

文章编号: 0258-7025(2008)09-1401-08

激光加工陶瓷裂纹行为的理论分析及实验验证

闫胤洲 季凌飞* 鲍勇 蒋毅坚

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 通过建立脉冲激光陶瓷打孔二维温度场模型, 计算了相应的热应力分布, 预测了打孔过程中的两种裂纹形态——径向裂纹和环形裂纹, 并由此预测出激光脉冲切割过程中的两种裂纹扩展方式——发散型和回归型, 提出通过降低加工处温度、减少热影响区以及增大孔径(或切缝宽度), 可以达到降低热应力, 抑制加工裂纹产生的目的。通过讨论模型参数和激光加工工艺参数之间的对应关系, 提出低占空比、高辅助气体压力和离焦加工是激光加工工艺参数优化的基本方向, 通过对氧化铝陶瓷和单晶硅的激光加工实验, 对裂纹的产生及扩展预测进行了验证, 并对加工参数优化实现了陶瓷的激光无裂纹加工。

关键词 激光技术; 激光加工陶瓷; 裂纹行为; 温度场模型; 切割实验

中图分类号 V 261.8; TQ 174.75 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1401

Theory Analysis and Experiment Verification on Crack Characters during Laser Processing Ceramics

Yan Yinzhou Ji Lingfei Bao Yong Jiang Yijian

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract A thermal-stress field of laser drilling ceramic is calculated by building a two-dimensional (2D) thermal field model. Two types of cracks during pulsed laser drilling are predicted. One is along radial direction, and the other is along tangent direction. Further more, spreading characteristics of two types of cracks, emanative and regressive, during pulsed laser cutting are analyzed and predicted. It is concluded that the restraint of cracks can be achieved by reducing temperature of processing point, decreasing size of heat affected zone and increasing hole diameter (or kerf width). Based on analyzing parameters of the theoretical model, relationships between model parameters and processing parameters are discussed. It is proposed that optimizing laser processing parameters should depend on lower duty cycle, higher gas pressure and focal position outside the workpiece. The prediction results of crack formation and spread analyzed by the mathematic model are accordant with the experimental results of laser drilling and cutting of alumina ceramic and single-crystal silicon. Laser crack-free processing of ceramics is achieved by optimizing laser processing parameters based on the theoretical model.

Key words laser technique; laser processing of ceramics; crack characters; temperature field mathematic model analysis; processing experiment

1 引言

自 1976 年 E. Lambert 等^[1]将激光加工引入玻璃等广义陶瓷体的切割研究以来, 陶瓷激光加工技术的研究一直方兴未艾。但由于陶瓷本征的高硬脆

特性, 结构中难以发生显著的位错运动, 即使对于非接触式的激光加工技术, 也会由于辐照中在材料局部所产生的较大热应力而导致裂纹的产生, 直接影响材料的各种性能, 严重阻碍了陶瓷激光加工技术

收稿日期: 2007-10-31; 收到修改稿日期: 2008-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(10674041)和北京市科技新星计划(2006B11)资助项目。

作者简介: 闫胤洲(1985—), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事激光材料加工技术方面的研究。

E-mail: yzyan@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 蒋毅坚(1962—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光制备与加工材料技术及激光拉曼光谱学等方面的研究。E-mail: yjjiang@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ncltji@bjut.edu.cn

的发展。近二十年来,研究人员力求采用各种方法抑制裂纹的产生,如水辅助切割^[2]、多道切割^[3,4]以及热应力切割^[5,6]等,但其各有局限,与传统加工方法相比在加工效率和加工复杂程度上并不占优。而对激光加工过程中理论分析主要集中在温度场及热应力切割应力分布的有限元数值模拟方面^[7~10],对于激光加工中裂纹的产生形态及扩展方式的分析并不多见^[11~13]。本文针对目前陶瓷激光加工中最常见的脉冲激光加工方式,建立激光打孔、切割过程的数学模型,通过其解析解分析预测应力分布及其所引起的裂纹形态和扩展行为,并通过实验加以验证,提出了优化激光加工工艺的基本方法。

