

网络出版时间:2016/10/21 15:13:00

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/33.1331.TJ.20161021.1513.002.html>

热丝脉冲TIG工艺参数对焊缝成型质量影响研究

徐小东¹,李悦钦¹,郭龙龙¹,刘少胡²,冯春宇¹,肖飞¹

(1.西南石油大学机电工程学院,四川成都610500;2.长江大学机械学院,湖北荆州434023)

摘要 基于中心复合实验设计方法,用热丝脉冲TIG(HPTIG)在AISI 4130平板上堆焊Inconel 625合金,并结合响应面法建立工艺参数与焊缝高度、宽度和稀释率的多元回归模型。模型的显著性、失拟性和验证试验表明,所建立的模型能够准确预测焊缝成型质量。同时,详细分析工艺参数对焊缝成型质量的影响规律。单因素主效应分析结果表明:对焊缝高度影响最大的主效应是焊接速度;对焊缝宽度和稀释率影响最大的主效应是占空比。峰值电流、基值电流和占空比3个因素的交互效应分析结果表明,对焊缝高度和稀释率影响最大的交互效应是峰值电流和占空比。

关键词 脉冲TIG;堆焊;数学模型;Inconel 625;RSM

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2016)06-0060-06

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20161021.001

Effect of process parameters on formation quality of clads deposited by hot wire pulsed TIG

XU Xiaodong¹, LI Yueqin¹, GUO Longlong¹, LIU Shaohu², FENG Chunyu¹, XIAO Fei¹

(1.School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.Mechanical Engineering College, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract Based on the central composite design, Inconel 625 alloy was welded on the plates of AISI 4130 by hot wire pulsed TIG (HPTIG). Response surface method was utilized to establish the mathematical models between process parameters and clad width, height and dilution rate. The significance, lack of fit and validation tests indicate that the developed models can predict the formation quality of clads with high accuracy. Meanwhile, the effect of the process parameters on the formation quality of clads was studied in detail. The main factor affecting on weld height is the welding speed. The main factor affecting on weld width and dilution rate is the duty cycle. The formation quality is also affected by the interaction of the peak current, base current and the duty cycle. Main interactive factors affecting on weld height and dilution rate are peak current and dilution rate.

Keywords pulsed TIG; cladding; mathematical models; Inconel 625; RSM

Inconel 625合金诞生于20世纪60年代,属于Ni-Cr固溶强化合金^[1]。该合金具有较高的强度、优秀的抗高温氧化和耐腐蚀性能、良好的加工性和焊接性等特点,因此被广泛应用于航天航空、石油化工、海洋工程等领域^[2-3]。然而,高昂的材料成本极大地限制了其单独大量使用,堆焊表面改性是解决这一问题经济而有效的方法。目前,Inconel 625堆焊工艺研究主要以激光、等离子、电子束堆焊为主,采用HPTIG堆焊的研究却较少^[4-6]。

HPTIG是在传统TIG基础上发展起来的更先进的工艺,其优点是设备和使用成本相对较低^[7-9]、熔敷效率高^[9]、热输入少、热裂纹倾向低、焊缝可控性好^[9-10]。目前,部分学者已经对HPTIG堆焊进行了探讨。Ghosh等^[8]采用HPTIG进行高强低合金钢表面改性,研究了工艺参数对基体表面性能的影响。Madadi等^[11-12]采用HPTIG在碳钢板上堆焊stellite合金,借助响应面法研

究对工艺参数中焊缝硬度、稀释率的影响,并对工艺参数进行了优化。Wang等^[13]采用HPTIG进行增材制造,并研究参数对增加层形貌的影响。众多学者的研究表明,HPTIG能够用于堆焊,并能获得较好的焊缝质量。

响应面法(Response surface methodology, RSM)最早是由数学家Box和Wilson于1951年提出的一种试验设计方法,该方法能够以多元非线性回归数学模型展现输入因素与响应之间的关系,并能够很好地进行响应预测。目前,国内外学者对RSM应用于焊接过程中焊缝成型质量预测进行了一些研究。如印度科学家Gunaraj等^[14]将响应面法运用到管道埋弧焊焊缝质量预测与控制上,并取得很好的效果。长春理工大学孙硕等^[15]应用响应面法建立了多因素对熔深、熔宽和余高影响的多元非线性回归模型,回归模型预测结果与试验结果吻合。研究结果表明,应用响应面法建立数学模型能够用于预测焊缝成型质量。

收稿日期:2016-05-02;修回日期:2016-06-24

基金项目:石油天然气装备教育部重点实验室开放基金资助项目(OGE201401-01);西南石油大学研究生创新基金资助项目(CX2014BY05)

作者简介:徐小东,男,硕士研究生;主要从事先进制造技术研究。E-mail:18782943364@163.com。

通信作者:李悦钦,副教授;主要从事流体机械研究。E-mail:15108208278@163.com。

采用HPTIG工艺进行Inconel 625堆焊试验。借助响应面法研究焊缝几何形状与焊接速度、峰值电流、基值电流、频率、占空比之间的关系。以期建立工艺参数与焊缝成型质量之间的数学模型,为控制焊工艺参数、获得高质量的堆焊层提供技术依据。

