

文章编号 1004-924X(2009)10-2473-07

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷薄片 CO<sub>2</sub> 连续激光弯曲试验

吴东江, 张 强, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**脆性材料的激光弯曲成形是激光快速成形技术的重要应用。本文通过改变激光功率、扫描速度等工艺参数,利用CO<sub>2</sub>连续激光对氧化铝陶瓷薄片进行了弯曲试验。同时,引入线能量密度来寻求适合弯曲的最佳工艺参数,并结合氧化铝陶瓷的高温性能分析了其激光弯曲特点。试验结果表明:氧化铝陶瓷在温度梯度机制下要实现激光弯曲必须使样品表面达到一定温度以降低其脆性和屈服应力,避免裂纹的产生;采用CO<sub>2</sub>连续激光可以对氧化铝陶瓷薄片进行弯曲,弯曲角度可达2°;氧化铝陶瓷的激光弯曲过程具有强烈的温度敏感性,当试样表面温度大于临界温度时,弯曲角度迅速增加;适合弯曲的最佳线能量密度为17~24 J/mm。

**关键词:**激光弯曲;氧化铝陶瓷;温度敏感性;塑性变形

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

## Experiment on bending of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic slice with CO<sub>2</sub> CW-laser

WU Dong-jiang, ZHANG Qiang, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** As an important application of laser rapid forming, the laser bending technology of brittle materials has broad prospects. In this paper, the experiments on bending of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic slices with a CO<sub>2</sub> CW-laser are carried out at various laser processing parameters, including laser powers and scanning velocities. Laser linear energy density is introduced to explore the best processing parameters for laser bending, and bending characteristics are briefly analyzed according to the high temperature properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic. Experimental results show that, to realize laser bending for brittle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at a temperature gradient, the sample surface must be heated to a specified temperature to reduce its brittleness and yield stress and to avoid generating cracks. Moreover, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic slice can be bent by the CO<sub>2</sub> CW-laser, and the bending angle can be as high as 2°. Furthermore, the laser bending processing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic slice is strongly sensitive to temperature, and there exists a critical temperature, above which, the bending angle increases greatly. The best range of laser linear energy density for bending Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic is 17~24 J/mm.

**Key words:** laser bending; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic; temperature sensitivity; plastic deformation

收稿日期:2008-12-03;修订日期:2008-12-23.

基金项目:国家教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20070141002);辽宁省自然科学基金资助项目(No. 20062178)

## 1 引言

激光弯曲成形是一种无模具、无外力的非接触式依靠热应力成形的技术,由于其具有生产周期短、柔性大等特点,而受到快速成形加工界的密切关注。该技术是利用高能激光束扫描板材表面形成非均匀温度场诱发热应力来产生塑性变形,最终实现板材弯曲的工艺方法,通过调整激光工艺参数,控制热影响区域及热应力大小,可以精确控制板材弯曲角度。

