

# 镍基单晶材料皮秒级超短脉冲激光气膜孔加工表面完整性研究\*

刘瑞军, 桓 恒, 李伟剑, 李光泽, 韦廷立, 马永跃

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 利用皮秒超短脉冲激光加工镍基单晶材料气膜孔,采用物理超景深显微镜对气膜孔成型几何形貌进行判定,采用金相显微镜对气膜孔内腔表面组织进行观测,采用高温低周疲劳设备对皮秒超短脉冲激光和电火花两种工艺加工出的气膜孔试样进行性能对比验证,采用扫描电镜对性能试样断口进行分析。结果表明:采用皮秒超短脉冲激光分步加工气膜孔,通过有效控制能量密度,可实现气膜孔进出口表面无烧蚀,几何精度满足设计指标,内腔无重熔层、断续小球、起弧及微裂纹等缺陷,有效提升了气膜孔加工的表面完整性;通过皮秒超短脉冲激光及电火花气膜孔加工试样高温低周疲劳性能对比试验,皮秒超短脉冲激光制孔试样循环次数是电火花制孔试样的3倍;通过对两种工艺制孔高温低周疲劳断裂后试样进行扫描电镜断口分析,两种工艺加工试样断裂均为解理断裂,无材质冶金缺陷,电火花打孔形成的重熔层可能对断裂有贡献,超短脉冲激光打孔未见明显重熔层。

关键词: 气膜孔; 镍基单晶; 表面完整性; 烧蚀阈值; 低周疲劳

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.084



刘瑞军

高级工程师,主要从事超短脉冲激光加工研究工作。

气膜孔结构多出现在热端部件,由于此类零件工况相对恶劣,工作上对零件寿命提出了更高要求。气

膜孔结构的出现主要是在零件的外表面形成覆盖气膜,用以阻隔热燃气对零件表面的换热,达到降低零件表面温度的目的。

气膜孔加工在产生重熔层后,由于金属表层质地变得不均匀以及微裂纹的存在使得金属在长时间交变应力作用下易发生断裂。因此,重熔层的产生将直接影响零件的使用寿命。

气膜孔孔型的差异也会影响零件的疲劳寿命。经研究表明,圆度误差会使镍基单晶材料气膜孔试件在高温下的低周疲劳寿命显著降低约39.1%。气膜孔的圆度误差越小,试件的高温低周疲劳寿命越大<sup>[1]</sup>。

随着激光专业的不断发展,超

短脉冲激光技术逐渐被行业所关注。超短脉冲激光设备由激光器发出高功率超短超快脉冲激光,通过复合光束扫描机构的高速旋转扫描,由聚焦光学组件把激光束直接聚焦在工件表面,以直写的方式在各种材料上实现多种形状特征的加工,属冷加工工艺。通过合理优化激光工艺参数,可以解决目前传统气膜孔加工过程中无法克服的重熔层、再结晶、微裂纹、精度低等工艺技术难题。

## 皮秒激光

### 1 设备功能开发

“04专项”集成的国产化皮秒级超短脉冲激光加工机床具备五轴运动平台,能够满足叶片气膜孔加工矢量方向要求;采用单激光光源和分时复用双工位光学扫描加工,可实现异型孔和圆柱孔加工;三维轮廓检测

\*基金项目: 国家科技重大专项课题(2014ZX04001041)。

辅助定位模块可直接对工件进行全部或局部外形轮廓扫描,通过特征点准确实现工件的空间定位;激光束终端监测模块直接对激光束的终端(焦点)采用高像素工业相机进行定期的监测和分析计算,并及时做出补偿方案,确保加工过程精度,图1为整机集成皮秒激光设备。

## 2 光学系统组成

光学系统由 20MHz 皮秒锁模振荡器、脉冲选择器、隔离器、多级放大器、快速光开关、倍频器、机械快门等组成。高功率皮秒 MHz 振荡器采用被动器件实现锁模,得到窄脉宽输出。采用声光调制器 AOM 进行脉冲选单,将振荡器 20MHz 重复频率降低为几百 kHz。为保证激光器输出光束质量,采用多级端面泵浦放大器提升激光器功率。

## 3 皮秒激光加工特点

皮秒激光与物质相互作用中,等离子体屏蔽和热量积累是影响激光对材料作用烧蚀阈值的两个重要因素。较高的重复频率和脉冲能量的皮秒激光配合高速扫描,可以很大程度上提高材料去除效率。同时,高频率和高能量也是产生等离子体和热量积累现象的主要原因,会影响去除材料的精度和可靠性<sup>[2]</sup>。

