

文章编号: 1001-3806(2004)04-0340-04

## 管材激光弯曲规律的试验研究

刘顺洪, 方熊, 樊昕荣

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 通过实验研究管状件激光弯曲成形的机理以及成型规律。金属管状零件的激光弯曲成形是一种利用激光加热来实现构件的柔性成形技术, 其基本原理是利用高能激光束扫描金属管表面, 加热区域材料的热膨胀引起材料产生堆积, 冷却后, 该区域材料沿轴向上的缩短, 导致了金属管朝向激光束的弯曲从而最终实现无模具成形。影响金属管状零件激光弯曲成形的工艺参数主要有激光功率、扫描角度、扫描次数、光斑直径和扫描速度。通过实验研究了工艺参数对弯曲角度的影响。在一定取值范围内, 增大激光功率, 增大扫描角度, 增加扫描次数, 降低扫描速度均可以使弯曲角度变大; 增大光斑直径, 弯曲角度会变小。

**关键词:** 激光加工; 激光成形; 钢管弯曲; 机理

中图分类号: TG665 文献标识码: A

### Experiment investigation on rules of laser tube bending

LIU Shurong, FANG Xiong, FAN Xinrong

(School of Materials Science and Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper the mechanism of the laser bending of tube parts is elaborated. And the bending rules are obtained through the experiment. Laser tube bending is a flexible forming process by which metal tube can be bent without external force. It is generally known that laser bending of tubes is achieved through upsetting mechanism. The scanned region of the tube is heated almost homogeneously in the thickness direction, and undergoes compressive plastic deformation and wall thickening due to restriction on thermal expansion by the surrounding material. The major problem in the study of laser bending is to understand the temperature and stress-strain distribution at different process parameters and scanning paths. The process parameters influencing the laser bending parts of tube mainly include laser power, scanning angle and numbers, facular diameter and scanning speed. With the help of the experiment the respective influence of the five process parameters on the bending angle is studied. Within the range of some fixed value given, the bending angle can be increased by the following means: increasing the laser power, scanning angle and scanning numbers and decreasing the scanning speed.

**Key words:** laser process; laser forming; tube bending; mechanism

### 引言

在现代工业生产中, 用管材制造的弯曲零件除了大量用于气体和液体管道工程外, 在船舶制造业、锅炉及压力容器制造业、中央空调制造业、汽车工业、航空航天业、石油化工、轻工等工业部门也得到了广泛使用。传统的管材弯曲<sup>[1]</sup>为机械弯曲, 按照弯曲方式可分为: 压弯、滚弯、推弯和绕弯 4 种。在机械弯曲中, 管材的变形区的外侧壁由于受到张力作用, 会产生壁厚变薄的现象, 这就导致凹陷或者裂纹而

产生张力破坏; 变形区的内侧壁会出现变厚的现象, 从而导致起皱。机械弯曲中还会出现一个最小弯曲半径, 这主要是因为可能会出现的张力破坏, 这个最小半径和管件的外直径成正比, 和材料的延展性成反比。机械弯曲的管材往往会出现椭圆化现象, 这是由于使用了模具, 而模具对内弧面施加了外力, 外弧面受到拉应力。机械弯曲还可能出现回弹的现象, 因此将带来一系列问题。

激光弯曲主要是通过内弧面的变形来达到, 而变形是变形区域沿轴向上的缩短和沿半径方向向外变形的效果之和, 此过程中作用在外弧面上的力远远小于机械弯曲中的程度, 因而外侧壁变薄的程度要小于机械弯曲。激光弯曲管材中, 最小弯曲半径并不是由于弯曲中的张力失效决定的, 故表面材料的

作者简介: 刘顺洪(1954), 男, 工学硕士, 教授, 主要从事激光材料加工和焊接力学行为的科研和教学工作。

E-mail: lius@pubic.wh.hb.cn

素,而是由激光的工艺参数来决定的。对于椭圆化问题,由于激光弯曲管材不使用模具,且管材外侧受到的张力要小许多,所以,激光弯曲管材的椭圆化率要小于机械弯曲。

激光成形是一种利用激光束照射材料表面时形成的内部非均匀热应力场来实现材料成形的新技术。通过调整激光加工工艺参数和选择合适的扫描轨迹就能成形任意的弯曲件、异形件和其它复杂的三维曲面等零件。它的显著优点是<sup>[2]</sup>:(1)无模成形,生产周期短,柔性大,特别适合批量小的大型零件生产;(2)非接触式成形,变形件无外力作用,不产生回弹变形和由此带来的其它问题;(3)属热态成形,总变形由多次扫描累积而成,故能够成形在常温下不易成形的难变形材料。

