

使用高功率绿光 DPSS 激光器对氧化铝陶瓷进行切割和划刻

陶瓷经常用于恶劣环境下的印刷电路板 (PCB) 基板和高散热 LED 封装等领域，以及包括植入物和医疗设备在内的生物医学应用。由于具备硬度、化学惰性以及在恶劣高温环境下的整体适应性等特点，它们成为多个行业的绝佳选择。制造陶瓷部件时通常会使用切割、划刻或钻孔等形式的激光加工，因此了解市场上不同激光技术的影响会有所助益。

作为一种常用的工业陶瓷，烧结氧化铝 (Al_2O_3 ，“氧化铝”) 给激光加工带来了多项挑战。首先，它的烧蚀阈值高，需要高通量才能有效去除材料。同时它还非常脆，基材较薄时，很容易因过度加热而破裂。最后，氧化铝成本相对较高，容易产生狭窄的切口和密集的特征，因此脆性可能会成为严重影响产量和生产成本的问题。为了克服这些挑战，一种众所周知的方法是使用二极管泵浦固态 (ns DPSS) 纳秒脉冲激光器，特别是绿光和紫外 (UV) 波长。

与绿光激光器相比，紫外激光器在加工氧化铝时具有多项优势：粘合剂材料中吸收率更高，可提高烧蚀效率，同时光斑尺寸更小，瑞利范围更长，有利于加工更密集、更高纵横比的特征。尽管紫外激光器具备以上优势，绿光激光器还是一种具有竞争力的选择，因为它们的输出功率更高，总体成本（初始成本和拥有成本）更低。

MKS Spectra-Physics® Talon® 纳秒 DPSS 激光平台使用绿光和紫外波长时，在切割和划刻工业陶瓷时均展现出优异的质量和产量（应用说明 36）。为了扩展这组数据，

我们使用 Talon GR70 进行测试。这款绿光纳秒激光器在 275 kHz 的脉冲重复频率 (PRF) 下可提供超过 70 W 的平均功率，并且能在高达 700 kHz 的频率下保持超过 60 W 的功率，同时纳秒脉冲宽度更短。在以上测试中，使用 $f = 100 \text{ mm}$ 的 f -theta 透镜将激光聚焦至直径约 $16 \mu\text{m}$ ($1/e^2$)。通过高速多次加工实现切割和划刻，扫描速度 4 m/s，并且通过改变次数来控制划线深度。

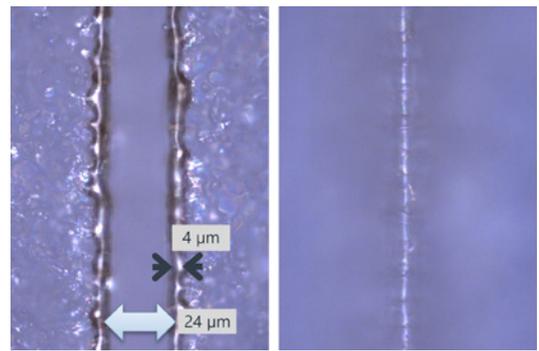


图 1. 划线俯视图，观察位置分别为表面顶部（左）和划线底部（右）。划线宽度为 $24 \mu\text{m}$ ，HAZ（热影响区）为 $4 \mu\text{m}$ 。划刻底部的视图显示出深度均匀的光滑沟槽。

对 $200 \mu\text{m}$ 厚的氧化铝板材料进行加工划线，激光器参数为 65 W，500 kHz，脉冲能量输出 $130 \mu\text{J}$ 。图 1 显示了 $25 \mu\text{m}$ 深、 $24 \mu\text{m}$ 宽的划线结果，加工方式为以 4 m/s 速度进行 10 次重叠扫描，净速度 400 mm/s。划线周围几乎没有碎屑，热影响区 (HAZ) 极小且非常均匀，小于 $5 \mu\text{m}$ 。此外，划线底面光滑、深度均匀，说明所用的扫描速度和 PRF 为最佳组合。

为了对氧化铝板进行全切割，必须按固定的横向间距加工多条相邻的平行划线，以加宽切口。这有助于补偿随着划线变深而降低的划刻效率（每次扫描的深度）。由于划线会随着深度增加而自然趋向于变窄（“锥度”），可以配合这种趋势，减少相邻划线的数量。MKS Spectra-Physics 改进了这种锥度配合技术，通过逐次略去最靠外的一次扫描来提高整体划刻效率，因为在不断加深的沟槽中，靠外的扫描烧蚀的侧壁材料较少。

