

激光偏振特性在微尺度工件激光弯曲成形中的作用

刘杰, 孙胜, 管延锦

(山东大学模具工程技术研究中心, 250061, 济南)

摘要: 根据激光的偏振特性影响金属材料对激光的吸收这一特点, 通过改变激光扫描工件表面的入射角, 提高了金属表面对 CO_2 激光能量的吸收率, 使厚度为 0.1 mm 的微尺度不锈钢工件在未进行黑化处理的情况下获得了弯曲变形. 实验结果表明, 在采用线偏振激光对具有吸收层的工件进行多次扫描时, 由于变形部分入射角增大引起激光吸收率提高, 以及光斑面积增大引起激光功率下降, 从而导致作用于工件表面的激光能量因素改变, 这是弯曲角度发生变化的主要原因.

关键词: 激光微尺度弯曲成形; 激光偏振特性; 入射角

中图分类号: TN249; TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0096-05

Experimental Study on Laser Polarization Properties in Laser Micro-Bending Processes

LIU Jie, SUN Sheng, GUAN Yanjin

(Mold & Die Engineering Technology Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The influence of the beam polarization in laser bending process is experimentally investigated. With the beam polarization of laser, the laser absorption of the metallic specimen can be enhanced by increasing the incident angle. The bend angles are achieved in stainless foil specimens without absorptive coatings, and larger bend angles can be obtained by single laser scanning with higher incident angles. Multi-pass laser bending experiments are also carried out on the same material with graphite coatings. The results show that the bend angle per pass is affected obviously by the beam polarization, and the bend angle per pass increases significantly while the total bend angle gets big enough. Using polarized light, the laser beam distortion and laser absorption change induced by the variation of the absorptive coatings and laser incident angle are the two main factors affecting the coupled laser energy. The bending rule is the synthesis effect of the above two factors.

Keywords: laser micro-bending; beam polarization; incident angle

激光弯曲成形^[1]作为一种无外力、无模具的柔性板材成形工艺, 其研究领域已经从单纯的二维弯曲发展到复杂的曲面成形. 近年来, 激光弯曲成形技术在微尺度工件加工方面逐渐成为研究的热点^[2-5].

在激光弯曲成形加工过程中, 固相金属表面对 CO_2 激光有较高的反射率, 激光能量利用率低, 因此研究者往往采用在工件表面涂覆吸收层的方法来

提高金属对激光能量的吸收率. 但是, 在激光弯曲成形工艺中, 随着扫描次数增加, 吸收层被不断消耗, 从而使激光能量的利用率下降, 并且在一些微细精密加工中, 由于精度和空间的限制, 还无法涂覆吸收层. 另外, 涂覆吸收层不仅增加了工艺的复杂程度, 同时还引入了新的不确定性因素. 总之, 解决激光的高反射率问题对金属激光弯曲成形工艺至关重要.

1 激光偏振特性及其应用

在激光金属相变硬化技术中,经常利用激光的偏振特性来提高金属表面对 CO_2 激光的吸收率^[6].

图 1 所示为平行于入射面的偏振光的反射率 R_p 和垂直于入射面的偏振光的反射率 R_s 与入射角的关系. 由图可见: R_p 先随入射角的增加而减小, 在达到最小值后, 随入射角的进一步增加急速上升. R_p 达到最小值时的入射角相当于材料的布儒斯特角, 这个角度及相应的 $R_{p,\min}$ 值随材料而定. 对于不锈钢, 此角度约为 85° , 此时 $R_{p,\min} \approx 20\%$.

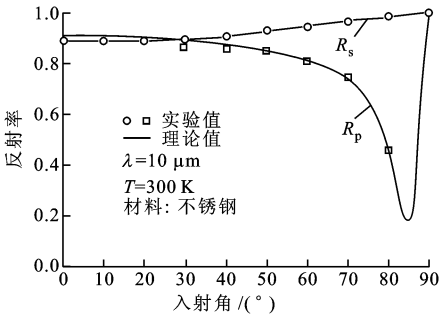


图 1 激光偏振光反射率随入射角的变化^[5]

通过上述分析可知, 当采用线偏振激光、偏振方向在入射平面内、入射角达到或接近材料的布儒斯特角时, 材料表面对 CO_2 激光有强烈的吸收. 因此, 增大入射角可以获得较高的表面吸收率.

