

文章编号: 0258-7025(2010)08-2143-06

铝-锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究

丁磊 刘会霞 王鹤军 王霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 金属板材的激光弯曲成形是一种新型非接触、无模和无外力、无回弹的柔性成形方法,其弯曲过程受到许多工艺因素的影响。以航空用铝-锂合金薄板为研究对象,用半导体激光器对影响板材激光弯曲成形的主要因素进行了系统的试验研究。研究表明,在其他工艺参数一定的条件下,弯曲角度随着激光功率、扫描次数、板材宽度的增大而增大;随着扫描速度的增大,弯曲角度先增大后减小;随着扫描线距自由端的增大,弯曲角度先减小后增大;随着光斑直径的增大,弯曲角度先减小,后增大,再减小;随着板材厚度的增大,弯曲角度减小。

关键词 激光技术;激光弯曲成形;铝-锂合金;半导体激光器;薄板

中图分类号 TN 249; TG 665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2143

Experimental Study of Thin Aluminum-Lithium Alloy Sheet Metal Laser Forming with Semiconductor Laser

Ding Lei Liu Huixia Wang Hejun Wang Xiao

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

Abstract Laser forming of sheet metal is a new sheet metal forming process with the features of non-contact, dieless, spring-back free, and high degrees of flexibility. The bending process is affected by many factors. A thin aluminum-lithium alloy sheet metal used in aircraft is chosen as the object of the research and systematic experimental study is conducted with a semiconductor laser to investigate the effect of principal factors that influence laser forming. The experimental results reveal that, under the condition that other technological parameters are invariable, the bending angle increases with the increase of the laser power, number of scan, and sheet width. With the increase of laser scan speed, the bending angle increases at first, and then decreases. As the scan line from the free edge increases, the bending angle decreases at first, and then increases. With the increase of laser beam diameter, the bending angle decreases at first, then increases and finally decreases. The bending angle decreases with the increase of the sheet thickness.

Key words laser technique; laser forming; aluminum-lithium alloy; semiconductor laser; thin sheet metal

1 引 言

激光弯曲成形是一种新的金属板材成形工艺方法,它通过利用高能激光束对板材局部进行扫描时在板材内部形成的非均匀热应力来实现板材的塑性变形,是激光非熔凝加工新的应用领域^[1,2]。和传统的成形方法相比,激光弯曲成形具有很多优点:它属于非接触成形和无模成形,且无需刀具和外力,所以大大减少了生产成本,缩短了生产周期,且不存在使用模具时的回弹现象^[1,3~7],大大提高了成形精

度。由于激光弯曲成形具有生产周期短,生产柔性大,且易于实现激光切割、激光焊接等加工工序的同工位复合化等特点,特别适合于一些形状复杂、单件或小批量产品的生产。在航空航天、汽车、造船、仪器仪表、微电子等领域具有广阔的应用前景,也因此吸引了国内外很多学者从事这方面的研究^[1,2]。

从 20 世纪 80 年代激光弯曲成形方法被提出以来,研究人员对激光弯曲成形的机理、数值模拟、影响因素、解析模型及其在实际中的应用等做了大量

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-07

作者简介: 丁磊(1980—),男,硕士研究生,主要从事激光弯曲成形方面的研究。E-mail: dl2310@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工技术、数字化设计与制造技术等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn(通信联系人)

研究工作^[2~18],当前仍是激光成形研究的主流方向^[7~9,12~18]。但国内外所进行的金属板材激光弯曲成形的试验研究中,使用的绝大部分都是 CO₂ 和 Nd:YAG激光器。从目前公开发表的文献中可知,仅有国外的 J. Lawrence 等^[4,6,11,12,15,16],用半导体激光器对金属板材的激光弯曲成形进行了研究,而国内尚未见这方面研究的报道。而同 CO₂ 与 Nd:YAG激光器相比,由于半导体激光器具有结构紧凑、电光转换效率高、寿命长、运行成本低等的优点^[19,20],加上其波长较短,金属材料对其吸收率高^[19,20],已得到了越来越多的认同,并在工业生产中进行了实际应用^[20~22]。本文用半导体激光器对航空航天用铝-锂合金 AA2090 金属薄板的激光弯曲成形进行了试验研究。

影响板材激光弯曲成形的因素主要为三方面:

1)激光能量因素:包括激光功率、光斑大小、扫描速度、扫描次数、扫描路径等;2)材料的性能:包括材料的热物理性能及力学性能,比如热、热膨胀系数、热传导率、屈服强度、弹性模量、密度等;3)板材的几何参数:包括板材宽度、厚度等。而研究影响激光弯曲成形的主要因素对板材激光弯曲成形的影响规律,对于预测其他工艺条件下板材的变形具有重要意义。

因板材的长度对弯曲成形影响很小,当板料长度超过板厚 10 倍以上时,长度对弯曲变形的影响并不大^[23];而材料的性能对一个具体的板材而言是确定的,无法通过试验来研究同一材料的这些因素对弯曲成形的影响。因此本文对除了板材长度、材料性能参数以外的其他主要因素进行了试验研究。

2 试验方法与材料

试验采用德国 DILAS 公司的 Compact 130/400 型半导体激光器,最大输出功率为 130 W,波长为(980±10) nm,激光采用光纤传输方式传输至激光头,光斑形状为圆形。试验材料为铝-锂合金 AA2090,试验中所有样件的长度均为 90 mm,其中用于夹持部分的长度均为 10 mm;宽度除了研究板宽对弯曲成形的影响外均为 20 mm;厚度除了研究板厚对弯曲成形的影响外均为 0.3 mm。试验前,用无水乙醇对样件表面进行清洗,以去除表面可能存在的油污等。为了增加材料对激光的吸收率,在样件的扫描表面涂敷碳黑。样件长度方向的一端夹持固定在数控工作台上,另一端处于自由状态。板材的宽度方向为激光的扫描方向,如图 1 所示。

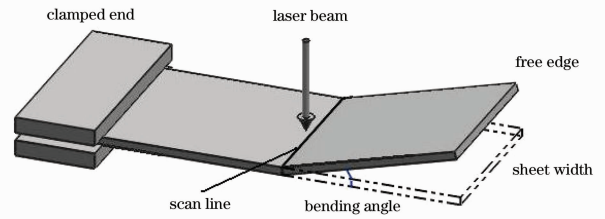


图 1 激光弯曲成形试验示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup for laser forming

试验时,激光头固定不动,通过数控工作台的运动来实现对工件表面的来回扫描。在所有的试验中,相邻两次扫描的间隔时间为 0。采用自然冷却方式。激光弯曲成形的试验装置如图 2 所示。试验结束待工件冷却至室温后,用 16 J(JGX-1 型)小型工具显微镜测量所得的弯曲角度,精度为 1'。

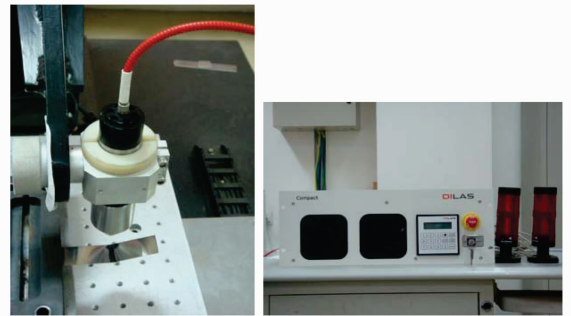


图 2 激光弯曲成形系统试验装置

Fig. 2 Experimental setup of laser forming system

3 试验结果及讨论

3.1 激光功率的影响

图 3 是在光斑直径 $D=1.0$ mm,扫描速度 $v=400$ mm/min,扫描次数 $N=20$,扫描线距自由端距离 $L'=40$ mm 的工艺参数条件下,激光功率 P 对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸均为 90 mm×20 mm×0.3 mm。

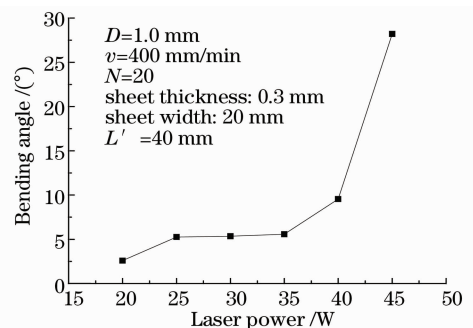


图 3 激光功率对弯曲角度的影响

Fig. 3 Effect of laser power on bending angle

由图 3 可看出,随着激光功率的增大,弯曲角度呈增大的趋势。当激光功率较小时,板材厚度方向的温度梯度较小,产生的热应力较小,所以产生的弯曲角度较小。随着激光功率增大,板材吸收的能量增多,厚度方向的温度梯度增大,产生的热应力增

