

热丝 TIG 堆焊 Inconel625 工艺参数优化及组织与性能研究

郭龙龙¹, 郑华林¹, 符运豪¹, 刘振平², 李悦钦¹

(1.西南石油大学机电工程学院,成都 610500;2.重庆新泰机械有限责任公司,重庆 402100)

摘要:堆焊工艺参数是影响焊缝成形质量与性能的重要因素。为了提高酸性气田节流阀的耐腐蚀性,采用热丝 TIG 在 AISI 4130 基体表面堆焊 Inconel625,以堆焊层的高度和融合率为指标,运用正交试验法分析了工艺参数对焊缝成形质量的影响。借助显微镜、XRD、EDS 以及显微硬度计对堆焊层的组织、物相、硬度进行了分析。试验结果表明:采用热丝 TIG 在 AISI 4130 表面堆焊 Inconel625 是可行的;优化后的工艺参数获得的焊缝无缺陷、与基体结合良好;堆焊层组织为柱状奥氏体,硬度分布比较均匀,约为 230 HV,略低于基体硬度。

关键词:堆焊;正交试验;优化;组织;性能

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.23.067

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2015)23-0227-04

Processing Parameters Optimization of Hot-wire TIG Cladding Inconel625 and Reseach of Microstructure and Properties

GUO Longlong¹, ZHENG Hualin¹, FU Yunhao¹, LIU Zhengping², LI Yueqin¹

(1. Mechatronic Engineering College, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Chongqing Xingtai Machinery Corporation, Chongqing 402100, China)

Abstract: Processing parameters have important effects on the formation quality, microstructure and properties of the cladding layer. Inconel625 was clad on the substrate of AISI 4130 by hot-wire TIG to improve the corrosion resistance of the choke valve, which was used in acid gas field. Taking height and dilution rate of cladding layer as target, the orthogonal experiment method was adopted to analyze the quality of cladding layer. The microscope, XRD, EDS and hardness tester were applied to investigate the microstructure, phase and microhardness of the cladding layer. The results indicate that it is feasible to clad inconel625 on the substrate of AISI4130 by using hot-wire TIG. The weld bead obtained by optimized process parameters has no defects and bonds well with substrate. The microstructure of the cladding layer is composed of columnar austenite. The distribution of microhardness is uniform, which is about 230HV, slightly below the substrate.

Key words: overlaying; orthogonal experiment; optimization; microstructure; property

Inconel625 是 Ni-Cr 固溶强化合金^[1-2],具有优良的综合性能,包括高温强度、耐腐蚀性、延展性、耐应力腐蚀开裂等^[3-5],是石油天然气工业首选耐腐蚀材料。Inconel625 属贵重材料,所以将其堆焊在廉价的低碳或低合金钢基体上,使设备具有良好的耐腐蚀性与经济性^[6]。

热丝 TIG 是在传统 TIG 基础上发展起来的高

效、优质焊接工艺,继承了传统 TIG 电弧稳定、焊缝成形均匀的优点^[7]。通过对焊丝预热,热丝 TIG 减少了热输入量、提高了焊接速度和熔敷效率,扩大了工艺适应性和应用范围^[8]。目前,该技术已经应用于核电装备、采油设备、军械制造和航空航天等高端工业。

国内外学者^[9-13]对 Inconel625 堆焊已经做了相关研究,并取得了一定的成果。但是,截至目前研究主要以激光、等离子、电子束堆焊 Inconel625 为对象,采用热丝 TIG 堆焊的研究却比较少。本文以高含 H₂S/CO₂ 气田井口 HH 级(API 6A)节流阀制造为背景,研究采用热丝 TIG 在 AISI 4130 表面堆焊 Inconel625,以焊缝质量为指标,运用正交试验法对工艺参数进行优化;借助显微镜、XRD、EDS、硬度计

收稿日期:2015-04-16

基金项目:西南石油大学研究生创新基金资助项目(CX2014BY05)

作者简介:郭龙龙(1988-),男,陕西洛南人,博士研究生,研究方向:石油天然气装备焊接技术与理论;电话:15108208278;

E-mail: gl810396447@163.com

通讯作者:郑华林(1965-),男,四川营山人,教授,博导;

E-mail: zh1@swpu.edu.cn

研究了堆焊层的组织、相组成、元素以及硬度分布。研究结果为制定合理的堆焊工艺,获得综合性能良好的堆焊层提供关键的数据基础和理论依据,为堆焊同类产品提供一定的技术支撑,具有一定的科学价值与工程意义。