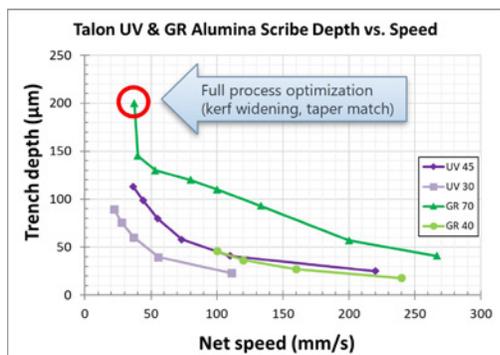


图 2. 四种不同 Talon 激光器的沟槽深度与净加工速度对比：UV30、UV45、GR40 和 GR70。图中显示，Talon GR70 的净速度显著提高，切割 200 µm 厚氧化铝时达到 37.5 mm/s。

图 2 显示了几种不同 DPSS 纳秒激光器的沟槽深度与净速度比较。与功率级别为 30 W 和 45 W 的低功率绿光激光器和 UV Talon 系列激光器相比，Talon GR70 的产量显著提高。红圈标出的是结合采用切口加宽和锥度配合后全面优化的结果，以 37.5 mm/s 的净速度实现了 200 µm 厚氧化铝板的全切割。与 Talon UV45 在相同净速度下取得的结果相比，深度增加一倍。其他数据点代表未采用切口加宽或锥度配合的多次重叠扫描的划线深度。

与低功率绿光和紫外激光器相比，Talon GR70 划线深度的显著改善不能单纯用平均功率参数来解释。例如，在净速度为 100 mm/s 时，GR70 在 65 W 功率下的加工深度几乎是 GR40 和 UV45 激光器的 2.4 倍，而功率则分别为 1.63 倍和 1.44 倍。额外的效率提升可能是由于更高的 PRF（3.3 倍）和更长的脉冲宽度（2 倍）增加了材料发热，这有利于提高产量，前提是要保持材料充分冷却，以避免破裂和低 HAZ 等热应力故障。值得注意的是，划线较深时，GR70 相对于 UV45 激光器的深度优势会有所降低。这可能是由于紫外波长较短导致瑞利范围较长，有利于加工较高纵横比的特征。

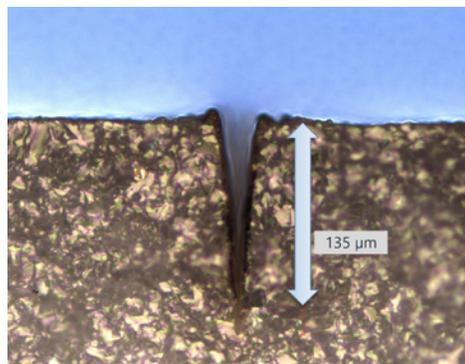


图 3. 深 135 µm 的高纵横比 (5:1) 划线横截面显示划线内部碎屑堆积极少，HAZ 低。未进行任何后处理或清洁。

在陶瓷上加工高纵横比深划线较为困难，部分原因是侧壁有角度导致通量降低，碎屑也难以排出。随着划线深度增加，碎屑容易积聚，减缓并最终阻碍烧蚀。对 Talon GR70 加工出的一条较深划线进行横截面观察，显示出一致的 6° 锥度，整体纵横比为 5:1（图 3）。作为尚未进行后处理的加工划线，其质量非常出色，HAZ 低，残留碎屑极少。

由于具备多种有利的材料特性，氧化铝等工业陶瓷在从医疗器械到电子产品封装的多个应用领域得到广泛使用，但同时也带来了一些加工挑战。氧化铝的烧蚀阈值高，需要高激光通量，并且容易因热应力导致破裂。本文中的结果表明，Talon GR70 是氧化铝加工的绝佳候选工具，因为它能够同时实现高产量和高质量，性能远优于低功率绿光和紫外激光器。划线结果显示沟槽底面光滑、HAZ 极小，并且几乎没有碎屑沉积。通过切口加宽和锥度配合优化，200 μm 厚氧化铝板的净切割速度达到 37.5 mm/s。

