

基于响应面法的 Inconel 625 镍基合金 GTAW 堆焊工艺优化

梁恩宝^{1,2}, 胡绳荪^{1,2}, 王志江^{1,2}

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 堆焊层稀释率和厚度是影响电弧堆焊质量的重要因素, 它们是由各焊接参数相互影响综合作用决定的. 文中通过中心复合设计试验方案, 基于响应面法建立了 Inconel 625 镍基合金 GTAW 堆焊参数(焊接电流、焊接速度、送丝速度)与响应值稀释率、堆焊层厚度之间的数学模型, 分析了各焊接参数对稀释率和堆焊层厚度的影响, 并对堆焊参数进行了优化. 结果表明, 文中试验条件下送丝速度对堆焊层的厚度有着显著的影响, 焊接速度和焊接电流对堆焊层厚度的影响较小; 焊接电流对稀释率的影响最大, 而焊接速度的影响最小; 焊接电流和送丝速度的交互作用对稀释率有着重要的影响.

关键词: 响应面法; 参数优化; GTAW 堆焊; Inconel 625 镍基合金

中图分类号: TG 453.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)06-0085-04

0 序 言

随着人类对石油资源日益增长的需求, 高 CO_2 , H_2S , Cl^- 含量的油气田也成为重要的能源来源. 这种高酸性气田对石油开采设备的抗腐蚀性能提出了更加严苛的要求. 在高酸性油气田的开发过程中, 使用镍基耐蚀合金可以有效地减小腐蚀程度, 降低因腐蚀而造成的经济损失^[1]. 但由于镍基合金的生产成本很高, 单纯采用镍基合金势必会大大增加油气开采成本.

堆焊作为一种材料表面改性工艺, 提供了一种既经济又实用的技术方案: 将耐蚀性能优良但成本较高的镍基合金借助于一定的焊接热源熔敷到成本低廉但力学性能优良的碳钢母材的表面, 提高材料的耐腐蚀性能. 堆焊的方法有多种, 主要包括 SAW, GMAW, GTAW, FCAW 等. 由于 GTAW 电弧稳定, 线能量低, 保护效果好, 飞溅少, 灵活性较高, 获得的堆焊层稀释率低、质量高^[2], 且焊接电流独立于送丝速度, 可以更好地控制焊缝成形, 非常适用于镍基合金等易于氧化、对热裂纹敏感性较高的材料的堆焊.

堆焊层性能除了受合金自身性能影响外, 也受到稀释率和焊道成形质量的影响. 为有效发挥堆焊层性能, 希望获得较低的稀释率, 同时焊道具有良好的成形效果^[3]. 稀释率和焊道形状取决于热输入,

而热输入则受焊接电流、焊接速度、送丝速度、焊接电压等焊接参数的影响. 建立数学模型有助于了解焊接参数对稀释率和焊缝成形的影响规律, 并能预测稀释率的大小, 这对于获得高质量、理想的堆焊层具有重要的指导意义.

响应面法(response surface methodology, RSM)是数学和统计相结合的方法, 可以对所感兴趣的响应值受多个变量影响的问题进行建模和分析, 其最终目的是优化该响应值^[4]. 响应面法在真实响应 Y 未知的情况下, 假定响应 Y 与其随机参数矢量 $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_i]$ 的关系含有各个影响因素的交叉二次项, 从而建立优化模型更精确地反应两者间关系.

文中采用响应面法设计了 GTAW 堆焊 Inconel 625 镍基合金的工艺方案, 建立了焊接参数(焊接电流、焊接速度、送丝速度)与预响应值(堆焊层厚度、稀释率)之间的定量关系. 通过该数学模型预测 GTAW 堆焊镍基合金过程中堆焊层厚度和稀释率, 为获得高质量的镍基合金堆焊层提供优化的焊接参数.

1 试验方法

1.1 选取变量因子与响应值

GTAW 主要的焊接参数有焊接电流(I)、弧长(L)、焊接速度(v_w)、送丝速度(v_f)等. 尽管弧长是

一个很重要的参数,镍基合金的易氧化性要求弧长尽可能短,以提高氩气保护效果,但堆焊层需要达到一定的厚度,弧长太小则容易发生短路熄弧而造成夹钨.因此,试验中选择固定弧长 $L=4\text{ mm}$,选取 I , v_w 和 v_f 三个焊接参数作为变量因子,以堆焊层厚度 (h)、稀释率 (D) 为响应值.