2 激光加工的热应力模型及裂纹分析

2.1 激光打孔的热应力模型及参数分析

激光打孔在高峰值功率的脉冲激光作用下可在极短时间内完成(如厚10 mm氧化铝的打孔过程可在0.06 s内完成),穿孔瞬间孔内材料迅速熔化,可认为厚度方向的温度近似均匀,因此将打孔过程简化为二维平面模型。由于陶瓷材料的低导热性以及激光打孔时间的短暂性,打孔完成后在孔径周围一个有限区域内材料温度升高,而这个区域以外仍为室温。该假设对长波长高峰值脉冲输出激光快速打孔各种材料均适用。对于不同的材料和不同的工艺参数,由于材料的导热性以及激光输入能量的不同,会在热影响区域大小以及热影响区内温度上存在一些差异,但总体趋势一致。考虑 TEM₀₀ 光斑的轴对称性,对于导热性各向同性的陶瓷来说,其热影响区也应该是轴对称的,孔径和热影响区的示意图如图1所示。

由上述分析确定边界条件

$$\begin{cases} T(b) = T_{mc} \\ T(d) = 0 \\ \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=d} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 b 为打孔半径,由于孔径边缘材料虽有熔化但由于喷嘴气流等关系不能完全吹除(将形成重凝层),因此孔径边缘的温度应略高于材料熔点 T_m , 设为 T_{mc} ; d 为描述热影响区的半径,热影响区边缘为室温(即背景温度设为0);最后一个条件表示在热影响区边缘的温度变化趋势不应该是突变的,即它的一阶偏导数应该存在并且连续,由于热影响区以外的温度为一定值,其偏导数为0,所以在热影响区边缘的偏导数也为0。

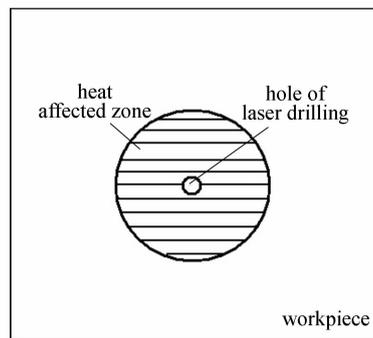


图1 激光打孔二维模型示意图

Fig. 1 Sketchmap of laser drilling 2D model

轴对称温度场的温度分布只和半径 r 有关,采用多项式拟合不稳定温度场

$$T(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式中,解出(2)式中的三个常数,得到温度分布

$$T(r) = \frac{T_{mc}}{(d-b)^2} d^2 - 2d \frac{T_{mc}}{(d-b)^2} r + \frac{T_{mc}}{(d-b)^2} r^2 = \frac{T_{mc}}{(d-b)^2} (r-d)^2, \quad (3)$$

由于材料的温度分布具有轴对称性且沿 z 轴方向无变化,采用柱坐标系 r, θ, z 描述时,所有物理量仅是坐标 r 的函数,因此热应力问题可以简化为平面轴对称热弹性问题^[14],其应力场满足

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \int_b^r T(r') r' dr' + D_1 + \frac{D_2}{r^2} \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left[-T(r) + \frac{1}{r^2} \int_b^r T(r') r' dr' \right] + D_1 - \frac{D_2}{r^2}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 σ_r, σ_θ 分别为径向和切向的正应力, α 为线膨胀系数, E 为拉压弹性模量, μ 为泊松比, $T(r)$ 为热影响区内的温度分布, D_1 和 D_2 为两个由边界条件确定的常数。

由于孔边缘处是径向自由的,径向的应力为0;热影响区边缘处温度为0,认为此处材料为刚性,因此相应的切向应力亦为0,故设边界条件为

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=b} = 0 \\ \sigma_\theta|_{r=d} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

将边界条件(5)和温度函数(3)代入到应力场分布(4),解得径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 的解析解

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{T_{mc}}{12(d-b)^2(b^2+d^2)} \frac{b-r}{r^2} \times [(3b^2-9d^2)r^3 + (3b^3-8b^2d-9bd^2+16d^3)r^2 + (3b^2d^2+16bd^3-5d^4)r + 3b^3d^2-8b^2d^3-5bd^4],$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{T_{mc}}{12(d-b)^2(b^2+d^2)} \frac{r-d}{r^2} \times$$

$$[(3d^2-9b^2)r^3 + (7b^2d-5d^3)r^2 +$$

$$(3b^4+19b^2d^2-8b^3d)r + 3b^4d-5b^2d^3-8b^3d^2],$$
(6)

对应的应力趋势图如图 2 所示(为了简化计算,设

$\frac{\alpha E}{1-\mu} T_{mc} = 1, b = 0.1 \text{ mm}, d = 10 \text{ mm}$ 来观察应力趋势)。

