

文章编号: 0258-7025(2008)11-1686-07

陶瓷激光切割技术的研究现状与思考

季凌飞 闫胤洲 鲍勇 蒋毅坚*

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 介绍了硬脆性陶瓷激光切割技术研究的若干新进展,着重从工艺角度系统地分析总结了激光加工陶瓷减少热损伤的 4 大类型:传统工艺的优化参数法、多道切割法、应力引导控制裂纹切割法以及辅助切割法。结合实际研究经验,针对陶瓷不同薄厚类型及三维切割需求,提出了目前该技术所需解决的主要问题及相关思考。

关键词 激光加工;陶瓷;激光无损切割

中图分类号 V261.8; TQ174.75 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1686

Research and Consideration on Laser Cutting Technique of Ceramics

Ji Lingfei Yan Yinzhou Bao Yong Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The lately developments of laser cutting technique of ceramic materials with hard and brittle properties in recent years are reviewed. According to the emphatic analysis of processing, the 4 kinds of laser damage-free cutting methods, including traditional optimized parameter method, laser multiple-pass cutting, laser cutting with controlled fracture by stress guiding method and aided laser cutting method, are summarized. Combined with the research experience of the authors, the present problems of laser cutting of ceramics with different kinds of thicknesses and dimensions are proposed and analyzed.

Key words laser processing; ceramic materials; laser damage-free cutting

1 引言

广义上玻璃、搪瓷、珐琅、釉、水泥、单晶或其他无机化合物都属于陶瓷的范畴^[1]。陶瓷因具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温、高绝缘、无磁性、比重小、自润滑及热膨胀系数小等的独特优点,除了在日常生活和工业生产中发挥着重要作用,正越来越多地作为电子器件、滑动构件、发动机制件、能源构件等应用材料,在机械、化工、电子以及航空航天等一些尖端科技领域中显示出巨大的应用需求和优势潜力。但其硬度高、脆性大、抗热震性与重现性差等致命弱点严重阻碍了该类材料工程化的推广应用^[2]。目前通过组分复合(如陶瓷基复合材料)和成型工艺可以在一定程度上提高陶瓷的可加工性和达到部分结构设计要求,但还远远不能满足实际陶瓷零构件的使用需

求,多数情况下仍需要进行修整加工,以提高陶瓷零构件的形状和尺寸精度,满足机械结构相互灵活配合的目的^[3]。其中,切割即是陶瓷零构件加工中一个必不可少的基本手段。激光切割技术因其具有非接触性、柔性化、效率高及易实现数字化控制等特点,一直以来颇受青睐,人们寄希望于这种高能束加工方法可以象对待金属材料的切割一样,很好地完成陶瓷的无损切割。

2 陶瓷激光切割技术特点及现行主要方法

以激光作为加工能源,在硬脆性陶瓷加工方面的发展潜力已见端倪^[4]:它可以实现无接触式加工,减少了因接触应力对陶瓷带来的损伤;陶瓷对激光

收稿日期:2008-09-08;收到修改稿日期:2008-10-10

基金项目:国家自然科学基金(10674041, 50875006)、北京市人才强教一拔尖创新人才项目(05313999200601)、北京市科技新星计划(2006B11)、北京市教委面上项目(KM200810005006)和北京市自然科学基金项目(2082005)资助课题。

作者简介:季凌飞(1971-),女,博士,副研究员,主要从事激光材料加工技术方面的研究。E-mail: ncltji@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yjjiang@bjut.edu.cn

具有较高的吸收率(氧化物陶瓷对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长激光的最高吸收率可达 80% 以上), 聚焦的高能激光束作用于陶瓷局部区域的能量可超过 10^8 J/cm^2 , 瞬间就可使材料熔化蒸发, 实现高效率加工; 由于聚焦光斑小, 产生的热影响区小, 可以达到精密加工的要求; 激光的低电磁干扰以及易于导向聚焦的特点, 方便实现三维及异形面的特殊加工要求。激光器的种类很多, 以激光光束质量、材料对热源的高吸收效率以及适应产业化发展需求的标准来衡量, CO_2 激光热加工仍为陶瓷切割的主要手段。激光切割的难易程度由材料的热物理性质决定, 由于陶瓷是由共价键、离子键或两者混合化学键结合的物质, 晶体间化学键方向性强, 因而具有高硬度和高脆性的本征特性。相对于金属材料, 即使是高精度陶瓷, 其显微结构均匀度亦较差, 严重降低了材料的抗热震性, 常温下对剪切应力的变形阻力很大, 极易形成裂纹、崩豁甚至于材料碎裂。因此, 高效无损伤激光切割陶瓷类高硬脆无机非金属材料一直是一个诱人的且亟待解决的问题。总结近 20 年来激光加工陶瓷技术的研究发现, 陶瓷的激光切割技术主要包括传统工艺的优化参数法、多道切割法、应力引导控制裂纹切割法以及辅助切割法四大类。

