

## 低压水射流激光复合切割 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷的研究

陈春映, 袁根福, 王金华

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对激光切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷存在热裂纹、大量熔渣等问题, 提出了低压水射流激光复合切割陶瓷技术, 并将这种工艺与普通激光切割进行了对比, 结果表明低压水射流激光复合切割陶瓷可以大大减少陶瓷切缝的熔渣、避免热裂纹。主要研究了辅助气体压力、激光脉冲能量和激光重复频率对水射流激光复合切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷质量的影响规律, 发现水射流存在时, 辅助气体压力主要起到吹除切割头处水珠的作用, 激光脉冲能量或激光重复频率增大、烧蚀材料增多, 当烧蚀材料不能及时被射流冲除就形成了熔渣的累积, 影响陶瓷切割质量。

**关键词:** 低压水射流; 激光复合切割; 陶瓷切割; 熔渣

**中图分类号:** TG665    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2097-06

## Low-pressure water jet and laser composite cutting on $\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic

Chen Chunying, Yuan Genfu, Wang Jinhua

(College of Mechanical Engineer, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** As the thermal cracks, a large amount of slag etc. exist with laser cutting on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic, a technology called low-pressure water jet and laser composite cutting on ceramics was introduced. Compared with ordinary laser cutting, the results show that low-pressure water jet and laser cutting is better, which can greatly reduce the slag and avoid thermal cracks. The influence rules of low-pressure water jet and laser composite cutting on ceramics the different auxiliary gas pressure, laser pulse energy and repeated frequency on were mainly discussed, and found out that under the water jet, the auxiliary gas pressure mainly played the role in blowing the drops away from the cutting head. When the laser pulse energy or the repeated frequency increased, the ablation of the material increased, but if the material cannot take away by the water jet, that would be accumulated to large amount of slag which will impact the quality of ceramic cutting.

**Key words:** low-pressure water jet; laser composite cutting; ceramic cutting; slag

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51175229)

作者简介: 陈春映(1989-), 女, 硕士生, 主要从事激光精密加工方面的研究。Email: chenchunying89@126.com

导师简介: 袁根福(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光加工理论及应用方面的研究。Email: forygf@263.net

## 0 引言

$\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷作为光电产业的高密度材料,因其具有良好的热稳定性使其成为了高能装备的理想基体材料<sup>[1]</sup>。利用传统的加工方法加工  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷是相当困难的,这大多数是由于其易脆性和高硬度的特点,而利用激光烧蚀  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的效果却很明显<sup>[2-3]</sup>,激光烧蚀加工是非接触加工,避免了机加工由于挤压应力而引起的接触损伤以及刀具的磨损;且激光的能量比较集中,切缝窄,材料受热立即发生熔化或蒸发,加工速度远比传统机加工快。但是,由于陶瓷材料受热极易形成热裂纹,且大量熔渣残留在切割表面,影响了切割质量。针对这一问题,又引入了激光复合加工,国外以激光化学复合加工技术(LCP)和水射流诱导激光加工技术(LMJ)的应用尤为典型,国内逐渐也有不少关于激光复合加工的研究,包括 LCP、LMJ 以及水下激光加工技术等,研究表明,激光复合加工技术确实可以提高切割的表面质量、减少微裂纹、提高加工效率的效果<sup>[4-8]</sup>。因此,利用激光复合加工技术加工  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷将是一个必然的趋势。

文中引入了低压水射流激光复合切割,将其与普通激光切割进行对比,对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷切割的效果进行分析。低压水射流一方面可以及时地冷却受热材料,避免产生热裂纹;另一方面冲蚀了存在于切割表面大量的熔渣。同时低压水射流的压力比较低,和高压水射流相比,一方面避免了高压水射流带来的切割损伤;另一方面,不需要高精装置,大大减少装置的成本,有利于实现产业化。

## 1 实验装置与方法

实验材料选用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 96% 的陶瓷材料,厚度为 1 mm。用 Nd:YAG 固体激光器进行切割加工,加工之前对陶瓷材料进行清理,初步鉴定现实样品的表面粗糙度 0.2~0.25  $\mu\text{m}$  之间。

