

文章编号: 0258-7025(2004)04-0499-06

材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性研究

管延锦, 孙 胜, 赵国群, 栾贻国

(山东大学模具技术研究中心, 山东 济南 250061)

摘要 板料激光弯曲成形是一种柔性、无模成形新工艺,它通过激光扫描金属板料所导致的非均匀热应力使板料产生塑性变形。材料的性能参数(包括力学性能与热物理性能)对激光弯曲成形的影响很大,通过三维热机耦合有限元仿真研究了材料性能参数与板料激光弯曲角度之间的相关性,研究表明,小弹性模量、低屈服强度的材料容易产生大的弯曲变形。热膨胀系数与弯曲角度之间成正比关系,当热膨胀系数趋于零时,弯曲角度也趋于零。小的热传导系数有利于形成大的温度梯度,从而使板料产生大的弯曲变形;比热越小,加热区内材料的温升越大,使板料容易弯曲变形。

关键词 激光技术;板料;激光弯曲成形;有限元仿真;材料性能

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Study on Relationship between Material Properties and Bending Angles in Laser Forming Process of Sheet Metals

GUAN Yan-jin, SUN Sheng, ZHAO Guo-qun, LUAN Yi-guo

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

Abstract Laser forming process is a new flexible forming process without rigid tool and external force. The sheet metal is formed by internal thermal stress induced by laser. Material properties play an important role in laser forming. A three-dimensional coupled thermal-mechanical finite element model is established in this paper. The laser bending process of a sheet blank is simulated numerically using the model. The relationship between the bending angle and material property parameters, such as Young's modulus, yield strength, thermal expansion coefficient, heat capacity, and thermal conductivity, are studied in detail by FEM simulation. The simulations show that the material with lower Young's modulus and yield strength can get a larger bending angle. The thermal expansion coefficient is about in direct proportion to the bending angle. The bending angle decreases with the increase of the heat conductivity. The bigger bending angle can be obtained for the material with lower heat specific and density. The research provides a good reference of selecting process parameters for increasing laser forming efficiency.

Key words laser technique; sheet metal; laser forming; FEM simulation; material properties

1 引 言

板料激光弯曲成形是一种柔性、无模成形新工艺,它通过激光扫描金属板料,在热作用区内沿板厚方向产生强烈的温度梯度,从而导致非均匀热应力

的产生,使板料产生塑性变形。它不需模具、不需外力,仅仅通过合理匹配激光加工工艺参数、精确控制热作用区内的温度分布,就可获得合理的热应力大小与分布,使板料最终获得所要求的变形。

激光弯曲成形过程是一个非常复杂的热机耦合

收稿日期: 2002-11-27; 收到修改稿日期: 2003-03-13

基金项目: 山东省自然科学基金(Y2002F14)资助项目。

作者简介: 管延锦(1969—),男,山东大学模具工程技术研究中心副教授,博士,主要从事成型新技术、结构分析与优化、成型过程数值模拟、产品/模具快速设计与制造等方面的研究。E-mail: guan_yanjin@sdu.edu.cn

过程,影响其成形的因素很多,主要包括能量因素(激光入射功率、光束扫描速度、光束能量分布、材料对激光的吸收系数等)、板料的几何参数(板料的宽度和厚度)、材料的性能参数(材料的热物理性能及力学性能)、冷却方式等。关于能量因素、几何参数对激光弯曲成形的影响,文献[1~9]从不同的角度进行了深入的研究。而由于材料的力学性能与热物理性能都与温度相关,是温度的函数,并且它们随温度变化的规律对于不同的材料也有很大的差异,因此通过试验方法很难把握各材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性^[2]。而研究材料性能参数与板料激光弯曲角度的关系,对于优选成形工艺参数具有重要意义。本文通过有限元数值仿真较系统地研究了材料性能参数与板料激光弯曲角度的相关性,获得了满意的效果。

2 激光弯曲的有限元仿真

在激光弯曲成形过程中,温度场与位移场相互影响,属于复杂的热机耦合问题,为与实际情况相吻合,仿真采用了三维的热机耦合有限元分析,获得了激光弯曲过程中板料的瞬时位移场、温度场以及应力应变场等。仿真采用有限元分析软件 MSC.MARC 在 SGI Octane 工作站上进行。