现阶段对于激光弯曲成形的研究主要集中在金属和合金(铝合金,钛合金等)等塑性变形材料<sup>[1-2]</sup>上,而对脆性材料很少涉及。随着材料科学的发展,陶瓷、硅片和玻璃等脆性材料在微电子、微机械系统、信息等产业的应用越来越广泛,其加工性能也受到越来越多的关注。脆性材料的激光弯曲技术由于其独特的优点吸引了不少国内外学者从事该方面的研究。上世纪末,德国的 U. Löschner, H. Exner 等人对硅片在高温下塑性变形的可行性进行了试验研究,并成功实现了硅片的激光弯曲,初步确定了硅片弯曲机理与金属材料弯曲机理的相似性<sup>[3-6]</sup>。美国 IBM 公司和日本富士通公司利用 LCAT(Laser Curvature Adjust Technique)技术实现了微小陶瓷件的激光弯曲,并将其应用于修正硬盘磁头滑块上气膜浮动面的曲率,取得了良好的效果<sup>[7-8]</sup>。美国普渡大学的 X. Richard Zhang, Xianfan Xu 等人利用连续和短脉冲等小功率激光器对硅片、陶瓷、玻璃与 AISI301 不锈钢进行了激光弯曲对比试验,实现了试样的微弧度量级弯曲,并指出通过调整激光工艺参数可以实现硅片、陶瓷、玻璃等脆性材料以度为量级的弯曲角控制<sup>[9-12]</sup>。针对常利用刻蚀等方法制作目前 MEMS 器件中脆性材料的大曲率弯曲面,工艺过程复杂、成本高、制作周期长且伴随有化学试剂污染等问题<sup>[13]</sup>,国内大连理工大学吴东江教授科研小组分别利用 Nd:YAG 长脉冲激光和 CO<sub>2</sub> 连续激光对硅片和玻璃进行弯曲研究,讨论了激光参数对弯曲角度的影响,并对弯曲硅片激光扫描区域的表面形貌及晶相等特性进行了分析<sup>[14-16]</sup>。

本文利用 CO<sub>2</sub> 连续激光对氧化铝陶瓷薄片进行弯曲试验,得到了以度为量级的弯曲角,同时

研究了激光工艺参数对弯曲角度的影响,并结合氧化铝陶瓷的高温性能分析了激光弯曲氧化铝陶瓷的工艺特点。

## 2 试验条件

### 2.1 试验材料

试验选用流延成形的,电子工业专用 96% 氧化铝陶瓷薄片为研究对象,其主要化学成分(质量百分数)如下: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 约 96%, Na<sub>2</sub>O 约 0.1%, SiO<sub>2</sub> 约 1.9%, CaO 约 1.3%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不大于 0.05%, MgO 约 0.8%。试样几何尺寸为 10 mm × 3 mm,厚度为 300 μm,其热物理性能参数如表 1 所示。将试样置于 200 °C 的恒温炉中保温 1 h,以消除试样中残余应力对试验结果的影响。

表 1 96% 氧化铝陶瓷的热物理性能参数

Tab. 1 Thermo-physical performance parameters of 96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic

Thermo-physical performance parameters	Values
Heat capacity (20 °C) (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	800
Thermal conductivity(20 °C) (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	24.7
Coefficient of linear thermal expansion (20~800 °C)/(10 <sup>-6</sup> · K <sup>-1</sup> )	6.5~8.0
Density/(kg · m <sup>-3</sup> )	3 740
Poisson's ratio	0.2
Yang's module(20 °C) / 10 <sup>9</sup> Pa	305

### 2.2 试验设备

试验设备采用北京神州镭神激光技术有限公司生产的 CLS2000-1200 型连续 CO<sub>2</sub> 激光加工机,激光波长为 10.6 μm,最大功率为 75 W。激光加工机采用 PC-BASE CNC 控制器,驱动程序为镭神切割/雕刻软件 3.0 版。

### 2.3 试样固定方式及角度测量方法

如图 1 所示,试样采用单端固定方式,一端通过夹持器固定后平放在试验台上,另一端自由悬空。试验采用直线往复连续扫描方式,扫描路径距离试样自由端为 5 mm,加工时关闭吹气和排风装置以消除其对试验结果的影响,扫描后试样在空气中自然冷却。扫描起点和终点到试样薄片

两端边缘的距离均为 5 mm,一方面使激光束能量有足够的时间趋于稳定,另一方面使试样在下一扫描开始前有足够的时间进行冷却。试验后用游标万能角度尺测量试样弯曲角度的大小。

