

镀锌板激光钎焊温度场的数值模拟 *

封小松 陈彦宾 李俐群

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要 以镀锌钢板为母材, 以 CuSi3 焊丝为钎料, 进行了单、双光束激光钎焊实验. 在分析单、双光束激光填丝钎焊传热行为的基础上, 采用有限元方法对激光钎焊温度场进行了数值模拟, 提出了激光填丝钎焊热源模型. 采用体热源来模拟熔化钎料铺展流动引起的传热, 模型考虑了热物性参数随温度的变化带来的非线性影响以及潜热、辐射和对流对传热的影响. 对典型激光钎焊工艺参数下的温度场进行计算, 结果表明: 单光束激光钎焊有较高的温度梯度, 而 2 mm 焦点间距的双光束钎焊接头峰值温度和温度梯度低, 高温区域宽, 更适合于获得良好的钎焊接头.

关键词 激光钎焊, 双光束, 温度场, 数值模拟

中图法分类号 TG402

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)08-0882-05

TEMPERATURE FIELD SIMULATION OF LASER BRAZING FOR GALVANIZED STEEL SHEETS

FENG Xiaosong, CHEN Yanbin, LI Liqun

State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Correspondent: FENG Xiaosong, Tel: (0451)86415374, E-mail: fxsupc@hit.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50275036)

Manuscript received 2005-11-01, in revised form 2006-02-20

ABSTRACT The experiments of single and dual laser beam brazing were carried out, in which the base metal is galvanized steel sheets and CuSi3 is used as filler metal. A finite element model was developed for the thermal process on the basis of heating behaviors analysis, and the transient temperature fields in the braze joint were calculated. In the model, the surface heat source was used to model laser heating the surface of filler metal and base metal, and the heat transfer induced by the flow of melted filler metal was simulated by a volume heat source. Nonlinear effect of temperature on thermal properties, latent heat, the convection and irradiative heat losses were considered. Numerical results of the temperature fields in the braze joint were obtained for typical process parameters. The results show that the temperature gradient of individual beam brazing is high, however, in dual laser beam brazing with 2 mm spot distance, the peak temperature and temperature gradient are low and high-temperature zone is wide, which is benefit to achieve good brazing quality.

KEY WORDS laser brazing, dual laser beam, temperature field, numerical simulation

激光钎焊是近年来发展起来的一种新的高温钎焊技术, 其加热迅速、热影响区窄、容易实现柔性化和自动化加工, 对于有镀层金属板材的连接具有优势^[1,2]. 为了提高激光钎焊过程的适应性, 增加钎料与母材的反应时间, 提高钎缝强度, 获得更好的钎缝成形, 在单光束钎焊技术的基础上, 又开发了双光束激光钎焊工艺^[3].

激光钎焊技术属于局部钎焊, 其接头温度场是一个随时间和空间迅速变化的非稳态热场. 在钎焊过程中, 激光

加热速率快, 但对钎缝总的热输入小, 这使得激光加热区内的温度梯度较大, 钎焊过程温度变化剧烈. 液态钎料在母材表面存在时间过短的问题往往会影响到钎料在母材表面的润湿铺展及液态钎料与母材金属的反应过程. 此外, 钎焊过程温度场的分布决定了焊接残余应力和变形, 对于镀锌板的钎焊还涉及到镀锌层的烧损带来的接头抗腐蚀性能下降的问题. 由此可见, 深入了解激光钎焊的加热过程、量化钎焊过程的温度分布, 对于优化激光钎焊工艺、控制焊接残余应力和变形、提高钎缝质量具有重要意义.

由于加热速率快、温度梯度大、高温区域小, 仅仅采用实验的方法研究激光钎焊加热过程及温度分布有一定难度且精度较低. 目前, 数值模拟是一种有效的手段, 但由于涉及到钎料的填充和润湿铺展、激光能量的耦合, 物