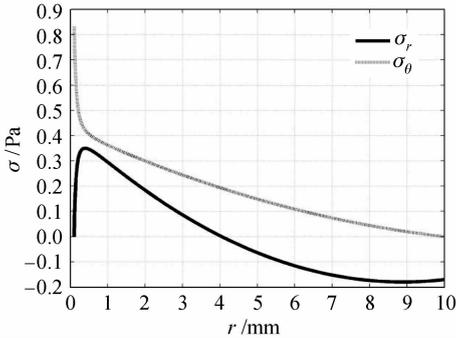


图 2 热应力分布图

Fig. 2 Thermal-stress field plot

分别讨论式(6)中与激光加工参数有关的三个系数,即孔径边缘温度 T_{mc} ,孔半径 b 和热影响区半径 d 。

T_{mc} 对热应力的影响,如图 3 所示(为了简化计算,设 $\frac{\alpha E}{1-\mu} T_m = 1, b = 0.1 \text{ mm}, d = 10 \text{ mm}$ 来观察应力趋势)。随着孔径边缘温度的提高,切向和径向的拉应力都有显著提高,将增加裂纹产生的可能。因此要尽量降低孔径边缘温度接近熔化温度以减少材料中的拉应力,抑制裂纹的产生。

孔径大小 b 和热影响区大小 d 对应力分布的影响如图 4 所示。当热影响区的大小减少时,两个方向的应力都有变小的趋势(如图 4(a),(b),(c)所示);从图 4(d)和(e)中可以看到,增大孔径也可以降低两个方向的拉应力;特别地,当热影响区的大小($d-b$)不变,仅是增大孔径时也可以有效地降低打孔的拉应力(如图 4(f)和(g)所示)。由(3)式可知在这种情况下温度场分布只是存在平移并不发生变化,即只要将温度场分布向外平移就可以降低热应力。因此减少热影响区大小、增大打孔孔径或向外平移温度分布都可以抑制裂纹的产生。

切割的热应力分析由于切缝的存在而变得复杂,对于这种非轴对称的温度应力场的计算一般很难得到解析解,因此需要将切割过程的温度场以及应力分布在近似范围内进行合理简化。切割过程

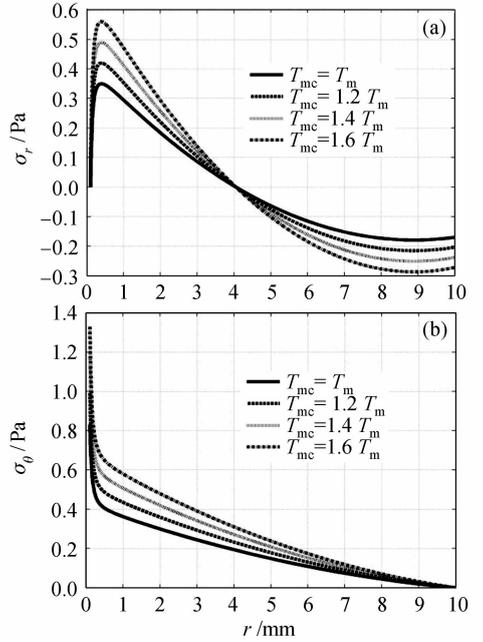


图 3 温度对径向应力(a)和切向应力(b)的影响
Fig. 3 Effect of temperature on thermal-stress of (a) radial and (b) tangent direction

中,冷却气体对切缝的强冷却效果会导致切缝边缘具有温度较低的重凝层,因此可以将不在光斑覆盖范围内的切缝边缘看成是刚性的且一般切缝宽度很窄(0.1mm左右),又因为激光切割陶瓷一般采用脉冲方式,因此可以将脉冲激光切割近似为一系列打孔过程。上述打孔热应力分析即可适用于脉冲激光切割,不同之处在于脉冲激光切割过程中脉冲间隔很近,会有热积累效应,即前一个脉冲作用的温度场会与后一个脉冲作用的温度场相叠加,导致加工处温度不断升高。从图 3 中可知温度的升高会导致两个方向拉应力的显著提高,而增加裂纹的产生。因此对脉冲切割的参数优化强度要高于打孔的参数优化,但基本思想还是:降低切缝边缘温度、减少热影响区以及增大切缝宽度。

