

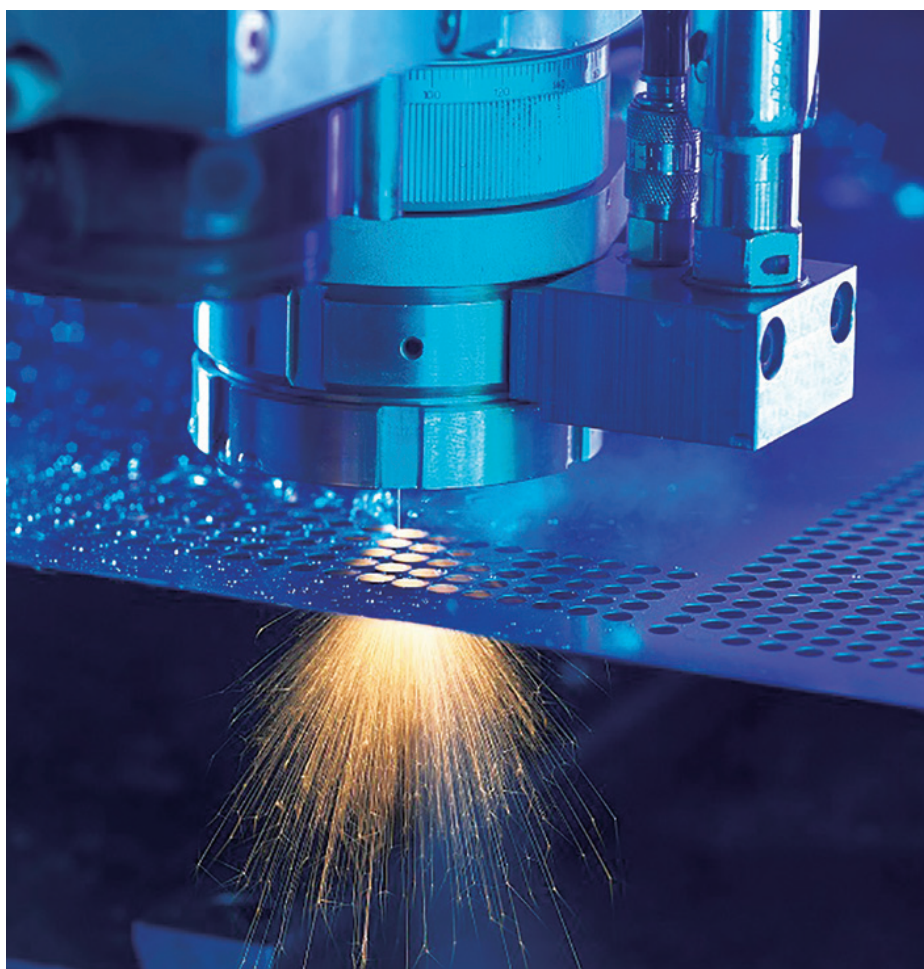
激光微射流提供发动机零件加工新方案

Laser Microjet Offers New Solution for the Machining of Aero Engine Parts

■ 刘亚威 / 中国航空工业发展研究中心

复合材料具有易发生分层、易受热影响的特性，对以金属为对象的传统加工工艺技术体系提出了挑战。GE 航空集团在 LEAP 发动机的陶瓷基复合材料罩环加工中采用了一种先进的激光微射流技术，使得上述难题迎刃而解。该技术还适用于对碳纤维复合材料和金属材料的切削与钻孔，从而为发动机零件加工提供了新的解决方案。

陶瓷基复合材料（CMC）在航空发动机、高超声速飞行器上的应用正不断扩大，其高可靠性和高精度的加工，对于以金属为对象的传统加工工艺技术体系是一个重大挑战。CMC 高硬度和易损伤的特性，导致加工速度缓慢、需要不断更换刀具，会对材料性能产生不良影响，无法满足零件规格要求。激光技术作为一种解决方案，可提高加工效率并终结刀具的重复性成本，但激光产生的热量会传导到材料中，可能会产生微裂纹和材料变性；激光在光束的焦点处切削，还会导致 V 形切口影响公差精确控制。由瑞士喜诺发（Synova）公司开发的激光微射流技术为解决上述难题提供了解决方案。2017 年，GE 航空集团在位于美国北卡罗来纳州阿什维尔的 CMC 发动机部件生产厂部署了激光微射流技术，用于加工 LEAP 发动机的 CMC 罩环上的孔。生产验证过程表明，该技术既高效又有助于保持孔直径的高精度，微射流可以在 2min 内完成钻孔，而传统加工则要 1h。



