

347 不锈钢堆焊 Inconel 690 镍基合金的组织特征及其侧弯性能

车洪艳^{1,3} 陈峰^{1,2} 董浩^{1,3} 刘国辉^{1,3}

(1. 安泰科技股份有限公司, 北京 100081; 2. 兰州理工大学有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点试验室, 兰州 730050; 3. 河北省热等静压工程技术研究中心, 河北 涿州 072750)

摘要 采用 GTAW 自动化焊接方法在 347 不锈钢表面堆焊了 Inconel 690 镍基合金。通过优化工艺参数, 控制熔合比得到了无明显缺陷的堆焊组织, 在此基础上分析研究了堆焊组织的特征与侧弯性能。结果表明, 正交设计优化后的最佳工艺参数为焊接电流 160 A、送丝速度 100 cm/min、焊接速度 15 cm/min; 对应于界面往堆焊中心位置, 堆焊组织逐步由柱状树枝晶向等轴树枝晶转变, 树枝晶主要由 γ -Ni(Cr, Fe) 固溶体组成, 同时还有少量的富 Nb 相在枝晶间形成偏析; 据 ASME QW-462.5(d) 标准截取侧弯试验检测无明显裂纹产生。

关键词: 堆焊 微观组织 界面结构 侧弯性能

中图分类号: TG455

0 前言

不锈钢表面堆焊镍基合金技术是应用在核电设备中关键零部件以期达到增加抗腐蚀性能的目的, 例如推力盘^[1]、蒸汽发生器管板^[2]等。Inconel 690 镍基合金自身具有良好的焊接性^[3-5], 但是在工艺参数不合理的情况下仍可出现气孔与裂纹, 其中热裂纹中的凝固裂纹与高温失塑裂纹(DDC)最为常见^[6]。在异种金属连接中, 母材对于熔敷金属的稀释所引起的微观组织演变, 由此引起的性能变化对于镍基合金的应用尤为关键。

在不锈钢表面的镍基合金堆焊可由诸多方法实现。于建平等^[7]采用冷金属过渡堆焊技术在法兰球体和密封面堆焊了镍基合金, 虽然堆焊效率较高且稀释率较低, 但与基体的结合强度较弱不及传统的钨极氩弧焊(TIG)堆焊。林海燕等人^[8]采用带极电渣堆焊的方法将 Inconel 690 镍基合金堆焊于核电管板之上, 基本满足使用需求, 但是由于本身带极电渣堆焊的方法对于熔敷金属稀释率较大, 至少需要堆焊 5 mm 厚度以上才能接近 Inconel 690 的主要成分。Awasthi 等人^[9]采用激光堆焊的方式在 316L 不锈钢表面堆焊了 Ni-Cr-Mo 系镍基合金, 同样由于稀释率较高出现了由母材向熔敷金属的组织转变, 且堆焊的热输入直接

决定了堆焊层的力学性能。

文中以某型号核电站屏蔽电机主泵的关键部件, 即推力盘的表面堆焊为研究的应用背景。通过在 347 不锈钢圆盘表面的沟槽中堆焊 Inconel 690 镍基合金制造而成, 其目的是为了增强该核电站的推力盘在高温下的耐磨耐蚀性。由组织决定性能的观点出发, 在优化堆焊工艺参数的基础上, 对堆焊的组织及相关力学性能做了准确表征。

1 试验材料及方法

采用自动化 TIG 堆焊工艺, 熔敷金属选用直径为 1 mm 的 Inconel 690 镍基合金焊丝, 在板厚为 30 mm 的 347 不锈钢表面堆焊 5~6 mm 厚的堆焊层。347 不锈钢和 Inconel 690 镍基合金的装置如图 1 所示, 具体主要化学成分见表 1。

堆焊前对 347 不锈钢母材表面的油污、氧化膜及水分等进行了清理。堆焊工艺首先确定了次要参数, 在此基础上通过正交设计优化了主要参数。其中次要

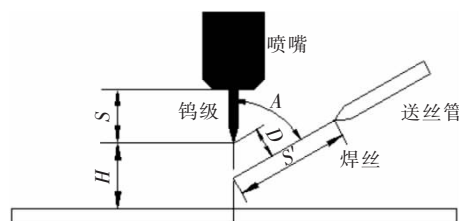


图1 焊接示意图

表 1 母材与焊丝的主要化学成分(质量分数,%)

材料	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	Nb	P	S	Cu
347 不锈钢	0.07	0.38	1.65	10.58	16.89	70.18	0.21	0.03	0.01	—
690 镍基焊丝	0.03	0.06	0.88	58.82	27.19	10.82	2.00	0.01	0.01	0.18

