

● 特约稿件 ●

# 小孔内壁热丝 TIG 堆焊 Inconel625 参数优化研究

王 匀<sup>1</sup>, 陈英箭<sup>1</sup>, 许桢英<sup>1</sup>, 彭 勇<sup>2</sup>, 唐书浩<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 豪利机械(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215127)

**摘 要:**为提高油气钻采设备的耐腐蚀性能,采用热丝 TIG 焊工艺在直径为 35 mm、深度为 254 mm 的 AISI8630 小孔内壁堆焊 Inconel625 合金。以堆焊稀释率为指标,运用正交试验法优化堆焊参数。应用 OM、EDS 及 SEM 等对堆焊层的显微组织及元素分布进行分析,采用失重法测定堆焊层及母材的腐蚀速率。结果表明:采用优化后的堆焊参数可在 AISI8630 小孔内壁获得性能良好、无缺陷的堆焊层;堆焊层主要由柱状奥氏体、枝晶和枝晶间共晶组成,熔合线处为平面晶组织,热影响区主要由柱状晶和等轴枝晶组成;从基体到堆焊层合金元素含量迅速增加,堆焊层中合金元素的含量较均匀。Inconel625 合金具有较强的耐腐蚀性能,腐蚀速率约为 AISI8630 的 1/6~1/5,堆焊后的小孔工件耐腐蚀性能得到大幅提升。

**关键词:**小孔堆焊;参数优化;稀释率;微观组织;正交试验

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.19.001

**中图分类号:** TG455; TG444.74

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3814(2017)19-0001-04

## Study on Parameters Optimization of Hot-wire TIG Cladding Inconel625 on Small Hole Surface

WANG Yun<sup>1</sup>, CHEN Yingjian<sup>1</sup>, XU Zhenying<sup>1</sup>, PENG Yong<sup>2</sup>, TANG Shuhao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. R&D Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215127, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion resistance of the petroleum and natural gas drill equipments, the Inconel625 alloy was claded on the surface of AISI8630 small hole with diameter of 35 mm and depth of 254 mm by using hot-wire TIG welding. Taking the dilution ratio of cladding layer as the target, the orthogonal experiment method was adopted to optimize the cladding parameters. The microstructure and the element distribution of cladding layer were analyzed by means of optical microscope (OM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and scanning electron microscopy (SEM), and the corrosion rates of the cladding layer and base metal were tested by using weight loss method. The results show that the cladding layer on small hole's surface of AISI8630 with high performance and no defect can be achieved by using optimized process parameters. The microstructure of the cladding layer is composed of columnar austenite, dendrites and interdendritic eutectic, the fusion zone is plane crystal and the HAZ is columnar crystal and isometric crystal. The contents of alloying elements increase rapidly from the matrix to the cladding layer, and the contents of alloying elements in cladding layer is more uniform. Inconel625 alloy has good corrosion resistance, and the corrosion rate of Inconel625 is about 1/6-1/5 of that of AISI8630. The corrosion resistance of the sample with small holes improves significantly after cladding.

**Key words:** small hole cladding; parameter optimization; dilution ratio; microstructure; orthogonal experiment

在工程应用领域,小孔内壁堆焊相对于直径较大的孔,从堆焊设备到堆焊工艺都具有更高的要求 and 难度。对于含小孔的工件,一般做法是忽略小孔部分的堆焊操作,因此工件的小孔部分成为整个工

件最薄弱的环节。对于深海油气钻采设备,尤其是井口设备,腐蚀常发生于未堆焊小孔部分。随着高腐蚀性 and 深海油气田的开采,对钻采设备的性能特别是耐腐蚀性能提出了更高的要求。所以小孔堆焊必将在采油树部件及阀门中的应用越来越广泛,故开展小孔堆焊的研究是非常必要的。

热丝 TIG 堆焊是在普通 TIG 堆焊的基础上发展起来的一种堆焊方法,在兼顾传统 TIG 堆焊电弧稳定、焊缝成形质量高等优点的同时,显著提高了堆焊速度,减少了堆焊稀释率,堆焊层质量得到大幅度

收稿日期:2016-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575245,51679112);江苏省重点研发计划项目(BE2015134)

作者简介:王 匀(1975-),男,江苏无锡人,教授,博导,主要从事海工装备制造和激光加工的研究;电话:13815483092;