1 试验

1.1 方法

堆焊所用基体材料为AISI 4130,尺寸为150 mm×120 mm×25 mm,热处理状态为热锻后调质处理。堆焊表面粗糙度Ra为0.8,焊前清洗表面油污,并在工业加热炉中预热至300℃。焊丝牌号为ERNiCrMo-3(Inconel 625),基体与焊丝的化学成分,如表1所示。

表1 基体与焊丝的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of base metal and filler wire (mass fraction/%)

元素	AISI 4130	ERNiCrMo-3	元素	AISI 4130	ERNiCrMo-3
C	0.290	0.010	Ti	0.006	0.200
Si	0.200	—	Cu	0.020	<0.010
Nb	—	3.530	Fe	Bal	0.320
Mn	0.510	—	Mo	0.175	8.730
Cr	0.990	22.650	Al	0.006	0.160
Ni	0.020	64.240	S	0.016	—
P	0.021	—	Other	—	0.160

试验设备为Fronius自动HPTIG焊接系统,由FPA9000控制系统、TT5000焊接电源、TT2200热丝电源、执行机构等组成。焊接参数和焊接路径由控制系统控制。试验以氩气作为保护气体,每个基体中间以不同的工艺参数组合沿长度方向堆焊长为100 mm的单道焊缝。并且,为避免系统误差,试验顺序随机。

焊后试样空冷至室温,用线切割将试样切成25 mm×25 mm×10 mm的试样。然后将垂直焊接方向的横截面打磨抛光,用5%的硝酸+酒精溶液腐蚀抛光表面,以明显区分焊缝与基体的交界面,以使用三坐标仪进行参数测量。

1.2 设计

1.2.1 试验因素

堆焊得到的焊缝应同时满足几何形状和性能的要求。焊缝的几何形状和性能主要取决于热输入,然而热输入由工艺参数决定^[16]。HPTIG主要工艺参数包括送丝速度、电压、保护气流量、焊接速度、脉冲频率、占空比、基值电流、峰值电流等^[8]。选择可控制的主要独立参数,如脉冲频率、占空比、基值电流、峰值电流、焊接速度为试验变量。其余恒定的工艺参数,如表2所示。各变量的取值范围借助大量前期试验确定,以获得连续且无可见缺陷焊缝为标准。每个变量取5个水

表2 恒定焊接工艺参数

Table 2 Fixed process parameters

工艺参数	取值	工艺参数	取值
焊丝填充速度/(m·min ⁻¹)	2.0	喷嘴直径/mm	12.5
焊丝直径/mm	1.2	电极直径/mm	3.2
热丝电流/A	70.0	电压/V	13.5
氩气流速/(L·min ⁻¹)	15.0		

表3 工艺参数水平编码及真实值

Table 3 Values and codes of process parameters

试验因素	因素水平				
	-2	-1	0	1	2
焊接速度v/(cm·min ⁻¹)	12	15	18	21	24
峰值电流I _p /A	210	220	230	240	250
基值电流I _b /A	90	95	100	105	110
脉冲频率/f/Hz	1	2	3	4	5
占空比δ	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

平并对变量进行编码,如表3所示。

1.2.2 实验指标

试验所得焊缝都是连续的,且进行渗透探伤可知表面无缺陷,典型焊缝,如图1所示。以焊缝几何特征,包括高度(Y₁)、焊缝宽度(Y₂)、稀释率(Y₃)作为评判焊缝质量的标准,其中稀释率Y₃的表达式如公式(1)。通常焊缝高度Y₁影响堆焊层的层数;宽度Y₂影响堆焊层的焊道数;稀释率Y₃影响焊缝的性能^[17]。实际生产中,期望的焊缝尺寸取决于具体工况。对于薄壁或小尺寸的零件期望较小的焊缝尺寸;然而,在堆焊尺寸较大的零件时,则期望获得较大的焊缝尺寸。实验基于石油天然气设备的耐腐蚀堆焊进行研究,所以大的焊缝高度(Y₁)、宽度(Y₂)与小的稀释率(Y₃)是所期望的。各组试验参数及其响应值,如表4所示。

