

文章编号: 0258-7025(2007)09-1303-05

不同激光热源模式下薄板弯曲特性数值模拟

石经纬¹, 李俐群¹, 陈彦宾¹, 王 威²

(¹ 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

² 哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 利用非线性有限元分析软件,建立了纯铝薄板激光成形过程的三维弹塑性热力耦合有限元模型。选择等面积的圆形、方形、矩形 1/4 和矩形 4/1 光斑激光热源模式(矩形 1/4 和 4/1 表示激光光斑沿着光束扫描方向尺寸与垂直光束扫描方向尺寸的比例分别为 1:4 和 4:1),对不同激光热源模式下的板材弯曲特性进行了数值模拟计算,并分析了各种热源模式作用下板材温度场、位移场和应力应变场的特点。结果表明,在扫描过程中,圆形光斑热源模式获得了最高的峰值温度和上下表面温度差;而矩形 1/4 激光热源模式获得了最大的高温区作用宽度。矩形 1/4 激光热源模式产生了最大的塑性区宽度及上下表面总塑性应变差,因此获得了最大的弯曲角,内部残余应力最低。

关键词 激光技术;激光成形;激光热源模式;数值模拟;温度场;弯曲角

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

Numerical Simulation of Bending Properties for Sheet Metal with Different Laser Source Modes

SHI Jing-wei¹, LI Li-qun¹, CHEN Yan-bin¹, WANG Wei²

(¹ State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China
² Harbin Welding Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract The three-dimensional elastoplastic thermo-mechanical coupled finite element model of laser forming for pure aluminum plates is established with nonlinear finite element analysis software Msc. Marc. Circular, square, rectangular 1/4 (the size ratio of laser spot along the laser scanning direction and its vertical direction is 1:4, same as below) and rectangular 4/1 laser spots with the same area are chosen as the heat sources. The bending properties of sheet metal with four different laser source modes are simulated, and the temperature field, displacement field, stress and strain field are analyzed. The results show that the circular laser spot acquires the highest temperature peak value and temperature differences between upper and lower surfaces, while the rectangular 1/4 laser spot acquires the largest width of high temperature zone. The rectangular 1/4 laser spot which owns the widest plastic strain zone and highest total plastic strain differences between upper and lower surfaces obtains the highest bending angle, and also the lowest residual stress.

Key words laser technique; laser forming; laser source modes; numerical simulation; temperature field; bending angle

1 引言

激光成形作为一种柔性加工技术,早已引起工业界的广泛关注,国内外学者从实验和模拟两个方面^[1~4]都对激光成形技术进行了深入的研究,获得

了能量、材料和几何等因素对激光成形特性的影响规律。激光成形依靠局部加热在板材内部产生不均匀的温度场,从而产生热应力使板材发生塑性变形。陈彦宾等^[5]采用数值模拟的方法对高斯热源、均匀

收稿日期:2007-04-17;收到修改稿日期:2007-05-21

作者简介:石经纬(1984—),男,河南人,硕士研究生,主要从事激光弯曲成形方面的研究。E-mail:jingweishi@163.com

导师简介:李俐群(1970—),女,副教授,硕士生导师,目前从事金属板材与管材激光弯曲成形、激光焊接方面的研究。

E-mail:liliqun@hit.edu.cn

热源和等效矩形热源的溫度场进行了初步研究。管延锦等^[6]对管材的激光弯曲过程进行了数值模拟,将能量高斯分布的圆形光斑等效为面积相等的能量均匀分布矩形光斑,呈小步距间歇跳跃式移动,每个时间步跳跃一个网格间距。多数的研究人员都是针对典型的高斯分布圆形光斑进行不同光斑尺寸下板材激光弯曲特性的研究。随着科学技术的进步,近年来出现了更多的新型激光器,使得激光热源模式呈现多样化,圆形光斑可通过积分镜变为能量均匀分布的矩形光斑,半导体激光器更是可以获得多样化的光斑形式,这也为激光加工技术创造了更大的发展空间。