2.1 传统工艺的优化参数法

该类方法基本借鉴金属材料激光加工的成熟工艺, 仅通过优化工艺参数来实现加工目的。研究发现针对不同材料需要采用不同的激光激励方式, 对于大多数陶瓷, 脉冲激光切割方式是较好的选择^[5], 连续激光切割方式一般更适用于其中的薄片状玻璃切割。提高脉冲激光输出的峰值功率、降低脉宽至纳秒量级、减少重复频率、降低切割速度是该类方法有效减少激光输入对材料产生的过热影响, 抑制裂纹产生的基本工艺规律^[6~8]。在无损伤切割速度的研究中, G. Lu 等^[9]给出了激光功率、切割速度和材料厚度之间的关系式: $P \geq 1.78 \times 10^{11} t^{2.41} v$, 指出对于一定厚度 t 的材料, 存在一个最大切割速度 v 。要提高切割速度, 实验证明在相同激光功率条件下, 采用线聚焦方式的切割速度可比点聚焦方式提高 5 倍以上^[10], 线聚焦更好地增大了切割方向的热输入量, 并减少了垂直于切割方向的热影响区。

在优化参数的基础上, 对相关加工附件(包括夹具)的改进也是该研究方法的一个突破点。激光加工中辅助气体的超音速气流可有效减少热积累, 抑制切割过程中的裂纹产生^[11], 但是超音速气流的气压大, 作用在被加工材料上会产生类似于刀具加工

的接触应力。通过对超音速喷嘴的创新改进, 可使作用于材料表面的气体净压力为零^[12], 达到抑制机械压力损伤的目的。使用图 1 所示 F. Quintero 等^[13]提出非同轴送气方式在激光切割厚氧化物陶瓷中, 会由于比同轴送气更高的气体利用率而产生更好的冷却效果, 切缝断面无裂纹, 底部无挂渣(图 2 所示)。采用真空吸盘固定硬脆性陶瓷可以保持工件在激光加工过程中的受力均匀^[14], 减少因夹持预应力而增大材料产生裂纹乃至断裂的概率。

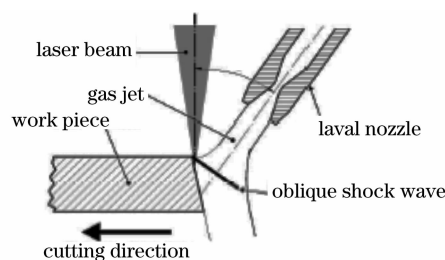


图 1 非同轴辅助气体切割冷却方式示意图

Fig. 1 Cooling effects of supersonic off-axis cutting method of ceramics

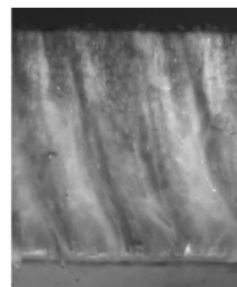


图 2 非同轴辅助气体切割冷却方式所切切缝断面图

Fig. 2 Cut quality of the cut edges by the off-axis cutting method

该类研究中, 值得一提的是 I. Black 等^[15, 16]对 8.5 mm 和 9.2 mm 厚的 Al_2O_3 基瓷砖进行的切割研究。他们通过优化切割速度、脉宽、喷嘴直径、气体类型及压力等措施, 实现了该类厚板陶瓷的直线切割, 并通过建立经验模型预测了该方法针对不同厚度陶瓷的无裂纹切割速度。实验所用瓷砖型陶瓷一般具有较低的密度, 疏松的结构可以为应力积累提供很好的释放空间。但是在对尖角的切割中, 由于过烧产生了难以控制而无法避免的裂纹。 Al_2O_3 陶瓷相比其他陶瓷具有热膨胀系数低及杨氏模量低的特点, 对热应力产生的断裂阻力高^[17], 因此 Al_2O_3 陶瓷厚板激光无损切割的成功还不能完全表示所有陶瓷都可以采用类似的切割工艺。