1 试验材料与方法

基体材料为调质 AISI4130,焊前去除表面污物,预热至 300℃;焊丝材料为 Inconel625(牌号为 ERNiCrMo-3),直径 1.2mm,材料成分如表 1 所示。所用钨极直径 3.2mm,喷嘴直径 12.5mm,氩气浓度 99.995%,氩气流量 13.5L/min。采用 Fronius 的电流

预热焊丝自动 TIG 系统,焊接路径、焊接参数根据工艺设定,并由系统自动保持。

采用着色法对各焊缝进行无损探伤,试件用线切割机沿垂直堆焊方向的截面切开,切取三个不同的截面。截面经打磨、抛光后用 5% 的硝酸酒精溶液腐蚀基体,以明显区分堆焊层与基体,测量焊缝几何参数。

将打磨、抛光后的试样置于饱和草酸水溶液中,用电压为 6V 的电源电解腐蚀 10s,以制备金相试样;使用 MM6 光学显微镜进行组织观察;采用 JEOLJSM-6490LV 扫描电镜进行化学成分分析;采用 HVS-1000 型数显硬度计进行硬度测量,加载

表 1 材料化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of materials(wt%)

	C	Fe	P	S	Si	Ni	Mn	Cu	Al	Ti	Cr	Mo	Nb
Inconel625	≤0.1	≤5	≤0.02	≤0.015	≤0.5	≥55	≤0.5	≤0.5	≤0.4	≤0.4	20-22	8-10	3.4
AISI 4130	0.29	97	0.021	0.016	0.2	0.02	0.51	0.02	0.006	0.006	0.99	0.175	-

1000g,加载时间 10s。

2 堆焊工艺参数优化

2.1 正交试验方案设计

热丝 TIG 主要工艺参数为热丝电流 I_H 、焊接电压 U 、焊接电流 I 、焊接速度 V 、焊丝进给速度 V_F 。这些工艺参数会对焊缝几何形状、稀释率、缺陷等产生显著影响^[6]。借助正交试验法,试验过程中保持焊丝进给速度 2m/min 不变,选取剩余四个参数作为试验因素,每个因素取四个水平,选用 $L_{16}(4^4)$ 正交表,共进行 16 次试验,各因素及取值水平如表 2 所示。

表 2 试验因素及水平

因素		A	B	C	D
		I_H/A	U/V	I/A	$V/(cm \cdot min^{-1})$
水 平	1	40	9.5	160	12
	2	50	11	180	16
	3	60	12.5	200	20
	4	70	14	220	24

2.2 试验指标

对所得焊缝进行着色探伤均未发现缺陷。堆焊所得典型焊缝横截面如图 1 所示。宏观上看,工艺参数对焊缝的熔深、高度具有显著的影响。因堆焊结果的优劣单一指标不能全面评定,所以借助焊缝融合率 θ ^[14]、高度 H ^[15] 来衡量焊缝质量,参数定义如图 2 所示。通常大的 H 、小的 θ 值代表着高的焊缝成型质量。

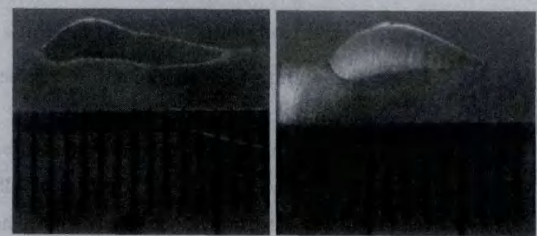


图 1 不同工艺参数焊缝横截面形状
Fig.1 Geometric graphs of weld beam under different process parameters

$$\theta = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \frac{A_w}{A + A_w} \quad (1)$$

式中: θ 为堆焊层融合率; i 为所观察的横截面数; A_w 为熔合区面积(mm^2); A 为堆焊层面积(mm^2)。

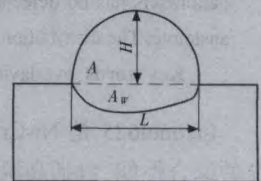


图 2 堆焊层参数示意图
Fig.2 Parameters schematic map of cladding layer

2.3 试验分析原理

极差分析法简称为 R 法,是用数理统计的方法计算出正交表中每列的极差 R_j 值。根据 R_j 值的大小评定影响因素的主次关系^[6],寻求最佳的水平组合,其定义公式为^[17-18]:

$$R_j = \max(R_{jm}) - \min(R_{jm}) \quad (2)$$

式中: R_j 为第 j 列因素波动水平; R_{jm} 为第 j 列因素的 m 水平所对应的试验指标和; j 为正交表的列数; $\max(R_{jm})$ 为第 j 中最大的 R_{jm} ; $\min(R_{jm})$ 为第 j 中最小

