

一种提高表面完整性的气膜孔成形方法

赵华龙¹, 周仁魁¹, 赵鸿雁², 赵卫¹, 朱文字¹,
杨小君¹, 李明¹, 邓玥¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所
瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119;
2. 西安外事学院 外国语学院, 西安 710077)

摘 要: 为了解决目前航空发动机涡轮叶片气膜孔成形工艺存在热影响严重等问题,提出了采用超快激光环切与螺旋扫描的加工方法,设计了一种可实现高效、无热效应微孔加工的双激光光源微加工系统,并从作用机理和实际加工过程两方面分析了热效应的产生原因,指出了其中的主要影响因素,然后针对这些因素选用 DD6 材料进行了工艺参数优化和实验验证. 实验结果表明:采用 500 fs 激光与微秒长脉冲激光复合加工的方式可以使精细钻孔的效率提升约 10 倍,并得到基本无重铸层和微裂纹的涡轮叶片气膜孔;其工艺参数包括扫描速度为 2400 r/min,重叠率为 12%,进给量为 5 μ m,重复频率为 20 kHz 以及 0.6 Pa 同轴吹气. 表明超快激光配合合理的工艺参数和加工方式可以实现无热效应微孔加工,是一种有效提高气膜孔成形表面完整性的工艺方法.

关 键 词: 表面完整性; 热效应区; 再结晶; 微裂纹; 重铸层; 超快激光; 重复频率; 脉冲宽度
中图分类号: V19; TG665 **文献标志码:** A

Forming method for improving the surface integrity of film cooling holes

ZHAO Hua-long¹, ZHOU Ren-kui¹, ZHAO Hong-yan², ZHAO Wei¹,
ZHU Wen-yu¹, YANG Xiao-jun¹, LI Ming¹, DENG Yue¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics,
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. School of Foreign Languages, Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to solve the problems of forming process of turbine blade of aero-engine film cooling holes, such as severe heat effect, a helix drilling and spiral drilling processing method for micro-hole by ultrafast laser was proposed, and a double power laser system was designed for machining of micro holes efficiently and without heat effect; the reason of thermal effects was analyzed from two aspects of action mechanism and actual machining process, the main influential factors were pointed out and the optimization of process parameters and experimental verification targeting at these factors were processed using DD6 material. The experimental results show that the composite processing method using 500 femto-seconds laser and microseconds laser can increase fine drilling efficiency about 10 times, and can also process the film cooling holes on turbine blades without recast layer and micro-cracks; the process parameters includes beam scanning speed at 2 400 r/min, overlap rate

12%，feeding amount of 5 μm ，repetition frequency of 20 kHz and coaxial blow with the air pressure at 0.6 Pa. They also show that ultrafast laser with reasonable process parameters and processing methods can process micro holes without heat effects, so it is an effective technological method to improve the surface integrity of film cooling holes.

Key words: surface integrity; heat effect zone; recrystallization; macro-crack; recast layer; ultrafast laser; repetition frequency; pulse width

涡轮叶片是航空发动机中热负荷及机械负荷最大的部件,其工作环境恶劣,承受燃烧后高温高压燃气冲击,其制造技术被列为现代航空发动机的关键技术.其中叶片铸造技术和气膜孔加工技术是最主要的难点^[1].

目前,叶片气膜孔的加工技术主要包括长脉冲激光打孔、电火花打孔、电液束打孔等方法.其中前两种方式都属于热熔加工,会在孔壁产生重铸层、再结晶和微裂纹,严重影叶片的表面完整性,最终导致了叶片材料性能和安全使用寿命的下降;电液束打孔无重熔层,表面质量好,但效率较低^[1].朱海南等^[1]对比分析了不同叶片气膜孔加工工艺的加工质量,可以知道作为叶片气膜孔主要加工手段的电火花依然存在较大的重铸层、毛刺和微裂纹等缺陷.