产品应用性能要点：

- 超高性价比的 Talon GR70 纳秒激光器在划刻和切割氧化铝时展示出优异的产量和质量。
- Talon GR70 的高 PRF 优化点 (275 kHz 下 70 W, 700 kHz 下输出超过 60 W) 非常适合以更高速度对陶瓷进行显微机械加工。
- Talon GR70 的脉冲对脉冲稳定性高，可在每个脉冲中产生最佳通量，从而实现高质量，同时脉冲速率极高，可提高产量。
- 与低功率绿光和紫外 DPSS 激光器相比，Talon GR70 的产量提升超出预期。
- 总体优势是能够以优异性价比提高对高难度工业陶瓷进行高质量激光加工的生产效率。

产品

Talon® 紫外和绿光激光器

Talon 系列紫外和绿光半导体泵浦固态 (DPSS) 调 Q 激光器, 在性能、可靠性和成本方面实现了完美结合。Talon 基于 Spectra-Physics 的 *It's in the Box* 设计, 将激光器和控制器集成到一个极小的封装中。Talon 可在运行数万小时后保持较高的脉冲对脉冲稳定性和出色的 TEM₀₀ 模式质量。Talon 激光器经过专门设计, 非常适合全天候制造环境中的微加工应

用, 系统正常运行时间对此类环境至关重要。正如本《应用说明》所述, 宽泛的功率和波长范围可以带来极大的优势, 而全面的 Talon 产品组合恰恰能够提供这一优势。Talon 具有优异的性价比: 在不影响功能、性能或可靠性的前提下, 提供业内低拥有成本。

	Talon UV45	Talon UV30	Talon UV20	Talon UV15	Talon UV12	Talon UV6	Talon GR70	Talon GR40	Talon GR20
波长	355 nm	355 nm	355 nm	355 nm	355 nm	355 nm	532 nm	532 nm	532 nm
功率 ²	100 kHz 时 >30 W	50 kHz 时 >15 W	50 kHz 时 >10 W	50 kHz 时 >15 W	50 kHz 时 >12 W	50 kHz 时 >6 W	275 kHz 时 >70 W	50 kHz 时 >20 W	50 kHz 时 >20 W
	150 kHz 时 >45 W 200 kHz 时 >35 W	100 kHz 时 >30 W 200 kHz 时 >23 W	100 kHz 时 >20 W	100 kHz 时 >13 W	100 kHz 时 >10 W	100 kHz 时 >4 W		100 kHz 时 >40 W 200 kHz 时 >36 W	100 kHz 时 >18 W
	300 kHz 时 >23 W	300 kHz 时 >17 W	300 kHz 时 >11 W	300 kHz 时 >3 W	300 kHz 时 >3 W	300 kHz 时 >1 W		300 kHz 时 >30 W	300 kHz 时 >13 W
重复频率	0-500 kHz						0-700 kHz	0-500 kHz	
脉冲宽度	150 kHz 时 <35 ns	100 kHz 时 <25 ns				550 kHz 时 <43 ns		100 kHz 时 <25 ns	
脉冲对脉冲的能量稳定性	150 kHz 时 <2% rms	100 kHz 时 <2% rms, 典型值				50 kHz 时 <2% rms, 典型值		100 kHz 时 <2% rms, 典型值	
	最高 300 kHz 时 <3% rms 300 kHz 以上 时 <5% rms	最高 150 kHz 时 <3% rms 最高 300 kHz 时 <5% rms, 典型值				最高 550 kHz 时 <3% rms		最高 300 kHz 时 <3% rms 300 kHz 以上时 <5% rms	

		Talon HE UV500	Talon HE UV275	Talon HE GR1000
波长		355 nm	355 nm	532 nm
功率 ²	15 kHz	—	—	15 W, 典型值
	20 kHz	>10 W	5.7 W, 典型值	>15 W
	40 kHz	7.7 W, 典型值	>11 W	13 W, 典型值
	100 kHz	4.2 W, 典型值	5.9 W, 典型值	10 W, 典型值
重复频率		0 至 150 kHz		
脉冲宽度		20 kHz 时 25–40 nsec	40 kHz 时 40–60 nsec	20 kHz 时 25–40 nsec
脉冲对脉冲的能量稳定性		<3% rms		