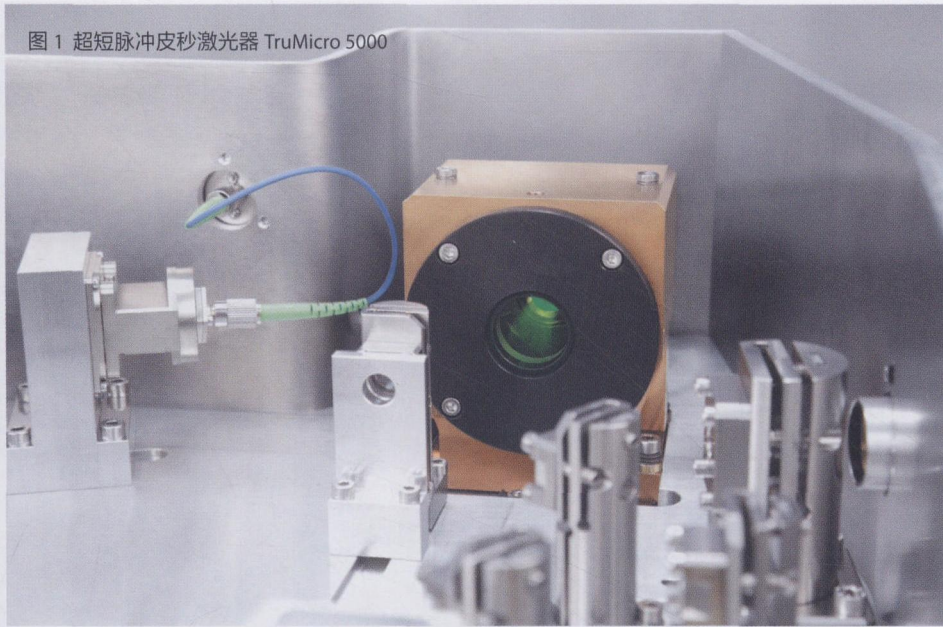


图1 超短脉冲皮秒激光器 TruMicro 5000



激光加工

用激光光束攻克难加工材料

玻璃、蓝宝石和陶瓷是普遍应用于微加工技术和精细加工的材料。然而，它们给传统的制造工艺带来了越来越多的挑战，这种挑战也给强大的超短脉冲激光器赢得了更多机会。

文 | TRUMPF 公司

材料优质的属性对很多产品来说是不可或缺的：玻璃用来制作智能手机的显示屏，显示屏有着钢化的外壳；陶瓷坚硬，化学性质稳定，可用来制作电子零部件和电路板以及电气绝缘体。蓝宝石极其坚硬，耐划伤，适合用于半导体和LED技术。但玻璃、陶瓷和蓝宝石有个共同点就是很难加工。由于它们易碎而且都是非常坚硬的材料，他们挑战着铣、

钻、磨等传统制造工艺的极限。加工这些材料时刀具磨损快，并且需要多个加工环节才能得到足够好的加工质量。

激光光束在坚硬、易碎的材料特别能展现出良好的效果。它们不会磨损且能聚焦到最小直径。扫描振镜能灵活定位光束，几乎可以满足各种形状轮廓的加工需要。超短脉冲激光器（图1）特别适合加工易碎的材料。对于小于

10 ps 的激光脉冲，在热传导到周边的材料上之前，被加工区域的材料已经汽化了。只要激光参数精确调整并与应用相匹配，那么就不需返工。

对可见光以及近红外的光谱范围内的光来说，很多像玻璃这样的宽带隙电介质是透光的。然而，高强度的皮秒脉冲能通过多光子电离产生自由电子。大量连续的电离进一步释放电荷载体，这些电荷载体能够破坏材料中的化学键，最终达到烧蚀材料的目的。

当加工易碎材料时，避免产生小裂缝是经常要遇到的挑战，这些小裂缝会削弱零部件的强度。产生裂缝的一个原因是过度的热量进入了零部件。热量导致材料膨胀，加快了裂缝的生成。适当的加工策略可以防止小裂缝的形成。这其中就包括精准定义加工参数，如脉冲能量、脉冲重叠度、重复频率、焦点直径和激光加工次数。最佳工作点取决于材料、加工形状、加工时间和质量的要求，并通过应验试验加以确认。位于德国南部 Ditzingen 的 Trumpf 公司和德国西部 Aachen 的 Fraunhofer 激光技术研究所开展联合研究，奠定了优化激光加工脆性材料效果的理论基础。

不同标准可用来评估质量：零部件的弯曲强度（用来测量材料的断裂强度，裂缝会使断裂强度降低）、切割边缘粗糙度以及边缘视觉效果。切割边缘的情况可以通过光学显微镜以及借助扫描电子显微镜来测量。

测量零部件弯曲强度的普通方法是四点折弯测试。用两根圆柱对一定加工轮廓的实验样品进

行支撑和定位。另外两个圆柱以既定速度对样件不断加力，直到它被折断。破坏时间点的压力因此得到测量，断裂强度可以通过零部件的形状以兆帕为单位计算得出。

智能手机的兴起突出了显示屏的重要性。智能触摸显示屏已经超越了手机键盘成为最主要的用户界面。典型的智能手机包括四块玻璃平板：两块在显示屏上，容纳薄膜晶体管和液晶材料；一块提供触摸功能；还有一块化学钢化玻璃盖板保护底层免于划伤、冲击损伤和脏物。由于用户想要轻便、纤薄的智能手机，更薄的玻璃面板被使用。典型的玻璃显示面板为 0.3 mm；化学钢化玻璃盖板为 0.7 mm。这使得传统的切割工艺达到了极限。切削轮子已经不适合加工这种玻璃，因为他们都经过特殊的化学强化处理，而铣削加工则需要大量研磨和抛光上的返工作。