激光器为脉冲激光器,其最大平均功率为 500 W,波长为 10.6  $\mu\text{m}$ ,激光脉冲范围为 0.5~20 ms,激光脉冲能量可以通过电流调节,其范围为 0~400 A,激光频率调节范围为 0~100 Hz,辅助气体与激光束同轴,

其调节范围为 0~0.6 MPa。水射流系统通过自制的装置获得,水射流的压力来源于泵的压力提供,其中泵的压力为 0~30 MPa 可调,由于水在水管中的各种摩擦阻力作用,到喷嘴处的压力仅为几个 MPa,喷枪通过喷嘴最后将水喷射到陶瓷面上,喷嘴直径为 0.6 mm。通过调节泵的压力,可以将水的流速调节在一定范围内,实验中经过计算单位时间内水的流量测得水流速率为 80 mm/s。水射流的方向、水射流到所加工区域的入射距离都可以通过调整喷枪的位置角度实现,实验中水射流与陶瓷片的夹角成  $60^\circ$ ,且稍滞后于激光束照射点,约为 1~2 mm。陶瓷装夹在工作台上,工作台的移动由数控系统控制,由于工作台与激光束的相对运动产生切割,工作台的移动依赖于所要加工的图形,所要加工图形由绘制的 CAD 图形或采集的点获得。实验后的样本采用显微镜进行拍摄。

低压水射流激光复合切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的示意图如图 1 所示,实验中用纯水作为射流载体。

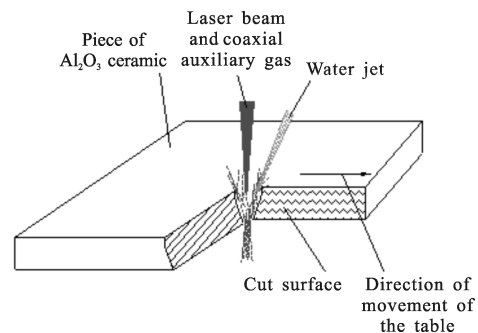


图 1 低压水射流激光复合切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷示意图

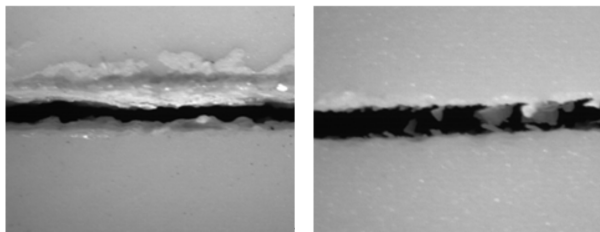
Fig.1 Schematic diagram of the low-pressure water jet and laser cutting on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic

低压水射流激光复合切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片的切割原理是,在激光光能的照射下,陶瓷片照射区域发生熔化,甚至蒸发,同时在水射流和同轴辅助气体的作用下,熔体被冲离切割表面。蒸发的陶瓷材料向上喷射出,而熔化的材料经过水、辅助气体以及自身重力的作用会向下排出。工作台沿着切割方向不断移动,陶瓷与激光束之间发生相对运动,在陶瓷片上回留下一道很窄的切缝,从而将陶瓷片切开,图中可以看到切割好的切缝截面。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 水射流激光复合切割与普通激光切割表面质量的对比

实验中将水射流激光复合切割和普通激光切割质量进行对比,图2为激光脉冲能量为220 A,脉宽为0.8 ms,频率为40 Hz,切割速度为0.8 mm/s时切割陶瓷的上表面形貌对比。在图中对比可以看出,在相同的加工参数下,加水的切割表面比没有加水的情况下切割质量好得多,这是由于水射流的在切割过程中冲走了大量的熔渣,并且水射流使得熔化或蒸发的材料及时得到冷却,不至于使其再次粘附在基体材料上,如图2(b)所示。而无水射流情况下虽然具有明显的切割痕迹,但是切缝处布满了厚厚的熔渣,如图2(a)所示。



