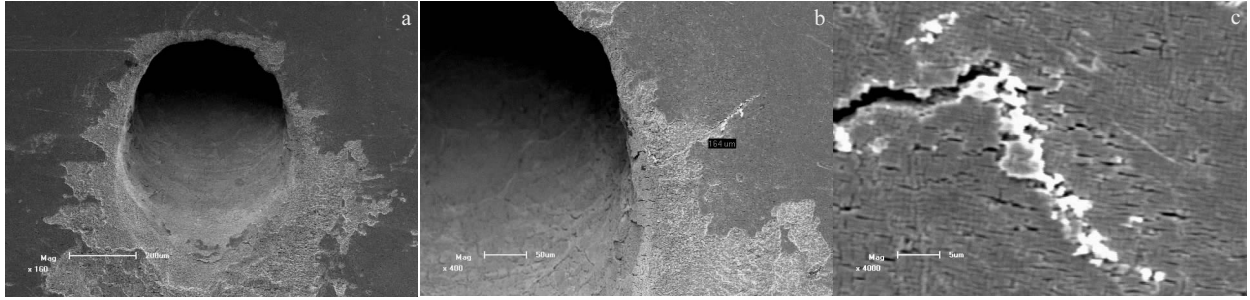


图 6 疲劳裂纹萌生的演变过程

Fig.6 Evolution process of fatigue crack initiation: (a)  $N=0$ , (b)  $N=107\ 131$ , and (c)  $N=114\ 192$

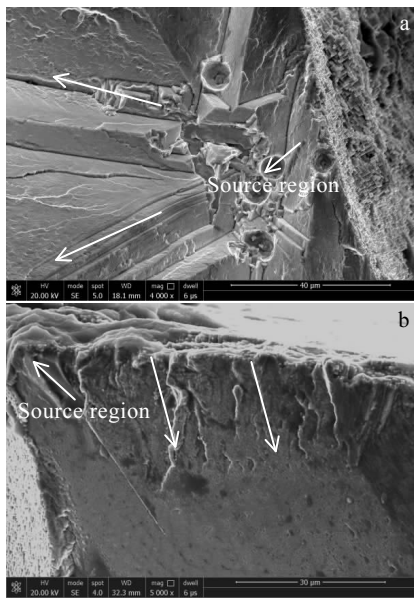


图 7 断口源区形貌

Fig.7 Morphologies of source region of fracture surface: (a) at the rarefaction defects and (b) near the electrolytic corrosion layer

二是从孔内腔与孔边电解腐蚀损伤层相交角处起源，微观观察可见孔边电解腐蚀损伤层表面有放射棱线，呈线源特征（图 7b）。电液束加工属于一种电化学腐蚀方法，宏观观察可知，在入口侧各孔边缘可见一圈电解腐蚀特征；高倍下观察，腐蚀区域部分  $\gamma$  相已被腐蚀掉，细小立方体状的  $\gamma'$  相突出，立方体状的  $\gamma'$  相局部出现脱落。进一步通过透射电镜分析可知，由于部分  $\gamma$  相已被腐蚀掉，且局部形成了通道，导致  $\gamma'$  相与  $\gamma$  相结合力变低。根据不同部位多次测量结果可知，入口侧孔边的电解腐蚀层厚度比孔壁的电解腐蚀层厚度大一些，为 15~30  $\mu\text{m}$ ，即孔边的腐蚀程度相对严重一些。因此，电液束加工对孔边的单晶材料先造成腐蚀损伤和弱化，同时孔内腔与孔边相交角处应

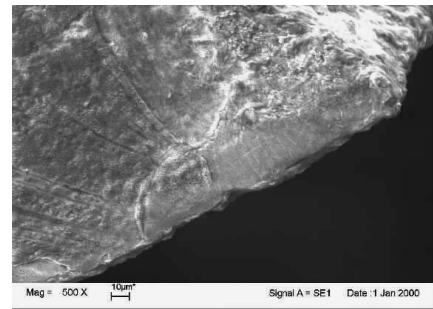


图 8 实际叶片断口源区形貌

Fig.8 Fracture morphology of source region of real blade

力集中较大，电解腐蚀层对疲劳裂纹的萌生有促进作用，裂纹从孔内腔与孔边电解腐蚀损伤层相交角处起源，延伸到应力较低区域时试样被快速撕断。

近年来，出现了多起与涡轮叶片气膜孔有关的故障，如 2014 年某型发动机在试车过程中叶片发生断裂，叶片材料为 DD6 单晶高温合金，采用电液束打孔方式，断裂性质为疲劳断裂<sup>[15]</sup>，源区位于叶片第 4 排气膜孔孔边，断口源区存在一个明显的“异常区域”，呈线源特征，与本文的原位疲劳试验断口源区形貌相似，进一步说明电解腐蚀层对疲劳裂纹的萌生有促进作用（图 8）。