因此,增大激光单脉冲能量有利于提高蚀除率,但不利于表面的加工质量。Chichkov 等<sup>[3]</sup>研究发现皮秒激光在 200~600mJ/cm<sup>2</sup> 低能量密度下的加工质量要优于 600~6000mJ/cm<sup>2</sup> 高能量密度下的加工质量。Lopez 等指出当激光能量密度接近材料烧蚀阈值时能获得最优的加工表面质量,对于皮秒激光在同一位置进行多脉冲烧蚀会减小材料的烧蚀阈值<sup>[4-5]</sup>。

### 镍基单晶平板试片皮秒激光气膜孔加工试验

试验采用镍基单晶平板试片,规格 30mm × 20mm × 2mm,试片铸件由沈阳中航动力精密铸造科技有

限公司提供,经(固溶)热处理,在 2h 内升温至 1200℃, 1300℃ 保持温度 4h,后充入保护性气体冷却。将试片表面抛光,表面粗糙度达到  $R_a 1.6 \mu\text{m}$  (表 1)。

## 1 小功率验证气膜孔加工效果

### 1.1 试验过程

试验首先采用画圆方式验证不同单脉冲能量下表面烧蚀状态,通过图 2 可以判定,较高的单脉冲能量会导致零件表面形成不同程度的烧蚀及飞溅伤。再采用不同单脉冲进行

一次成孔加工验证,通过图 3 可以判定,较小或较大的单脉冲能量一次成孔导致孔的圆度误差增大,材料蚀除率下降。所以,采用分步加工法降低孔口加工能量,消除烧蚀区域,适当增大孔口以下加工能量,保证材料去除充分,此方案对提升皮秒加工气膜孔表面质量较为有效。

所以,小功率试验在不考虑加工效率的前提下,采用较小的功率输出,也就是在重复频率 200kHz 恒定的情况下通过降低功率的方式降低

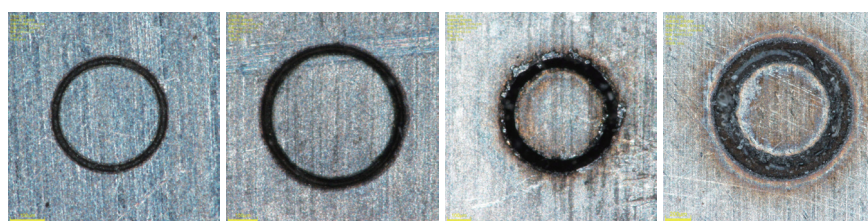


图1 皮秒级超短脉冲数控机床

Fig.1 Picosecond level ultrashort pulse CNC machine

表1 镍基单晶材料主要化学成分(质量百分数) %

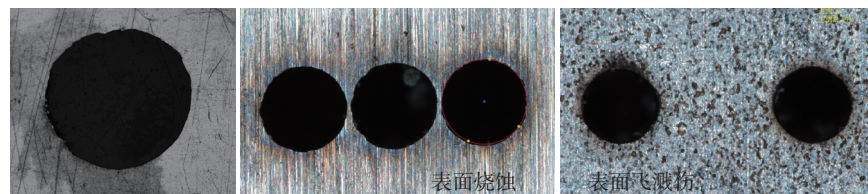
Re	Cr	W	Co	Al	Mo	Ta	Ti	Ni
3.25	7.3	5.25	8.0	6.4	1.7	6.7	0.02	余量



(a) 5 μJ (b) 35 μJ (c) 66 μJ (d) 78 μJ

图2 单脉冲能量状态下表面烧蚀形貌

Fig.2 Surface ablation morphology at single pulse energies



(a) 5 μJ (b) 35 μJ (c) 66 μJ

图3 单脉冲能量状态下一次成孔孔型、表面烧蚀及表面飞溅伤形貌

Fig.3 Primary pore type, surface ablation and surface splatter morphology at single pulse energy