2 激光偏振特性的实验研究

为了验证激光偏振特性在激光弯曲成形中的作用, 本文设计了可改变激光入射角度的工件夹持装置, 如图 2 所示. 通过旋转夹持装置中心轴来改变激光入射工件表面的角度, 同时计算出 x 方向与 z 方向的偏移距离来调整激光束扫描位置, 以保证扫描路径位置和聚焦透镜到扫描路径中心之间的垂直距离与激光垂直入射时的相同.

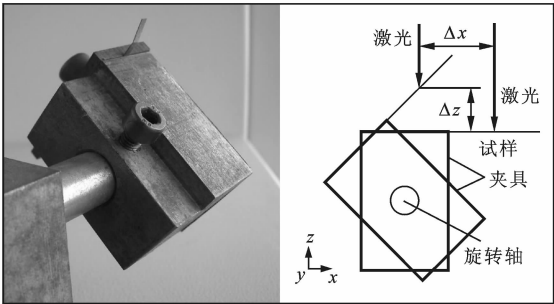


图 2 变入射角激光弯曲成形夹持装置

2.1 无吸收涂层工件变入射角激光弯曲实验

采用波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光, 对尺寸为 $10\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 0.1\ \text{mm}$ 的 AISI304 不锈钢箔进行实验, 工件表面光亮, 未经黑化处理. 为了清晰地观察偏振特性的影响, 实验中选用的入射角范围为 $60^\circ \sim 85^\circ$. 激光工艺参数如表 1 所示.

表 1 激光工艺参数

激光功率/W	光斑直径/mm	扫描速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
21	0.2	10~30

图 3 为不同入射角下单次扫描的工件弯曲角度曲线, 从中可以看出, 当入射角由 60° 增大到 80° 时, 不同扫描速度下工件的弯曲角度随入射角的增大而增大, 两者之间呈近似线性关系, 但是当入射角超过 80° 时, 工件的弯曲角度大幅减小.

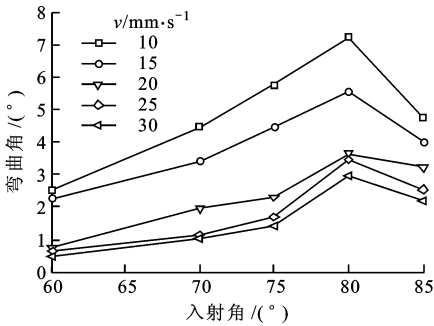


图 3 不同激光入射角下的工件弯曲角曲线

影响工件弯曲角度的主要因素是作用于工件的激光能量. 在多次扫描过程中, 有两方面的因素影响激光能量: 一是工件表面的激光光斑面积, 当激光功率一定时, 光斑面积的大小决定了工件表面的功率密度; 二是工件对激光的吸收率, 当激光入射角变化时, 工件表面对激光的反射率 (如图 1 所示) 和光斑面积也同时发生改变. 所以, 要了解作用于工件的激光功率密度的实时变化情况, 就要综合考虑这两方面的因素.

图 4 为激光束以非零入射角辐照到工件表面时的光斑几何形状, 其中 D 为光斑直径, R_1 为光斑半径, φ 为激光光束入射角, R_2 是由于非零入射角引起光斑畸变所形成的椭圆的长半轴.

很明显, 光斑面积随激光入射角的增大而增大. 发生畸变后的椭圆光斑的长半轴

$$R_2 = R_1 / \cos\varphi \tag{1}$$

则发生畸变后的光斑面积

$$A = \pi R_1 R_2 = \pi R_1^2 / \cos\varphi \tag{2}$$

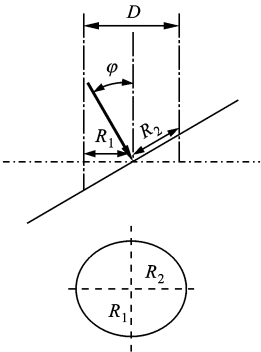


图 4 激光非零入射角照射时工件表面的光斑形状

工件表面的激光功率密度

$$I = (1 - R_f) p / A \tag{3}$$

式中： R_f 为工件表面对激光的反射率。

图 5 为根据式(2)、式(3)和图 1 中的数据计算得到的工件表面光斑面积与激光平均功率密度随入射角的变化曲线,可以看出,在入射角由 60° 增大到 80° 期间,光斑面积增大的趋势比较缓和,此过程中激光吸收率也随入射角的增大而提高(见图 1),二者的综合作用使激光功率密度随入射角的增大而小幅度减小。