* 国家自然科学基金资助项目 50275036

收到初稿日期: 2005-11-01, 收到修改稿日期: 2006-02-20

作者简介: 封小松, 男, 1978 年生, 博士生

理现象复杂, 研究报道较少. Jeon 等^[4]和 Park 等^[5]采用 ABAQUS 模拟计算了 304 不锈钢栓与 5052 铝合金板激光钎焊过程的温度场, 他们将整个激光钎焊过程按时间顺序分成 6 个典型阶段, 在每一阶段假定钎料没有流动; 激光作表面热源处理, 下一个阶段是在上一时间段内发生钎料流动后的情形, 以此来模拟钎焊过程中钎料的流动对整个温度场计算带来的影响, 获得的温度场结果与测量结果比较吻合. 在此基础上 Park 和 Na^[6]进一步改进了不锈钢栓的形状及入射激光模式, 优化了钎焊工艺, 并对接头应力场分布进行了计算. 文献^[7]采用 MARC 软件对钎环激光束钎焊过程的温度场和应力场进行了有限元模拟, 同样没有考虑熔池内的流体流动. 需要指出的是, 文献^[4—7]所建立的模型均为轴对称二维模型, 并没有考虑激光束的移动或钎料的动态填充过程, 模型相对简单. 本文在钎焊实验观察的基础上, 分析了单、双光束激光钎焊的加热过程, 建立了卷对接接头的镀锌板激光钎焊温度场模型, 并对不同钎焊工艺进行了温度场的计算, 为优化钎焊工艺、控制镀锌层的烧损及焊接残余应力和变形提供依据.

1 激光钎焊实验

为了观察和分析钎焊加热过程并验证数值模拟结果, 进行了镀锌板激光填丝钎焊实验. 实验所用钎料为直径 1 mm 的 CuSi3 焊丝, 主要的化学成分 (质量分数, %) 为: Si 2.8—4.0, Mn 0.5—1.5, Fe<0.3, Zn<0.2, Cu 余量. 母材为双面电镀锌板, 其基体为低碳钢板, 板厚为 0.8 mm, 镀锌层厚度为 7.5 μm .

实验所用设备主要有 3 kW 扩散冷却 CO₂ 激光器, 四轴控制 CNC 数控系统及平面工作台, 单、双光束成形光学系统, 钎焊过程如图 1 所示. 分光镜为屋脊反射镜, 镜表面的上、下两部分不在同一平面上, 而是互成一定角度. 本文实验中分别使用了单光束、光束焦点间距为 0.6 和 2.0 mm 的两种双光束进行激光钎焊实验.

钎焊接头形式为汽车工业中常用的卷对接接头, 水平和垂直翻边宽度分别为 20 和 10 mm. 焊丝实时自动送进, 保护气为 Ar 气.

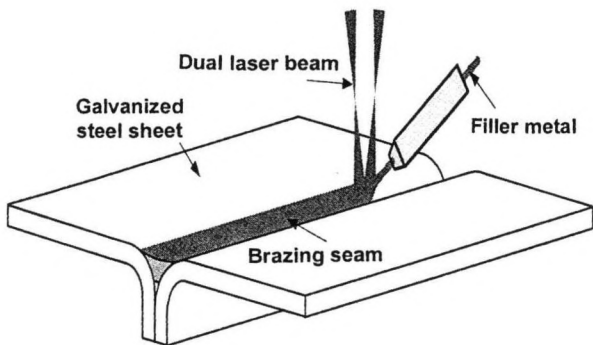


图 1 双光束激光钎焊卷对接接头示意图

Fig.1 Schematic of dual laser brazing flange butt joint

2 激光钎焊过程热源模型的建立

2.1 激光钎焊加热过程分析

激光钎焊过程中, 激光束、送丝头及保护气喷嘴保持固定, 工件移动. 在单光束钎焊时, 激光直接加热固态的焊丝及熔化的钎料表面和工件表面, 送入的焊丝即时熔化并在母材上润湿铺展形成钎缝接头. 此过程时间非常短暂, 在 10^{-1} s 数量级, 采用高速摄影装置观察此过程, 以作为对激光加热过程和钎料熔化铺展进行分析的依据. 由于钎料熔化所需要的温度较低, 并且要保证母材不熔化, 所以激光束采用散焦加热. 施加在钎料和母材表面的功率密度较低, 不至于气化材料形成匙孔, 热能向材料内部的传递模式为热传导.