基于上述优点,激光弯曲管材技术在一些场合可以完全取代传统的机械弯曲技术。国外已在这方面进行了一些研究<sup>[3~5]</sup>。随着激光技术的进一步发展,这项技术势必能推广开来,成为一种大量应用的成熟的成形工艺。

笔者在研究板料激光弯曲成型的基础上,扩大激光弯曲的应用,研究钢管的激光弯曲成型的规律。钢管的激光成形方法比较复杂,根据所要弯曲的几何形状不同,采取的激光照射方法也大不相同。其变形机理很复杂,往往是好几种机理的混合。金属管材的激光弯曲成形过程是一个多因素综合作用的结果。影响其弯曲成型的主要因素很多<sup>[9]</sup>(见图 1)。主要是金属管外径、壁厚、材料性能参数(热力学性能及热物理性能)、激光功率、扫描速度、扫描角度和扫描次数等。

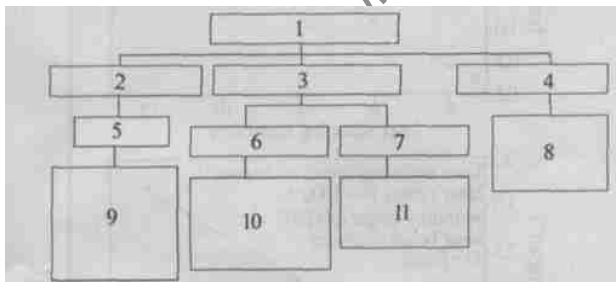


Fig. 1 Primary factors affecting laser tube bending

1—factors affecting laser tube bending 2—laser processed parameter 3—tube physical capability parameter 4—tube geometry parameter 5—energy density 6—heat physical capability 7—mechanics capability 8—tube outer diameter, tube wall thick, tube geometry 9—absorption coefficient, power density, scanning speed, scanning numbers, scanning angle 10—heat conduct coefficient, specific heat, heat expand coefficient, density 11—yield limit, elasticity modulus, poisson's ratio

在本研究中,利用激光对低碳碳钢管进行弯曲,通过

较,来说明激光功率、扫描角度、扫描次数、扫描速度和光斑直径等技术参数对金属管材的弯曲角度的影响,得出相应的规律结论。

## 1 实验设备及方法

实验使用激光器为横流 5kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器及其配套的数控工作台。冷却方式为空冷。实验材料为 Q235 碳钢管,直径  $d = 10\text{mm}$ ;壁厚  $t = 2\text{mm}$ ,长度  $l = 140\text{mm}$ 。

实验参数的确定如下:扫描角度  $\omega: 90^\circ, 180^\circ$ ;扫描次数  $n: 3, 4, 6, 8, 9, 12, 20$ ;光斑直径  $D: 5\text{mm}, 8\text{mm}, 11\text{mm}$ ;激光功率  $P: 500\text{W}, 600\text{W}, 700\text{W}, 800\text{W}, 1000\text{W}$ ;扫描速度  $v: 10\text{r/min}, 8\text{r/min}, 6\text{r/min}, 4\text{r/min}$ 。

弯曲角度测量的方法如下(见图 2):测量出  $L$  和  $d$  的值,计算出  $\frac{d}{L}$  的值,可以得出:  $\alpha = \arcsin \frac{d}{L}$ 。

