

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0558-03

激光深熔焊接热模型及温度场计算*

张永强¹ 王 成¹ 彭 云¹ 陈武柱¹ 张旭东¹ 田志凌²

(¹ 清华大学机械工程系, 北京 100084)
(² 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

提要 激光焊接热循环对焊接接头的性能影响至关重要。考虑等离子体对工件表面的作用以及小孔内等离子体对激光能量的吸收,建立了点热源和逐渐衰减的线热源相叠加的数学模型,其中对线热源采用了分层处理技术。利用模型对低碳钢的激光焊接进行了求解,并将计算与实测的结果进行了对比。计算与实测结果显示二者有较好的近似性。

关键词 激光深熔焊, 热循环, 热源模型, 分层处理, 温度检测

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Heat Source Model and Thermal Field Calculation of Laser Deep Penetration Welding

ZHANG Yong-qiang¹ WANG Cheng¹ PENG Yun¹ CHEN Wu-zhu¹

ZHANG Xu-dong¹ TIAN Zhi-ling²

(¹ Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)
(² Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Thermal cycle greatly influences the microstructures and mechanical properties of laser welded joint. Taking account of the heating effect of plasma on the workpiece and the absorption of heat in the keyhole, a mathematical model, consisted of a point heat source and a line heat source which weakens with the depth, is put forward, and a delamination method is applied for the analysis. The model is used to calculate the thermal field of laser welding of mild steel. The results are compared with that of experiment. The calculation results coincide well with the experiment results.

Key words laser deep penetration welding, thermal cycle, heat source model, delamination method, temperature measuring

1 引 言

激光深熔焊接时,接头的性能除了与材料本身的焊接性有关外,很大程度上取决于焊接工艺参数或者说焊接热循环的影响。然而由于激光焊接具有极高的加热和冷却速度以及很窄的加热范围,到目前为止国内外在激光焊接热循环的计算及实时检测方面公开发表的研究报告很少,缺乏令人满意的实验研究数据^[1]。

本文采用点热源和逐渐衰减的线热源相叠加的激光深熔焊接模型,对焊接热循环进行计算;并将计算结果与实验结果进行对比,证明此方法的可行性。

2 热源数学模型

激光深熔焊接过程中,通常伴有极高温度的光致等离子体出现,高温的等离子体对焊接工件有强烈的加热作用,使材料表面熔化区扩大。在使用轴向保护气体条件下,等离子体一般都被控制在小孔

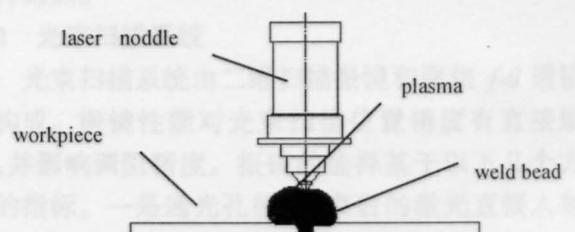


图 1 高温等离子体作用示意图

Fig. 1 Effect of high temperature plasma

* 国家重点基础研究发展规划(973)(G1998061500)、清华大学 985 基金(012-101050)资助课题。

开口处,此时高温等离子体可视为一个点状热源^[2]作用在工件的上表面,如图 1 所示。其余的能量由小孔壁以及等离子体蒸汽柱吸收,这种加热模式看作为线热源模型^[2]。假定材料热物理特性与温度无

关,则可将点热源和线热源各自的温度场解析表达式直接相加而得到工件的温度场计算式。

在高速连续移动的激光束加热条件下,忽略表面热损失,其线热源解析式为

$$T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi\lambda h} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''} \exp\left[-\left(\frac{v^2 t''}{4a} + bt'' + \frac{r^2}{4at''}\right)\right] \quad (1)$$

式中 $r^2 = x^2 + y^2$, $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $t'' = t - t'$ 。高速运动的点状热源温度解析式为

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left(-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right) \quad (2)$$

