

不锈钢低功率激光—双面 TIG 复合焊的模拟分析

李庆海, 王本轶, 林瑞昌

(浙江工贸职业技术学院电子工程系, 浙江 温州 3250003)

摘要 基于有限元预测模型, 构建了普通不锈钢低功率激光—双面 TIG 复合焊, 对低功率激光—双面 TIG 复合焊本身所具有的熔池形貌与循环规律进行了模拟分析, 同时对低功率激光—双面 TIG 复合焊体系进行了实际搭建, 并对比分析模拟结果。试验结果显示, 实际焊缝形貌与实测温度曲线、模拟温度曲线以及模拟焊接融合线具有良好的吻合度。

关键词 低功率激光—双面 TIG 复合焊; 有限元预测模型; 数值模拟

中图分类号: TG141

文献标识码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20153502.208

Analysis Sided TIG Hybrid Welding Simulation-based on the Finite Element Predictive Model of Ordinary Stainless Steel, Low-power Laser

Li Qinghai, Wang Benyi, Lin Ruichang

(Department of Electronic Engineering Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou, Zhejiang 325003, China)

Abstract In this paper, based on finite element predictive model was constructed ordinary stainless steel low-power laser-sided TIG hybrid welding of low-power laser-morphology and circulating bath duplex TIG hybrid welding law itself has carried out a simulation analysis, while the low-power laser-sided TIG hybrid welding system was actually built, and comparative analysis of simulation results, test results show that the actual weld morphology and measured temperature curve, analog and analog temperature curve fusion welding wire has a good fit degrees.

Key words low-power laser-sided TIG hybrid welding; finite element predictive model; numerical simulation

0 引言

双面电弧焊接、激光—电弧负荷焊接以及 A-TIG 焊接都可以有效降低焊接成本、提高焊接生产效率以及改善焊接质量^[1]。所以, 这些焊接模式被广泛应用在了车辆、船舶以及石油化工等各个领域。但是, 因为在三个焊接热源中, 激光—双面 TIG 复合焊具有相互耦合作用, 有极为复杂的温度场变化机理, 而且焊接操作比较困难, 所以研究与应用这种技术远远无法与现代化生产需求相满足。传统上研究激光—双面 TIG 复合焊所采用的方法是试错法与试验法, 这种方法效率低, 而且成本比较高^[2]。应用数值模拟仿真技术, 一方面能够对焊接温度场分布规律予以实时获取, 对可能产生的不足与缺陷进行预测; 另一方面也有效降低了生产成本, 使产品开发周期得到大大缩短^[3]。也可以说, 数值模拟仿真技术以现代化的

“理论—数值模拟—生产”模式代替传统“理论—试验—生产”模式, 目前数值模拟仿真技术已成为对工艺优化与焊接技术研究中极为重要的一种科研途径^[4-5]。所以, 本研究基于有限元预测模型, 构建了普通不锈钢低功率激光—双面 TIG 复合焊, 对低功率激光—双面 TIG 复合焊本身所具有的熔池形貌与循环规律进行了模拟分析, 同时对低功率激光—双面 TIG 复合焊体系进行了实际搭建, 并对比分析模拟结果。本研究中, 所采用普通不锈钢为 304 不锈钢, 其化学成分(质量分数/%)为 $C \leq 0.070$, $Si \leq 1.000$, $Mn \leq 2.000$, $Cr 17.000 \sim 19.000$, $Ni 8.000 \sim 11.000$, $S \leq 0.030$, $P \leq 0.035$ 。

1 有限元模型及其试验方法

1.1 几何模型的构建

基于有限元预测模型, 对 9 mm 低功率激光—双面 TIG 复合焊 1Cr18Ni9Ti 有限元数值模型予以

收稿日期: 2014-06-30; 收到修改稿日期: 2015-03-05

作者简介: 李庆海(1980—)男, 硕士、讲师, 主要从事自动控制理论、神经网络、信号与数据处理及计算机应用等方面的研究。E-mail: 13634939@qq.com