大,故产生的弯曲角度增大。当激光功率 $P=45\text{ W}$ 时,产生的弯曲角度急剧增大,这应该用该功率扫描后板材表面出现烧蚀现象所致,如图 4 所示。图 4(a),(b)分别是 P 为 40,45 W 时激光弯曲成形后的板材上下表面情况。

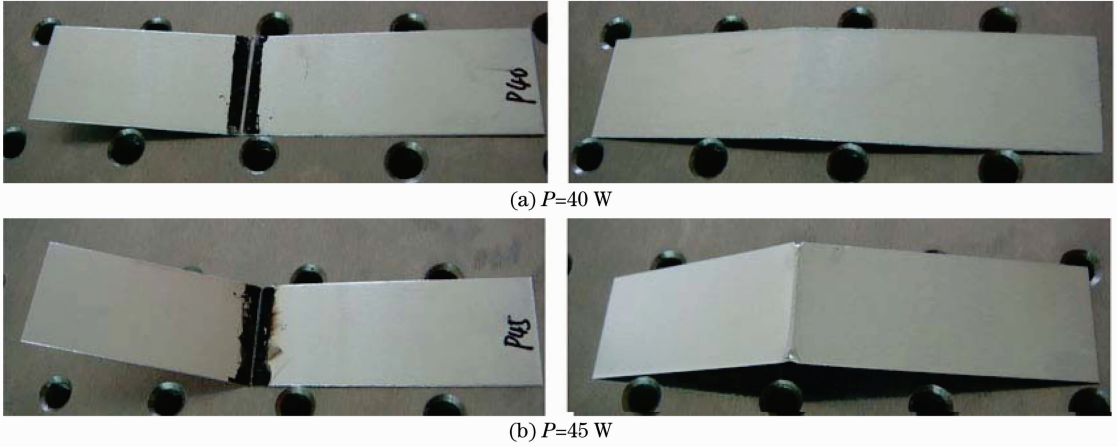


图 4 激光弯曲成形后板材的上下表面

Fig. 4 Top and bottom surfaces of the sample after laser forming

3.2 扫描速度的影响

图 5 是在 $P=30\text{ W}, D=1.0\text{ mm}, N=20, L'=40\text{ mm}$ 的工艺参数条件下,扫描速度 v 对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸均为 $90\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 。

由图 5 可以看出,当 $v\leq 600\text{ mm/min}$ 时,随着 v 的增大,板材的弯曲角度增大;当 $v\geq 600\text{ mm/min}$ 时,随着 v 的增大,板材的弯曲角度减小。这是因为,在其他工艺参数一定的条件下,当 v 较低时,板材表面受激光辐射的时间较长,加之铝-锂合金的热传导率大,所以板材上下表面间的温度梯度较小,产生的热应力较小,不利于形成大的弯曲角度。随着 v 的增加,板材上下表面间的温度梯度开始增大,产生的热应力随之增大,从而所得的弯曲角度也随之增大。但随着 v 的进一步增大,板材表面受激光辐

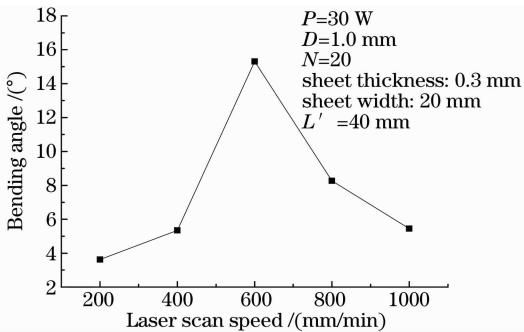


图 5 扫描速度对弯曲角度的影响

Fig. 5 Effect of laser scan speed on bending angle

射的时间逐步减少,从而板材表面吸收的激光能量减少,板材上下表面间的温度梯度开始减少,产生的热应力随之减少,从而所得的弯曲角度也随之减少。

由此也说明,对于给定板材的激光弯曲成形,在其他工艺参数一定的情况下,存在一个最佳扫描速度使板材产生的弯曲变形最大。

3.3 光斑直径的影响

图 6 是在 $P=30\text{ W}, v=400\text{ mm/min}, N=20, L'=40\text{ mm}$ 的工艺参数条件下,光斑直径 D 对弯曲角度的影响。样件的尺寸均为 $90\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$ 。

