

镁合金/不锈钢激光-TIG复合焊的数值分析

李迅波¹, 吴刚¹, 曾志¹, 王锦夏², 赵刚²

(1. 电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 611731;

2. 成都焊研威达自动焊接设备有限公司, 成都 610300)

摘 要: 应用 Nd:YAG 激光-TIG(非熔化极氩弧焊)复合焊接技术对 AZ31B 镁合金板和 304L 不锈钢板进行异种材料对接焊。根据复合焊接的能量耦合机理,建立了基于双椭圆平面分布、双椭圆体积分布和旋转-高斯体积分布相结合的复合焊接热源模型,利用有限元数值模拟,分析了复合焊接温度场及残余应力分布。结果表明,对异种材料而言,焊缝处温度场差别较大,且镁合金侧的残余应力较高。

关键词: 镁合金; 不锈钢; 复合焊接; 残余应力

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)08-0049-04



李迅波

0 序 言

复合焊接技术在经济和技术上的优势,使其在造船业、航空航天业、管道制造业等都有很多的应用。激光-TIG 复合焊接技术作为复合焊接技术之一,融合了电弧焊接和激光焊接的优势,在高速焊接薄板材时有较好的焊接效果和板材变形小的特点。这项技术对于工业应用有很多益处,例如提高生产效率以及在焊接过程中减少再加工的成本^[1]。

残余应力和焊接变形不利于焊接结构,残余应力不仅会导致结构变形而且会影响焊接结构的连接特性,会使焊接后板材迅速开裂以及减少焊接结构的使用寿命,尤其是在焊接区域的拉应力,一般都有不利的影响:导致应力增大、疲劳失效、易折断等。因此对于结构的新焊接工艺,必须预先在设计阶段清楚焊接接头的物理特性^[2]。焊接工艺的复杂性包括集中加热、温度对材料特性的影响以及热源的移动等,其数值模拟不可能考虑到所有的实际焊接条件,必须要适当地简化假设^[3]。

应用 Nd:YAG 激光-TIG 复合焊接技术焊接 AZ31B 镁合金板和 304L 不锈钢板。根据复合焊接的能量耦合机理,建立了基于双椭圆平面分布、双椭圆体积分布和旋转-高斯体积分布相结合的复合焊接热源模型,并对 AZ31B 镁合金和 304L 不锈钢的复合焊接温度场和残余应力进行了数值模拟。试样

采用红外摄像仪测量焊接接头的热温度场分布,用 X 射线衍射法(XRD)测量焊接接头残余应力,通过试验测得的数据与数值模拟数据的对比,以验证复合热源模型的准确性。

1 复合焊接试验

试验采用 AZ31B 镁合金板材尺寸为 200 mm × 100 mm × 2.2 mm 和尺寸为 200 mm × 100 mm × 2 mm 的 304L 不锈钢板材。试样焊前采用丙酮去除油脂,干燥后分别用砂布和钢刷等机械方法去除氧化膜。焊接设备由 400 W Nd:YAG 激光焊机和 TIG 焊机组成如图 1 所示,焊接时选用的工艺参数如表 1 所示。

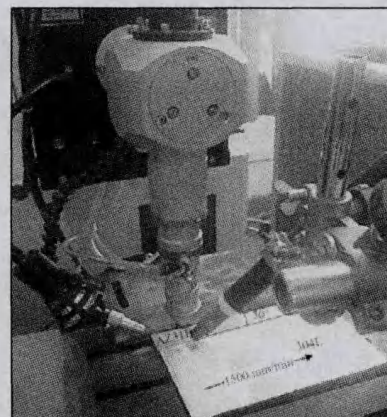


图 1 激光与 TIG 电弧相对位置示意图

Fig. 1 Relative position of laser and TIG

表1 复合焊接参数
Table 1 Parameters of hybrid welding

焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	焊接电流 I/A	激光功率 P/W	激光离焦量 $\Delta d/mm$	激光频率 f/Hz	激光与镁合金- 钢连接处距离 D/mm	激光和钨 极距离 d/mm	激光脉宽 W/ms	钨极和工件 的夹角 $\alpha(^{\circ})$	保护气体 的流速 $q_1/(L \cdot min^{-1})$
1 500	80	400	1	20	0.5	0.8	3.5	50	15

试验采用平板对接焊,焊接过程中不填充焊剂.激光垂直聚焦于镁合金板材表面,沿焊接方向,TIG在前,激光在后.

2 有限元模型

2.1 控制方程与边界条件

热分析的能量平衡等式为

$$\nabla(k \nabla T) + q - \rho c T_r = 0 \quad (1)$$

式中: T 为温度; T_r 为温度变化率; k 为热导率; c 为比热容; ρ 为密度; q 表示热源的体积分布函数; ∇ 为空间梯度算子.