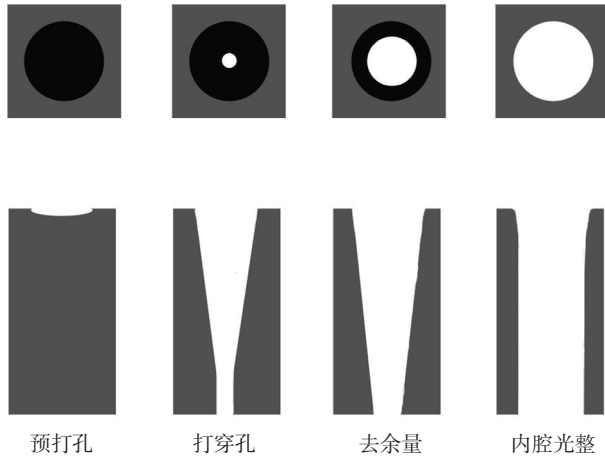


图4 分步打孔示意图

Fig.4 Step by step drilling schematic

单脉冲能量,力求得到好的表面质量和几何精度。

加工工序上单孔采用4步加工法,分别为预打孔、打穿孔、去余量以及内腔光整,如图4所示。首先通过单脉冲能量为 $5\mu\text{J}$ 进行预打孔,加工深度仅为全深度的 $1/4$ ;再采用 $35\mu\text{J}$ 能量接着此深度继续完成剩余的 $3/4$ 深度加工,将孔打穿;再沿用此能量对全深度范围进行孔壁的剩余余量去除;最后采用 $15\mu\text{J}$ 能量完成整个气膜孔内壁的光整加工,单孔加工时间为 $4\text{min}$ 。

采用分步法分别加工出 $\phi 0.25\text{mm}$ 、 $\phi 0.28\text{mm}$ 、 $\phi 0.3\text{mm}$ 、 $\phi 0.35\text{mm}$ 和 $\phi 0.4\text{mm}$ 5种孔径气膜

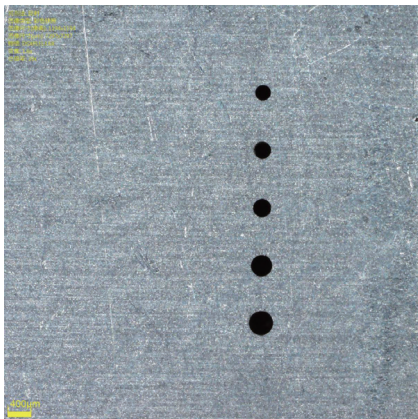


图5 小功率加工镍基单晶制孔5种孔径超景深显微镜

Fig.5 Deep field micrograph of five kinds of pores on nickel-based single crystal processed by low-power

孔,如图5所示,通过试验可以看出,预打孔工序在约束排屑方向同时,避免了后续加工对表面的大范围烧蚀,同时降低了作用面的反光效果。

### 1.2 孔型精度

通过超景深显微镜观测,三点成圆方法测量气膜孔进出口孔径差(圆柱度误差)可控制在 $20\mu\text{m}$ 以内,正反面圆度误差通过孔边外切圆与

内切圆差值判定可控制在 $\phi 15\mu\text{m}$ 以内,气膜孔的几何精度可控制在 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ ,实现了圆柱孔的加工。但正面沿孔口边缘依然存在 $18\sim 26\mu\text{m}$ 的圆环烧蚀带,如图6、7所示。

### 1.3 金相检测

气膜孔反面无烧蚀,正面最好状态下烧蚀带均在 $18\sim 26\mu\text{m}$ ,无法彻底消除。后对进口处烧蚀带表面状态分析判定,经金相检测,沿孔口的表面烧蚀带为基体表面颜色改变,与基体本身无关;另外,经检测发现部分孔存在断续小珠以及氧化层,断续小珠 $0.013\text{mm}$ ,氧化层 $0.007\text{mm}$ ,内腔表面光滑,无重熔层、微裂纹,如图8、9所示。