叶片气膜孔的表面完整性是描述、鉴定和控制叶片加工过程在加工表面层内可能产生的各种变化及对该表面工作性能影响的技术指标^[2-3],其评价指标主要包括表面粗糙度、表面纹理和表面缺陷在内的表面纹理几何特征,以及重铸层、微裂纹、再结晶等变质层特征,这些特征是影响叶片热疲劳性能、安全使用寿命的关键因素^[4].

随着航空发动机技术的快速发展,对叶片气膜孔的加工工艺提出了更高的要求,新型航空发动机要求气膜孔更小、更深、表面质量更好,同时还需要加工簸箕孔等更多的功能要求.针对这种现象,国内外学者都进行了大量的研究工作,但大部分研究都集中于叶片形貌和叶片气膜孔设计模拟分析^[5-6],只有部分文献就电火花加工航空材料的表面完整性的影响做了深入分析,认为电火花加工对表面完整性的影响可以根据通过优化参数得到提升^[7].但这些提升是有限的,不能从根本上解决热影响问题.

本文通过对比研究,提出了基于长脉冲激光和超短脉冲激光复合加工气膜孔的工艺,并通过理论分析和实验验证优化了可工程应用的加工参数,形成了可提高表面完整性的高效率气膜孔成形方法.

1 超快激光加工机理

Anisimov 等提出的双温模型是激光与金属材料的相互作用的理论基础^[8],该模型综合考虑了脉冲激光作用过程中光子与电子、电子与晶格之间的相互作用,利用一维非稳态热传导方程得到了电子与晶格温度变化的微分关系方程.表明激光与金属材料相互作用时,激光能量首先传递给自由电子,进行电子的子系统加热过程,然后自由电子再将热量传递给晶格,进行晶格系统的加热过程.在这个过程中,自由电子对光子的吸收大约需要 10^{-15} s,而电子的平均冷却时间以及电子把能量传输给晶格的时间大约需要 10^{-12} s,其作用模型如图 1 所示.

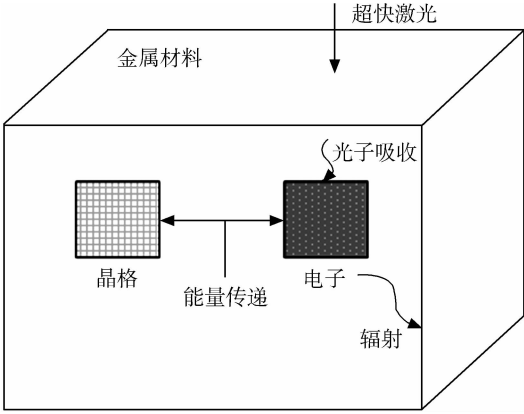


图 1 激光与电子、晶格相互作用模型
Fig. 1 Interaction model of laser with electron and lattice

飞秒激光具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率^[9-11],在与材料作用过程中,因为单个激光脉冲时间小于 1 ps,脉冲结束时自由电子与晶格没有足够的时间进行能量平衡过程,来不及在晶格之间进行转化为热量.这样,聚焦到超细微空间区域的巨大激光能量就会在极短时间内使材料电离,从而破坏材料的分子键,直接使材料从固体转化为蒸气或等离子,达到去除材料的目的^[12-16],而不会对周围的材料造成热影响.

因此,从激光与材料作用的机理上讲,飞秒激

光加工可以实现高精度、热影响区域小、无热熔、无重铸层、无微裂纹的材料去除,是提高航空发动机涡轮叶片气膜孔成型表面完整性的最佳手段之一。

2 复合激光气膜孔成形系统设计

从作用机理讲,飞秒激光不会像长脉冲激光和电火花一样产生热影响区,加工精度也很高,可以大幅提高气膜孔加工的表面完整性.但受限飞秒激光器功率较低,工程应用中加工效率也仅能达到与电火花相当水平.基于这种情况,本文结合长脉冲激光和超短脉冲激光与材料作用的特点,设计了可实现高效率、高表面完整性钻孔的复合激光气膜孔成型系统。

