

推力室外壁机器人自适应焊接控制研究

杨瑞康¹, 张勤练¹, 周 舟², 董 飞¹

(1. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 93956 部队, 甘肃 张掖 361023)

摘 要:针对推力室外壁焊缝坡口进行机器人焊接控制的研究,并基于主动式激光传感器获取坡口参数,通过建立坡口-参数-焊缝的模型来实现推力室外壁的自适应焊接,从而保证推力室焊接质量的一致性。在“静态”研究的基础上,进行推力室焊接过程“动态”坡口结构参数与工艺参数最优匹配的研究,建立了推力室外壁坡口自适应焊接参数模型。结合模糊控制算法搭建了焊接自适应控制系统,完成了推力室模拟件的焊接试验,验证了模型与自适应焊接系统的适用性。针对液体火箭发动机推力室专用 S-06, 1Cr21Ni5Ti 等材料建立了热丝 TIG 焊接参数计算模型,可覆盖深度 5~12 mm 的推力室对接坡口。在 SIMULINK 平台下针对控制响应速度优化了焊接自适应控制系统的调节因子。自适应试验件焊缝熔合良好, X 射线检测合格,强度均高于母材强度的 90%。

关键词:液体火箭发动机推力室;机器人焊接;数值模拟;自适应控制

中图分类号:V463 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)01-0066-07

Research on robot adaptive welding control of thrust chamber outer wall

YANG Ruikang¹, ZHANG Qinlian¹, ZHOU Zhou², DONG Fei¹

(1. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China;

2. 93956 Troops, Zhangye 361023, China)

Abstract: The robot welding control is studied for the weld groove of thrust chamber outer wall. Based on the acquired groove parameters with the active laser sensor, the adaptive welding for thrust chamber outer wall is achieved and the welding quality for thrust chamber is guaranteed by building the models of groove, parameter and welding. On the basis of “static” studies, the “dynamic” control of the process parameters is studied and an adaptive welding parameter model is established for the groove of outer wall in thrust chamber. Furthermore, the welding adaptive control system is established combined with the fuzzy control algorithm and the welding experiment is accomplished for a thrust chamber simulator, which verified the applicability of model and the adaptive welding system. A parameter calculation model of hot wire TIG welding is established for the materials such as S-06 and 1Cr21Ni5Ti in the thrust chamber of liquid rocket engine, which can cover the thrust chamber joint with a depth of 5~12mm. The adjustment factor of the welding adaptive control system is optimized for the control response speed under

收稿日期:2018-05-07;修回日期:2018-06-07

基金项目:国防科工局推广项目(JSCG2016203B003)

作者简介:杨瑞康(1993—),男,硕士,研究领域为自动化焊接技术

the SIMULINK platform. The welds of the test joint are well welded, which passes the X-ray examination, and the strength is higher than 90% of the base metal.

Keywords: thrust chamber of liquid rocket engine; robot welding process; numerical simulation; adaptive control

0 引言

国内外在汽车、航空、航天领域逐渐实现了机器人自动焊接,但国内在液体火箭发动机推力室上机器人焊接技术还应用得很少,焊接过程中参数控制技术应用得更少。焊接控制技术应用难度一般较大,主要因为焊接是模糊科学,焊接参数一般在一定范围内变动,同时焊接质量精准评价困难^[1]。现有产品自动焊接时因为产品坡口状态的差异性容易产生局部咬边,余高不均匀,或者未溶透气孔等问题,需要手工再补焊^[2]。欧洲、美国 NASA、SPACEX 等航天企业逐渐应用了焊接过程控制技术,国内航天发动机领域焊接过程自适应控制还没有实际的应用^[3-5]。

航天发动机产品焊接质量要求高,由于钣金件热加工带来了坡口状态不稳定、存在间隙等问题。本文结合试验与数值模拟技术,建立了推力室外壁坡口自适应焊接参数模型,输入为对接间隙、坡口宽度,输出为焊接电流、送丝速度与摆动幅度等工艺参数。并在 SIMULINK 平台下建立了机器人自适应仿真系统,以坡口间隙与坡口宽度为输入量、焊接电流及焊接速度为输出控制量,进行了机器人焊接过程自适应控制系统仿真验证。

