



在切割 4 mm 以下厚度材料时，激光的切割速度可以比水射流或铣刀快 2 ~ 3 倍

激光切割

激光切割 可以解决 CFK 加工上的症结

复合材料是解决当代很多问题的一种途径，此类零件被大量应用，但也常常需要返工，而激光技术可以很好地解答对经济性加工方案的探询。

文 | Marc Kirchhoff

纤维复合材料（FVK）是一种潮流，但它很难被加工，制造技术人员往往把激光用作切割工具，这是因为激光工作起来无磨损、精确且高效。尤其在汽车制造、航空领域和风能行业，碳纤维强化塑料（CFK）应用广泛，它在很大程度上回答了目前对气候保护、电子移动技术、资源效率和可持续发展等

方面的问题，这种大趋势是轻型化结构和 FVK 应用的决定性推动力。

在切割过程中的矛盾材料特性

由于轻型编织材料刚性强，因此设计人员喜欢此类材料，但制造技术人员却皱起了眉头，这是因为在这里，有两种截然不同的材料被聚合成为一种复合

体——纤维和塑料。在加工过程中，这两种材料都会带来困难：纤维会像黄油一样柔软地穿过塑料，而在遇到硬质纤维时则会磨损刀片，这种不同的材料特性使选择正确的加工工艺和刀具变得相当不便，工业领域的制造技术人员目前正在寻找一种与 CFK 打交道的更快、更安全和更具生产效率的方法。

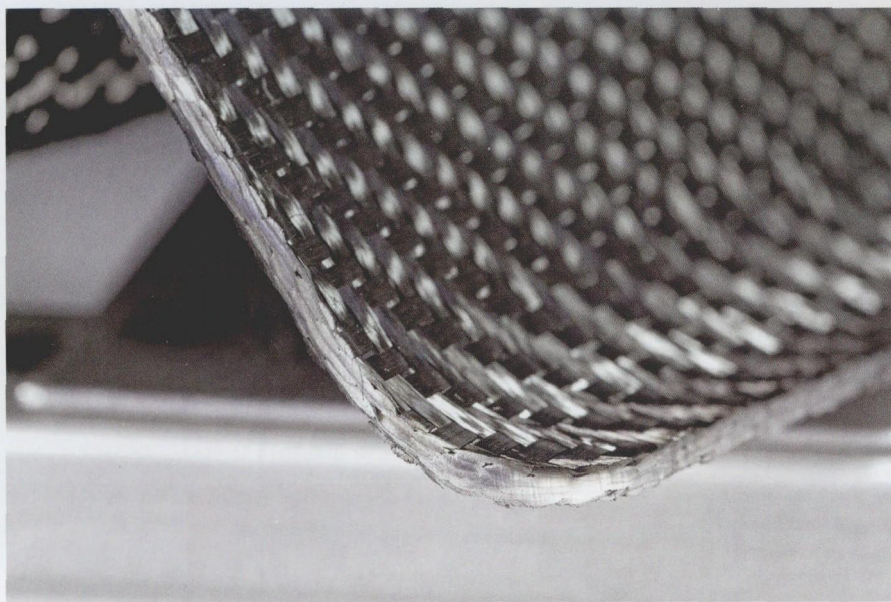


图1 固体激光器的激光可以很好地进入到碳纤维里，在加工 CFK 预成型件时，可以达到完美的切割边缘，无纤维突出，同时也减轻和加快了后接工序的处理进程

在生产链的多个环节上，激光被视为是加工 FVK 材料的一种合适的刀具而得到应用，例如切割坯料和部件、在粘合准备前的表面剥离和金属材料与塑料的接合。

纤维复合材料切割的基本挑战，在于这种材料既不服贴却又敏感，这给机械加工工艺带来麻烦。在采用剥离介质的水射流切割时，纤维切割边缘会因异物作用而出现轻微损伤或变湿，从而造成纤维从基体上脱落。此外，在切割时会有很强的力作用到工件上，

结果是切口的质量不高，纤维脱落出来。这种危险也存在于切削流程之中，其缺点主要在于很高的加工成本，这是因为铣刀或镗刀在遇到硬质纤维时磨损很快，在一个作业班次里必须多次更换刀片，一旦材料厚度和特性发生了变化，往往也就意味着需要换刀。换刀间歇耗费时间，持续使用新刀具也耗费资金，在这种生产情况下，为了维持连续的高质量，则需对刀具进行连续的监测，这将又是一个产生费用的因素。