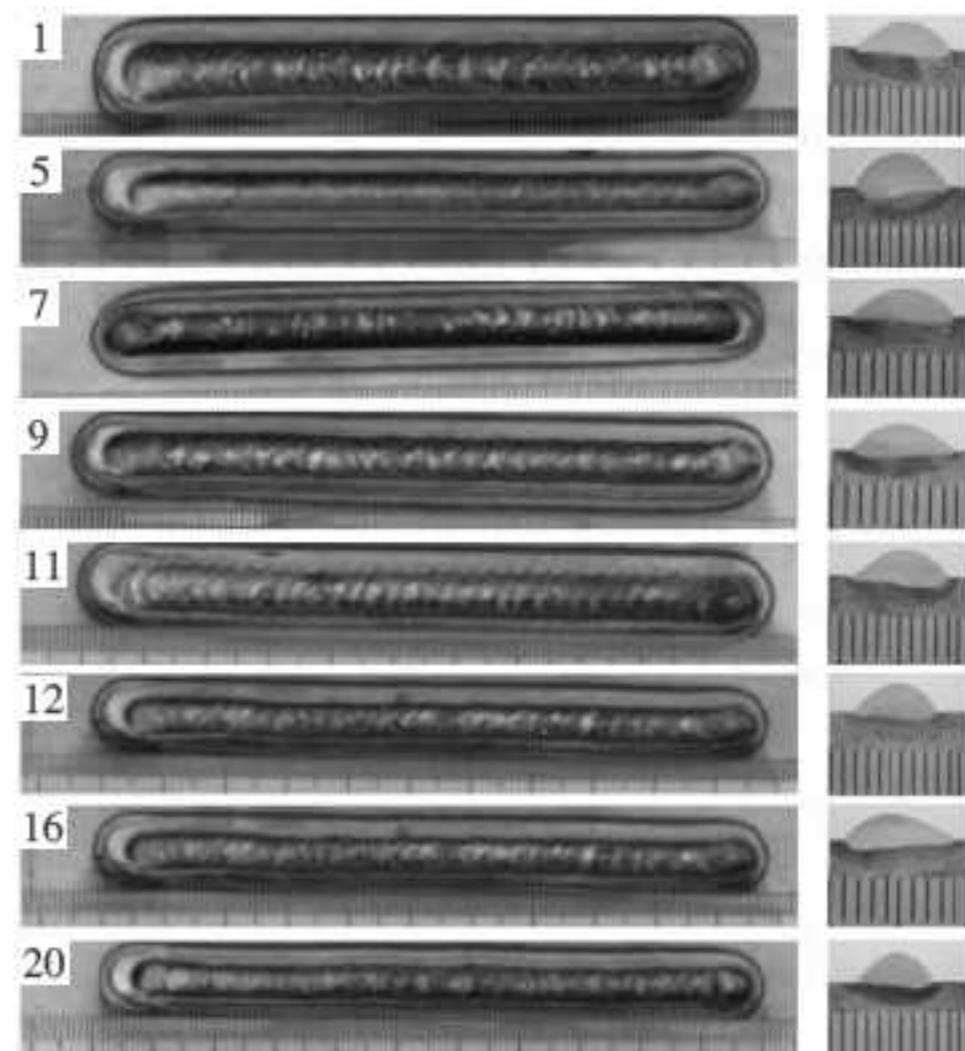


图1 典型焊缝示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical weld bead

表4 试验设计和响应值
Table 4 Design of experiment and responses

试验 序号	工艺参数					响应值		
	v_s	I_p	I_b	f	δ	Y_1	Y_2	Y_3
1	0	2	0	0	0	2.20	8.38	0.272
2	-1	-1	1	-1	-1	2.66	7.72	0.213
3	1	1	1	-1	-1	1.95	7.55	0.288
4	1	1	-1	-1	1	1.84	8.34	0.327
5	2	0	0	0	0	1.88	7.61	0.292
6	-1	1	1	-1	1	2.52	8.74	0.253
7	0	0	0	0	0	2.20	7.51	0.272
8	1	-1	1	1	-1	2.14	6.60	0.224
9	0	0	2	0	0	2.30	7.41	0.221
10	-1	-1	-1	-1	1	2.50	8.3	0.253
11	0	0	0	-2	0	2.10	8.15	0.301
12	0	-2	0	0	0	2.38	7.06	0.230
13	0	0	0	2	0	2.29	7.44	0.227
14	0	0	0	0	0	2.23	7.48	0.259
15	-1	1	1	1	-1	2.62	8.10	0.214
16	0	0	0	0	2	2.19	8.38	0.284
17	-1	1	-1	-1	-1	2.63	8.01	0.215
18	1	1	1	1	1	2.05	8.19	0.267
19	0	0	0	0	0	2.26	7.49	0.273
20	0	0	0	0	-2	2.45	6.92	0.155
21	-1	1	-1	1	1	2.54	8.69	0.254
22	0	0	0	0	0	2.29	7.69	0.255
23	-1	-1	1	1	1	2.57	8.33	0.247
24	-1	-1	-1	1	-1	2.88	7.24	0.173
25	1	-1	-1	1	1	2.05	7.82	0.303
26	1	-1	1	-1	1	1.90	7.80	0.290
27	0	0	0	0	0	2.25	7.72	0.262
28	1	1	-1	1	-1	2.04	7.45	0.239
29	0	0	0	0	0	2.26	7.70	0.261
30	1	-1	-1	-1	-1	2.11	6.73	0.228
31	-2	0	0	0	0	3.04	8.06	0.213
32	0	0	-2	0	0	2.24	7.45	0.247

$$Y_3 = \frac{A_w}{A + A_w} \quad (1)$$

式中: A 为堆焊层面积; A_w 为融合区面积。

2 模型的建立和验证

2.1 模型的建立

数学建模就是找到一个合适的近似值来满足多变量与响应的方程关系,通常在响应面法中应用二次多项式方程来拟合输入与响应之间的关系,五因子二阶响应面回归方程表达式:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{j=1}^5 \beta_j x_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j < k}}^5 \beta_{kj} x_k x_j + \sum_{j=1}^5 \beta_{jj} x_j^2 \quad (2)$$

