

航发涡轮叶片气膜孔的磨削加工实验

李潜彤 陈志同 全芳 马磊

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

文 摘 针对目前航空发动机涡轮叶片气膜孔加工精度低和重熔层难去除的问题,提出了“电火花打孔、磨削扩孔”的新型气膜孔加工工艺,研制出小孔磨削专用微细 CBN 砂轮并对电火花气膜孔进行了磨削工艺实验。实验结果表明:经磨削加工后气膜孔圆度降低 50.9%,孔径尺寸标准差降低 90.7%,表面粗糙度降低 65.9%,重熔层被全部去除,证明了航发涡轮叶片气膜孔磨削加工的可行性。

关键词 气膜孔,电火花,重熔层,微细 CBN 砂轮,磨削

中图分类号:V261.94

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2019.02.017

Experimental Study on Grinding Approach of Film Cooling Hole of Aero-Engine Turbine Blade

LI Qiantong CHEN Zhitong QUAN Fang MA Lei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract For the problem that the machining precision of film cooling hole of aero-engine turbine blade is low and the recast layer is difficult to be removed. A new film cooling hole process which is mainly based on the thought of using EDM to drill and using grinding to expand is proposed. Grinding experiment was carried out on the film cooling hole machined by EDM using the special fine CBN grinding wheel. The result shows that after the grinding process, the roundness of the film hole is reduced by 50.9%, the standard deviation of the hole size is reduced by 90.7%, the surface roughness is reduced by 65.9%, and the recast layer is completely removed, proving the feasibility of the grinding approach of film cooling hole of aero-engine turbine blade.

Key words Film cooling hole, EDM, Recast layer, Fine CBN grinding wheel, Grinding

0 引言

随着航空发动机推重比的不断上升,燃烧室出口的温度也随之升高,涡轮前温度达到 1 300~1 500 K,为了适应不断提高的工作温度,一方面需要不断改善材料性能,另一方面则需要采用冷却技术^[1]。在航空发动机的涡轮叶片、燃烧室、火焰筒等热端部件加工冷却气膜孔是降低零件表面温度的有效手段^[2]。涡轮叶片材料难加工,气膜孔孔径尺寸小,且多分布于曲面区域,材料和结构的变革对涡轮叶片等零件制孔技术提出无重熔层、无裂纹、无热影响区的质量要求^[3-4]。

重熔层厚度影响金属表层的均匀性,微裂纹等表面缺陷增加疲劳源产生的概率,加工精度影响气膜孔

的散热效率,上述三项是衡量气膜孔加工质量的重要指标^[5]。目前航空发动机气膜孔的加工工艺主要有电液束打孔、激光打孔、电火花打孔以及上述方法的复合打孔方法^[6],电液束打孔具有无重熔层、无微裂纹、无加工应力等特点,但其加工效率低,尺寸精度重复性差,距离实际工程化应用还有一定距离^[7]。传统纳秒激光打孔效率高,加工能力较强,但其加工圆度差,精度低,气膜孔表面粗糙度差,且会产生难以去除的重熔层^[8]。电火花打孔效率较高,通过调整工艺参数可以获得较小的重熔层厚度,但是电火花电极磨损较快,且加工精度不高^[9]。国内外学者对上述特种加工方式进行了大量研究,Y.ZHANG 等通过正交实验获得电液束加工气膜孔的优化参数,并对比了

收稿日期:2018-06-14

基金项目:叶片磨削抛光加工单元研究应用(2013ZX04001051)

第一作者简介:李潜彤,1996 年出生,硕士,研究方向为难加工材料加工表面完整性。E-mail:lqt_1996@163.com

电液束和电火花加工气膜孔的表面质量和重熔层厚度^[10], J.W.LIANG 等研究了气膜孔分布和激光打孔参数对 DZ125 低周疲劳寿命的影响规律^[11]。B. IZQUIERDO 等通过分析电火花加工过程中的热源传递和材料去除建立了电火花工艺参数与重熔层厚度的预测模型并对预测模型进行了检验^[12]。A. MUHAMMAD 等进行了电火花加工 HSLA 的正交试验, 确定了脉冲开启时间和线速度是对重熔层影响较显著的参数^[13]。