激光微射流加工金属板

激光微射流加工技术原理及其优势

基于全内反射原理，激光微射流技术可以生成完全包含在水射流中的激光

束，激光束在具有较低密度介质的空气—水界面处反射（其原理类似于光纤），沿着从喷嘴到工件的狭窄直线路径传播，不会有能量穿过内壁；水

可用于冷却切削区，并从切口洗去碎屑。与传统激光器相比，该技术不会让材料燃烧或发生热退化，产生的毛刺更少可以使表面更光滑，还能够实



阿什维尔CMC工厂生产两种LEAP发动机零件

现直边切削和更高的精度。

激光脉冲持续时间以纳秒为单位，对于每个激光脉冲，产生的等离子体会向上推水，从而实现有效的烧蚀。在脉冲结束时，等离子体坍塌，由水射流清洁加工表面并消散热量，水射流还消除了干式激光系统通常需要保持激光聚焦带来的复杂性和工艺变化，这样可以切割厚的或非平面的零件而不必担心焦点问题。

穿过它，水射流也必须高度稳定且边界一致，以防止光束逸出。Synova公司为如何使用由气体封闭的液体射流来防止形成湍流的技术申请了

一项国际专利。由蓝宝石或钻石构成的喷嘴较为耐用，具有特殊形状可确保气体和水适当发生相互作用。在低压下投射的纯水、去离子水和过滤水包裹着光束，以限制水流不利影响带来的风险。

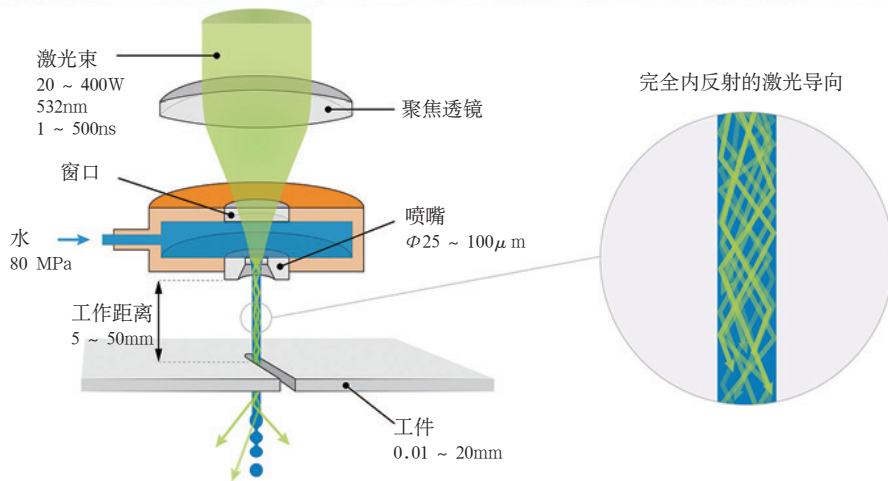
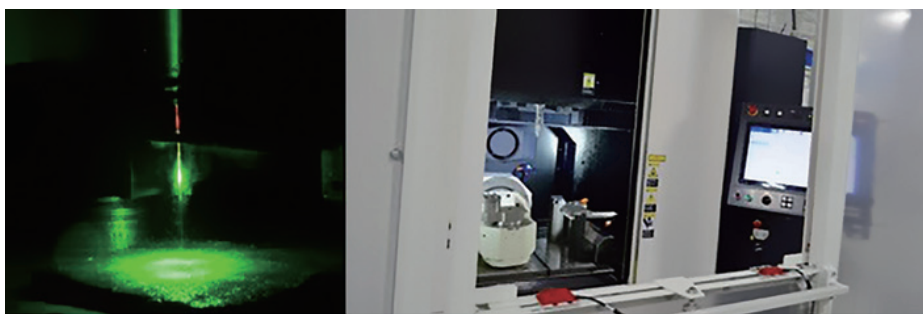
激光微射流系统喷嘴的直径范围为25 ~ 120 μm，利用内部连续反射光束的能量，水流本质上成为一个完美的圆柱形叶片，在其轨迹中留下完美的直壁。在没有引导水流的情况下，激光束是自然的锥形，从源头起开始变窄，到特定点后聚焦，然后再次向外展开。因此，必须严格控制切削深度和焦点位置，以避免切削中出现不必要的锥度，水的添加消除了这个问题。根据Synova公司提供的数据，在水射流及其内部的激光开始展开之前，水射