式中 $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $x = x_0 - vt$, $y = y_0$, $z = z_0$, $t'' = t - t'$ 。根据叠加原理^[2],焊接工件上某点的温度应该是点热源与线热源对该点共同作用的结果,即某点的温度应为

$$T(x, y, z, t) = \frac{q_1}{4\pi\lambda h} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''} \exp\left[-\left(\frac{v^2 t''}{4a} + bt'' + \frac{r^2}{4at''}\right)\right] + \frac{2q_2}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left(-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right) \quad (3)$$

x, y, z 为计算点的坐标(m), t 为时间(s), q 为热源的有效功率,激光焊接时即为激光功率和激光热效率的乘积(W), q_1 为线热源的有效功率, q_2 为点热源的有效功率, v 为热源移动的速度,即激光束在工件上扫描的速度(m/s), h 为被焊钢板的厚度(m), λ 为材料的热传导系数(J/m·s·°C), c 为材料的比热(J/kg·°C), ρ 为材料的密度(kg/m³), α 为材料的导热系数(m²/s)。

根据点热源与线热源模型叠加计算出来的焊缝上部为半圆形,下部焊缝的两个侧面平行。这与实际的焊缝形状略有差别,实际的激光深熔焊缝下部略

收缩为锥形,如图 2 所示。这是由于焊接小孔内的等离子体吸收激光能量,使得激光能量逐渐衰减所致。根据朗伯定律,深入到工件表面以下 z 处的激光功率密度为^[3]

$$I(y) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

I_0 为表面处的激光功率密度, α 为等离子体的吸收系数, z 为深度。

考虑焊接小孔内激光能量的衰减,建立分层模型如图 3。即将薄板分成 n 层,每层获得的激光能量为 $q \exp(-\alpha z)/n$,假设层与层之间没有热量交换,则第 n 层某点的温度为

$$T(x, y, z, t) = \frac{(q_1/n) \exp(-\alpha z)}{4\pi\lambda(h/n)} \exp\left(\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''} \exp\left[-\left(\frac{v^2 t''}{4a} + bt'' + \frac{r^2}{4at''}\right)\right] + \frac{2q_2}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left(-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right) \quad (5)$$



图 2 激光深熔焊缝断面照片
Fig. 2 Photograph of cross section of laser deep penetration welding

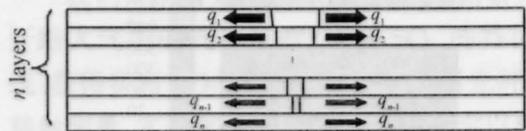


图 3 能量衰减线热源的分层模型
Fig. 3 Delamination model for the power weakening line heat source

3 相同参数条件下断面计算结果分析

(5)式中 q_1 、 q_2 、 α 取不同值,可得到五种热源模型:点热源($q_1 = 0$)、线热源($q_2 = 0, \alpha = 0$)、衰减线热源($q_2 = 0$)、点热源 + 线热源($\alpha = 0$)、点热源 + 衰减线热源。在相同的焊接参数($P = 2400 \text{ W}$, $V = 1.0 \text{ m/min}$)情况下,根据不同的焊接模型模拟得到的焊缝断面形状如图 4 所示,焊缝宽度见表 1。

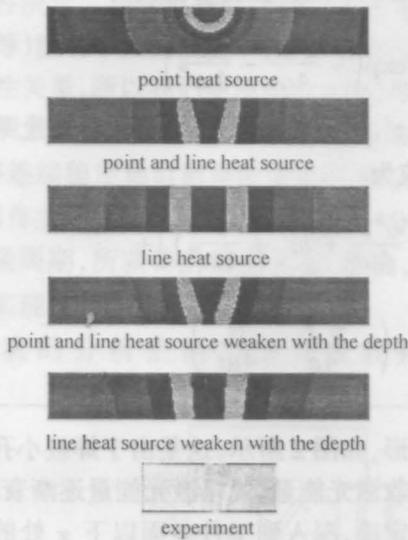


图 4 不同模型温度场断面图

Fig. 4 Diagram of thermal field of different models

表 1 各种模型焊缝断面宽度与实测断面宽度 (mm)