1 试验设备及软件

试验设备为机器人热丝 TIG 焊接系统及 SERVE 激光焊缝坡口识别系统。相对于传统 TIG 焊,热丝 TIG 焊是将填充焊丝进行焊前加热,大大加

快了焊丝的熔化速度(增加达 20 ~ 50 g/min)^[6]。

本文采用的 SYSWELD 焊接有限元软件可用于热温度场模拟、电磁分析、力学分析和氢扩散,同时焊接过程数值模拟采用了生死单元技术^[7-8]。焊接工艺参数的调整过程与电弧特性、焊接电源特性等多方面因素相关,为了控制精确且响应快速,本文通过 MATLAB SIMULINK 平台搭建仿真系统进行研究与验证。

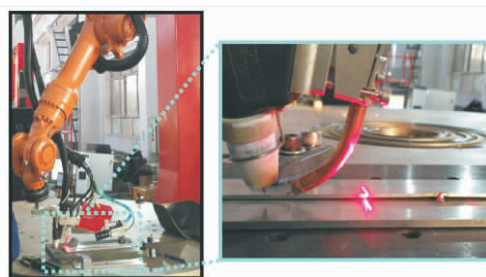


图1 机器人热丝 TIG 焊接系统

Fig. 1 Robot heat TIG welding system

2 推力室外壁焊接参数模型建立

2.1 试板焊接试验

进行步长为 5 A 的变焊接参数热丝 TIG 焊接试验,记录焊接开始出现缺陷的焊接参数。试验直到未熔透缺陷如图 2(a)所示,记录此时的焊接电流 I_{\min} ,然后将焊接电流不断调大,直到焊漏缺陷如图 2(c)所示,记录此时的焊接电流 I_{\max} 。定义初选参数 $I_m = 0.5(I_{\min} + I_{\max})$ 。

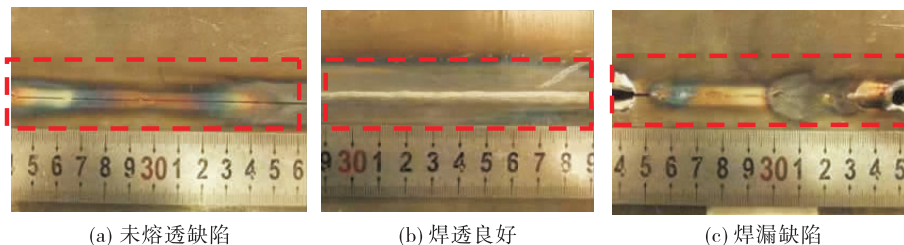


图2 焊接熔合状态

Fig. 2 Fusion state of welding

同时根据焊接背部熔宽及焊接热输入最终确定优选焊接参数。优化参数需要满足焊缝背面熔宽 t 最大、热输入 W 较小,即 $i = \{i \mid t_i = \max t\}$, $i = \{i \mid W_i = \min W\}$ 。

2.2 焊接参数模型建立及数值模拟

本文通过数值模拟的方式得到熔池面积与电流参数、板厚及焊接速度的关系,在此之前需要调整数值模拟模型,使得数值模拟的结果与试验实测的结果保持一致性,从而准确地进行焊接过程数值模拟计算^[9-10]。推力室材料有 QCr0.8 合金与 S-06 不锈钢,通过对 SYSWELD 进行二次开发,建立材料 QCr0.8 与材料 S-06 的材料文件。

热丝 TIG 焊过程中熔池尾端随着两侧液体金属的凝固逐渐变细,熔池头部则是半圆形向前扩展,根据对于热源模型的研究,其中双椭球移动热源模型用来描述这种状态^[11],如图 3 所示。