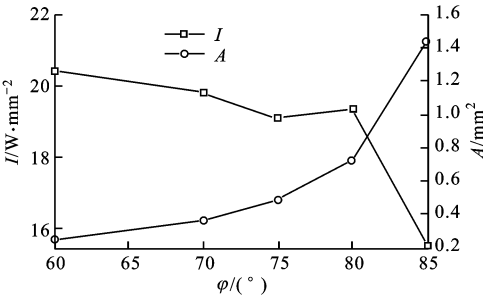


图 5 入射角对激光功率密度和光斑面积的影响

对比激光功率密度与光斑面积的变化曲线发现,在入射角由 60° 增大到 80° 期间,光斑面积增大的幅度大于激光功率密度下降的幅度. 较大的光斑面积意味着加热区域的增大,而较小的激光功率密度下降幅度则意味着工件表面的温度不会显著降低. 加热区域增大势必引起参与变形的材料增多,有利于弯曲角度的增大,所以在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 入射角范围内,工件的弯曲角度是随入射角的增大而增大的。

当入射角超过 80° 并继续增大时,从图 5 所示曲线可以看出,光斑面积急剧增大,导致工件表面的激光功率密度大幅下降,从而使工件的弯曲角度急剧减小。

2.2 工件涂覆吸收层时的激光弯曲成形实验

为了解激光偏振特性在激光多次扫描弯曲成

形中的作用,本文实验研究了激光沿同一路径对涂覆吸收层的不锈钢箔多次扫描的变形规律. 激光首次扫描以零入射角入射,这样工件变形部分的入射角将随工件弯曲角度的变化而变化. 工件尺寸为 $10\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$,表面进行黑化处理(碳黑吸收层),采用的激光线能量不高于 1 J/mm . 实验中激光束沿同一扫描路径单向扫描,前一次扫描结束后,待工件完全冷却再进行下一次扫描。

如图 6 所示,3 条工件弯曲角曲线有共同的变化趋势,在多次扫描中都经历了 3 个不同的增长阶段:在开始阶段约 5 次扫描内,弯曲角曲线的斜率较大,说明此过程中弯曲角增长的速率较大;随着扫描次数的增加,弯曲角曲线的斜率变小;当弯曲角达到某个值后,弯曲角增加的速率又突然变大,直到弯曲角接近 90° 。

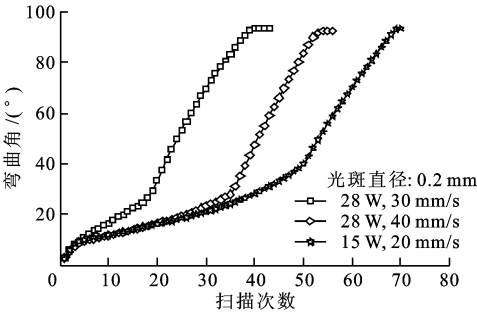


图 6 工件弯曲角与扫描次数的关系

图 7 为单次扫描的弯曲角与已形成的弯曲角之间的关系曲线. 在不同的工艺条件下,当已形成的弯曲角相同时,单次扫描的弯曲角变化曲线在横坐标方向趋于重合,说明单次扫描的弯曲角变化与已形成的弯曲角的某个特定值有很大关系。

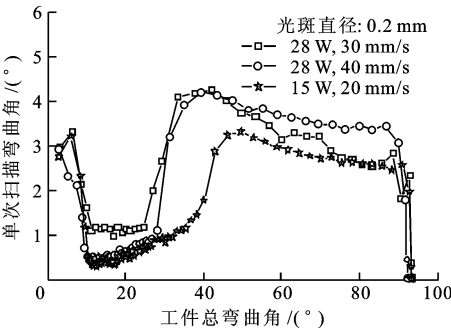


图 7 单次扫描弯曲角随工件总弯曲角的变化

Edwardson 等人^[7-8]曾对多次扫描时因工件变形导致光斑形状畸变,从而使激光功率密度发生变化的情况进行了分析,但分析中未考虑由激光偏振

特性引起的吸收率变化所产生的影响. 本文对这种影响的方式和程度进行如下分析.