2.1 激光光束的处理

在激光弯曲成形中,激光光束以某一特定速度照射金属板料表面,激光束的部分能量注入板料表面引起板料的变形,因而,可以将激光光束在板料表面形成的光斑看作为一半径为 r_b 的移动热源。激

光束的模式很多,光斑形状有圆形、方形、矩形等,光束的能量密度分布也存在均匀型、高斯分布型等。为方便边界条件的施加,同时又不改变光束单位时间内注入板料的热量,采用高斯分布的圆形光斑按照面积等效的原则转化为方形光斑来处理。

在成形过程中,激光束呈运动态,即热流的作用位置随时间的变化而改变。不仅如此,就板料表面的光斑而言,其热流密度的分布并不均匀,但由于激光光斑的尺寸很小(圆形光斑的直径一般在 10 mm 以下),同时板料的长度与宽度远远大于光斑尺寸,因此可将光斑作为一匀强面热源来处理,其热流密度为光束的平均热流密度 I_m 。

对于高斯光束,其能量密度分布 I 为^[8,9]

$$I = \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) \quad (1)$$

于是,在光束直径范围内的平均热流密度 I_m 为

$$I_m = \frac{1}{\pi r_b^2} \int_0^{r_b} I(2\pi r) dr = \frac{2\pi}{\pi r_b^2} \int_0^{r_b} \frac{2AP}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right) r dr = \frac{0.865AP}{\pi r_b^2} \quad (2)$$

其中 P 为激光输出功率, A 为板料对激光的吸收系数, r 为考察点至光束中心的距离。

因此,为准确模拟处于运动态的光束热源,可将其简化为一平面尺寸为 $l \text{ mm} \times l \text{ mm}$, 热流密度为 I_m , 沿板料表面以扫描速度 v 移动的方形热源,简化模型如图 1 所示,简化后的激光束可作为一个移动的热载荷以热流的形式,通过一用户子程序施加到相应单元表面,来描述动态的热源。

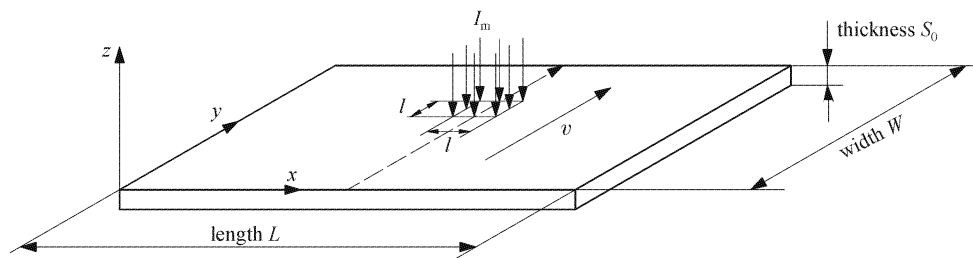


图 1 激光热源的简化模型

Fig. 1 Simplified model of laser spot

MARC 软件提供了良好的接口程序,其中用户子程序 FLUX(F, TS, N, TIME)用以定义随时间、温度或位置变化的面热流或体热流,可以满足在激光弯曲成形中施加激光热源的需要^[10]。通过用户子程序 FLUX 来描述激光热源的热流密度、几何形