2.2 激光加工过程的裂纹行为预测

从图 2 中可以看到,加工区域附近产生了很大的切向拉应力,这种应力的作用使得材料加工边缘的薄弱点成为裂纹的起点产生张开型裂纹,开裂的方向为径向,如图 5 中沿径向的裂纹处所示。而图 2 中所示径向应力则在一定半径内迅速提高到拉应力的最大值,产生环形裂纹或是改变已扩展裂纹的传播方向。图 2 所示应力较大的位置集中在距离加工处很近的一个环形区域,裂纹也将会在此区域出现,如图 5 中沿切向的裂纹处所示。由于模型并没有针对某种特定的材料,所以无论对于何种材料,在

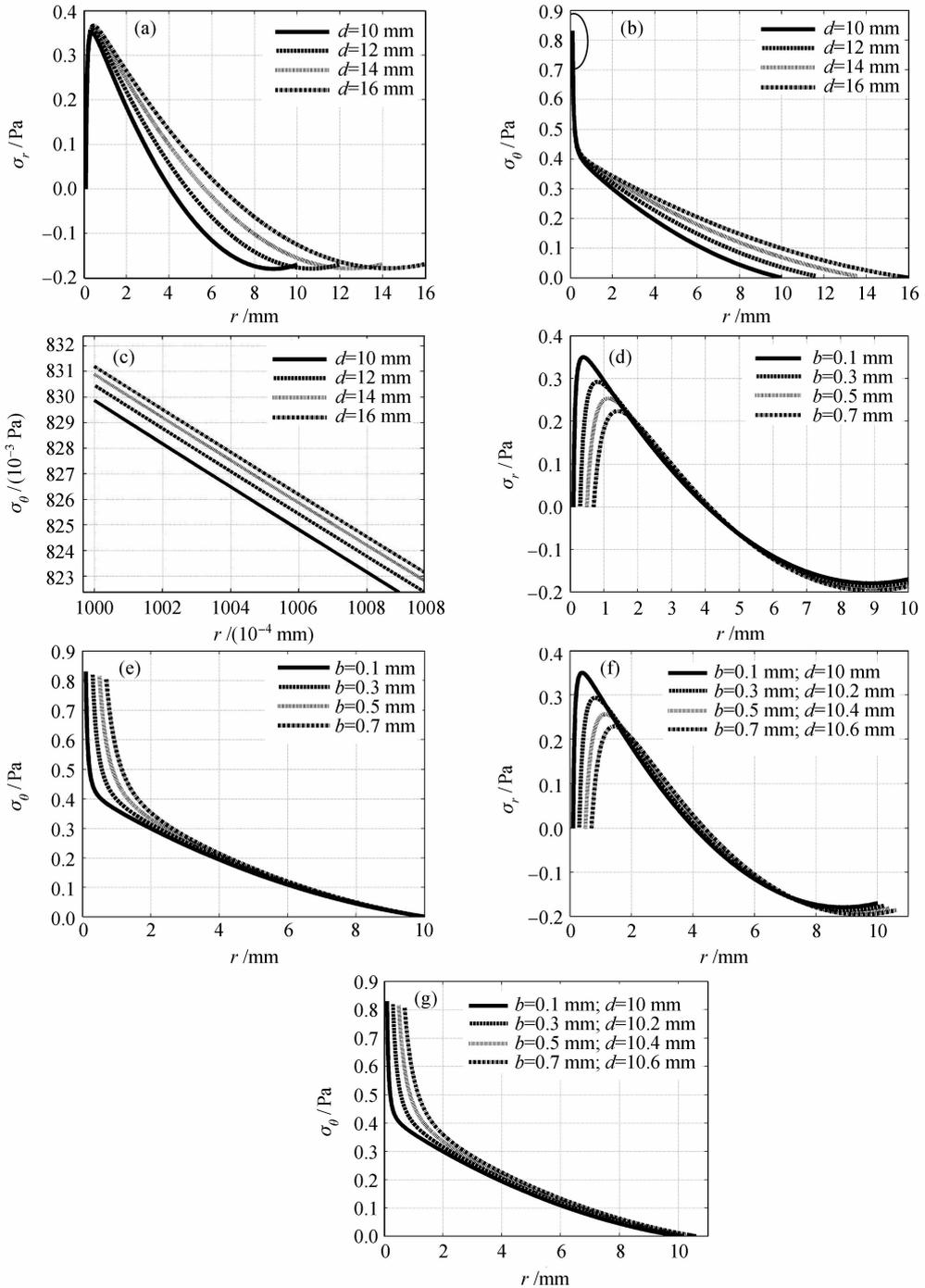


图4 热影响区和孔径对应力分布的影响曲线。(a) 热影响区半径 d 对径向应力的影响;(b) 热影响区半径 d 对切向应力的影响;(c) 图4(b)中切向应力前端局部放大图;(d) 孔径大小 b 对径向应力分布的影响;(e) 孔径大小 b 对切向应力分布的影响;(f) 热影响区位置对径向应力分布的影响;(g) 热影响区位置对切向应力分布的影响

Fig. 4 Effect of heat affected zone and hole radius on thermal-stress. (a) effect of heat affected zone radius d on thermal-stress of radial direction; (b) effect of heat affected zone radius d on thermal-stress of tangent direction; (c) an enlarge figure of Fig. 4(b) on tangent stress fount; (d) effect of holes radius b on thermal-stress of radial direction; (e) effect of holes radius b on thermal-stress of tangent direction; (f) effect