本文采用有限元数值模拟方法,针对目前激光加工中存在的典型圆形光斑、方形光斑、矩形光斑等光束能量分布特征,研究了不同热源模式下金属薄板弯曲成形过程中的溫度场、位移场、应力应变场等特点,为激光成形工艺的实际应用提供了理论依据。

2 有限元模型


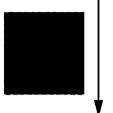

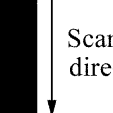
应用有限元分析软件 Msc. Marc 建立激光成形 L2 工业纯铝薄板的热弹塑性热力耦合模型。板材尺寸为 50 mm × 100 mm × 1 mm。假设材料为各向同性和连续的,原始状态板材内部无应力,材料表面

无熔化产生,材料性能随溫度变化^[7],塑性变形遵循米塞斯(Von Mises)屈服准则。采用 7 号八节点六面体单元对板材进行划分,为提高有限元分析的精度和效率,采用疏密不同的网格,在热源加载区域附近将网格加密,在厚度方向划分 4 层。定义扫描方向为 x 方向,垂直扫描方向为 y 方向,板厚方向为 z 方向。

激光束作为外加表面热流载荷输入,沿 x 方向匀速扫描。通过 Fortran 用户子程序 Flux 描述激光束的连续扫描,使激光热载荷以热流密度的形式施加到相应单元上。板材一端固定,约束端部所有节点 x, y, z 方向的平动自由度,以避免板材发生刚体位移。通过 Fortran 用户子程序 Film 描述板材与空气之间的对流、辐射换热,总的换热系数 $h = 11.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,板材经激光束扫描后在空气中自然冷却,初始溫度 $T_0 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$,对流辐射换热边界条件为 $q_h = h(T - T_0)$ 。设计面积相等的 4 种热源模式,如表 1 所示。方形与矩形光斑能量均匀分布,圆形光斑能量分布函数 $I = 2AP \exp(-2r^2/r_b^2) / \pi r_b^2$,为高斯能量分布,其中, A 为能量吸收系数, P 为激光功率, r_b 为光斑的有效半径, r 为工件上表面任意一点距光斑中心的距离。设材料对激光的吸收系数 $A = 0.65$ 。

表 1 4 种激光热源模式

Table 1 Four laser source modes

Laser source mode	Circular laser spot	Square laser spot	Rectangular 1/4 laser spot	Rectangular 4/1 laser spot
Shape of laser spot	 Scanning direction	 Scanning direction	 Scanning direction	 Scanning direction
Energy distribution	Gaussian distribution	Average distribution	Average distribution	Average distribution
Size of laser spot	$D = 9 \text{ mm}$	$8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$	$4 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$	$16 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$

3 模型验证

采用 CO_2 激光器,激光功率 $P = 600 \text{ W}$,扫描速度 $V = 30 \text{ mm/s}$,扫描次数 $N = 5$,选择圆形光斑(光斑直径 $D = 8 \text{ mm}$)进行纯铝板材的激光弯曲成形实验,两次扫描时间间隔为 4.33 s。在板材表面加碳黑涂层以增加吸收率。

分别采用热电偶和激光测距仪对板材上的两点溫度和一点位移进行测量,监测板材加热与冷却过程中的溫度与弯曲角变化。溫度监测点为工件下表

面中部距离扫描中心线 0 mm 和 10 mm 处两点。

图 1,图 2 所示分别为溫度、位移的实验值与模拟值。可以看出,连续 5 次扫描过程中溫度循环曲线模拟值和实验值吻合较好。对于位移情况,在扫描次数 N 较小时,模拟值与实验值吻合较好,当 N 达到 4 时,模拟值和实验值出现一定偏差, $N = 5$ 时偏差为 12%。主要有两方面的原因:1) 模型中屈服强度仅考虑其随溫度的变化,没有考虑其随应变与应变速率的变化;2) 模型中未考虑重力的影响,扫描次数较大时,板材溫度高从而导致刚度降低,重力