2.1 光路结构设计

系统主要由飞秒激光器、微秒激光器、扩束镜、光路切换装置、四光楔扫描装置和聚焦镜组成.其系统光路简图如图 2 所示。

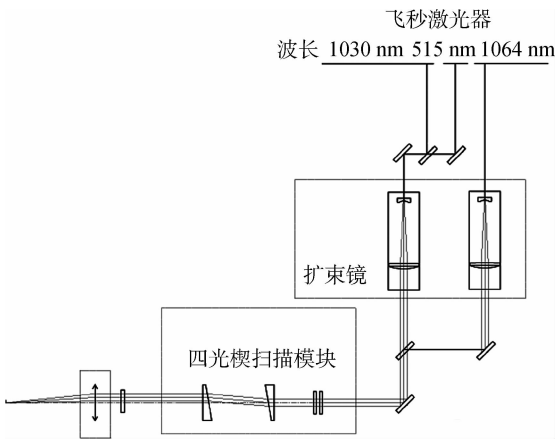


图 2 系统光路图
Fig. 2 Schematic of optical path of system

其中长脉冲激光器用于气膜孔的粗加工来提高效率,参数为脉冲宽度为 1 100 ns,平均功率为 70 W,单脉冲能量为 6.5 mJ;飞秒激光器用于精修加工来提高表面完整性,主要参数为脉冲宽度 500 fs~1 ps 可调,脉冲重复频率 1~2×10⁵ Hz 可调,平均功率为 10 W;扩束镜为 3 倍扩束,出射光束直径为 8 mm;四光楔加工头主要用于飞秒激光环切扫描精修加工,扫描直径范围为 0.1~1.5 mm,转速为 3 000 r/min;聚焦镜焦距为 100 mm。

2.2 提高加工效率的工艺方法设计

目前高精度的激光钻孔主要采用环切和螺旋扫描方式^[17-18],如图 3 所示。

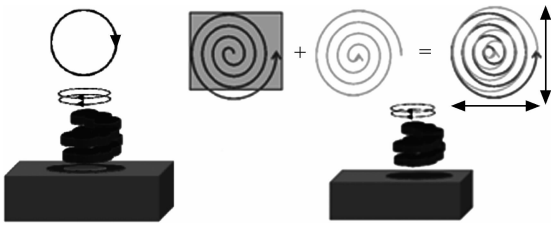


图 3 环切与螺旋扫描方式
Fig. 3 Helix drilling and spiral drilling

在飞秒激光钻孔中,为了保证加工精细度一般都采用螺旋逐层扫描方式,但这种方式的加工效率比较低.前期实验中在 2 mm 厚 DD5 材料上钻直径为 400 μm 的圆柱孔,需要 3 min 左右.这样的效率在工程应用中是不够的.而一般长脉冲激光实现 2 mm 深孔加工仅需 3 s 左右,但是其加工质量较差.本文结合这两种激光的优势设计了一种高效率、高质量的复合工艺方法,其钻孔过程如图 4 所示。

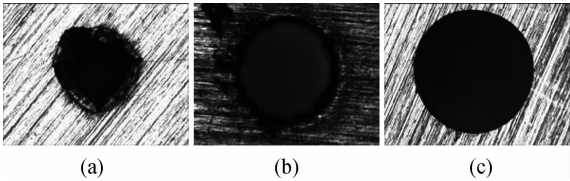


图 4 复合钻孔过程
Fig. 4 Process of composite drilling

以在 2 mm 厚 DD5 材料上钻直径为 400 μm 的圆柱孔为例,其加工过程是首先用长脉冲激光直接冲孔 1 s,形成直径约 300 μm 穿透的正锥形孔,如图 4(a);然后使四光楔扫描装置环切扫描 2~3 s,形成直径为 350~360 μm 的圆柱孔,如图 4(b);这两个阶段属于热熔加工方式,对加工质量不做过多要求,只需适当调整参数使热影响区小于 40 μm 即可.最后系统光路切换到飞秒激光光源,使四光楔扫描装置螺旋逐层扫描 15 s,精修去除前两阶段形成的热影响区,完成直径为 400 μm 的高质量圆柱孔成型,如图 4(c)。

