

镁合金激光—TIG 复合热源焊接热源模型的建立及其数值模拟*

刘黎明 迟鸣声 宋 刚 王继锋

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室 大连 116024)

摘要: 根据 YAG 激光—TIG 复合热源焊接的物理特征, 建立了基于旋转高斯体热源与高斯面热源相结合的新型复合热源焊接模型。该模型的建立并非简单的热源叠加, 而要考虑材料本身特性与复合焊接特点。在此基础上, 针对镁合金 AZ31B 进行了复合热源焊接温度场、焊缝断面形状的数值模拟, 提出了热源模型建立过程中的参数修改建议。与实测结果比较表明建立在双热源基础上的复合热源模型能准确地模拟镁合金的复合焊接过程; 数值模拟结果验证了镁合金复合热源焊接高速、能量增强和热影响区窄的特点。

关键词: 复合热源焊接 热源模型 镁合金

中图分类号: TG403

0 前言

镁合金被称为“21 世纪绿色工程材料”。目前, YAG 激光—TIG 复合热源焊接 AZ31B 镁合金已经被证明是一种可行而且高质量的焊接工艺^[1], 迫切需要数值模拟工作对这一过程进行指导、预测, 并通过数值模拟更深层次的理解复合热源焊接这一过程。但目前复合热源的数值模拟工作开展的却非常有限。其中一个主要原因是焊接数值模拟工作的“灵魂”, 即复合热源焊接热源模型一直解决得不甚理想。首先高能束激光焊接的热源模型虽然经过线热源、面热源、柱状热源乃至双椭球体热源^[2]的变迁, 始终没有得到很好的解决; 其次激光、电弧两热源之间存在着一定的物理机制, 需要考虑热源之间的能量影响关系^[3]; 再者数值模拟过程中, 当不同种类热源共同加载时, 子程序的实现也存在着一定的困难。以上这些都加大了复合热源模型建立的难度。W. STEEN^[4]曾对激光与电弧复合热源焊接进行过数值模拟工作, 但只是概括提到了模拟中应该一定程度地提高电弧焊接的热效率及提高电弧热效率对接头形状模拟结果的影响。

针对过程特点, 提出了 YAG 激光—电弧复合焊接的热源模型, 该模型建立在旋转高斯体热源与高斯面热源模型相结合的基础上。此后又对组合热源的叠加问题进行了讨论, 指出了复合热源模型非简单叠加这一问题, 并对镁合金 AZ31 在模型建立

过程中的参数改变情况给出了说明。在此基础上对镁合金 AZ31B 的复合热源焊接温度场进行了数值模拟, 通过与实际热循环曲线以及焊接接头形状的对比, 验证了模型建立的准确性。

1 复合热源模型的建立

复合热源焊接的特点是 YAG 激光、TIG 电弧这两种不同物理性质与能量传输机制的热源同时作用于焊接区^[3]。深熔 YAG 激光属于一种高能束热源, 能量作用有效半径很小, 但能量密度很高, 达到 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 可使材料瞬时熔化或汽化, 并产生焊接匙孔, 焊后形成深宽比较大的熔池形状。TIG 电弧则相对有效作用区域较大, 能量密度较小。两者的结合可以降低材料对激光的反射以提高能量利用率, 激光产生的小孔效应压缩 TIG 电弧使电弧能量更加集中, 从而有效地提高了焊接速度与焊接效率。

热源模型建立在 YAG 深熔激光焊旋转高斯体热源与 TIG 电弧高斯面热源的基础之上。其中 YAG 激光采用的旋转高斯体热源是一种新型的高能束焊接热源模型^[5], 这种模型物理意义清晰明确(图 1), 考虑了激光焊接小孔效应机制、匙孔壁的能量传递及其有效加热半径很小的物理特点。模型满足如下条件: ①模型在 z 向上的断面均为圆, 且断面上的热流密度服从高斯分布, 在圆心处的热流密度 $q(0, z)$ 达到最大值。② z 轴上各处的热流密度值相同, 即 $q(0, z)$ 为常数。热源有效作用区域内任意一点的热流密度值是热源高度, 激光热源有效功率以及热源开口半径的函数。其热源模型的数学表达式为

