DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.003

新型复合式激光水射流切割氧化铝陶瓷实验方法研究

马林旭[1],王丽娜[1],郭　健[2],赵静楠[2,3],黄蒙恩[2]

(1. 天津中德应用技术大学 机械工程学院,天津 300350; 2. 天津科技大学 机械工程学院,天津 300222; 3. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室,天津 300222)

摘　要:针对陶瓷材料传统加工方式,如激光空冷加工、磨料水射流技术以及金刚石切割等具有加工精度较差、材料去除率低以及刀具磨损严重等问题,研究了一种新型激光水射流切割方式,全新的复合式激光与水射流共同作用下,利用激光加热和水射流快速冷却所产生的大量热应力对硬脆氧化铝陶瓷材料产生热断裂,切开陶瓷。结果表明,激光水射流切割硬脆氧化铝材料相比于激光空气冷却切割和其他传统切割方式具有材料切口小,材料去除量较小以及切割后材料表面精度高。

关键词:激光水射流;氧化铝;陶瓷材料切割;激光头

中图分类号:TB321; TH161　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)09-0895-04

Study on Cutting Alumina Ceramics by Novel Hybrid Laser and Water–jet

MA Linxu[1], WANG Lina[1], GUO Jian[2], ZHAO Jingnan[2,3], HUANG Mengen[3]

(1. Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China; 2. School Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China)

Abstract: For ceramic materials traditional processing methods, such as laser in air cooling, abrasive water-jet technology and diamond cutting and low machining accuracy was poorer, the materials removal rate and tool wear serious defects, such as studied a new type of laser water-jet cutting process, a new type laser and water-jet under the joint action, using laser heating and a large number of thermal stress produced by rapidly cooling water-jet in hard brittle alumina ceramic materials to produce thermal fracture for cutting ceramics. The results show that compared with laser air cooling cutting and other traditional cutting methods, the laser water-jet cutting of hard brittle alumina material has the advantages of small incision, small materials removal and high surface precision.

Key words: Laser water-jet; Alumina; ceramic cutting; Laser head

当前，磨料水射流技术已被用于切割陶瓷材料[1-3]。然而,高压水(>250 MPa)的使用,加上水射流中的磨料，需要特殊的压力增强器和蓝宝石喷嘴,这些都需要使用昂贵的材料。此外,磨料水射流切割陶瓷零件时,切缝宽度较大,表面粗糙度较差。最近,一些学者[1]提出了控制喷嘴振荡来提高切割质量。然而,此方法所得到的改善效果甚微,切割质量仍低于常规金刚石加工。

在过去的几十年里，激光技术也成功地应用于切割硬质陶瓷材料[4-7]。材料的切割主要通过以下4种不同的方式来完成:材料的汽化、材料的融化、划线或热断裂[8]。前两个模式是能源密集型加工过程,需要激光的功率密度超过1 010 W/m^2。此外,高温加工过程可能导致材料产生残余应力，从而影响加工后产品的强度。

Lumley[5]是提出激光切割陶瓷热断裂模式的早期研究者之一。他提出由于陶瓷材料吸收激光能量而产生的温度梯度会导致足够高的热应力，进而使材料发生断裂。本文设计的实验目的是设计一种激光/水射流(LWJ)复合切割头,该切割头利用热断裂

收稿日期:2019-05-15

基金项目:天津市自然科学基金项目(名称:基于激光热处理的数控机床氮化硼刀具材料表面硬度提高研究;编号:17JCYBJC42400);天津市教委基金科研项目(名称:基于激光水射热处理方法的氮化硼刀具材料维氏硬度提高研究;编号:2017KJ020)

作者简介:马林旭(1980-),河北高阳人,副教授,工学硕士.研究方向为机械设计与制造.电话:13502012045,
E-mail:malinxu@tsguas.edu.cn

通讯作者:赵静楠(1984-),内蒙古通辽人,讲师.研究方向:先进制造技术.电话:13920614682,
E-mail:jingnanzhao@tust.edu.cn

方式对陶瓷材料进行切割。图 1 所示是激光水射流复合加工的示意图。图中包括使用低功率激光器在工件表面上的小区域的精确加热，材料表面温度快速上升至 1 000 ℃左右。随后，低压水射流对该区域进行快速淬火，导致材料表面的应力状态从压缩转变为张力。快速冷却而不是快速加热将造成较大的热冲击，因为诱导表面应力是拉伸性质在快速冷却。由于这一点，在材料的顶部表面形成了微裂纹[9]。由于热应力的存在，可以使得材料沿着激光加工产生的微裂纹沿着其厚度方向扩展，进而切开现有材料。由于材料的切割是通过热应力沿工件长度的裂纹扩展来实现，由此产生的切削表面没有热损伤和残余应力。另外，激光水射流混合工艺避免了材料的气化，因此整个加工过程更节能和环保。