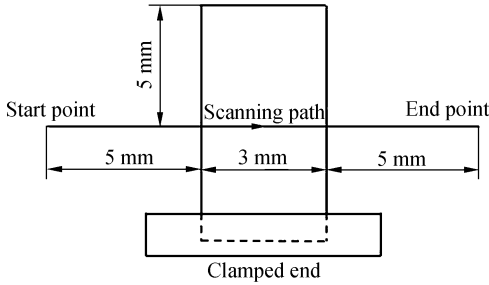


图 1 激光弯曲加工示意图

Fig.1 Scheme of laser bending processing

### 3 试验结果与讨论

影响氧化铝陶瓷激光弯曲性能的因素主要包括材料本身的热物理性能参数、试样几何形状以及激光工艺参数。本文对厚度为 300  $\mu\text{m}$ 、几何尺寸为 10 mm $\times$ 3 mm 的氧化铝陶瓷,通过调整激光功率、扫描速度等工艺参数,研究了在温度梯度机制下试样弯曲角度随各参数的变化关系,并讨论了其弯曲成形的规律,同时引入线能量密度来探求适合激光弯曲氧化铝陶瓷的最佳工艺参数。

#### 3.1 激光功率对弯曲角度的影响

在扫描速度  $v$  为 100 mm/min、光斑直径  $d$  为 0.3 mm、扫描次数  $N$  为 4 次的条件下,以 0.5 W 为增量,观察激光功率  $P$  对试样弯曲效果的影响。图 2 所示为弯曲角度随激光功率变化的关系曲线。

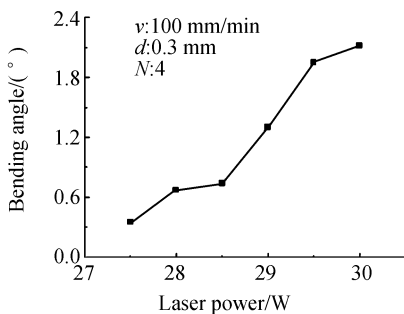


图 2 激光功率对弯曲角度的影响

Fig.2 Effect of laser power on bending angle

当激光功率低于 27.5 W 时,弯曲现象难以发生,而且试样极易在扫描路径上产生裂纹,甚至沿扫描路径断裂。因为功率过小时,材料整体温度较低,脆性很大,产生塑性变形相对困难,因而弯曲难以发生,而且厚度方向上温度梯度所诱发的非均匀热应力容易使试样产生裂纹。

当激光功率在 27.5~28.5 W 之间时,试样能够发生弯曲现象,但角度相对较小,而且弯曲试样的下表面偶有微裂纹出现。在该功率范围内,试样上下表面的温度均增加,并开始从脆性域向塑性域转变。由于受到激光直接照射,试样上表面温度较高,材料屈服应力降低,于是塑性压应变得以产生,冷却后试样发生朝向激光束的正向弯曲;但试样下表面的温度仍相对较低,脆性相对较大,它不仅抑制弯曲角度的增加,同时容易在热应力的作用下产生微裂纹。

当激光功率 $>$ 28.5 W 时,弯曲角度随功率的增加迅速增大,且扫描轨迹质量良好,没有产生裂纹,试样两端有微小的熔化缺口。在该功率条件下,试样上下表面温度都很高,材料均达到塑性域,这是没有产生裂纹的主要原因。在激光照射下,试样在厚度方向产生一定的温度梯度,受激光直接照射的材料上表面在瞬间被加热至高温状态,并产生膨胀,此时试样有产生背向激光束的反向弯曲趋势,但周围未被激光直接照射的材料会抑制膨胀的产生,从而在光斑区域内产生很大的压应力,而此时光斑区域内材料由于温度升高屈服应力将急剧下降,于是在压应力的作用下上表面将会产生少量的材料堆积;光斑移走后上表面材料开始冷却,试样厚度方向上的温度梯度减小,由于热传导温度逐渐降低,上表面材料冷却并收缩,同时下表面则因热传导温度升高而维持膨胀状态,这有利于正向弯曲的发生。冷却结束后,试样上表面的材料堆积不能完全复原,即产生塑性压应变,最终试样产生朝向激光束的正向弯曲。