* 国家“十五”科技攻关计划(2004BA311A11)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0271)资助项目。20050103 收到初稿, 20050530 收到修改稿

$$q(x, y, z) = \frac{9P}{\pi R_0^2 h (1 - e^3)} \exp \left[\frac{-9}{\ln \left(\frac{h}{z} \right) R_0^2} (x^2 + y^2) \right]$$

式中 h ——热源高度

P ——激光热源有效功率

R_0 ——热源开口半径

x, y, z ——坐标轴

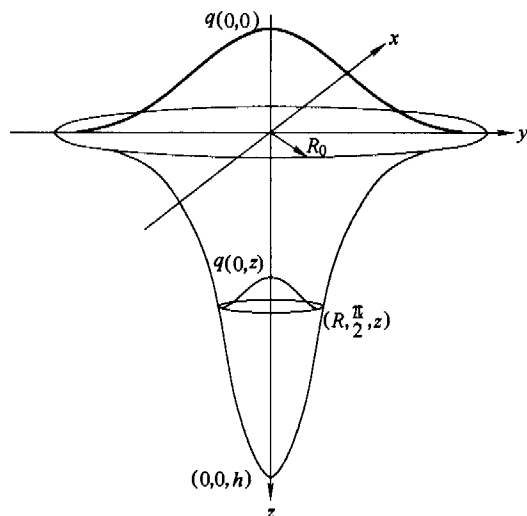


图 1 旋转高斯体热源模型

TIG 焊接热源则选择的是在数值模拟中较成熟的高斯面热源模式^[6]。这种模型将热源按高斯函数在一定范围内沿二维分布, 其热源模型的数学表达式为

$$q(x, y) = \frac{3Q}{\pi r_0^2} \exp \left[-\frac{3}{r_0^2} (x^2 + y^2) \right]$$

$$Q = \eta U I_{\text{arc}}$$

式中 r_0 ——热源有效半径

Q ——热源有效功率

η ——焊接热效率

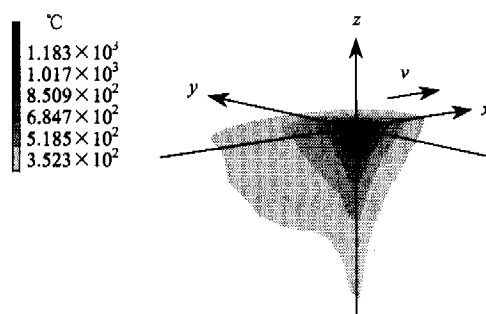
U ——电弧电压

I_{arc} ——焊接电流

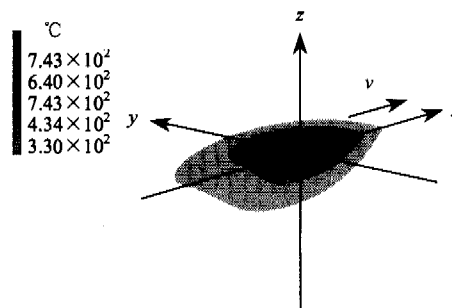
超出此半径 r_0 的热流值规定为 0。由于在复合热源焊接过程中, 焊接速度很高, 所以用这种模型来模拟此时的 TIG 焊接情况是比较准确的。

YAG 激光—TIG 复合热源焊接热源模型建立在上述提到的两种热源模型上, 但是由于复合热源焊接过程并不是激光焊与 TIG 焊两种焊接过程的累加, 所以复合热源焊接热源模型也决不是简单的两热源迭加, 因为在复合热源焊接过程中激光与电弧存在着一定的物理机制。如前所述, 激光提高了电弧的利用率, 对应着复合热源电弧部分的高斯面热源模型中热效率 η 加大, 在对镁合金 AZ31 复合热源焊接的数值模拟过程中, 在模型建立过程中通常

使 η 的值增大 0.1; 激光对电弧的吸引压缩作用, 使电弧收缩, 对应着热源模型中的有效半径 r_0 减小, 同样针对镁合金 AZ31 复合焊接, 在热源模型建立过程中, 通常使正常 TIG 焊接的热源有效半径 r_0 降低 0.5 mm。而由于电弧的加入, 激光的利用率大大提高, 对应着旋转高斯体热源模型中的热源有效功率 P 大大增加, 对于镁合金这种高反射率的金属, 在模拟中把激光利用率提高到 75%。上述热源模型的参数调节基于与工艺试验结果反复比较论证的基础之上。由数值模拟实现的镁合金复合热源模型图如图 2a 所示。图 2b 为没有考虑复合热源能量增强效应的热源模型 ($I_{\text{arc}}=110 \text{ A}$, $P=400 \text{ W}$, $v=1100 \text{ mm/min}$)。值得注意的是, YAG 激光相比 CO_2 激光与电弧复合时, 等离子体效应相对较弱, 所以不易出现 TIG 电流达到很大时产生的电弧“屏蔽”激光这一现象。在大电流情况下, 激光与电流仍然保持相互增强的效果。