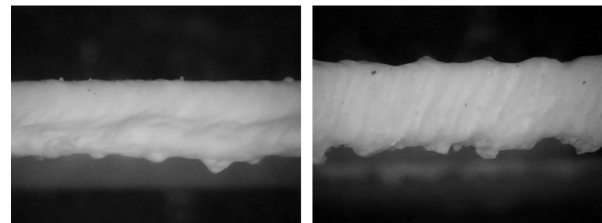
(a) 普通激光切割 (b) 水射流激光复合切割  
(a) Ordinary laser cutting (b) Water jet and laser composite cutting

图2 普通激光切割与水射流激光复合切割陶瓷上表面切割质量形貌

Fig.2 Morphologies of the cutting quality by ordinary laser cutting and water jet and laser composite cutting on ceramic surface

图3为激光脉冲能量为220 A,脉宽为1.0 ms,频率为45 Hz,切割速度为1 mm/s情况下,有无水射流切割陶瓷切缝截面的质量形貌对比。如图3(a)所示,截面凸起的部分即为熔渣堆积的部位,一部分熔渣堆积在切缝的下表面边缘,而如图3(b)所示,熔渣基本上分布在陶瓷基片的上下表面,且数量远远小于无水射流的情况。这是因为无水情况下材料受热熔化或蒸发,蒸发的材料直接变成气化微粒离开材料表面,而熔化的材料主要靠辅助气体吹离切割表面,辅助气体的方向向下,熔渣就主要集中在下表面。在水射流作用下,熔渣能够顺利地离开陶瓷表面,基本上看不出熔渣的残留。

对比两种切割的形貌发现,无论是切缝的上表面还是切缝的截面,水射流激光复合切割陶瓷的切缝(如图2(b)和图3(b))质量效果比普通激光切割的切缝(如图2(a)和图3(a))质量好得多,水射流冲蚀了大量的熔渣,大大地提高了切割质量。同时在实验中发现,在普通切割陶瓷时,经常会发生材料热裂,而水射流激光复合切割却不存在这种现象。这是因为水射流的引入可以及时冷却受热的材料,降低了热应力集中,避免了热裂纹的产生。



(a) 普通激光切割 (b) 水射流激光复合切割  
(a) Ordinary laser cutting (b) Water jet and laser composite cutting

图3 普通激光切割与水射流激光复合切割陶瓷切割切缝截面质量形貌

Fig.3 Kerfs-section morphologies of the cutting quality by ordinary laser cutting and water jet and laser composite cutting on ceramic

### 2.2 辅助气体压力对水射流激光复合切割切缝质量的影响

图4为水射流激光复合切割与普通激光切割在相同激光参数,不同的辅助气体压力情况下的切割切缝形貌的对比。

在没有水射流的情况下,切缝处堵满了熔渣,切缝在辅助气体压力不断增加的情况下会变得清晰,但是大量的熔渣还是无法去除,如图4(a2)、(b2)、(c2)所示。然而,在有水射流激光复合切割条件下,熔渣的数量明显减少,当辅助气体压力较小时,切缝断断续续,还存在着大量的熔渣,如图4(a1)所示;当辅助气体压力逐渐变大时,切缝能够清晰可见,如图4(c1)所示。这主要是由于,当辅助气体压力较小时,水射流时打到切割头光斑出口处,这时就相当于在光斑出口位置安装了一个凸透镜,影响了焦点的位置,减少了达到基体表面的能量。此时又由于气体的不断通入,当切割头装置内气体压力增大到一定程度时,水珠将被气体冲落,这时又能够进行正常切割,如此循环就形

成断断续续的切割现象。当辅助气体压力为 0.25 MPa 时,如图 4(b1)所示,基本上能够进行连续切割,但是与辅助气体压力为 0.4 MPa 相比,如图 4(c1)所示,辅助气体压力为 0.4 MPa 时的切割质量更好。

