

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0143-04

激光在脆性材料加工中的应用

朱银波 周建忠 黄 舒 樊玉杰 蒋素琴

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 脆性材料由于其特殊的性能在工业产品中的应用日益增多,相对于金属材料的加工技术,目前对非金属脆性材料的加工工艺研究较少,至今缺少高效的加工手段。随着激光技术的发展,激光被公认为是加工脆性材料的一种很有潜力的加工工具。介绍了激光在脆性材料分离、成形、喷丸改性中应用研究的最新成果,分析了其加工原理和技术特点。讨论了激光弯曲脆性材料过程中影响弯曲角度的几个因素,提出了在激光喷丸脆性材料中应用位错理论解释激光使脆性材料改性的机理,最后指出了目前激光加工脆性材料研究中存在的问题,预测了激光加工脆性材料的发展前景。

关键词 激光技术;脆性材料加工;分离;成形;喷丸处理

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0143

Laser Application in Processing Brittle Materials

Zhu Yinbo Zhou Jianzhong Huang Shu Fan Yujie Jiang Suqin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Brittle materials have been applied more and more popularly because of their special properties, relating to machining technique of metal materials, there is little study on processing for nonmetal brittle materials, and effective machining tools lack. With the development of laser technology, laser is becoming a potential processing tool for brittle materials. The principle of processing, characteristics and research status on brittle materials with laser separation, laser bending and laser peening are reviewed. Affecting factors of processing quality in laser separation and bending, such as laser energy, scanning velocity and beam mode, are discussed, the theory of dislocation is used to explain the performance improved in brittle materials after laser peening. Finally, some problems of laser application in nonmetal brittle materials processing are pointed out and future developments are forecasted.

Key words laser technology; brittle material processing; separation; forming; peening

1 引 言

延伸率是衡量材料塑性能量的指标,工程上通常把延伸率小于 5% 的材料,如陶瓷、玻璃、石材、半导体硅片等称为脆性材料^[1]。激光在金属材料加工工艺方面的研究已日趋完善,如激光切割成形金属材料、激光表面强化提高金属材料的机械性能等,而对于激光在脆性材料加工工艺中的研究则相对较少,因为脆性材料的塑性较低,激光加工时容易产生裂纹和崩裂等现象,导致加工质量控制困难。本文

主要介绍几种激光加工脆性材料的工艺原理以及特点,并提出了后续工作中需要注意的几个方面。

2 激光分离脆性材料

脆性材料如 Si、玻璃、陶瓷、石英、GaN 等由于具有热膨胀系数小、强度高、硬度大与光电性能优异等特点而被广泛地应用于光电子、生物医疗与国防等领域。传统的分离技术如金刚石砂轮划片、水喷、超声加工等,由于产生断片、边部碎屑与显微裂纹等

作者简介: 朱银波(1987—),女,硕士研究生,主要从事激光加工脆性材料方面的研究。

E-mail: zhuyinbobo@126.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光新技术应用和模具设计制造新方法等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

缺陷,已不能满足半导体工业低成本、高精度与高效率的要求^[2]。而激光微细加工技术以其无接触、热损伤小、切口窄、无碎屑与加工灵活等特点,正逐步成为脆性材料精密加工的关键技术。目前用于分离脆性材料的典型激光微细加工技术包括激光烧蚀切割技术和激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术^[3]。

2.1 激光烧蚀切割技术

激光烧蚀切割脆性材料是利用激光束产生的高密度能量,使材料在短时间内熔化甚至气化,然后用辅助吹气将熔渣吹除,随着激光束的移动而形成切缝,称为激光烧蚀分离法。它具有切速快、切缝窄、切割边缘光滑等优点,因此被广泛地应用于脆性材料的加工领域。但是,激光烧蚀切割脆性材料时由于产生温度差极易在切口断面形成热裂纹,使材料强度大大降低;而且激光烧蚀切割脆性材料是一个高度非线性的过程,要精确预测或分析裂纹产生的机理是相当困难的。因此,近年来,关于激光烧蚀切割脆性材料过程中裂纹的形成机理以及如何消除裂纹已成为研究的焦点,图1为切割时形成裂纹的示意图^[4]。

