

微水刀镭射

集成喷水器 扩展了激光切割的潜力

这种设计是为了小而复杂的特性，如涡轮叶片冷却孔，在技术上融合水和光，几乎消除了激光切割的传统缺陷，同时不影响利润。

文 | Matt Danford



仅需加水

根据 General Electric 最新发布的一份报告显示，激光加工是一种可行的工艺，可用于生产涡轮叶片表面的冷却孔，用于燃气和供应应用。这种独特的激光多样性帮助 GE 在每个零件的生产过程中节约了几个小时的时间，现在这种技术的瑞士开发者及其北美合伙人希望将成果扩散到其他涡轮叶片制造商那里。他们称，这种技术不仅提供了激光切割长期以来被认为的速度和精度，还消除了传统缺陷：比如，热量会影响材料结构和粘附在表面上的加工油泥。

然而，优势不仅如此，用途也不止制冷却孔。GE 也利用这些激光加工新型防热（因此很难加工）材料生产其他涡轮部件。其他制造小型、复杂特征的制造商也开始盈利：手术刀、针头和其他医疗设备；汽车燃油喷嘴和火花塞；单晶和多晶金刚石（PCD）切割刀具，这只是少数的一些例子，证明本特定种类的激光切割技术可作为铣削到电火花加工蚀刻工艺的可行替代方案。除刀具种类和 GE 进行的清洁材料移除以外，技术开发人称，独立零件制造商还可以

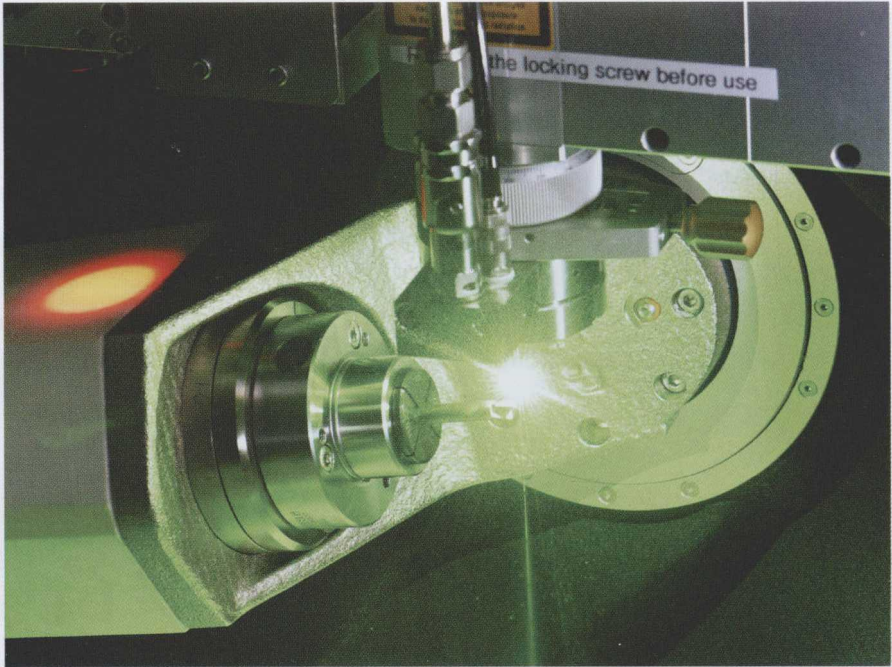


图1 如光纤一样，水流可以引导激光束，这就保证了准确的直壁式切割，同时不会出现热影响区或杂质粘附在工件表面的风险

从技术能力中受益的是，在整个切割深度范围内，几乎不产生锥化，不用担心焦点问题。

这是怎么做到的呢？通过所有基本要素中最重要的元素：水。更具体地说，通过压缩水流，完全围绕激光束，因此可

以同时作为向导，冷却媒介以及清洁剂。

扩展研究

在瑞士 Lausanne 的联邦理工学院（EPFL）完成现在所说的微水刀镭射（LMJ）的开发后，博士生 Bernold

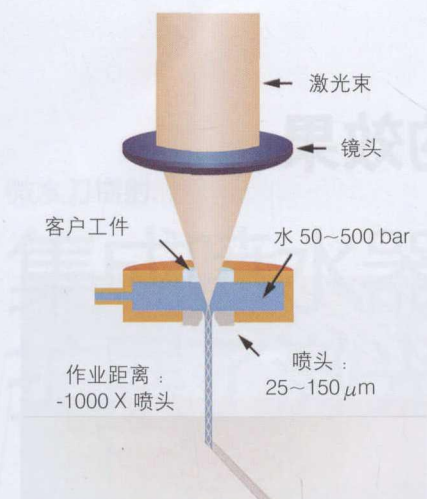


图2 微水刀镭射 (LMJ) 通过全反射远离作业，激光束在向工件行进时持续在空气与水之间的边界反射，最大作业距离为 $1000 \times$ 喷嘴直径，在该点水流开始断开