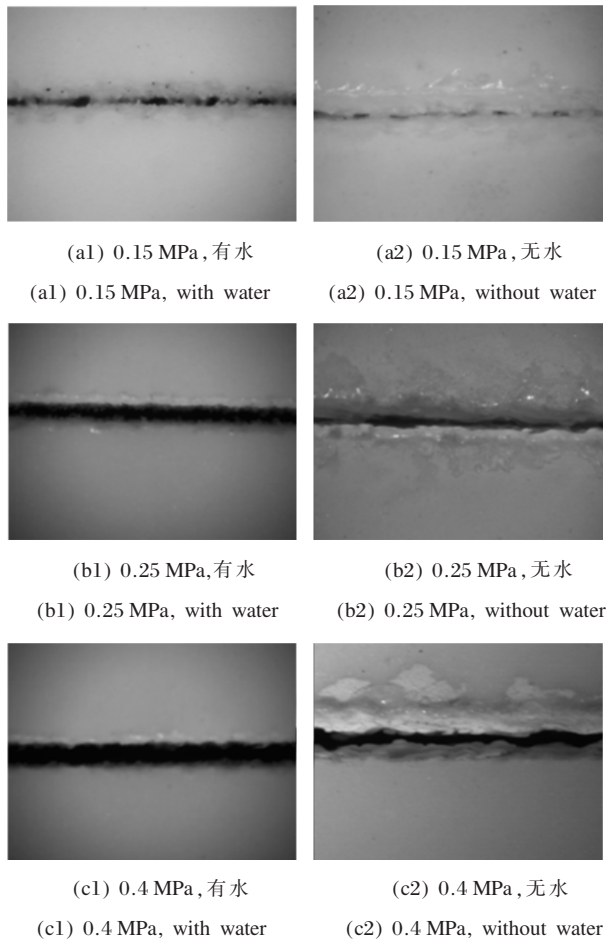


图 4 低压水射流激光复合切割与普通激光切割在不同辅助气体压力情况下的陶瓷切缝形貌对比

Fig.4 Slit morphologies of ceramics compared low-pressure water jet and laser composite cutting with ordinary laser cutting in the case of different auxiliary pressure

图 5 所示为水射流激光复合切割与普通激光切割条件下,切缝宽度随辅助气体压力变化的曲线。从曲线中可以看出,当辅助气体压力大于 0.35 MPa,水射流激光复合切割切缝宽度比普通激光切割切缝宽度小,这主要是因为水射流的冷却作用减少了热影响区,切缝宽度也减小;而辅助气体的压力越大切割宽度越大是因为辅助气体的吹去了切割面上的较厚的水膜,水膜减少了激光的入射能量,而水膜变薄就会有更多的激光能量照射到切割表面上,这也解释了辅助气体压力为 0.4 MPa 时的切割质量比辅助气

体压力为 0.25 MPa 时切割质量好的原因。在实验过程中,通常把辅助气体的压力控制在一定范围内,既要保证水射流不堵住切割头,同时还要满足最佳的切割质量效果。

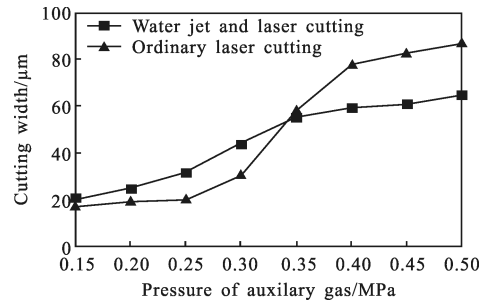


图 5 水射流激光复合切割与普通激光切割在不同辅助气体压力下切缝宽度的变化曲线

Fig.5 Curves of the slit-width with water jet and laser composite cutting and ordinary laser cutting in the case of different auxiliary pressure

在低压水射流激光复合切割陶瓷的过程中,辅助气体的主要作用是吹除切割头附近的水珠和切割表面上的水膜,熔渣的去除大部分还是水射流冲刷的结果。

### 2.3 激光脉冲能量和重复频率对切缝熔渣的影响

#### 2.3.1 激光脉冲能量对切缝熔渣的影响

激光脉冲能量是通过电流的大小调节的,图 6 所示为脉宽为 0.8ms,频率为 45Hz,切割速度为 0.8 mm/s,辅助气体压力为 0.4 MPa,电流不同情况下的切缝形貌。如图 6(a)、(d)所示,切缝中存在着大量的熔渣,图 6(b)、(c)的切缝熔渣大大减少,其中电流为 250 A 时的切割效果更好。