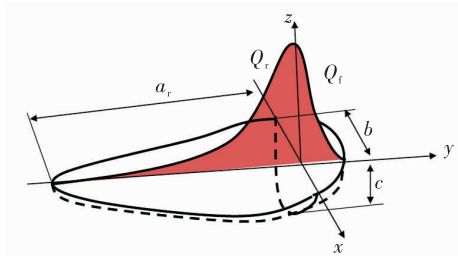


图 3 双椭球热源模型

Fig. 3 Double ellipsoid heat source model

三维非线性瞬态传热问题的控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (1)$$

式中: T 为温度; ρ 为材料的密度; c 为比热; S_T 为物体内热源; k_x , k_y 及 k_z 分别为材料 3 个方向的导热率,均为温度的函数^[12]。屈服条件与所考虑的应力状态有关^[13],本文采用 Mises 等效应力 $\bar{\sigma}$ 表示为:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

焊接数值模拟过程包括以下步骤:几何模型建立、网格划分、材料物性参数整理与设置、热源校核、边界条件及约束条件设置、求解方法与参数设置、计算温度场、计算应力场及后处理^[14]。提取计

算结果,如图 4 所示。

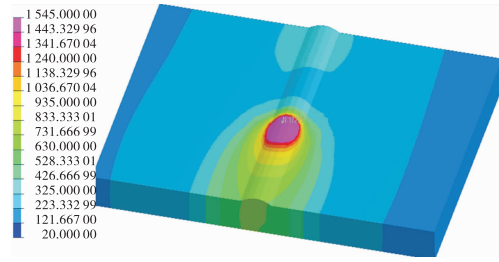


图 4 焊接试验试板温度场云图

Fig. 4 Temperature field of welding test plate

本文为了简化对焊接焊缝尺寸形状的描述,约定:焊缝在垂直于焊接方向的稳定的横截面简称为焊缝截面,其对应的截面积为焊缝截面积。

设计三因素四水平回归试验,探究焊缝截面积与焊接电流、焊接壁厚及焊接速度的关系模型。针对 V 型 60°坡口数值模拟试验,变量为焊接电流 100 ~ 400 A (打底焊接电流为 50 ~ 300 A)、板厚 5 ~ 12 mm 与焊接速度 10 ~ 25 cm/min。数值模拟试验结束后,设定材料熔化温度线(固相线、液相线)后进行后处理。并对熔池区域面积进行计算测量,本文对熔池区域面积测量时定义 3 个测量值:高度 X_1 、宽度 X_2 及深度 X_3 ,如图 5 所示。

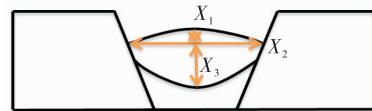


图 5 焊缝截面区域测量图

Fig. 5 Measurement of welding section

通过板件焊接数值模拟进行各个参数的焊接过程计算,得到数据结果如表 1 所示。

查阅国内外文献在描述多变量单响应量时,通常的方法是建立式(3)所示模型,并根据相关检验法对回归模型进一步进行检验调整:

$$w = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} v_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} v_i v_j + \varepsilon \quad (3)$$

式中: w 为响应变量(焊缝截面积); β 为回归系数; v 为焊接工艺参数; ε 为残差; $k=2$ 。

表 1 填充层数值模拟回归试验结果						
Tab. 1 Simulated results of filling layer						
电流/ A	板厚/ mm	速度/ (cm·min ⁻¹)	X ₁ / mm	X ₂ / mm	X ₃ / mm	面积/ mm ²
400	9	15	1.59	10.06	5.82	74.545
400	5	10	1.40	10.92	5.04	70.325
400	12	20	1.13	8.86	4.86	53.071
400	15	25	0.90	8.06	4.30	41.912
300	9	10	1.45	9.58	5.80	69.526
300	5	20	1.22	7.80	4.00	40.56
300	12	25	0.95	6.21	3.20	25.461
300	15	15	1.02	7.81	4.20	40.612
200	9	20	0.87	4.61	3.07	18.21
200	5	25	0.56	3.92	2.24	10.976
200	12	15	0.42	4.66	2.55	13.840
200	15	10	0.54	5.95	3.33	23.026
100	9	25	0.21	2.14	1.60	5.634
100	5	15	0.08	1.35	0.42	0.824
100	12	10	0.04	1.87	1.73	2.465
100	15	20	0.01	1.10	0.22	0.024