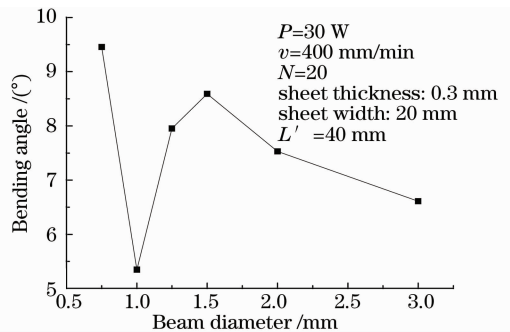


图 6 光斑直径对弯曲角度的影响

Fig. 6 Effect of beam diameter on bending angle

由图 6 可以看出,当 $D\leq 1.0\text{ mm}$ 或 $D\geq 1.5\text{ mm}$ 时,随着 D 的增大,板材的弯曲角度减小;当 $1.0\text{ mm}\leq D\leq 1.5\text{ mm}$ 时,随着 D 的增大,板材的弯曲角度增大。在其他工艺参数一定的条件下,

D 变化时,一方面会使激光辐射区内的能量密度发生变化,另一方面则使激光辐射区的大小发生变化,而激光弯曲成形所得角度的大小则是这两方面综合作用的结果。当能量密度起主要作用($D \leq 1.0$ mm 及 $D \geq 1.5$ mm)时,则随着 D 的增大,板材的弯曲角度随之减小;当激光辐射区的大小起主要作用(1.0 mm $\leq D \leq 1.5$ mm)时,则随着 D 的增大,板材的弯曲角度随之增大。当由能量密度起主要作用转为激光辐射区的大小起主要作用时,存在一个光斑直径值,使在该光斑直径下所得到的弯曲角度为极小值;当由激光辐射区的大小起主要作用转为能量密度起主要作用时,存在一个光斑直径值,使在该光斑直径下所得到的弯曲角度为极大值。

3.4 扫描次数的影响

一般对板材扫描一次后,只能得到较小的弯曲角度,而在实际应用中可能需要有更大的弯曲,而这除了通过改变激光功率、扫描速度等来实现外,还可以在其他参数不变的情况下仅通过增加扫描次数,即通过对同一扫描路径的多次重复扫描来实现。

图 7 是在 $P = 30$ W, $D = 1.0$ mm, $v = 400$ mm/min, $L' = 40$ mm 的工艺参数条件下,对同一扫描路径来回扫描的次数对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸均为 90 mm \times 20 mm \times 0.3 mm。

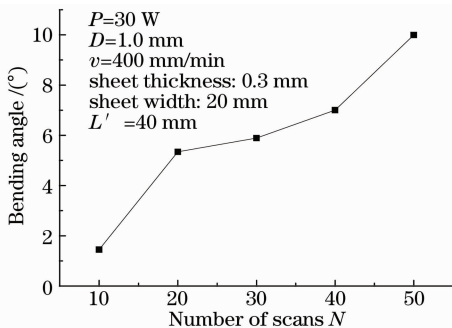


图 7 扫描次数对弯曲角度的影响

Fig. 7 Effect of number of scan on bending angle

由图 7 可以看出,随着 N 的增大,弯曲角度随之增大。激光弯曲成形属于热态累积成形,所以弯曲角度随着 N 的增大而增大。当 $N \geq 20$ 时,弯曲角度的增量比 $N \leq 20$ 时小,这应该是随着扫描次数的增多,板材表面的碳黑涂层被不同程度地破坏,从而使板材对激光的吸收率减小所致。

3.5 扫描线距自由端距离的影响

图 8 是在 $P = 30$ W, $D = 1.0$ mm, $v = 400$ mm/min, $N = 20$ 的工艺参数条件下,扫描线距自由端距离 L' 对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸均为 90 mm \times 20 mm \times 0.3 mm。