在激光钎焊过程中, 激光束直接辐照在焊丝、熔化的钎料和一部分母材表面, 在卷对接接头的下部, 由于钎料或焊丝的遮挡, 激光不能进行直接加热. 钎料熔化后, 随即对母材进行了润湿铺展、填充焊缝间隙, 在此过程中, 钎料的运动并不等同于钎料内部的自然对流流动, 主要在重力和表面张力的作用下, 熔融的钎料对接头间隙进行填充并加热母材, 这个过程将一部分激光能量进行了传递, 它是对流和热传导之外的传递方式. 在不考虑熔化钎料的温度场和流场耦合的情况下, 这部分能量传递对钎焊过程温度场的影响只有依靠假设来进行模拟. 可以认为, 高温流动填充间隙的钎料在钎焊过程中, 对于母材而言, 起了一个热源的作用, 将激光能量传递到接头深处, 特别是激光束无法辐照到的接头底部位置. 钎焊过程中, 钎料不断地熔化, 这种能量传递的方式随着焊接的进行而持续地起作用. 因此, 可以这样来理解激光填丝钎焊的加热过程: 在激光直接辐照的钎料和母材表面, 激光作为表面热源进行加热, 这部分能量在材料内部通过热传导和熔化钎料的流动进行传递; 而钎料的润湿铺展和填充过程传递的激光能量, 可以看作体热源进行加热.

2.2 激光钎焊热源模型的建立

基于对激光填丝钎焊能量传递过程的分析, 为了模拟熔化钎料填充过程的加热作用, 尝试了人为增加熔融钎料在接头深度方向上的热传导系数以及将熔融钎料作为体热源加热两种方式. 计算结果表明, 采用后者计算得到的接头温度场, 更能逼近实际的接头温度分布. 因此, 提出了一种接近实际加热过程的热源模型, 假设光束横截面能量分布为 Gauss 分布, 一部分激光能量以面热源的形式加载在钎缝和母材表面, 另一部分激光能量依靠熔融钎料的流动传递, 以体热源的形式加载.

钎焊过程中, 激光散焦加热, 激光模式为 TEM₀₀ 模. 其辐照在钎缝和母材表面的一部分能量为面热源, 一部分被材料吸收, 通过材料内部的热传导传递到材料内部, 另一部分被材料表面所反射. 在钎焊接头中, 激光辐照的材料有 CuSi3 钎料和镀锌钢板母材, 同时考虑温度对吸收率的影响. 对于波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光, 吸收率 A

有如下式 [8]:

$$A = 11.2[\rho_{20}(1 + \alpha T)]^{1/2} \quad (1)$$

式中, ρ_{20} 为材料室温下的电阻率, 取铜基钎料的电阻率为 $8.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, 镀锌板取低碳钢的值 $15.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$; α 为电阻率的温度系数, 钎料和镀锌板的值分别取 1.5×10^{-3} 和 $3.3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} / ^\circ\text{C}$; T 为温度, $^\circ\text{C}$.

面热流的这部分能量为 Gauss 分布, 则工件表面上任意一点 r 的面热流密度为

$$f_{\text{face}} = I_f \exp(-2r^2/r_b^2) \quad (2)$$

式中, r_b 为光斑半径, 其值与离焦量有关, 在本实验系统下 30 mm 的离焦量对应的光斑半径为 1.5 mm; I_f 为光斑中心的热流密度, 可以表示为

$$I_f = \frac{2A\eta kP}{\pi r_b^2} \quad (3)$$

式中, η 为激光束作为钎焊热源时的效率, 取 0.9; k 为激光束作为表面热源时所占的能量比率, 取其值为 0.5; P 为激光功率, W.

为了模拟由熔化钎料引起的传热和加热过程, 将一部分激光能量作为体热源加载. 加载的范围为激光光斑中心一定距离内的接头钎料. 体热源的形状为实际的钎缝填充形状, 上下表面简化为平面, 加载长度取为光斑直径. 由于钎料上部在激光的直接加热下, 温度较高, 在向接头深处填充的过程中, 钎料温度逐渐降低, 为了模拟这一现象, 假设施加在钎料上的体热源热流密度随着深度方向的增加而线性衰减, 在同一厚度上均匀分布, 从而有体热源热流密度的表达式

$$f_{\text{volume}} = I_v(1 - \beta z) \quad (4)$$

式中, I_v 为光斑中心处钎料表面的最大热流密度; β 为体热源线性衰减系数, 取其值为 0.1; z 为填充的钎缝厚度方向距离. 对体热流密度在所加载的区域积分, 得到加载在体热源上的总功率. 图 2 为卷对接接头的体热源加载区域示意图.