of heat affected zone position on thermal-stress of radial direction; (g) effect of heat affected zone position on thermal-stress of tangent direction

激光打孔过程中,都会在其热影响区的一定范围内产生径向和切向拉应力,当拉应力超过材料的断裂

阈值时将导致环形和径向裂纹的产生。

脉冲切割中每个脉冲产生的热应力分布均应满

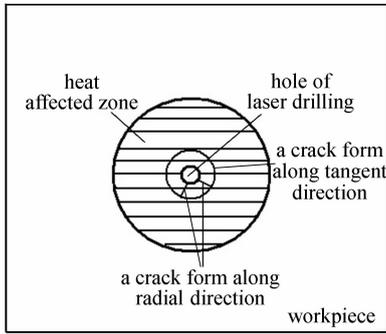


图 5 裂纹形态趋势图

Fig. 5 Sketch map of cracks forms

足(6)式,裂纹沿拉应力极大值进行扩展。根据应力极大值的组合,将出现两类裂纹扩展方式——发散型和回归型。

发散型扩展方式如图 6(a)所示。由图 2 所示打孔应力分布可知:加工边缘处为以某一角度开裂而产生径向裂纹,随着光斑的移动裂纹尖端切向应力方向发生改变(图 6(a)中所标半径方向),裂纹扩展的角度变大,引导裂纹进一步向远离加工区域的方向扩展,最后得到呈放射形状的裂纹。回归型扩展方式如图 6(b)所示,裂纹初始扩展与发散型裂纹扩展类似,但扩展到达径向应力最大处,裂纹在此处发生偏转,从径向扩展转为切向扩展;随着热影响区的继续移动,切向裂纹的扩展趋于与切缝平行,当裂纹尖端的速度小于切割速度时,切向裂纹扩展有向切缝位置扩展的趋势,则裂纹又偏转到径向方向,在切向应力和移动热影响区的共同作用下,裂纹将重新回归到切缝位置。由于该类裂纹扩展距离有限,对材料加工质量的影响要小于发散型裂纹。实际上两种裂纹初始的扩展过程是一致的,由于在径向应力最大处两个方向的应力相近,因此裂纹有两种近

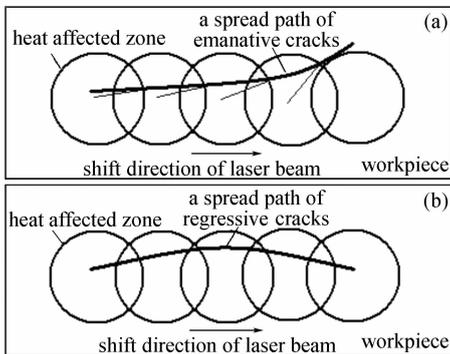


图 6 (a) 发散型裂纹扩展方式;

(b) 回归型裂纹扩展方式

Fig. 6 (a) Spread mode of emanative cracks;