采用无接触激光刀具 对 CFK 的保护性加工

激光的优势显而易见：激光刀具从不磨损，工作起来也不与工件发生接触。制造商可以达到稳定且高质量和可重复的加工。同时，激光技术人员也做到了即使在连续的加工流程中材料厚度和特性都发生了变化，也可通过一次性的参数设定而均衡这些差异。此外，还有更多原因可以解释为何激光是切割 CFK 材料的最好刀具，这是因为激光光束并不向部件施加任何机械负荷，因此也可以对极薄或极脆的 CFK 部件进行精确加工。对于任何几何外形和轮廓，都可以很好地利用激光光束来进行加工，因为加工光学装置并不与工件相互接触，而是与工件保持 150 mm 以上的距离。因此，激光光束也可以进入到部件的狭窄区域里。

在对碳纤维和 CFK 材料进行激光切割时，会遇到一种气化现象：当这种材料遇到很高的能量时，会立即被气化，但不会产生熔化物渗出，材料的切口光滑，没有纤维突出，切割边缘的热影响区维持在最低限度，从目前了解上看，对部件的机械性能也不会产生任何影响。

在切割预成型材料时，激光的精密性也会发挥出积极的作用。预成型材料是干燥的织状半成品，即尚未硬化而

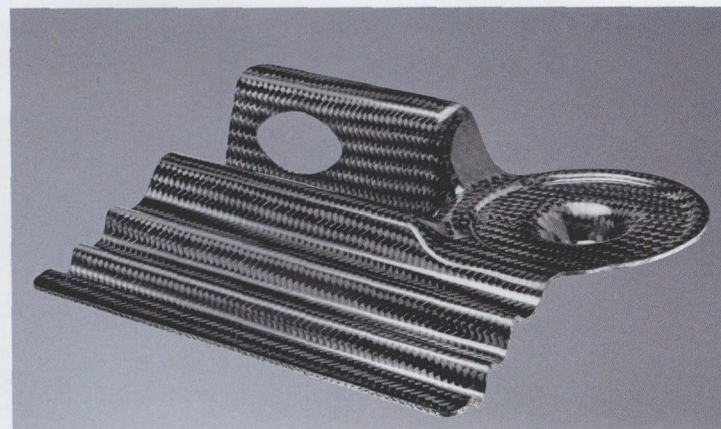


图2 通过采用激光，可以在编织工件上实现光滑和接近最终轮廓的切割，也无需对切割边缘再作返工

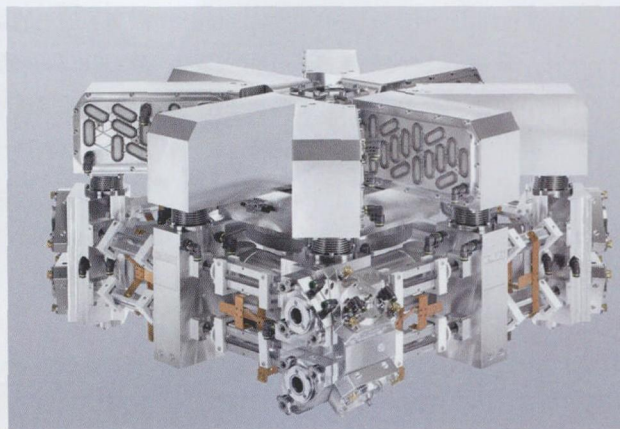


图3 Truflow 系列激光器的特点是有很高的可利用率和良好的经济性，此类激光器在严苛的使用条件下也非常可靠

是柔软的垫子。针对预成型制造，垫子在下料之后被置于刀具内，并在温度作用下实现 3D 预成型，然后在所谓的树脂转化模制过程中对预成型半成品进行诸如树脂母体浸润，然后再进行干燥和硬化，由此便产生拥有复杂 3D 外形的 CFK 部件。

预成型产品在激光切割之后可立即投入使用

激光以一种特定质量和速度对预成型部件进行接近于最终外形轮廓的切割，这种效果是其他切割工艺（例如超声波刀具）所无法达到的。由激光切割的预成型部件具有清晰和固定的自然边缘，而不会产生纤维突出，这有利于后续的加工处理，同时也使返工步骤（如磨削）变成多余，预成型部件在激光切割之后可立即被放入 RTM 模具里接受浸润处理。

尽管有很多种纤维基体材料，但对于激光加工作业来说都不成问题，这是因为有各种不同的激光光源可供使用。固体激光器很适用于切割 CFK 半成品或 CFK 织物产品，激光可很好地进入到纤维里。针对 0.5 mm 以下厚度的 CFK 材料，可采用 1 kW 功率和 20 m/min 以上的加工速度，这要比水射流或铣削加工快 2 ~ 3 倍。