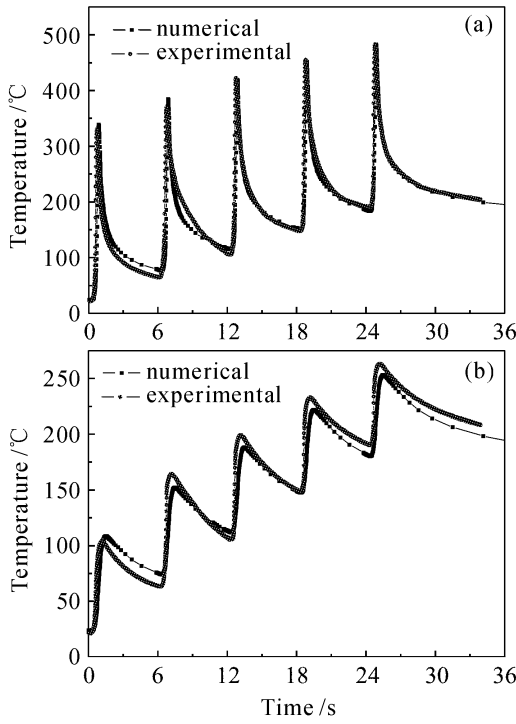


图 1 连续 5 次扫描过程中板材温度模拟值和实验值随时间变化的比较

(a) 扫描中心线; (b) 距离扫描中心线 10 mm

Fig. 1 Comparison of temporal change of numerical and experimental temperature in five continuous scanning processes

(a) central point; (b) point 10 mm away from central point

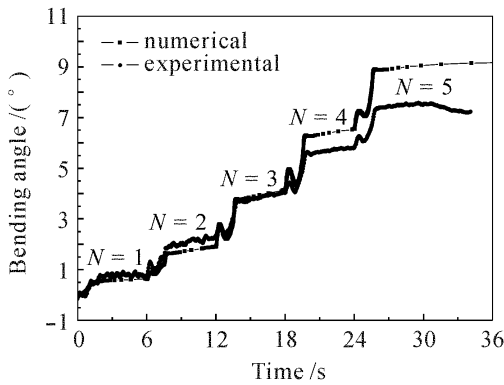


图 2 板材弯曲角模拟值和实验值的比较

Fig. 2 Comparison of numerical and experimental bending angles of sheet metal

阻碍弯曲的影响比较明显。

4 计算结果与分析

4.1 不同热源模式下的板材弯曲特性

采用的激光弯曲成形主要参数为：激光功率 $P = 800 \text{ W}$ ，扫描速度 $V = 30 \text{ mm/s}$ ，扫描次数 $N = 5$ ，每次扫描时间间隔为 4.33 s 。选择如表 1 所示的 4 种不同模式的激光热源进行激光成形数值模拟计算。

图 3 所示为不同热源模式下板材弯曲角的变化规律。可以看出，采用圆形光斑、方形光斑和矩形 1/4 光斑热源模式下弯曲角随扫描次数增加基本呈线性增长，而在矩形 4/1 光斑热源模式下，随扫描次数增大，板材弯曲角的增量逐渐减小。矩形 1/4 光斑热源模式下获得了最大的弯曲角，5 次扫描后可以达到 20° 左右，矩形 4/1 光斑热源模式下获得的弯曲角最小，5 次扫描后只有 11° 左右。

可见，在矩形光斑长边垂直于扫描方向时，能够获得比长边平行于扫描方向时更大的弯曲角。由于实验条件的限制，选择光斑尺寸为 $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 和 $4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的矩形光斑进行成形实验，功率 $P = 600 \text{ W}$ ，其弯曲角如图 4 所示，当长度为 4 mm 的边垂直于扫描方向时，获得了更大的弯曲角。