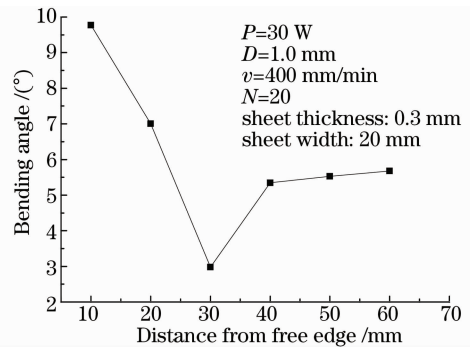


图 8 扫描线位置对弯曲角度的影响

Fig. 8 Effect of scanning position on bending angle

由图 8 可以看出,当 $L' \leq 30$ mm 时,随着 L' 的增大,板材的弯曲角度减小;当 $L' \geq 30$ mm 时,随着 L' 的增大,板材的弯曲角度增大。这是因为, L' 即为加热区域的材料距自由端的距离,而加热区与自由端之间的板材对加热区的材料存在两种不同的作用:一种是吸热作用,即由于热传导作用,该部分材料吸收了激光扫描期间板材吸收激光所产生的部分热量,这样就会使加热区板材所吸收的热量产生一定程度的损失,从而会使板材厚度方向的温度梯度有所减小,继而使板材内产生的热应力有所减小,以致所得的弯曲角度有所减小;另一种是刚性约束作用,即该部分材料对加热区材料的热膨胀起到约束作用,加热区材料的热膨胀受到的约束作用越大,则加热区由热应力所引发的塑性变形量越大,从而板材的弯曲角度越大。

这样,在其他工艺参数一定的条件下,当 L' 较小时,由于铝-锂合金的热传导率高,此时加热区与自由端之间的板材主要表现为对加热区的吸热作用,所以随着 L' 的增大,加热区与自由端之间的板材所吸收的加热区的热量便随之增大,这样就使得板材上下表面间的温度梯度随之减小,从而所得的弯曲角度也随之减小;但随着 L' 的进一步增大,加热区与自由端之间的板材对加热区的吸热作用不再继续增大,而是趋于平缓,基本达到稳定,此时该部分板材主要表现为对加热区材料热膨胀的刚性约束作用,所以随着 L' 的增大,刚性约束作用增大,所得的弯曲角度越大;但当 L' 再进一步增大时,该约束作用也不再增加,而是趋于平缓,基本达到稳定,即如图 8 所示,当 $L' \geq 40$ mm 时,曲线趋于平缓,弯曲角度增加趋于平缓。

由图 8 可以发现,当加热区与自由端之间的板材由对加热区材料的吸热作用转为刚性约束作用时,存在一个扫描线距自由端距离的值,使在该距离

下所得到的弯曲角度为极小值。

3.6 板材宽度的影响

图9是在 $P=30\text{ W}$, $D=1.0\text{ mm}$, $v=600\text{ mm/min}$, $N=20$, $L'=40\text{ mm}$ 的工艺参数条件下, 板材宽度对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸: 长度均为 90 mm , 厚度均为 0.3 mm 。

由图9可以看出, 随着板材宽度 W 的增大, 弯曲角度随之增大。当 $W \leq 20\text{ mm}$ 时, 弯曲角度的增量较大; 当 $W \geq 20\text{ mm}$ 时, 弯曲角度的增量小, 并趋于平缓。在金属板材的激光弯曲成形过程中, 未被加热的冷态区域板材属于未变形的刚性区, 它们对正在发生变形的加热区域板材起着刚性约束作用。这种刚性约束作用越大, 加热区材料的热膨胀受到的约束作用越大, 则加热区由热应力所引发的塑性变形量越大, 从而板材的弯曲角度越大。所以, 在其他工艺参数一定的条件下, 随着 W 的增大, 周围冷态区域板材对加热区板材的约束作用随之增大, 所得的弯曲角度也随之增大。但当 W 增大到一定程度时, 周围冷态区域板材对加热区板材的约束作用不再继续增大, 而是趋于平缓, 基本达到稳定, 这时所得的弯曲角度随 W 的变化也趋于平缓, 逐渐达到稳定。

