

气膜冷却孔飞秒激光加工技术与设备

Femtosecond Laser Machining Technologies and Equipments for Film Cooling Holes

■ 孙黎/中国航发研究院

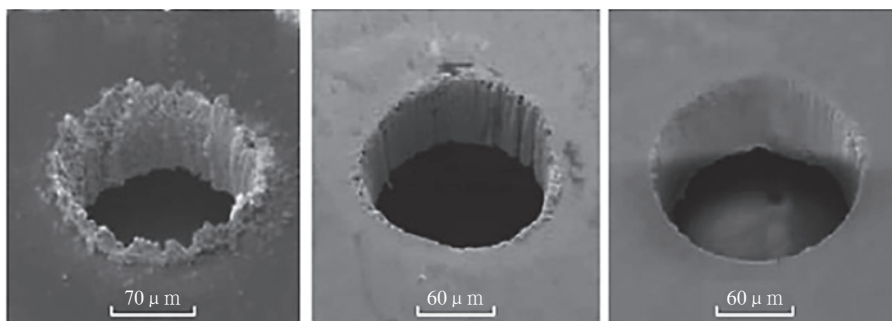
由于航空发动机不断增长的性能需求，高压涡轮前温度也一直在提高，因此，对先进叶片冷却技术和气膜冷却孔加工技术和设备的要求也大为提高。飞秒激光加工技术是随激光技术的发展逐步应用于微孔加工，是一种高效且有发展前景的气膜孔加工技术。

气膜冷却孔飞秒激光加工技术

气膜孔加工技术是叶片制造水平的关键技术之一。传统的涡轮叶片气膜冷却孔的加工方法主要有传统纳秒激光加工、电火花加工和电液束加工等方法。这些方法各有特点：传统的纳秒激光打孔效率高，但重融层较厚；电火花打孔效率次之，重融层也相对较薄，成为涡轮叶片打孔的主流方法；电液束加工无重融层，但效率低。

传统激光打孔和电火花打孔都属于热加工方法，高度集中的能量在小范围内对材料加热融化和冷却凝固，导致产生热裂纹和重融层。由于微裂纹和重融层对叶片的疲劳性能影响巨大，所以通常在传统打孔工艺后单独安排去除重融层工序。

飞秒 (10^{-15} s) 激光加工技术是随激光技术的发展逐步应用于微孔加工的，由于其脉冲持续时间极短、峰值功率极高 (可达PW量级，即 10^{15} W)，与传统的纳秒激光加工不同，其独特的冷加工去除材料机理使避免了重融层和微裂纹的出现。采用传统纳秒激光加工与飞秒激光加工小孔的效果对比如图1所示。



(a) 传统纳秒激光加工的小孔 (b) 传统纳秒激光加工的小孔 (c) 飞秒激光加工的小孔

图1 采用传统纳秒激光加工与飞秒激光加工小孔效果对比图

除了常规圆柱形孔，当前广泛应用于涡轮叶片的主要是异形孔，其具有复杂三维形状。相关研究表明，异形孔相对于圆柱形孔具有更好的冷却效率。

另外，现在叶片表面通常覆盖有热障涂层 (一般为氧化锆或陶瓷等非导电材料)，未来的涡轮叶片基体也趋向采用非金属材料，以上两点会导致采用传统气膜孔加工方法将十分困难或无法进行。而飞秒激光打孔具有材料适应性广、非接触加工、无机械应变、无大面积热应变、定位精度高、适合加工复杂孔型、可加工高精度群孔、极小重融层和微裂纹等特点。

用于航空发动机气膜冷却孔加工的飞秒激光设备

飞秒激光加工设备可通过智能控制系统，实现光束自适应调节和工件高速自动定位技术相结合，从而完成对工件的超精细加工。飞秒激光气膜冷却孔加工设备通常由飞秒激光系统 (主要搭载激光器)、计算机控制系统、电荷耦合元件 (CCD) 与光学成像系统、工件操纵移动平台等，如图2所示。