1.2 选取焊接参数范围

为选取合理的焊接参数范围,文中预先进行了焊接试验,通过焊缝成形和缺陷检测,确定了 I , v_w 和 v_f 三因素的参数区间.表1为因素真实值与水平编码值,表2为其它恒定焊接参数.试验采用三因子五水平的中心组合设计试验方案,因素真实值与水平编码的关系为

$$X_i = 1.682 [2X - (X_{\max} + X_{\min})] / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中: X 为因素最大值 X_{\max} 与最小值 X_{\min} 之间的某真实值; X_i 为 X 的编码值.

表1 因素水平编码及真实值表

水平编码值	焊接电流 I/A	焊接速度 $v_w/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
-1.682	176	1.5	0.70
-1	190	1.7	0.76
0	210	2.0	0.85
1	230	2.3	0.94
1.682	244	2.5	1.00

表2 恒定的焊接参数

电弧长度 L/mm	焊丝直径 ϕ_1/mm	钨极直径 ϕ_2/mm	钨极锥角 $\theta/(\text{°})$	氩气流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
4	1.2	3.0	30	15

表3 材料化学成分

Table 3 Chemical compositions of materials

	C	P	Si	Mn	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Ti	Nb
X65	0.07	0.01	0.3	1.5	0.005	0.004	0.2	<0.3	Bal	0.02	0.06
Inconel625	0.012	0.003	0.04	<0.01	0.001	64.389	22.7	8.7	0.21	0.21	3.56

1.3 试验过程

文中采用母材为平板管线钢 X65,堆焊层材料为 Inconel 625 镍基合金,表3为材料的化学成分.

焊接前,用砂纸对母材表面进行打磨处理,之后用无水乙醇清洗表面,去除母材表面氧化膜与油污.试验中采用单层单道焊,以减少热积累效应的影响.图1为焊缝横截面图.稀释率通过计算熔合比来获得,这与通过测定化学成分的方法获得的稀释率结论基本吻合^[5,6].表4为试验响应结果.



图1 焊缝横截面图

Fig. 1 Weld cross section

表4 试验设计与响应

Table 4 Design of experiment and responses

编号	变量因子编码值			响应值	
	I	v_w	v_f	$D(\%)$	h/mm
1	-1	-1	-1	10.60	2.84
2	1	-1	-1	30.86	2.36
3	-1	1	-1	10.57	2.36
4	1	1	-1	35.45	2.20
5	-1	-1	1	9.01	3.10
6	1	-1	1	14.88	2.92
7	-1	1	1	9.69	2.56
8	1	1	1	16.77	2.42
9	-1.682	1	0	10.51	2.68
10	1.682	1	0	25.49	2.48
11	0	-1.682	0	18.05	2.02
12	0	1.682	0	18.26	2.22
13	0	0	-1.682	18.32	2.28
14	0	0	1.682	12.67	2.94
15	0	0	0	14.11	2.27
16	0	0	0	16.08	2.58
17	0	0	0	14.80	2.56
18	0	0	0	15.44	2.32
19	0	0	0	17.81	2.44
20	0	0	0	17.15	2.38

2 试验结果及分析

2.1 数学模型的建立与检验

应用响应面法建立了用于预测堆焊层厚度和稀释率的数学模型,基于文中选取的因素 I, v_w 和 v_f , 响应方程可以表示为

$$Y = f(I, v_w, v_f) \quad (2)$$

用于描述三因素响应面的回归方程可以表示为

$$D = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1, i < j}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3)$$

式中: D 表示稀释率; X_i 为考察因子; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为回归系数.