(b) spread mode of regressive cracks

似等概率的扩展方向,该处裂纹不同的偏转现象形成了两种扩展类型。

3 实验结果及讨论

3.1 实验装置及实验对象

实验中采用峰值功率为 3500 W 的 Slab CO₂ 激光器(德国 Rofin 公司)作为加工能量源,激光器光束模式为 TEM₀₀ 模,激光输出方式可以为连续或脉冲,脉冲频率最高可达 5 kHz,配以六轴联动三维加工机床作为加工平台,加工精度可达 0.01 mm。加工材料分别是厚度为 4 mm 的致密氧化铝陶瓷(密度为 3.73 g/cm³)和厚度为 0.48 mm 的单晶硅。

3.2 实验结果

对氧化铝陶瓷和单晶硅进行打孔实验,观察裂纹的基本形态,如图 7 所示。从图 7(a)中可以看到径向裂纹的扩展以及在径向拉应力作用下的偏转行为;从图 7(b)中可以清晰看到在单晶硅中出现的环型裂纹,与理论预测两种打孔过程中的裂纹行为相吻合。

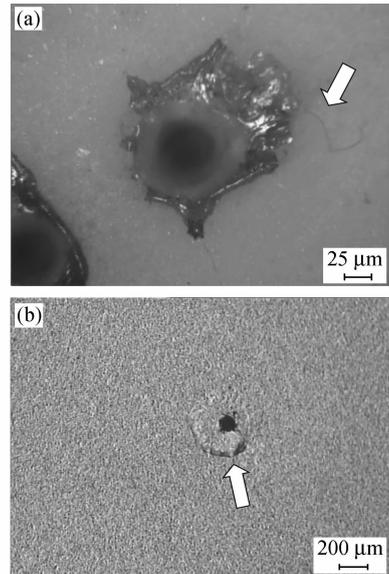


图 7 脉冲激光打孔过程中两种形态的裂纹。(a) 氧化铝陶瓷打孔的径向裂纹;(b) 单晶硅打孔的环型裂纹

Fig. 7 Two types of cracks forms during pulsed laser drilling. (a) crack along radial direction with laser drilling on alumina; (b) crack along tangent direction with laser drilling on single-crystal silicon

使用相同工艺参数进行脉冲切割,观察了切割后的裂纹形态,如图 8 所示。从图 8(a)可以看到切割氧化铝陶瓷的发散型裂纹扩展;从图 8(b)可以看到在单晶硅的切割过程中出现的回归型裂纹,这两

种脉冲激光切割中裂纹扩展的形式与理论预测的扩展方式基本一致。

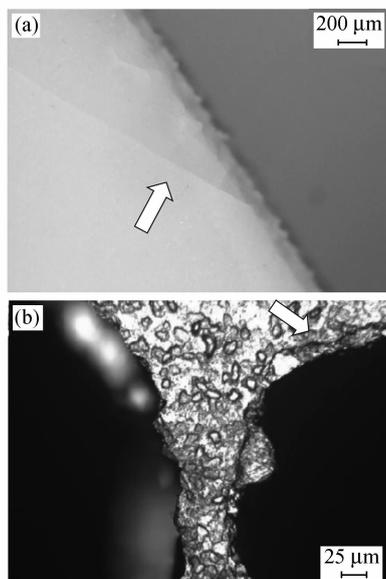


图 8 脉冲激光切割中两种裂纹扩展方式。(a) 氧化铝陶瓷脉冲切割的发散型裂纹；(b) 单晶硅脉冲切割的回归型裂纹

Fig. 8 Two types of crack spread during pulsed laser cutting. (a) an emanative crack of pulsed laser cutting on alumina; (b) a regressive crack of pulsed laser cutting on single-crystal silicon

从实验中可以看出,氧化铝陶瓷更容易产生径向裂纹以及发生发散型裂纹扩展,而单晶硅则更容易产生环形裂纹以及发生回归型裂纹扩展。初步认为这是由于两种材料的微观结构不同导致的,多晶多相的氧化铝陶瓷对切向应力更为敏感,因而容易在切向应力的作用下形成裂纹并扩展;而单晶硅对径向应力更为敏感,因此容易在径向应力的作用下形成裂纹并扩展。

3.3 激光加工参数优化的讨论及实验结果

激光加工陶瓷中需要优化的参数涉及:峰值功率、占空比、焦点位置和辅助气体压力。峰值功率、占空比和辅助气体压力会对加工边缘温度 T_{mc} 产生影响,峰值功率与占空比的乘积表示为平均功率,平均功率描述激光注入材料中的热量,减少平均功率可以降低材料加工的温度。但由于激光输出功率要达到熔化材料所需的阈值,所以峰值功率不能过低,因此只能降低占空比来实现降低平均功率的目的,而且占空比降低时每个脉冲作用的时间将减少,辅助气体可以更好地冷却,与连续激光相比可以降低注入到材料中的热量。增大冷却气体压力可形成强对流效果,也降低加工材料处的温度。因此降低孔