状和尺寸以及扫描速度,从而实现热载荷自动施加到相应单元表面。图 2 给出了用户子程序的流程图。

为提高板料对激光的吸收系数,板料表面需进行黑化处理,实验时在其受照面涂一层炭黑,根据板

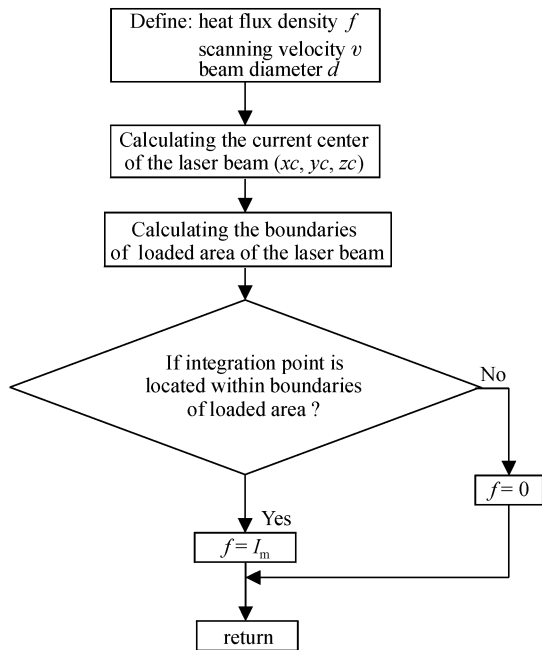


图 2 FLUX 子程序框图

Fig. 2 Flowchart of the user subroutine

料表面的处理情况,仿真时板料对激光能量的吸收系数取为 0.5。

2.2 边界条件的处理

板料经激光束扫描后在空气中自然冷却,板料与周围环境存在对流和辐射换热。此两类边界条件在传热学中称为第三类边界条件,可统一写为

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha(t - t_{\infty}) \quad (3)$$

式中, α 为换热系数, t 为板料表面温度, t_{∞} 为环境温度。 α 可写成对流换热系数 h 与等效辐射换热系数 h_r 之和。与环境的对流换热系数,结合实验现场条件,取为 $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ 。与环境之间的辐射换热系数,根据辐射定律,并转换成(3)式的标准形式,可得等效辐射换热系数为

$$h_r = \sigma \varepsilon (t + t_{\infty})(t^2 + t_{\infty}^2) \quad (4)$$

式中, σ 为玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$, ε 为材料热辐射率,本文取 $\varepsilon = 0.8$ 。

由(4)式可知,等效辐射换热系数与温度相关,因而辐射边界条件是非线性的。根据(4)式,即可建立等效辐射换热系数随温度变化的曲线(如图3所示),作为仿真时等效辐射换热系数的取值。

板料的初始温度及环境温度均为 20 C ,板料无初始应力和变形,为与成形过程中板料的固定情况相吻合,将板料一端所有节点的平动自由度予以约束。

2.3 材料性能参数的处理

以 08F 钢板为研究对象,分析中必须考虑材料性能与温度的函数关系,其相应的热物理性能及力学性能参数与温度的关系取自文献[11~13]。在有限元仿真中,可以根据研究的需要,改变某一材料性能参数的数值,而保持其他材料性能不变,从而方便地研究此材料性能参数与弯曲角度的相关性。

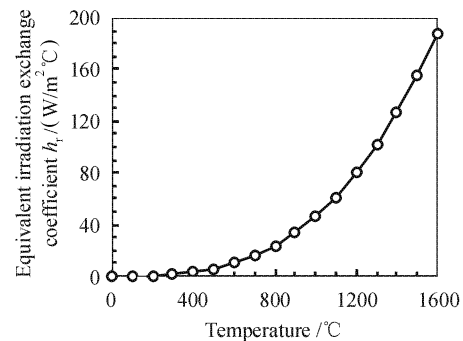


图 3 等效辐射换热系数与温度的关系

Fig. 3 Relationship between equivalent irradiation exchange coefficient and temperature

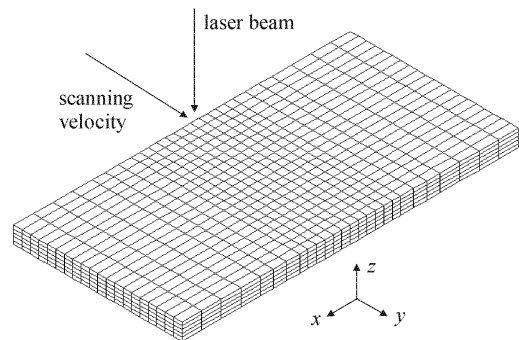


图 4 有限元仿真模型

Fig. 4 Model of FEM simulation

2.4 网格离散和仿真工艺参数

取长度为 40 mm ,宽度为 20 mm ,厚度为 2 mm 的板料进行分析。在激光束扫描路径附近的加热区网格密度加大,加热区以外的区域网格较稀疏,采用 20 节点六面体单元将板料离散为 1920 个单元。图 4 为有限元仿真模型。

其他的成形工艺参数为:激光输出功率 $P = 1 \text{ kW}$,光束扫描速度 $v = 1.5 \text{ m/min}$,光斑直径 $d = 4 \text{ mm}$ 。