将表 1 数据处理求出定义面积后,进行偏最小二乘回归分析,经过多次回归,剔除影响过小的二次项、交叉项后得到填充层焊缝截面积与 3 个参数

的回归公式:

$$S'_m = -7.691\,42 + 0.278\,82I_w + 3.404\,37\delta - 1.353\,69V_w - 0.212\,53\delta^2 \quad (4)$$

式中: S'_m 为焊缝截面积; I_w 为焊接电流; δ 为焊接壁厚; V_w 为焊接速度。

对上述得到的回归方程模型进行显著性检验,可采用 F 检验法检验回归的总体效果。其 F 值为 52.62,远大于 $F_{0.01}(8,9) = 5.47$,回归效果显著;回归方程相关系数 $R^2 = 98.33\%$,也表明回归效果非常显著。同样得到打底层焊缝截面积模型与盖面层焊缝截面积模型:

$$S'_m = 9.671\,19 + 0.072\,5I_w - 0.481\,62\delta - 0.182\,25V_w - 0.005\,88\delta^2 \quad (5)$$
$$S'_m = 10.462\,9 + 0.391\,5I_w + 1.1667\delta - 1.540\,8V_w - 0.104\,0\delta^2 \quad (6)$$

以上 3 个模型均是根据 S-06 钢物性参数所得,1Cr21Ni5Ti 的计算焊缝截面积为 S-06 钢的 1.091 倍。根据 3 种近似焊缝截面几何模型圆、椭圆和梯形,计算得出圆、椭圆的弦长等信息,进而获得模型规划焊缝截面积 S_0 。如图 6 所示,根据焊接填充入金属量及形状(梯形、圆、椭圆)等建立坐标系,计算出椭圆(圆)方程,得出规划焊缝截面宽度、深度(最小的熔透所需熔池区域)所需的焊缝截面积。

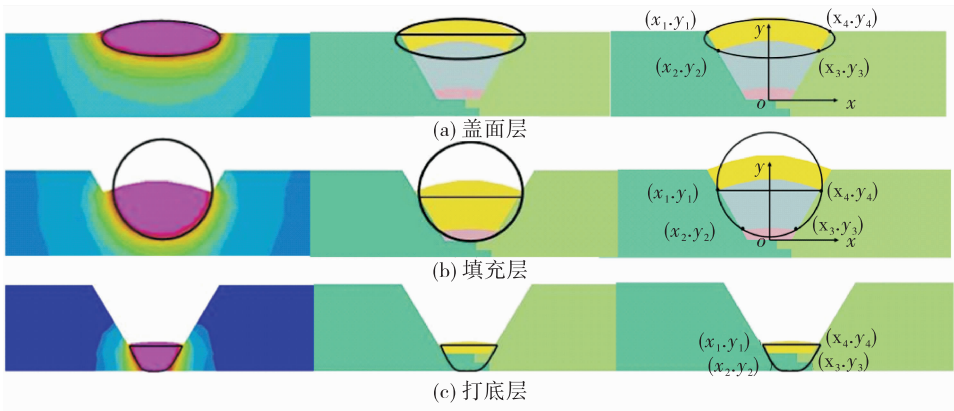


图 6 预估焊缝截面形状计算模型示意图

Fig. 6 Calculation model of estimating welding section shape

焊缝截面按照椭圆与半圆/梯形计算如图 6 所示。 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 及 (x_4, y_4) 为填充规划面积后的层间高度与坡口侧壁交点。其中打底层的梯形焊缝截面区域底部宽设为 e 。焊缝截面规

划面积 S_0 只是焊缝截面区域规划的最小值,为保证焊接参数的可靠性及稳定性,需对 S_0 公式进行修正,通过乘上一个大于 1 修正系数实现。此修正系数通过试验拟合得出。定义焊缝熔宽、深熔合修正

系数为 α, β 。通过数据拟合得到熔合修正系数, 填充: $\alpha = 1.132\ 12, \beta = 1.095\ 6$; 盖面: $\alpha = 1.123\ 8, \beta = 1.061\ 2$; 打底: $\alpha = 1.084\ 4, \beta = 1$ 。参数计算模型流程如图 7 所示。