(a) 考虑热源之间能量影响因素



(b) 未考虑热源之间能量影响因素

图 2 复合热源模型

另外在小功率 YAG 激光独立焊接镁合金的时候, 在焊接速度 v 较高的情况下难以形成深熔焊, 此时激光焊接热源模型应采用高斯面热源模式。

2 镁合金复合热源焊接过程的数值模拟

2.1 有限元网格的划分与初始、边界条件的确立

采用非线性有限元程序作为数值模拟的软件环

境, 焊件采用 AZ31B 镁合金, 焊接方式采用对接焊。对接件尺寸为 $300\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 。网格划分情况如图 3 所示。

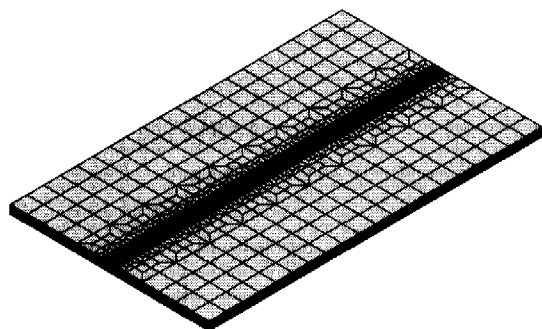


图 3 对接焊有限元网格的划分

与其他金属相比, 镁合金物性特点主要是高热导率, 低密度, 低熔点。镁合金 AZ31 随温度变化的各项物性参数以及相变潜热查相关手册得到, 高温区域参数由于数据缺乏采用外推法获得。值得注意的是, 数值模拟过程中通过增加固—液区间金属的热传导率来间接地考虑熔池流动^[7]。

能量边界条件即焊接热源的加载已有详细描述。温度(散热)边界条件施加对流边界条件以及辐射边界条件。

2.2 数值模拟结果分析及验证

2.2.1 数值模拟分析

图 4 为普通 TIG 焊接、激光焊接以及复合热源焊接三者的数值模拟分析, 这三种镁合金焊接方式的焊接速度相同($v=1\ 100\text{ mm/min}$, $I_{\text{arc}}=100\text{ A}$, $P=400\text{ W}$)。从模拟结果也可以明显地看出, 复合热源模型并不是建立在热源模型简单叠加的基础上, 而是充分考虑了复合热源焊接本身的物理特点。数值模拟结果与参考文献[1]得到的结论也是相吻合的。

图 5、6 分别为复合热源焊接($I_{\text{arc}}=100\text{ A}$, $P=400\text{ W}$, $v=1\ 200\text{ mm/min}$)、TIG 单独焊接($I_{\text{arc}}=140\text{ A}$, $v=600\text{ mm/min}$), 进入到焊接准稳态后, 在焊接到焊件同一位置时的温度场分布云图。数值模拟建立在两者都能刚好焊透工件的前提下。从图中可以看出, 复合热源的等温线范围明显比单独 TIG 焊范围窄, 也就是说在复合热源焊接时热影响区域比单独 TIG 焊接要窄很多, 这是因为镁合金热扩散率很高, 如果要达到满意的熔深, 所需要的焊接线能量比较大或者加强焊接热源的纵向能量, 单独 TIG 焊接只能依靠加大焊接电流或降低焊接速度的方式增加线能量, 这些都导致热影响区域较宽, 而复合热源焊接则由于激光的加入使纵向能量大大加强、焊接热效率加大并可实现高速焊接, 其热输入相对较小, 热

