

激光深熔焊传热模型的研究*

刘建华 李志远 胡伦骥 贺礼 张立文

(华中理工大学材料科学与工程系, 武汉, 430074)

摘要: 本文提出了一种点-线组合热源传热数学模型及其计算机求解和作图方法, 以描述激光深熔焊条件下的焊缝截面形状及HAZ温度场。通过对现有的不同形状激光焊缝的初步计算, 证明该数学模型得到的结果与实际情况有较好的吻合性。

关键词: 激光深熔焊 传热数学模型

Conduction model for laser deep penetration welding

Liu Jianhua, Li Zhiyuan, Hu Lunji, He Li, Zhang Liwen

(Department of Materials Science & Engineering, HUST)

Abstract: This paper put forward a mathematic model of point-line combined heat conduction, shows the computer solving procedure and plotting to describe the laser deep penetration welding profile and HAZ isotherms. Using the model to analyze the various laser bead welding shapes, it is proved that the calculation results are well coincide with actual welding. So, the model can be used to solve the practical welding problem.

Key words: laser deep penetration welding heat transfer model

* 国家自然科学基金项目 59075208 资助。

参 考 文 献

- 1 Signore R. *Instruments et Laboratoires*, 1971; (1): 7~14
- 2 赵凯华, 钟锡华. 光学. 北京: 北京大学出版社, 1984: 330~340
- 3 Hercher M. *Appl Opt*, 1969; 8(6): 1103~1106
- 4 Корюлен Ф А *et al.* *ЖТТ*, 1976; 25(6): 990~994

作者简介: 李胜飞, 男, 1965年8月出生。硕士。现从事激光光导纤维通讯方面的科研工作。

郭建生, 男, 1937年6月出生。副教授。从事激光应用技术和激光光谱方面的研究。

晏思贤, 男, 1931年9月出生。教授。从事利用激光测动态颗粒场参数及脉冲高温测量方面的研究。

收稿日期: 1994-04-25

一、引言

激光束的能量特性与电子束是相似的。然而用于焊接时,尤其是连续激光器焊接较厚板时,激光焊的熔深比电子束要小得多,焊缝截面形状也未能充分体现高能束焊的特点,其主要原因就是激光焊接时产生的等离子体对激光束能量进入工件内部的屏蔽作用。采用了控制这种等离子体的工艺措施后,激光焊与电子束的结果就比较接近了^[1]。对于激光焊的温度场分析,当焊接呈传热焊模式时,一般都以点热源或高斯分布面热源三维温度场方式处理。而当激光束能量密度高于一定值而形成小孔(Keyhole),亦即深熔焊(Deep penetration welding)模式时,与电子束焊相同,是把激光束作为一沿工件厚度方向的线热源二维温度场方式处理。可是在实际激光焊接工艺中,大多数的焊缝截面形状都难于达到与电子束焊相近的深宽比。由于等离子体控制条件各不相同,焊缝形状也大相径庭,呈酒杯状、钉子状、三角形状等。显然,仅用一线热源来描述激光深熔焊时的能量耦合(传递)特征是不符合多数实际情况的。一般在大功率激光作用下在被焊材料上小孔形成后,等离子体产生于孔内并周期性地逸出形成等离子云。在适当工艺措施的控制下,等离子体能稳定于小孔开口处,发出强烈的蓝光^[1]。它本身就是一个温度极高的等离子体热源,因而通常在其邻近工件表面形成一个较大的加热熔化区。本研究的目的是建立一个点热源(等离子体中心)和一个线热源(小孔内激光束)相叠加的双热源传热数学模型,来表征连续激光深熔焊条件下能量耦合过程的基本特征,利用计算机求解,计算出不同条件下焊缝形状(也可计算温度场)。并与实际焊缝相比较来加以分析验证,为激光焊焊缝形状的控制建立一种理论基础。

二、传热模型

对于形成了一个稳定小孔的大功率激光焊来说,激光束进入小孔中会发生多次的反射而其能量由小孔壁及等离子体蒸气柱吸收。在板厚方向基本穿透的情况下,这种加热模式可认为是一垂直于板厚方向的线热源,形成的传热过程为典型的线热源二维传热模型。在高速连续移动的激光束焊接条件下,忽略表面热损失,其温度场解析式为^[2]:

$$T_1 = q_1 \cdot \exp(-y_0^2/4at) / \sqrt{h(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \quad (1)$$

式中, q_1 为线热源功率(W); λ 为导热系数(J/cm²·s·C); α 为导温系数(cm²/s); c 为材料比热(J/g·C); ρ 为材料密度(g/cm³); h 为材料板厚(cm); v 为焊接速度(cm/s); y_0 见图1。