参数为:送丝角度 $70^{\circ}\sim 75^{\circ}$,焊丝伸出长度 $6\sim 10\text{ mm}$,焊丝末端和钨极尖端的距离为 $2\sim 2.5\text{ mm}$,钨极伸出长度 $4\sim 5\text{ mm}$,钨极末端距工件高度 $3\sim 4\text{ mm}$;保护气及流量:浓度为 99.99% 的氩气,气流量为 15 L/min 。堆焊后的试样利用 OLYMPUS GX51 金相显微镜和 Quanta FEG-450 型场发射扫描电子显微镜进行组织观察,利用 D8 advance 型 X 射线衍射仪对堆焊层中的物相进行标定。

焊后试样根据 ASME 第 IX 卷 QW-462.5(d)《耐蚀焊缝金属堆焊——板材的弯曲试验方法》,对其进行了导向弯曲试验。按要求在试件中取 4 个横向侧弯试样,尺寸为 $38\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,在宽度方向上截取堆焊层厚度 3 mm 。在试验过程中,弯心直径 38 mm ,弯曲角度 180° ,试验完毕后,观察有无开裂,若有,记录开裂尺寸。

2 试验结果及分析

经初步探索可知,焊接速度越大且送丝速度越小,则不能焊出连续的焊缝;焊接速度越小且送丝速度越大,则母材和钨极都易过热,焊缝较厚容易出现缺陷且成形不美观,钨极也容易烧损;焊接电流过小,有可能因为热输入不够而来不及熔化焊丝。通过初步的探索得出了能焊出连续焊缝且成形较好的三个主要工艺参数的基本范围:焊接电流 $140\sim 180\text{ A}$,送丝速度 $60\sim 100\text{ cm/min}$,焊接速度 $12\sim 18\text{ cm/min}$ 。

为了更迅速地确定出最优工艺参数,采用三因素三水平正交试验,所选的因子分别为焊接电流、送丝速度和焊接速度,即焊接电流: 140 A , 160 A , 180 A ;送丝速度: 60 cm/min , 80 cm/min , 100 cm/min ;焊接速度: 12 cm/min , 15 cm/min , 18 cm/min ;氩气流量均为 15 L/min 。正交试验的因子与水平见表 2。

表 2 正交试验因子与水平

因子	焊接电流 I/A	送丝速度 $v_1/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $v_2/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
水平 1	140	60	12
水平 2	160	80	15
水平 3	180	100	18

根据镍基合金焊接过程中易产生热裂纹倾向的特点,焊缝越宽,稀释率越小则能尽可能的降低焊接热裂纹倾向;稀释率等于熔深/熔敷厚度 ($\alpha=h_2/H$);形状系数等于余高/熔宽 ($\beta=h/B$);用稀释率和形状系数的乘积堆焊系数 η ($\eta=\alpha\times\beta$) 来评价堆焊质量的好坏,堆焊系数越小则对焊接热裂纹的敏感性越低,据此优化出最佳工艺参数。

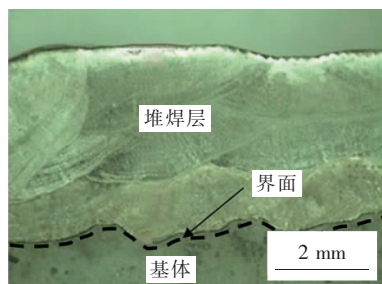
根据极差分析结果,见表 3, $R_B>R_C>R_A$,故在所

表 3 正交试验分析结果

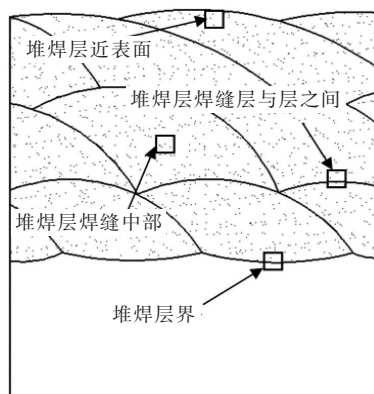
试验号	因素 A	因素 B	因素 C	稀释率 α	形状系数 β	堆焊系数 η
1	1	1	1	0.449	0.166	0.075
2	1	2	2	0.197	0.214	0.042
3	1	3	3	0.128	0.263	0.034
4	2	1	2	0.500	0.106	0.053
5	2	2	3	0.189	0.173	0.033
6	2	3	1	0.186	0.208	0.039
7	3	1	3	0.471	0.132	0.062
8	3	2	1	0.384	0.155	0.060
9	3	3	2	0.185	0.174	0.032
K_1	0.150	0.190	0.173	—	—	—
K_2	0.124	0.134	0.127	—	—	—
K_3	0.154	0.105	0.129	—	—	—
k_1	0.050	0.063	0.058	—	—	—
k_2	0.041	0.045	0.042	—	—	—
k_3	0.051	0.035	0.043	—	—	—
极差 R	0.010	0.028	0.016	—	—	—
主次顺序	$B>C>A$					
优水平	A_2	B_3	C_2			
优组合	$A_2B_3C_2$					