由于使用飞秒激光气膜孔方法加工出的气膜冷却孔具有孔壁无重铸层和微裂纹，且表面粗糙度低，无须后续处理等优点，业界已着手突破飞秒激光器领域，并形成了较

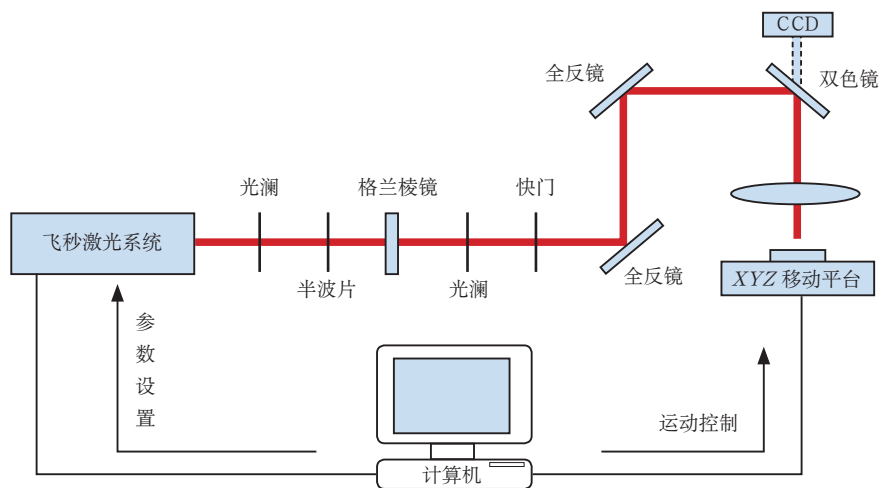


图2 飞秒激光气膜冷却孔加工设备组成示意图

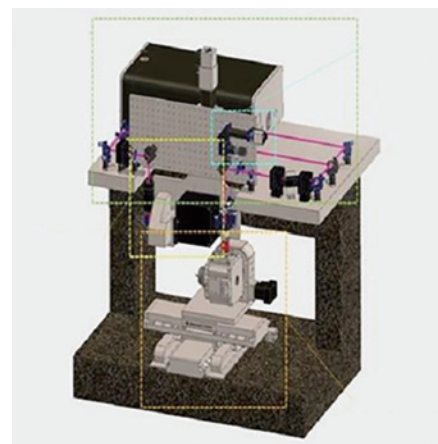


图3 试验系统组成示意图

为成熟的商业市场。

搭载PHAROS飞秒激光器的加工系统

该套系统为意大利巴里理工大学自主搭建，搭载型号为PH1-2MJ的Yb: KGW飞秒激光器，其发射波长为 $1.03\mu\text{m}$ ，单次脉冲重复频率范围 $1\sim 600\text{kHz}$ ，脉冲持续时间范围 $3\times 10^{-13}\sim 1\times 10^{-11}\text{s}$ ，试验系统组成示意如图3。

PHAROS的输出参数具有可调节性，可调参数包括脉冲持续时间($1.9\times 10^{-13}\sim 1\times 10^{-11}\text{s}$)、重复率(单脉冲至 1MHz)、脉冲能量(高达 2MJ)和平均功率(高达 20W)。其内置脉冲选择器允许在按需脉冲模式下方便地控制激光输出，配有丰富的外部控制接口可轻松将激光器集成到更大的机构和加工工作站。PHAROS拥有紧凑牢固的光机设计，各模块易于更换，控制温度稳定的密封外壳可以确保在不同环境下进行稳定的激光操作。另外，PHAROS配备了丰富的软件包，确保流畅的自动化操作，并允许快速、轻松地集成到各种处理设备。PHAROS激光器的输出特性见表1。

除激光器单元外，该系统还包括激光扫描单元、可视单元与工件操纵单元。该系统既可在线性模式下使用，包括三个直线移动轴和两个旋转轴(工作范围： $1000\text{mm}\times 1000\text{mm}$)，也可通过振镜扫描头(工作范围： $7\text{mm}\times 7\text{mm}$)和一个光束转换单元(WOP)在扫描模式下使用。该套设备的系统配置允许工业与科研领域的高精度加工(微切割、微钻孔、微成形、微刻蚀等)。

该套系统用于在金属板上打微

孔，以孔的圆度、倾斜度和入口尺寸稳定性为评判打孔质量的指标，且具有如下优点：尺寸误差限制在微米级；由于激光和热缺陷(裂纹、毛刺、氧化)引起的误差最小；具有良好的控制几何参数的能力(孔锥度、切深、切削刃倾角)；在激光波长和脉冲宽度的作用下表现出显著差异；加工次数最少。