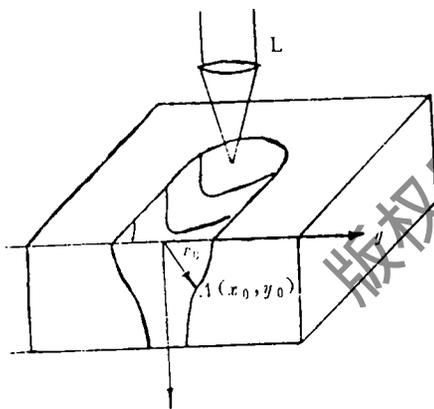


Fig. 1 Laser deep penetration model

实际上在聚焦后的高功率密度激光束作用下,深熔焊时总是伴随有极高温度的等离子体出现。在使用吹除气流等控制条件下,从小孔内逸出后在其上方形成的大体积的等离子云已被消除,等离子体一般都被控制在小孔开口处,而且常与激光聚焦的焦点相重合。因而可以看成是一高温等离子体中心,对焊接工件起强烈的加热作用,可视为一个点热源。相对于小孔内的激光束这一线热源来说,是一个独立的点热源。所以从数学

上讲,这一等离子体点热源的传热可认为是一个连续移动的点热源的三维传热模型,其温度场解析式为^[2]:

$$T_2 = q_2 \cdot \exp(-r_0^2/4at)/2\pi\lambda vt \quad (2)$$

式中, q_2 为点热源功率(W); r_0 见图 1。

显然这只能用于高速焊条件下计算熔合线及其附近温度极高的小范围的近似计算,如果要计算更广泛的 HAZ 温度,必须考虑到有限板厚的边界条件而采用更复杂的计算公式。

根据温度叠加原理 $T = \sum T(r_i, t_i)^{1/2}$, 某点的温度应当等于各热源对该点产生的温度的总和。因此,对于我们激光深熔焊条件下的点-线双热源模型,某点的温度应为 $T = T_1 + T_2$,

即:

$$T = q_1 \cdot \exp(-y_0^2/4at)/\sqrt{h(4\pi c\rho t)^{1/2}} + q_2 \cdot \exp(-r_0^2/4at)/2\pi\lambda vt \quad (3)$$

由于焊接接头截面上焊缝金属的轮廓线实际上就是峰值温度等于材料熔点温度的各点的连线,因此为了确定这一熔点温度等温线(或 HAZ 其他等温线),必须首先求出各点达到峰值温度即 $\partial T/\partial t = 0$ 时的时间 t , 以进一步求出该点此时所达到的峰值温度 T_{\max} 。

公式(3)对时间求偏导,化简后得到如下方程:

$$\partial T/\partial t = \exp[(y_0^2 - r_0^2)/4at] \cdot (r_0^2 - 4at) - k \sqrt{t} (2at - y_0^2) = 0 \quad (4)$$

式中, $k = q_2/(hq_1) \cdot \sqrt{(\pi\lambda)/(c\rho)}$ 。

方程(4)有实根并且正实根是唯一的,说明此方程有解,采用二分法求解。为此,编制了计算机程序并配以适当绘图软件求解并作图。内循环变量为 y_0 , 外循环变量为 x_0 , 求出满足方程(4)的时间 t , 代入方程(3)而求出温度 T_{\max} , 设 $T_1 = 1500\text{C}$, $T_2 = 1550\text{C}$ 为熔合区温度范围,

熔合线上的点 (x_0, y_0) 所必须满足的条件是 $T_1 < T_{\max} < T_2$, 从而可以找到一系列满足这一条件的点, 计算机连点作图后即得到熔合线, 即焊缝金属的轮廓线。

由于(2)式适用于点热源处于工件表面的情况, 而实际上由于不同的工艺控制条件(吹气压力、焦点位置等), 等离子体中心有可能处于工件表面以下的小孔内, 即点热源的位置有可能处于小孔内部, 低于表面。在此情况下, 必须以镜面反射方法处理, 如图 2 所示。相当于增加了一个对称于工件表面距离为 S 的功率相等的点热源, 在无限大物体中传热, 公式(3)变成:

$$T = q_1 \cdot \exp(-y_0^2/4at)/\sqrt{h(4\pi c\rho t)^{1/2}} + q_2 [\exp(-r_{01}^2/4at) + \exp(-r_{02}^2/4at)]/4\pi\lambda t \quad (5)$$

与前述方法相同, (5)式求导后用计算机求解。实际上根据镜面反射方法对有限厚度板温度场计算还需取多次反射求解, 但对于激光焊这一高速焊条件而且只进行熔合线温度计算的情况, 取一次反射就可以了。

根据文献[3]提供的接头照片和工艺数据, 计算得到的焊缝形状(熔合线)(图 3a)与实际接头截面照片比较, 上部吻合性很好, 但下部计算得到的形状是两条垂直平行线, 与实际情况不符。其原因从数学模型上看, 此线热源并非具有均布的能量密度, 而是一个逐渐衰减的非线性分布线热源, 这与小孔内壁多次反射吸收效应而使激光束能量逐渐衰减的理论^[1] 是一致