## 2 大功率验证气膜孔加工效果

### 2.1 试验过程

为了提高加工效率,验证较大功率加工气膜孔后通过修整提升表面质量的方案是否可行。在原有小功率试验的基础上同样采用4步加工

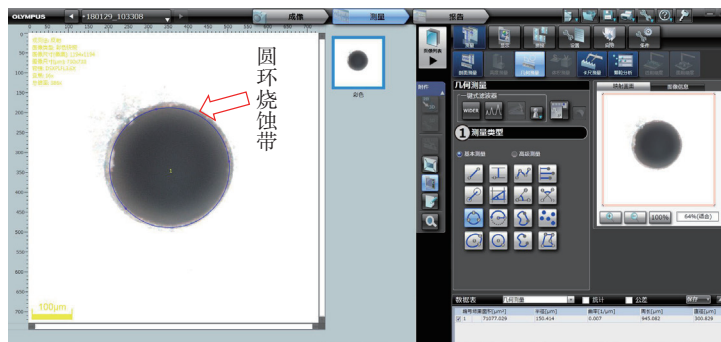


图6 孔径几何精度及烧蚀带测量

Fig.6 Pore set accuracy and ablation band measurements

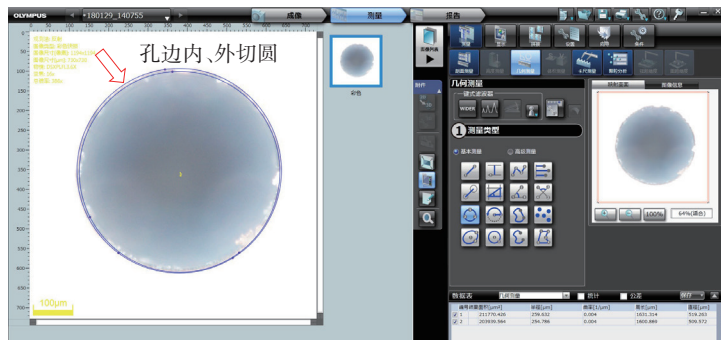


图7 孔径圆度误差测量

Fig.7 Measurement of pitch roundness error

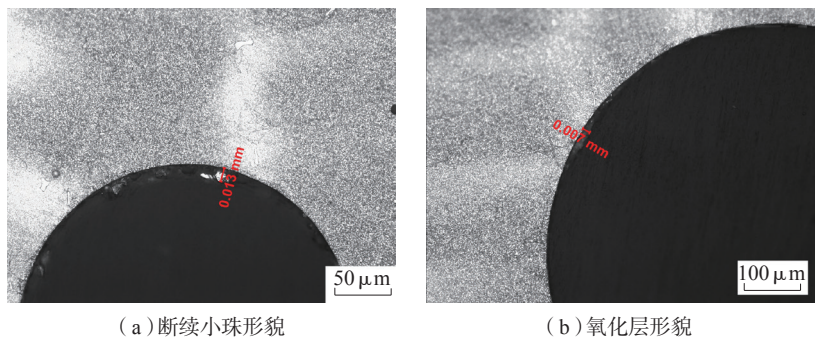


图8 镍基单晶表面残留检测横向金相图  
Fig.8 Metallography of nickel-based single crystal surface residue detection in horizontal direction

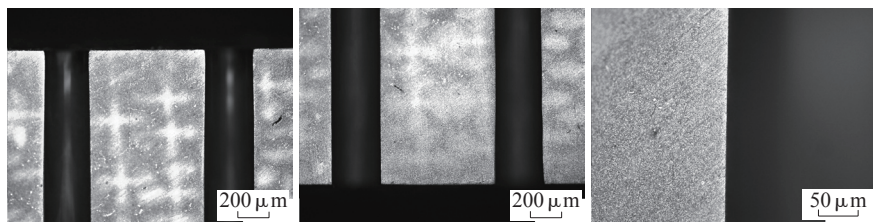


图9 小功率镍基单晶制孔内腔表面完整性检测金相图  
Fig.9 Metallography of nickel-based single-crystal cavity surface integrity test processed by low-power

检查,镍基单晶试样无论是斜孔还是直孔均未见重熔层、断续小珠、起弧及微裂纹等缺陷,如图 11 所示。

### 3 气膜孔内腔表面粗糙度检测

针对大功率试验取得的表面完整性优于小功率结果,为了进一步对大功率制备的气膜孔内腔表面粗糙

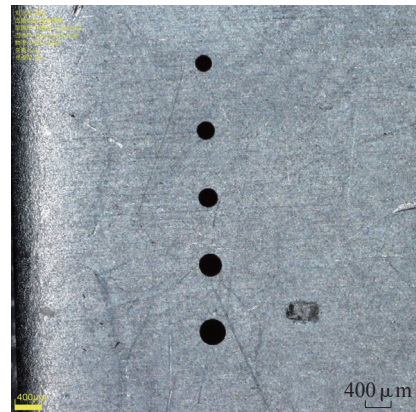


图10 较大功率镍基单晶制孔五种孔径超景深显微图  
Fig.10 Deep field micrograph of five kinds of pores on nickel-based single crystal processed by more power

法进行,但加工思路进行了改变。这4步加工分别为打穿孔、去余量、修孔口以及内腔光整,原来的第1道工序变为第3道工序,整体思路变为在不考虑进口表面质量的前提下将孔打穿,改变排屑以及内腔等离子场分布状态,再通过后3道工序将孔修整到目标尺寸以及改善表面质量。

采用单脉冲能量为 66 μJ 直接将孔打穿,加工深度为 2mm;沿用此能量对全深度范围进行孔壁的剩余余量去除;接着采用 5 μJ 对孔口表面进行修整;最后采用 15 μJ 能量完成整个气膜孔内壁的光整加工,单孔加工时间为 2min,如图 10 所示。