相比于单纯依靠飞秒激光螺旋扫描,这种复合加工方式用 20 s 以内的时间就可以实现更高质量的微孔成型,效率可以提升约 10 倍.当然,针对不同指标的微孔,其个阶段时间和参数需要进行微调。

3 实验验证与表面完整性分析

搭建实验系统后,在 2 mm 厚 DD6 材料平板试件上进行实验加工发现:加工后的孔表面质量

虽然优于电火花,但其效果并无法达到无热效应的要求,加工出的微孔仍具有少量的毛刺、沟槽、重铸层、微裂纹等现象,只是相较于电火花和传统激光加工有了一定程度的改善,如图5所示。

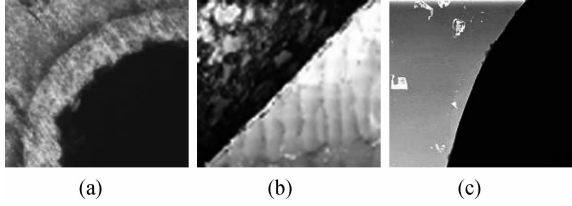


图5 不同加工工艺加工效果

Fig. 5 Effects of different processing techniques

图5(a)是长脉冲激光冲孔效果,具有很厚的重铸层(重铸层厚度大于 $30\mu\text{m}$);图5(b)是电火花加工效果,重铸层厚度约 $20\mu\text{m}$;图5(c)是飞秒激光加工效果。金相显微检测结果为:表面粗糙度小于 $0.4\mu\text{m}$,局部存在 $3\mu\text{m}$ 以下重铸层、延孔轴向等间距 $1\mu\text{m}$ 左右的沟槽以及少量氧化现象,如图5(c)所示。毛刺、重铸层、微裂纹等热效应作用区的产生,说明简单地应用超快激光加工还达不到真正的“冷”加工的目的,并不能完全实现无热效应微孔成形。

分析飞秒激光加工过程也存在热影响的原因,可以发现在激光与材料作用机理模型中仅是对于理想单脉冲作用时间内的加工过程而言,并没有考虑脉冲分布、对比度和连续脉冲叠加作用的影响。由于激光脉冲在时空上都是高斯分布,单脉冲周期上下两端都会大于弛豫时间,作用时就会产生少量的热传递,多个脉冲的累积就会造成热效应区;在空间上两端的能量密度不足以产生材料去除效果,其能量会不断累积,部分转化成热量。对于多脉冲打孔而言,材料仅在第一个脉冲作用时间内保持冷加工状态,脉冲结束后,材料也会升温,从而引起热烧蚀;另外,过程中喷出的等离子体会吸收下一个脉冲的能量,导致孔内部温度骤升,带来热烧蚀过程^[4]。因此,即便是对于再短的激光脉冲,热效应也会存在。

因为不可能制造出完全理想化的超快激光器,工程应用中也不能使两个脉冲作用时间间隔过长(消除连续脉冲作用叠加影响),所以必须在实际工程实现中进行参数优化,充分发挥超快激光的优势,减小热累积现象。

4 参数分析及优化实验

激光加工对表面质量的影响因素很多^[19],其

中影响热效应的主要因素有脉冲宽度、脉冲能量以及脉冲重复频率^[14,16],其次加工方式和中间处理环节也对热效应有着重要影响。

参数优化实验按照“点—线—面—体”的思路进行:首先从打单点开始,采用不同的脉冲猝发数和脉冲频率进行冲击打孔,确定合适的脉冲能量和脉冲猝发数,脉冲猝发被证明可以极大提高加工效率^[7];然后通过画圆环,找出合适的脉冲重叠率和重复频率。确定脉冲能量、脉冲猝发数、重复频率后,进行打孔实验,确定加工时焦点随小孔加深的下降速度,即步进量。