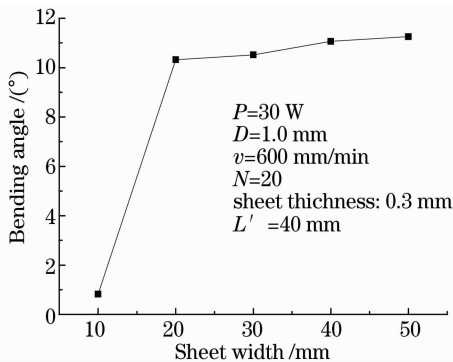


图9 板材宽度对弯曲角度的影响

Fig.9 Effect of sheet width on bending angle

3.7 板材厚度的影响

图10是在 $P=40\text{ W}$, $D=1.0\text{ mm}$, $v=600\text{ mm/min}$, $N=20$, $L'=40\text{ mm}$ 的工艺参数条件下, 板材厚度对弯曲角度的影响规律。样件的尺寸: 长度均为 90 mm , 宽度均为 20 mm 。

由图10可以看出, 随着板材厚度的增大, 弯曲角度随之减小。且当板材厚度由 0.3 mm 增大为 0.5 mm 时, 弯曲角度减小的值(即弯曲角度的增量)远大于板厚由 0.5 mm 增大为 0.6 mm 时的情况。这是因为在其他工艺参数一定的条件下, 板材厚度越大, 弯曲时所需的弯曲力矩越大, 从而对内部热应力的需求就越大, 以致板材的弯曲角度就越小。

由此可知, 在其他工艺参数一定的条件下, 存在一个板材厚度的极限值, 也即存在一个板材厚度的最大值, 当板材厚度超过该最大值时, 将无法实现对板材的激光弯曲成形。

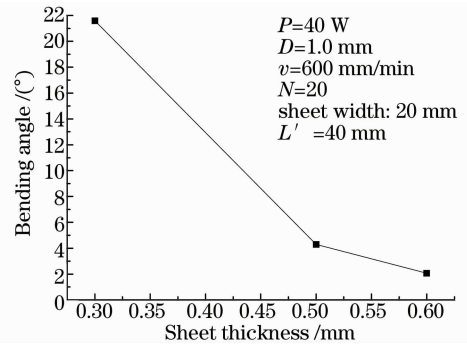


图10 板材厚度对弯曲角度的影响

Fig.10 Effect of sheet thickness on bending angle

4 结 论

研究了半导体激光器对影响铝-锂合金薄板激光弯曲成形的主要因素进行了系统的试验研究, 得出以下结论:

1) 在其他工艺参数一定的条件下, 弯曲角度随着激光功率、扫描次数、板材宽度的增大而增大; 随着板材厚度的增大而减小。同时, 当激光功率过大时(为 45 W 时), 板材表面会出现烧蚀现象; 扫描次数 $N \geq 20$ 时的弯曲角度的增量小于 $N \leq 20$ 时的弯曲角度的增量; 当板材宽度增大到一定程度时, 弯曲角度随板材宽度的变化趋于平缓, 逐渐达到稳定; 存在一个板材厚度的最大值, 当板材厚度超过该最大值时, 将无法实现对板材的激光弯曲成形。

2) 随着激光扫描速度的增大, 板材的弯曲角度先增大后减小; 对于给定板材的激光弯曲成形, 存在一个最佳扫描速度使板材产生的弯曲变形最大。

3) 随着光斑直径的增大, 弯曲角度先减小, 后增大, 再减小; 在光斑直径变化时, 当由能量密度起主要作用转为激光辐射区的大小起主要作用以及由激光辐射区的大小起主要作用转为能量密度起主要作用时, 分别存在一个光斑直径值, 使在这两个光斑直径下所得到的弯曲角度分别为极小值和极大值。

4) 随着扫描线距自由端距离的增大, 弯曲角度先减小后增大; 并且当激光加热区(即激光扫描区)与自由端之间的板材由对加热区材料的吸热作用转为刚性约束作用时, 此时存在一个扫描线距自由端距离的值, 使在该扫描线距自由端距离下所得到的弯曲角度为极小值。