3 仿真结果及分析

3.1 力学性能的影响

影响激光弯曲成形的材料力学性能包括材料的

弹性模量、屈服强度、硬化指数及泊松比等,由于在激光弯曲成形过程中变形区的温度已相当高,达到几百度甚至上千度,材料变形过程中的硬化已不明显,可不予考虑,因此材料的弹性模量、屈服强度成为影响激光弯曲成形的主要因素。

图 5(a),(b)分别为弹性模量、屈服强度与板料弯曲变形的关系。在相同工艺条件下,随着弹性模量、屈服强度的增大,板料的弯曲角度减小,即小弹性模量、低屈服强度的材料容易产生大的弯曲变形。研究表明,当材料的弹性模量大约超过 300 GPa 时,即使弹性模量继续增大,弯曲角度的减小幅度大大减小,表明这时弹性模量对弯曲角度的影响力大大减弱。

弯曲变形对屈服强度的变化比较敏感,随着屈服强度的增大,材料抵抗变形的能力提高,使弯曲角度急剧减小。因此,对于高屈服强度的材料,在激光弯曲成形时应尽可能增加光束功率或降低扫描速度,以提高加热区的温度,最大限度地降低材料的高温屈服强度。

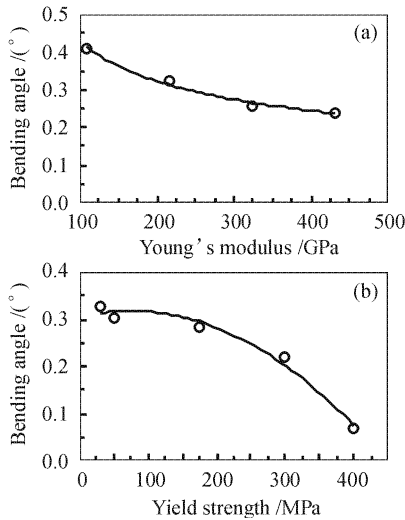


图 5 弹性模量(a)和屈服强度(b)与弯曲角度的关系
Fig. 5 Influence of Young's modulus (a) and yield strength (b) on bending angle

3.2 热物理性能的影响

影响板料激光弯曲成形的热物理性能参数主要包括材料的熔点、热膨胀系数、比热、密度及热传导系数等。其中熔点是限制激光弯曲成形的一个重要条件,加工工艺参数无论如何变化,都不能使板料加热区温度超过材料的熔点。

3.2.1 热膨胀系数与板料弯曲角度的关系

图 6 为热膨胀系数与板料弯曲角度之间的关

系。可以看出,当热膨胀系数趋于零时,弯曲角度也趋于零,当热膨胀系数增大时,弯曲角度迅速增大,两者之间基本成正比关系。因为材料的热膨胀系数越大,在相同条件下板料受热区域产生的塑性压缩变形越大,在冷却阶段产生的横向收缩变形也越大,从而获得较大的弯曲变形。

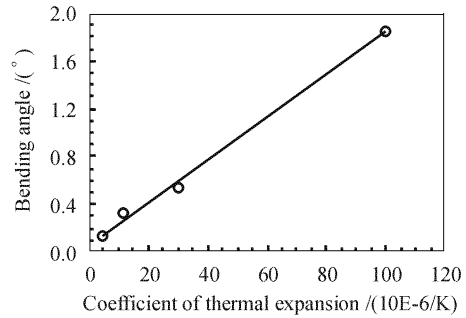


图 6 热膨胀系数与弯曲角度的关系
Fig. 6 Influence of thermal expansion on bending angle

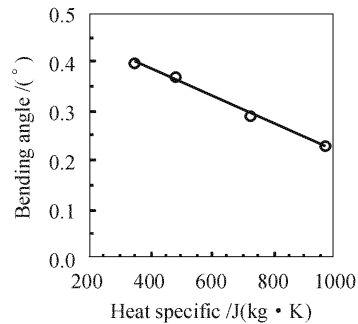


图 7 比热与弯曲角度的关系
Fig. 7 Influence of heat capacity on bending angle

3.2.2 比热与板料弯曲角度的关系

图 7 给出了比热与板料弯曲角度之间的关系。随着材料比热的增加,弯曲角度减小,两者成直线关系。由于材料的比热决定了注入相同热量时材料所能产生的温升,所以比热越小,单位体积的材料的温升就越大,而随着温度的升高,材料的屈服强度降低,抵抗变形的能力下降,从而有利于材料的塑性变形,使板料的弯曲角度增大。