的 R_{jm} 。

2.4 试验结果分析

根据极差原理所得分析结果如表3所示。可看出:焊接参数对焊缝高度 H 的影响主次为:D、B、C、A,对融合率 θ 影响主次顺序为:B、C、D、A。

表3 试验结果
Tab.3 The result of experiment

序号	试验因素				试验指标	
	I_p/A	U/V	I/A	$V/(cm \cdot min^{-1})$	H	θ
1	40	9.5	160	12	3.200	0.143
2	40	11.0	180	16	2.230	0.175
3	40	12.5	200	20	1.820	0.291
4	40	14.0	220	24	1.230	0.509
5	50	9.5	180	20	2.050	0.209
6	50	11.0	160	24	1.940	0.265
7	50	12.5	220	12	2.080	0.349
8	50	14.0	200	16	1.860	0.420
9	60	9.5	200	24	1.950	0.230
10	60	11.0	220	20	1.780	0.345
11	60	12.5	160	16	2.340	0.128
12	60	14.0	180	12	2.450	0.300
13	70	9.5	220	16	1.840	0.142
14	70	11.0	200	12	2.380	0.314
15	70	12.5	180	24	1.470	0.251
16	70	14.0	160	20	1.750	0.244
H	K_1	8.480	9.040	9.230	10.110	
	K_2	7.930	8.330	8.200	8.270	
	K_3	8.520	10.050	8.010	7.400	
	K_4	7.440	7.290	6.930	6.590	
	R	1.080	2.760	2.300	3.520	
	优选	$D_1B_1C_1A_3$				
θ	k_1	1.118	0.724	0.779	1.107	
	k_2	1.243	1.098	0.935	0.864	
	k_3	1.003	1.019	1.255	1.090	
	k_4	0.951	1.473	1.128	1.254	
	R	0.240	0.748	0.476	0.390	
	优选	$B_1C_1D_3A_3$				

由于是多目标优化,各因素对每个指标的重要程度各异,为了得到最佳水平组合,采用综合平衡法对结果进行分析。由表3可知,因素A、C的最优值均为 A_3 、 C_1 ;因素D对指标 H 是主要因素,对于指标 θ 较次要,所以最优值选取 D_1 ;因素B对于指标 H 是次要因素,对于指标 θ 较重要,所以选 B_1 。综上,最佳参数组合为: $D_1B_1C_1A_3$ 。根据优化参数所得焊缝横截面如图3示。



图3 优化后单道堆焊焊缝
Fig.3 Macrograph of cross section of cladding layer after optimized

3 微观组织与成分

优化后的堆焊层微观组织如图4所示,堆焊层为柱状枝晶,堆焊层与基体结合良好,没有气孔、裂纹、未熔合等缺陷。堆焊层的XRD分析结果如图5

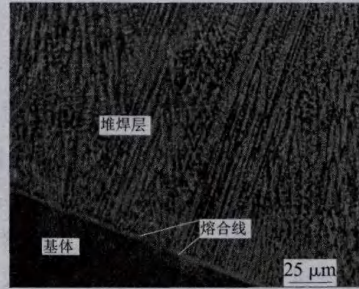


图4 堆焊层横截面微观组织
Fig.4 Optical micrographs of cross section of cladding layer

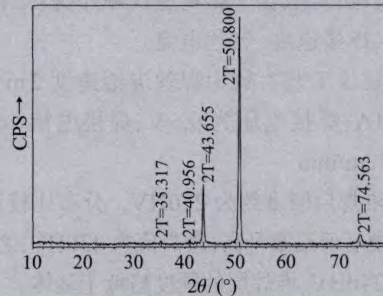


图5 堆焊层XRD结果
Fig.5 XRD analysis result of cladding layer

所示,峰位分别为 35.317° 、 40.956° 、 43.655° 、 50.80° 、 74.503° 。通过与ICDD数据库对比,得知堆焊层相组成为奥氏体。

4 显微硬度

在垂直堆焊方向的横截面内沿垂直熔合线方向自堆焊层表面至基体间隔 $500 \mu m$ 依次测量硬度值,硬度分布如图6所示。可见,堆焊层硬度约为230HV,且分布比较均匀;熔合线附近硬度值逐渐升高,最高值为430HV,之后又逐渐降低至240HV。堆焊层的硬度略低于基体硬度。靠近熔合线处堆焊层的硬度较高是因为基体中的C元素扩散,使堆焊层强化所致;热影响区硬度大于基体,因为在堆焊过程中该区域相当于经历了淬火处理。