从疏松缺陷处萌生的裂纹常为多源开裂，而从孔边的电解腐蚀损伤层附近萌生的裂纹未见多源开裂的特征；由于电液束加工过程中对孔边造成的腐蚀损伤程度存在一定的随机性（如功率、脉冲等加工参数），对于源区附近的电解腐蚀层厚度与疲劳寿命之间的影响关系需要更多的试验数据来进一步研究。

### 3 结 论

1) 电液束加工属于一种电化学腐蚀加工方法，在入口侧孔边及孔壁的电解腐蚀层已渗入基体，均为 DD6 单晶高温合金电解腐蚀组织的特征，部分  $\gamma$  相被

腐蚀掉, 细小立方体状的  $\gamma'$  相突出, 立方体状的  $\gamma'$  相局部出现了脱落。

2) 入口侧孔边的电解腐蚀层厚度在 15~30  $\mu\text{m}$  范围内, 中间孔壁的电解腐蚀层厚度较均匀, 为 6~9  $\mu\text{m}$ ; 腐蚀损伤层的透射电镜组织形貌显示部分  $\gamma$  相已被腐蚀掉, 局部形成了通道, 导致  $\gamma'$  相与  $\gamma$  相结合力较弱。

3) 带单孔的 DD6 单晶高温合金试样疲劳裂纹萌生有两种情况: 一是从孔边的疏松缺陷处萌生裂纹; 二是从孔内腔与孔边电解腐蚀损伤层相交角处起源, 电液束加工对孔边的单晶材料先造成腐蚀损伤和弱化, 同时孔内腔与孔边相交角处应力集中较大, 电解腐蚀损伤层对疲劳裂纹的萌生有促进作用。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Xiaobing(张晓兵). *Applied Laser*(应用激光)[J], 2002, 22(2): 227
- [2] Peng Guoping(彭国平), Peng Xiuyun(彭秀云). *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2008(6): 26
- [3] Yang Liyan(杨丽艳). *Research on High Speed Electric Spark Processing for Gas Film Hole of High Pressure Turbine Blade*(高涡叶片气膜孔高速电火花加工工艺研究)[J], Dalian: Dalian University of Technology, 2008
- [4] Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎), Liu Chunjiang(刘春江) *et al.* *Materials Review*(材料导报)[J], 2013, 27(11): 117
- [5] Chen Changjun(陈长军), Guo Wenyuan(郭文渊), Wang Mao-cai(王茂才) *et al.* *Gas Turbine Experiment and Research*(燃气涡轮实验与研究)[D], 2004, 17(3): 44
- [6] Lu Xuping(卢绪平), Wen Zhixun(温志勋), Yue Zhufeng(岳珠峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1173
- [7] Liu Jun(刘军), Gou Wenxuan(苟文选), Yue Zhufeng(岳珠峰) *et al.* *Journal of Mechanical Strength*(机械强度)[J], 2007, 29(6): 1001
- [8] Zhang Xiaobing(张晓兵), Li Qilian(李其连), Wang Jian(王健). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空工艺技术)[J], 1995(2): 20
- [9] Li Yingjie(李英杰). *Research on Electro-Micromachining Based on Electro-Stream Technology*(基于电液束技术的电解微细加工工艺研究)[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007
- [10] Sen M, Shan H S. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2006, 31(5-6): 520
- [11] Li Jiarong(李嘉荣), Jin Haipeng(金海鹏), Liu Shizhogn(刘世忠). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(10): 1784
- [12] Wang Xueli(王雪丽), Zhang Wei(张伟), Jia Zhihong(贾志宏). *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*(电子显微学报)[J], 2013, 32(5): 420
- [13] Hu Chunyan(胡春燕), Liu Xingling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎). *Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2014, 9(4): 224
- [14] Liu Xingling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎), Liu Delin(刘德林). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(12): 3178
- [15] Hu Chunyan(胡春燕), Liu Xingling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2016, 44(5): 93

## Damage Behavior of Film Holes of DD6 Single Crystal Superalloy by Electro-Stream Machining

Hu Chunyan, Liu Xinling, Tao Chunhu, Kong Zhiqiang

(Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Electro-stream machining is mainly a process of electrochemical anode dissolution, which causes corrosion damage to the single-crystal material and affects the performance of the film holes under service conditions. Based on the microscopic analysis and in-situ fatigue test, the damage behavior of the film holes of DD6 single crystal superalloy by electro-stream machining were investigated. The results show that the corrosion zones of the film hole are characteristics of electrolytic corrosion of DD6 single crystal superalloy, in which part of the  $\gamma$  phase are eroded and the  $\gamma'$  phase is prominent. In addition, there are two ways of fatigue crack initiation of the DD6 single crystal superalloy specimen with a single hole: one is originated from the porous defect at the edge of the hole and the other is from the electrolytic corrosion damage layer at the edge of the hole.

**Key words:** film cooling hole; DD6 single crystal superalloy; electro-stream machining; damage behavior; in-situ fatigue

Corresponding author: Hu Chunyan, Ph. D., Senior Engineering, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62496238, E-mail: fachcy@163.com