

## 激光焊接中聚焦透镜热效应研究

胡席远 胡伦骥 熊建钢 刘建华 骆 红 陈祖涛

(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074)

摘要: 通过理论计算和实验研究了激光焊接中聚焦透镜的热效应, 以及聚焦透镜的热效应对激光焊接工艺的影响, 找出了其中一些规律, 对激光焊接工艺和提高焊接质量有一定指导意义。

关键词: 激光 聚焦透镜 热效应

### A research of the thermal effect of focussing lens in the laser processing

Hu Xiyuan, Hu Lunji, Xiong Jianguang, Liu Jianhua, Luo Hong, Chen Zutao

(Department of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** In this paper, the thermal effect of focussing lens in the laser processing was studied from the theoretical calculation and the experiment. The influence of the thermal effect of focussing lens for the laser welding technology was discussed. Some rules and the preventive methods were obtained. The suggestions of the research show quite signification to improve the quality and technology of the laser welding.

**Key words:** laser focussing lens thermal effect

### 引 言

在激光加工时, 聚焦透镜对激光束聚焦, 由于聚焦透镜的物理特性及制造精度, 会引起透镜的热效应。国内学者曾对激光器的输出窗口透镜的热效应进行过研究<sup>[1, 2]</sup>。日本学者曾对 ZnSe 聚焦透镜的温度分布及热效应进行了研究<sup>[3]</sup>。为此, 我们在横流式、轴快流式和直管半封闭式等三种型式的 CO<sub>2</sub> 激光器上, 采用透镜焦距相同的 GaAs 聚焦透镜, 对薄板实施激光深熔焊(小孔效应焊)<sup>[4]</sup>, 考查 GaAs 聚焦透镜的热效应状况。并计算了聚焦透镜受激光辐照后的温度分布。得出了因聚焦透镜热效应引起光学畸变, 产生附加聚焦, 导致激光焊接工艺不稳定及对焊缝质量的影响规律。

### 一、聚焦透镜上温度分布的计算

#### 1. 计算参数的选取

由于国内所用的聚焦透镜多为 GaAs, 故以 GaAs 聚焦透镜为例进行计算。计算参数为<sup>[4]</sup>: 折射率  $n = 3.2766$ , 导热系数  $k = 0.48 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 材料密度  $\rho = 5.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 比热容  $C_p = 276 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ , 热胀系数  $\alpha = 6.57 \text{ K}^{-1} \cdot 10^{-6}$ , 初始温度  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , 激光束直径  $D = 10 \sim 25 \text{ mm}$ , 激光功率  $P = 500 \text{ W}$ , 透镜厚度  $H = 4 \text{ mm}$ 。

#### 2. 计算条件及方法

因激光束光强呈高斯分布, 则聚焦透镜上光强分布为:  $I(x) = I_0 \exp[-(2s^2)/r^2]$  (1) 式中,  $I(x)$  为任意点 A 处的光强,  $I_0$  为激光束中心光强,  $s$  为 A 点距光束中心的距离,  $r$  为激

光束半径。

假定聚焦透镜对激光的吸收在透镜厚度方向是均匀的,则厚度方向上的温度是均匀的,将透镜吸收激光能量作为内部热源处理,则有:

$$q(r) = [AI(x)]/H = [(AI_0)/H] \exp[-(2s^2)/r^2] = [2An/H] \exp[-(2s^2)/r^2] \quad (2)$$

式中,  $q(r)$  为内部热源功率密度,  $A$  为聚焦透镜吸收率,  $H$  为聚焦透镜平均厚度,  $n$  为激光功率密度。

因为透镜装在带有冷却水套的导光系统中使用,假定聚焦透镜边缘的温度不变。根据图 1 所示模型分析,图中  $O$  点为透镜中心,  $R$  为透镜边缘,则一维轴对称的热传导基本方程为<sup>[3]</sup>:

$$e k \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} k \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] \right\} + q(r) \quad (3)$$

式中,  $T$  为温度,  $\tau$  为时间,  $k$  为导温系数,  $r$  为激光束半径,  $c$  为材料比热,  $\rho$  为材料密度,  $q(r)$  为内部热源。

初始条件与边界条件是:  $T(r, 0) = T_0$ ;  $T(R, t) = T_0$ ;  $(d/dr) T(0, t) = 0$

式中,  $T_0$  为冷却水温度,  $R$  为聚焦透镜半径。对上述热传导方程(3)采用有限单元法计算<sup>[6]</sup>。

### 3. 计算结果及分析

聚焦透镜上的温度分布仍呈高斯分布。如图 2 所示(1.  $\tau \geq 12s$ , 2.  $\tau = 1.7s$ , 3.  $\tau = 0.43s$ ), 随通光时间增长,透镜上温度逐渐增高,通光时间大于 12s 后,聚焦透镜上温度也就不再上升,达到热平衡。

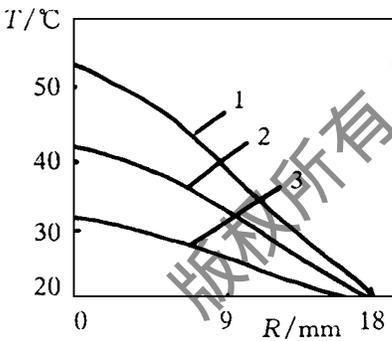


Fig. 2 Distribution of the temperature at various moment after pass thugh the focussing lens  $P = 500W, A = 0.05$