图3 一台 LMJ 机穿过陶瓷涂层，钻出该孔，这是使用电火花加工钻孔是无法实现的，因为涂层是不传导的，这种能力使涡轮叶片制造商可以在涂层之后钻孔，而不是之前，简化了整个过程

Richerzhagen 在 1997 年成立了 Synova 公司，将新注册专利的技术带给了工业制造商。在接下来的 20 多年内，Synova 深入市场，从金刚石和宝石切割到半导体和电子切割，设备制造合伙人提供适用于 LMJ 的各行业平台。美国业务经理 Jacque Coderre 称，公司自 2003 年起在硅谷的小型客户群附近经营一家办事处，提供销售、服务和辅助基础设施，在更大范围内推动 LMJ，加速与关键合伙人的合作步伐。

该合伙人即机床制造商 Makino，由于两个公司最近与 GE 合作，将 LMJ 应用于制造涡轮叶片冷却孔加工，合作的步伐大大加速。这促进了 LMJ 加工中心的 MCS 生产线的开发，在 2016 年 5 月，与 Single Source Technologies (SST) 公司签订了包销、经销和售后支持协议，由 Makino 提供工程、现场服务和产品销售，对制造商自身的铣削和电火花加工生产线进行补充。可以制造两种尺寸：三轴 MCS 300 和五轴 MCS 500，后者专门设计用于 3D 操作，如 GE 正在做的工作一样。Synova 的 LCS 生产线是一种非 Makino 系统，相比于 MCS，主要用于精密加工小型金属和硬材料零件，通过 SST 可用（最大 LCS、LCS300，提供一个 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的工作区域，其中 MCS

500 提供 $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的工作区域）。

在两个生产线上，切割动作主要由二极管泵浦、固态、钕钇铝石榴石激光负责，脉冲持续时间以纳秒为单位，平均功率为 50~200 W，波长为 $532 \text{ N} \cdot \text{m}$ （有些 LCS 模型波长为 $1064 \text{ N} \cdot \text{m}$ ）。切口宽度紧紧匹配喷嘴尺寸，精度和重复性以 μm 为单位。激光束由纯净的、去离子的、经过滤的水包围，以低压喷射，以限制水流产生的不利影响。与光纤电缆的作用非常类似，水流可以保证设备低温、干净且准确。

低温、干净和准确

本质上说，鉴于全内反射的原理，在水流内“封闭”激光束是可行的。当能量波（在此情况下为激光束）在与密度较低介质的边界（在此情况下为水和空气的边界）处完全反射掉时，能量无法通过，就会发生上述现象。如前面的图表所示，LMJ 利用该原理将激光束返回，然后在水流内壁反射，使其沿着笔直的、狭窄的路径从喷嘴喷向工件。

原理简单明了，实际却不是这样。设备平台具备多种内置子系统，用于处理和安全承载水。至于激光头本身，激光束需要以一定角度靠近边界，然后返回，而不是穿过边界，这是一个挑战。

水流需要高度稳定，产生持续的边界，防止激光束溢出。对此，Synova 的一项国际专利即采用气体包围液体射流，防止产生湍流。为保证喷嘴耐用性，采用蓝宝石或金刚石制造，形状上也专门设计用于保证气体和水之间适当互动，还有其他作用。Coderre 称，优化水箱的形状也经过了多年的实验。

尽管 Synova 对于这些技术和其他关键设计特征守口如瓶，但公司相关文件从三个基本方面说明了这种特殊技术与传统激光加工的区别：

无锥化。LMJ 系统喷嘴直径有多种尺寸，从 $25 \sim 120 \mu\text{m}$ 不等，低压水流小了 15%。利用内部激光束的不断反射带来的能量，水流在实质上成为一个完美的圆柱形叶片，留下笔直的壁。

由于不存在导流，激光束自然成锥形，在再次扩散前，从源头到特定的焦点不断变窄。这样，切割深度和焦点精度一定要严谨控制，避免在切口出现不需要的锥度，加水消除了这种必要。

无热影响区。尽管从原始速度和精度方面讲，激光很难被打败，但仅有某些应用采用熔化材料的工艺。一般来说，激光烧蚀的本质不适合用于任何可能会被微裂纹、变形和其他在切割区域周围的热影响区内发生的条件不利影响的工

件。在 LMJ 系统内，细如毛发的水流包围着激光束，在激光脉冲之间的微妙间隙吸收热量。

无材料沉积。水流不仅移除了切割区域的热量，也带走了烧蚀的废料和其他可能会粘附在工件上的污染物，如熔渣。这样切口更干净，可能就消除了去除毛刺和其他下游操作的必要。

这三个优势使得 LMJ 具备切割复杂特征的功能，几乎包括任何材料，玻璃、木材、纸、纺织品和透明塑胶除外。Coderre 称，这种工艺不仅可以替代干激光切割，还可以替代很多其他工艺。