由此可见,氧化铝陶瓷产生弯曲现象的首要条件是要让试样上下表面达到一定的温度,使材料进入塑性状态,降低材料脆性和屈服应力,使塑性变形得以发生;其次,在试样厚度方向上必须存在一定的温度梯度,从而产生塑性应变差以实现弯曲。

随着功率的继续增加,试样温度升高,塑性变形进一步增大,但厚度方向上温度梯度逐渐减小,

弯曲角度趋于稳定。当激光功率超过 30 W 时,材料两端熔化严重,表面发现烧蚀现象,弯曲效果不理想;当激光能量进一步增大时,试样将发生切割现象。

### 3.2 扫描速度对弯曲角度的影响

在激光功率为 28 W、光斑直径为 0.3 mm、扫描 4 次的条件下,以 10 mm/min 为增量,观察扫描速度对试样弯曲效果的影响。图 3 所示为弯曲角度随扫描速度变化的关系曲线。

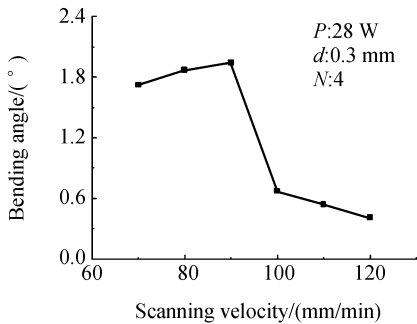


图 3 扫描速度对弯曲角度的影响

Fig. 3 Effect of scanning velocity on bending angle

当速度低于 70 mm/min 时,扫描轨迹上的材料发生烧蚀现象,而且轨迹两端出现很大的熔化缺口,弯曲质量很差;当扫描速度在 70~90 mm/min 时,试样能够产生较大的弯曲角,而且扫描轨迹良好,极少产生裂纹,是比较理想的加工参数范围;当速度超过 90 mm/min 时,弯曲角度急剧下降,且试样下表面偶有裂纹产生。

扫描速度的大小直接决定了材料在单位时间内所吸收激光能量的多少,速度越低,单位时间内材料吸收的能量越多,试样表面温度越高。当速度低于 70 mm/min 时,试样在单位时间内吸收的能量过大,温度过高,材料发生较严重的破坏,而且较长的激光作用时间使厚度方向上的温度梯度由于热传导作用而减小,不利于弯曲的发生。随着速度的增加,试样吸收的能量逐渐减少。在 70~90 mm/min,试样表面温度适中,上下表面间存在较大的温度梯度,同时材料在高温下均达到塑性状态,因此试样没有产生裂纹,弯曲现象明显。当速度超过 90 mm/min 时,由于试样吸收的能量过低,上下表面温度相对较低,材料不能完全达到塑性状态,屈服应力较高,产生塑性应变的难度增

加,最终使弯曲角度急剧下降。

### 3.3 线能量密度对弯曲角度的影响

激光工艺参数对弯曲角度的影响是激光功率、扫描速度等多种因素耦合作用的结果。为了评估激光参数对试验结果的综合影响,引入线能量密度来衡量其对弯曲角度的耦合作用效果。线能量密度是激光功率与扫描速度的比值,它表示材料单位长度上所吸收能量的大小。试验条件如下,光斑直径为 0.3 mm,扫描次数为 4 次,激光功率为 27~30 W,扫描速度为 60~120 mm/min。图 4 所示为弯曲角度随线能量密度变化的关系曲线(没有发生弯曲和材料发生严重破坏的试样未计)。