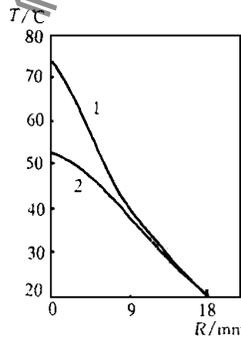


Fig. 3 Relationship between the distribution of the temperature on the focussing lens and the diameter of the laser beam

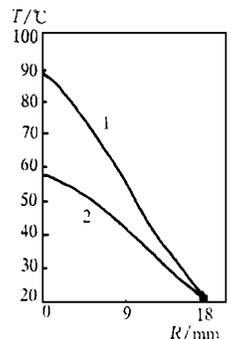


Fig. 4 Relationship between the distribution of the temperature on the focussing lens and the absor bance

随激光束直径减小,透镜中心的温度急剧增高,温度梯度也增大,其影响结果如图 3 所示(1.  $D = 10mm$ , 2.  $D = 20mm$ )。

聚焦透镜的温度分布与透镜吸收率的关系如图 4 所示(1.  $A = 0.10$ , 2.  $A = 0.05$ ),当吸收率增加一倍时,透镜中心部分的温度几乎也增加了一倍。

## 二、聚焦透镜热效应试验结果及分析

### 1. 试验方法

分别在横流式、轴快流式及直管半封闭式三台激光器中,用相同焦距及通光口径,透过率  $\geq 98\%$  的 GaAs 聚焦透镜进行焊接试验。另外,还在横流式激光器上加装扩束器,以改变激光束直径,试验同类激光器的光束直径的影响。

焊接试验的材料为 0.20~ 0.25mm 厚度的马口铁板,其工艺参数均以调整到实现深熔焊(小孔效应焊)<sup>[5]</sup> 为准。因为小孔效应焊对聚焦光斑要求极高,聚焦透镜引起的热畸变,都会影响小孔效应焊的实现。同时因在小孔效应焊时要出现等离子体特征光,可直接观察焊接过程的稳定性。

### 2. 激光束直径的影响

在横流式激光器上通过调整扩束器改变激光束直径,其结果如图 5 所示。当光束直径  $\leq f 15\text{mm}$  时,根本无法实现深熔

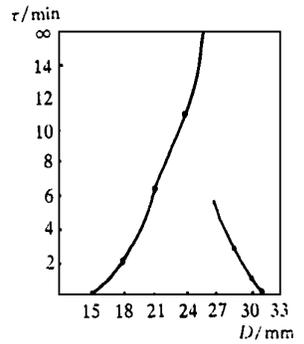


Fig. 5 Relationship between the differential diameter of the laser beam and steady of the deep penetration welding

Table The time of the reaching deep penetration weld for the differential lasers

laser	beam diameter (mm)	condition	the time of the reaching deep penetration weld (s)
traverse flow	f 26.5	expand beam	3
straigh tube	f 14		6.5
axial-flow	f 12.5		8

焊,只能是传热焊。随光焦直径增加,逐渐出现短时间的深熔焊,即维持时间不长。当光束直径在 f 26.5mm 时,即实现长时间稳定的深熔焊。继续增大光束直径,当  $> f 31.5\text{mm}$  时,深熔焊便又转为传热焊了。

同样,在三种不同类型的 CO<sub>2</sub> 激光器上进行深熔焊,其达到深熔焊的时间明显不同,如附表所示。激光束直径越大,进入稳定的深熔焊的时间越短。

上述实验结果与理论计算结果一致。

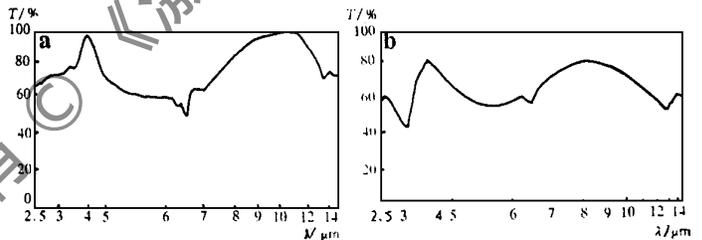


Fig. 6 Measuring result of the spectrum of the infrared ray on the focussing lens

### 3. 聚焦透镜吸收率的影响

对多片聚焦透镜在红外谱线扫描仪上进行测试,得到如图 6 所示的透过率曲线。选取透过率分别为 98.5% 和 65% 两片聚焦透镜进行试验。但透过率低的透镜,即使加大激光功率,也很难实现长时间稳定的深熔焊,这说明即使功率密度达到生成小孔效应的条件,但聚焦透镜的热畸变也增加了,仍无法实现深熔焊。

## 三、结 束 语

1. 聚焦透镜热效应对于激光深熔焊有着密切的关系,在其它工艺参数均合理的前提下,其热效应是一不可忽视的条件。
2. 激光束直径的大小是引起聚焦透镜热效应的主要因素,选用合适的激光束与聚焦透镜匹配,可有效改善其热效应。
3. 聚焦透镜吸收率是引起热效应的重要因素,除严格选用高透过率的透镜外,在使用时