

致密 Al_2O_3 陶瓷厚板激光离散通孔密排无损切割新技术研究

季凌飞 闫胤洲 鲍勇 陈晓川 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 以 10~12 mm 厚致密 Al_2O_3 陶瓷为研究对象, 采用 CO_2 激光, 以离散通孔密排分离新技术, 实现了厚板陶瓷直线、曲线等自由加工路径的激光无损切割。采用扫描电镜(SEM)和激光共聚焦显微分析方法研究了切缝表面的熔凝层结构, 评价了无损切割的良好质量。以激光切割过程的高速摄像 CCD 分析为基础, 对激光峰值功率、占空比、频率、打孔时间等特征工艺参数进行了优化分析, 给出了厚度不小于 10 mm 致密陶瓷激光无损切割的优化工艺参数, 脉冲峰值功率 2.7~3.5 kW, 脉冲频率约 50 Hz, 脉冲占空比 30%~50%, 通孔时间 0.1~0.5 s。该技术直线切割速度可达 15~20 mm/min。

关键词 激光技术; 无损切割; 陶瓷厚板; 通孔密排

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0603002

Research on Laser Close-Piercing Lapping Processing for Damage-Free Cutting of Thick Al_2O_3 Ceramics

Ji Lingfei Yan Yinzhou Bao Yong Chen Xiaochuan Jiang Yijian

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

Abstract Achievement of laser close-piercing lapping processing technique for damage-free cutting in arbitrary path (line, curve and angle) of dense Al_2O_3 ceramics with the thickness of 10~12 mm by CO_2 laser is proposed. By the combination analysis of scan electron microscope (SEM) and laser scanning confocal microscope on the cut surface, the good cut quality is concluded. Based on the CCD analysis of the novel cutting processing, the optimal process parameters for damage-free cutting of 10 mm thick Al_2O_3 ceramics including peak power of 2.7~3.5 kW, pulse frequency of about 50 Hz, cycle duty of 30%~50% and piercing time of 0.1~0.5 s, are obtained. The optimal line cutting speed can be 15~20 mm/min.

Key words laser technique; damage-free cutting; thick ceramic; close-piercing lapping processing

OCIS codes 140.0140; 140.3390; 350.3390

1 引 言

Al_2O_3 陶瓷是最为常见的结构陶瓷, 具有良好的硬度和耐腐蚀性, 并可以作为绝佳的热绝缘体和电绝缘体, 从航天业到制造业应用十分广泛。相对于 ZrO_2 、 Si_3N_4 等其他常用结构陶瓷, Al_2O_3 陶瓷延/脆性临界切深小, 更易发生脆性断裂^[1], 增加了此类陶瓷厚板的无损加工难度。

国内外学者采用各种波长的激光器对陶瓷的打

孔及切割做了大量的实验^[2,3], 早期研究已发现, 相对于连续激光输出, 采用准连续脉冲输出, 可在保证加工处(激光辐照点)温度迅速提高到熔化温度的同时, 减少因光束在同一加工点的辐照热积累而导致的裂纹产生, 这在激光切割金属材料的工艺中, 已被证明是非常有效的方法。陶瓷相对于金属, 具有很差的导热特性, 需要更大程度地降低非平衡的热积累, 在脉冲切割的基础上, 陶瓷激光切割已开发了多

收稿日期: 2011-04-02; 收到修改稿日期: 2011-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(50875006)和北京市自然科学基金(2082005, 31111002)资助课题。

作者简介: 季凌飞(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要从事非金属材料激光加工、制备与改性等方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn

次走刀切割、可控断裂切割和激光复合切割等多种无损切割新工艺^[4~10],并建立了各种各样的激光加工理论模型对其中的作用机理进行了分析,在温度场分布及裂纹扩展等经验公式的建立方面也做了大量有意义的探索^[11~14]。但是,对于厚板陶瓷,尤其是在没有穿透切缝的情况下,由于脉冲数的增加而无法忽略对材料温升的影响,伴随熔化材料的反冲塞效应、凝渣堆积以及辅助气氛仅限于辐照面浅层区域的有限冷却作用,材料温升的热积累效应会迅速增加,最终导致应力分布失衡而极易产生裂纹致工件断裂。随着加工路径的延长、加工路径拐点的出现,加剧了热积累效应对应力分布失衡的影响,即使目前应用效果最好的可控断裂激光切割技术^[15~18],其直线切割陶瓷厚度可以达到 10 mm,但也无法完成同样厚度的曲线切割^[17,18]。因此,如何实现厚板陶瓷的曲线、角形等内轮廓的无损切割至今仍是一个挑战。本文提出的激光通孔密排陶瓷无损切割技术,在对一个定点的激光辐照时,可通过有效脉冲的叠加提高激光能量的利用效率;同时又通过通孔的边界衔接或叠加降低辐照点周围多余的热积累,减少热应力增加,达到无损切断材料的目的。