式中: Y 为预测响应值; α_0 为常数项; x_j 为自变量; β_j 为一次项系数; β_{kj} 为交叉项系数; β_{jj} 为二次项系数。

根据试验数据,借助 Design-Expert 软件计算各因

素的回归系数。首先,建立包含所有变量的全回归方程。然后,用逐步回归法将影响不重要的项剔除,即当某一个效应的概率 $P > F$ 值小于0.05,这个效应将引入方程;相反,若概率 $P > F$ 值大于0.05,在不影响精度的情况下将被剔除^[18]。去除不重要项后得到关于工艺参数与试验测量值的最优方程:

$$Y_1 = 23.57 - 0.301v_s - 0.064I_p - 0.13I_b + 0.144f - 14.08\delta + 0.03I_p\delta + 4.5 \times 10^{-4}I_pI_b + 0.05I_b\delta + 5.59 \times 10^{-3}v_s^2 - 0.016f^2 + 1.53\delta^2; \quad (3)$$

$$Y_2 = 3.581 - 0.395v_s + 0.03I_p + 3.083 \times 10^{-3}I_b - 0.508f + 4.054\delta + 8.83 \times 10^{-3}v_s^2 + 0.069f^2; \quad (4)$$

$$Y_3 = -2.167 + 6.97 \times 10^{-3}v_s + 4.313 \times 10^{-3}I_p - 0.0123f + 9.85 \times 10^{-3}I_b + 4.789\delta - 0.021I_b\delta - 6.875 \times 10^{-3}I_p\delta - 0.883153\delta^2。 \quad (5)$$

2.2 模型检验

对回归方程、偏回归系数进行显著性检验,并对回归方程进行失拟性分析,结果如表5所示。根据 F 检验基本原理检验回归方程、回归系数的显著性,当 F 满足临界值 $F > F_p$ 时表示显著,且 P 值越小越显著。通常, $P < 0.05$ 表示显著, $P < 0.01$ 表示非常显著。然而,对于方程的失拟性检验,满足 $F < F_p$,即 $P > 0.05$ 表示失拟性不显著,说明方程不失拟;反之亦然。由表5可知,模型 P 值均小于0.05,方程系数的 P 值大部分小于0.05,且失拟性检验的 P 值大于0.05,所以模型是可以接受的。值得注意的是,有些项的概率 P 值大于0.05仍然保留在回归方程中,其目的是确保回归方程的准确性。而且,可以通过拟合系数 R^2 和修正后的拟合系数 R^2_{adj} 进一步检验模型的可靠性, R^2 和 R^2_{adj} 的值越大,则表明回归模型拟合程度越好。3个模型的 R^2 均大于0.9,说明测试值和预测值非常吻合,拟合方程是可以

表5 回归模型的显著性检验

Table 5 Significance check of regression model

Y_1		Y_2		Y_3	
效应	P 值	效应	P 值	效应	P 值
模型	<0.000 1	模型	<0.000 1	模型	<0.000 1
v_s	<0.000 1	v_s	<0.000 1	v_s	<0.000 1
I_p	<0.000 1	I_p	<0.000 1	I_p	0.003 3
I_b	0.724 6	I_b	0.023 0	I_b	0.460 4
f	<0.000 1	f	<0.000 1	f	0.000 1
δ	<0.000 1	δ	<0.000 1	δ	<0.000 1
I_pI_b	0.016 2	v_s^2	0.027 0	$I_b\delta$	0.046 2
$I_p\delta$	0.002 3	f	0.051 0	$I_b\delta$	0.004 6
$I_b\delta$	0.008 5			δ^2	0.001 2
v_s^2	<0.000 1				
f^2	0.019 6				
δ^2	0.002 46				
失拟	0.399 0	失拟	0.118 0	失拟	0.070 6
$R^2=0.990 5$		$R^2=0.902$		$R^2=0.908$	
$R^2_{adj}=0.985$		$R^2_{adj}=0.878$		$R^2_{adj}=0.876$	

接受的。

2.3 试验验证

为检验建立模型的可靠性,重新进行堆焊验证试验,所用工艺参数,如表6所示。其他条件与先前试验保持一致,验证试验所得到的试验结果,如表7所示。可知,试验测试值和预测值非常吻合,最大误差仅为4.778%,进一步说明,利用回归方程预测焊缝的高度、宽度和稀释率是可行的。

表6 试验验证工艺参数

Table 6 Process parameters of validation tests

序号	$v/(cm \cdot min^{-1})$	I_p/A	I/A	f/Hz	δ
1	22.05	214.34	90.01	4.87	0.30
2	17.15	248.32	90.00	3.86	0.30
3	20.50	237.76	103.88	2.22	0.38
4	16.96	218.28	108.09	4.42	0.47

表7 验证试验结果

Table 7 Validation test results

序号	Y_1/mm			Y_2/mm			Y_3		
	预测	测试	误差/%	预测	测试	误差/%	预测	测试	误差/%
1	2.495	2.384	-4.449	6.236	6.045	-3.061	0.110	0.106	-4.038
2	2.517	2.472	-1.788	7.390	7.031	-3.152	0.150	0.156	3.861
3	2.015	2.051	1.786	7.389	7.742	4.778	0.260	0.267	2.561
4	2.493	2.396	-3.891	7.309	7.463	2.111	0.210	0.215	2.367