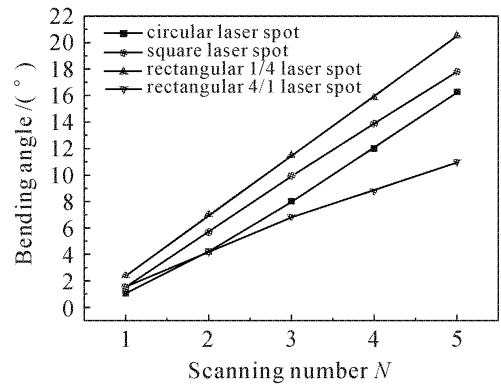


图 3 板材弯曲角随扫描次数的变化

Fig. 3 Relationship between bending angle and scanning number N

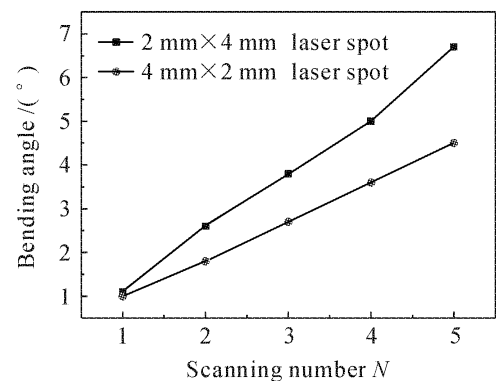


图 4 弯曲角的实验值

Fig. 4 Experimental results of bending angles

4.2 不同热源作用下的板材温度场分布特征

图 5 所示为扫描次数 $N = 5$ 时 4 种热源模式下板材上表面温度 ($^\circ\text{C}$) 的等值线图，可以看出，不同的热源模式形成了截然不同的温度场。以 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 等值线为例，4 种热源在板材中部 y 方向的宽度 B 分别为圆形光斑 17 mm ，方形光斑 20 mm ，矩形 1/4 光斑

25 mm,矩形 4/1 光斑 18 mm,可见,选择矩形 1/4 光斑可以获得较大的高温区宽度,而对于纯铝材料,当温度高于300 °C时,其屈服强度下降到室温时的 30%左右,因此,大的高温区宽度就意味着更多的材料易发生塑性变形。从 x 和 y 方向温度梯度分布来看,圆形光斑热源模式下等温线最密,温度梯度最高,矩形 4/1 光斑热源模式具有最小的 x 方向温度梯度,而矩形 1/4 光斑热源模式具有最小的 y 方向温度梯度。

板材厚度方向上的温度差分布规律。在热源辐照区域内上下表面存在温度差,而热源辐照区域之外上下表面温度相同,而在热源辐照区域,圆形光斑热源模式获得了类似高斯分布的温度差。其余的热源模式均获得了大小一致的温度差,圆形光斑热源模式具有最大的峰值温度差,约为40 °C,矩形 4/1 光斑热源模式的峰值温度差最小,仅为18 °C。4 种热源模式下光斑辐照区域内的平均温度差分别为 18.0 °C,16.0 °C,18.1 °C和15.6 °C。

宽度方向的高温区域范围和厚度方向的温度差是影响板材弯曲过程的两个重要因素,前者反映能够参与弯曲成形的材料的量,后者反映上下表面材料对弯曲成形贡献的差别。因此,定义 M 为这两个因素值的乘积,可得 4 种热源模式下的 M 值,依次为 307.2,319.4,451.0和280.0,其变化趋势与不同热源模式下的弯曲角的变化趋势一致。

4.3 不同热源作用下的应力应变场分布特征

图 7 所示为不同热源模式作用下,板材经历 5 次扫描之后上、下表面的 y 方向塑性应变分布特征。根据文献[7],板材弯曲角的大小主要取决于上下表面的总塑性应变差 $\Sigma\Delta\epsilon_p$, $\Sigma\Delta\epsilon_p$ 不仅取决于上下表面的塑性应变差,还受塑性区宽度的影响。