镁合金与不锈钢复合焊接有限元模型如图2所示.

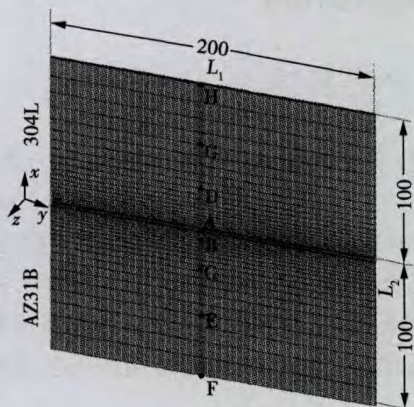


图2 镁合金与不锈钢复合焊接有限元模型(mm)

Fig. 2 Finite element model of welding structure

根据 AZ31B 镁合金和 304L 不锈钢的热物理特性,对复合焊接温度场进行数值模拟^[4].与其它金属相比,镁合金物性特点主要是高热导率、低密度、低熔点,其弹性模量、屈服强度也较低.镁合金 AZ31B 随温度变化的材料参数数据缺乏,只能得到室温至 200 ℃ 的数据^[5],在模拟时由外推法来获取材料参数.因为相变潜热对温度分布有很大的影响,所以有必要考虑其影响.然而潜热的吸收和释放会吸收大量的热量,会明显降低工件的升温 and 冷却速度.采用等价比热容法处理潜热吸收和释放^[6].

对流边界条件的处理比较复杂,施加的气体保护焊接过程包括 4 种对流现象,即熔池中液态金属的对流,远离熔池区域的自然对流,喷嘴下方区域的保护气体强制对流和喷嘴邻近区域的保护气体流散所造成的强制对流.在数值模拟中,熔池内的对流损失一般采用人为的提高导热系数来处理.在焊接中热能的损失主要通过辐射,而对流作用相对较小,温度越高则辐射换热作用越强,一般在 300 ~ 400 ℃ 的区域,辐射损失超过对流损失,研究中综合考虑了自然对流和辐射的损失^[7].

2.2 复合热源模型的建立

复合热源焊接过程中,由于激光和电弧的相互作用,形成一个温度极高的热源(约有 11 000 K),对工件有强烈的加热作用.对于激光-TIG 复合焊接,热源模型总体上是两种子热源(电弧、激光)的组合.此外,由于复合焊接中电弧利用率得以有效提高,等离子体能量在变形熔池内部分布较为复杂.基于激光-电弧能量耦合机理,复合热源模型建立在双椭圆平面分布(DEP)+双椭球体积分布(DEB)+旋转-高斯体积分布(RGB)基础之上,通过调整相应的分布参数,模拟激光和电弧的耦合作用.结合式热源模型对于复合焊而言,相当于有一个双椭圆分布的面热流密度模拟电弧的热输入作用,一个双椭球分布的体热流密度模拟由于电弧冲击、搅拌熔化而导致的变形熔池内部的部分激光能量分布,及旋转-高斯体热源来体现典型的“钉头”和“深熔”的现象.

双椭圆平面分布热源模型(DEP)为

$$\left. \begin{aligned} q_{DEP} &= \frac{6Q_{DEP}}{\pi a_1 b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2}\right) \\ q_{DEP} &= \frac{6Q_{DEPb}}{\pi a_2 b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: q_{DEP} 为电弧热流分布函数; Q_{DEP} , Q_{DEPb} 分别为电弧中心线前部和后部的总热量; a_1 , a_2 , b 为双椭圆热源参数.

双椭球体积分布热源模型(DEB)为

$$\left. \begin{aligned} q_{DEB} &= \frac{6Q_{DEB}}{\pi a_1' b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1'^2} - \frac{3y^2}{b'^2} - \frac{3z^2}{c'^2}\right) \\ q_{DEB} &= \frac{6Q_{DEBb}}{\pi a_2' b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2'^2} - \frac{3y^2}{b'^2} - \frac{3z^2}{c'^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: q_{DEB} 为部分激光能量热流分布函数,作用在熔池表面变形之后的下塌部分,即从工件上表面到熔池表面的最大下凹处这一段的激光热源能量,假设此部分热量均匀分布在双椭球体内; Q_{DEB} , Q_{DEBb} 分别为双椭球前部和后部的总热量; a_1' , a_2' , b' , c' 为双椭球热源参数。

旋转-高斯体积分布热源模型(RGB)为

$$q_{RGB} = \frac{3c_a Q_{RGB}}{\pi h_{RGB} (1 - 1/e^3)} \exp \left[\frac{-3c_a}{\log(h_{RGB}/z)} (x^2 + y^2) \right] \quad (4)$$