2 实验方法

实验用致密 Al_2O_3 陶瓷板厚度为 10~12 mm,密度约为 3.90 kg/m^3 ,热膨胀系数 $8.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热导率为 $0.335 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$,杨氏模量 400 GPa。激光器选用 3.5 kW Slab CO_2 激光器(德国 Rofin 公司),以脉冲输出为工作方式,同轴辅助 N_2 气体或压缩空气为工作气氛,聚焦镜焦距为 190 mm。所采用的新型离散通孔激光无损切割方式如图 1 所示。

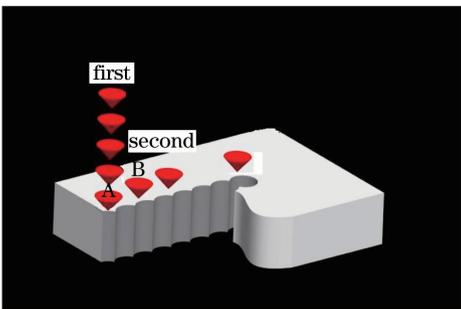


图 1 激光离散通孔无损切割方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser close-piercing lapping damage-free cutting method

首先采用激光在材料上打出一个通孔,以此确定最高峰值功率;在保持一定峰值功率的前提下引

入占空比,在保证材料有效去除所需峰值功率不变的前提下降低激光的平均输出能量,以较低的激光平均输出能量减少激光辐照点的热积累;然后配合合适的通孔时间和间距,沿加工路径获得一系列边界相衔接或相叠加的通孔,实现材料的无损切割。视材料致密度不同,10 mm 左右厚度的陶瓷,通孔孔径平均为 0.05~0.65 mm,孔隙间距为 0.03~0.2 mm。整个切割过程中需要工作气氛开关、激光出光开/关配合工件(或激光头)一起重复“移动-停止打孔-再移动”的循环单元,在首孔和后续通孔的两个阶段及时调整打孔时间、辅助气氛气压达到提高切割效率和有效去除切口熔渣提高切割质量的目的。

3 实验结果

10~12 mm 厚 Al_2O_3 陶瓷板无损切割典型试样如图 2 所示,激光离散通孔密排分离技术实现了包括直线、曲线、直角、锐角等自由路径(含内轮廓)的无损切割,直线切割速度一般为 12~15 mm/min 如图 2(a)所示,通过脉冲频率、占空比及工件/激光头移动速度的匹配,可提高至约 20 mm/min,如图 2(b)所示。如图 3 所示,切割件切口形貌完好,切缝边缘垂直度高,可以很好地实现尖角的无损切割,尖角内、外轮廓切割件均没有裂纹和崩角等损伤。

切缝表面轮廓仪测量结果,覆有粗糙度 R_a 约为 $10 \mu\text{m}$ 的熔凝层,该熔凝层的厚度仅在 $20 \mu\text{m}$ 左右。对切缝表面做扫描电镜(SEM)分析,如图 4 所示,图 4(a)左半部是熔凝层区域,右半部的深色区域是脱落了熔凝层的基体区。熔凝层上分布有很多呈横向与纵向裂纹,其中横向裂纹相较纵向裂纹要明显得多,裂纹的存在使得熔凝层非常易于脱落,图 4(a)中深色熔凝层脱落区即为了对比观察而简单采用金属刷去除。从熔凝层脱落区域可见,切缝熔凝层下覆的基体材料完好无损,保持了陶瓷材料原有的显微结构。这是由于陶瓷的热导率相对于金属较低,当激光入射能量通过晶格振动以热的形式向陶瓷内部传递时,切缝表面垂直方向的温度梯度会远大于平行方向,切缝表面裂纹以平行方向的横向应力扩展为主,而垂直方向因较大的温度梯度与导热损失厚度已经相当,热损伤无法渗入到基体当中。实际应用中,这些只存在于熔凝层上的裂纹可随熔凝层去除而不会对切割件的性能造成不良影响。