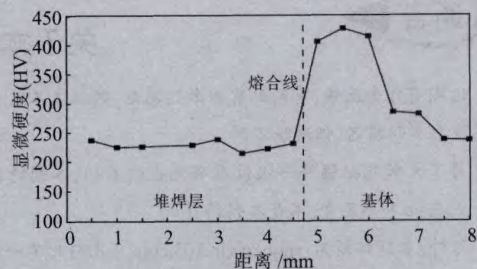


图6 显微硬度分布曲线
Fig.6 Distribution curve of microhardness

5 结论与展望

通过对热丝 TIG 堆焊 Inconel625 的工艺参数优化,组织、物相、硬度特征的研究,得出以下结论:

(1) 采用热丝 TIG 在 AISI 4130 基体表面堆焊 Inconel625 是可行的,堆焊层与基体结合良好,无气孔、未熔合等缺陷,堆焊层组织为奥氏体树枝状晶。

(2) 焊丝进给速度恒定时,焊接参数对焊缝高度的影响主次顺序为:焊接速度、焊接电压、焊接电流、热丝电流;对融合率影响主次顺序为:焊接电压、焊接电流、焊接速度、热丝电流。

(3) 建议工艺参数为焊丝进给速度 2 m/min、热丝电流 60 A、焊接电压为 9.5 V、焊接电流 160 A、焊接速度 12 cm/min。

(4) 堆焊层硬度约为 230HV,分布比较均匀,熔合线附近硬度值逐渐升高,最高值为 430HV,之后又逐渐降低至 240HV,堆焊层的硬度略低于基体。

(5) 焊后热处理对堆焊层组织、残余应力消除的影响以及堆焊层的耐腐蚀性能、力学性能将是后续研究的主要内容。

参考文献:

- [1] 吕耀辉,徐富家,刘玉欣,等. 固溶温度对等离子快速成形 Inconel625 合金组织的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2013(2): 14-19.
- [2] 孙焕焕,刘爱国,孟凡玲. 堆焊 Inconel625 合金的炉膜式水冷壁组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2013(2): 96-99.
- [3] 贾鹏,王恩刚,鲁辉,等. 电磁场对 Inconel 625 合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 金属学报, 2013(12): 1573-1580.
- [4] Abioye TE, McCartney DG, Clare AT. Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217, 232-240.
- [5] Silva CC, Miranda HCD, Motta MF, et al. New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2013, 2(3): 228-237.
- [6] Verdi D, Garrido MA, Muñoz CJ, et al. Cr3C2 incorporation into an Inconel 625 laser cladded coating: Effects on matrix microstructure, mechanical properties and local scratch resistance[J]. Materials & Design, 2015, 67: 20-27.
- [7] 范成磊,梁迎春,杨春利,等. 铝合金高频感应热丝 TIG 焊接方法[J]. 焊接学报, 2006(7): 49-52.
- [8] 赵福海,华学明,叶欣,等. 考虑热损失的热丝 TIG 焊热丝温度分布解析模型[J]. 焊接学报, 2012(10): 97-100.
- [9] Abioye TE, Folkes J, Clare AT. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2145-2151.
- [10] Shakil M, Ahmad M, Tariq NH, et al. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel 625 and stainless steel 304L[J]. Vacuum, 2014, 110: 121-126.
- [11] 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.
- [12] List FA, Dehoff RR, Lowe LE, et al. Properties of Inconel 625 mesh structures grown by electron beam additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 615: 191-197.
- [13] 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.
- [14] Wen P, Feng Z, Zheng S. Formation quality optimization of laser hot wire cladding for repairing martensite precipitation hardening stainless steel [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 180-188.
- [15] Ola OT, Doern FE. A study of cold metal transfer clads in nickel-base Inconel 718 superalloy[J]. Materials & Design, 2014: 57: 51-59.
- [16] 张国栋,薛吉林,周昌玉. 基于正交试验设计的高温管道焊接工艺优化[J]. 焊接学报, 2008(11): 53-56.
- [17] 陶博浩,李红,宋永伦,等. 电阻点焊冷轧 DP600 双相钢焊接接头性能的正交试验分析[J]. 焊接学报, 2013(6): 81-84.
- [18] 周方明,吴岷,朱正祥,等. 基于正交试验设计的固有应变法在焊接变形预测的应用 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2013(3): 241-245. [2]

通告

关于本刊网址和邮箱的通告

近期有作者反映,有网站冒用本刊网名:热加工工艺,致使其投稿失误,但其很快发觉不对,便迅速与本刊电话沟通,证实那个网站盗用本刊网名,但网址不同。

为了大家能把稿件一次性准确地投向本刊,本刊特此通告:本刊网名:热加工工艺;本刊网址:www.rjggy.com及www.rjggy.net。凡与此不一致者,不是本刊网页。

另外,本刊邮箱为:rjggy@vip.163.com。凡与此不一致者,不是本刊邮箱。

如您在网络上发现与本刊网页、邮箱有关的疑问,欢迎您与本刊积极联系,以维护各方权益。