图 8 为一端夹持方式下工件弯曲变形引起光斑形状变化的示意图,图中 D 为激光光斑直径, R_1 为垂直入射时的光斑半径, R_2 为由于工件弯曲变形而发生畸变(变为椭圆)后的光斑长半径, α 为工件弯曲角, φ 为光束照射工件变形表面的入射角.

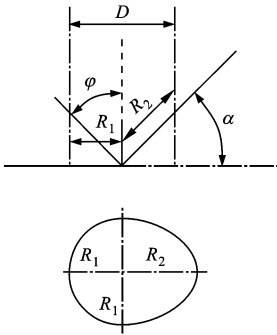


图 8 一端夹持情况下工件弯曲变形引起光斑形状变化示意图

由几何关系可知,工件弯曲变形部分的激光入射角 φ 与弯曲角 α 是相等的,所以随着弯曲角的增大,弯曲变形部分的入射角也不断增大. 随着弯曲角增大,弯曲变形表面的光斑发生畸变,畸变椭圆的长半轴可由下式表示

$$R_2 = \frac{R_1}{\cos\alpha} \tag{4}$$

总的光斑面积

$$A = \frac{\pi R_1^2}{2} + \frac{\pi R_1 R_2}{2} \tag{5}$$

将式(4)代入式(5),可得

$$A = \frac{\pi R_1^2}{2} \left(1 + \frac{1}{\cos\alpha}\right) \tag{6}$$

通过式(6)计算的光斑面积随工件弯曲角的变化趋势如图 9 所示. 随着弯曲角的增大,光斑面积也不断增大,这将造成激光功率密度下降,但同时工件弯曲变形部分的入射角增大将使激光反射率减小,激光能量利用率由此又得以提高. 可见,多次扫描弯曲成形过程中激光能量的变化是这两个因素综合作用的结果.

实验结果表明,在最初的几次扫描中,由于吸收层未被破坏,激光吸收系数大,故工件表面的峰值温度已接近甚至超过材料熔点,热量向下表面传递较多,使温度梯度减小而不利于弯曲成形. 当吸收层被消耗掉、激光吸收率降低后,工件表面的峰值温度下降到材料熔点以下,弯曲变形量显著增大. 随着激光

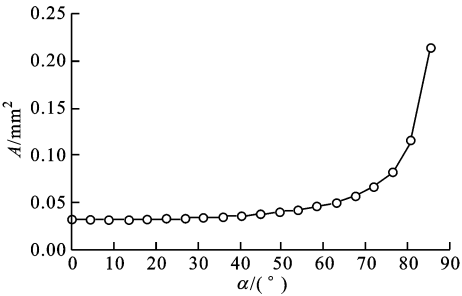


图 9 弯曲角对光斑面积的影响

扫描的继续进行,吸收层被消耗殆尽,激光吸收率急剧下降,致使激光的工作能量迅速降低,工件的弯曲角大幅度减小. 此后,激光吸收率和光斑面积基本上不再变化. 因此,引起激光工作能量变化的主要原因是吸收层的消耗.

当吸收层被完全破坏后,作用于工件表面的激光能量趋于稳定. 如图 7 所示,大约在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 区间,单次扫描获得的弯曲角变化平缓. 当总弯曲角增大到 30° 左右时,激光吸收率由于入射角的增大而明显加强,而此时由弯曲变形带来的光斑面积的增大并不显著(见图 9),所以单次扫描的弯曲角度在此阶段呈指数增长,直到光斑畸变引起的激光功率降低与激光吸收率增强的效果趋于平衡时,单次扫描弯曲角度才不再发生较大变化. 当弯曲角接近 90° 时,由于光斑面积迅速增大,功率密度降到很低,从而使弯曲角急剧减小.

2.3 激光吸收系数恒定时的多次扫描激光弯曲成形

在多次扫描激光弯曲成形实验中,每次扫描过后立即补充被消耗的工件表面吸收层,以使激光吸收率基本保持不变,此时影响作用于工件的激光能量的主要因素就是光斑面积,而光斑面积是随弯曲角变化的,这样便可从另一个方面来研究激光偏振特性对激光弯曲成形的影响.