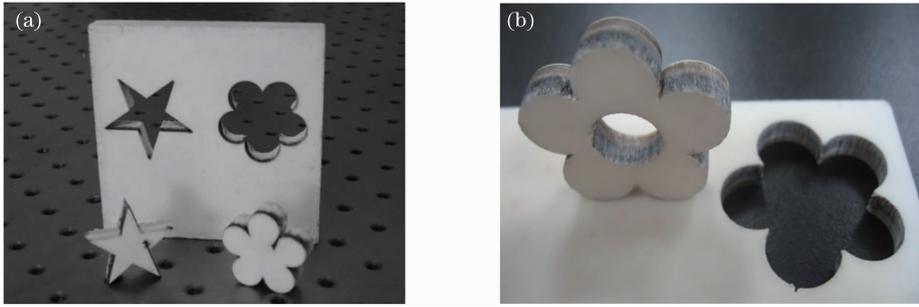


图 2 激光离散通孔无损切割典型试样示意图。(a)切割速度 12 mm/min, (b)切割速度 20 mm/min
Fig. 2 Typical samples cutting by laser close-piercing lapping damage-free method. (a) cutting speed is 12 mm/min, (b) cutting speed is 20 mm/min

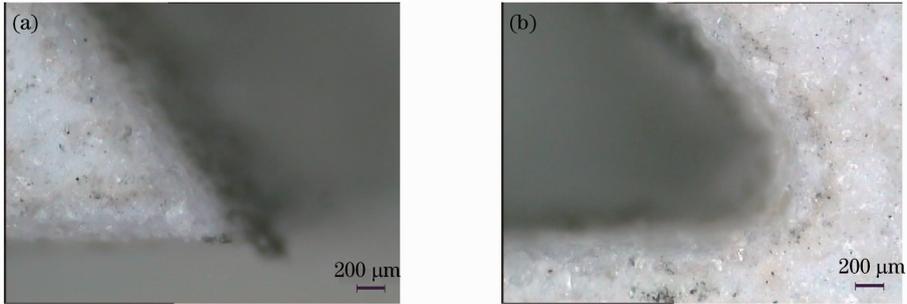


图 3 激光离散通孔无损切割陶瓷厚板尖角的微观形貌图。(a)内轮廓, (b)外轮廓
Fig. 3 Optical micrographs of apex angle of thick ceramic processed by laser close-piercing lapping damage-free cutting method. (a) inner profile, (b) outer profile

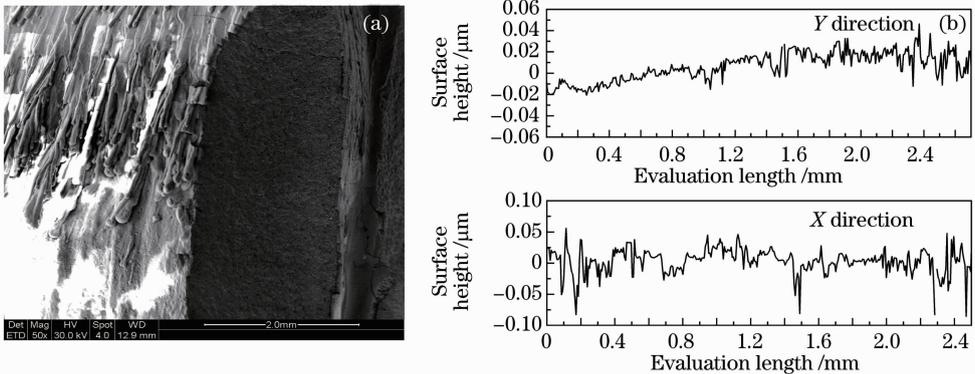


图 4 (a)切缝表面 SEM 显微图和(b)粗糙度测量
Fig. 4 (a) SEM micrographs and (b) roughness profiles of the cut surface of the ceramic