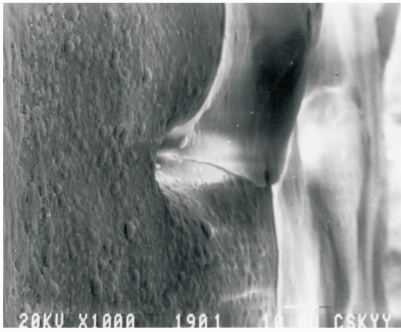


图1 切割裂纹的SEM图^[4]

Fig.1 SEM photo of a crack in cutting ceramics

防止切割裂纹的措施主要有:(1)用冷气吹喷切割部位,使该区域冷却,防止热冲击;(2)用辅助加热法把切割部位的周围区域预热,减少温度差,防止热应力;(3)使照射激光脉冲化,减少热负荷,防止热裂纹。然而在激光切割过程中某些微裂纹是不可避免的,如果裂纹的长度可以限制在晶粒大小以下(通常是几微米),其对强度的影响可以忽略。Hong Lei等^[4]利用具有高峰值功率,高脉冲重复率及适度平均功率的Q开关CO₂激光器对Si₃N₄陶瓷进行多工序激光加工,分析不同激光参数作用下,陶瓷温度与时间的分布规律,发现裂纹长度随切割速率增加而减少,当切割速率增加到一定值,裂纹消失,如图2所示。

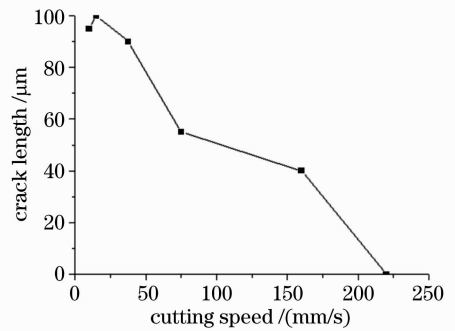


图2 裂纹长度与切割速度之间的关系

Fig.2 Relation between crack length and cutting speed

影响激光烧蚀切割脆性材料的质量因素有很多,如激光功率、切割速度、光斑尺寸、材料厚度、热物理性能及喷嘴孔径等,因此,建立激光切割工艺参数数学模型,对合理选择激光切割工艺参数与优化工艺具有十分重要的意义。

2.2 激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术

该技术是利用CO₂激光作用区由于快速加热与冷却而产生的张应力,实现陶瓷等脆性材料沿着激光扫描路径的分离。由于不是将材料加热至熔点以上高温,可避免熔珠的形成,从而降低材料加工表面的粗糙度,这种分离方式必须控制好激光功率和脉宽。实验中所使用的激光能量比激光烧蚀、激光划片等要小,而切割速度则快得多,因此,在加工脆性材料方面具有较大的潜能。为了进一步降低激光功率,减小热损伤区以及提高分离速度,在切割过程中使用水冷系统加快脆性材料的冷却,从而产生更大的张应力。这种改进为研究激光诱导张应力控制裂纹扩展分离技术注入了新的活力。但是应用这种方法进行脆性材料分离时,脆性材料并不能自动完成分离,而要用机械力或手工将其沿激光扫描的路径掰开,降低了激光切割效率,限制了其工业应用前景。

3 激光弯曲成形脆性材料

激光弯曲是一种利用高能激光束扫描板材表面形成的非均匀温度场所导致的热应力来实现塑性变形的工艺方法。依靠高能激光束对工件的不均匀加热,在变形区引起超过材料屈服强度的内应力,使板料产生变形。它具有无模具、非接触、生产周期短,柔性大等特点。当激光束相对于板料的运动轨迹为直线时,便得到形弯曲件;当运动轨迹不重复或为非直线时,便得到复合弯曲的异形件^[5]。

现阶段虽然对于激光弯曲的研究已经比较广泛,但主要集中在金属材料(主要是传统工程材料)、

合金材料(铝合金,钛合金等),而对脆性材料的涉及很少。随着快速成形技术的发展,使用激光弯曲加工的材料需求日益增长,不仅仅停留在传统的金属材料 and 合金材料上,而且对激光弯曲的脆性材料的研究也取得了一定的进展,特别是硅材料在某些领域也有了应用潜力。