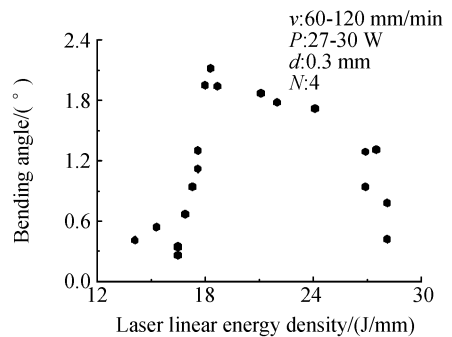


图 4 线能量密度对弯曲角度的影响

Fig. 4 Effect of laser linear energy density on bending angle

由图 4 可知,当线能量密度低于 17 J/mm 时,试样弯曲角度很小甚至不出现弯曲现象,而且扫描轨迹上偶有裂纹出现;当线能量密度超过 17 J/mm 后,弯曲角度迅速增加,试样在 17~24 J/mm 能够得到较大的弯曲角度,并且试样极少出现裂纹,弯曲质量良好;当线能量密度大于 24 J/mm 时,弯曲角度随着线能量密度的增加呈下降趋势,且扫描轨迹两端的熔化缺口迅速增大,材料表面烧蚀愈发严重。由此可见,在如此试验条件下,发生弯曲的最佳线能量密度为 17~24 J/mm。

当线能量密度较小时,试样表面温度较低,材料整体脆性较大,屈服应力高,塑性变形量小,弯曲角度极小;而且与上表面相比,材料下表面由于温度较低脆性相对较大,在热应力作用下容易产生裂纹。随着线能量密度的增加,材料上下表面的温度上升,屈服应力迅速下降。当激光能量

密度增加到 17~24 J/mm 时,试样上下表面温度均增加,同时在厚度方向上形成大的温度梯度,材料屈服应力急剧下降,有利于塑性应变的产生,因此弯曲角度迅速增大;当线能量密度进一步增大时,试样表面温度过高,材料发生严重的烧蚀现象,而且厚度方向上的温度梯度减小,不利于弯曲的产生。

### 3.4 氧化铝陶瓷的激光弯曲特点

在激光弯曲工艺中,弯曲现象的产生与否取决于试样在厚度方向是否存在塑性应变差,差值越大,弯曲角度越大。为在宏观上产生塑性变形,就必须使位错开始运动。尽管单晶氧化铝中存在滑移系,但开动位错需要很大的能量,而且在烧结成的氧化铝陶瓷中,单个晶粒随机排列所形成的大量晶界会抑制位错的运动。因此在室温下,氧化铝陶瓷的塑性变形极其困难,但随着温度的升高,滑移系逐渐开动以后,塑性变形将逐渐产生。

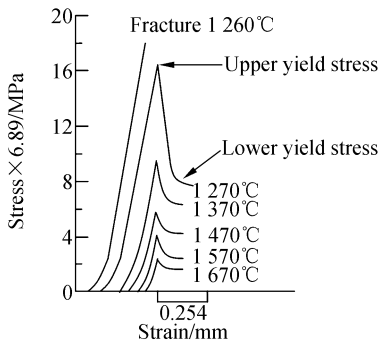


图 5 温度对单晶氧化铝形变行为的影响

Fig. 5 Effect of temperature on plastic deformation of single crystal Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

图 5 所示为单晶氧化铝的形变随温度变化的关系曲线<sup>[17]</sup>。单晶氧化铝在 900 °C 以上由于滑移系的运动而引起各向异性变形。当温度不超过 1 260 °C 时,氧化铝在较大的应力作用下极易产生裂纹。当温度继续升高时,氧化铝陶瓷可在较高的应力(上屈服应力)下实现塑性变形;一旦塑性变形发生,晶体内将产生新的位错,位错密度的增加使产生塑性变形所需的应力急剧下降,从而使塑性变形得以在较低的应力(下屈服应力)作用下就可以产生。此外,随着温度的增加,氧化铝陶瓷的屈服应力呈现出近乎指数规律的下降趋