为进一步考察激光输入能量在陶瓷内的传热效果,沿垂直于切缝表面方向做断面激光共聚焦显微分析,如图 5 所示。从图 5(a)共聚焦白光图片可见,材料颜色从左至右依次变浅,呈现了氧缺陷情况的改善,反映了温度梯度趋弱及快速降温的过程,而温度的区域变化会明显影响材料细观组织的变化。图 5(b)断面显微图片显示,从熔融层至基体材料,陶瓷晶粒形貌及细观组织随温度变化呈现明显的 4 个不同区域。区域 1 由于垂直方向的大温度梯度,切缝材料经熔融后冷却,形成细晶化的晶粒取向生

长。区域 2 由于陶瓷的低导热率,垂直方向温度梯度明显减小,材料的热传导来不及传递切缝表面高温熔融层提供的能量,形成温度在二维方向相对均衡的保温区域,部分陶瓷晶粒会因为保温效果出现过烧的异常生长。该区域晶粒形貌差异显著,晶粒部分熔化并形成玻璃态滞留在晶界处,晶界较其他区域明显增厚。相对于区域 4,区域 3 晶粒仍显较大,但保持了陶瓷晶粒原有的形貌特征和薄而清晰的晶界,区域 3 是已临近基体的温度相对较低的热影响区。区域 4 显示的是基体材料原有的致密显微

结构。断面分析结果,切缝表面熔凝层为区域 1 和区域 2,熔凝层的易脱落来源于区域 2 非均匀的晶

粒生长层。据此显微测量,熔凝层厚度应为 $30\ \mu\text{m}$ 左右,与轮廓仪测量结果基本相符。

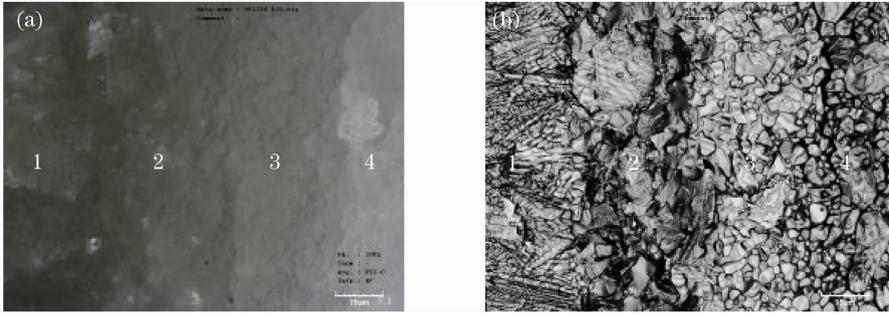


图 5 切缝断面激光共聚焦显微分析。(a)白光,(b)激光

Fig. 5 Laser scanning confocal micrographs of the cut surface. (a) confocal white light micrograph, (b) confocal laser micrograph

4 工艺分析

4.1 切割过程分析

采用 CCD 高速摄影方式拍摄了激光切割过程中的熔渣信息,根据所获得的信息,系统地分析了切割过程如图 6 所示。实际应用中,一般选择材料的废弃部分作为首孔的开工点,所用工艺条件为峰值功率 $3.5\ \text{kW}$ 、频率 $50\ \text{Hz}$ 、占空比 30% 的 CO_2 激光。如图 6(a)所示,开光初期,材料激光脉冲作用下发生熔化,随着熔化物蒸发蒸气压的增加,材料表面产生了小的熔蚀微粒喷射。在连续脉冲的作用下,熔蚀微粒增多并以大量的飞渣形式从厚板上表面溅出,此时应施以相应于较小的辅助气体气压 ($2 \times 10^5\ \text{Pa}$),但同时必须保证有足够的动量将熔蚀材料吹出。伴随着打孔深度的逐步增大,200 ms 后,即经过 10 个脉冲,出现了向下析出的少量熔渣,说明厚板已穿透,如图 6(b)所示,但穿孔内存在锥度。伴随后续脉冲的到来熔渣析出量不断增大,后