当激光脉冲能量比较小时,受激光照射的区域发生熔化,但是激光脉冲能量较小,不能使深层材料都发生熔化,因此切割不完全,切缝中存在大量未熔化的材料。随着电流增大,激光脉冲能量增大,受激光照射的区域吸收的能量也逐渐增大,热影响区域也增大,因此切缝变宽,基本上能够实现完全切割,如图 6(b)所示。当电流继续增大时,激光脉冲能量增大,陶瓷材料吸收的热量继续增大,陶瓷材料的烧蚀状态也发生变化,由熔融占主导作用状态转化成蒸发占主导作用,材料在瞬间受热蒸发离开烧蚀表面,然而蒸发去除的方向向上,与水射流和辅助气体的方向相反,蒸发的材料受到阻力和冷却作用将残留

在切缝中,加之更多的材料受热熔化或蒸发,无法及时排除,因此切割效果不如熔融占主体形式下的切割质量效果好。

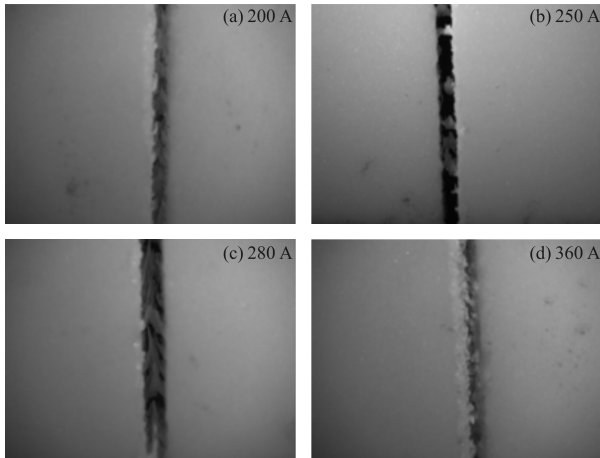


图 6 激光脉冲能量不同情况下的切缝形貌

Fig.6 Slit morphologies under the different conditions of laser pulse energy

### 2.3.2 激光重复频率对切缝熔渣的影响

图 7 是脉宽为 0.8 ms, 电流为 250 A, 切割速度为 0.8 mm/s, 辅助气体压力为 0.4 MPa, 激光重复频率不同情况下的切缝形貌。

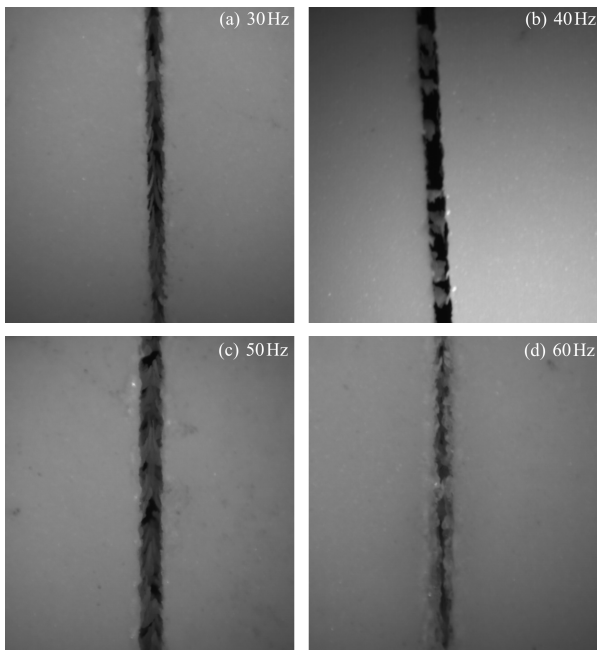


图 7 激光重复频率不同情况下的切缝形貌

Fig.7 Slit morphologies under different conditions of laser repeated frequency

从图 7 可以看出, 激光重复频率较小或较大的

情况下切缝中存在着大量熔渣,如图 7(a)、(c)、(d)所示,而图 7(b)熔渣却明显减少。由图 7(a)可以看出,激光重复频率为 30 Hz 时,切缝的宽度窄,说明此时激光的热影响区比较小,材料还没有完全受热熔化或蒸发,只有上层材料受热之后被去除。频率为 40 Hz 时,切缝宽度有所增加,去除的材料比频率为 30 Hz (如图 7(a))多。当激光重复频率继续增大时,切缝宽度继续变宽,如图 7(c)、(d)所示,此时切缝受熔渣堵塞也愈明显。频率增大说明单位时间内激光脉冲作用在材料上的重复次数增大,单位时间内激光到达陶瓷材料表面的能量变大,激光所照射区域材料吸收的热量也增大,切割热影响区增大,切缝变宽。同时,材料逐渐从熔融占主导形式转化成蒸发占主导的形式,蒸发的方向向上,与水射流和辅助气体的方向相反,抵消了一部分的冲量,不利于熔渣的排除;上层的材料受热蒸发能够及时向上排出,较深的材料未及及时排出就滞留在切缝中了,因此看到蒸发占主体作用下切缝中大量的熔渣。

## 3 结论

通过对低压水射流激光复合切割与普通激光切割  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的对比研究,发现水射流的引入大大减少了熔渣,提高了切割表面质量。这是因为水射流的动能冲蚀了大量的熔渣,避免熔渣堆积在切缝周围,使得切割质量提高。同时水射流的冷却作用又可以减少热裂纹,防止切割过程中的材料破裂。

实验结果显示辅助气体的压力选择 0.4 MPa 为最佳。气体压力过小会因水珠而堵塞在切割头,形成凸透镜,影响光的照射能量;辅助气体压力增大可以冲掉切割表面的水膜,使得更多的激光能量达到切割区域。

激光脉冲能量不宜过大或过小,太小了会形成切割不完全,太大了会堆积较多的熔渣;激光重复频率也不宜太小或太大,较小会出现切割不连续,太大了会被大量的熔渣堵住切缝。尽管材料吸收热量的增大有利于材料受热蒸发而去除,但是因蒸发而去除的材料大多发生在上层较少的材料上,蒸发的方向向上,与水射流和辅助气体的方向相反,不利于蒸发的进行,水射流只有与材料发生熔融状态时才能发挥最佳的切割效果。所以如果能改善材料蒸发时水射流和辅助气体方向不一致的问题,将会有助于材料在蒸发状态下的切割。