2.2 多道切割法

多道切割法即采用激光多次扫描同一切割轨迹

而达到去除材料的目的。一般先以较低功率激光多次扫描同一加工路径,以不断推进加工深度,至一定厚度后,转而以高功率激光完成切割。该方法工艺最为简单,但可靠性差。优点在于每道切割时单位长度输入的能量小,可以降低热载荷,抑制裂纹产生

表 1 激光多道切割法工艺参数

Table 1 Parameters of laser multiple-pass cutting of ceramics

Cutting mode	P_t	P_s	No. of passes	Last cut
Continuous wave	—	—	60	Full through cutting
Super pulse mode	100	9000	100	Full through cutting

实验发现激光每道扫描所产生的熔渣很难及时排除,往往因严重堆积造成切缝堵塞及残余热作用叠加。因此,该方法更适用于以气化切割机制为主的陶瓷。采用调 Q 的 CO₂ 激光及纳秒级脉宽抑制裂纹,以气化多道切割方式对 Si₃N₄ 陶瓷进行无损切割研究,可以将微裂纹尺寸控制在晶粒尺寸的范围^[18]。

2.3 应力引导控制裂纹切割

在激光扫描切割玻璃板的瞬态温度场和应力场的有限元分析中,研究人员发现位于光斑前后以及冷却点附近存在一个拉应力区,可以促使材料加工处形成裂纹并扩展以完成切割过程^[19],这种方法很快应用于实际生产中,目前已成为研究最为广泛、前景也极为看好的激光切割陶瓷方法之一。该方法通过激光辐照在陶瓷表面的切割方向产生拉应力,但并不将工件熔化或气化,完全依靠应力使材料断裂而完成切割。

使用椭圆光斑并增大光斑尺寸可以减少断面上的热影响区,增大冷却气体流量和减少冷却点与光斑距离可以增大拉应力值。Yu-Zan Wang 等^[20]通过有限元分析,采用线聚焦激光束切割玻璃,在直线切割方向上可以得到很大的温度梯度,从而实现热劈裂加工。在液晶显示器玻璃的激光切割中,研究人员尝试对材料施加三点力的弯矩,以在其内部产生预应力,增强裂纹控制的同时也加快了切割速度^[21]。

Tsai 等^[22, 23]在厚型陶瓷切割的实验中,先使用一束激光进行切槽加工,再用另一束非聚焦激光在材料上产生热应力发生断裂。由于槽的限制,第二道激光诱发的裂纹将会沿着槽的轨迹进行扩展,达到无损切割目的。以 YAG 和 CO₂ 聚焦激光混合切割 10 mm 厚的陶瓷板,60 W 的 YAG 激光用来切槽,44 W 的 CO₂ 激光产生热应力引导控制裂纹使材料断裂,切割速度可达 3 mm/s^[23]。该方法虽然常被成为“双光束”法(如图 3 所示),但其原理仍然是建立在以应力作用引导裂纹扩展达到切割目

与扩展。但是此法在提出之际就已被明确指出这是一种牺牲加工时间和效率的切割方法,用该方法切割 8.5 mm 的氧化铝陶瓷需要 60 或 100 次激光的重复扫描“走刀”(表 1 所示)^[15]。

的。实验方法上,人们采用更多方式的设备组合以期达到更好的切割质量。双 CO₂ 激光的组合方式可以完成对 2.54 mm 的氧化铝陶瓷的切割,速度接近 5 mm/s^[24]。此外,还有将双光束与冷却气流相配合的切割方法,以产生更大的热应力用以切割厚板^[25]。这种以裂纹控制为基础的“双光束”方法获得陶瓷厚板切割成功的最新报道为 10 mm 厚陶瓷的直线切割^[23],研究成果颇受瞩目。但是该方法设备系统和工艺操作复杂,而且由于引导裂纹扩展的可控制性较差,在曲线和角形切割中始终难以达到无损的切割效果。