#### 2.2 孔型精度

沿用超景深显微镜三点画圆测量方法,气膜孔的几何精度可控制在  $\pm 0.005\text{mm}$ ,正反面圆度误差可控制在  $10\ \mu\text{m}$  以内,圆柱度误差可控制在  $\phi 15\ \mu\text{m}$  以内。

#### 2.3 金相检测

气膜孔正反面均无烧蚀,经金相

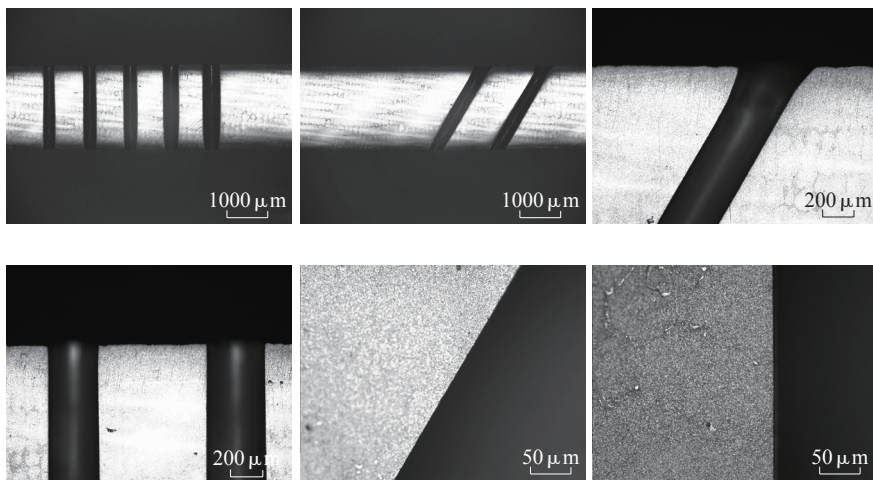
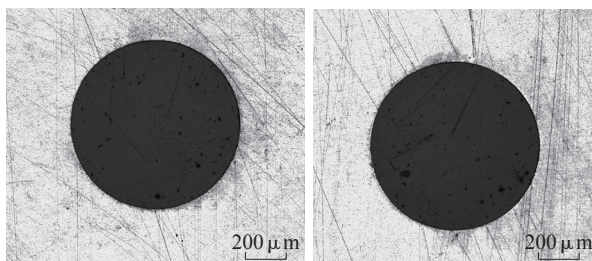


图11 大功率镍基单晶制孔表面完整性检测金相图  
Fig.11 Metallography of nickel-based single crystal hole surface integrity test processed by high-power

度进行判定,采用探针接触式高精度粗糙度测量仪( Form Talysurf 200 )对皮秒超短脉冲激光加工出的气膜孔内腔进行表面粗糙度检测,制备检测试样既要结合实体零件实际加工壁厚值,又要满足粗糙度检测需求。所以,课题组选用3mm厚镍基单晶试样加工  $\phi 1.6\text{mm}$  大孔使接触式检测探针可达,通过一个取样长度反复6次检测,最终确认内腔表面粗糙度为  $R_a 0.26\sim 0.3\mu\text{m}$ ,如图12所示。

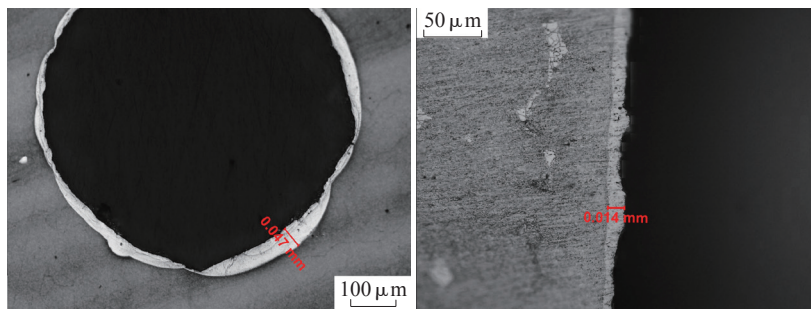


图13 电火花气膜孔加工金相图片

Fig.13 Metallographic pictures of EDM film hole processing

### 高温低周疲劳性能对比试验

在论证超短脉冲激光气膜孔加工可行性时,性能试验应为主要论证依据之一。通过图13可以看出,电火花加工存在较为连续的重熔层分布,从表面质量上,超短脉冲激光要优于电火花工艺。所以,论证两种工艺加工气膜孔的疲劳性能对比就显得尤为重要。