搭载自动可调谐超快激光器Mai Tai HP的加工系统

该型由德国斯图加特大学搭建

表1 PHAROS激光器输出特性

规格	PH1-2MJ
最大平均功率	6 W
脉宽(假设为高斯脉冲形状)	$< 3\times 10^{-13}\text{ s}$
脉宽范围	$3\times 10^{-13}\sim 1\times 10^{-11}\text{ s}$
最大脉冲能量	$>2\text{MJ}$
基本重复频率	$1\sim 200\text{ kHz}$ (可扩展到 1 MHz)
脉冲选择	单次、按需脉冲、基本重复频率分配
中心波长	$(1028\pm 5)\text{ nm}$
功率稳定性	$< 0.5\%$ 超过 100h
预脉冲对比度	$< 1:1000$
后脉冲对比度	$< 1:200$
偏振	线性, 水平
光束指向稳定性	$< 20\mu\text{ rad}/\text{ }^\circ\text{C}$
振荡器输出	可选

表2 Mai Tai HP激光器的输出特性

项目	输出参数
脉冲宽度	$<1 \times 10^{-13}s$
调谐范围	690 ~ 1040nm
平均功率(波长为800nm)	2.5W
平均功率, 对应波长	>500MW, 690nm >1.35W, 710nm >1.35W, 920nm >300MW, 1040nm
光束圆度	0.9 ~ 1.1
像散	<10%
重复频率	$80 \pm 1MHz$
光束指向稳定性	$<50 \mu rad/100nm$
噪声	<0.15%
功率稳定性	$< \pm 1%$
偏振度	>500 : 1横向
光束发散角	<1.2mrad
光束直径(1/e ²)	<1.2mm

的平台搭载了由光谱物理公司研发的型号为Mai Tai HP的飞秒超短脉冲钛宝石激光器, 可用于金属材料的微孔加工的理论及工艺研究。表2为Mai Tai HP激光器的输出特性。

该激光器在80 MHz的标称重复率下运转, 可提供大范围的可调谐波长, 同时实现了高功率和科研扩展性。除激光器外, 试验平台还包括一台光学展宽器、一台再生放大器和一台脉冲压缩器。由于高性能的超快振荡器和放大器均需要可靠的高性能泵浦激光器, 因此该自主搭建的系统中, 以二极管泵浦Nd:YLF绿光激光放大器, 得到中心波长为800nm的脉冲。通常情况下, 1MJ单脉冲能量对应的脉冲宽度为 $1.2 \times 10^{-13}s$ 、重复频率为1kHz, 以上参数由Clark MXR自相关测量器测量得到。需要特别指出的是, 在光路中引入放大器和含有两个偏振片的系统, 是为了降低和控制激光脉冲, 得到小的单个能量(通常为0.05 ~ 0.5MJ/pulse)。

此外, 该系统还通过搭载远程CCD相机的精确成像系统, 来精准监测加工区域材料去除的情况。

UMW系列飞秒激光微加工工作站

图4所示为美国莱特州立大学(Wright State University)配置的UMW系列飞秒激光微加工工作站。这款由Clark MXR公司凭借其在超短脉冲激光领域二十多年的实践研究与产品经验, 研制出的高度集成的、具有广泛适用性的微加工工作站, 已经成为成熟的商业产品。

该工作站主要组成为激光器、



图4 UMW系列飞秒激光微加工工作站

表3 运动定位系统参数

项目	运动定位系统	
	X/Y轴	Z轴
最大行程	300mm	100mm
重复精度	0.5 μm	1.0 μm
精度	1.0 μm	±1.0 μm
最大速度	5cm/s	5cm/s

表4 视觉监测系统的参数

项目	视觉检测系统
变焦透镜	12倍
分辨率	1 μm
视场	4mm
光源	环形同轴LED
监测系统	模式识别、边缘定位、部件旋转与测量

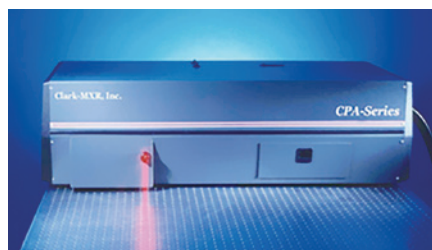


图5 CPA-2101激光器外形

运动定位系统、视觉监测系统、控制系统等。它集成了激光微加工中所需的一切元器件以及软件。软件接口采用工业标准G代码形式。表3和表4分别为该系统运动定位系统、视觉监测系统的参数。