4.1 脉冲宽度对热效应的影响

脉冲宽度决定了激光与金属材料的热作用大小和持续时间。对于长脉冲,金属材料的去除主要靠热熔进行,热作用主要由脉宽决定;对于超短脉冲激光脉冲,脉宽一般为皮秒和飞秒量级,当其与材料相互作用时,热作用不再由脉宽决定,而是由材料的属性决定。图6所示^[15],在不同铝材料固化、熔融、气化所需要的最大时间。可以看出,当脉冲宽度小于 10ps 时,气化、固化以及达到最大熔深需要的时间不再减小。这说明激光加工中材料的熔化和热影响区的产生并不能通过使用超短脉冲来完全避免。

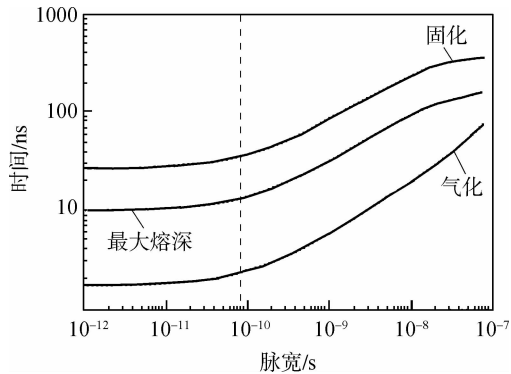


图6 不同脉宽时铝固化、熔融、气化所需时间

Fig. 6 Time of aluminum curing, melting, vaporization with different pulse width

4.2 脉冲能量对热效应的影响

根据前面分析,脉冲能量必须达到一定值时,金属才会蒸发。发生强烈蒸发的条件可以写为^[6]

$$F_a \geq F_{th} \exp(\alpha z) \tag{1}$$

其中 F_a 为脉冲能量, $F_{th} \approx \rho \delta / \alpha$ (ρ 是金属密度, δ 是单位体积蒸发能量)为超快激光脉冲蒸发的阈值通量, α^{-1} 定义为光学穿透深度。

对金属而言,作用深度取决于光学穿透深度

和热穿透深度. 研究表明^[2]: 当脉冲能量较小时, 光学穿透深度起主要作用, 此时热影响区较小; 当脉冲能量较大时, 热穿透深度起主要作用, 此时热影响较大. 可见脉冲能量既不能太小, 也不能太大. 脉冲能量太小时, 达不到金属蒸发所需条件, 脉冲能量太大时, 热效应就会比较明显, 同时表面粗糙度会上升, 精度会下降^[3]. 图 7 所示为单脉冲能量分别为 $5\mu\text{J}$ 和 $35\mu\text{J}$ 下扫描的圆环. 很容易看出激光脉冲过大时, 材料的热烧蚀效应也会增加. 图 8 是实验获得出现重铸层的临界点是单脉冲能量与脉冲数关系.



图 7 单脉冲能量为 $5, 35\mu\text{J}$ 时加工的圆环
Fig. 7 Processing ring with $5, 35\mu\text{J}$ single pulse energy

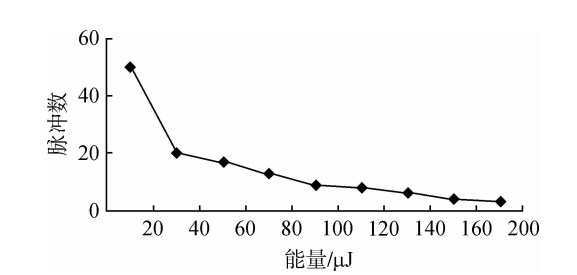


图 8 出现重铸层时单脉冲能量与脉冲数关系
Fig. 8 Relation ship between single pulse energy and pulse number when recast layer appearing