续脉冲连续烧蚀着孔壁,并在辅助气体气压的作用下排出熔渣,扩大孔径。再经 120 ms,厚板上表面入光口处飞溅的熔渣已不见,成束的熔渣完全沿着气流束制约的方向由板材出光口排出如图 6(c)所示,标示着无明显锥度的首孔完成。经过约 16 个脉冲耗时 320 ms,获得 10 mm 厚陶瓷板上的无损通孔。随即通过可靠的光路和气路控制系统在孔间距 ($0.05\ \text{mm}$) 的时间段内进行光开关和气流开关与气压的调整,图 6(d)和(e)是首孔之后后续孔的开始,可见对于开始的第一个脉冲,除了板材入光口的少数飞渣外,后续打孔就已经出现了向下析出的熔渣。孔与孔边界衔接或重叠形成的孔隙为后续打孔熔渣提供了直接向下析出的途径,熔渣的直接析出改善了通孔中的蒸气压反冲塞效应并带走了大量的热,有效地降低了热效应的积累和孔壁的温度变化量,抑制了裂纹的产生。同时,因为有了可作为应力释放的孔隙,后续孔的打孔时间也可以大大缩短,由约 320 ms 缩短至约 100 ms,有利于切割速度的提高。

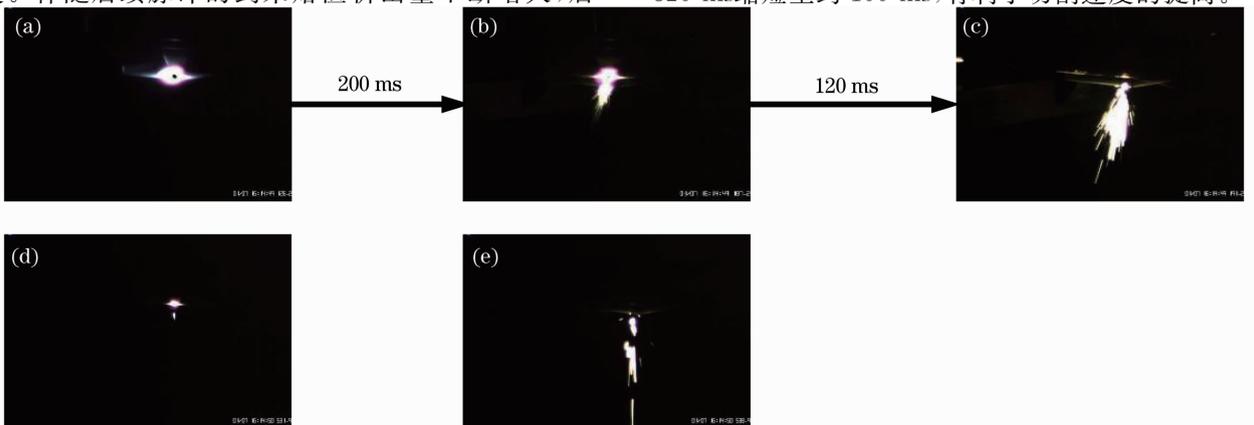


图 6 激光离散通孔无损切割过程

Fig. 6 Procedure of laser close-piercing lapping damage-free cutting processing

4.2 切割工艺参数的分析

常规脉冲激光切割的主要工艺参数是激光脉冲峰值功率、脉冲频率、脉宽、焦点位置、切割速度和辅助气体及气压。离散通孔激光切割新技术的基础是激光无损制孔,将离散的通孔连接起来从而达到分离材料的目的,有其独特的工艺特征:1)切割速度由激光打孔时间、打孔间距及工件/激光头的移动速度共同决定,不作为独立工艺参数优化,但需要上述各参数的匹配;2)首孔与后续通孔的工艺参数不同,需在切割过程中及时切换;3)以占空比、激光频率、焦点位置为代表的首孔无损工艺参数的优化是技术实现的关键。

4.2.1 占空比

占空比的作用是通过改变脉冲作用时间来影响总热输入量。Al₂O₃ 陶瓷的激光分离机制为熔化切割,对一个定点的打孔过程,每一脉冲能量可以视为点光源,瞬间作用于材料发生熔融的温度分布 $T(R, t_i)$ 可表示为^[19]

$$T(R, t_i) = (T_m - T_0) \operatorname{erfc}\left(\frac{R}{2\sqrt{\alpha t_i}}\right) + T_0, \quad (1)$$

式中 T_m 表示材料熔点, T_0 为材料基温(可等同于室温), R 为离放热点热源的半径, α 为材料热扩散率, $t_i = \tau\eta$, 为光束与材料相互作用时间,其中 τ 为脉冲周期, η 为占空比。