#### 1 试验准备

试样材料为镍基单晶材料与第2部分内容试验材料一致。试样规格及气膜孔位置分布如图14所示。

试验夹具采用限位卡槽销钉把紧,夹具规格如图15所示。

#### 2 高温低周疲劳对比试验

单个性能试样加工气膜孔数量14个,孔径均为  $\phi 0.3\text{mm}$ ,位于试样验证区域,两种不同工艺性能对比试样有效面积一致,如图16所示。

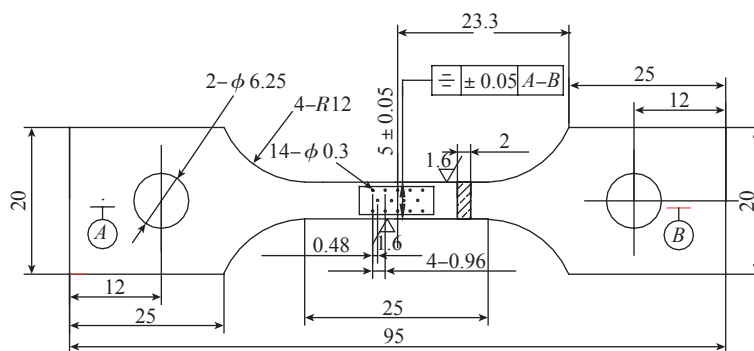


图14 高温低周疲劳试样规格及气膜孔加工位置分布

Fig. 14 High-temperature low-cycle fatigue specimen size and film hole processing position distribution

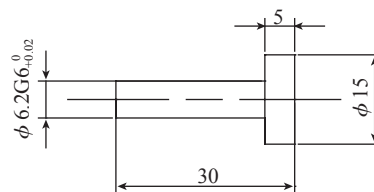
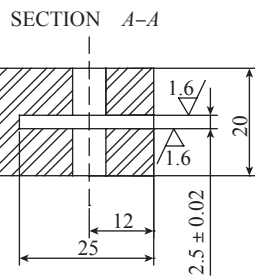
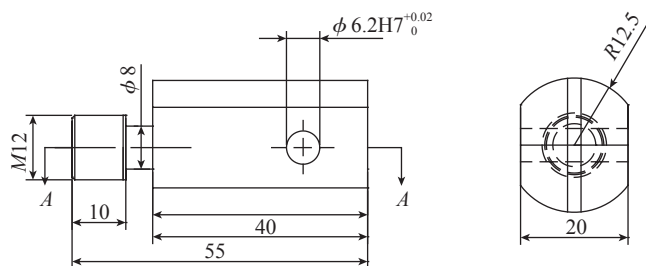


图15 高温低周疲劳夹具设计

Fig.15 High-temperature low-cycle fatigue fixture design

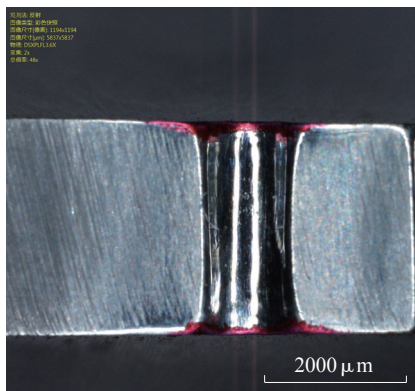


图12 表面粗糙度检测试样内腔表面状态

Fig.12 Roughness of specimen cavity surface condition

在试验温度 760℃条件下,最大应力为  $\sigma_{max}=540\text{MPa}$ ,频率为 3Hz。超短脉冲制孔和电火花制孔试样各制备 1 组,每组 3 片。试验设备为 EHF-EM100KN,应力比为 0.1,对比试验结果见表 2。

### 3 断口分析

经扫描电镜观测,电火花制孔试样断裂后孔壁表面都有明显的熔化物,边缘可见重熔层,未见微裂纹。断口为解理断口,表面有轻微氧化。多个孔边可见断口起始于孔边的重

熔层,表明重熔层在起裂的过程中可能对裂纹萌生有促进作用,如图 17、18 所示。

超短脉冲激光加工后孔壁表面光洁,只有一薄层氧化膜,与断口上的氧化膜类似,如图 19 所示。孔边未见有明显的重熔层和微裂纹。断口同样为解理断口,未见明显特定的起裂区,放大形貌如图 20 所示。