参 考 文 献

- 1 Guan Yanjin, Ji Zhong, Sun Sheng *et al.*. Technology and application of forming caused by laser-induced thermal stresses [J]. *Aeronautical Manuf. Technol.*, 1999, (4): 30~35
管延锦, 季 忠, 孙 胜 等. 激光诱发的热应力成形技术及其应用[J]. 航空制造技术, 1999, (4): 30~35
- 2 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9): 859~864
李伟民, M. Geiger, F. Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. 中国激光, 1998, **A25**(9): 859~864
- 3 Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Experimental study on laser bending of shipbuilding sheet plate[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2005, **30**(5): 64~66
裴继斌, 张立文, 张全忠 等. 船舶钢板激光弯曲成形的实验研究[J]. 锻压技术, 2005, **30**(5): 64~66
- 4 J. Lawrence, M. J. J. Schmidt, L. Li. The forming of mild steel plates with a 2.5 kW high power diode laser [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, **41**(7): 967~977
- 5 S. P. Edwardson, E. Abed, K. Bartkowiak *et al.*. Geometrical influences on multi-pass laser forming[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(2): 382~389
- 6 J. Lawrence. A comparative investigation of the efficacy of CO₂ and high-power diode lasers for the forming of EN3 mild steel sheets[J]. *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.*, 2002, **216**(11): 1481~1491
- 7 Cai Yougui, Wang Xiufeng, Chen Guangnan *et al.*. Experiment of sheet metal on laser bending[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(2): 154~157
蔡友贵, 王秀凤, 陈光南 等. 板料激光弯曲试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, **35**(2): 154~157
- 8 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical and experimental study on the laser micro-bending process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 276~280
刘 杰, 孙 胜, 管延锦. 微尺度激光弯曲成形数值模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 276~280
- 9 Shi Yongjun, Liu Feng, Qi Yaoguang *et al.*. Effect of heating position on deformation of plate in laser forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1087~1090
石永军, 刘 峰, 綦耀光 等. 激光热成形工艺中加热位置对板材变形的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1087~1090
- 10 Shi Yongjun, Yao Zhenqiang, Shen Hong *et al.*. Research on the mechanisms of laser forming for the metal plate[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(12-13): 1689~1697
- 11 Toshiyuki Miyazaki, Tadashi Misu, Osamu Yamazaki *et al.*. Laser bending of thin metal plate-effects of two beams and single line beam on bending characteristics based on buckling mode[C]. ICALEO 2006 Congress Proceedings, Scottsdale, AZ, United States: Laser Institute of America, 13501 Ingenuity Drive-Suite 128, Orlando, FL 32826, United States, 2006: 800~804
- 12 L. Casamichele, F. Quadri, V. Tagliaferri. Process-efficiency prediction in high power diode laser forming[J]. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2007, **129**(5): 868~873
- 13 F. R. Liu, K. C. Chan, C. Y. Tang. Numerical modeling of the thermo-mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites in laser forming by using a multi-particle cell model[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, **68**(9): 1943~1953
- 14 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical study on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1265~1270
刘 杰, 孙 胜, 管延锦. 预应力作用下微尺度激光弯曲成形的数值模拟[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1265~1270
- 15 M. L. Chen, J. Jeswiet, P. J. Bates *et al.*. Experimental study on sheet metal bending with medium-power diode laser [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, **222**(3): 381~389
- 16 V. Paunoiu, E. A. Squeo, F. Quadri *et al.*. Laser bending of stainless steel sheet metals[J]. *Int. J. Mater. Forming*, 2008, **1**(s1): 1371~1374
- 17 Me. Sistaninia, Ma. Sistaninia, H. Moeanodini. Laser forming of plates using rotating and dithering beams[J]. *Computational Materials Science*, 2009, **45**(2): 480~488
- 18 Takashi Ueda, Eisuke Sentoku, Yoshihiro Wakimura *et al.*. Flattening of sheet metal by laser forming[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, **47**(11): 1097~1102
- 19 Lin Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2000, **34**(4-6): 231~253
- 20 Zhu Zuchang, Ye Jian. Application status of high power diode lasers for transformation hardening of steels [J]. *Heat Treatment. Metals*, 2008, **33**(8): 16~20
朱祖昌, 叶 俭. 高功率二极管激光器在钢相变硬化中的应用现状[J]. 金属热处理, 2008, **33**(8): 16~20
- 21 Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 189~194
马晓宇, 王 俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 189~194
- 22 Friedrich Bachmann. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, **208-209**(Suppl.): 125~136
- 23 Chen Dunjun. Research on Laser Bending of Sheet Metals[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001, 22~23
陈敦军. 板料激光弯曲成形的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001. 22~23