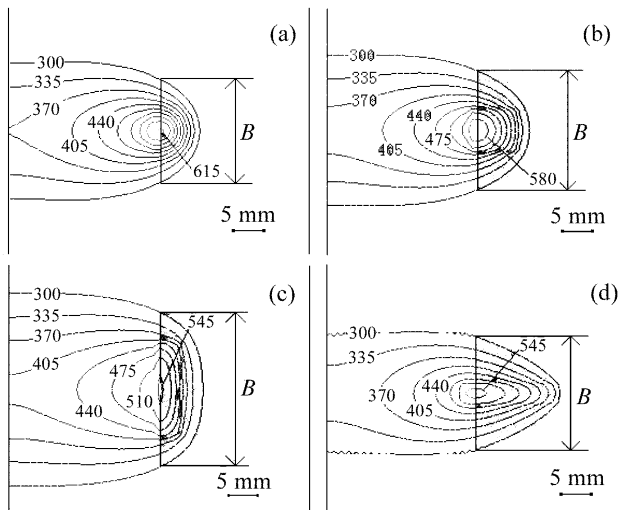


图 5 板材上表面温度分布

- (a) 圆形光斑;(b) 方形光斑;
- (c) 矩形 1/4 光斑;(d) 矩形 4/1 光斑

Fig. 5 Temperature distribution in the upper surface of sheet metal

- (a) circular laser spot; (b) square laser spot;
- (c) rectangular 1/4 laser spot; (d) rectangular 4/1 laser spot

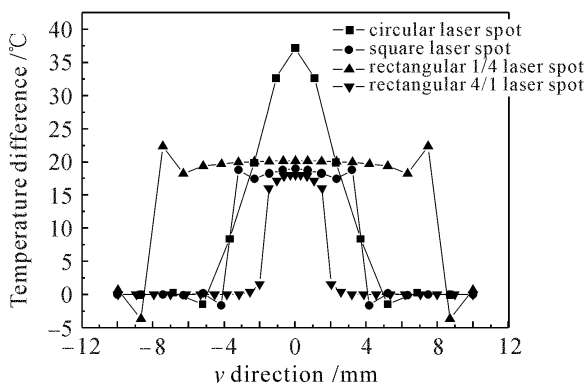


图 6 板材上下表面温度差分布规律

Fig. 6 Distribution of temperature difference between upper and lower surfaces of sheet metal

厚度方向上的温度差对板材的弯曲角也有重要影响,由于上下表面的温度差别使得上下表面材料的屈服应力大小不同,从而产生不等量的塑性应变使得板材弯曲变形。图 6 所示为 4 种热源模式下

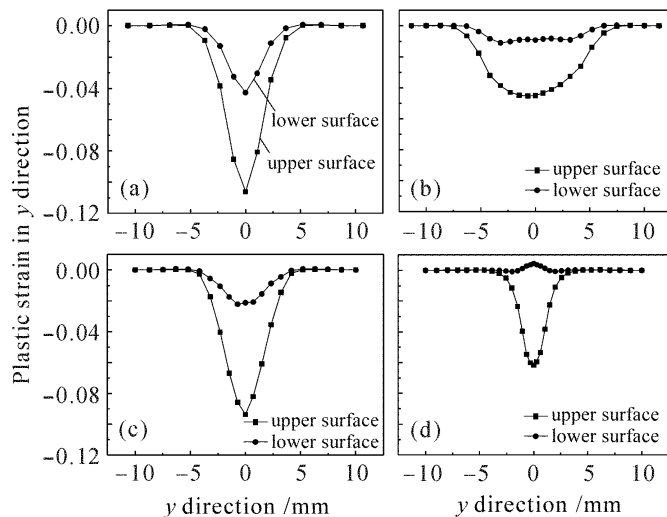


图 7 不同热源模式下 y 方向塑性应变分布

- (a) 圆形光斑;(b) 方形光斑;
- (c) 矩形 1/4 光斑;(d) 矩形 4/1 光斑

Fig. 7 Distribution of plastic strain in y direction with different laser source modes

- (a) circular laser spot; (b) square laser spot;
- (c) rectangular 1/4 laser spot; (d) rectangular 4/1 laser spot

由上下表面塑性应变差和塑性区宽度两个因素,得到圆形光斑、方形光斑、矩形 1/4 光斑、矩形 4/1 光斑 4 种热源模式的总塑性应变差,依次为

0.27189, 0.29427, 0.31880, 0.17692, 可见, 矩形 1/4 光斑热源模式实现了最大的弯曲角度。

图 8 为 $x = 0$ 时, y 方向的残余应力分布特征。可以看出, 板材下表面光斑扫描线上主要受拉应力, 而上表面光斑扫描线上在中间区域受拉, 两端区域受压, 这是因为在加热阶段, 板材中间区域受到的机械约束大于两边区域, 所以其较两边区域有更大的塑性压缩变形, 使得中间受拉, 两边受压。4 种热源模式相比, 矩形 4/1 光斑在板材上下表面的残余应力峰值最大, 矩形 1/4 光斑板材上下表面的残余应力峰值最小, 其余两种热源模式下的残余应力大小和分布相差不大。