E-mail:wangyun@ujs.edu.cn

提升。Inconel625 镍基合金具有良好的成型性、韧性、耐腐蚀性、耐磨性和抗氧化性,强度较高,易于加工和焊接,被广泛应用于航空、核能、阀门和压力容器等领域<sup>[1]</sup>。但 Inconel625 价格相对较高。为节省能源资源,降低生产成本,在油气钻采行业,常将 Inconel625 堆焊在碳钢、合金钢等金属表面组成双金属材料使用。国内外学者关于 Inconel625 堆焊的研究已取得一定的成果和进展<sup>[2-4]</sup>。但采用热丝 TIG 焊,针对小孔内壁堆焊镍基合金的组织性能的研究相对较少。本文采用热丝 TIG 焊在 AISI8630 小孔工件内壁堆焊 Inconel625 合金,以堆焊层稀释率为指标,运用正交试验法<sup>[5]</sup>对堆焊的工艺参数进行优化。研究结果为油气钻采及运输设备的小孔内壁堆焊提供理论和试验依据,具有一定的工程价值和科学意义。

表 1 AISI8630 钢和 Inconel625 焊丝化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of AISI8630 steel and Inconel625 welding wire (wt%)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti	Nb+Ta
AISI8630	0.310	0.900	0.260	0.008	0.001	0.930	0.42	0.880	0.130	0.021	0.004	-
Inconel625 焊丝	0.012	0.010	0.080	0.003	0.001	22.500	8.80	64.00	0.020	0.170	0.190	3.450

堆焊机,热丝电流为 60 A,采用自主研发的小孔堆焊专用焊枪<sup>[7-8]</sup>(如图 1 所示),钨极直径 2.4 mm,喷嘴直径 6.2 mm,保护气体为 99.999% 的工业纯氩,气体流量为 13.5 L/min。焊道重合率选择 40%<sup>[9]</sup>。堆焊开始前焊枪旋转中心与小孔中心严格对齐,堆焊完成后立即进行温度 350 °C,时间 4.5 h 的消氢处理。

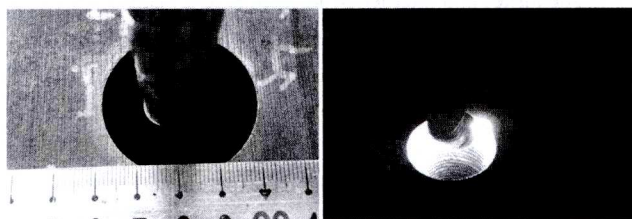


图 1 小孔堆焊专用焊枪

Fig.1 Special welding torch for small hole surfacing welding

将堆焊后的工件用磁粉探伤进行无损检验,检测合格后进行线切割,加工制成 10 mm×10 mm×5 mm 的试块。试块经打磨、抛光,用 5%硝酸酒精溶液进行清洗,找出熔合线位置,测量堆焊层的几何尺寸,以便计算稀释率。采用 DM2500M 金相显微镜进行金相分析,采用 JSM-7001F 扫描电镜进行组织观察及化学成分分析,采用全浸式均匀腐蚀试验测定堆焊层腐蚀速率。选取腐蚀溶液为 5.0 (质量分

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验材料与方法

本文所用堆焊母材为油气钻采设备中常用的 AISI8630 合金钢,化学成分如表 1 所示。待堆焊小孔直径为 35 mm,深度为 254 mm。AISI8630 碳当量为 0.797,属较难堆焊材料,堆焊前需进行预热,预热温度为 150 °C。由于小孔内部堆焊散热条件极差且堆焊过程温度分布较为复杂,温升较快,需严格控制堆焊层间温度 ≤260 °C。应用自主发明的深孔及腔体内壁堆焊焊枪用监测装置<sup>[6]</sup>对堆焊过程的温度进行实时检测,当温度超过设定极限值时自动停机,待自然冷却至作业温度后重新启动堆焊程序。

堆焊材料为 Inconel625 (牌号为 ERNiCrMo-3) 焊丝,焊丝直径为 1.2 mm,化学成分如表 1 所示。所用堆焊设备为 Fronius 公司生产的全自动热丝 TIG