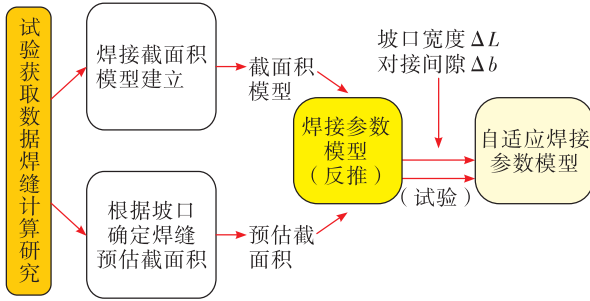


图 7 自适应焊接参数模型框图

Fig. 7 Block diagram of adaptive welding parameter

基于之前的试验研究, 推力室及其工装质量很大导致转动惯性较大, 难以精确地控制转动速度, 故在焊接过程中固定 15 cm/min 为常用焊接速度。确定焊接电流、送丝速度与摆幅三者为焊接自适应调整参数, 其三者分别可以控制热输入、坡口填入金属量与热源分布, 满足焊接过程中需要调整的 3 个方面。锁底坡口送丝量调整示意图如图 8 所示, 图 b 中为间隙。

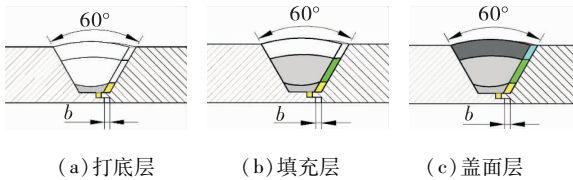


图 8 锁底坡口送丝量调整示意图

Fig. 8 Adjustment of wire feeding amount in the groove

打底层焊接送丝速度 (cm/min) 求解:

$$V_s = 100 + \frac{(1.45 + 0.9)bV_w}{0.36\pi} = 100 + 13.423\ 4b \quad (7)$$

打底层焊接电流模型求解:

$$S_0 = \frac{(6.14 + 2b + 0.18b^2 + 3)1.41}{2} \quad (8)$$

$$S'_m = 9.671\ 1 + 0.072\ 5I_w - 0.481\ 62\ \delta - 0.182\ 25\ V_w - 0.005\ 8\delta^2 \quad (9)$$

依据 $S'_m = \alpha\beta S_0$, $\alpha = 1.084\ 4, \beta = 1$ 有:

$$I_w = 182 + 23.532\ 2b + 2.117\ 9b^2 \quad (10)$$

同样得到填充层及盖面层模型:

填充层模型

$$S_w = 390 + 48.412\ 1b \quad (11)$$

$$I_w = 283 + 2.224\ 4b^2 + 46.089\ 7b \quad (12)$$

盖面层模型

$$S_w = 370 + 39.125b \quad (13)$$

$$I_w = 274 + 51.251\ 6b + 5.914\ 6b^2 \quad (14)$$

$$A_s = \pm (2.5 + 0.6b) \quad (15)$$

2.3 自适应焊接控制系统仿真

传统上, 焊接电源采用简单下降的平特性形式, 这种电源简化为一阶惯性环节, 即电源电弧系统传递函数与伺服电机驱动的送丝机构传递函数:

$$I(S) = \frac{K_{hd}}{T_{hd}S + 1}U(S)$$

$$V_s(S) = \frac{K_{ss}}{(T_mS + 1)(T_{sl}S + 1)}U_d \quad (16)$$

其中

$$T_{hd} = 0.001\ 2$$

$$K_{hd} = 22.5$$

$$T_m = 0.001\text{ s}$$

$$T_{sl} = 0.006$$

式中 K_{ss} 为 U_d 到 v_s 的静态倍率, 约为 $10\text{ mm/S} \cdot \text{V}$ 。

利用 MATLAB SIMULINK 仿真平台构建模糊控制模块 fuzzy-1, 将自适应参数模型嵌入到仿真系统中, 进一步建立了焊接电流与送丝速度的自适应控制系统如图 9 所示, 并进行了仿真, 得到了优化的各个比例因子的取值。焊接电流控制模糊控制系统的最佳比例因子 $K_3 = 50$; 调整因子 $\alpha_1 = 3, \alpha_2 = 0.2$; 送丝速度控制模糊控制系统的最佳比例因子 $K_3 = 800$; 调整因子 $\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 0.5$ 。