3 结果及讨论

3.1 主效应对焊缝质量的影响

通过建立的数学模型可以预测出焊缝质量,将不同的水平值代入到各个方程中,即可得到相应的响应值。在分析单因素的影响时,其他因素取零水平值。

3.1.1 工艺参数对焊缝高度的影响

工艺参数对焊缝高度的影响,如图2所示。随着焊接速度的增加,焊缝高度快速减小。这是因为当焊丝进给速度为定值时,随着速度的增加,焊缝单位长度上沉积填充材料体积减少,所以高度快速降低。同时还可以看出,焊缝高度随峰值电流、占空比的增加

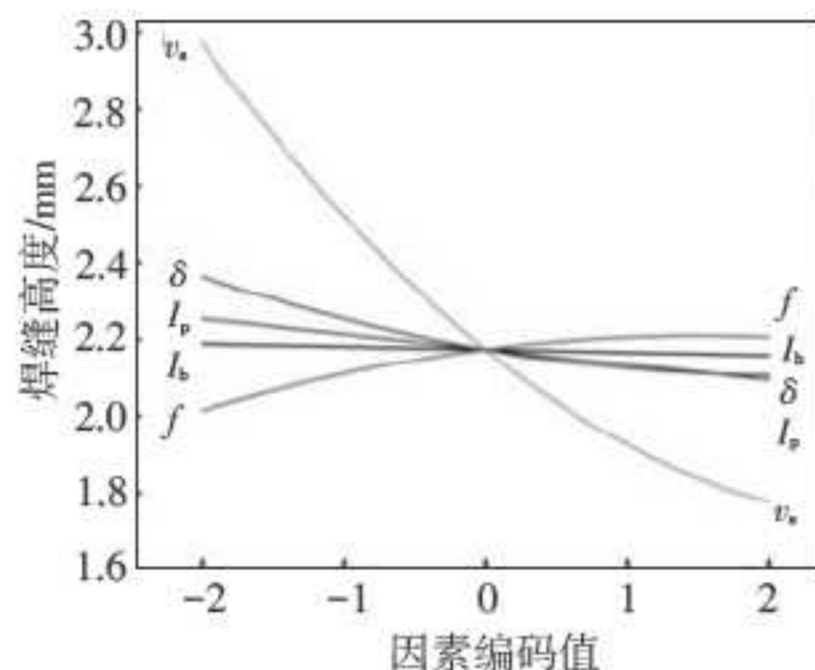


图2 工艺参数对焊缝高度的影响

Fig.2 Effect of process parameters on clad height

而缓慢减小,随脉冲频率的增加而缓慢增加,基值电流对焊缝影响不明显。这是因为这4个参数主要影响焊接时的热输入,焊接热输入增加,熔池温度升高;高的熔池温度导致液态金属运动黏度降低,延长了熔池金属处于液态的时间,在由表面力梯度引起的剪切力、重力作用下,液体金属向外部扩张,导致焊缝高度减小。

3.1.2 工艺参数对焊缝宽度的影响

工艺参数对焊缝宽度的影响,如图3所示。除了基值电流对焊缝宽度影响不明显外,其余工艺参数对焊缝宽度都有显著影响。随着峰值电流和占空比的增加,焊缝宽度呈上升趋势,这是由于在高的热输入条件下金属熔池的运动黏度低、流动性好,所以宽度随峰值电流、占空比的增加而增加。同时焊缝宽度随着焊接速度增加而逐渐减小,随着焊接速度增加,单位长度沉积的填充材料体积减少,这是导致速度增加焊缝宽度降低的主要原因。随频率值的增加,焊缝宽度逐渐变小。根据沈阳工业大学常云龙等^[19]的试验结果,频率值增加会引起电弧形态向轴线方向收缩,从而导致焊缝宽度减小。