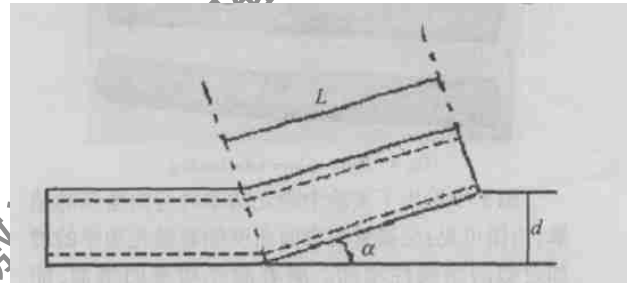


Fig. 2 Measure principle of experiment results

## 2 管材激光弯曲机理

本实验钢管激光弯曲采用墩粗机理如图 3a 所示。采用的光斑尺寸比钢管壁厚要大,但加热区

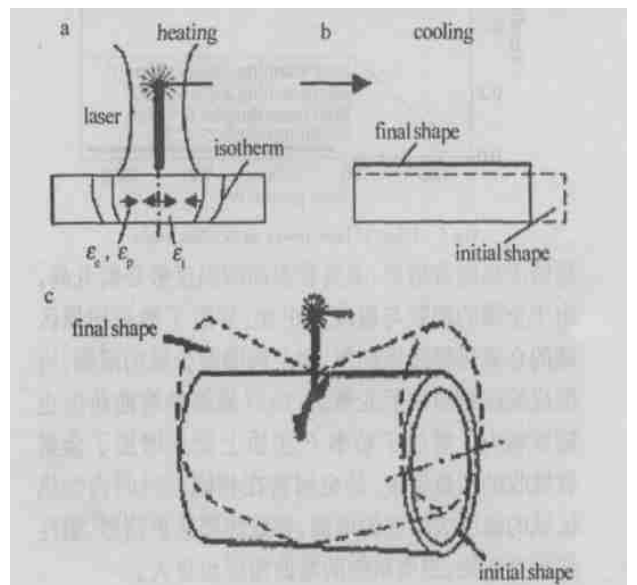


Fig. 3 Process steps of laser bending by the upsetting mechanism

的尺寸与材料截面相比要小得多,沿管子壁厚方向不产生温度梯度,受热区域的膨胀受到周围区域的

限制产生压缩塑性变形,引起材料的缩短和厚度的增加。冷却后,因收缩而缩短。这种加热变形机理用在钢管上,加热源相对于钢管截面中性轴呈不对称状态,其收缩偏于钢管中性轴一边,从而引起弯曲(见图3c)。对于薄壁管或管壁厚度与管径比很小时,激光弯曲钢管会同时产生墩粗和压曲现象。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 激光功率对弯曲角度的影响

图4为激光弯曲钢管的实物照片。上下两根钢管经过激光弯曲,中间钢管为参照管。

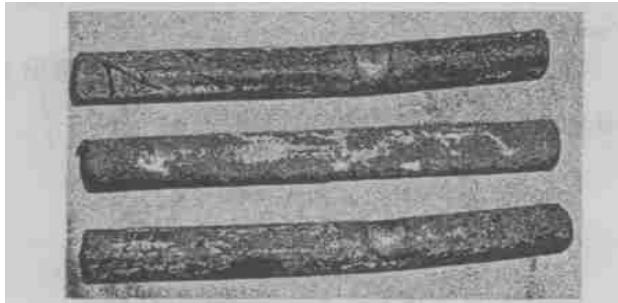


Fig. 4 Photo of laser tube bending

图5中给出了实验中激光功率对弯曲角度的结果,由图可见:金属管的弯曲角度随着激光功率的增加近似的呈线性增加。随着激光功率的增加,能

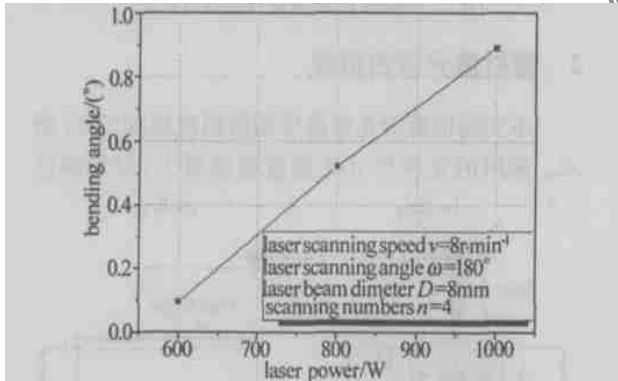


Fig. 5 Effect of laser power on bending angle

量密度也随着增加,金属管表面的温度势必要升高,由于金属的膨胀与温度成正比,导致了激光扫描区域的金属热膨胀更剧烈,加上周围冷金属的限制,所形成的压缩塑性形变更大,所以最终的弯曲角度也随着增大。增加了功率 $P$ 实质上就是增加了金属管吸收的能量密度,是金属管在相同的时间内加热区域的温度大幅度的增加,导致热膨胀更剧烈,塑性变形更明显,进而最终的弯曲角度也更大。