式中: c_a 为热源形状集中系数; R_{RGB} 为热源开口半径; Q_{RGB} 为热源功率; h_{RGB} 为热源高度。

Nd:YAG 激光-TIG 复合焊接热源模型建立在上述提到的三种热源模型上,但是由于复合焊接过程并不是激光焊与 TIG 焊两种焊接过程的简单累加,因此复合焊接热源模型也决不是简单的三热源迭加,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。激光提高了电弧的利用率,对应着复合热源电弧部分的双椭圆面热源模型 DEP 的热效率加大;激光对电弧的吸引压缩作用,使电弧收缩,对应着面热源模型中的形状参数 a_1 , a_2 , b 减小。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 RGB 中的热源有效功率 Q_{RGB} 大大增大。激光-电弧共同作用在镁合金板上,需要采用复合热源计算热输入;而不锈钢板未熔化,因此仅采用 DEP 模拟电弧焊接热源,不锈钢处温度场分布主要采用热导进行计算。根据焊接接头熔合线形状应用数值优化(OPT)方法对焊接热源参数进行反复校核^[8],并用回归分析的方法确定了 DEP, DEB 和 RGB 三者之间的能量耦合关系。采用热-结构间接耦合方法,将温度场分布结果作为热输入,加载至相应的力学模型中,同时施加与试验相符的约束边界条件,预测复合焊接过程的残余应力及变形。

3 结果及分析

3.1 复合焊接焊缝温度场分布

复合焊接同时具有电弧焊接热源和激光焊接热源的特点,其焊接接头处的温度值高于 2 200 °C。焊接过程中不锈钢板的温度尚未达到材料的固-液转变温度,AZ31B 镁合金的热导率比 304L 不锈钢大,因此镁合金热影响区范围也会较不锈钢大。图 3 显示的是在试样表面宽度方向上各点(图 2 中 A-H)的温度变化曲线图。由于熔池附近的弧光干扰等,选取了 C, D 两点的红外测温数据进行比对,以验

证复合焊热源模型的准确性。比较数值模拟结果与实时测温数据可以发现,所建的复合热源模型可以较为准确的反映焊接热循环过程及温度场分布。随着焊接过程的进行,焊接接头处的温度逐渐升高。经过 4 s,熔池和它周边(远焊)区域的温度变化有着明显的不同,熔池温度增长得很快,温度梯度可以达到 200 °C/mm,而在远焊区的温度变化则比较小;对比不锈钢板上 D, G, H 点与镁合金板上 A 等测试点的热循环曲线,可得不锈钢板的温度梯度比镁合金板的大。对比 C 点与 D 点的热循环曲线,也可得出镁合金的热影响区范围比不锈钢大。

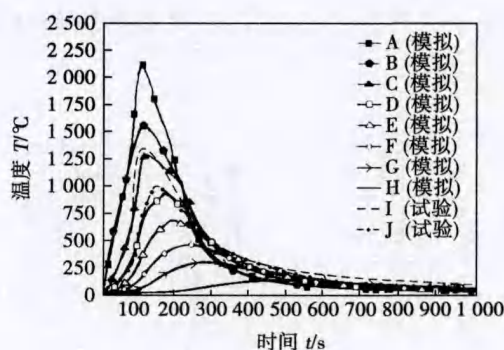


图3 试样中截面各点的热循环曲线图

Fig. 3 Thermal cycles of hybrid welding

3.2 复合焊接焊缝残余应力分布及变形分布

采用热弹-塑性有限元法对焊后残余应力进行分析,图 4 显示了中间横截面处纵向残余应力 σ_y 的分布图。 σ_y 在熔合区和热影响区是拉应力,其值超过了 AZ31B 镁合金的屈服应力。最大的残余拉应力出现在热影响区,而金属母材部分存在压应力,且在热影响区的应力非常集中。此外,由于热源集中作用于镁合金板材且其热胀系数较高,焊接接头处镁合金板材侧的残余应力较高,接近 180 MPa,应力集中也较为严重;而不锈钢板材侧的残余应力分布较为均匀,仅焊趾位置应力大于 150 MPa。



图4 横截面处纵向残余应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution on butt welds

图 5 为焊接接头残余应力分布。图 5a 是距离图 1 中直线 L_1 100 mm 处残余应力数值仿真计算结

果与试验中用 XRD 方法测得的实际数据的比较. 复合焊接残余应力分布特点是焊接接头处显示为残余拉应力, 其它地方显示为压应力. 304L 不锈钢板上的残余应力要比 AZ31B 镁合金板上的低 60 MPa 以上, 数值仿真数据与 XRD 测量数据基本符合. 图 5b 是焊接样板表面 L_2 直线处的残余应力分布. 在中心横截面附近表现的是残余拉应力, 而在边缘附近(即离起焊点或收弧点纵向距离近的地方)表现的是残余压应力, 沿着焊接方向拉应力能达到 170 MPa, 表现出明显的非线性瞬态变化的应力场. 仿真得到的焊后变形量(图 6)为 2.26 mm, 与实际焊件变形量(2.45 mm)相比, 误差约为 8%, 其原因可能在于采用外推法进行了材料热物理性能的估算.