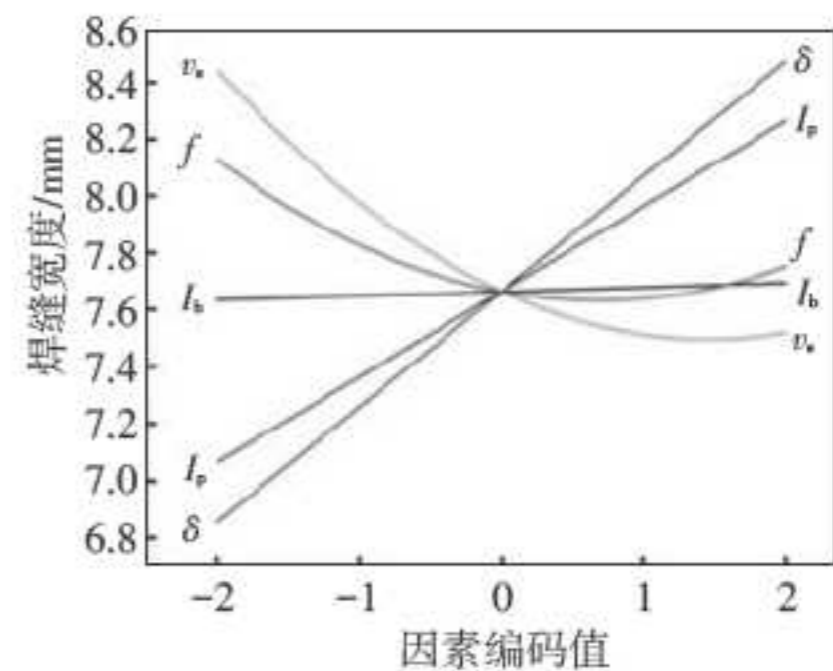


图3 工艺参数对焊缝宽度的影响

Fig.3 Effect of process parameters on clad width

3.1.3 工艺参数对稀释率的影响

工艺参数对稀释率的影响,如图4所示。稀释率对焊缝性能至关重要,较低的稀释率意味着热输入对

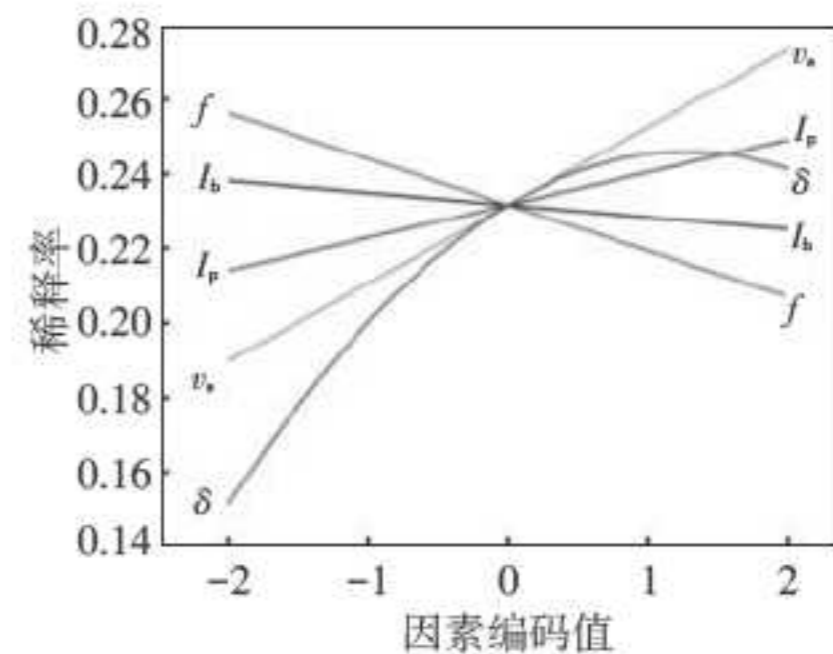


图4 工艺参数对稀释率的影响

Fig.4 Effect of process parameters on dilution rate

基体损伤小,可以获得化学成分纯的堆焊层,这是表面耐腐蚀堆焊所期望得到的结果。可知,稀释率随频率的增加而减少,随着其他参数增加而增加。随着焊接速度的增加,堆焊层和熔合区的面积都会减少,但堆焊层的面积比熔合区面积减少的幅度大,所以稀释率增大。由上面的分析可知,随着热输入增加,将熔化更多的基体材料,使熔池与基体的混合以及流动更加充分。所以稀释率随频率的降低、峰值电流与占空比的增加而增加。

3.2 因素交互作用对焊缝形貌的影响

焊接过程中交互作用的影响往往是由热、力、磁等多物理场的耦合引起的,耦合关系非常复杂。单因素对焊缝质量的影响通常还受到其他因素的干涉。为分析参数之间的交互效应,采用与单因素分析相似的方法,固定方程中除交叉项所涉及参数以外的变量为零水平值,将得到的交互作用方程三维坐标绘图,即可获得因素交互作用与焊缝质量之间的关系曲面。

3.2.1 工艺参数对焊缝高度的交互作用

工艺参数对焊缝高度的交互作用,如图5所示。从图5a可以看出,随基值电流的增加,峰值电流对焊缝高度的影响逐渐减弱。从图5b中可以看出,当这两个参数其中一个保持恒定,焊缝高度随峰值电流或占空比的增加而减小。而且,随着占空比的增加,在所有峰值电流的水平值下焊缝高度变化的幅度相对比较缓慢。即在较高的占空比条件下,峰值电流对焊缝高度的影响很微弱。出现这种现象的原因是由于融化材料的热输入不仅与热功率有关,而且还与热功率持续时间的长短有关。如果热功率很大但持续时间很短,大部分热量将会损失,而不会作用于焊接材料。根据图5c可知,焊缝高度随着占空比和基值电流的增大而出现下降趋势,并且占空比的影响更加明显,这是由于基值电流的主要作用是维持电弧的燃烧。

3.2.2 工艺参数对稀释率的交互作用

工艺参数对焊缝高度的交互作用,如图6、7所示。从图6可以看出,峰值电流和占空比对稀释率都有一个积极的影响,但当占空比处于一个较低的水平时,峰值电流的作用更加明显,当占空比增大时,这种作用将逐渐减弱。由图7可见,稀释率、占空比、基值电流三者之间呈抛物线关系,比较曲面的变化方式可以看出,在一定范围内,增大占空比可以使稀释率增大,这是由于高的占空比将导致有更多的热量输入,从而增加熔池的流动性和黏性,推动液态金属从中心向边界流动。这种情况可以加快焊接的热损失,从而减少基材融化的体积。