Table 1 Width of weld by various models and experiment

Type of model	Width	
	Up	Down
Point heat source	2.2	0.0
Line heat source	2.4	2.4
Line heat source weaken with the depth	2.4	2.0
Point and line heat source	2.4	1.2
Point and line heat source weaken with the depth	2.4	1.0
Experiment	2.5	0.9

由各种模型与断面的实际尺寸比较可知,点热源 + 衰减线热源模型与实测最为接近,图 5 再现了此模型模拟的焊接动画过程的一帧图像。其中,上图为立体图,下图为俯视图。

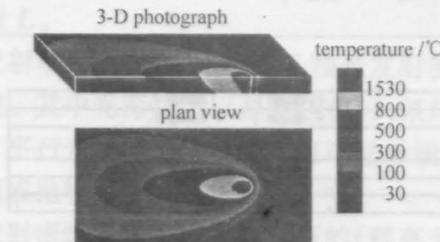


图 5 点热源 + 衰减线热源模型模拟的激光焊接过程

Fig. 5 Modeling of laser welding process by heating model of point heat source and weakening line heat source

4 激光焊接热循环检测与计算

利用热循环计算机检测系统^[4]实测的热循环曲线与计算曲线的比较如图 6 所示,图中实线为实测曲线,虚线为计算曲线。测量点为工件背面距焊缝中心 0.8 mm 处,激光功率 $P = 2400 \text{ W}$,焊接速度 $V = 0.8 \text{ m/min}$ 。由图 6 可以直接得到 T_m 、 $t_{8/5}$ 。将激光焊接热循环计算结果与实际检测结果相比较,实测 $T_m = 1020 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{8/5} = 1.2 \text{ s}$;模拟得到 $T_m = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{8/5} = 1.0 \text{ s}$,二者有较好的近似性。

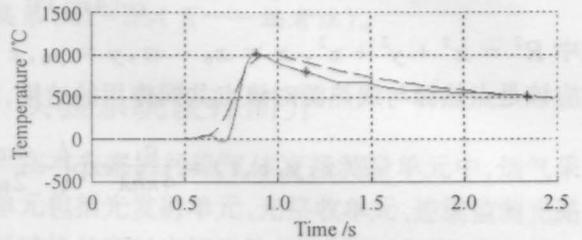


图 6 模拟结果与实际测量结果的比较

Fig. 6 Comparison of thermal cycle between calculation and experiment

5 结 论

1) 提出了用于计算激光深熔焊接热循环的数学模型。模型将热源简化为一点热源和一按指数衰减的线热源相叠加的形式,并对线热源采用了分层处理技术。

2) 点热源 + 衰减线热源模型计算得到的焊缝宽度:上表面为 2.4 mm,下表面为 1.0 mm,与实际焊缝断面误差为 0.1 mm。

3) 在焊接参数相同($P = 2400 \text{ W}$, $V = 0.8 \text{ m/min}$)的情况下,用点热源 + 衰减的线热源模型得到的距离工件背面焊缝中心 0.8 mm 处的最高温 T_m 为 $1020 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{8/5}$ 为 1.0 s;实际检测得到最高温 T_m 为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{8/5}$ 为 1.2 s,二者有较好的近似性。

参 考 文 献

- 1 M. Kutsuna, A. Kikuchi. Thermal cycles and microstructures in laser welding of carbon steel. *Proc. SPIE*, 1992, 1990: 103~106
- 2 Zhang Wenyue. *Heat Conduction of Welding* (焊接传热学). Beijing: Mechanical Industry Press, 1987 (in Chinese)
- 3 Li Lijun. *Modern Laser Processing and Its Equipment* (现代激光加工及其装备). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993 (in Chinese)
- 4 Zhang Xudong et al.. Thermal cycle of CO₂ laser beam welding and effect on mechanical property of joint. *Appl. Laser*, 1999, 19(5): 272~274