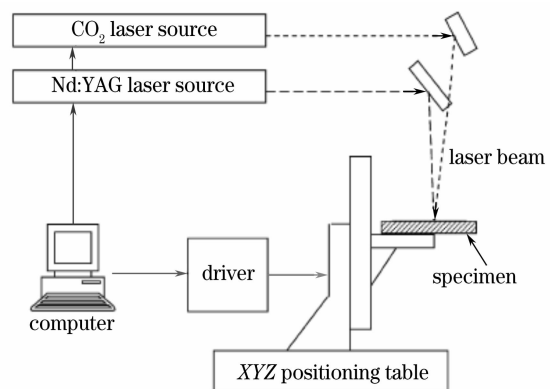


图 3 双光束法之热应力切割架构图

Fig. 3 Schematics of laser dual-beam cutting technique

2.4 辅助切割法

激光复合切割技术是将激光技术与一些传统切割技术相结合,既有以激光为主的方法亦有以激光为辅助工具的方法。总体而言,还未能充分发挥激光技术的独有优势,理论创新也因工艺上的多学科交叉特色而有所束缚。

水是液体辅助激光加工方法中最常见辅助介质,水中激光加工可以避免空气中加工的污染,抑制飞溅物的产生和再沉积。由于水对红光的吸收率较高,水中加工的激光波长以蓝绿光为佳^[26],实际应用中,考虑到加工效率,则常以近红外波长的

Nd:YAG激光为主要切割热源。水辅助切割既可将工件浸于其中进行激光加工,亦可利用与光束同轴水流的水导激光切割方法。

1987年 Noboru Morita 等^[27]提出在水中通过Nd:YAG激光可以实现无缺陷陶瓷加工。此后 I. Black等^[15]发现水中加工会因多余的热量被水吸收而减少激光切割的热影响区,但由于熔渣的冷凝,其切缝断裂面裂纹仍然难以得到抑制。在采用Nd:YAG激光加工 Al_2O_3 陶瓷的过程中,研究人员发现产生的气泡和加热液体的流动有助于熔渣的排出,提高加工质量^[28]。此外,如果考虑光在水中具有最佳穿透能力的波段为紫外波段,则对于一定深度的水下切割陶瓷材料,波长为532 nm的倍频Nd:YAG激光会更合适^[29]。但随着水层深度的加大,激光能量损失也随之增长。由于水对激光的折射率会使光束的焦点下移,实际应用中往往需要重新调整焦点位置以获得最佳切割效果。如图4所示的水导激光加工中^[30],同轴入射的水流可以有效减少热影响区,降低热应力以抑制工件表面裂纹产生,适合厚板材料的切割。

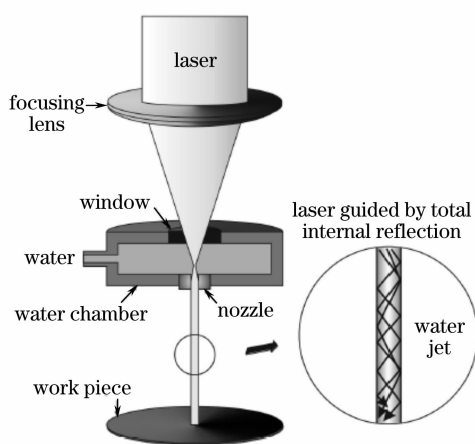


图4 水导激光无损切割示意图

Fig. 4 Damage-free cutting using the water jet guided laser

1982年,国内研究人员提出的“微区激光切割”方法是一种典型的激光为辅方法^[31]。通过将激光束聚焦成为光带,用以加热、熔化余量和零件分界面的微区,同时用剥离工具剥离已分离的切屑,并使工件相对聚焦激光束和剥离工具而运动。2007年6月,国际极光飞行科学公司(Aurora Flight Sciences)在西维吉尼亚高技术联盟公司和NASA联合投资的支持下,宣布开始实施激光辅助切削轻量碳化硅陶瓷基复合材料(CMC)项目的研究(www.aurora.aero)。即以激光器作为辅助手段,将零件表面加热到540℃,使脆性的陶瓷基复合材