GE的CMC激光微射流加工细节

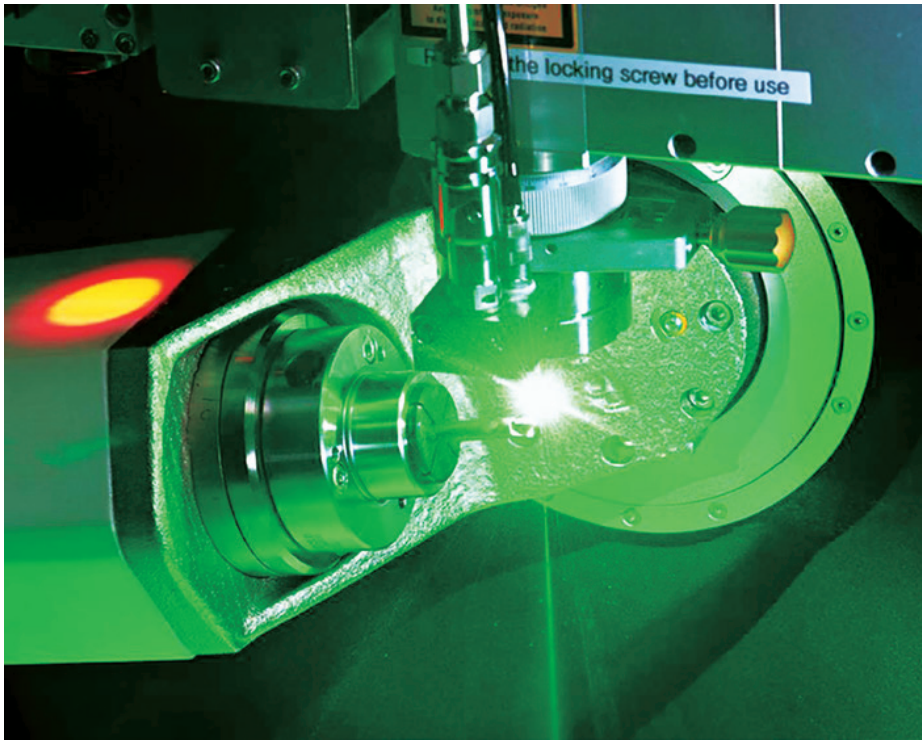
系统及工艺

Synova公司的CMC激光微射流(LCS)系统中，激光束通过加压水舱并聚焦到喷嘴中。激光器是工业常见的固态钕掺杂钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器，大约每秒脉冲为10000次，功率为10 ~ 200W，波长为1064nm(红外)、532nm或355nm。射流为过滤的去离子水，直径为50 ~ 70 μm，在20 ~ 65MPa的低压下使用。

对于激光头本身，光束必须以一定的角度接近边界以反射而不是



激光微射流原理



LCS机床

流可以投射到距离喷嘴直径1000倍的距离（最大工作范围为100mm）。切口宽度与喷嘴直径紧密匹配，精度和重复性以微米（ μm ）为单位。

虽然激光在原始速度和精度方面可以做到无懈可击，但只有在一些特殊情况下才会让它去直接熔化材料。通常，激光烧蚀的性质阻止了它在工件上的使用，因为在切削区域周围的热影响区内，可能会发生微裂纹、变形和其他条件的不利影响。在激光微射流系统中，围绕光束的发丝般细的水流在激光脉冲之间的微秒间隙中吸收这种热量。水射流不仅消除了切削区域的热量，还带走了烧蚀的废料和任何其他可能作为碎屑黏附在工件上的污物，以获得更清洁的切削结果，并且可能省略去毛刺和其他下游的操作。此外，水的消耗也很低，为2 ~ 3L/

h，并且施加在材料上的力小于0.1N，是可以忽略的。

CMC零件加工流程

GE的CMC零件加工线的每台机床都使用一个带真空卡盘的3R接口，以便尽可能地使生产接近单件流。3R接口涉及一个工件夹具系统，可夹取多种不同的零件，实现快速安装和高效生产。工件通过胶接固定到接口，由机器人夹取，逐一通过自动化加工线站点，包括微射流加工机床，每站不需要额外的安装工作。加工线的最后一步是无损检测，使用计算机X射线断层扫描（CT）机。每个零件都要检测，扫描时间是15min，完成时间是30min，包括数据评价。

日本牧野铣床株式会社（Makino）与Synova公司联合开发的激光微射流机床具备“工厂4.0”功能，激光功

率计、定位传感器和自动射流角度校正集成在激光微射流系统中。该系统实际上非常灵活，可作为独立系统集成到零件生产中，或作为全自动生产线的一部分。工业互联网也是机床具备的重要特征，从工厂的每台机床直到屋顶都铺设室内以太网电缆，连接到工厂的数据库系统，称为“银管网络”。因此，加工指标和CT扫描等在每个CMC零件的数字主线中都记录下来，并用于分析以帮助技术人员优化工艺，提速降本。