#### 3.2 扫描角度对弯曲角度的影响

在扫描角度不大于 $180^\circ$ 时,最终的弯曲角度随着激光扫描角度的增大而增大。扫描角度的增大则意味

域也会增大,所以冷却后管件弯曲的角度也变大。

图6中为扫描角度和弯曲角度之间的实验结果,从图中可以明显地看出,随着扫描角度的增加,最终弯曲角度也随着增大。

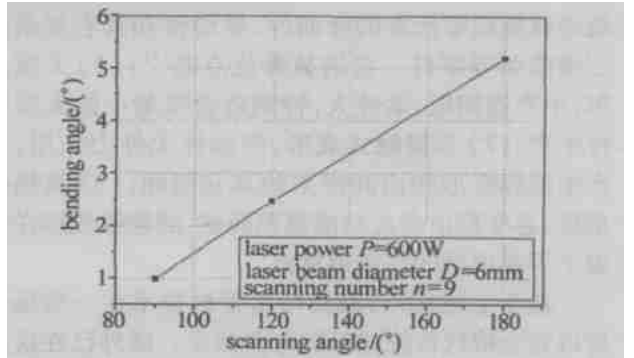


Fig. 6 Effect of scanning angle on bending angle

#### 3.3 扫描次数对弯曲角度的影响

激光弯曲成形是累积成形的过程,进行单次扫描后的管材只能得到一个很小的弯曲角度,在实际应用中,管材的弯曲角度一般要根据不同的用途达到不同的弯曲角度,这样就要对管材进行多次扫描,使管材达到所需要的弯曲角度,从而满足工程要求。实际使用中就需了解累积成形的规律。

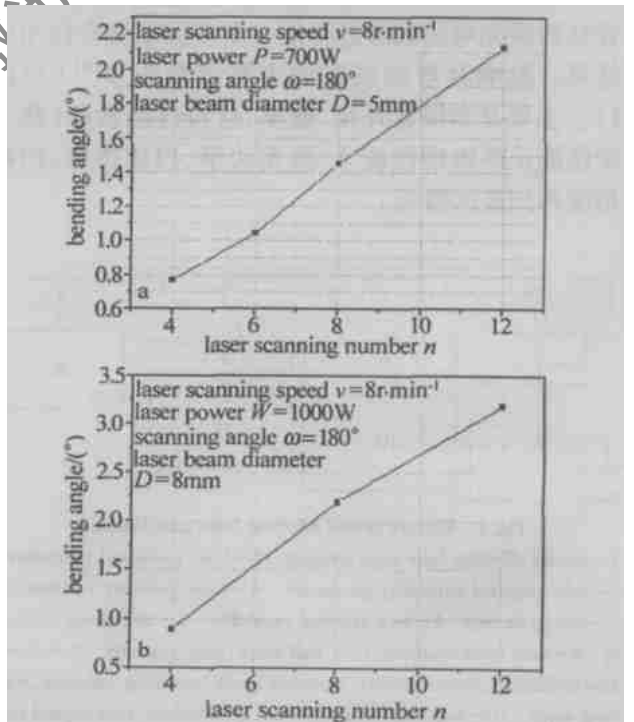


Fig. 7 Effect of laser scanning number  $n$

图7为不同功率和不同的扫描速度下,扫描次数对弯曲角度的部分试验结果。可以看出扫描次数和弯曲角度呈曲线关系:随着扫描次数的增加,弯曲角度也随着增大。在开始阶段,随着扫描次数的增加,弯曲角度增加较小,后阶段随着扫描次数的增

加,曲线变陡,即弯曲角度增加变快。这是由于激光弯曲是热态下的累积成形过程,单次的弯曲角度不是很大,但是累积起来就可能得到一个比较大的角度。在初始加热阶段,钢管处于冷态,刚性较大,单次扫描引起的弯曲角度较小,随着扫描次数的增加,前次扫描的热累积的作用相当于预热作用,使得后面扫描引起的压缩塑性量增加,故成形角度增加要大一些。