### 结论

(1) 皮秒级超短脉冲激光具备镍基单晶材料气膜孔圆柱孔加工

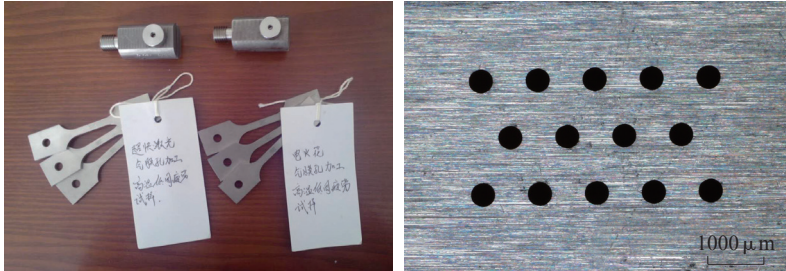


图16 高温低周疲劳试样、夹具实物图

Fig.16 High-temperature low-cycle fatigue specimen, fixture physical picture

表2 超短脉冲与电火花加工气膜孔高温低周疲劳试验数据

试样编号	试验温度 $T/^\circ\text{C}$	试验应力 /MPa	循环次数 $N/\text{周}$	备注
1	760	540	367802	超短脉冲激光打孔
2	760	540	324536	超短脉冲激光打孔
3	760	540	340139	超短脉冲激光打孔
4	760	540	27447	电火花打孔
5	760	540	16149	电火花打孔
6	760	540	116180	电火花打孔

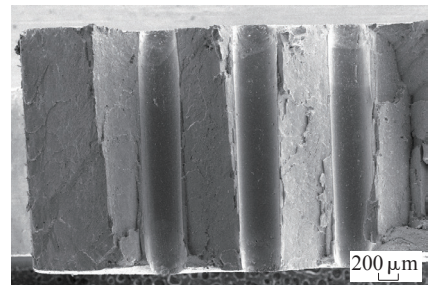


图19 典型超短脉冲激光加工孔试样断口宏观形貌

Fig.19 Macroscopic morphology of typical ultra-short pulse laser machined hole specimens' fracture

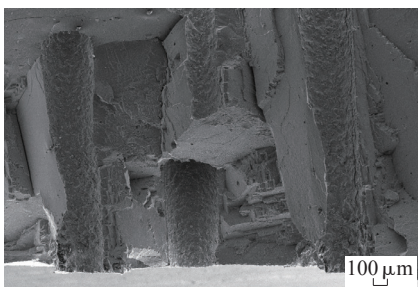


图17 典型电火花加工孔试样断口宏观形貌

Fig.17 Typical EDM hole specimen port macro morphology

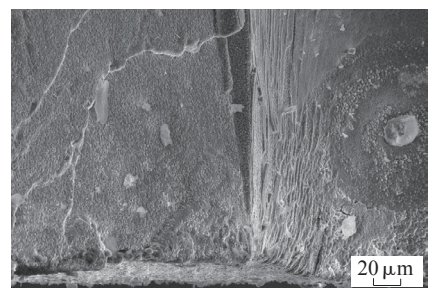
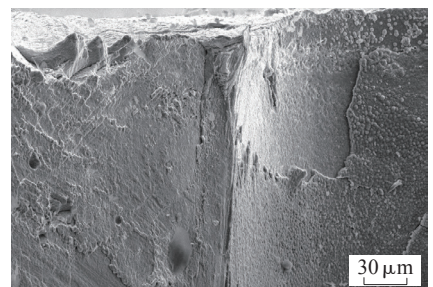
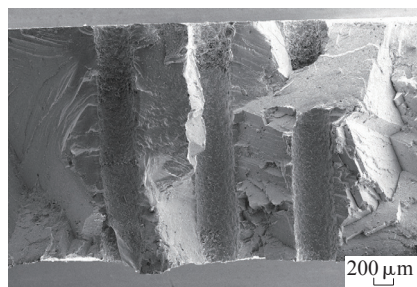


图20 典型超短脉冲激光加工孔试样断口微观形貌

Fig.20 Microscopic morphology of typical ultra-short pulse laser machined hole specimens' fracture

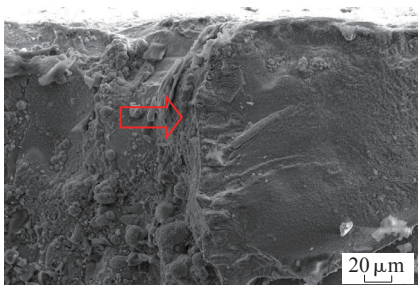
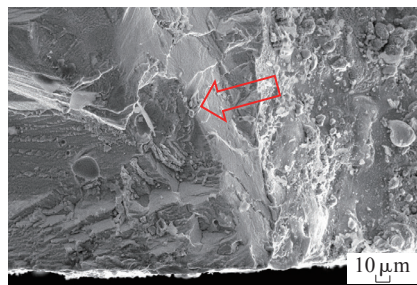