料刚好软化,再使用先进的刀具进行零件切割加工。

由于人们在陶瓷研究中已积累沉淀了大量经验,激光在金属材料的应用技术研究也颇为成熟。因此针对硬脆性陶瓷类非金属材料的激光加工,研究人员已从多学科范围提出过大量的可尝试方法,4大类方法仅是对已有代表性工艺的一种简要总结。相对于金属材料,陶瓷类非金属材料除具有硬脆性高、导热率差等普遍性特点外,还存在明显的个性差异,即使是同一配方、同一原料也会由于烧结批次不同而在显微结构上存在差异,这种差异对于无损切割往往是不容忽视的。实际中,研究人员往往要视加工材料的具体情况工艺调整、改进,乃至创新,对材料加工前所需进行的预处理细节,如浸润、附着有助应力释放的粘合膜等^[32],也同样不容忽视。

3 陶瓷激光切割技术所面临的问题与思考

硬脆性陶瓷类非金属材料激光切割技术的研究从未停步,但目前还没有一项能够真正满足大批量企业化生产的高效率激光加工方法。新型产业对陶瓷需求的日益增长,更是敦促先进的陶瓷可加工技术大步发展的良好契机,机遇与挑战同在。

从加工工艺而言,陶瓷加工的第一步必须确定合理的激光输出方式。激光激励的基本方式有两种:连续输出和脉冲输出。两种输出方式针对不同类型的陶瓷各有发挥所长之处,需要综合考虑切割质量和切割速度。通常连续输出适用于玻璃、有机玻璃等非晶态非金属材料。脉冲输出方式则多适用于陶瓷等多晶或单晶材料。此外,厚度、密度等无疑也是需要考虑的重要影响因素。无损切割是陶瓷加工的首要目标,针对材料的不同特征,侧重点各有不同。按照陶瓷构件及陶瓷器件的发展趋势,陶瓷激光加工所面临的问题与思考略述如下。

3.1 薄型陶瓷的激光精密切割

应用于微电子、生物等领域的陶瓷类无机非金属材料厚度一般在1 mm左右。该类材料多称为精细陶瓷,高密度高质量,几无烧结缺陷。采用激光对该类材料的加工,通过调整激光工艺参数,重点降低激光输出占空比,在保证材料切断的前提下尽量降低激光输出的平均功率。同时提高激光切割速率(对于非晶态的玻璃材料,甚至可以采用连续激光切割方式),并使用较大气压值的辅助气体进行吹

除,可以达到切口整洁无裂纹的无损切割。要解决的关键问题是如何保证切割的精细度,包括加工定位精度、切缝的精密度等。如图 5 所示片状微电子线路基板上的引脚制孔,切割定位精度需要达到几十微米。

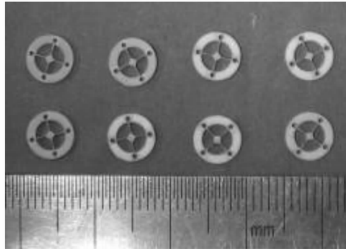


图 5 微电子线路基板引脚的激光切割制孔

Fig. 5 Drilling on microelectronic circuit substrate by laser cutting technique

金属材料激光加工中,往往可以通过采用电容式传感器的高度调节系统来保证切割头与工件的距离严格一致。但绝大多数陶瓷类非金属材料具有高的电绝缘性,激光头所带高度调节不起作用。因此,现行激光加工系统在应用于陶瓷类材料加工时,大多需要改进、设计新的定位装置或反馈系统。新开发的“激光精细加工非同轴显微定位”装置无需改变激光加工系统原有结构,直接装配于激光头,装卸灵活,定位精度可达加工机床精度^[33],应用于 1 mm 高硼硅玻璃微流控封装器件的加工取得了良好效果,其无损切割制孔阵列,单孔绝对定位精度约 30 μm ,直径最小切割精细度可达 300 μm (图 6)。

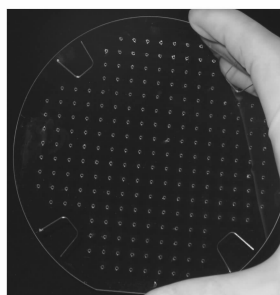


图 6 高硼硅玻璃激光无损切割制孔阵列

Fig. 6 Vycor glass sample with micro-hole arrays prepared by laser damage-free cutting