构建。9 mm×25 mm×76 mm 为模型尺寸,将不填充焊丝视为焊接形式,不开坡口平板立焊,在进行焊接试验过程中,以 300 W 的激光功率作为激光—双

面 TIG 复合焊具体工艺参数为 125 A 的电弧电流,120 mm/min 的焊接速度。Icr18Ni9Ti 钢本身所达到的热物理性能参数见表 1。

表 1 Icr18Ni9Ti 钢热性能参数值

Tab. 1 Icr18Ni9Ti steel thermal performance parameters

温度/℃	热导率/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	综合换热/(W·m ⁻² ·k)	密度/(kg·m ⁻³)
20	15.3	511	0.2	7 964
400	21.0	590	22.0	7 631
800	27.1	645	120.0	7 396
1 000	30.4	680	180.0	7 273
1 200	31.9	742	200.0	7 237
1 400	36.2	802	302.0	7 173

运用 PLAN55 对二维平面模型予以构建,利用有限元模型中所具有的创建功能,在中间区域 6.0 mm≤y≤12.5 mm,焊缝和热影响区 0 mm≤y≤5.0 mm,母材边缘区域 9.0 mm≤y≤12.5 mm 分别划分 1.0 mm×1.0 mm,0.5 mm×0.5 mm,2.0 mm×2.0 mm 大小的网格,再分别用 2.0 mm×2.0 mm,1.0 mm×1.0 mm 映射网格在 7.0 mm≤y≤9.0 mm,5.0 mm≤y≤6.0 mm 的区域进行划分,以视为过渡性网格,由此就便于将网格由焊缝区平缓过渡至边缘母材区^[6]。创建二维模型后,以 SOLID70 视为选择单位类型,顺着 z 轴方向进行 9 mm 的拖拽,平均分为 9 层,这样就能生成三维模型,见图 1 所示。

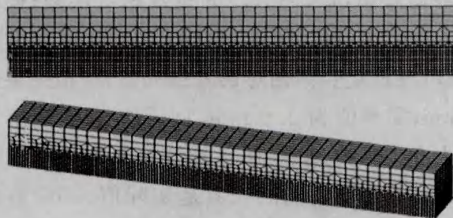


图 1 有限元模型图

Fig. 1 The finite element model of Figure

体热源与面热源有机结合的熔池形状精度更高。本研究在实施焊接温度场模拟过程中,将峰值温度递减加高斯面热源旋转抛物线热源模型应用于复合侧,高斯面热源模型应用于单 TIG 侧。

1.2 复合焊缝金属有效热输入分析计算

整个焊接过程中的热源总能量 Q 的分布可由公式(1)表示

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3 \quad (1)$$

式中,周围环境损失的能量用 Q1 表示,熔化焊缝金属能量用 Q2 表示,母材金属散热导致的热损失用 Q3 表示,这些能量中,Q2 直接影响着焊缝熔深,被称为有效能量。

为了比较不同热源的焊缝有效热,通过将其转化为各个热源作用后对比焊缝横截面积。复合热源在单位时间内的有效热作用 Q 用公式表示为

$$Q_e = Av\rho\left(\int_{T_0}^{T_m} cdT + H\right) \quad (2)$$

式中,v 表示焊接速度,Tm 表示熔点,A 表示焊缝横截面积,T₀表示环境温度,ρ表示焊接材料密度,c 表示比热容,H 表示熔化潜热。

TIG 激光、电弧和复合热源作用下的焊缝有效热输入用公式可分别表示为

$$Q_a = A_r v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} cdT + H \right) \quad (3)$$

$$Q_a = A_l v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} cdT + H \right) \quad (4)$$

$$Q_a = A_h v \rho \left(\int_{T_0}^{T_m} cdT + H \right) \quad (5)$$

因为焊接时焊接速度与材料的值不变,所以公式(3)、(4)、(5)中的 $v\rho\left(\int_{T_0}^{T_m} cdT + H\right)$ 是常数。在热源不同的作用下,焊缝有效热输入比值 δ 用公式表示为

$$\delta = \frac{Q_{ei}}{Q_{ek}} \quad (6)$$

式中,Q_{ei}、Q_{ek} 分别表示不同热源的焊缝有效热输入,A_i、A_k 分别表示在相应热源作用下的焊缝横截面积。

1.3 试验方法

本试验中的低功率激光—双面 TIG 复合焊由

WSE-250 型北京时代交直流逆变氩弧焊机、FRONIUS-MW2600 型奥地利交直流逆变氩弧焊机以及 YAG 低功率激光焊机组成。以奥氏体 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为焊材实施平板堆焊,具体焊接时,在台钳中垂直夹持工件,固定两侧 TIG 复合焊相对位置, TIG 电弧热源之后为复合侧激光源^[7]。进行实验之前,可以通过砂纸对磨焊接试件进行打磨,将其表面氧化膜去除掉,再运用丙酮对试件表面进行清洗,再运用刷子在焊件两侧表面敷上丙酮和活性剂混合糊状物,等到丙酮挥发后,将保护气体 Ar 气打通,对最佳焊接参数进行调节^[8]。在焊接过程中,将直流正接作为工件连接方式,以非接触式高频引弧为 TIG 焊机引弧方式,两侧焊机有着一致的试验规范,以激光器为脉冲输出方式^[9]。