影响区域较窄。从数值模拟的结果可以看出复合热源焊接比 TIG 单独焊接焊速提高一倍。

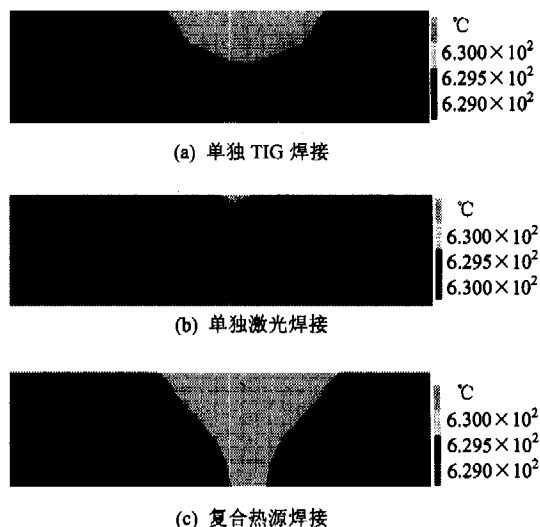


图 4 三种焊接方法接头形状的数值模拟

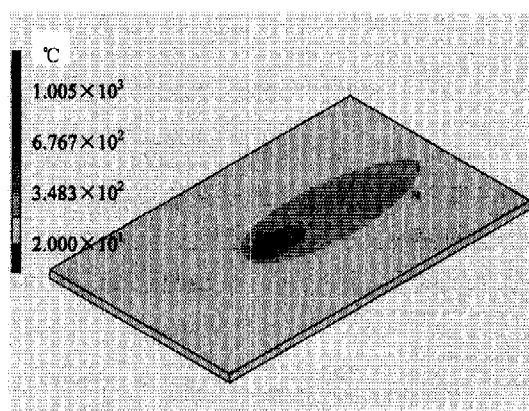


图 5 进入准稳态后复合热源对接焊温度场分布

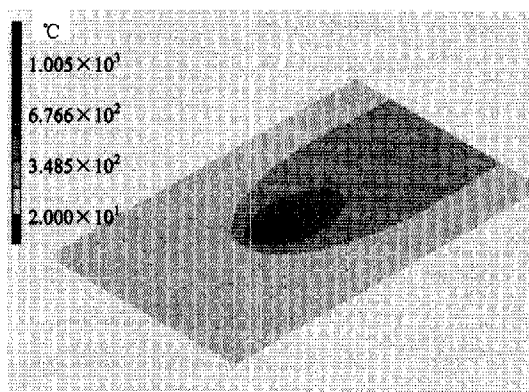
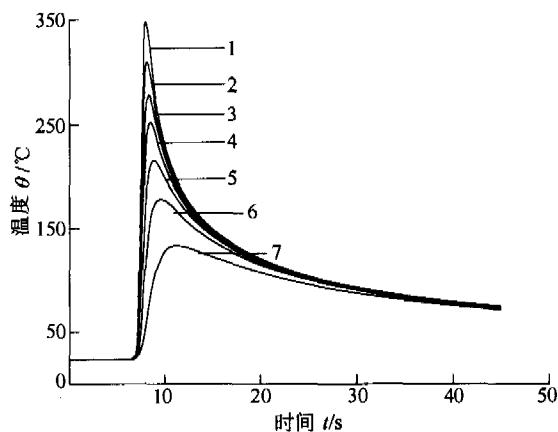


图 6 进入准稳态后单独 TIG 对接焊温度场分布

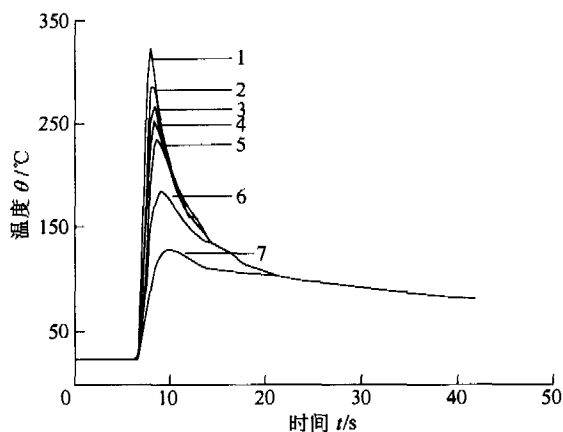
2.2.2 数值模拟结果验证

图 7 为在复合焊接工艺参数($I_{\text{arc}}=100\text{ A}$, $P=400\text{ W}$, $v=1\ 200\text{ mm/min}$)下, 焊缝中断面距焊缝中心不同位置点的模拟与实测的焊接热循环曲线比较图, 图 7 中 y 为采集点与焊缝中心的距离, 验证试验采用的镍铬—镍硅 K 型热电偶进行温度采样。从图 7