图 8 为对应不同的比热值板料上表面的温度以及上下表面温差变化,板料上表面在激光弯曲成形中所能达到的最高温度以及沿板料厚度方向的温差随比热值的增加而减小。不难理解由于材料的比热决定了注入相同热量时材料所能产生的温升,所以比热越小,吸收相同的热量,单位体积的材料的温升就越大,使板料上表面达到较高的温度,同时由于激

光加热的时间很短,热量来不及传递就进入冷却阶段,使上下表面产生较大的温差。这样一方面随着温度的升高,材料的屈服强度降低,抵抗变形的能力下降,从而有利于材料的塑性变形,另一方面由于沿厚度方向温度梯度的增大,板料上下表面产生的横向收缩量的差距增大,也有利于获得大的弯曲角度。同时注意到,板料上表面温度值随比热的减小而迅速降低,但是板料上下表面的温差随材料比热的减小变化却比较平缓,所以对于小比热的材料,由于板料表面达到较高的温度而引起材料屈服强度的降低是使板料产生较大变形的主要因素。

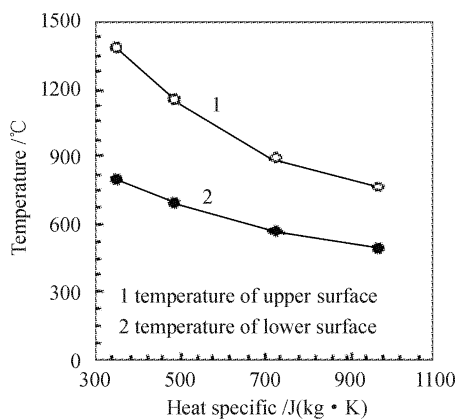


图 8 板料上下表面温度随比热的变化

Fig. 8 Influence of heat specific on the temperature of the upper surface and lower surface

3.2.3 热传导系数与板料弯曲角度的关系

板料经激光束扫描后能产生一定的弯曲变形,主要是由于沿板料厚度方向产生了强烈的温度梯度,结果使板料上下表面发生不同的塑性变形所致。通过改变材料的热传导系数获得了热传导系数与板料上下表面的温度及其温差之间的关系如图 9 所示。当热传导系数为 $32.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,板料上下表面的温差为 733.2°C ,对应的弯曲角度为 0.3734° ;当热传导系数增加到 $300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,板料上下表面的温差仅为 111.7°C ,对应的弯曲角度减小为 0.017° ,板料基本不产生弯曲变形。也就是说,当材料的热传导系数小时,在相同工艺条件下有利于在板料厚度方向产生大的温度梯度,获得大的弯曲变形;如果材料的热传导系数较大,那么在加热过程中板料厚度方向的温度梯度减小,甚至板料上下表面的温度基本趋于一致,使板料的弯曲变形减小,或不产生弯曲变形。所以小的热传导系数有利于弯曲变形,随着热传导系数的增大,板料的弯曲

角度迅速减小(如图 10)。

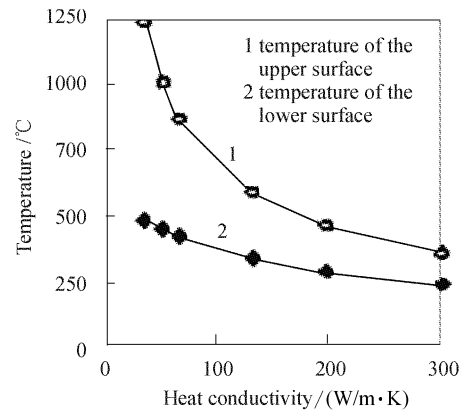


图 9 板料上下表面温度随热传导系数的变化

Fig. 9 Influence of heat conductivity on the temperature of the upper surface and lower surface