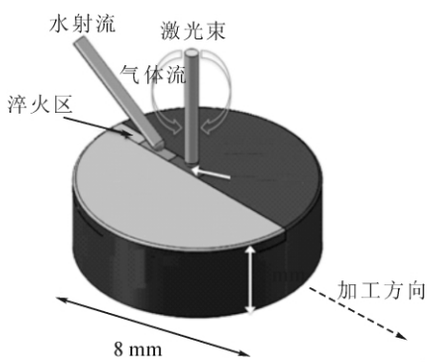


图 1 激光水射流热断裂工艺原理图
Fig.1 Schematic diagram of laser water-jet thermal fracture process

综上所述，激光水射流热断裂工艺的优点有：①最大温度明显低于熔点；②切割表面没有大的可见缺陷，这在电子工业中具有重要的意义；③该方法由于材料去除量较少，所以材料在切割过程中的损失较少。因此，激光水射流复合热压裂技术可以满足氧化铝成型过程中进料率高、能量降低和环境改善的要求。

1 激光水射加工头的设计

设计了一个独特的复合式激光水射流切割头，用于与现有的 1.5 kW（最大功率）连续 CO_2 激光器和 X-Y 数控工作台进行对接。切割头有两个功能：①允许激光束聚焦在工件上，并在激光加热区域内形成辅助气体罩和直接水射流；②在激光水射流切割过程中水射流始终以固定距离跟随在激光束后。

切割头设计的第一步是估算淬火陶瓷材料受热表面所需的水流量。在激光加工过程中，首先通过传热计算以确定将工件表面从加热温度冷却到室温所需的水射流的流速[4,5]。实验所用的喷水孔距离激光出口距离在 0.125 mm 至 0.375 mm 之间。冷却陶瓷工件表面所需的最大压差仅为 1.69 MPa。虽然看来相对较低的压力，但足以产生所需的水流量。为了达到这个目的，本文选择了一种能产生 0 至 21 MPa 压力范围的水泵。

切割头的主要功能要求，是将激光束和水射流直接对准工件表面。激光束和随后的水射流都要接触到相同的位置去引起工件表面热应力断裂。因此，激光切割头部设计应确保水射流遵循与激光束相同的路径，以允许加工直线和曲线轮廓。此外，系统的约束条件包括切割头与现有激光器的兼容性，并且要求激光切割头设计应紧凑，与现有硬件兼容，确保激光束和水射流之间在激光头中没有相互作用。

设计完成后的照片如图 2 所示。激光头的底部是由黄铜制成，其照片表明激光和水通道显示在图 2 中内部。如图所示，旋转壳体的圆周上加工有凹槽，以帮助激光切割头通过皮带和滑轮系统与 CNC 定位台的第三轴线对接。数值的对切割头旋转的控制将促进沿弯曲型材的材料分离。

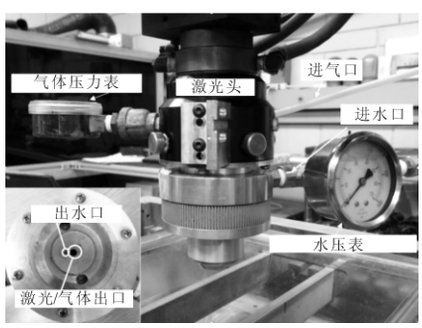


图 2 激光水射流切割头
Fig.2 Laser water-jet cutting head

2 激光水射切割氧化铝实验

针对设计并制造完成后的激光水射切割系统，进行了相关切割实验研究。由于氧化铝在微电子电路和专用结构部件上如飞机、航天器和汽车的部件都有大量的应用，此外，氧化铝也是一种优良的激光加工基片材料，因此本文选择氧化铝作为带切割材料用于此项测试。

实验选用厚度为 1 mm 的 96%氧化铝试样进行切削试验。首先，将尺寸为 25 mm×25 mm 的氧化铝试样进行边缘的研磨以便实验中的装夹。然后，采用不同切割方法对氧化铝试样沿中线进行切割实验。

实验采用激光空气冷却切割和激光水射切割两种方式来进行。首先进行了激光空气冷却切割实验，以找出导致热断裂的合适的参数范围。研究了功率、速度、光斑尺寸和气压等参数的影响。设定激光功率

从 100~200 W,切割速度范围为 8~76 mm/s,进行了参数化研究。光斑直径从其聚焦光斑的 0.2 mm~离焦光斑 1 mm。此外,还设定了两个极限空气压力(60 kPa 和 207 kPa(30 psi))的影响。采用空气环绕激光的目的,一个是保护激光不受融化材料反射到透镜的影响,另一个原因是空气可作为冷却剂对切割材料起到快速冷却的作用。