根据表 4 试验数据,进行二次回归响应面分析,并剔除不显著项,分别得出了以 I, v_w 和 v_f 为参量,稀释率和堆焊层厚度为响应值的编码回归方程,即

$$D = 16.83 + 6.10I + 0.55v_w - 3.41v_f + 0.73Iv_w - 4.02Iv_f - 0.25v_wv_f \quad (4)$$

$$h = 2.50 - 0.095I - 0.098v_w + 0.17v_f \quad (5)$$

其真实值回归方程分别为

$$D = -382.28 + 1.96I - 15.85v_w + 449.92v_f + 0.12Iv_w - 2.24Iv_f - 9.21v_wv_f \quad (6)$$

$$h = 2.52 - 4.75 \times 10^{-3}I - 0.33v_w + 1.91v_f \quad (7)$$

对数学模型的显著性进行检验,表 5 为堆焊层厚度、稀释率模型的方差分析表.

表 5 数学模型的方差分析表

Table 5 Mean square analysis

模型	平方和	F 值	均方和	失拟性检验 显著性检验	
				$P_{rob} > F$	$P_{rob} > F$
稀释率	805.48	20.51	134.25	0.051 2	< 0.000 1
堆焊层厚度	0.66	4.25	0.22	0.060 4	0.021 8

F 检验,又称方差齐性检验的值,当 P_{rob} (概率) $> F$ (显著性) 的值小于 0.05 时,即认为该指标显著;当 $P_{rob} > F$ 的值小于 0.01 时,即为高度显著. 由表 5 中数据可以看出,堆焊层厚度和稀释率的回归方程的显著性相当明显,失拟项不显著,表明回归方程拟合较好.

2.2 焊接参数对响应值的影响

2.2.1 焊接参数对稀释率的影响

图 2 描述了各变量因子对稀释率的直接影响. 结合稀释率的编码回归方程 (4) 可看出,焊接电流和送丝速度对稀释率具有显著影响,而焊接速度的影响较小. 稀释率随焊接电流和焊接速度的增加而

增大,而随着送丝速度的增大而减小. 这是因为电流的增大会使热输入升高,母材的熔化量增大,从而增大稀释率. 送丝速度的增加虽然没有改变总的热输入,但是却增加了熔化焊丝的热量,导致熔化母材的热量减小,从而使稀释率降低. 焊接速度对稀释率有双重的影响作用,一方面增大焊速会降低母材、焊丝总的热输入而使稀释率降低;另一方面增大焊速会减小单位长度焊缝上焊丝的熔敷量而使稀释率增大. 两方面综合作用使焊接速度对稀释率的影响作用不显著.

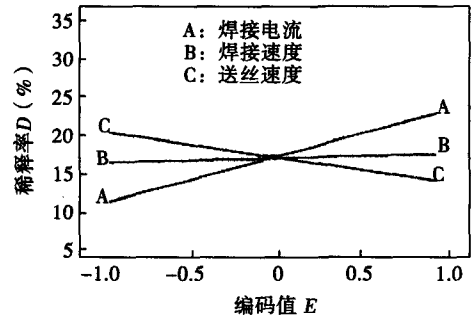


图 2 各变量对稀释率的直接影响

Fig. 2 Effect of welding current, welding speed and wire feed rate on dilution

图 3、图 4、图 5 分别为焊接参数各因子的交互作用对稀释率影响的三维响应面图,焊接电流和送丝速度的交互作用最强,焊接电流和焊接速度的交互作用次之,焊接速度和送丝速度的交互作用最弱.

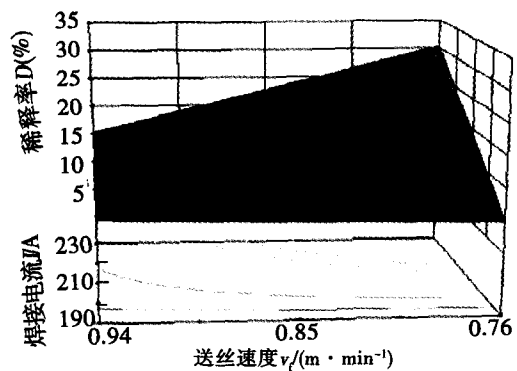


图 3 焊接电流和送丝速度的交互作用对稀释率的影响

Fig. 3 Interactive effect of welding current and wire feed rate on the dilution

2.2.2 焊接参数对堆焊层厚度的影响

图 6 是焊接参数各个变量因子对堆焊层厚度的直接影响,结合回归方程 (5) 可得,随着焊接电流和焊接速度的增加,堆焊层厚度逐渐减小,但由于镍基合金的流动性较差造成这种影响效果不显著. 随着