3.2 厚型陶瓷的激光无损切割

裂纹是厚型陶瓷类材料激光切割所需解决的最大问题。热量注入导热性差的厚板材料中,会产生很大的热应力积累,在应力特别是非平衡分布应力的作用下,极易导致裂纹产生。需要说明的是,这里的“厚型”有一定的数值范围:应用于机械工程领域实用成形陶瓷类非金属零构件的材料厚度一般均超

过 1 mm,多为几毫米乃至十几毫米,厚度超过 20 mm 以上的陶瓷类材料,特别是具有高密度低缺陷的该类材料,从现行烧结制备工艺来说也是难度极大。厚型陶瓷类材料的制备,往往会伴随密度的下降,而密度的下降将会明显降低激光切割的难度。因此针对实际应用意义,该领域激光加工技术的研究重点可放在厚度 20 mm 以下的陶瓷无损切割。厚型陶瓷类材料的加工往往对切缝精密度的要求不高。但其加工损伤将随陶瓷厚度的增加而愈发严重,其无损切割难度已成为制约激光切割陶瓷技术发展的瓶颈。该类材料的切口断面往往有一层熔凝层,经显微分析,重凝层的厚度仅在 20 μm 左右,而断面裂纹则分布于熔凝层上。陶瓷的硬脆特性使得这一熔凝层结构疏松且极易脱落,其上裂纹并不渗入基体材料,对基体材料没有不良影响。如图 7(a) 所示左半部分是重凝层区域,右侧上方白色箭头所示为重凝层脱落后露出的基体材料。因此相比薄型材料,该类硬脆性厚型陶瓷激光切割研究的重点应放在垂直于切缝的工件表面裂纹的产生和扩展,如图 7(b) 所示。

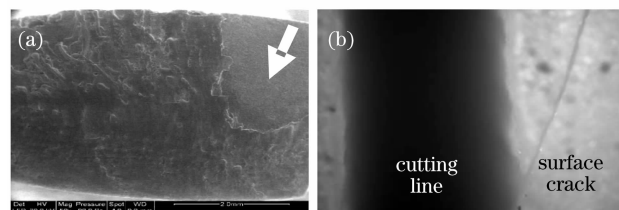


图 7 陶瓷厚件切口断面(a)与工件表面裂纹(b)的显微形貌

Fig. 7 Micro-topography of cross section (a) and surface crack (b) of thick ceramics

按照热传导基本原理对硬脆性陶瓷激光切割中的热效应行为进行了分析。发现现行“脉冲激光连续走刀”方式在薄型陶瓷类材料切割中的成功,是由于材料在高能激光作用下的迅速穿透,个数有限的脉冲对材料表面温升的影响可以近似等同于单个脉冲,脉冲间隙足以保证温度的冷却,从而抑制了因热应力作用而产生的裂纹;但对于该类厚型材料,脉冲数的增加对材料温升的影响无法忽略,且连续走刀的扫描方式也无法有效减弱激光束前一个加工点的残余热量对后一个加工点的累积效应,这种热累积效应将随加工路径的延长、加工路径拐点的出现而加剧,尤易造成曲线、角形等内轮廓的切割失败。特别是在每次“连续走刀”没有穿透切缝的情况下,更会由于熔化材料的反冲塞效应、凝渣的堆积、辅助气氛仅局限于辐照面浅层区域的有限冷却作用,而增

加这种热积累效应及随之的应力分布失衡,导致裂纹出现。因此,对该类材料的切割,仅采取工艺调整是不够的,还需要开发新的工艺。

3.3 陶瓷的激光三维切割

就陶瓷本身而言,其在烧结过程中的高收缩率增大了陶瓷结构件的制成难度。激光切割对材料几乎不产生机械冲击和压力,且定位灵活,为实现陶瓷零构件的三维加工提供了广阔的发展空间。实现陶瓷激光三维切割的前提是解决好本文所提的前两个问题,但陶瓷切割中,往往一个点的显微裂纹就会引致整个陶瓷件的崩裂,因此,要真正实现可实用的陶瓷激光三维切割还有很长的路要走。针对陶瓷的热物理性质,可以预见的问题应涉及:离焦量随工件表面变化实时调节控制的问题,复杂切割路径的热扩散问题,激光束穿透工件单面对相对面的热损伤问题以及激光光点处应力断裂的控制问题等。