4.3 重复频率对热效应的影响

前面已经分析过, 如果两个脉冲相隔太近, 第 1 个脉冲作用完后, 形成的蒸气或等离子体来不及从孔内喷出, 第 2 个脉冲已经到达, 此时蒸气或等离子体会对光束造成遮挡, 使得照射到材料上的光能量减少, 同时蒸气或等离子体吸收光能后, 温度会急剧上升, 造成小孔腔内温度达到材料热熔温度, 出现重铸层. 金属融化后, 不再具有导体特性, 进而加剧热效应的产生. 图 9 所示为不同脉冲重复频率加工出的圆环, 从图中可以看出, 重复频率越高, 热效应越明显.

4.4 重叠率和吹气方式对热效应的影响

在加工过程中, 为了获得更好的加工效果, 脉冲之间必须有 $10\% \sim 15\%$ 的重合^[7]. 重叠率对烧

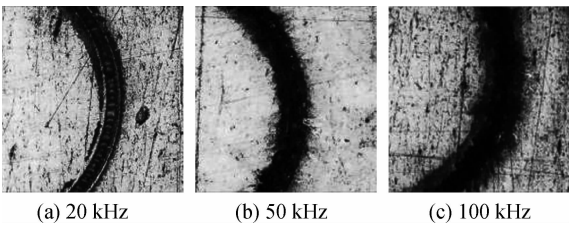


图 9 不同重复频率下热效应
Fig. 9 Heat affected at different repetition frequencies

蚀孔径、深度和烧蚀阈值有着重要影响. 一般重叠率越大, 烧蚀孔径越大, 深度也越深, 加工效率会越高, 但是孔径越深, 蒸气或等离子体越不容易排出, 越易产生热熔过程, 因此必须合理选取重叠率. 重叠率主要由重复频率、光束扫描转速、焦点大小以及孔径决定.

4.5 加工进给量对热效应的影响

加工进给量指的是加工过程中焦点沿孔轴向的进给深度, 必须与单层材料去除量匹配才能实现高质量、高效率加工. 进给量与其他因素是紧密配合的, 因为它直接反映激光是否在用焦点位置在加工材料, 进给量太大或太小, 都会造成激光的离焦加工, 所以进给量的合理与否对小孔的锥度^[4]以及热效应极为重要. 图 10(a)~图 10(c)是不同进给量下小孔正反面的形状.

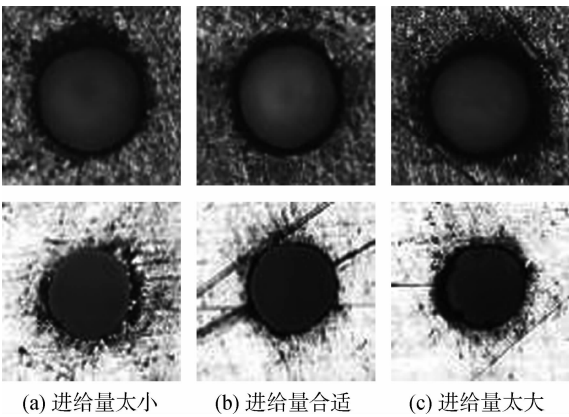


图 10 不同进给量下小孔形状
Fig. 10 Hole appearances with different feeding amounts

4.6 辅助吹气方式对热效应的影响

另外, 辅助吹气也对热效应有着重要影响. 由于打孔过程中会产生少量的残渣, 残渣会吸收激光能量产生热效应, 为此必须尽量去除残渣. 在打孔过程中采用同轴吹气方式可以去除部分残渣, 调整吹气压力和方向可以大大减少因残渣产生的热效应, 且孔口整洁. 其规律是, 当气压较小时, 空

气中氧气会作为助燃剂,与金属反应,形成氧化物,促进热效应的产生;当气压较大时(一般大于 0.4 Pa),作为冷却剂,可以将材料中的残渣和蒸气吹走,有利于抑制热效应。