在激光水射切割实验中。采用激光功率为100～200 W,切割速度为 8～76 mm/s 的条件下,进行了单点激光切割实验。水压设定从 414 kPa 到 6.30 MPa。

每一次切割试验后,对试样表面进行仔细检查,然后将其分为 3 大类:划线、材料分离和无控制断裂,其中材料分离认定为完整的切割完成。每一次切割完成后,均对其进行表面测量,以评价切割质量。

3　实验结果与讨论

用线能量法展示了两种切削方式的实验观测结果,即加工参数(功率(*P*)/ 速度比(*V*)比)的组合。线能量明显对 3 种不同的切削方式获得的不同断裂特征进行了区分。作为代表性实例,在图 3 中绘出了在不同功率和速度下用于空气冷却的样品断裂特征。所收集的数据是在激光光斑大小为 0.4 mm 条件下的激光空气冷却切割。可以推断,从激光切痕到切断的过渡变化是以固定 *P*/*V* 值来区分开的。

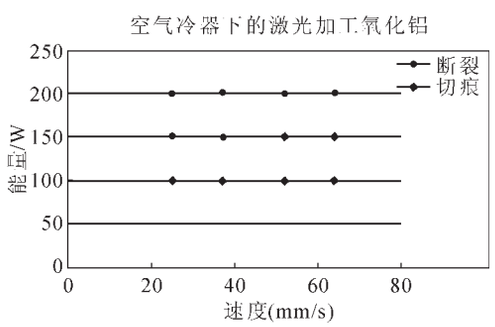


图 3 激光空气冷却断裂方式的线能量法

Fig.3 Characteristics of Cutting as a Function of Line Energy for LWJ

因此,功率(*P*)与速度(*V*)之比可以认为是单一的裂缝控制参数而不是两个独立的参数。激光水射切割方式的激光切痕到切断的过渡也有类似的激光与速度之比。

3.1　采用空气冷却的热断裂方式

光斑大小的影响:

随着光斑尺寸的增大,从划线到可控断裂的转变发生在较低的线能值上。参考文献[6]报告了具有较大光斑尺寸的散焦光束的受控裂纹的相似观察结果。当使用光斑尺寸为 0.2 mm 的聚焦光束时,工件更容易受到聚焦光束的损伤,导致工件不受控制的断裂。

气压影响:

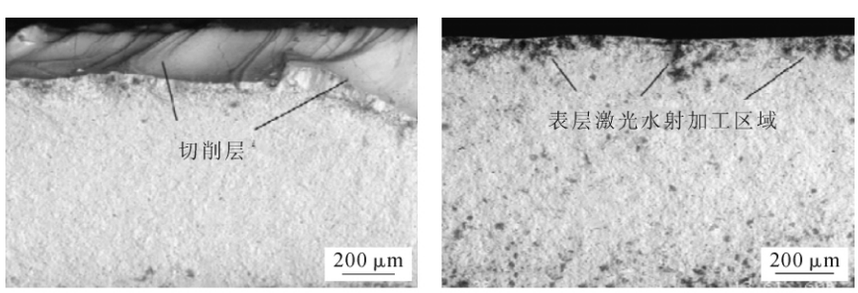
采用两种不同的气压进行风冷。研究发现,气压从 69 kPa 增加到 207 kPa 时,对断裂条件的影响最小。

3.2　不同切割方式的切削材料表面精度比较

(1)风冷热断口　对于如图 4(a)所示的空气冷却引起的热断裂,切割面的表面光滑,但近顶部约 200 μm 处有较薄的下切区。上表面附近的沟槽是由激光加热过程中的材料汽化引起的,可称为下切区。由图中可以观察到在断口处存在少量的微裂纹。由于切削层较厚且存在微裂纹,所以切割后的材料在近切割区域的试样强度会有一定程度的下降。

(2)LWJ 热断裂　对于图 4(b)中所示的激光水射引起的热断裂,切割表面的切削层非常小,而且断裂面并没有切削毛刺等存在。此外,切削截面没有重熔层和微裂纹。因此,切削过程不会影响试样的强度[10]。图 4(b)中的暗区是由于在水中发现的矿物质污染切割表面造成的。对被污染和未受污染的地区进行化学分析,以确定切割过程中使用的水质的影响。污染区域显示钾、钙、钠、氯是在本次实验中在水射流中使用的自来水中发现的矿物的基本成分。使用纯净水可以缓解敏感应用的污染问题。