数,%,下同)+0.5CH<sub>3</sub>COOH+H<sub>2</sub>S(饱和),试验温度为(10±1)°C以模拟深度为 200 m 的海水温度,试验周期为 7 d。试样腐蚀结束后用 1:1 的盐酸溶液浸泡 2 min 以去除表面腐蚀产物,吹干后称量,计算相应腐蚀速率。

### 1.2 正交试验设计

选用对堆焊热输入影响较大的堆焊速度、堆焊电流、电弧电压和送丝速度四个因素作为研究对象,设计四因素三水平的正交试验表如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Factors and levels of orthogonal tests

因素	A 堆焊速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	B 堆焊电流 /A	C 电弧电压 /V	D 送丝速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )
1	20	180	11.0	120
2	25	200	12.5	160
3	30	220	14.0	200

堆焊过程中热输入的变化是导致堆焊层稀释率、微观组织和元素分布等产生差异的主要原因;稀释率的变化又直接影响堆焊层的使用性能,如耐磨性和耐腐蚀性等。本文选用堆焊稀释率作为正交试验指标。堆焊稀释  $\theta$  率是指堆焊过程中母材的熔化量在焊道金属中所占百分比(即熔合比),其计算公式为:

$$\theta = \frac{W_b}{W_d} = \frac{W_b}{W_w + W_b} = \frac{A_w}{A + A_w} \quad (1)$$

式中： $W_b$ 为溶入焊缝中的母材质量； $W_d$ 为焊缝质量； $W_w$ 为溶入焊缝中的焊丝质量； $A$ 为堆焊层面积； $A_w$ 为熔合区面积。

## 2 试验结果分析

### 2.1 极差分析原理

极差分析法又称 R 法,是利用数理统计的相关计算方法,平均效果中最大值和最小值的差,进而找出影响指标的主要因素,并找到最佳因素水平组合。其计算公式为:

$$R_j = K_{j(\max)} - K_{j(\min)} \quad (2)$$

式中： $R_j$ 为第  $j$  因素的极差值； $K_{j(\max)}$ 和  $K_{j(\min)}$ 分别为第  $j$  因素中的最大值和最小值。

### 2.2 极差分析结果

根据上述极差分析原理,计算出的极差分析结果如表 3 所示。

表 3 极差分析表  
Tab.3 Range analysis table

水平	因素				评定指标 稀释率 $\theta$
	A 堆焊速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	B 堆焊电流 /A	C 电弧电压 /V	D 送丝速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	
1	20	180	11.0	120	0.289
2	20	200	12.5	160	0.335
3	20	220	14.0	200	0.421
4	25	180	12.5	200	0.407
5	25	200	14.0	120	0.465
6	25	220	11.0	160	0.157
7	30	180	14.0	160	0.508
8	30	200	11.0	200	0.202
9	30	220	12.5	120	0.243
$K_1$	0.348	0.401	0.216	0.332	-
$K_2$	0.343	0.334	0.328	0.333	-
$K_3$	0.318	0.274	0.465	0.343	-
$R_j$	0.030	0.127	0.249	0.011	-
优选	A1	B1	C3	D3	-

由表 3 可以看出,四种因素对堆焊稀释率的影响主次顺序为电弧电压、堆焊电流、堆焊速度和送丝速度。各因素优化后的水平分别为电弧电压 140 V,堆焊电流 180 A,堆焊速度 20 cm/min,送丝速度 200 cm/min。最优组合是 A1B1C3D3。

### 2.3 显微组织与元素分布

采用最优参数所获得的小孔内壁堆焊层和热影响区的显微组织如图 2 所示。

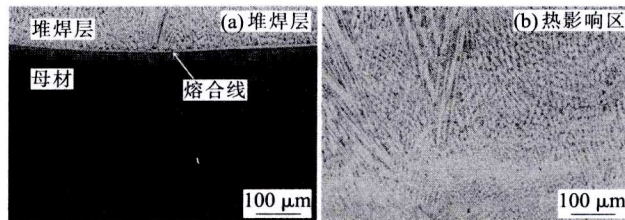


图 2 小孔内壁堆焊层和热影响区的微观组织  
Fig.2 Microstructure of hardfacing layer and HAZ on the interior wall