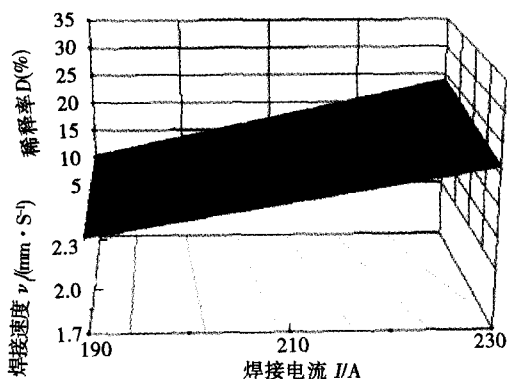


图 4 焊接电流和焊接速度的交互作用对稀释率的影响
Fig. 4 Interactive effect of welding current and welding speed on the dilution

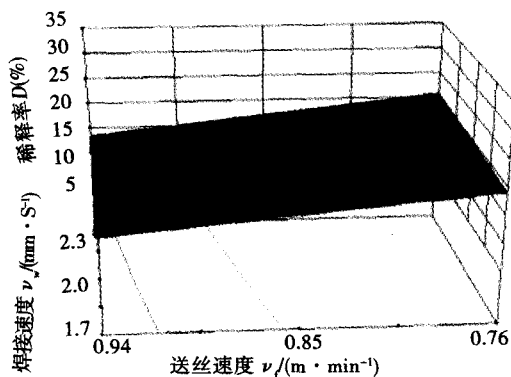


图 5 焊接速度和送丝速度的交互作用对稀释率的影响
Fig. 5 Interactive effect of welding speed and wire feed rate on the dilution

送丝速度的增加,堆焊层厚度逐渐增加.

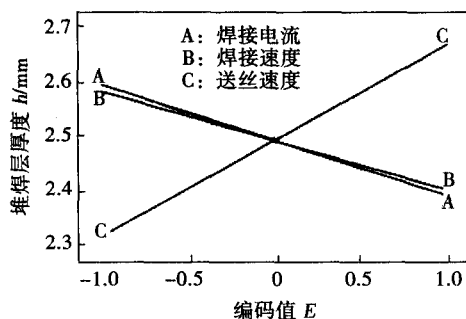


图 6 各变量对堆焊层厚度的直接影响
Fig. 6 Effect of welding current, welding speed and wire feed rate on reinforcement

2.3 焊接参数优化

镍基合金的化学成分是影响镍基合金堆焊层抗腐蚀性能的主要因素之一,而稀释率的大小和焊缝成形也对堆焊层的性能有着重要的影响.在工程应

用中,希望获得的堆焊层的稀释率尽可能的小,堆焊层的厚度也应满足一定的要求.采用较小的焊接电流和较大的送丝速度可以降低稀释率并增大堆焊层厚度.但是,如果焊接电流过小且送丝速度过大,则容易造成未熔合等缺陷.实际工程中为保证生产效率,希望采用较大的焊接速度.因此,提出焊接电流、焊接速度和送丝速度的最优组合对于获得高质量的焊件和提高生产效率具有重要的意义.试验中以稀释率最小,堆焊层厚度达到 2.7 mm,焊接速度最大为优化目标,利用多目标优化软件获得了优化焊接参数组合.表 6 为优化所得的三组参数组合及预响应值.

表 6 优化结果
Table 6 Optimized results

推荐组	焊接电流 I/A	焊接速度 $v_w/(mm \cdot s^{-1})$	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	稀释率 D(%)	厚度 h/mm	满意度 m
1	190	2.19	0.940 0	11.05	2.7	0.973
2	190	2.20	0.939 6	11.04	2.69	0.972
3	190	2.18	0.937 2	11.06	2.7	0.968

3 试验验证

为验证数学模型准确性,对满意度最高的优化参数组合(表 6 中推荐组 1)进行了试验验证(重复试验 3 次),表 7 为验证结果及误差率.试验值与模型预测值误差小于 5%,吻合较好,模型可信.