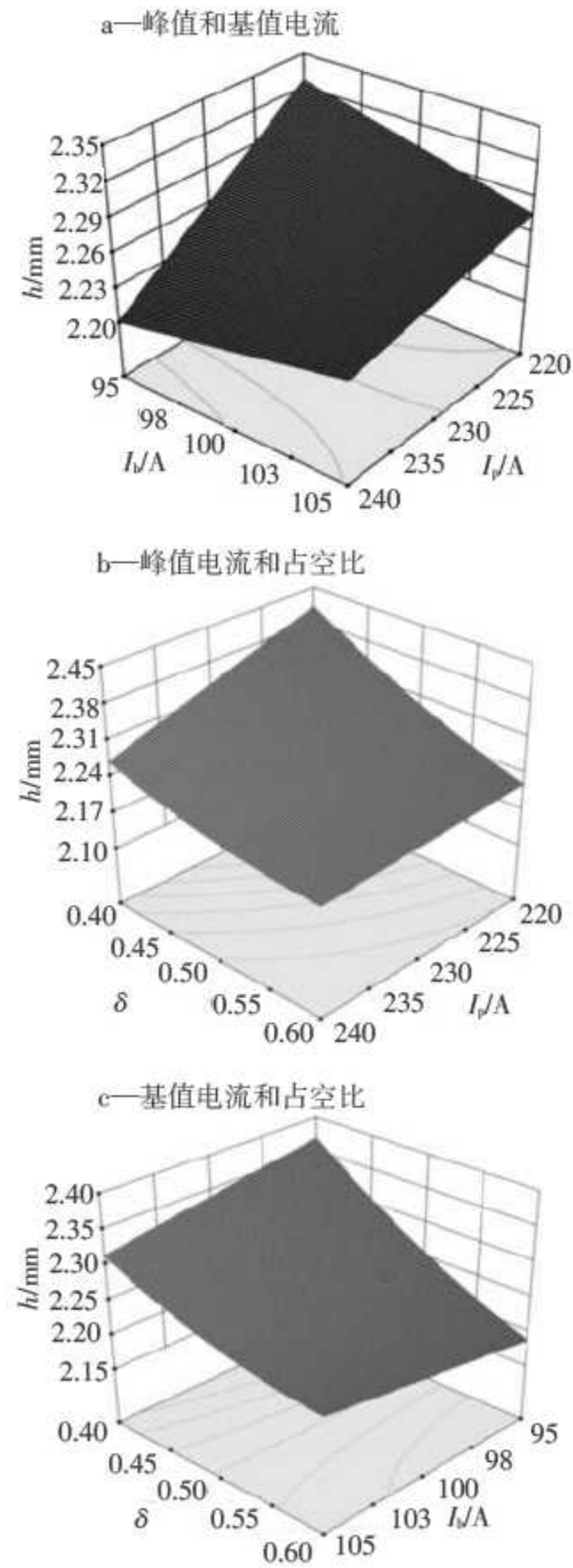


图5 工艺参数对焊缝高度的影响
Fig.5 Effect of process parameters

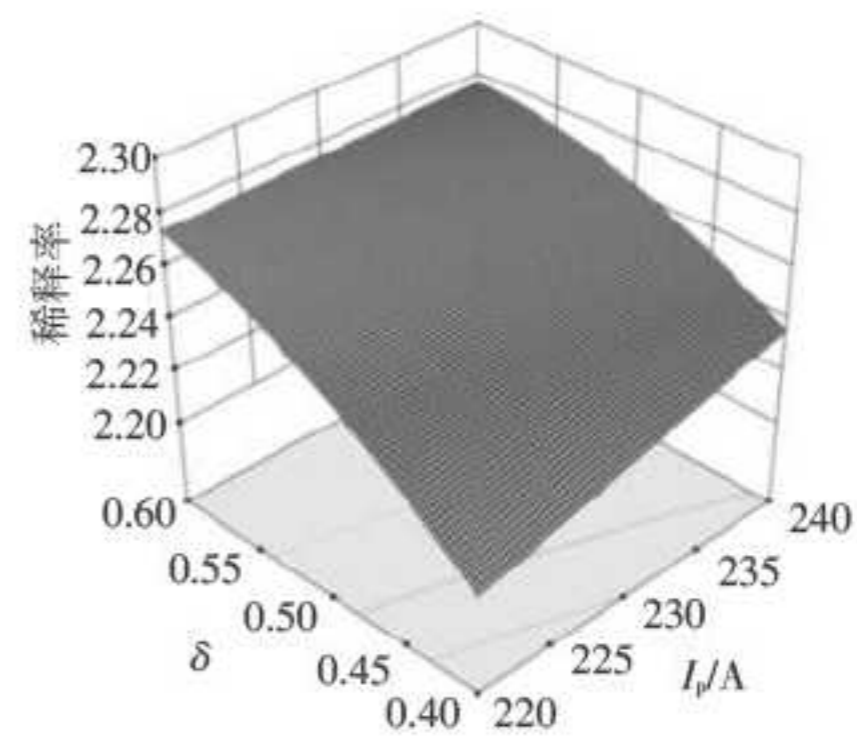


图6 峰值电流和占空比对稀释率的影响
Fig.6 Effect of peak current and duty ratio on dilution rate

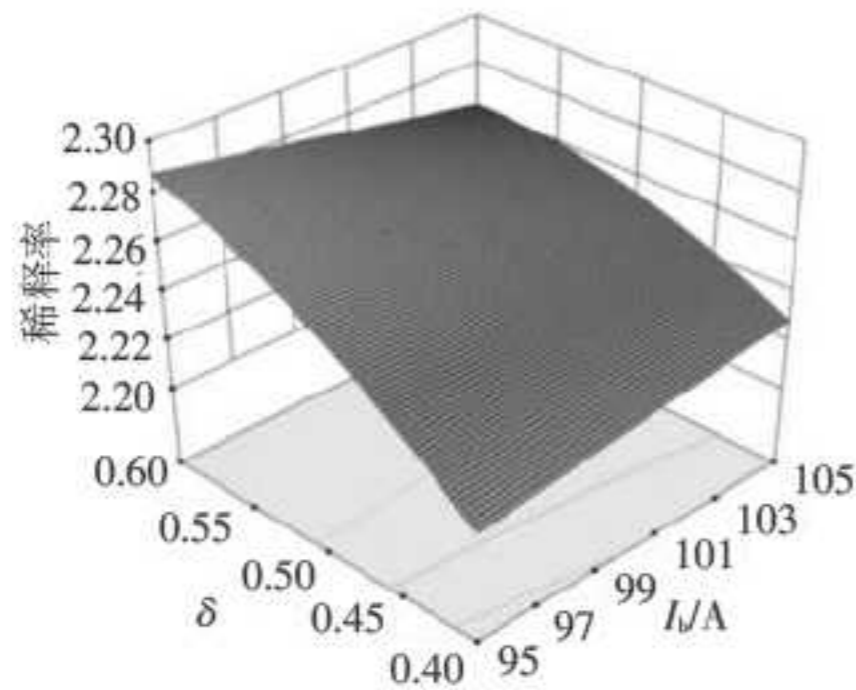


图7 基值电流和占空比对稀释率的影响

Fig.7 Effect of base current and duty ratio on dilution rate

4 结论

1) 运用响应面法设计 HPTIG 进行 Inconel 625 耐腐蚀堆焊试验,采用逐步回归的方法建立了多因素对焊缝高度、焊缝宽度和稀释率影响的多元非线性回归方程。

2) 通过方差分析,表明回归方程可以用来预测焊缝质量,并通过试验验证,回归模型预测结果与试验测量结果相吻合。

3) 焊接速度主效应对焊缝高度影响最大;占空比主效应对焊缝宽度和稀释率影响最大。峰值电流与占空比的交互效应对焊缝高度和稀释率影响最大。

5 参考文献

- [1] 张谦,王基维,史玉升,等. 固溶处理对热等静压 Inconel 625 合金组织与拉伸性能的影响[J]. 金属热处理,2013(3):65-69.
- [2] MOHAMMADI ZHRANI E, ALFANTAZI A M. High temperature corrosion and electrochemical behavior of Inconel 625 weld overlay in $PbSO_4$ - Pb_3O_4 - $PbCl_2$ - CdO - ZnO molten salt medium[J]. Corrosion Science, 2014, 85: 60-76.
- [3] 邸新杰,邢希学,王宝森. Inconel 625 熔敷金属中 δ 相的形核与粗化机理[J]. 金属学报,2014(3):323-328.
- [4] ABIOYE T E, FOLKES J, CLARE A T. Aparametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2145-2151.
- [5] LIU S, LIU W, HAROONI M, et al. Real-time monitoring of laser-hot-wire cladding of Inconel 625[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62: 124-134.
- [6] XU F, LV Y, LIU Y, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 625 alloy during pulsed plasma arc deposition process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(5): 480-488.
- [7] YANG Z, QI B, CONG B, et al. Microstructure tensile properties of Ti-6Al-4V by ultra high pulse frequency GTAW with low duty cycle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 37-47.