本文针对气膜孔加工精度低和重熔层难去除的问题, 在目前行业内最广泛采用的电火花打孔工艺基础上, 通过自主研发的微型电镀 CBN 砂轮对电火花加工的气膜孔进行磨削工艺试验, 并对电磨复合孔试样和电火花孔试样进行了圆度、表面形貌、粗糙度、重熔层等方面的对比分析, 验证了气膜孔磨削加工的可行性, 以为后续航发真实叶片的气膜孔磨削加工提供数据支持和理论基础。

1 实验

1.1 气膜孔磨削机理分析

在电火花加工过程中, 极间介质被击穿后形成放电通道, 形成的电场将使通道中的正负离子向正负极高速运动从而使电能转换为动能, 正负离子高速撞击到电极表面又使动能转换为热能, 从而使正负极达到高温。高温不仅使冷却液汽化和分解, 更可将金属材料熔化甚至沸腾汽化, 未被抛出的金属冷却凝固后附着在基体表面形成重熔层^[14], 如图 1 所示。

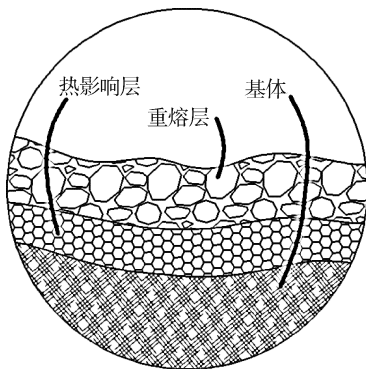


图 1 重熔层
Fig.1 Recast layer

为消除电火花打孔产生的重熔层, 本文提出了“电火花打孔, 磨削扩孔”的新型气膜孔加工工艺, 该方法将气膜孔加工分为两步, 如图 2 所示, 首先通过电火花加工出比最终尺寸小的中心孔, 然后用微细 CBN 砂轮进行气膜孔的精加工并得到最终尺寸。

磨削工艺去除量稳定, 在上一步工序重熔层厚度不大的前提下微细砂轮磨削可以实现重熔层的定量去除, 并通过控制磨削参数和磨削层数来保证气膜孔宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2019 年 第 2 期

的尺寸精度合格, 其作用机理如图 3 所示。同时磨削过程磨削力小, 在合理的磨削参数下不会产生表面缺陷, 从而避免疲劳源在表面缺陷处产生, 且电镀 CBN 砂轮磨削会产生一定的表面残余压应力, 残余压应力可以和叶片服役时所受的拉伸载荷相抵消从而降低表面所受载荷, 使得高温环境交变应力下疲劳源产生的可能性降低, 有利于零件疲劳寿命的提高。