2 结果与讨论

2.1 焊接模拟热循环曲线

通过对比镍铬—镍硅热电偶实际温度曲线与模拟热循环曲线,分别得出距焊缝中心线 12、6 mm 与复合表面距焊缝 10 mm 处测温点曲线模拟与实测对比图,见图 2、图 3 所示。

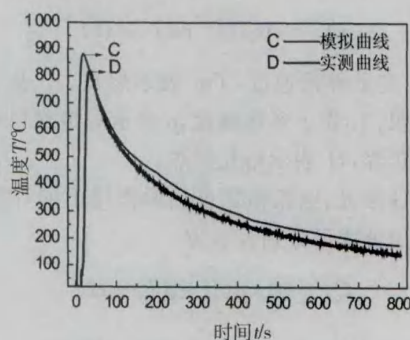


图 2 模拟与实测曲线对比图

Fig. 2 Simulated and measured curve comparison chart

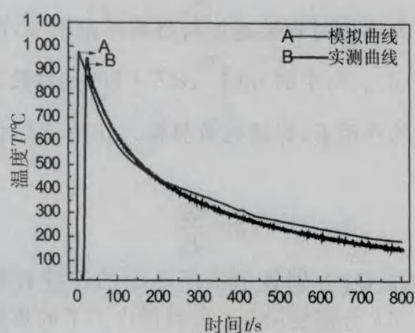


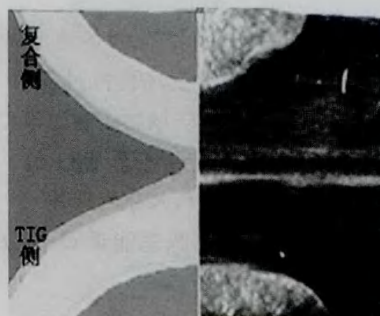
图 3 工件边沿模拟温度与实测温度曲线对比图

Fig. 3 The workpiece edge analog temperature and measured temperature curve comparison chart

从图 2、图 3 可知,实测曲线 B 与模拟温度曲线 A 数据吻合良好,变化趋势也基本一致。前者模拟曲线达到 976 °C 的最高温度需要 6 s 的时间,而实测曲线达到 950 °C 的最高温度则需要 25 s 的时间,存在 2.7% 的误差。后者模拟曲线达到 882 °C 的最高温度需要 28 s 的时间,而实测曲线达到 820 °C 的最高温度则需要 33 s 的时间,存在 2.5% 的误差。由此充分表明,本试验所选用的热源模型可以很好的将低功率激光—双面 TIG 复合焊温度场变化反映出来,具有合理性;模拟升温速率要远远快于实测升温速率,出现模拟峰值温度和实测峰值温度的时刻具有滞后性,导致这种情况产生的主要因素是实际测温时,热电偶本身存在一定的动态响应误差,在一定程度上延迟温度信号。

2.2 熔池形貌

采用欧能达 RMG4015 型裂纹测深仪获得市级焊缝地貌云图,实际焊缝形貌和焊缝横截面模拟结果对比见图 4。从图 4 中可以看出其下部分是 TIG 侧焊缝形貌,而上部分则属于复合侧焊缝形貌。由此可知,实际焊缝形貌与模拟焊接融合线比较接近。1.7、2.2 mm 分别为 TIG 侧和复合侧实际焊缝熔深,其模拟值是 1.6、2.0 mm,两者存在 5.8%、4.5% 的误差。此外,分别用 A—A、B—B、C—C、D—D、E—E、F—F 几条线对图 4 中所标示的焊缝横截面进行截取,以此得到焊缝深度的不同熔宽,见表 2。从图 4 与表 2 中可知,TIG 侧和复合侧有着比较小的熔宽差距,4.7%、2.7% 是其相对误差;模拟熔宽与实测熔宽深度不同,其相对误差值也存在很大差别,11% 是复合侧相对误差最大值,模拟结果值为 4.0 mm,实测值为 3.6 mm,18% 的 TIG 侧熔宽误差最大值,模拟结果值为 5.0 mm,实测值则为 6.1 mm;不管是模拟值或者是实际值,TIG 侧熔宽值均比复合侧大,而 TIG 侧熔深值却小于复合侧,其原因主要是复合侧激光会在一定程度上压缩电