有因素中按重要性排序依次为送丝速度、焊接速度、焊接电流。对正交试验结果进行极差分析可知,优化出的最优工艺参数为 $A_2B_3C_2$,即焊接电流 160 A、送丝速度 100 cm/min、焊接速度 15 cm/min。

以上述优化后的工艺参数为基础,图 2 为 Inconel 690 合金堆焊层宏观特征及示意图。图 3 为 Inconel 690 合金堆焊层界面、堆焊层中心以及堆焊层近表面的微观组织,从图中可以看出靠近母材边缘的堆焊层有一沿基体表面垂直生长的平面结晶带,这是由于在靠近母材边缘的区域溶质富集而出现成分过冷,导致柱状树枝晶的生长。同时靠近堆焊层界面处的母材区域有少量的铁素体生成,如图 3a 和图 3b 所示,这是因为该区域 Cr_{eq}/Ni_{eq} 相对较高,且焊接热循环一般很快,奥氏体不锈钢在加热到稍低于固相线的温度时就会生成铁素体,而奥氏体至铁素体的相变又相对较慢,因而形成的铁素体数量不多。在堆焊层中部为柱状树枝晶和等轴树枝晶的混合组织(图 3c),这是由于熔池中部可以通过多种渠道来散热,而且由于热量在堆焊层中分布不均匀,致使该区域散热方式具有各向异性,形成了比较紊乱的组织形貌。堆焊层中部焊缝层与层之间的组织形貌如图 3d 所示,可以看出上一层焊缝的底部和下一层焊缝的顶部均为柱状树枝晶组织,但是下

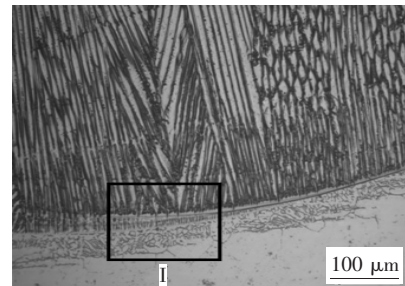


(a) 堆焊层横截面宏观特征

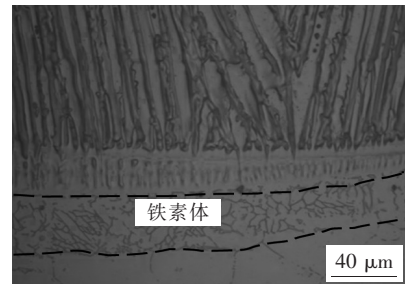


(b) 堆焊层横截面示意图

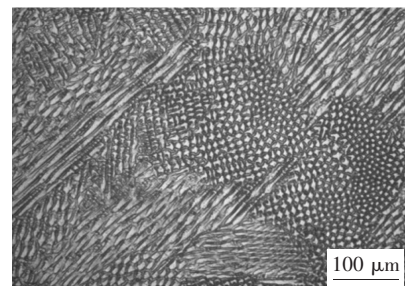
图 2 Inconel 690 合金堆焊层宏观特征



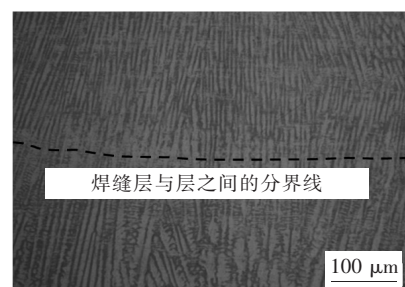
(a) 堆焊层界面



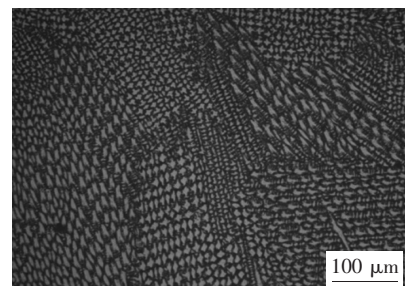
(b) 堆焊层 I 区放大图



(c) 堆焊层中焊缝中部组织



(d) 堆焊层中部焊缝层与层之间



(e) 堆焊层近表面

图 3 堆焊层微观组织

一层焊缝的枝晶组织更为粗大,这是因为在焊接上一层焊缝时对之前的焊缝起到了一定的回火作用,使底层焊缝组织变得更为粗大。

图 4 和图 5 分别为堆焊层 XRD 衍射图和 SEM 微观形貌。可以看到,堆焊层树枝晶主要由 γ -Ni (Cr,Fe) 固溶体组成,同时还有少量的富 Nb 相在枝晶间形成偏析。