红外和绿光波长的超短脉冲激光器正好可用于这种材料的加工。皮秒脉冲能减少裂缝的产生，切割质量远远超过普通的铣削加工。激光光束多次扫过被加工材料来实现切割。速度，边缘质量和边缘的角度可以由加工策略来决定。相对于其他的激光工艺，烧蚀工艺更稳妥。例如，轻微变形的玻璃并不影响加工结果。在测试中，使用绿光皮秒激光器，“Corning Eagle XG”的弯曲强度达 280 MPa。使用红外皮秒激光器的测试结果表明速度增加三倍，边缘的弯曲强度略低。

更强大的皮秒激光器提供了更多的机会来提高加工玻璃的效率（图 2）。由于等离子体屏蔽的原因，钢材的烧蚀效率在 5 J/cm^2

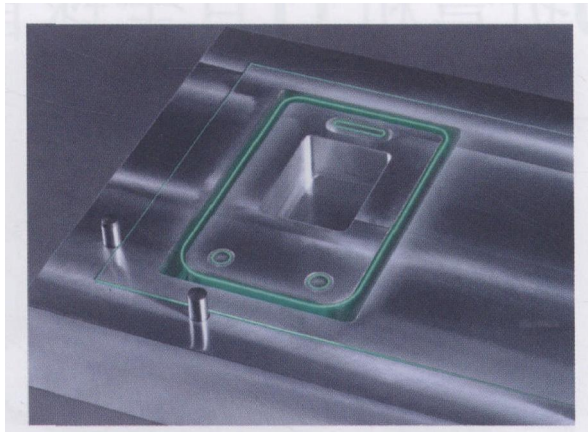


图 2 使用皮秒激光器加工玻璃

的脉冲能量密度时开始降低，而玻璃允许更高的脉冲能量密度，直到加工效率达到最高。因此当加工玻璃时，更高的脉冲能量可以转化为更高的烧蚀效率。

蓝宝石是地球上仅次于钻石的第二坚硬材料，很难使用机械的方法来加工。使用激光器来切割蓝宝石是当今 LED 制造业的标准加工方法，蓝宝石在这里用作基板衬底。由于其抗划伤性和透光性，蓝宝石会用来生产手表和光学仪器的保护镜面。

当加工细小的轮廓时，超短脉冲激光器可以实现精准的加工。例如当切割圆形部件和钻微孔时，柔性的轮廓加工可以通过高速扫描器来实现。超短脉冲除去了加工时的热影响，从而产生极好的切割边缘质量。使用 TruMicro 5070 红外皮秒激光切从蓝宝石上切割下来。最小轮廓尺寸是 0.2 mm。与超短脉冲相结合的智能加工方式可以避免形成缺口及开裂。经验表明 $100 \mu\text{J}$ 左右的脉冲能量是最佳的。例如，将脉冲能量为 $250 \mu\text{J}$ 的激光光束分成两个 $125 \mu\text{J}$ 的独立激光光束同时加工两个零部件就可以获得更高的产量。卓越的加工质量取决于加工方法、除尘和工件夹具之间的适

宜配合。

工程陶瓷经常会用于暴露在高温或要求耐磨损的零部件上。在许多应用中，对材料的电绝缘性要求很高。例如，工程陶瓷用于汽车行业传感器芯片的 PCB 材料，用于油泵的耐磨损贮存材料，或用于食品行业中喷嘴材料。

激光非常适合在薄陶瓷上钻孔，切割或者结构处理。例如，使用红外超短脉冲激光器可以以高达 10 mm/s 的速度切割 0.3 mm 的氧化锆板。超短脉冲可产生平滑，无裂纹的切割边缘。

鉴于超短脉冲激光锐利的聚焦特性，他们非常适用于打孔：能在 0.5 mm 的氧化铝和氮化铝陶瓷上钻出直径为 $60 \mu\text{m}$ 的孔。打孔速度可达 20 个孔 /s。在划片-裂片的工艺中，激光切割到材料厚度的 $1/3$ ，然后用机械方式裂片，速度可达 50 mm/s 。

在达到加工质量要求的前提下，产能是工业制造中的一个决定性的变量。为了将超短脉冲激光的卓越特性应用到高生产率要求的工业制造中，通快按比例增加了皮秒激光器 TruMicro 5000 的输出功率。新型 TruMicro 5070 和 TruMicro 5270 分别是功率 100 W 红光和 60 W 绿光皮秒激光器，脉宽在 10 ps 之内。基于碟片式的激光功率放大技术，可以减少激光在介质中的热透镜效应，获得好的光束质量和更高的激光功率。

由于所有通快超短脉冲激光器都有双级功率调节特点，加工效果在各种情况下都可重复实现。放大器外的外部调节模块会调整脉冲能量和频率，这确保了光束特性不会受激光参数的变化的影响。[1][2]