由(1)式可知,对一定脉冲周期的单个脉冲,材料的固液界面的表面扩散温度是占空比根倒数的补误差函数。因此,占空比越小,表面扩散温度越低,对于 n 个连续脉冲的作用,某时刻的叠加温度场变化趋势亦如此。因此,在保证材料去除热效率的前提下,选择尽可能小的占空比,可以有效降低激光熔蚀界面处的温度叠加,减少温度变化量,从而控制温度场空间分布的不均匀性和热应力的积累,这对于减小热影响区和抑制裂纹是非常有利的。实验发现,首孔占空比不大于 30%,后续孔占空比不大于 50%。

4.2.2 脉冲频率

脉冲频率的变化在保证总热输入量不变的前提下改变脉冲的时间分布形态。降低占空比,减少了温度变化量,在避免或减少裂纹产生的同时会影响材料的去除效率,可以通过适当提高脉冲频率对此加以改善。实验中,由于陶瓷的热震性较差,对于厚度不小于 10 mm 的致密厚板陶瓷,当脉冲频率不小于 100 Hz 时,热冲击效应非常明显,极易产生微裂纹并引起材料断裂;而当脉冲频率超过 200 Hz

时,伴随着热冲击效应,材料的去除效率也会明显降低。这是由于脉冲间隔时间过短,后续脉冲可能未及固体材料而重复作用于还未排除的蒸气或是熔化材料上。因此,陶瓷厚板的无损切割优化频率选择在 50~100 Hz 之间时,低于厚板金属的激光切割频率。

4.2.3 通孔时间

通孔时间是激光离散通孔切割技术的特征工艺参数,首孔和后续孔的通孔时间需要分别考虑。根据板材厚度及所要求的切缝宽度,设定好孔径大小,以 10~12 mm 厚陶瓷、0.2~0.3 mm 孔径大小为例,首孔时间应控制在 0.5 s 以内,后续通孔因通过与前一孔的叠加实现材料切断,可通过叠加的边界部分释放应力,通孔时间可缩短至 0.1~0.2 s,以此理论最大速度可以达到 15 mm/min,基本满足加工效率。实验中,在设定值的基础上还需要根据 CCD 高速摄像的动态分析结果,以首孔质量和打穿通孔的实际脉冲数进行打孔时间、工件/激光头移动速度的调整,以满足实用化的切割效率。

4.2.4 焦点位置

焦点位置的选择主要考虑对打孔深度和锥度的影响,用以提高切割深度和改善切缝的垂直度。实验中采用长焦距 190 mm(7.5") 聚焦镜,焦深可达 8 mm 左右。一般焦深范围之内,切割时尽可能考虑让焦点处于材料上表面,此时可用最少的脉冲数完成首孔打通,后续脉冲则用来去除临近出光口的材料,以减少孔的锥度。但是随着焦点位置的提高,激光传输到下层表面的能量密度会降低,易造成非平衡态的热积累,焦点位置下移可以减少纵向温度梯度。焦点位置的穿孔临界值为 -5 mm,实验中调整焦点位置为 -8 mm,在离材间隙为 1 mm 时,实际聚焦位置为工件上表面以下约 7 mm 处,对于 10 mm 左右的陶瓷厚板可获得较好的切断效果。因此,离散通孔激光分离技术中,虽然焦点位置确定基本遵循常规激光切割技术规律,但仍需根据板材厚度和切缝平行度的要求进行实际调整。

综上所述,对于 10~12 mm 厚 Al₂O₃ 陶瓷厚板,获得优化通孔密排切割工艺参数为:脉冲峰值功率 2.7~3.5 kW,脉冲频率约 50 Hz,脉冲占空比 30%~50%,离散通孔间距 0.03~0.05 mm,通孔时间 0.1~0.5 s,激光束孔间移动速度 3~7 mm/s。

5 结 论

研究采用激光离散通孔密排技术成功地实现了

包括直线、曲线及尖角等自由路径的厚板陶瓷无损切割。切缝断面存在易脱落熔凝层, 断面上的裂纹及由熔化材料所形成的周期性条纹仅存在于该熔凝层, 没有扩散到材料基体内部, 垂直于切缝表面存在有 4 个显微特征差异明显的热传导影响区域。通过 CCD 高速摄像分析方法, 分析了离散通孔激光分离技术的切割过程和工艺参数优化, 在保持足够切断材料的峰值功率条件下, 调整占空比, 减少激光的平均输出功率, 可减少材料的热积累、热变形和热应力, 进而减少热影响区及产生断裂的可能性, 达到无损切割目的。研究证明, 合适的激光加工工艺方法和参数优化可以实现厚板陶瓷复杂图形的无损加工。