4 结 论

随着陶瓷应用领域的不断扩大,激光在陶瓷加工方面的巨大潜力日趋显现。激光加工方法尤其适合于常规方法不适用和不经济的方法,在硬脆性陶瓷类材料加工方面已体现出强大的发展潜力。但由于陶瓷本征的硬脆特性,使得该技术的发展中还存在许多亟待解决的问题。随着实验研究的广泛深入开展,对陶瓷激光加工的作用机制更需要得到理论上的论证和支持,根据该类材料的个性差异,系统开展有关工艺及机制的规范研究具有重要意义。

参 考 文 献

- Li Biorong. *Technological Principle of Electronic Ceramic* [M]. Wuchang: Press of Huazhong University of Science and Technology, 1986. 1
李标荣. 电子陶瓷工艺原理[M]. 武昌: 华中工学院出版社, 1986. 1
- Xiao Hanning, Gao Pengzhao. *Applications and Fabrication of High Performance Structure Ceramic* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
肖汉宁,高朋召. 高性能结构陶瓷及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- Zheng Lei, Yuan Juntang, Li Shaohua. Drilling of hole mechanisms of ceramic of composite armors [J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2007, **35**: 568
郑 雷,袁军堂,李少华. 陶瓷复合装甲的孔加工及机理[J]. 硅酸盐学报, 2007, **35**: 568
- Chen Hongxin, Jia Tianqing, Huang Min *et al.*. Visible-infrared femtosecond laser-induced optical breakdown of 6H SiC[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 467~470
陈洪新,贾天卿,黄 敏等. 飞秒激光的波长对SiC材料烧蚀的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 467~470
- Zhang Shan, Kang Shaoying. Experimental studies of laser processing of ceramic strength[J]. *Applied Laser*, 1996, **16**(5): 218~220
张 珊,康少英. 激光加工陶瓷强度的实验研究[J]. 应用激光, 1996, **16**(5): 218~220
- K. Li, P. Sheng. Plane stress model for fracture of ceramics during laser cutting[J]. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1995, **35**(11): 1493~1506
- Zhang Shan, Kang Shaoying. Experimental studies of laser processing of constructural ceramics [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(10): 797~800
张 珊,康少英. 激光加工结构陶瓷的实验研究[J]. 中国激光, 1995, **A22**(10): 797~800
- R. Akarapu, A. E. Segall. Numerical simulations of an active-stressing technique for delaying fracture during cutting of alumina [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2006, **128**: 921~927
- G. Lu, E. Siores, B. Wang. An empirical equation for crack formation in the laser cutting of ceramic plate[J]. *J. Materials Processing Technology*, 1999, **88**(1): 154~158
- N. Barsch, K. Korber, A Ostendorf *et al.*. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. A*, 2003, **77**: 237~242
- Zhang Zheng, Liang Yong, Zhang Bingchun *et al.*. Study on the re-cast layer for laser drilling of Al₂O₃ ceramics[J]. *Laser J.*, 2000, **21**(1): 43~45
张 罡,梁 勇,张炳春等. Al₂O₃陶瓷YAG激光切割重铸层的研究[J]. 激光杂志, 2000, **21**(1): 43~45
- B. P. Pifutsk. Gas-aided laser cutting of thin and brittle materials[P]. China Patent; CN1222389C, 2005-10-12
B. P. 皮夫茨克. 薄且脆的材料的气助激光切割[P]. 中国,发明专利, CN1222389C, 2005-10-12
- F. Quintero, J. Pou, F. Lusquinos *et al.*. Comparative study of the influence of the gas injection system on the Nd: Yttrium-aluminum-garnet laser cutting of advanced oxide ceramics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(9): 4199~4205
- Liu Guozhen. Method and instrument for self-substrate cutting devices[P]. China Patent; CN1508850, 2004-6-30
刘国珍. 用于自衬底切割器件的方法和装置[P]. 中国,发明专利, CN1508850. 2004-6-30
- I. Black, K. L. Chua. Laser cutting of thick ceramic tile[J]. *Optics & Laser Technology*, 1997, **29**(4): 193~205
- I. Black. Laser cutting speeds for ceramic tile; a theoretical-empirical comparison[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**: 95~101
- F. Quintero, J. Pou, F. Lusquinos *et al.*. Nd: YAG laser cutting of advanced ceramics[C]. *SPIE*, 2001, **4419**: 756~760
- Hong Lei, Li Lijun. A study of laser cutting engineering ceramics [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, (31): 531~538
- Hyoun-Shik Kang, Soon-Kug Hong, Seok-Chang Oh *et al.*. A study of cutting glass by laser[J]. *SPIE*, 2002, **4426**: 367~370
- Yu-Zan Wang, Lehming Lin. Characterization of laser cleaving on glass sheets with a line-shape beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 892~899
- Chwan-Huei Tsai, Bor-Chang Lin. Laser cutting with controlled fracture and pre-bending applied to LCD glass separation[J]. *Int J. Adv. Manuf. Technol.*, 2005. Original article
- Chwan-Huei Tsai, Chuen-Heng Ou. Machining a smooth surface of ceramic material by laser fracture machining technique[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2004, **155~156**: 1797~1804
- Chwan-Huei Tsai, Hong-Wen Chen. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2003, **136**: 166~173
- V. Pereles-Santiago, M. Washington, P. Bragan *et al.*. Faster and damage-reduced laser cutting of thick ceramics using a simultaneous prescore approach [J]. *J. Laser Applications*, 2005, **17**(4): 219~224