根据能量守恒有

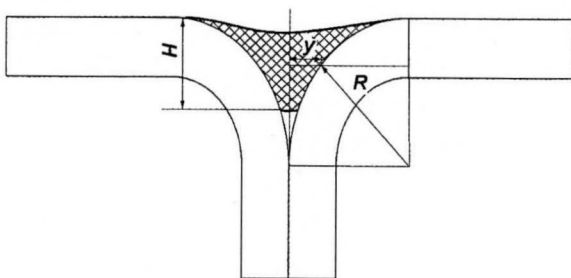


图 2 卷对接接头体热源加载区域

Fig.2 Volume heat source loading domain of flange butt joint

$$(1 - k)A\eta P = \int_0^H I_v(1 - \beta z)\Delta xy dz \quad (5)$$

式中, Δx 为沿钎缝方向施加的体热源长度, 设为光斑直径 3 mm; y 和 H 如图 2 所示, 根据实际钎焊的钎缝填充情况获得; 钢板弯曲半径记为 R ($R=2$ mm). 因此, y 可表达为

$$y = R - \sqrt{R^2 - (R - z)^2} \quad (6)$$

由式 (5) 和式 (6), 可以得到 I_v , 从而可以得到体热源内任一点的功率密度.

3 激光钎焊温度场计算模型

采用上述的热源模型, 利用 MARC 有限元软件, 编写用户子程序, 分别对单光束以及 0.6 和 2.0 mm 焦点间距的串列排布双光束钎焊镀锌板卷对接接头的三维温度场进行了计算, 并与实验结果进行了对比. 针对激光填丝钎焊的特点, 建立了描述激光钎焊过程的瞬态传热计算数学模型, 基本假设如下: (1) 材料为各向同性和连续的; (2) 钎焊热过程为准稳态; (3) 不考虑熔化金属对流传热的影响, 钎料的铺展流动传热采用体热源模拟; (4) 材料热物理参数随着温度进行变化, 对于高温条件下材料的性能参数, 采用外推法获得; (5) 考虑钎料相变潜热对温度的影响.

模型的一部分网格如图 3 所示, 设焊接方向为 X 方向, 垂直于焊接方向为 Y 方向, 厚度方向为 Z 方向. 钎缝网格的形状由实际钎焊接头的填充情况决定. 在靠近钎缝的区域, 由于温度梯度高, 为保证计算精度, 在此区域内采用密网格.

此外, 本文采用体热源的形式对钎料流动过程进行的激光能量传递进行模拟, 但钎料的填充过程对温度场也有影响. 采用单元死活技术, 在激光束未扫描的区域将钎缝单元设为死单元, 随着激光束的移动, 钎缝单元被逐渐激活. 这样就模拟了钎缝由无到有的过程, 近似实现了焊丝钎料自动送入的仿真.

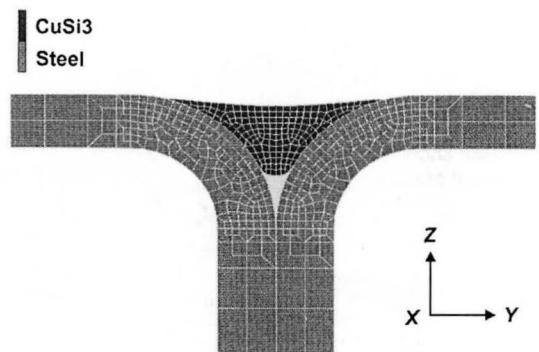


图 3 卷对接接头温度场计算模型

Fig.3 Finite element model of temperature field at flange butt joint

4 模拟结果及讨论

激光钎焊属于局部钎焊技术，其温度在时间和空间上的分布决定了钎料的熔化和润湿铺展，也即决定了钎焊接头质量。此外，由于激光加热的特点决定了其与电弧钎焊、火焰钎焊、电磁感应钎焊等局部钎焊技术的温度分布有很大的不同。在单、双激光束钎焊镀锌板卷对接接头中，可以看到各自不同的温度分布状态。下面以典型钎焊参数的单、双光束钎焊为例，说明激光填丝钎焊温度分布特点。钎焊参数为：激光功率 1200 W，钎焊速度 1.2 m/min，送丝速度 1.78 m/min，光斑直径 3 mm。