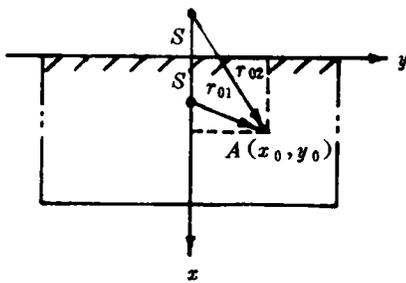


Fig. 2 A point heat source underneath the surface by S

$$r_{01} = \sqrt{(x_0 - S)^2 + y_0^2}$$

$$r_{02} = \sqrt{(x_0 + S)^2 + y_0^2}$$

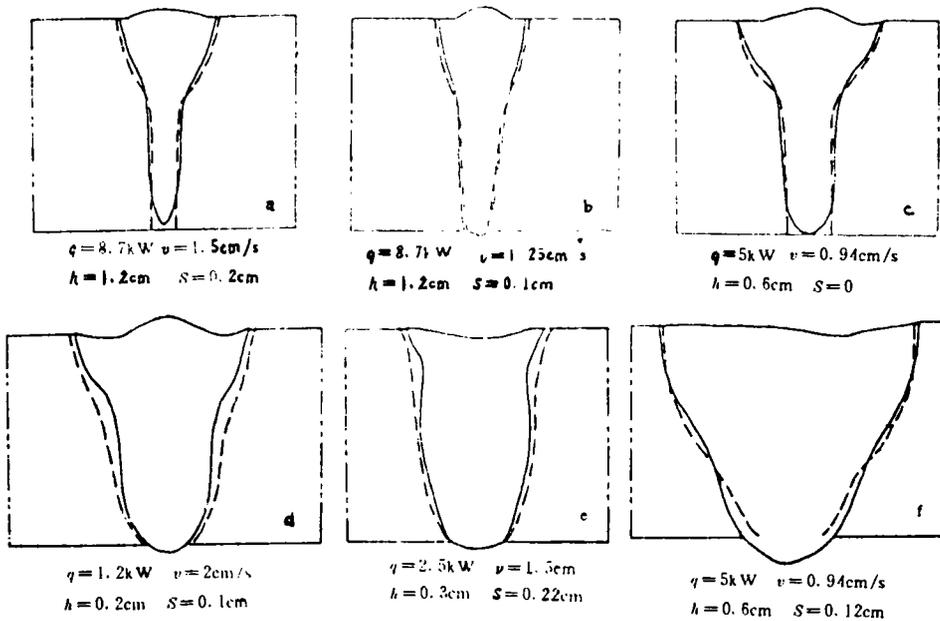


Fig. 3 Comparison of calculated welds fusion zone profiles with actual ones

—— actual welds profile - - - - calculated welds profile

的。因此,相应地设该线热源功率密度 $q_1 = q_0 \cdot \exp(-kx_0)$, 取一定 k 值,对于文献[3]的另一焊缝获得了良好的一致性(图 3b)。对另一文献[4]的激光焊接头,计算与实际形状的比较见图 3c,f。可以看出,吻合性也是相当好的。作者也进行了一系列试验:如采用 1.5kW 纵流 CO_2 激光器以及国产 5kW 横流 CO_2 激光器实际焊接结果与计算结果的比较见图 3d,e。

三、讨 论

大功率激光焊获得深熔焊的关键问题之一是等离子云的控制^[1]。然而在非真空条件下要完全抑制等离子体是不太可能的,何况实际上处于小孔内部的等离子体本身也是一个有效的热源。因此,其控制目的是将小孔外部起屏蔽作用的逸出等离子体吹除,而对小孔内部的等离子体加以利用,甚至用压力控制等离子体的位置而控制焊缝的形状^[5]。

激光深熔焊的最大特征是小孔的形成。在小孔形成及其后续的封闭、凝固过程中,除了热源的作用外,表面能、金属气化产生的动态与静态压力、液态金属的流动都对焊缝成形有很大影响。但这些因素本身及其相互作用是一个极其复杂的动态过程,要以一个简单的物理和数学模型来一并表示还难以实现,只能从不同角度出发来进行讨论。本文从焊接热过程角度建立的一种激光深熔焊的点-线双热源数学模型及计算方法,经过用各种不同实际焊接接头计算的验证,证明是一种可以描述深熔焊过程能量传递特征的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Arata Y. Plasma electron & laser beam technology. ASM, 1986
- 2 张文斌. 焊接传热学. 北京:机械工业出版社, 1989: 27~51

版权所有 © 《激光技术》编辑部