激光微射流加工技术应用前景广泛

碳纤维复合材料加工

激光微射流技术可以基于非常恒定的 $1\text{mm}^3/\text{min}$ 的消融率，快速切割2.54cm厚的CMC层压板。除了CMC，该技术还特别适用于碳纤维增强塑料（CFRP），可在2.6mm厚的CFRP层压板上生成直径为3mm的孔，速度高达1440mm/min。使用常规的激光器，因为热量必须降低钻削速度；常规的铣削虽可达到类似的速度，但由于需要更换刀具，因此运营成本更高。

Synova公司于2018年推出了五轴CNC LCS 305系统，用于高精度3D切削，非常适合小型CMC零件，但不适合大型CFRP零件。为此，Synova公司又将其激光微射流系统集成到龙门机床中，能够加工大于 $2\text{m} \times 3\text{m}$ 的零件。该系统还很容易与机器人集成，易于编程，从而扩大加工能力。对于平面切削，微射流软件将CAD文件转换为机床代码，一经验证，操作员只需按下一个按钮，机床就会执行切削程序。对于立体切削，后处理器将从CAD文件中提取必要的数



加工后的碳纤维复合材料层板

将其用于微射流软件。

金属加工

没有锥度、没有热影响区、无材料沉积这3个优点使激光微射流具有多功能性，可将几乎任何材料切割成复杂的特征，这使得该工艺不仅可以替代干式激光切割，还可以替代许多其他工艺，甚至用于金属加工。

Synova公司的LCS系列机床可以精密加工小型金属，LCS 300的最大工作范围为300mm×300mm，而Makino公司与Synova公司联合开发的五轴MCS 500工作范围可达500mm×400mm，MCS系列补充了Makino公司自己的铣削和电火花加工（EDM）产品线。Makino公司正在营销所谓的“混合加工单元”，包括MCS 500和Makino EDBV的电火花加工钻孔机床，专门用于钻削铸造涡轮叶片中的冷却孔和具有中空内部的导向叶片部件，可使用户能够钻出一个具有最佳成果的完整叶片，包括非视距孔的钻孔。

这些涡轮叶片和导流叶片通常涂有陶瓷隔热层，以帮助抵御高温。但是，这些涂层不导电，而电火花加

工仅适用于导电材料。因此，制造商通常在涂覆涂层之前对孔进行电火花加工钻孔。更麻烦的是，设计者越来越多地采用锥形、方形或其他非圆形开口的扩散器孔，这些开口并不总是以外部扩散器形状为中心。仅使用电火花加工时，制造商通常选择加工出大于规格的这些特征以预留出涂层的厚度，其中一些特征可能需要在之后手动移除。具有在机床之间传输数据功能的自动化混合加工单元简化了该过程。初始涂层渗透和扩散器形状的加工可以通过激光微射流进行，同时将大部分孔留给电火花加工。

如果一个孔足够浅，完全可用激光微射流加工整个几何形状，并且比电火花加工更快。然而，在一定深度，水流开始分解，电火花加工变得更快并且是唯一选择。EDBV机床还具有其他一些优点，例如，它的发电机具有动态反馈电路，感知管式电极的位置并根据需要增加进给以使“空气切削”最小化，特别是在高接合角度时。机床还可以感知电极何时在1s或0.1cm深度内突破内腔以保持速

度，同时防止可能会扰乱气流的电火花回击。Makino公司的专用弯曲导轨还有助于加工非视距涡轮发动机孔特征的功能。

因此，两种工艺在这些应用中都占有一席之地，并且由制造商决定哪种钻孔最适合给定的工作。将两者结合在一个单元中可以使两个过程的工作负载平衡，从而将质量和生产率提高到超出单个系统的水平。GE航空集团已经在利用激光微射流机床独立切削CMC涡轮零件，如果这个案例具有示范效应，那么其他制造商也可能将该技术部署到自己的加工机床资产组合中，作为其他工艺的补充和替代。这将大大增加激光微射流技术的应用前景。

结束语

激光在航空制造中占有越来越重要的地位，激光微射流工艺的应用进一步说明了这一点。激光微射流能够提升陶瓷基复合材料和碳纤维复合材料的加工效率与成品质量。由于层压纤维结构的存在，比起金属切削或钻孔中经常存在的毛刺，加工这些复合材料的热影响往往可能会造成更加复杂的分层和缺陷。在碳纤维-钛合金叠层钻孔方面，轨道加工已经大面积应用，在CMC和CFRP钻孔方面，激光微射流也已登堂入室，相信随着航空复合材料应用的继续扩大，今后类似的创新工艺还将不断涌现以颠覆现有的以面向金属加工为主开发的传统工艺。

航空动力

（刘亚威，中国航空工业发展研究中心，高级工程师，主要从事先进航空制造技术、智能制造、制造成熟度和制造创新体系研究）