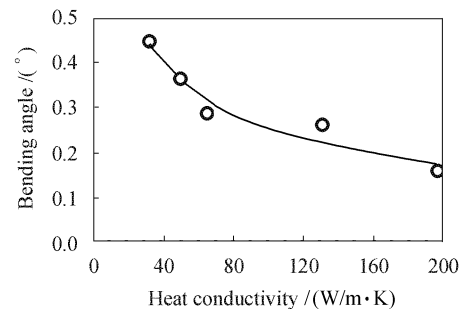


图 10 热传导系数与弯曲角度的关系

Fig. 10 Influence of heat conductivity on bending angle

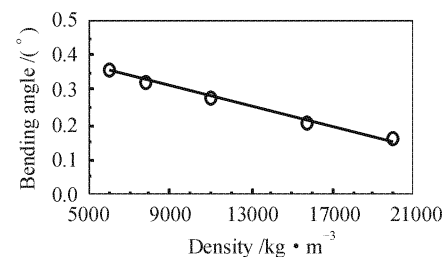


图 11 密度与弯曲角度的关系

Fig. 11 Influence of density on bending angle

3.2.4 密度与板料弯曲角度的关系

由于材料的密度同样决定了注入相同热量时材料所能产生的温升,因此材料的密度对板料激光成形的影响与比热的影响类似。

在相同的工艺条件下,材料的密度越小,板料上表面所能达到的温度越高,同时上下表面的温差越大,越有利于板料的成形。所以在相同工艺条件下,小密度的材料可获得大的弯曲角度,而大密度材料的弯曲角度大大减小,从图 11 可看出材料密度与弯曲角度之间也近似成直线关系。

4 结 论

1) 单纯通过实验的方法无法获得材料性能参数对板料激光弯曲成形影响的一致性规律,而通过有限元数值仿真可方便地研究某一材料性能参数对成形的影响。

2) 材料的屈服强度越低,材料抵抗变形的能力越小,越容易获得大的弯曲角度。小弹性模量、低屈服强度的材料容易产生大的弯曲变形。

3) 热膨胀系数与弯曲角度之间成正比关系,当热膨胀系数趋于零时,弯曲角度也趋于零,热膨胀系数越大,产生的弯曲变形越大。在相同工艺参数下,热膨胀系数的大小对板料的激光弯曲成形影响很大。

4) 小的热传导系数有利于形成大的温度梯度,从而使板料产生大的弯曲变形;比热越小,加热区内材料的温升越大,使板料容易弯曲变形。

5) 在确定具体的激光弯曲成形工艺参数时,应根据材料性能参数对成形的不同影响,进行综合考虑,以优化成形工艺参数。

参 考 文 献

- 1 M. Geiger, F. Vollertsen. The mechanism of laser forming [J]. *CIRP Annals*, 1993, **42**(1):301~304
- 2 F. Vollertsen. An analytical model for laser bending [J]. *Lasers in Engineering*, 1994, **2**:261~276
- 3 M. Marya, G. R. Edwards. A Study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **108**:376~383
- 4 C. L. Yau, Chan K. C., Lee W. B.. Laser bending of leadframe materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **82**:117~121
- 5 Guofei Chen, Xianfan Xu. Experimental and 3D finite element studies of CW laser forming of thin stainless steel sheets [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**(2):66~73
- 6 An. K. Kyrsanidi, Th. B. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis. Numerical and experimental investigation of the laser forming process [J]. *J. of Materials Processing Technology*, 1999, **87**:281~290
- 7 F. Vollertsen, S. Holzer. 3D-thermomechanical simulation of laser forming. *Simulation of Materials Processing; Theory, Methods and Applications* [C]. eds; Shen & Dawson, 1995. 785~791
- 8 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9):859~864
李纬民, M. Geiger, F. Vollertsen. 金属板材激光弯曲成型规律的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(9):859~864
- 9 Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang *et al.*. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, **41**:589~607
- 10 MSC. MARC. Theory Manual, Version 2000 [M]. MSC. Software Corporation, USA, 2000
- 11 J. R. Davis. *Metals Handbook 1* [M]. ASM International Ohio, 1990
J. R. 戴维斯. 金属手册[M]. 美国金属学会主编,第9版,第1卷. 北京:机械工业出版社,1990
- 12 J. R. Davis. *Metals Handbook 2* [M]. ASM International Ohio, 1990
J. R. 戴维斯. 金属手册[M]. 美国金属学会主编,第9版,第2卷. 北京:机械工业出版社,1990
- 13 Tan Zhen, Guo Guangwen. *Thermal Physical Properties of Engineering Alloys* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994
谭 真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京:冶金工业出版社,1994