势<sup>[17]</sup>,产生塑性变形将更加容易。因此,氧化铝的塑性变形量将随着温度的升高而逐渐增加,而且这一趋势在温度超过一定值后更加明显。

96%氧化铝陶瓷薄片的主晶相为  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其高温下的塑性变形主要通过晶界的滑移和晶体内位错的运动来实现。对于 96%氧化铝陶瓷,必存在一个临界温度  $T_s$ ,当温度  $< T_s$  时,位错的运动和晶界的滑移受阻,材料脆性仍然较大,屈服应力相对较高,塑性变形的产生比较困难,因此试样发生的弯曲现象并不明显;当温度  $> T_s$  时,位错的运动和晶界的滑移变得相对容易,试样在高温下呈现出良好的塑性,膨胀产生的热应力足以克服材料在该温度下的屈服应力,塑性变形随之产生;而且随着温度的升高,热应力增大,而材料屈服应力下降,塑性变形量急剧增大,最终使弯曲角度随温度的升高而迅速增大。

可见,氧化铝陶瓷的激光弯曲过程具有强烈的温度敏感性,一旦温度超过临界值,弯曲角度将迅速增大(图 2 和图 4);而当温度低于临界值时,弯曲角度将迅速减小(图 3)。

## 4 结 论

利用 CO<sub>2</sub> 连续激光对厚度为 300  $\mu$ m、质量分数为 96%的氧化铝陶瓷薄片进行激光弯曲试验,得到如下结论。

(1)对于脆性材料氧化铝陶瓷,在温度梯度机制下要实现激光弯曲必须首先使试样的上下表面达到一定温度以降低其脆性和屈服应力,避免裂纹的产生,使塑性变形得以发生,从而才能得到良好的弯曲效果;

(2)保持光斑大小不变,随着激光功率的增加,弯曲角度的上升趋势先缓后急,最后角度趋于稳定;

(3)对于特定功率的激光,在一定扫描速度范围内能得到较好的弯曲试样,但当扫描速度超过一定值以后,弯曲角度急剧下降;

(4)在实验条件下存在一个适合激光弯曲氧化铝陶瓷的最佳线能量密度范围:17~24 J/mm。当线能量密度低于 17 J/mm 时,弯曲角度较小;

当线能量密度超过 24 J/mm 时,温度梯度逐渐变小,弯曲角度呈下降趋势,而且试样表面破坏越来越严重;