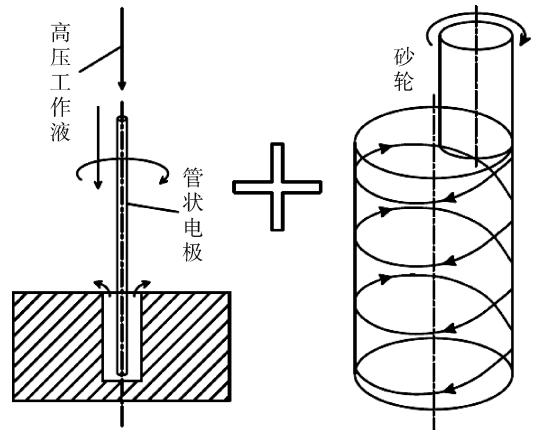


图 2 气膜孔电火花磨削打孔复合工艺
Fig.2 Compound EDM-grinding process for film cooling hole

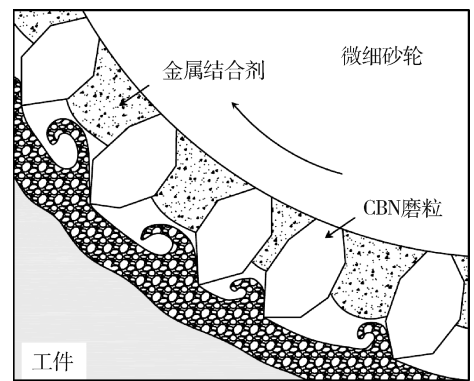


图 3 微细砂轮作用机理
Fig.3 Mechanism of fine grinding wheel

1.2 实验设计

试验所用材料为航空发动机所用的固溶强化型镍基高温合金 GH3128, 试件的尺寸为 30 mm×30 mm×4 mm, 预先在试件上通过电火花打出一定数量的微孔, 电火花打孔工艺与某型号航空发动机叶片气膜孔加工工艺一致, 之后选择一部分孔进行磨削加工。

由于气膜孔的尺寸较小, 普通砂轮无法满足要求, 本文设计并研制出气膜孔磨削专用的微细 CBN 砂轮, 砂轮基体采用直径为 0.2 mm 的硬质合金刀杆, 将被 CBN 颗粒完全覆盖的基体浸入含有沉积金属的金属盐溶液电解槽中, 通过电沉积的方式将金属结合剂沉积在金属基体上固定 CBN 磨粒, 从而在刀杆的头部均匀镀上一层 CBN 砂粒, 见图 4 所示。

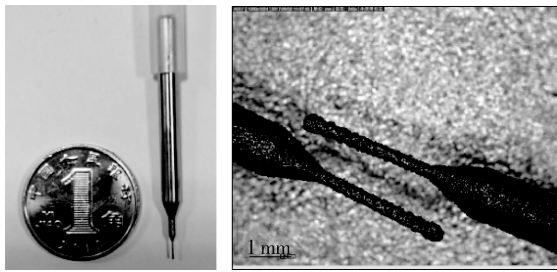


图4 微细 CBN 砂轮

Fig.4 Fine CBN grinding wheel

磨削采用三轴立式磨床;磨削参数为主轴转速 $n=60\ 000\ \text{r}/\text{min}$,进给速度 $f=40\ \text{mm}/\text{min}$,行宽 $A_p=0.2\ \text{mm}$,磨深 $A_e=0.005\ \text{mm}$ 。

1.3 测试过程

对试件表面使用王水进行腐蚀,腐蚀后在 Zeiss Aviovert 200MAT 显微镜下观察孔边缘的金相组织和轮廓特征。

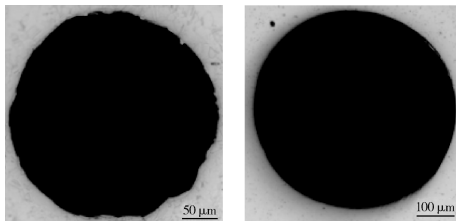
将试件沿孔深方向进行线切割并采用日本电子株式会社 JSM-6510 扫描电子显微镜获取孔内剖面表面形貌,采用 Taylor Hobson 轮廓仪测试孔内剖面粗糙度。

采用扫描电子显微镜配套的 EDS 电子元素分析仪对磨削后的内孔表面进行元素谱分析。

2 结果与讨论

2.1 圆度检测

图5为电磨复合孔和电火花孔在100倍显微镜头下的图像,电火花孔边缘凹凸不平,有附着或半剥离的材料,而电磨复合孔边缘非常光滑,无附着无杂质。



(a) 电火花孔 (b) 电磨复合孔

图5 图像对比

Fig.5 Contrast of image

孔的轮廓可视为孔的表面边缘和图像阴影的边界曲线,通过提取原始轮廓线并按照轮廓线计算各个孔的圆度,如图6所示,圆度计算公式为:

$$r = (D - d) / 2 \quad (1)$$

式中, D 为孔轮廓的外接圆直径, d 为孔轮廓的内切圆直径, r 为孔的圆度误差值。

电火花孔和电磨复合孔的圆度检测结果见表1。

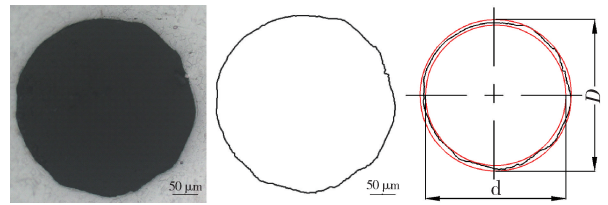


图6 气膜孔圆度计算

Fig.6 Calculation of the roundness of hole

电火花孔和电磨复合孔的圆度平均值分别为 16.93 和 $8.31\ \mu\text{m}$,电磨复合孔的圆度相比于电火花孔降低 50.9%,电火花孔和电磨复合孔的孔径尺寸标准差分别为 8.86 和 $0.82\ \mu\text{m}$,电磨复合孔的孔径尺寸标准差相比于电火花孔降低 90.7%。

由对比结果可知电磨复合工艺下的气膜孔尺寸精度和圆度相比于电火花工艺都有较大的提升,通过控制磨削参数和磨削层数可以保证尺寸精度达到要求。

表1 电火花孔圆度检测结果

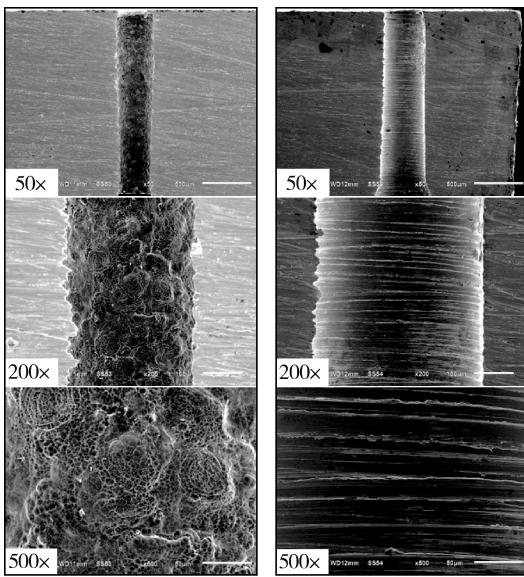
Tab.1 Test result of EDM hole roundness

工艺	$d/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	$\bar{\Phi}/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$
电火花打孔	333.33	362.86	348.10	14.77
	341.02	368.16	354.59	13.57
	352.25	383.13	367.69	15.44
	343.88	395.85	369.87	25.99
	339.05	371.43	355.24	16.19
	355.71	386.94	371.33	15.62
电磨复合打孔	544.35	562.86	553.61	9.26
	544.08	561.90	553.00	8.91
	546.26	558.78	552.52	6.26
	546.63	563.21	554.42	8.79

2.2 表面形貌检测

电火花孔和电磨复合孔的内孔剖面 SEM 图如图7所示。电火花孔剖面呈倒锥形,从入口处到出口处直径均匀减小,孔内壁粗糙且全部覆盖有重熔层,并且可以观测到图8所示的微裂纹,微孔等表面缺陷。而经过磨削加工后的孔身尺寸均匀,入口处尺寸稍大,有倒角特征,孔内壁光滑,纹路均匀,纹理方向与磨削进给方向相同,表面未发现有表面缺陷。

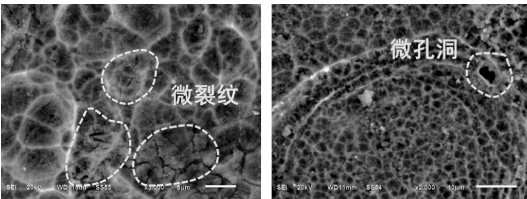
分别沿孔深方向对电火花孔和电磨复合孔内表面进行粗糙度测试,粗糙度取样长度为 $0.08\ \text{mm}$,评定长度为 $0.4\ \text{mm}$,粗糙度测试结果分别为 0.85 和 $0.29\ \mu\text{m}$,电磨复合孔的表面粗糙度相比于电火花孔降低 65.9%。轮廓结果如图9所示,电磨复合孔相比于电火花孔表面波纹平滑。