表 7 验证试验结果
Table 7 Validation test results

编号	厚度 h/mm		稀释率 D(%)	
	测量值	误差	测量值	误差
1	2.81	4.1%	10.59	4.2%
2	2.83	4.8%	10.72	3.0%
3	2.78	3.0%	11.31	2.4%

4 结 论

(1) 基于响应面法建立了镍基合金堆焊层稀释率、厚度与焊接参数之间的数学模型,模型预测值与试验结果值吻合良好.

(2) 文中模型分析及试验结果表明,焊接电流对镍基合金堆焊层稀释率的影响最大,送丝速度次之,焊接速度的影响作用最小;焊接电流和送丝速度的交互作用对稀释率有着重要的影响.送丝速度对堆焊层的厚度有着显著的影响作用,送丝速度的增

- [7] 张彦华. 焊接结构疲劳分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [8] Newman Jr J C, Ruschau J J. The stress-less effect on fatigue-crack growth under constant-amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 1608 - 1615.
- [9] 吴欢, 赵永庆, 曾卫东. 疲劳裂纹扩展行为的研究现状及钛合金的疲劳裂纹扩展特征[J]. 稀有金属快报, 2008(4): 23 - 26.
Wu Huan, Zhao Yongqing, Zeng Weidong. State for fatigue crack propagation behavior and character of titanium alloy[J]. Rare Metals Letters, 2008(4): 23 - 26.
- [10] 兆文忠, 译. IIW 标准[S]. 武阳钢铁公司焊接接头及部件疲劳设计, 1996.
- [11] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法: GB/T 6398-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [12] 李昊, 李华. 盲孔法测量非均匀残余应力时的释放系数

[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 85 - 88.

Li Hao, Li Hua. Research of calibration for measurement of non-uniform residual stresses by blind-hole method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 85 - 88.

- [13] 陈怀宁, 陈亮山, 董秀中. 盲孔法测量残余应力的钻削加工应变[J]. 焊接学报, 1994, 15(4): 276 - 279.

Chen Huaining, Chen Liangshan, Dong Xiuzhong. Drilling strains in measuring residual stress with hole-drilling strain-gage method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1994, 15(4): 276 - 279.

作者简介: 薛彬, 男, 1985年出生, 博士研究生. 主要从事焊接接头疲劳裂纹扩展方面的科研. 发表论文4篇. Email: xuebin0608@gmail.com

通讯作者: 徐人平, 男, 教授. Email: xurenp@foxmail.com

[上接第88页]

加将会增大堆焊层的厚度, 而焊接速度和焊接电流对堆焊层厚度的影响作用较小.

(3) 针对稀释率最小, 堆焊层厚度达到 2.7 mm, 焊接速度最大的优化目标, 优化后的焊接参数组合为: 焊接电流 190 A, 焊接速度 2.19 mm/s, 送丝速度 0.94 m/min.

参考文献:

- [1] 沈琛, 张忠铎, 张春霞. 高酸性腐蚀气田用 BG2250-125 镍基合金油管开发[J]. 中国工程科学, 2010, 12(10): 35 - 38.
Shen Chen, Zhang Zhonghua, Zhang Chunxia. The development of BG2250-125 Ni-based alloy tubing used in severe sour oil field[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(10): 35 - 38.
- [2] 李玉龙, 禹业晓. TIG 堆焊技术研究进展[J]. 电焊机, 2012, 42(12): 70 - 76.
Li Yulong, Yu Yexiao. Research and development of TIG deposition technology[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42

(12): 70 - 76.

- [3] Kannan T, Yoganandh J. Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 47(9 - 12): 1083 - 1095.
- [4] 汪仁官. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [5] Banovic S W, DuPont J N, Marder A R. Dilution and microsegregation in dissimilar metal welds between super austenitic stainless steel and nickel base alloys[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2002, 7(6): 374 - 383.
- [6] Banovic S W, DuPont J N, Marder A R. Dilution control in gas-tungsten-arc welds involving superaustenitic stainless steels and nickel-based alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32(6): 1171 - 1176.

作者简介: 梁恩宝, 男, 1989年出生, 硕士研究生. 主要从事镍基合金的堆焊工艺和镍基合金组织性能研究. Email: arsenal46@126.com

通讯作者: 王志江, 男, 博士. Email: wangzj@tju.edu.cn