由图 2 可以看出,采用优化后的参数进行小孔内壁堆焊,得到的堆焊层与基体结合良好,无未熔合、夹渣、气孔和裂纹等缺陷。图 2(a)中,熔合线处平整的白亮带为平面晶区,证明母材与堆焊层实现了良好的冶金结合。堆焊层为奥氏体组织,主要由柱状晶、枝晶和枝晶间共晶组成。图 2(b)中,热影响区主要由珠光体和铁素体组成,在靠近熔合线位置显微组织为柱状晶和等轴枝晶,远离熔合线的位置以等轴晶为主,晶粒尺寸较小且分布均匀。

在垂直于小孔堆焊方向的横截面内沿熔合线垂线的EDS点扫描位置及扫描结果如图 3 所示。由图 3 可看出,堆焊层中主要合金元素 Ni、Cr、Mo、Nb 的含量较均匀。从基体到堆焊层合金元素含量迅速增加,Ni、Cr、Mo、Nb 所对应的质量分数约为 54%、15%、6%、4%。同时,Fe 元素含量迅速减少,堆焊层中 Fe 元素含量约为 20%。较未优化参数所获得的堆焊层,其含量降低 10%左右,堆焊层质量得到大幅提高。

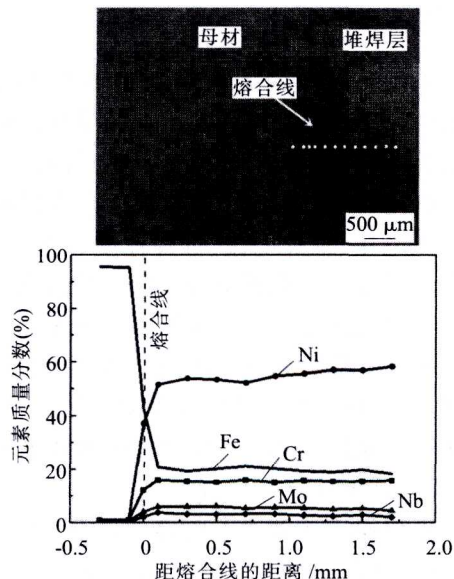


图 3 沿熔合线垂线的 EDS 点扫描位置及扫描结果  
Fig.3 EDS scanning points along the line vertical to the fusion line and scanning results

## 2.4 耐腐蚀性分析

采用失重法计算母材以及堆焊层的腐蚀速率。腐蚀速率  $\omega$  的计算公式为:

$$\omega = \frac{\tau}{A \cdot t} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为失重, g;  $A$  为试样表面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为试验时间, h。

试样在腐蚀溶液中的腐蚀速率见表 4 所示。

表 4 堆焊层和母材的腐蚀速率 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )  
Tab.4 Corrosion rates of cladding layer and base metal ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )

材料	时间, d						
	1	2	3	4	5	6	7
AISI8630 母材	1.09	1.01	0.87	0.78	0.72	0.63	0.62
Inconel625 堆焊层	0.20	0.20	0.15	0.12	0.11	0.10	0.09

由表 4 可看出, AISI8630 母材和 Inconel625 堆焊层的腐蚀速率呈现相同的变化趋势, 即刚开始腐蚀速率较快, 随后逐步变缓趋于一个固定值。这是由于在腐蚀初期, 试样表面存在一定的粗糙度, 使得与腐蚀液的实际接触面积变大, 导致腐蚀速率较大。随着腐蚀过程的进行, 样件表面在类似腐蚀抛光的作用下趋于光滑, 腐蚀速率随之变缓, 最终趋于一个稳定值。同时, AISI8630 母材的腐蚀速率约是 Inconel625 堆焊层的 5~6 倍。堆焊层的耐腐蚀性能与堆焊层中 Fe 元素的含量密切相关, 采用优化后的堆焊参数所获得的堆焊层稀释率较低, 母材熔化量较少, 进入堆焊层的 Fe 元素含量也随之降低, 堆焊后的小孔工件耐腐蚀性能得到大幅度提升。

## 3 结论

(1) 采用热丝 TIG 工艺在 AISI8630 小孔内壁堆焊 Inconel625 合金是可行的, 堆焊层与母材实现良好的冶金结合, 无夹渣、气孔、未熔合等缺陷。