针对 CFK 材料或玻璃纤维强化塑料 (GFK)，可采用 CO₂ 激光器进行加工，因为玻璃纤维和编制材料并不透明，更易于激光加工。当材料厚度达到 2 mm 以上时，采用一款速度为 10 m/min 的 5 kW 激光器即可，它的加工速度也要比常规方法快 2 ~ 3 倍。除了这里所述的 FVK 品种之外，激光器也可加工很多其他 FVK 组合材料，例如天然纤维复合材料或 GF 和 CF 组合材料。

除了切割加工，激光还可对 CFK 材料进行其他方面的加工，最重要的便是剥离加工。对此，激光光束可以对材料的最表层进行精确蒸发，这种方法对于粘合前的准备工作非常有用，因为为了

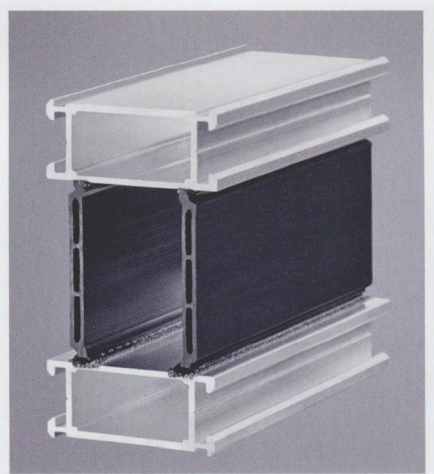


图 4 超短脉冲激光器在金属材料上加工出侧凹结构，由此可以实现塑料与高温金属的彻底熔合

达到良好的黏附性能，对材料最表层的剥离和打毛是一个必需的步骤。在这里，激光只对所需的区域进行加工，即使增加激光强度，也不影响其对几何外形的加工，激光可对粘合前的圆形部件进行预处理，对此激光可以准确地跟踪其几何外形。

超短脉冲激光可快速准备出需要粘合的大型面积

针对大面积的快速加工场合，在粘合作业开始之前可以采用 CO₂ 激光作为光源进行加工作业。如果需要对小区域进行最高质量的加工的话，近几年来工程师们应用了在工业领域已经应用成熟的超短脉冲激光技术。这一技术不会产生毛刺类熔化残余物和影响材料的质量，还极大提高了加工的精度。铆接或粘合是如今粘合 CFK 和金属的常见工艺，对此，激光可以为铆接流程钻出所需的孔，并为粘合准备工作剥离出上部漆层。

此外，这两种工艺也有几何外形方面的局限，人们必须要设置一个接合凸缘，或铆接工具必须能够接触到加工部件。因此，制造技术人员寻找更完美的结合技术方案，并找到了激光技术应用。通过采用超短脉冲激光，可以对金属和纤维强化塑料进行密闭组合。

为了对金属和热塑性塑料进行接合，

超短脉冲激光器对金属接合剂进行配备，并对侧边结构进行处理。处理好的金属部件被置于一个温度下，使得聚合物接合剂融化。根据部件或生产链的特点，融化工作可以由感应器、炉子或其他激光器来承担，然后把加热后的金属与塑料进行对接，后者流入到金属侧凹里并在冷却后与金属部件达到封闭连接，无需其他辅助材料。这种接合强度要高于粘合，无论是在静力方面，还是动力方面均是如此。由此可以实现防液密封性接合，而无需额外的密封，例如针对压力容器或外壳部件。

激光器成为复合材料加工的标准刀具

汽车制造和航空领域设计人员经常会在 FVK 部件里使用金属部件，可以是螺纹套，通过它可以安装上其他部件，例如 CFK 盖板上的合页。在这里，超短脉冲激光器也可以在嵌入物上准备出侧凹结构，然后与硬质塑料（非融化型）进行完美的接合，在部件进行浸润之前，可以把结构化的金属部件植入到预成型织物中去。在硬化部件里，带侧凹的嵌入物即可通过其封闭式接合而固定在复合材料里。

激光器目前成为 CFK 加工的标准刀具，最重要的理由其实也跟其对板材加工的情况相同，即它是一种更快捷、无磨损和无接触的加工。激光器提供了新的加工自由度，这是因为与常规机械加工方法相比，激光更容易对复杂外形实施加工。

在激光加工过程中，可以对能量向工件里的引入进行精确控制，因此可以相对容易地对极薄材料进行精细加工，这种在工业领域相当新的超短脉冲激光器适用于所谓的“冷”加工，即热量导入几乎为零。它的应用领域非常广阔，有了这种优势，激光器在现代材料加工上的优势是显而易见的，对于 CFK 和 GFK 部件加工来说，激光器将逐步成为首选的加工刀具。[11]