边缘温度 T_{mc} 抑制裂纹产生的具体方法是通过降低占空比减少平均功率并增大冷却气体压力来实现的,在可能的情况下可通过进一步提高峰值功率并降低占空比^[15]以减少激光对材料的热输入量;辅助气体压力还影响到热影响区大小,当提高气体压力时,冷却效果将提高,减少热影响区大小即减少热影响区半径 d ,实现降低热应力减少裂纹的产生;由于聚焦光斑的发散,焦点位置影响打孔孔径,通过离焦打孔的方法可实现增大孔径减少热应力抑制裂纹产生的目的;特别地,由图 4(f)和(g)可知在不增大冷却气压时,采用离焦打孔将热影响区向外平移,同样可以降低拉应力抑制裂纹产生,防止由于气压过大而产生机械力断裂的问题。

在脉冲切割过程中,由于脉冲间隔很小,所以会在加工处存在明显的热积累效应,易在切割过程中产生大的拉应力形成裂纹,因此要进一步地降低激光输出占空比、增大气体压力并进行离焦加工,最大限度地降低热应力以抑制裂纹的产生。但是在厚板 (>5 mm)切割时,一方面需要输出较高平均功率实现熔化纵向较多的材料,另一方面冷却气体存在机械力作用,不能使用过大的气体压力实现强冷却,热积累无法避免,易引起裂纹的产生和扩展。实现厚板陶瓷的无裂纹切割还需要寻找新的低热输入量的激光加工方式。

3.4 不同工艺参数对加工结果的影响和优化参数的实验结果

针对讨论中各种工艺参数对应的模型参数,通过观察在不同工艺条件下的陶瓷断裂情况,得到实验结果:

1) 采用高占空比、高峰值功率和降低辅助气体压力来得到加工处高温度和大的热影响区,在对氧化铝陶瓷的切割过程中发现极易产生陶瓷材料的整

表 1 激光打孔最佳工艺参数

Table 1 Optimal parameters of laser drilling

Workpiece	Alumina	Silicon
Focal position /mm	-3	-0.5
Focal length /mm	127	127
Nozzle diameter /mm	1.5	1.5
Nozzle distance /mm	2	1
Peak power /W	3500	2100
Pulse frequency /Hz	50	500
Duty cycle /%	15	10
Assistant gas	N ₂	N ₂
Gas pressure /Pa	2×10 ⁵	10 ⁵
Drilling time /s	0.1	0.1

体性断裂。通过降低占空比、增大辅助气体压力,如表 1 所示,可以有效地抑制裂纹的产生,得到无裂纹的密集孔阵列,如图 9(a)所示。

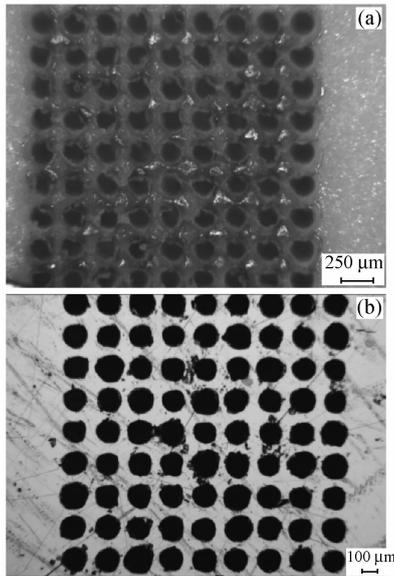


图 9 密集激光打孔阵列。(a) 氧化铝陶瓷;(b) 单晶硅

Fig. 9 Holes dense-array of laser drilling.