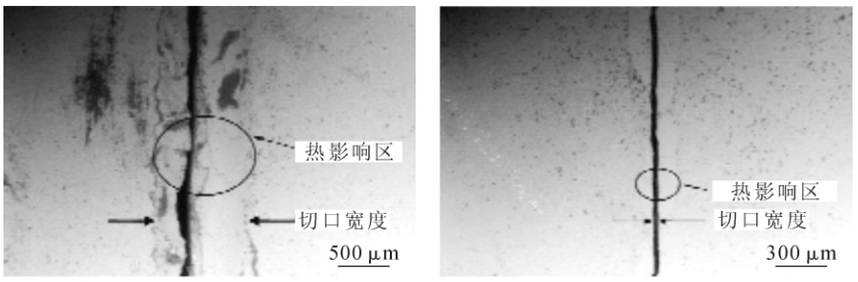
比较两种切割方式的切口,图 5(a)和(b)分别给出了由于空气冷却和激光水射切割而使用热断裂模



(a)空冷热断裂　　(b)激光/水射流切割

图 4 切割横截面

Fig.4 Cut Cross-Section



(a)气冷热断口切割俯视图　　(b)激光水射切割

图 5 不同切割断口

Fig.5 Different cutting surfaces

式切割的试样表面的 SEM 图像。在空气冷却的热断裂模式中,其切口在 100~150 μm,相对于激光水射切割的 50~80 μm 明显要大。在这两种热断裂情况下，顶部表面的裂纹路径都被热影响区所包围。对于空气冷却的热断裂,热影响区域约为 600μm,而对于激光水射热断裂，热影响区域仅为 100～200 μm。

此外，参考其他文献介绍到的磨料水射流切割[1,11,13]情况,其切口宽度非常大(根据[11]所示的数字计算,约为 1 300 μm),并且切割表面不均匀。传统的磨削工艺由于晶粒的移动和剪切力的作用而导致亚表面损伤[12]。单独使用激光通过汽化或气淬热断裂分离材料会导致明显的热影响区、残余热应力和切割表面的微裂纹。相反,激光水射切割可以有效地分离出没有残余热应力和微裂纹的小切口宽度的切割表面。实验结果清楚地证明了激光水射流复合法在陶瓷加工中的优越性。

4 结论

设计了一种激光水射流切割头，并将其与现有的数控激光加工系统集成在一起,用于加工陶瓷等硬脆材料。基于以上的激光水射流切割头的设计,课题组在氧化铝上进行了切割试验,验证了切割头的有效性。实验结果表明,激光 / 水射流加工利用了激光与水射流的协同效应通过受控的热断裂进行分离，需要比常规汽化模式低 3 至 5 倍的能量输入。此外,激光水射流工艺的材料切割表面质量优于传统的激光汽化方式和空冷热断裂方式,具有更小的切口和较高的表面精度。

参考文献:

[1] Xu S, Wang J. A study of abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with controlled nozzle oscillation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27: 693-702.

[2] Wang J. Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites cutting performance, erosive analysis and predictive models [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15: 757-768.

[3] Hashish M, Loscutoff W V, Reich P. Cutting with Abrasive Waterjets, Proceedings of the 2nd U.S. Water Jet Conference[C]. WJTA, 1983: 417-419.

[4] Jingnan Zhao, Kwang Shiong Wong, Pranav Shrotriya. Hybrid CO_2 laser waterjet heat (LWH) treatment of bindered boron nitride composites with hardness improvement [J]. Ceramics International, 2017, 43(11): 8031-8039.

[5] Jingnan Zhao, Pranav Shrotriya. Increase the hardness of polycrystalline cubic/wurtzite boron nitride composite through Hybrid Laser/Waterjet Heat (LWH) treatment [J]. Advances in Applied Ceramics 2017, 116:333-340.

[6] Tsai C H, Liou C S. Fracture Mechanism of Laser Cutting with Controlled Fracture [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125: 519-528.

[7] Tsai C H, Liou C S. Apply On-line Crack Detection Technique to Laser Cutting with Controlled Fracture[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18: 724-730.

[8] William Steen, Laser Materials Processing [M]. London, Springer, 2003: 72-85.

[9] Elperin T, Kornilov A. Formation of Surface Micro crack for separation of Nonmetallic wafers into chips [J]. Journal of Electronic Packaging, 2000, 122: 317-322.

[10] Shehata G, Molian P A, Bastawros A. Surface finish and flexural strength of CO_2 laser-cut alumina by evaporative and thermal stress fracture modes, Proceedings of NAMRC 35 [C]. Society of Manufacturing Engineers, 2007: 579-584.

[11] Wang J, Guo D M. The cutting performance in multi-pass abrasive water-jet machining of industrial ceramics [J]. Journal of Material Processing Technology, 2003, 133: 371-377.

[12] Huang H, Liu Y C. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 811-823.

[13] Zhao J, Guo J, Shrotriya P. A rapid one-step nanosecond laser process for fabrication of superhydrophilic aluminum surface [J]. Optics and Laser Technology September, 2019,117:134-141.