参 考 文 献

- Sheng Xiaomin. High speed and deep grinding of engineering ceramics[J]. *World Manufacturing Engineering & Market*, 2009, **5**: 57~63
盛晓敏. 工程陶瓷的高速深切磨削 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2009, **5**: 57~63
- Guo Dong, Shao Tianmin, Li Longtu *et al.*. Investigation of the drilling conditions of piezoelectric ceramics by pulsed Nd:YAG laser [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2002, **24**(2): 104~138
郭 栋, 邵天敏, 李龙土等. 压电陶瓷的 Nd:YAG 准脉冲激光打空的研究[J]. 压电与声光, 2002, **24**(2): 104~138
- N. N. Nedialkov, M. Sawczak, M. Jadrage *et al.*. Effect of laser drilling on surface and material properties of AlN ceramics [C]. *SPIE*, 2005, **5958**: 361~367
- Atsuki Yamamoto, Hiroyuki Hayashikawa, Hitoshi Hongu. Experimental study on ceramics processing by using high power CO₂ laser beam[C]. *SPIE*, 2003, **4830**: 424~428
- Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huadong *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(10): 1441~1445
马南钢, 王希军, 丁华东等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1441~1445
- I. Black, K. L. Chua. Laser cutting of thick ceramic tile[J]. *Opt. Laser Technol.*, 1997, **29**(4): 193~205
- Zhang Shan, Kang Shaoying. Experimental studies of laser processing of constructional 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
- Zhu Bo, Qi Litao, Wang Yang. The experimental study of water-assisted laser machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2003, **12**: 73~74
朱 波, 齐立涛, 王 扬. 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
- Hong Lei, Li Lijun. A study of laser cutting engineering ceramics [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1999, **31**(8): 531~538
- Xie Xiaozhu, Li Lijun, Fang Shiyin *et al.*. Cutting of nonmetallic plates by medium and low power level CO₂ lasers[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2): 236~239
谢小柱, 李力钧, 方石银等. 中低功率 CO₂ 激光切割非金属材料[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2): 236~239
- R. Akarapu, A. E. Segall. Numerical simulations of an active-stressing technique for delaying fracture during cutting of alumina [J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2006, **128**(1-4): 921~927
- C. Dutto, E. Fogarassy, D. Mathiot. Numerical and experimental analysis of pulsed excimer laser processing of silicon carbide[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2001, **184**(1-4): 362~366
- J. F. Li, L. Li, F. H. Stott. A three-dimensional numerical model for a convection-diffusion phase change process during laser melting of ceramic materials[J]. *Internat J. Heat Mass Tran.*, 2004, **47**(25): 5523~5539
- A. Kotousov, J. W. H. Price. Stress intensity factor for semi-infinite crack formed by moving thermal source[J]. *Internat J. Fracture*, 1998, **90**(3): 39~42
- Liu Jian, Lu Jian, Ni Xiaowu *et al.*. Thermal stress cleaving of Al₂O₃ ceramic plate by pulsed laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(5): 1398~1403
刘 剑, 陆 建, 倪晓武等. 脉冲激光热应力切割 Al₂O₃ 陶瓷板[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1398~1403
- Zhang Mingfeng, Zhang Shengxiong, Zheng Shaojia *et al.*. Investigation of optimized cutting conditions of Al₂O₃ ceramic plate by pulsed CO₂ laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2000, **A27**(11): 1045~1049
张铭峰, 张胜雄, 郑邵家等. CO₂ 激光控制断裂切割氧化铝陶瓷基板最佳条件的探讨 [J]. 中国激光, 2000, **A27**(11): 1045~1049
- V. Pereles-Santiago, M. Washington, P. Brugn *et al.*. Faster and damage-reduced laser cutting of thick ceramics using a simultaneous prescore approach [J]. *J. Laser Appl.*, 2005, **17**(4): 219~224
- P. Brugn, G. Cai, A. E. Segall. Controlled-fracture of prescored alumina ceramics using simultaneous CO₂ lasers[J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(3): 236~241
- J. Lawrence, A. A. Peligrad, E. Zhou *et al.*. Prediction of melt depth in selected architectural materials during high-power diode laser treatment[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **35**(1): 51~62