- [8] GHOSH P K, KUMAR R. Surface modification of micro-alloyed high-strength low-alloy steel by controlled TIG arcing process[J]. Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(2): 831-842.
- [9] ARABI J R, JABERZADEH M, ZOHDI H, et al. Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617[J]. Materials & Design, 2014, 54: 491-497.
- [10] PAL K, PAL S K. Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(6): 918-931.
- [11] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71-77.
- [12] MADADI F, SHAMANIAN M, ASHRAFIZADEH F. Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of stellites tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(17/18): 4320-4328.
- [13] WANG F, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5/6/7/8): 597-603.
- [14] GUNARAJ V, MURUGAN N. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes[J]. Materials Processing Technology, 1999, 88(1/2/3): 266-275.
- [15] 孙硕,刘双宇,贾东生,等. 高氮钢激光-电弧复合焊缝成形多元非线性回归模型[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 67-75.
- [16] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71-77.
- [17] SENTHILKUMAR B, KANNAN T. Effect of flux cored arc welding process parameters on bead geometry in super duplex stainless steel claddings[J]. Measurement, 2015, 62: 127-136.
- [18] PALANI P K, SENSITIVITY M. Analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2006, 8(2): 90-100.
- [19] 常云龙,刘民军,路林,等. 电流脉冲频率对 TIG 焊电弧压力的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(5): 500-504.
- [20] 刘佳,张宏,石岩. 基于 Design-Expert V7 设计的不锈钢激光非熔透搭接焊工艺优化研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 52-60.