(5)氧化铝陶瓷的激光弯曲过程具有强烈的温度敏感性,当试样表面温度超过一定值后,弯曲角度迅速增大。

### 参考文献:

- [1] 管延锦,孙胜,季忠.板料激光成型技术的实验研究[J].光学技术,2000,26(3):260-262.  
GUAN Y J, SUN SH, JI ZH. Experimental study on laser forming technology of sheet metal [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(3): 260-262. (in Chinese)
- [2] 杨起君,周建忠,张永康,等.激光冲击金属板料变形的最小激光能量估算及其实验研究[J].光学精密工程,2006,14(3):396-401.  
YANG CH J, ZHOU J ZH, ZHANG Y K, *et al.*. Study on calculation of minimum laser energy of sheet metal deformation by laser shock forming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 396-401. (in Chinese)
- [3] FRÜHAUF J, GÄRTNER E, JÄNSCH E, *et al.*. Silicon as a plastic material [J]. *J. Micromesh Microeng*, 1999(9):305-312.
- [4] LÖSCHNER U, EXNER H, GÄNSCH E, *et al.*. Laser bending of silicon [J]. *SPIE*, 2003, 4977: 86-93.
- [5] EXNER H, LÖSCHNER U. Contactless laser bending of silicon microstructures [J]. *SPIE*, 2003, 5116:383-392.
- [6] GÄRTNER E, FRÜHAUF J, LÖSCHNER U, *et al.*. Laser bending of etched silicon microstructure [J]. *Microsystem Technologies*, 2001, 7(1):23-26.
- [7] TAM A C, POON C C, CRAWFORTH L. Laser bending of ceramics and application to manufacture magnetic head sliders in disk drives [J]. *Analytical Sciences*, 2001, 17(Special Issue): 419-422.
- [8] MATSUSHITA N. Laser micro-bending for precise micro-fabrication of magnetic disk-drive components [J]. *SPIE*, 2003, 5056:24-29.
- [9] ZHANG R X, XU X F. Microscale bending using pulsed and CW lasers [J]. *SPIE*, 2001, 4274: 58-65.
- [10] ZHANG R X, XU X F. Microscale bending of brittle materials using pulsed and CW lasers [J]. *SPIE*, 2002, 4637:291-296.
- [11] ZHANG R X, XU X F. Finite element analysis of pulsed laser bending: the effect of melting and solidification [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 71(3):321-326.
- [12] XU X F. Laser-based microscale bending for microelectronics fabrication [J]. *SPIE*, 2000, 3933: 299-308.
- [13] 蒋振新,丁桂甫,杨春生,等.微弯曲面成型技术—多线成面技术[J].电子工艺技术,2003,24(5):210-213.  
JIANG ZH X, DING G F, YANG CH SH, *et al.*. A novel micro-fabrication technique of micro-buckling surfaces—forming surfaces with a series of lines[J]. *Electronics Process Technology*, 2003, 24(5):210-213. (in Chinese)
- [14] 吴东江,马广义,周秋菊,等.长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J].光学精密工程,2007,15(9):1361-1365.  
WU D J, MA G Y, ZHOU Q J, *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1361-1365. (in Chinese)
- [15] 吴东江,牛方勇,刘双,等.CO<sub>2</sub>连续激光弯曲硼硅酸盐玻璃薄片的实验研究[J].光学精密工程,2008,16(8):1416-1422.  
WU D J, NIU F Y, LIU SH, *et al.*. Experimental study of borosilicate glass film bending with CO<sub>2</sub> CW-laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1416-1422. (in Chinese)
- [16] 吴东江,马广义,曹先锁,等.脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面的形貌分析[J].中国激光,2007,34(11):1589-1593.  
WU D J, MA G Y, CAO X S, *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending pro-

cessing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34 (11):1589-1593. (in Chinese)

ZHOU Y. *Ceramic Materials* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)

[17] 周五. 陶瓷材料学[M]. 北京:科学出版社,2004.

#### 作者简介:



吴东江(1964—),男,山东潍坊人,博士,教授,博士生导师,分别于1987年和1990年于大连理工大学获得学士和硕士学位,2000年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

张 强(1985—),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要从事激光精密加工方面的研究。E-mail: xtxkzhangqi@hotmail.com

郭东明(1959—),男,河南人,博士,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: guodm@dlut.edu.cn

#### ● 下期预告

## 楔条形阳极光子计数探测器成像性能检测

何玲平<sup>1,2</sup>, 尼启良<sup>1</sup>, 李 敏<sup>1,2</sup>, 刘世界<sup>1</sup>, 陈 波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

基于楔条形位置灵敏阳极的光子计数成像探测器能够记录入射的单光子或带电粒子位置信息,因而能够在极低的照明条件下对目标二维成像。本文首先描述了研制的一套 WSA 光子计数成像探测器样机的设计结构及工作原理;分析了这类探测器的图像畸变产生的原因,提出了校正图像畸变的方法,并得到了无畸变的图像;然后以美国空军标准分辨率检测板(USAF1951)为目标进行了分辨率检测,采集的检测图像显示人的裸眼能分辨出检测板的第 2 组第 6 单元条纹。最后,为了消除人眼观测的主观性,通过计算探测器对该单元条纹的成像调制度来确保检测结果的准确性。计算结果表明,探测器对该单元条纹的水平、垂直方向成像调制度分别为 57% 和 37%,表明研制的探测器完全能够分辨该单元条纹,对应的分辨率为 7.13 pl/mm,即探测器空间分辨率达到了 0.14 mm。