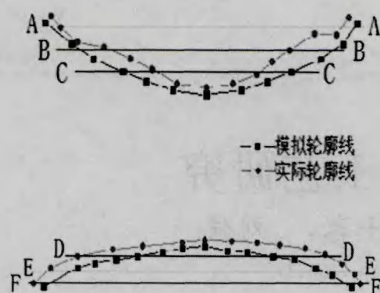


图4 模拟焊缝与实际焊缝结果对比图
Fig. 4 Analog weld seam and actual results
of the comparison chart

弧,降低复合侧电弧有效半径,不断集中能量密度所导致。由此充分表明在模拟中通过复合侧表面热源作用的适当减小,以此对激光压缩电弧的具体措施进行考虑是相对比较合理的。

表2 实测熔深熔宽和模拟数值表

Tab. 2 Measured penetration weld width and numerical
simulation table

	复合侧			TIG侧		
	A-A	B-B	C-C	D-D	E-E	F-F
实测值/mm	7.2	5.5	3.6	6.1	7.8	8.4
模拟值/mm	7.4	6.0	4.0	5.0	6.9	8.0
相对误差/%	2.7	9.0	11.0	18.0	12.0	4.7

3 结论

本文基于有限元预测模型,对普通不锈钢低功率激光—双面 TIG 复合焊进行了构建,试验与模拟研究焊接熔池与焊接热循环曲线的形貌,结论如下:

(1)结果揭示了距焊缝中心线 12、6 mm 与复合表面距焊缝 10 mm 处测温点曲线,其中复合侧表面实测曲线达到 950 °C 的最高温度需要 25 s 的时间,模拟曲线达到 976 °C 的最高温度需要 6 s 的时间,存在 2.7% 的误差;后者模拟曲线达到 882 °C 的最

高温需要 28 s 的时间,而实测曲线达到 820 °C 的最高温度则需要 33 s 的时间,存在 2.5% 的误差。

(2)实际测温时,热电偶本身存在一定的动态响应误差,在一定程度上延迟温度信号。

(3)模拟熔宽与实测熔宽深度不同,其相对误差值也存在很大差别,11% 是复合侧相对误差最大值,模拟结果值为 4.0 mm,实测值为 3.6 mm,18% 的 TIG 侧熔宽误差最大值,模拟结果值为 5.0 mm,实测值则为 6.1 mm,模拟熔宽与实测熔宽深度不同,其相对误差值也存在很大差别,11% 是复合侧相对误差最大值;不管是模拟值或者是实际值,TIG 侧熔宽值均大于复合侧。

参考文献

- [1] 陈作炳,范涛,曾芳,等. 对接接头焊接温度场的三维数值模拟[J]. 机械设计与制造,2007(4):152-153.
- [2] 郑振太,单平,胡绳荪,等. 中厚板熔化极气体保护焊的数值模拟及实验验证[J]. 中国机械工程,2007(11):196-197.
- [3] 熊震宇,董洁,谢雨田,等. 焊接过程的有限元模拟[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2008(2):147-148.
- [4] 张光明,李志宏,彭显平. 基于 ANSYS APDL 的堆焊热过程数值模拟[J]. 机械,2005(9):158-159.
- [5] 李冬林. 基于 ANSYS 软件焊接温度场应力场模拟研究[J]. 湖北工业大学学报,2005(5):120-121.
- [6] 杜秀丽,李鸿. 贯穿件环焊缝多道焊温度场数值模拟[J]. 测试技术学报,2010(3):187-188.
- [7] ARTEMIS AGELARIDOU. Thermal and solidification modeling of weld a design tool approach[D]. US: Tufts University,2002:185-186.
- [8] 吴冬,戴晴华,殷晨波,等. 挖掘机主平台三维焊接有限元模拟[J]. 电焊机,2011(6):185-186.
- [9] 薛小龙,王志亮,桑芝富,等. 正交接管焊接残余应力的三维有限元模拟[J]. 机械科学与技术,2006(5):189-190.