图 4 与图 5 分别给出了单光束、2 mm 焦点间距双光束钎焊接头的横截面形貌及计算所得的钎料熔点以上的温度分布云图。由于机械加工条件的限制以及焊接变形的影响，实际的母材板件形状与标准尺寸有一定差别。由图可见，在加热区域中心，单光束具有更高的峰值温度。

为进一步说明单、双光束钎焊的温度分布特点，考察了它们在钎缝长度方向上的温度分布。图 6 为 $t=1.6$ s 时钎缝中心线上激光加热区的温度分布。由图可见，2 mm 焦点间距双光束钎焊工艺中钎料熔点以上温度的区域长度最大，达到 6 mm 左右，峰值温度最低，在 1200 ℃ 以下；0.6 mm 焦点间距的钎焊工艺次之；单光束钎焊工艺的峰值温度在 1400 ℃ 以上，温度在钎料熔点以上区域

长度为 4.4 mm。本文采用对比实验和计算得到的镀锌层的烧损宽度来近似验证模型的准确性。在高速摄影图像中可以清晰的看见，镀锌层熔化时并不会从表面被去除，而达到气化温度的镀锌层会产生挥发，并且冷却后有白色的氧化锌附在工件表面。因此，在数值模拟中认为锌气化温度以上的区域为镀锌层烧损区域。表 1 给出了工件上表面镀锌层烧损宽度的计算值与实验值比较。从表中可见，计算值与实验值大体吻合，所建立的温度场计算模型能够反映实际钎焊过程的加热特点。

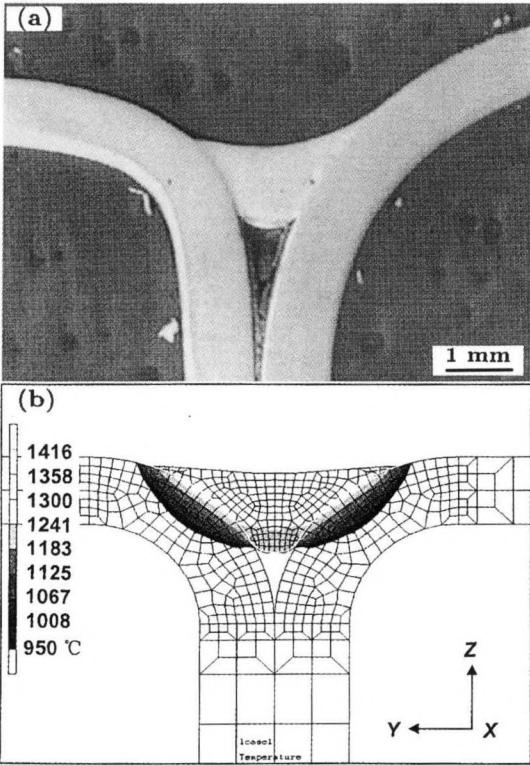


图 4 单光束激光钎焊接头横截面形貌及计算的温度分布云图

Fig.4 Cross sectional appearance (a) and calculated cloud map of temperature field (b) for single laser beam brazing joint