### 3.4 光斑直径对弯曲角度的影响

图8显示了实验中光斑直径和弯曲角度之间的关系,由图中可看出:随着光斑直径的增大,弯曲角度变小呈现减小的趋势。

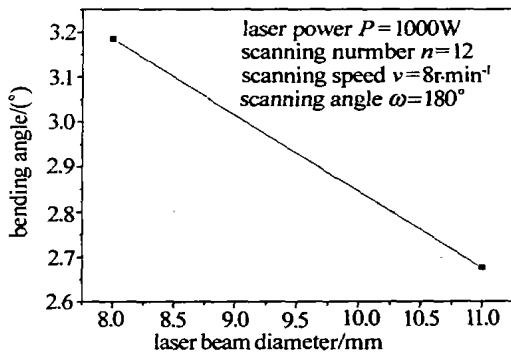


Fig. 8 Effect of laser beam diameter on bending angle

光斑直径的变化反应到金属管表面则分为温度的变化和扫描区域的变化;在功率不变的前提下,光斑直径越大,功率密度越小,则金属管的加热温度越低,因此塑性形变的量也随之减小,反应到宏观上就是金属管的弯曲角度变小。

### 3.5 扫描速度对弯曲角度的影响

图9中给出了激光扫描速度对弯曲角度的影响规律。由图可见,低碳钢管的弯曲角度随着扫描速度的增加近似地呈线性的减少。扫描速度的增加使得激光束对金属管表面加热区域的作用时间减少,由于作用时间减少,加热区域吸收的能量必然会减少,故加热区域的温度下降。这就意味着加热区域发生的热膨胀量也要减少,所以,扫描区域的压塑性

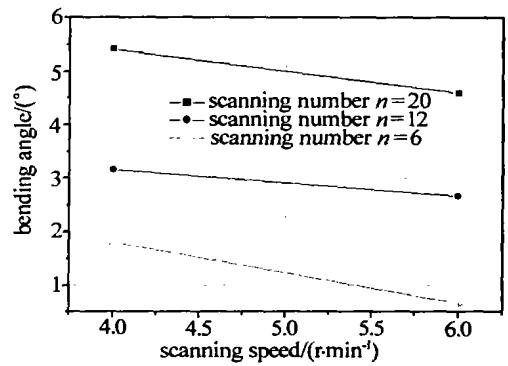


Fig. 9 Effect of laser scanning speed on bending angle

应变相应的减少,故最终的金属管弯曲角度也减小。

## 4 结论

(1) 激光功率和弯曲角度呈近似的线性关系,随激光功率增大,弯曲角度增加,但激光功率有一定的取值范围。(2) 在扫描角度不大于 $180^\circ$ 的情况下,扫描角度的增大,直接影响到弯曲角度的变化,两者呈近似线性增加关系。(3) 激光弯曲成形属于热态下的累积成形,所以在相同的条件下,扫描次数越多,弯曲角度越大。但每次扫描之间的间隔时间要控制,以防将管材烧穿。(4) 光斑直径对弯曲角度的影响是随着光斑直径的变大,弯曲角度变小。(5) 扫描速度变大,在扫描区域的作用时间就减少,最终导致弯曲角度的变小。

### 参考文献

- [1] 田福祥,王 珍. 管材弯曲加工新技术 [J]. 锻压机械, 2002, 3: 32~ 34.
- [2] 刘顺洪,周龙早,李志远. 激光弯曲成形的研究现状及发展趋势 [J]. 中国机械工程, 2000(增刊): 23~ 29.
- [3] LI W Ch, YAO Y L. Laser bending of tubes: mechanism, analysis, and prediction [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001 (11): 674~ 681.
- [4] HAO N, LI L. An analytical model for laser tube bending [J]. Applied Surface Science, 2003, 208~ 209: 432~ 436.
- [5] HAO N, LI L. Finite element analysis of laser tube bending process [J]. Applied Surface Science, 2003, 208~ 209: 437~ 441.
- [6] 刘顺洪,胡乾午,周龙早. 激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究 [J]. 中国激光, 2002, A29(11): 1049~ 1053.