图10为在每次激光扫描与冷却结束后都重新

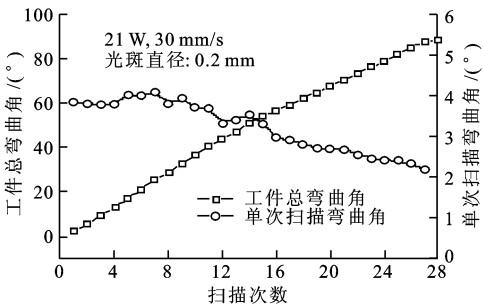


图 10 激光吸收系数恒定时工件总弯曲角和单次扫描弯曲角随扫描次数的变化

进行吸收层涂覆的情况下,多次扫描的工件总弯曲角与单次扫描弯曲角随扫描次数的变化曲线,从中可以发现,当激光吸收系数不变时,总弯曲角和单次扫描弯曲角都与扫描次数成近似线性关系,单次扫描获得的弯曲角度随扫描次数的增加呈递减趋势,这是因为在此过程中引起激光能量变化的因素主要是工件表面光斑面积的变化。

3 结 论

(1)变入射角激光弯曲成形实验的结果表明,采用激光线偏振光在较大入射角情况下进行扫描,可显著提高激光吸收率,无吸收涂层的工件也可以获得大的弯曲角度。

(2)对具有吸收涂层的工件进行的多次激光扫描实验结果表明,单次扫描弯曲角与已形成的弯曲角有很大关系。由于激光偏振特性引起激光吸收率变化以及累积弯曲角引起光斑面积变化,影响了实际作用于工件的激光能量,使得单次扫描弯曲角经历了急剧减小→相对维持→迅速增大→缓慢减小的变化过程。

参考文献:

- [1] 管延锦,孙胜,赵国群,等. 预约束应力作用下的激光弯曲成形仿真工艺研究[J]. 中国激光, 2002, 29(8): 755-758.
GUAN Yanjin, SUN Sheng, ZHAO Guoqun, et al. Simulation of the laser bending process of sheet metals with pre-stresses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(8): 755-758.
- [2] ZHANG Richard X, XU Xianfan. High precision mi-

cro-scale bending by pulsed and CW lasers [J]. Transactions of the ASME, 2003, 125(3): 512-518.

- [3] 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.
LIU Jie, SUN Sheng, GUAN Yanjin. Numerical and experimental study on the laser micro-bending process [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 276-280.
- [4] 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.
LIU Jie, SUN Sheng, GUAN Yanjin. Numerical study on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1265-1270.
- [5] YOSHIOKA S, MIYAZAKI T, MISU T, et al. Laser forming of thin foil by a newly developed sample holding method [J]. Journal of Laser Applications, 2003, 15(2): 96-100.
- [6] 李力钧. 现代激光加工及其装备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [7] EDWARDSON S P, ABED E, CAREY C, et al. Key factors influencing the bend per pass in laser forming [C]// Proceedings of Laser Materials Processing Conference. Orlando, Florida, USA: Laser Institute of America, 2007: 508-514.
- [8] EDWARDSON S P, ABED E, BARTOWIAK K, et al. Geometrical influences on multi-pass laser forming [J]. Journal of Physics, D: Applied Physics, 2006, 39(2): 382-389.

(编辑 葛赵青)

“2009 技术与创新国际学术会议”将在我校召开

“2009 技术与创新国际学术会议”将于 2009 年 10 月 12~14 日在我校召开。本次会议的主题是低碳和可持续制造,会议的英文名称是 International Technology and Innovation Conference 2009: Low Carbon and Sustainable Manufacturing,简称 ITIC 2009。

技术与创新国际学术会议是由英国 IET 学会和中国机械工程学会共同主办的。第一次在中国举办的技术与创新国际学术会议的主题是先进制造技术(International Technology and Innovation Conference 2006: Advanced Manufacturing Technologies),于 2006 年在中国杭州召开,与会代表 400 多人,会议论文集收录了 400 多篇来自世界各地的论文,由英国 IET 学会出版社出版,并被 Ei 和 INSPEC 收录。

本届会议的论文集将继续由英国 IET 学会出版社出版,投稿本次会议的英文论文一旦通过审核被收录到论文集中,仍将被 Ei 和 INSPEC 收录。

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>,邱志惠供稿)