进一步通过使用 $\sin(x)$ 函数作为输入量模拟坡口间隙的变化, 进行焊接电流及送丝速度自适应模糊控制算法仿真。如图 10 所示, 该自适应控制系统控制准确性良好, 响应速度小于 80 ms 且无超调现象, 可实现自适应焊接参数快速响应控制。

3 试验验证

本文试验验证了推力室扩张段样机及其坡口试验件焊接, 焊接结束后, 产品焊缝焊接外观良好, 无咬边、焊漏等缺陷。

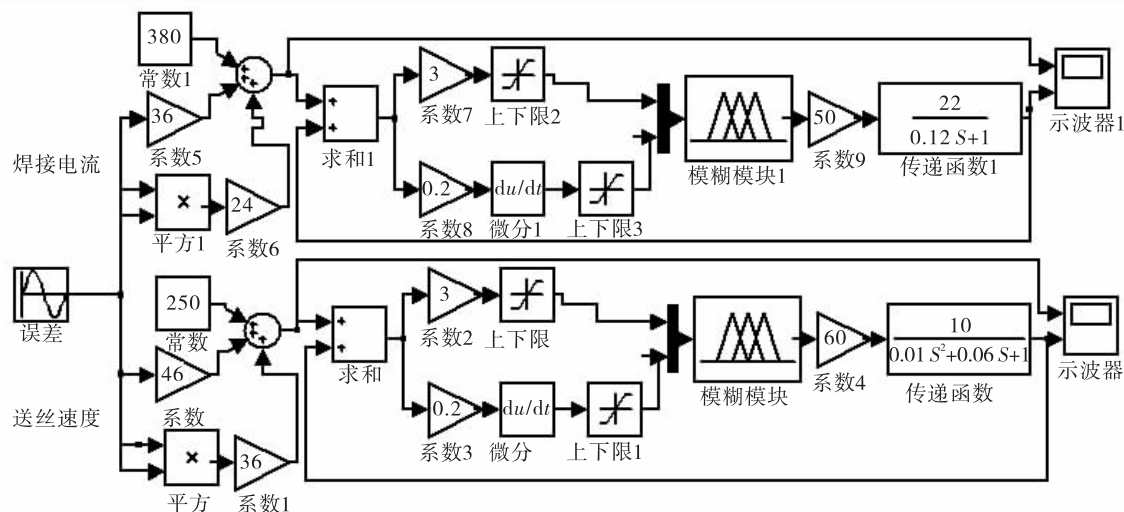
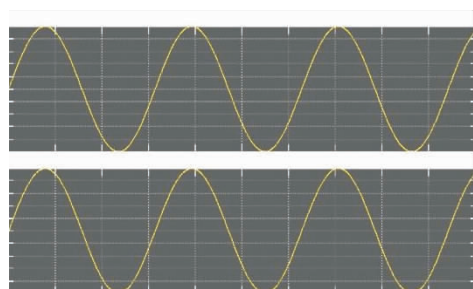
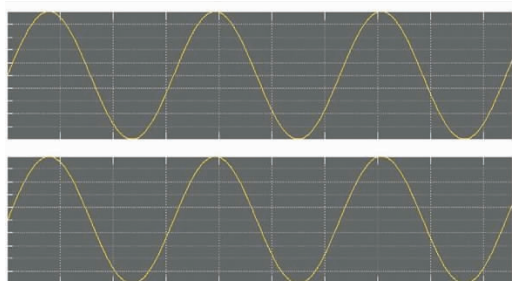


图9 焊接自适应控制系统

Fig. 9 Welding adaptive control system



(a) 焊接电流系统调整仿真曲线



(b) 送丝速度系统调整仿真曲线

图10 焊接自适应系统仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve of welding adaptive system

如图11所示,焊缝余高分别为1.85 mm,1.89 mm及1.88 mm,误差为2%。本试验在推力室锁底坡口宽度波动最大值为1.3 mm情况下焊接一致性良好。进行了推力室坡口的模拟件试验,焊缝熔合良好,并进行X光检测合格。对焊缝拉伸件进行了拉伸试验,两试件断裂位置均发生在热影响区,强度均达到母材强度的90%。