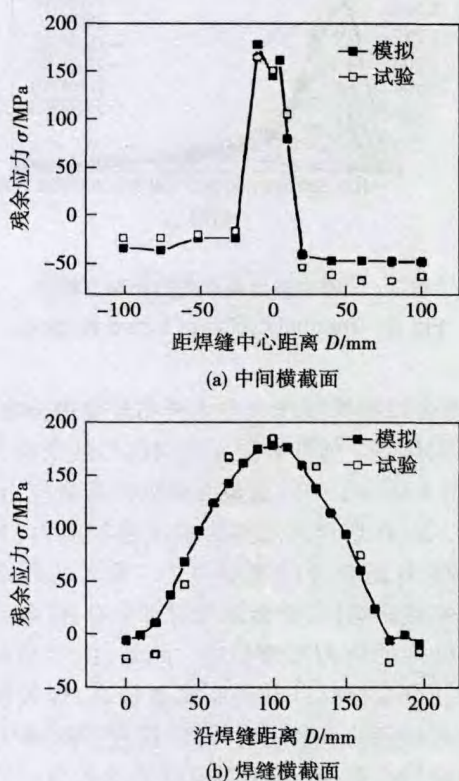


图5 焊接接头残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution on hybrid butt weld

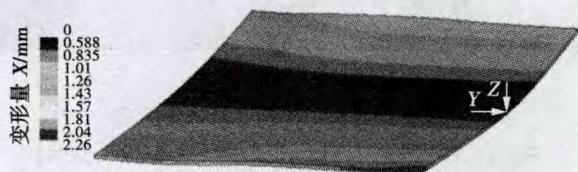


图6 数值模拟变形量(mm)

Fig. 6 Deformation analysis by FEM

4 结 论

(1) 对比数值模拟数据和试验数据, 证明一个由双椭圆平面分布热源、双椭圆体积分布热源和旋转-高斯体积分布热源组合成的三维热源耦合模型是准确的, 它同时具有电弧焊接热源和激光焊接热源的特征.

(2) 复合焊接过程中存在较快的加热速率和冷却速率, 熔池和远焊区域的温度变化有着明显的不同, 熔池温度增长得很快. 由于材料热导率和线胀系数的不同, AZ31B 镁合金的热影响区范围比 304L 不锈钢的大很多.

(3) 焊后残余应力在熔合区与热影响区表现为拉应力, 其值超过了镁合金的屈服应力, 最大残余应力出现在镁合金侧热影响区, 且应力集中较为明显, 而金属母材部分存在压应力. 在中心横截面处, 残余应力表现出明显的非线性瞬态变化特点.

参考文献:

- [1] Liu L M, Zhao X. Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59: 1279-1284.
- [2] Son K J, Yang Y S, Beom H G. Analysis of angular distortion in weldments using laminated plate theory[J]. *Science Technology Welding and Joining*, 2000, 5(4): 244-249.
- [3] Bagger C, Olsen F O. Review of laser hybrid welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, 1(17): 1-14.
- [4] 刘黎明, 迟鸣声, 宋 刚. 等. 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[J]. *中国机械工程学报*, 2006, 42(2): 82-85.
- [5] Liu Liming, Chi Mingsheng, Song Gang, et al. Numerical simulation of AZ31B magnesium alloy laser-TIG hybrid welding with new heat source model[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(2): 82-85.
- [5] 方昆凡. 工程材料手册[M]. 有色金属材料卷. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] 周建兴, 刘瑞祥, 陈立亮, 等. 凝固过程数值模拟中的潜热处理方法[J]. *铸造*, 2001, 50(7): 404-407.
- [7] Zhou Jianxing, Liu Ruixiang, Chen Liliang, et al. The approaches of latent heat treatment[J]. *Foundry*, 2001, 50(7): 404-407.
- [7] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 1版. 北京: 新时代出版社, 1987.
- [8] 曾 志. 复杂铝合金结构焊接应力与变形行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

作者简介: 李迅波, 男, 1963 年生, 博士, 教授. 主要从事焊接自动化、焊接结构及焊接数值模拟的研究. 已发表论文 20 余篇.
Email: wgueste@163.com