由于脆性材料的特殊性质,能够加工脆性材料的激光器种类比较少,主要集中在 Nd:YAG/VA、CO₂、光纤激光器。现阶段采用 Nd:YAG/VA 主要用于加工硅片。德国 U. Loschner、H. Exner 等^[6,7] 在 2003 年对硅片在高温情况下塑性变形的可行性进行了实验研究,利用连续 YAG 激光器,对单晶硅的成形性能进行了一系列的实验,分析了激光能量、扫描次数、扫描速度、厚度等对弯曲角度的影响^[8,9]。

实验结果表明,在不严重损伤材料表面的条件下,弯曲角度随着激光能量的增大而增大,而且关系近似于满足线性关系。随着扫描次数的增加弯曲角度也随着增加,前一次扫描所引起的增加角度总是比后一次扫描所引起的扫描角度大。扫描速度的快慢直接影响了材料截面上形成的温度梯度的大小,如果扫描速度很快则上表面的温度不够,形成不了足够的热应力,导致没有弯曲变形;如果扫描速度很小,则会在截面上的温度梯度变化很小,使得没有弯曲现象。在可以产生弯曲变形的前提下扫描速度越快,则弯曲角度越小。对于硅片而言,扫描间距有一个临界值,即当每条线的距离为 5 μm 的时候,产生的弯曲角度是最大的,可能是由于在这个线距的条件下热积累效应最有利于实现弯曲。另外陶瓷的弯曲角度对于线距的增大不是特别敏感,只是在线距在 80 μm 以下的时候,弯曲角度才有所增加,而后来则几乎不变。目前,采用弯曲脆性材料的激光器主要是连续激光和百纳秒的脉冲激光,而且要求的输出功率比较小。对于硅片而言,要求连续激光输出功率不能大于 5 W,脉冲激光不能超过 9 W;而陶瓷也不超过 10 W。而且文献中对陶瓷的实验表明,脉冲激光产生的弯曲角度明显小于连续激光产生的弯曲角度,但是脉冲激光对于表面的损害要比连续激光小^[5]。

4 激光喷丸脆性材料

激光喷丸是一种由激光诱导的冲击波压力使材料产生塑性变形的过程,它可以使金属材料的机械性能提高,由于脆性材料的塑性比较低,并且没有足够的冲击压力使位错产生移动,因此到目前为止还

没有将激光喷丸应用于该领域。最近,一种经过改进过的激光喷丸工艺已经用于实验室的硅成形以改变它的位错结构和机械性能,通过实验发现产生了明显的位错现象,并且在喷丸后硅晶的硬度得到了提高。图 3 为激光喷丸硅晶块体的原理^[10],其利用短脉冲($\lambda = 248 \text{ nm}$)激光辐照硅晶表面,表面的吸收层吸收激光能量发生爆炸性汽化,汽化后的蒸气急剧吸收激光能量并形成高温($>10000 \text{ K}$)、高压($>1 \text{ GPa}$)的等离子体,等离子体受到约束层的限制,形成高强度压力冲击波,作用于硅晶表面并向内部传播,由于冲击波压力高达数个兆帕,使材料产生密集、均匀和稳定的位错结构,而硅片在温度超过 790 K 时脆性开始向塑性转化,超过 920 K 时将体现出良好的塑性。