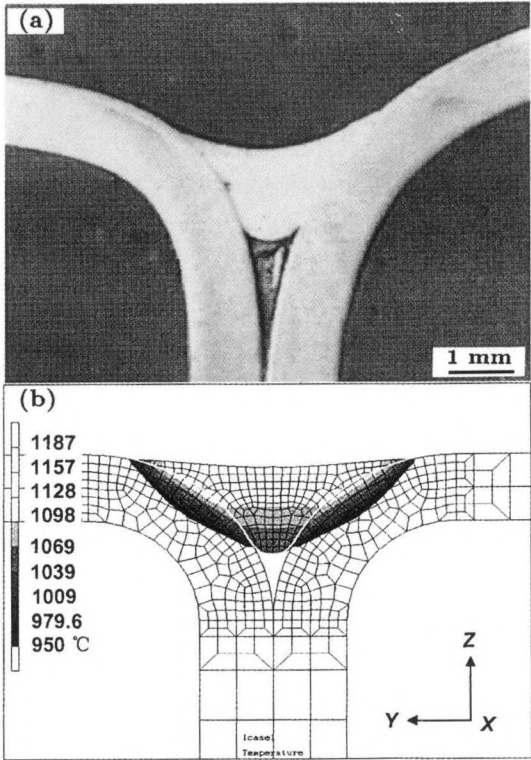


图 5 双光束激光钎焊接头横截面形貌及计算的温度分布云图
Fig.5 Cross sectional appearance (a) and calculated cloud map of temperature field (b) for dual laser beam brazing joint with 2 mm focus distance

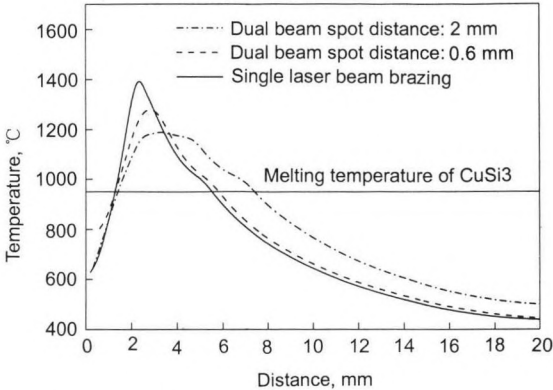


图 6 钎缝中心处沿钎焊方向的激光加热区温度分布
Fig.6 Temperature distributions at the brazing seam center line along brazing direction

表 1 工件表面镀锌层烧损宽度的计算值与实验值的比较

Table 1 Calculated and experimental results of burning loss width of zinc coating

Brazing process	P	v	Loss width, mm	
	W	m/min	Cal.	Exp.
Individual beam	1200	1.2	3.30	3.27
Dual beam (2 mm)	1200	1.2	3.18	2.91
Dual beam (0.6 mm)	2000	1.0	4.81	4.49

5 结论

(1) 在分析激光钎焊加热过程的基础上, 建立了单、双光束激光钎焊过程的热源模型, 采用面热源与体热源相叠加. 面热源按照光斑直径大小加载在钎缝及工件表面, 体热流密度在接头深度方向上线性衰减, 加载的范围为一定长度的钎缝实际形状区域.

(2) 采用所建立的热源模型对激光填丝钎焊过程温度场进行了数值模拟, 结果表明: 单光束激光钎焊接头具有较高的温度梯度和峰值温度, 2 mm 焦点间距的激光钎焊接头峰值温度最低, 在焊接方向上高温区域更宽, 镀锌层烧损最少, 有利于获得良好的钎焊接头质量.

(3) 镀锌层烧损宽度的计算结果与实验测量结果大体

吻合, 温度场计算模型能够近似反映实际钎焊过程的加热特点.

参考文献

- [1] Feng X S, Li L Q, Chen Y B, Zhou S B. *Chin Weld*, 2005; 14(1): 9
- [2] Feng X S, Chen Y B, Li L Q, Zhou S B. *Appl Laser*, 2004; 24: 357
(封小松, 陈彦宾, 李俐群, 周善宝. 应用激光, 2004; 24: 357)
- [3] Hanebuth H, Hoffmann P, Geiger M. In: *Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications*, Vol.2207, Bellingham, USA: The International Society for Optical Engineering, 1994: 146
- [4] Jeon M K, Kim W B, Han G C, Na S J. *J Mater Process Technol*, 1998; 82(1-3): 53
- [5] Park J S, Na S J. *Weld J*, 1998; 77(4)(Suppl.): 155
- [6] Park J S, Na S J. *J Mech Eng Sci*, 1999; 213C: 763
- [7] Dong P, Chen Y Z, Zou J S, Li S H. *Acta Metall Sin*, 2002; 38: 881
(董平, 陈裕泽, 邹觉生, 李盛和. 金属学报, 2002; 38: 881)
- [8] Li L J. *Laser Processing Technology and Equipment*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 114
(李力钧. 现代激光加工及其装备. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 114)