侧弯试验后,试样弯曲凸面的表面形貌如图 6 所示,可以看出试样弯曲后堆焊层处虽然出现很多褶皱,但沿各个方向上均没有开裂,说明堆焊层的延展性良好。

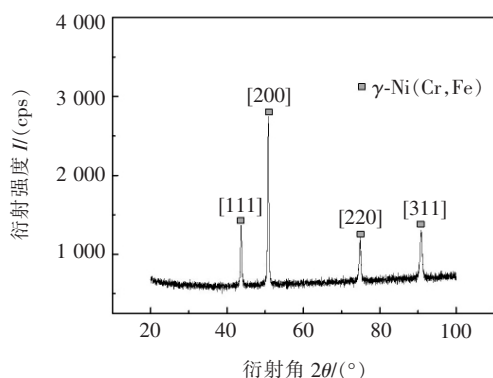


图 4 堆焊层 XRD 衍射图

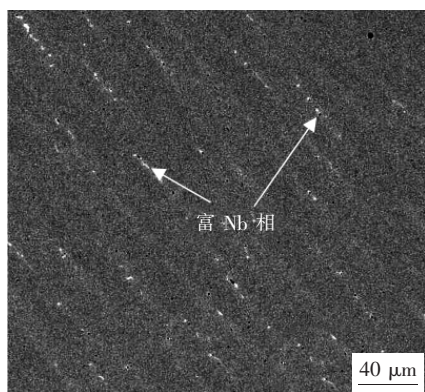


图 5 堆焊层 SEM 背散射微观形貌

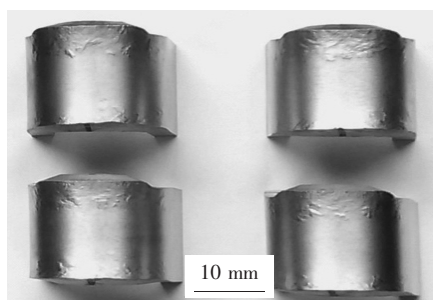


图 6 侧弯后试样宏观形貌

3 结论

(1) 通过设计正交试验,优化得出主要因素的最佳工艺参数值,其中焊接电流 160 A、送丝速度 100 cm/min、焊接速度 15 cm/min。

(2) 对应于界面往堆焊中心位置,堆焊组织逐步由柱状树枝晶向等轴树枝晶转变,树枝晶由 γ -Ni (Cr,Fe) 固溶体组成,枝晶间含有少量富 Nb 相。

(3) 微观组织观察和侧弯试验结果来看,焊后试样延展性好且堆焊层与母材冶金结合良好,优化出来的焊接工艺参数满足堆焊需要。

参考文献

- [1] 陈峰,刘国辉,林巧力,等. 347 不锈钢表面堆焊 690 镍基合金电化学腐蚀性能研究 [J], 动力工程学报, 2016, 36(4): 326-330.
- [2] 王娜,纪强. 管板堆焊镍基合金 625 焊接工艺 [J], 焊接, 2016(6): 53-55.
- [3] 朱兴华. Inconel690 镍基合金材料焊接技术要点 [J]. 电子世界, 2013(14): 189.
- [4] 张皓月. S, P 对 Inconel690 焊丝熔敷金属结晶裂纹敏感性影响的研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院硕士学位论文, 2011.
- [5] 李远,张立德,王金龙. INCONEL690 镍基合金带极电渣堆焊工艺研究 [J]. 锅炉制造, 2011(02): 48-51.
- [6] Ramirez A, Lippold J C. High temperature cracking in nickel-base weld metal, Part 2-Insight into the mechanism [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 380: 245-258.
- [7] 于建平. CMT 焊接在堆焊(包覆)镍基耐蚀合金层中的应用 [J]. 石油化工设备技术, 2013, 34(5): 49-52.
- [8] 林海燕. 核电蒸汽发生器管板镍基合金 Inconel 690 电渣堆焊工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2013.
- [9] Reena A, Santosh K. Effect of specific energy input on microstructure and mechanical properties of nickel-base inter-metallic alloy deposited by laser cladding [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 12(43): 4688-4696.

作者简介: 车洪艳, 1977 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为热等静压扩散连接。