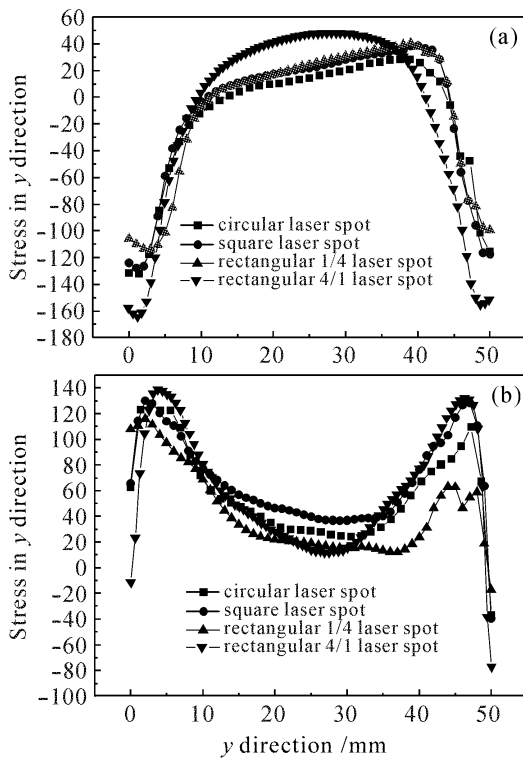


图 8 不同热源模式下的残余应力分布

(a) 板材上表面; (b) 板材下表面

Fig. 8 Distribution of residual stress in y direction with different laser source modes

(a) upper surface; (b) lower surface

5 结 论

采用有限元数值模拟方法对圆形光斑、方形光斑、矩形 1/4 光斑和矩形 4/1 光斑 4 种热源模式下的纯铝薄板的弯曲特性和温度场、应力应变场分布规律进行了模拟计算, 得到: 1) 在扫描过程中, 圆形光斑热源模式获得了最高的峰值温度和上下表面温度差; 而矩形 1/4 激光热源模式获得了最大的高温区作用宽度。高温区范围与板材的厚向温度差对弯曲角大小的影响作用同样重要。2) 矩形 1/4 激光热源模式产生了最大的塑性区宽度及上下表面总塑性应变差, 因此获得了最大的弯曲角, 并且内部残余应力最低。

参 考 文 献

- 1 Li Liqun, Wang Xuyou, Lin Shangyang *et al.*. Experimental and numerical study of energy effects in laser forming [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):155~159
李俐群, 王旭友, 林尚扬 等. 能量因素对激光成形的影响[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2):155~159
- 2 D. J. Chen, S. C. Wu, M. Q. Li. Studies on laser forming of Ti-6Al-4V alloy sheet [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **152**(1):62~65
- 3 Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao. Numerical and experimental investigation of convex laser forming process [J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2001, **3**(2):73~81
- 4 S. P. Edwardson, E. Abed, K. Bartkowiak *et al.*. Geometrical influences on multi-pass laser forming [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**:382~389
- 5 Chen Yanbin, Li Liqun, Lin Shangyang. The FEM simulation of the temperature field in laser forming [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):145~149
陈彦宾, 李俐群, 林尚扬. 激光弯曲成形温度场的有限元数值模拟[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2):145~149
- 6 Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun. Process simulation and mechanism study on laser tube bending [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2):85~89
管延锦, 孙 胜, 赵国群. 管材激光弯曲成形有限元工艺仿真及其机理研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**(2):85~89
- 7 Li Liqun. Mechanism of laser forming and numerical simulation for sheet metal [D]. *Dissertation for Ph. D Degree*, Haerbin: Haerbin Institute of Technology, 2003. 59~60, 64~67
李俐群. 激光成形机理及其数值模拟[D]. 博士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 59~60, 64~67