5 热效应抑制实验总结分析

根据前面的优化实验分析可知,要提高气膜孔加工的表面完整性,除了采用脉冲宽度要足够窄的飞秒激光外,合理选取扫描方式、脉冲能量、重复频率、重叠率以及吹气气压才可以有效抑制热效应的产生。根据参数优化过程,可以得出基本无热效应的高效微孔成型工艺方法:

1) 首先用微秒激光加工出小于标称孔径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的基孔,重铸层厚度控制在 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以下;

2) 然后用 500 fs 激光螺旋逐层扫描精修成形无热影响区的圆柱孔,其参数组合为:扫描速度为 2400 r/min ,重叠率为 12% ,进给量为 $5\text{ }\mu\text{m}$,重复频率为 20 kHz , 0.6 Pa 同轴吹气。

参数优化前后加工效果如图11所示,参数优化前有约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的重铸层和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 起伏沟槽,如图11(a),参数优化后基本上消除了重铸层与沟槽,如图11(b)。同时,其加工时间也由大于 3 min 减少到少于 20 s ,效率提升了近10倍。

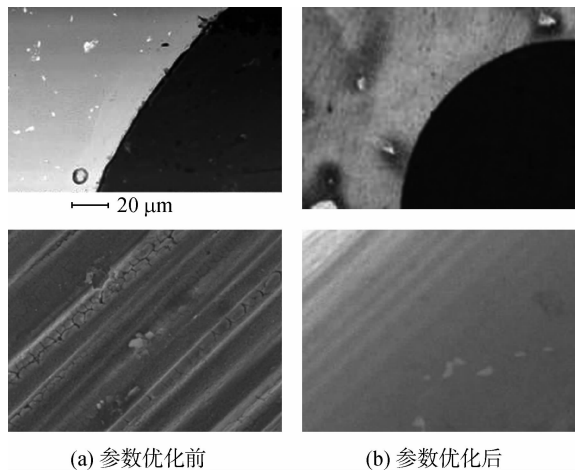


图11 参数优化前后对比

Fig. 11 Comparison of parameters between before and after optimization

6 结论

本文结合目前叶片气膜孔加工工艺对表面完整性影响分析,设计了一种可以实现高效、无热效应的双激光光源气膜孔成型系统,结合激光加工理论和气膜孔加工模型分析了热效应产生原因,

然后在DD6材料上针对影响热效应的多个因素进行了分析和实验,最后形成可以大大降低热效应、提高表面完整性的气膜孔成型优化工艺方法。工程应用中,针对不同材料只需测试其损伤阈值,并按优化规律进行参数微调即可快速实现不同材料的工艺优化。

通过理论分析和实验验证表明,简单利用超快激光,并不能完全消除热效应区,必须进行参数优化和加工方式的调整。利用该系统 and 优化的工艺参数加工的气膜孔,不论加工效率还是质量都有了很大提高,样件经检验后没有重铸层和微裂纹等热影响区,完全可以满足航空发动机涡轮叶片表面完整性微孔成形要求。

参考文献:

- [1] 朱海南,齐敬霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展[J]. 航空制造技术,2011(13):72-74.
ZHU Hainan, QI Xinxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(13):72-74. (in Chinese)
- [2] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 镍基高温合金GH4169磨削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报,2013,28(3):621-628.
HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3):621-628. (in Chinese)
- [3] 韩野,张志金,崔海军. 电火花加工表面完整性研究在大飞机发动机制造中的重要性[J]. 航空制造技术,2012,13:64-66.
HAN Ye, ZHANG Zhijin, CUI Haijun. Importance of EDM surface integrity research for large aircraft aero-engine manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 13:64-66. (in Chinese)
- [4] 陈雷,吕泉,马艳玲,等. 表面完整性对航空发动机零件疲劳寿命的影响分析[J]. 航空精密制造技术,2012,48(5):47-50.
CHEN Lei, LÜ Quan, MA Yanling, et al. Analysis of effect of surface integrity on aero engine parts fatigue life failure[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012, 48(5):47-50. (in Chinese)
- [5] 刘晓红,陶智,罗翔. 小孔辅助结构影响气膜冷却效果的实验[J]. 航空动力学报,2011,26(12):2710-2715.
LIU Xiaohong, TAO Zhi, LUO Xiang. Experimental investigation on effect of small auxiliary holes on film cooling effectiveness[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12):2710-2715. (in Chinese)
- [6] 向安定,罗小强,朱惠人,等. 涡轮叶片表面气膜冷却的传热实验研究[J]. 航空动力学报,2002,17(5):577-581.
XIANG Anding, LUO Xiaoqiang, ZHU Hui ren, et al. Turbine blade surface heat transfer and film cooling measure-