(a) alumina ceramic; (b) single-crystal silicon

2) 通过对单晶硅的不同焦点位置的实验,发现采用焦点位置处于材料内部时产生裂纹的工艺条件,将焦点调至正离焦或负离焦时,裂纹将不再出现,从表 1 中可以看出,当焦点位于单晶硅表面以上 1 mm 位置时,工艺参数最佳。通过对焦点位置的优化得到了单晶硅的无裂纹密集孔阵列,如图 9(b)所示。

4 结 论

结合理论模型和实验,得到以下基本结论:

1) 在脉冲激光打孔时可能出现的两种裂纹:从孔边缘开裂的径向裂纹;在一定半径处出现的环形裂纹;

2) 在脉冲激光切割时可能出现的两种裂纹扩展方式:沿切割方向由切向应力产生的发散型扩展;沿切割方向由切向和径向应力共同作用的回归型扩展;

3) 降低孔边缘温度、增大打孔孔径或切缝以及减少热影响区大小都可以有效降低拉应力,抑制裂纹产生。对应激光加工工艺参数的优化方向为降低脉冲的占空比、增大冷却气体压力;特别地,适当调整焦点位置实现离焦加工也可降低热应力,该方法可以避免由于辅助气体压力过大带来机械应力而产生裂纹。

生裂纹。

由于陶瓷结构各异,其裂纹产生的热应力阈值的定量计算及其扩展方式的准确预测非常复杂,但尽可能降低拉应力是减少裂纹的有效方法。本文忽略了材料的微观结构,给出了激光打孔过程中裂纹产生普遍形态及切割过程中裂纹扩展的一般方式,通过对模型的讨论提出了减少热应力抑制裂纹产生的一般基本思路和优化工艺参数的基本方法,并通过实验实现了硬脆材料的无裂纹激光加工。提出的陶瓷裂纹产生的概念不拘于陶瓷的种类,是所有陶瓷都会产生的裂纹形式,但是由于陶瓷材料结构的复杂性和多样性,针对某种特殊的陶瓷材料还会有更为复杂的裂纹形成机制及抑制方法。

参 考 文 献

- 1 E. Lamber, J.-L. Lambert, B. De Longueville. Severing of glass or vitrocryalline bodies [P]. US, Patent, 1976, 3935419;1~8
- 2 Noboru Morita, Shuichi Ishida, Yasutomo Fujimori *et al.*. Pulsed laser processing of ceramics in water [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **52**(23):1965~1966
- 3 Hong Lei, Li Lijun. A study of laser cutting engineering ceramics [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**:531~538
- 4 P. Brugan, G. Cai, R. Akarapu *et al.*. Controlled-fracture of prescored alumina ceramics using simultaneous CO₂ lasers [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, **18**(3):236~241
- 5 Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huadong *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 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
- 6 Chang Mingfeng, Chang Shengshung, Cheng Chaochia *et al.*. Investigation of optimized cutting conditions of Al₂O₃ ceramic plate by pulsed CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):1045~1049
张铭峰,张胜雄,郑劭家等. CO₂ 激光控制断裂切割氧化铝陶瓷基片最佳条件的探讨[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):1045~1049
- 7 Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin. Simulation of the temperature field in laser cutting of brittle materials [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(4):599~605
叶圣麟,马军山,黄鑫. 激光切割脆性材料的温度场模拟[J]. *光学技术*, 2007, **33**(4):599~605
- 8 Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin *et al.*. Finite element simulation of thermal stress field in cutting LCD glass substrate by laser [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(4):267~271
叶圣麟,马军山,黄鑫等. 液晶显示玻璃基板激光切割热应力场的有限元仿真[J]. *应用激光*, 2006, **26**(4):267~271
- 9 Liu Feng, Chen Yusheng, Wu Zhensen *et al.*. Analysis of the laser parameters choice for a rotational thin cylinder shell under CW-laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1052~1058
刘峰,陈雨生,吴振森等. 强激光加热旋转薄柱壳的参量选择分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1052~1058
- 10 Li Gao, Jiayang Yu, Yongkang Zhang. Numerical simulation and experiment of TA2 sheet forming under laser shock [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8):472~475
- 11 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
- 12 G. Lu, E. Siores, B. Wang. An empirical equation for crack formation in the laser cutting of ceramic plates [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **88**:154~158
- 13 Zhou Yan, Liu Xiaosheng, Zhang Xiankui *et al.*. Study on the tangent cracks of quartz with laser beam cutting [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(4):73~75
周 岩, 刘晓胜, 张显奎 等. 激光切割石英的切向裂纹研究[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(4):73~75
- 14 Zhou Yichun. *Solid Mechanics in Materials* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 566~571
周益春. *材料固体力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 566~571
- 15 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