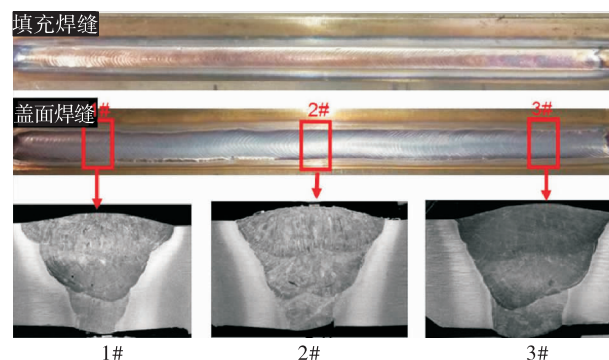


图11 推力室坡口试板自适应焊接试验图

Fig. 11 Adaptive welding experiment of thrust chamber plate

4 结论

1)建立的推力室外壁坡口焊接参数模型,可实现根据坡口精确计算匹配出焊接电流、送丝速度等关键工艺参数。使得焊接参数能够适应推力室产品对接坡口状态的差异性,实现对不同坡口状态的产品焊接参数根据坡口状态进行调整。

2)针对液体火箭发动机推力室专用材料S06,1Cr21Ni5Ti等材料建立了热丝TIG焊接参数计算模型。可以根据板厚、焊接速度得出合适的焊接参数以及焊接参数窗口。建立板厚、焊接速度、焊接电流与焊缝截面积的参数模型,可以预估计算出焊缝的尺寸。

3)在SIMULINK平台下引入模糊控制建立了机

器人焊接自适应系统,针对响应速度仿真优化了调节因子,验证了模型及控制系统的有效性。采用自适应焊接系统进行了推力室坡口的模拟件试验,焊缝熔合良好,并进行 X 光检测合格。

参考文献:

- [1] 杨春利,张九海,王其隆. TIG 焊熔池外激谐振与熔透的关系[J],焊接学报,1990,11(4):193-198.
- [2] 孙龙飞,钱喜乐,刘琳. 沉淀硬化不锈钢用于一体化贮箱工艺技术研究[J]. 火箭推进,2016, 42(6):62-67.
SUN L F, QIAN X L, LIU L. Application of precipitation hardening stainless steel for integrated tank technology[J]. Journal of Rocket Propulsion,2016, 42(6):62-67.
- [3] 毛鹏军. 弧焊机器人焊缝跟踪系统研究现状及发展趋势[J]. 电焊机,2001,31(10),9-12.
- [4] 陈武柱,张旭东. 视觉传感器与焊缝自动跟踪[J]. 现代制造,2002(18):58-60.
- [5] 梁明龙,周凯荣. 2219 铝合金变极性钨极惰性气体保护焊的焊缝成形模糊控制系统[J]. 上海交通大学学报,2016,28(10):42-54.
- [6] 汤建锋. 热丝 TIG 焊在转炉汽化冷却烟道制造中的应用[J]. 电焊机,2009,39(4):141-143.
- [7] 李游. 基于 SYSWELD 的汽车发动机排气歧管焊接变形数值模拟[D]. 南昌:南昌大学,2014.
- [8] 李振江. 基于 SYSWELD 的焊接接头温度场和残余应力场研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [9] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用[D]. 北京:清华大学,2001.
- [10] 王堃,蔡强顺. 电子束焊接熔池流场数值模拟研究[J]. 火箭推进,2015, 41(1):98-104.
WANG K, CAI Q S. Numerical simulation of EBW pool fluid flow field[J]. Journal of Rocket Propulsion,2015, 41(1):98-104.
- [11] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBV M. A double ellipsoid finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B,1994,15(6):299-305.
- [12] 张奕. 传热学[M]. 南京:东南大学出版社,2003.
- [13] 陈楚,汪建华,罗宇. 轴对称热弹塑性应力有限元分析在焊接中的应用[J]. 焊接学报,1987,8(4):196-203.
- [14] 蔡洪能,唐慕尧. TIG 焊接温度场的有限元分析[J]. 焊管,1995,32(1):34-39.

(编辑:马 杰)