## 参考文献:

- [1] Owain Williams, Martin Williams, Dr Changqing Liu, et al. Laser micromachining of polycrystalline alumina and aluminium nitride to enable compact optoelectronic interconnects [C]//Electronics Packaging Technology Conference, 2009, 11: 920-925.
- [2] Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Laser forming research on brittle inorganic materials and the application status [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, 39(6): 47-51. (in Chinese)  
袁根福, 曾晓雁. 硬脆性无机材料激光成形加工研究与应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(6): 47-51.
- [3] Zhang Shan, Kang Shaoying. The study on laser machining of structural ceramics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, A22(10): 797-800. (in Chinese)  
张珊, 康少英. 激光加工结构陶瓷的研究 [J]. 中国激光, 1995, A22(10): 797-800.
- [4] Arvi Krusing. Handbook of Liquids-assisted Laser Processing [M]. Elsevier, 2008, 1-3.
- [5] Bauerle D. Laser-chemical processing: recent developments [J]. *Applied Surface Science*, 1996, 106: 1-10.
- [6] Kray D, Fell A, Hopman S, et al. Laser chemical processing (LCP)-a versatile tool for micro structuring applications [J]. *Applied Physics A*, 2008, 93: 99-103.
- [7] Cai Liming, Lei Yuyong, Bing Longjian, et al. Application of water-jet-guided laser technology in micro-machining [J]. *Micro of Abrication Technology*, 2008(5): 60-64. (in Chinese)  
蔡黎明, 雷玉勇, 邴龙健, 等. 水射流导引激光在微细加工中的应用 [J]. 微细加工技术, 2008(5): 60-64.
- [8] Sybille Hopman, Andreas Fell, Kuno Mayer, et al. Comparison of laser chemical processing and laser micro jet for structuring and cutting silicon substrates [J]. *Applied Physics A*, 2009, 95: 857-866.