- ments in a turbine cascade with injection on surface[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(5): 577-581. (in Chinese)
- [7] 李丽,魏修亭,程祥,等. IN718 镍基高温合金电火花加工表面完整性初步研究[J]. *功能材料*, 2012, 43(24): 3479-3483.
- LI LI, WEI Xiuting, CHENG Xiang, et al. Surface integrity of IN718 nickel alloy after electrical discharge machining [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(24): 3479-3483. (in Chinese)
- [8] Breitting D, Ruf A, Dausinger F. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5339: 49-63.
- [9] 田瑞生. 高速激光打孔加工的技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- TIAN Ruisheng. The study of technology for high speed laser drilling [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] Becker P C, Fragnito H L, Brito Cruz C H, et al. Femtosecond photon echoes from band to band transitions in GaAs [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(14): 1647-1649.
- [11] Meunier M, Fiset B, Houle A, et al. Processing of metals and semiconductors by a femtosecond laser-based micro-fabrication system [J]. *Proceeding of SPIE*, 2003, 4978: 169-179.
- [12] 张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 351-352.
- [13] 徐世珍, 贾天卿, 徐至展, 等. 飞秒激光脉冲作用下氧化镁的烧蚀及其超快动力学过程[J]. *光子学报*, 2006, 35(8): 1126-1129.
- XU Shizhen, JIA Tianqing, XU Zhizhan, et al. Femtosecond laser-induced ablation and the ultrafast dynamics of MgO (111) Surfaces [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(8): 1126-1129. (in Chinese)
- [14] 倪晓昌, 王清月, 梁建国. 飞秒脉冲参量影响金属表面热特性的研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(1): 1-4.
- NI Xiaochang, WANG qingyue, LIANG Jianguo. The thermal character analysis of the femtosecond laser pulse parameters' effect on metal surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 1-4. (in Chinese)
- [15] 程光华, 王屹山, 赵卫, 等. 不同宽度脉冲激光对蓝宝石损伤的结构特征[J]. *光子学报*, 2006, 35(8): 1121-1125.
- CHENG Guanghua, WANG Yishan, ZHAO Wei, et al. Structural characteristics induced by nanosecond, picosecond, and femtosecond laser pulse in sapphire [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(8): 1121-1125. (in Chinese)
- [16] 王新林, 吴鹤, 常彦晓, 等. 热物性参量对飞秒激光烧蚀金属影响的分子动力学模拟[J]. *光子学报*, 2009, 38(12): 3052-3056.
- WANG Xinlin, WU He, CHANG Yanxiao, et al. Influence of thermophysical parameters by femtosecond laser ablation of metals: molecular dynamics simulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3052-3056. (in Chinese)
- [17] 谢云辉. 激光打孔光楔扫描光学系统的设计和研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- XIE Yunhui. Design and research of optical wedge scanning system for laser drilling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] 王砚丽. 激光旋转打孔技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- WANG Yanli. The research of technology for laser helical drilling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [19] 于海娟, 李港, 陈檬, 等. 飞秒激光加工过程中光学参数对加工的影响[J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 304-307.
- YU Haijuan, LI Gang, CHEN Meng, et al. Effect of femtosecond laser parameters on micromachining process [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 304-307. (in Chinese)