中可以看出, 模拟结果中峰值温度值与实际峰值温度相差只在 20°C 左右, 吻合较好。



(a) 数值模拟结果



(b) 实际测量结果

图7 焊接热循环曲线比较图

1. $y=4\text{ mm}$ 2. $y=5\text{ mm}$ 3. $y=6\text{ mm}$ 4. $y=7\text{ mm}$
5. $y=9\text{ mm}$ 6. $y=12\text{ mm}$ 7. $y=18\text{ mm}$

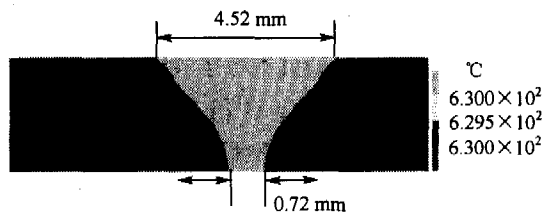
图8 模拟的焊缝断面接头形状与实际焊缝断面的比较($I_{\text{arc}}=110\text{ A}$, $P=400\text{ W}$, $v=1\,500\text{ mm/min}$), 可以看出对接焊的接头模拟结果与实际误差很小。这说明高温区域的模拟结果是很准确的。

另外在后续的工作中进行了激光—TIG 复合热源缝焊(搭接)镁合金的数值模拟工作与温度场测试, 模拟结果与实际也吻合较好, 这部分工作将在以后的论文中做进一步系统的阐述。

上述模拟结果充分证明了热源模型建立的准确性。

3 结论

(1) 建立了镁合金 YAG 深熔激光—TIG 复合热源焊接模式下的新型热源模型, 使其在模型物理意义上和数值模拟结果上更贴近实际。



(a) 数值模拟复合热源焊接接头形状



(b) 实际测量的复合热源焊接接头形状

图8 对接焊缝断面模拟结果与实际结果比照

(2) 在充分理解复合热源焊接过程的基础上, 探讨了 YAG 激光与 TIG 电弧的相互作用对热源模型的影响。指出: 热源模型并非简单的两热源叠加, 建模过程中要充分考虑过程的物理特点。

(3) 对镁合金 YAG 激光—TIG 复合热源焊接温度场进行了数值模拟, 数值模拟结果也深刻反映了复合热源焊接具有高速、能量增强以及热影响区较窄的优势。

(4) 通过对镁合金复合焊接热循环曲线与接头形状的模拟值与实测值的比较, 验证了模拟结果。从而进一步说明了新型复合热源模型建立的准确性。

参 考 文 献

- [1] 宋刚, 刘黎明, 王继锋, 等. 激光—TIG 复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 31-34.
- [2] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat source[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [3] STEEN W. Arc augmented laser processing of materials[J]. Appl. Phys., 1980, 51(11): 5 636-5 643.
- [4] STEEN W. Arc augmented laser welding[J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-335.
- [5] 吴甦, 赵海燕, 王煜, 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 92-94.
- [6] CHONG L M. Predicting welding hardness[D]. Ottawa, Canada: Carleton University, 1982.
- [7] 魏艳红. 焊接凝固裂纹温度场的数值模拟[J]. 焊接学报, 1999, 20(3): 199-204.

NUMERICAL SIMULATION OF AZ31B MAGNESIUM ALLOY LASER—TIG HYBRID WELDING WITH NEW HEAT SOURCE MODEL

LIU Liming CHI Mingsheng

SONG Gang WANG Jifeng

(State Key Laboratory of Material Surface
Modification by Laser, Ion and Electronic Beams,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: A new heat source model of laser-TIG hybrid welding that based upon rotary-Gauss body heat source model and Gauss area heat source is established. The model must consider the physical characteristics of material and hybrid welding

because two heat sources are not repeated addition simply. On this basis, the numerical simulation of hybrid welding temperature field and welding seam sectional form is performed and the advice of parameters modification is brought forward. Compared with the experimentally measured value, the result shows that the new model can simulate the AZ31 magnesium alloy hybrid welding accurately. The characteristics of hybrid welding including high welding speed, energy increased and narrow heat affected zone are verified by the calculated result of numerical simulation.

Key words: Hybrid welding Heat source model

Magnesium alloy

作者简介: 刘黎明, 男, 1967 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为有色金属的先进焊接技术及自动化。

E-mail: chimingsheng@163.com