搭载于该工作站的是型号为CPA-2101的可产生皮秒($10^{-12}s$)至飞秒($10^{-15}s$)的超短脉冲激光器, 图5为CPA-2101激光器外形。它内部集成了超短脉冲振荡器与放大器系统, 可通过接口与Windows平台的计算机相连接实现对激光器的控制。控制软件提供了对激光性能参数控制的功能, 例如调整输出功率、脉冲宽度、泵浦功率、时间、单脉冲

冲或多脉冲群选择，另外还包括一套诊断程序用于监视。CPA-2101激光器的输出特性见表5。

五轴超快激光微孔加工设备

该设备由中国科学院西安光学精密机械研究所自主研发，型号为MicroDrill100，如图10所示。

该设备以飞秒激光光斑作为装备“刀具”，实现一点到一线然后到一层，层层剥离的方式进行加工，具有极高的加工精度，该装备的关键技术包括：高功率、高重复频率



图10 MicroDrill100五轴超快激光微孔加工设备

表6 MicroDrill100主要技术参数

项目	技术参数
运动行程	1000mm × 450mm × 500mm × ±110° × 360° (X、Y、Z、A、C)
孔径范围	Ø0.05 ~ Ø1.5mm
孔径精度	≤ ±0.005mm (可根据用户需求定制 ≤ ±0.001mm)
定位精度	±0.01mm
最小斜孔夹角	30°
深径比	≥ 20 : 1

飞秒激光器；高精度光束扫描技术；三维轮廓检测辅助定位技术；集成光束实时监测和工艺数据库的控制系统。其主要技术参数见表6。

MicroDrill100主要针对航空航天领域的关键小型零部件的超精细冷加工而开发，可实现各类高温合金、金属、非金属、特别是复合材料表面的各类微结构的加工，如通孔、异形孔、盲孔、微腔、型腔、异型槽等复杂形貌微结构的制备。因此该设备特别适合于航空发动机叶片气膜孔的高品质高效制孔。

结束语

基于以上对用于航空发动机气膜冷却孔飞秒激光加工技术与设备的调研情况，初步得出以下结论。

研究机构与高校通常自主搭建完整的试验系统，而不是购买具有高成熟度的成套设备。研究人员通常购置核心的激光输出设备后，开发适合研究目标的控制与监控系统，将设备集成后形成专门用于发动机零部件修复的系统，往往具备实验室鲜明的特色，且随着技术成熟度的提高，部分发展为专业的设备集成商。

而航空发动机制造与维修厂商一般通过购买研究所和高校自行搭建的试验系统来开展生产，或通过产学研合作的方式支持科研院所研制设备和技术，双方共享知识产权。

由于航空发动机制造与维修厂商众多，通常与各大研究机构和高校密切合作，其中既有政府牵头，又有自发组织。厂商为基础与应用研究提供成熟的设备或加工模块，科研人员为商业领域带去前沿科技、带去智慧与创新，甚至为其输出高素质员工，共同促进了航空发动机行业的发展与进步。

航空动力

(孙黎，中国航发研究院，助理工程师，从事航空发动机机械系统设计及制造相关技术研究)

表5 CPA-2101的输出特性

项目	飞秒功能	皮秒功能
脉冲能量	在 ≤ 1 kHz 重复率时 > 0.8 mJ	在 ≤ 1kHz 重复率时 > 0.6mJ
脉冲宽度	< 1.5 × 10 ⁻¹³ s	< 8 cm-1
时间-带宽积 (TBWP)	< 1.4 × 变换极限 (sech ²)	< 1.2 × 变换极限 (Gaussian)
输出参数	泵浦激光器	1500nm
	振荡器	在 1550nm 时平均输出功率 > 10mW 或在 775nm 时 > 3mW (在 30MHz 的标准重复率)
波长	775nm	
重复频率	高达 1kHz	
偏振方向	线性，水平方向	
能量稳定性	< 1% rms	
光束直径 (FWHM)	4 ~ 6mm	
外形尺寸	激光头	122cm × 50.8cm × 30.5cm
	电源	71cm × 58.5cm × 96.5cm