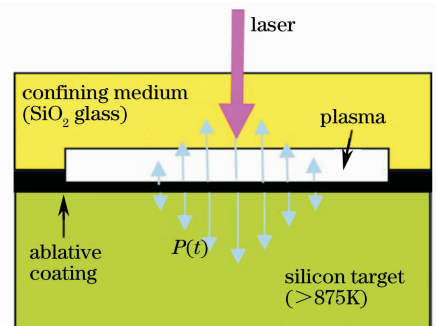


图 3 激光喷丸硅晶原理图

Fig. 3 Schematic of laser shock processing for silicon crystal

为了能更好了解硅晶的激光喷丸机理,还需要激光烧蚀引起的冲击压力和冲击波加载下硅晶的动态响应进行研究。在硅晶内产生塑性变形的困难主要有两个原因:(1)硅晶是脆性材料并且在温度低的情况下不会有位错现象;(2)没有足够高的冲击压力产生位错并使其移动^[11]。Loveridge-Smith 用 X 射线衍射仪对在室温下硅晶受喷丸状态下的反应进行监测,发现即使在高压条件下硅晶也是呈现纯弹性。然而,当压力和温度足够高时硅晶中的位错现象就会出现。在高温条件下,硅晶呈现与金属相似的应力应变关系和高的位错移动率。位错产生的固有速度可以在一定的温度和压力范围内进行测量和计算,在温度高于 850 K 时,硅晶的位错率随着温度呈指数增加,在高温高压下,通过改进过的喷丸过程可以使硅晶产生塑性变形以增加其机械性能。

在该激光喷丸实验方案中,由于 SiO₂ 透光性比较好而且熔点比水高,因此选用 SiO₂ 玻璃作为约束层。同时选择涂层材料也是激光喷丸的重要问题。在大多数激光喷丸中,涂层的作用是保护试件不受

激光热效应的影响。涂层材料可以是金属薄片,黑漆或者粘着物。在该研究中,黄铜取代了铝作为激光喷丸的涂层材料,因为硅可以加热到 873 K 而黄铜的熔点比铝高得多。从实验结果看,用黄铜作涂层产生的应变率要比使用铝高,使用两种涂层的位错组织结构是相似的,只是用黄铜时产生的位错密度要比使用铝高,这也表明使用黄铜作为涂层时位错增值的要比使用铝快^[10]。

5 结 论

利用激光加工脆性材料的技术受到越来越普遍的关注,对于激光分离、弯曲和喷丸脆性材料的研究虽已取得一定成果,但是还存在一些问题。如激光烧蚀切割脆性材料的工艺参数比较多,切割过程复杂,由于激光的热作用,导致材料过热,极易形成微裂纹,同时很难在实验中进行观察与测量。应用激光诱导张应力控制微裂纹扩展技术为无切缝切割脆性材料提供了一个新的途径,激光能量得到了很大的降低,而且切缝平直、无碎屑、无显微裂纹。但切割速度太低,需要复杂的在线裂纹监控系统。因此,要实现快速与高质量的脆性材料分离,仍需要开展大量的基础性研究工作。而在激光弯曲和喷丸方面也需要进一步完善分析模型,引入应力应变分析模块,同时结合硅材料的脆性特点,结合位错理论,进一步了解硅片弯曲及改性的影响因素,优化激光参数。

参 考 文 献

- 1 Ye Shenglin, Ma Junshan, Huang Xin. Simulation of the temperature field in laser cutting of brittle materials[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(4): 599~601
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): 599~601
- 2 Hermanns C. Laser cutting of glass[C]. *SPIE*, 2000, **4102**: 219~226
- 3 Zhou Shengfeng, Zeng Xiaoyan. Laser separation of brittle material[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **28**(3): 321~327
周圣丰,曾晓雁. 激光分离脆性材料的研究[J]. 应用光学, 2007, **28**(3): 321~327
- 4 Hong Lei, Li Lijun. A study of laser cutting engineering ceramics [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**: 531~538
- 5 Ma Guangyi. Experimental study on laser bending of thin silicon chip[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007, 5~8
马广义. 薄硅片材料的激光弯曲试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007, 5~8
- 6 Loschner U, Exner H, Gartner E et al. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering[J]. *Univ. Appl. Sci.*, 2003: 86~93
- 7 Loschner U, Exner H. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering: MEMS MOEMS and Micromachining[J]. *Univ. Appl. Sci.*, 2004: 407~414
- 8 X. Richard, Zhang Xianfan High precision micro scale bending by pulsed and CW lasers[J]. *Transactions of the ASME*, 2003, **125**(3): 512~518
- 9 R X Zhang, X F Xu. Laser bending for high-precision curvature adjustment of microcantilevers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(021114): 1~3
- 10 G. J. Cheng, M. A. Shehadeh. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: A multiscale simulation approach[J]. *Scripta Materialia*, 2005, **53**(9): 1013~1018
- 11 G. J. Cheng, M. A. Shenaden Multiscale dislocation dynamics analyses of laser shock peening in silicon single crystals[J]. *International J. Plasticity*, 2006, **22**: 2171~2194