(a) 电火花孔 (b) 电磨复合孔

图 7 内孔剖面放大图像

Fig.7 Enlarged image of hole profile



(a) 微裂纹 (b) 微孔洞

图 8 电火花孔表面缺陷

Fig.8 Defect of EDM drilling

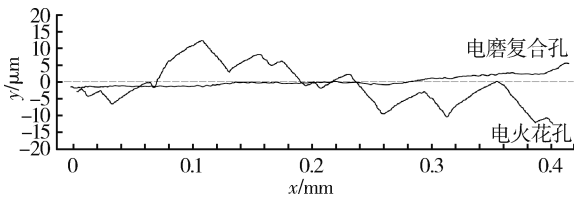


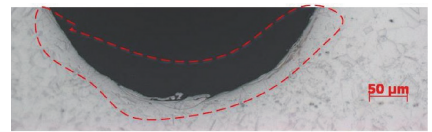
图 9 表面轮廓对比

Fig.9 Contrast of surface profile

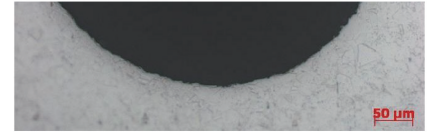
2.3 重熔层检测

电火花孔和电磨复合孔边缘腐蚀后的图像如图 10 所示,可以看出电火花孔的孔边缘经腐蚀后出现贝壳状的重熔层,可见厚度为 $20\ \mu\text{m}$,考虑到金相制样中小孔边缘凹陷效应,实际重熔层厚度会大于 $20\ \mu\text{m}$,而经过磨削加工后已观察不到孔边缘重熔层的痕迹。

电火花加工过程中由于介质水的分解会产生氧气,熔化的材料与氧反应从在基体表面生成氧化层,因此电火花加工形成的重熔层中可以检测到一定的氧含量^[15]。对磨削后的内孔表面进行 EDS 分析结果见图 11,磨削表面的氧含量几乎为 0,说明由电火花打孔产生的重熔层经过磨削加工后已被全部去除。



(a) 电火花孔



(b) 电磨复合孔

图 10 孔边缘金相图

Fig.10 Metallographic picture of hole edge

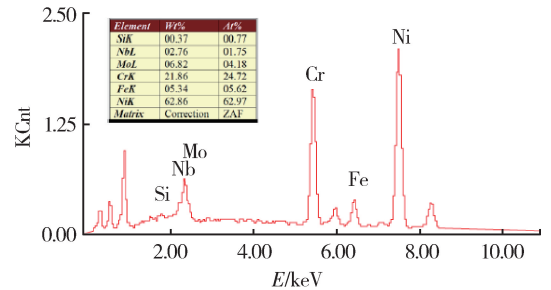


图 11 电磨复合孔 EDS 分析结果

Fig.11 EDS analysis result of compound EDM-grinding hole

3 结论

通过电火花磨削复合工艺得到了高精度无重熔层的气膜孔,验证了航发涡轮叶片气膜孔磨削加工的可行性。

(1) 电火花孔边缘凹凸不平,经磨削加工后孔边缘光滑,圆度误差降低 50.9%,孔径尺寸标准差降低 90.7%。

(2) 电火花孔内壁粗糙,表面存在微裂纹、微孔洞等缺陷,经磨削加工后孔身尺寸均匀,内壁光滑,无表面缺陷,表面粗糙度降低 65.9%。

(3) 电火花孔的重熔层厚度大于 $20\ \mu\text{m}$,磨削去量稳定可控,磨削加工可以将重熔层全部去除。

后续将通过优化磨削参数和研制尺寸更小的 CBN 磨具来提高磨削效率和孔径可加工范围。

参考文献

- [1] 倪萌, 朱惠人, 裘云, 等. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(4): 25-33.
- [2] BOGARD D G, THOLE K A. Gas Turbine Film Cooling [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 249-270.
- [3] 王富强, 张志强. 涡轮冷却叶片气膜孔加工方法研究[C]. 第 16 届全国特种加工学术会议, 苏州: 中国机械工程学会特种加工分会, 2015: 405-408.
- [4] 陈贵林, 柳万珠. 航空发动机先进制造技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 97-100.