补充和替代

自 2001 年引入 LCS 生产线后，公司的关注点扩展到了金属和其他硬材料，Synova 记录了多个世界各地的客户厂房采用 LMJ 更换其他工艺的范例。据公司称，多数情况证明，该工艺比微零件铣销速度更快，假设材料足够软，铣销可以作为一种选择，它消除了对毛刺或刀具破损的担心。这种工艺也比电火花加工快得多，电火花加工可能会在某些表面形成微裂缝，这样就有必要定期更换焊条或焊料，并仅可以在传导材料上作业。经证明，它比电铸或冲压更具灵活性，制造的零件尺寸也比后者小。LMJ 适用于很多应用，尤其是医疗、切割刀具和

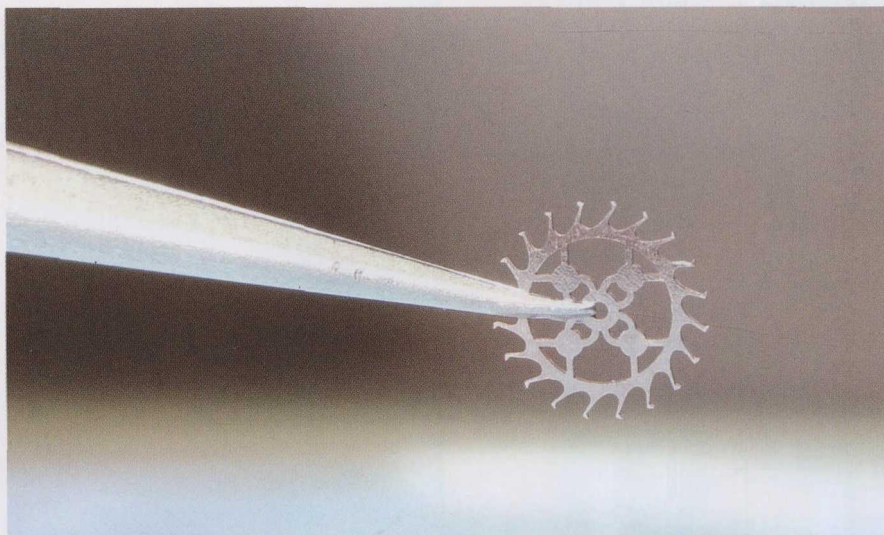


图 5 钟表零件，如铍铜合金轮也纳入了 LMJ 技术

汽车市场。

然而，最近公开的 MCS 系列和与 SST 的协议展示了 Synova 在工业涡轮机市场看到的机会，尤其是有 Makino 这样的合伙人投入专门技术和经验。基于 GE 验证的理念，SST 现在正在推广其所谓的“混合单元”，包含一个 MCS 500 和一个 Makino EDBV 电火花加工钻头，专用于钻孔中空的铸造叶片和叶片部件中的冷却孔。Makino\SST 总监 Mark Logan 称：“将 LMJ 与电火花加工的 EDBV 系列组合使用户可以以最佳输出完成一个叶片钻孔，包括非视线钻孔。”

这些涡轮叶片一般采用陶瓷热障涂层，以承受酷热。问题是，这些涂层不传导热，电火花加工仅作用于传导材料。因此，制造商一般在涂层前进行电火花加工钻孔。复杂的是，冷却孔近来变得越来越复杂。设计人越来越多地使用锥形、方形或其他非圆形开口的扩散孔，并不总是与外部扩散器形状对齐。单独采用电火花加工，制造商加工的特征一般大于规范尺寸，以适应涂层的厚度，有些事后再需要手动移除。一个自动、混合单元，带有在设备间传输数据的机制，简化了流程。LMJ 可以进行初涂渗透和扩散器形状加工，将钻孔工作留给电火花加工钻头。

至少，一般情况都是这样的。若孔足够浅，LMJ 非常适用于加工整个几何结构，而且速度比电火花加工钻头快。然而，在一定深度，电火花加工速度会加快，仅限于水流开始分散的点。EDBV 设备还具备其他优势。例如，其发电机具备动态反馈电路，可以感应管形电极的位置并根据需要增加馈电，以最小化“气体切割”，尤其是在较高的啮合角度。设备也可以在一秒内感应到电极进入内腔或进入 0.04in (1in=25.4mm) 的深度，以便在阻止回击（会破坏空气流）的同时保持速度。电火花加工产品经理 Brian Pfluger 称，Makino 的专业弯曲向导也可以促进非视线涡轮电机孔加工。

可以说 LMJ 和电火花加工钻孔均在这些应用中具备一定地位，制造商应根据作业需要确定哪一个更适用。将二者集成于一个单元使两种工艺平分工作量，质量和生产率会超出单独一种工艺的水平。同时，根据 GE 报告，公司已经利用 LMJ 设备从陶瓷基复合材料切割独立涡轮零件。若 GE 的经验可以作为一种指示，那其他制造商也可以将 LMJ 集成于众所周知的加工工具箱中，作为其他工艺的补充和替代，一定会从中受益。[MM]



图 4 除涡轮叶片孔外，LMJ 应用范围包括从金属板上切割模板