(2) 小孔堆焊过程中, 对堆焊稀释率影响主次顺序为电弧电压、堆焊电流、堆焊速度和送丝速度; 建议小孔堆焊参数为电弧电压 14V, 堆焊电流 180 A, 堆焊速度 20 cm/min, 送丝速度 200 cm/min。

(3) 堆焊层组织为奥氏体, 主要由柱状晶、枝晶和枝晶间共晶组成; 熔合线处为平面晶区; 热影响区组织为珠光体和铁素体, 主要由柱状晶和等轴晶组成, 晶粒尺寸较小且分布均匀。

(4) 堆焊层中主要合金元素 Ni、Cr、Mo、Nb 的含量较均匀。从基体到堆焊层, 合金元素含量迅速增加, 同时 Fe 元素含量迅速减少。由于腐蚀抛光作用的存在, 堆焊层及母材的腐蚀速率都表现为前期较

快, 后期逐渐变缓的趋势; AISI8630 母材的腐蚀速率约是 Inconel625 堆焊层的 5~6 倍, 堆焊后的小孔工件耐腐蚀性能得到大幅度提升。

## 参考文献:

- [1] Adamiec J. High temperature corrosion of power boiler components clad with nickel alloys [J]. Materials Characterization, 2009, 60(10): 1093-1099.
- [2] 郭龙龙, 郑华林, 符运豪, 等. 热丝 TIG 堆焊 Inconel625 工艺参数优化及组织与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 227-230.
- [3] Shakil M, Ahmad M, Tariq N H, et al. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel625 and stainless steel 304L [J]. Vacuum, 2014, 110: 121-126.
- [4] Verdi D, Garrido MA Munez CJ, et al. Mechanical properties of Inconel625 laser clad coatings: Depth sensing indentation analysis [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 598: 15-21.
- [5] 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): 53-58.
- [6] 豪利机械(苏州)有限公司. 深孔及腔体内壁堆焊枪用监测装置: 中国, 2015208062576[P]. 2015-10-19.
- [7] 豪利机械(苏州)有限公司. 深孔内壁堆焊方法: 中国, 2016100025313[P]. 2016-01-06.
- [8] 豪利机械(苏州)有限公司. 深孔内壁堆焊用焊枪: 中国, 2015208063437[P]. 2015-10-19.
- [9] 郭龙龙, 郑华林, 林振平, 等. 考虑重合率的热丝 TIG 堆焊 Inconel625 成形质量研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(11): 230-233. [3]

## 作者简介

王匀, 教授, 博士, 博士生导师, 江苏无锡人。江苏大学吴中先进制造研究院院长, 模具所副所长, 江苏省锻压学会秘书长, 中国成组技术主任委员, 中国科技名词委员会委员, 江苏省优势学科方向负责人、省“青蓝工程”中青年学术带头人、校“青年拔尖造就”培养对象, 江苏省 333 工程第二层次人才, 美国西北大学访问学者。《现代制造工程》和《精密成形工程》杂志编委。获江苏大学“十佳青年教师”称号。

主持国家自然科学基金项目 3 项, 江苏省自然科学基金及重点项目 2 项、中国博士后基金项目 1 项、高级人才启动基金项目 1 项、江苏省教育厅“青蓝工程”骨干教师资助项目 1 项、江苏省“333”人才项目 1 项, 江苏省科技支撑项目和成果转化等省部级项目 10 项。参与国家自然科学基金项目, 863 项目、江苏省科技成果转化专项、江苏省科技成果转化专项招标项目、泰州市科技成果转化专项、江苏省科技支撑重点项目、江苏省科技支撑项目、企业博士集聚计划项目、留学基金项目、江苏省自然科学基金项目、中国兵器装备集团创新基金项目、江苏省高校自然科学基金重大项目、教育厅自然科学基金项目、“六大人才高峰”项目、江苏省博士后基金等各类项目 20 余项。各类横向项目 10 余项。申请发明专利 40 项, 获得授权发明专利 22 项, 申请 PCT(专利合作条约)专利 4 项。获得国家科技进步一等奖, 江苏省科技进步一等奖、江苏省科技进步二等奖和三等奖、中国机械工业科学技术进步奖二等奖、教育部科技进步二等奖、安徽省科技进步三等奖、船舶工业协会二等奖等。在国内外主要期刊上发表论文 70 余篇(其中被 SCI 和 EI 收录 30 余篇)、主编教材 5 本。