图18 典型电火花加工孔试样断口放大形貌

Fig.18 Typical EDM hole specimen fracture enlargement morphology



能力,气膜孔的几何精度可控制在 $\leq \pm 0.005\text{mm}$ ,正反面圆度误差可控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,圆柱度误差可控制在 $\phi 15\ \mu\text{m}$ 以内。可实现无重熔层、微裂纹、起弧等表面缺陷,内腔表面粗糙度可达到 $< R_a 0.4\ \mu\text{m}$ 。

(2)从工序分布方面需通过短时间将孔打穿改变排屑方向,降低等离子场对材料去除反冲的阻碍效果,采用去余量、修孔口及光整工序可提升气膜孔加工的表面质量;从能量匹配方面需合理配置打穿与光整工序功率范围,避免瞬间能量过大而导致的烧蚀问题;从过程控制方面需通过同轴监测系统实时监测孔打穿时间点,避免光线穿透后对孔的反面由于作用时间过长而形成的反面烧蚀以及锥孔的产生。

(3)通过超短脉冲与电火花两种工艺制孔试样高温低周疲劳性能

对比试验,超短脉冲打孔试样循环次数是电火花打孔试样循环次数的3倍。

(4)超短脉冲激光和电火花两种工艺制孔加工试样断裂均为解理断裂,无材质冶金缺陷,电火花打孔形成的重熔层可能对断裂有贡献,超短脉冲激光打孔未见明显重熔层。

### 参考文献

[1] 陈龙. 镍基单晶气膜孔结构疲劳性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.  
CHEN Long. Research on fatigue property of the nickel based single crystal film cooling hole structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.  
[2] 刘路, 黄宗南, 阮亮, 等. 高重复频率皮秒激光烧蚀不锈钢的研究[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 202-208.  
LIU Lu, HUANG Zongnan, RUAN Liang, et al. Ablation study of stainless steel by

picoecond laser with high repetition rate[J]. China Laser, 2017, 44(7): 202-208.

[3] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.

[4] LOPEZ J, TORRES R, ZAOUTER Y, et al. Study on the influence of repetition rate and pulse duration on ablation efficiency using a new generation of high power Ytterbium doped fiber ultrafast laser[J]. Applied Surface Science, 2013, 283: 1012-1017.

[5] NEUENSCHWANDER B, JAEGGI B, SCHMID M. From ps to fs: Dependence of the material removal rate and the surface quality on the pulse duration for metals, semiconductors and oxides[C]//ICALEO 2012 Presents the Latest in Laser Materials Processing Research. Anaheim, 2012.

通讯作者: 刘瑞军, E-mail: liuruijun\_007@163.com。

## Research on Surface Integrity of Ni-Based Single Crystal Materials in Picosecond Ultrashort Pulsed Laser Gas Films

LIU Ruijun, HUAN Heng, LI Weijian, LI Guangze, WEI Tingli, MA Yongyue  
(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the film cooling holes machining of nickel-based single crystal material by picosecond ultrashort pulsed laser, physical depth of field microscope is used to determine the geometry of the film cooling holes, meanwhile the cavity lumen surface of the membrane pore is observed by optical microscopy. Performances of porous film samples prepared by two processes of picosecond ultrashort pulsed laser and electric discharge using high temperature and low cycle fatigue equipment are compared, and specimen fracture is analyzed by scanning electron microscope (SEM) to evaluate the performance. The results show that the entering and exiting holes surface can avoid ablation by picosecond ultrashort pulsed laser processing step by step and effective control of energy density. While the geometric accuracy can meet the design specifications, also there is no remelting layer, intermittent beads, arcing and micro-cracks and other defects in the cavity. Besides, the surface integrity of the film holes after processing could be effectively improved. The comparative tests of high temperature low cycle fatigue performance of picosecond ultrashort pulsed and EDM film show that the cycle number of sample perforated by picosecond ultrashort pulsed laser is as many as three times that of EDM. SEM of high temperature low cycle fatigue fracture shows that the two kinds of processing specimens are cleavage fracture, without metallurgical defect, the remelting layer formed by EDM drilling may contribute to the fracture, and there is no obvious remelting layer in ultrashort pulsed laser drilling.

**Keywords:** Cooling holes; Nickel-based single crystal; Surface integrity; Ablation threshold; Low cycle fatigue

(责编 大漠)