- 25 Nan Hengyou, Qiu Dagao, Quan Baijun. Method and device for laser cutting of non-metal substrate [P]. China Patent; CN1349875, 2005-5-22
南亨佑, 秋大镐, 全柏均. 用激光束切割非金属衬底的方法和装置[P]. 中国, 发明专利, CN1349875, 2005-5-22
- 26 Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Water-bath laser ablation and the laser processing method [P]. China Patent; CN1475324A, 2004-2-18
叶震寰, 楼祺洪, 董景星 等. 水浴激光消融和激光加工的方法[P]. 中国, 发明专利, CN1475324A, 2004-2-18
- 27 Noboru Morita, Shuichi Ishida, Yasutomo Fujimori *et al.*. Pulsed laser processing of ceramics in water[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **52**(23): 1965~1966
- 28 Zhu Bo, Qi Litao, Wang Yang *et al.*. The experimental study of water assisted laser machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2003, **12**: 73~74
朱 波, 齐立涛, 王 扬 等. 水辅助激光加工技术的实验研究[J]. *现代制造工程*, 2003, **12**: 73~74
- 29 Zhu Hua, Hua Yinqun. The research to the influencing factors of laser-cutting quality under water[J]. *Laser J.*, 2007, **28**: 73~74
朱 华, 花银群. 水下激光切割质量影响因素的研究[J]. *激光杂志*, 2007, **28**: 73~74
- 30 Delphine Perrottet, Roy Housh, Bernold Richerzhagen *et al.*. Heat damage-free laser-microjet cutting achieves highest die fracture strength[J]. *SPIE*, 2005, **5713**: 285~292
- 31 Li Lijun. An idea about "Laser Cutting Process"[J]. *J. Hunan University (Natural Sciences)*, 1982, **9**(4): 1~10
李力钧. 关于“激光切割”的设想[J]. *湖南大学学报*, 1982, **9**(4): 1~10
- 32 Aria, Kondou. Adhesive belt for cutting and the cutting method for semiconductor[P]. China Patent; CN1244726, 2000-2-16
妹尾秀男, 近藤健. 切割用胶带及切割半导体晶片的方法[P]. 中国, 发明专利, CN1244726, 2000-2-16
- 33 Jiang Yijian, Yan Yinzhou, Bao Yong *et al.*. Parallel-axis positioning device and method for laser processing of materials [P]. China Patent Application Number: 200810115283.9, 2008-06-20
蒋毅坚, 闫胤洲, 鲍 勇 等. 一种用于激光材料加工的非同轴定位装置及方法[P]. 中国, 发明专利: 申请号 200810115283.9, 2008-06-20