

镍基丝极埋弧焊材料焊接热裂纹的分析与防止

机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所(150028) 冯 伟 徐 锴 郭 泉 周珍珠

摘要 采用丝极埋弧焊的方法,通过宏观测试、微观分析研究了镍基 ERNiCrMo-3 焊丝/焊剂埋弧焊材料的焊接性、成分、组织、热裂纹等指标,并进一步通过 SEM 组织观察分析了镍基埋弧焊材料产生热裂纹的机理,杂质元素对裂纹的影响规律。结果表明,镍基埋弧焊材料的焊接要特别注意焊接热裂纹的产生,采用的焊丝和配套焊剂需要有效控制杂质元素,防止熔敷金属化学元素 C,Si,S,P 等杂质元素增加热裂纹倾向,其中熔敷金属的 S,Si 元素含量对热裂纹的影响较大,需要严格控制。

关键词: 镍基 625 合金 热裂纹 杂质元素
中图分类号: TG423

0 序 言

镍基 625 合金是一种 Ni-Cr 强化合金,具有优异的抗疲劳和抗腐蚀性能,这与镍基合金本身的特性有关^[1-2]。首先,镍为面心立方结构,组织非常稳定,从室温到高温不发生同素异形转变;其次,镍基合金具有较高的化学稳定性,在 500℃ 以下不被氧化。同时,镍基合金具有很强的合金化能力。为此,应用的领域也非常广,一般焊接不仅用于镍基 625 合金本身,而且常用于低合金钢和不锈钢的焊接,并作为耐高温、高压及各种苛刻腐蚀环境中使用的比较理想的金属材料。但是埋弧焊材料使用一般受到限制,主要原因是由于镍基 625 合金导热率低、流动性差、铬和钼含量高造成焊接困难,易在熔渣中形成铬和钼等尖晶石氧化物^[3-4],造成脱渣困难,特别是同种材料焊接时粘渣更为严重,对焊剂要求较高。焊缝金属的热裂纹是导致性能下降的主要原因。特别针对丝极埋弧焊材料,由于采用的埋弧焊剂的杂质含量如 C,S,P,Si,AS,Sn 等元素不可避免的带入,其中 S 和 Si 元素是增加熔敷金属热裂纹的敏感性的主要原因,为此有必要研究热裂纹的形成原因及制定有效的控制措施。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

焊丝、焊剂均采用哈尔滨焊接研究所威尔公司生产的镍基焊丝,牌号为 HS625,配套焊剂牌号为 SJ609。焊丝规格采用 $\phi 2.4$ mm,试验母材采用 Q345 材料,其化学成分见表 1。试板规格为 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 20 mm,V 型坡口,隔离层材料采用焊条 Ni625,规格 $\phi 4.0$ mm,过渡层厚度为 3 mm。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	S	P
0.14	0.23	1.32	0.012	0.024

焊丝采用真空炉进行冶炼,其化学成分要严格控制 C,S,P,Si 等杂质元素,防止焊接过程中这些杂质元素在熔池中形成低熔点共晶,产生偏析,并由此导致焊接热裂纹的形成。为此,焊丝的冶炼经过多年研究调整到最佳控制范围内,焊丝化学成分见表 2。焊剂的制备,由于镍基材料粘度大,流动性差^[6],既要保证焊接的工艺性能又要有效控制焊剂成分,同时焊剂采用矿物质原料,要考虑到脱氧、多层焊粘渣、热裂纹问题。为此,经过多批次研

表 2 HS625 焊丝化学成分(质量分数,%)

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Nb
标准值 ^[5]	≤ 0.10	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.015	≤ 0.020	20.0~23.0	≥ 58.0	8.0~10.0	3.15~4.15
实测值	0.006	0.068	0.27	0.001	0.002	22.13	64.93	8.47	3.57

究,重点控制微量元素和杂质含量,采用 12 组焊剂成分进行了裂纹问题的研究,焊剂化学成分见表 3。

表3 SJ609 焊剂化学成分(质量分数,%)

编号	S	P	SiO ₂
1	0.022	0.022	5.3
2	0.025	0.015	5.6
3	0.021	0.031	6.2
4	0.018	0.031	6.5
5	0.020	0.032	7.0
6	0.017	0.022	7.2
7	0.019	0.026	7.4
8	0.019	0.024	7.8
9	0.020	0.032	8.6
10	0.021	0.028	9.2
11	0.020	0.022	11.2
12	0.022	0.023	11.8

1.2 焊接工艺

焊接镍基合金材料,由于线膨胀系数较大,导热率低,焊接接头会产生较大的焊接内应力^[7-8]。同时镍基合金具有单相奥氏体组织,焊接时裂纹敏感性较大。为此试验过程中要尽量选用小的焊接热输入和层间温度进行焊接,焊接试板采用的焊接工艺参数见表4。

表4 焊接工艺参数

焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 v/(mm·min ⁻¹)	层间温度 T/℃
250~350	27~32	500~600	≤100

1.3 试验方法

弯曲试验在焊态下进行,按照 AWS B4.0M—2000《焊缝的机械测试方法》侧弯试样4个,垂直于焊接方向。弯曲后的试样,沿任何方向测量,都不得有超过1.5 mm长度的开口缺陷,熔合线处也不得有超过3.0 mm长度的开口缺陷,弯曲试验要求见表5。

表5 弯曲试验要求

试样厚度 δ/mm	弯心直径 D/mm	支座间距离 d/mm	弯曲角度 θ(°)
10	40	63	180

采用SEM进行断口分析,试样取自弯曲试样受弯面,进一步分析材料的断口形貌和出现裂纹的原因。并取弯曲试样进行显微组织分析,试样经磨光、抛光后用硫酸铜溶液腐蚀,在金相显微镜上进行金相组织分析。

2 试验结果与分析

采用丝极埋弧焊的方法,使用1种高纯焊丝,配合12组不同组分焊剂,测试弯曲试样是否产生微裂纹,最后通过熔敷金属化学成分、金相组织分析、SEM断口分析,找出影响热裂纹产生的主要原因,并提出了防治措施。

2.1 熔敷金属的化学成分

通过12组焊剂配合测试熔敷金属化学成分的杂质元素,研究S、Si和S+Si含量对弯曲试样产生裂纹长度的大小关系。试验结果表明,镍基625合金焊接材料易发生热裂纹现象,熔敷金属杂质元素是导致问题的主要原因,其中随着S+Si含量的增加,裂纹敏感性增加,当达到5号试样S+Si含量为0.277%后,开始出现裂纹倾向,裂纹开口长度呈逐渐增加趋势,当S+Si含量达到0.608%时发生脆性断裂。熔敷金属化学成分与裂纹长度的关系见表6。

表6 S、Si和S+Si含量对弯曲试样产生裂纹长度的大小关系

编号	熔敷金属化学成分(质量分数,%)			裂纹长度 l/mm
	Si	S	S+Si	
1	0.16	0.004	0.164	0
2	0.18	0.009	0.189	0.2
3	0.19	0.004	0.194	0
4	0.22	0.005	0.225	0
5	0.27	0.007	0.277	1.2
6	0.28	0.005	0.287	1.1
7	0.33	0.005	0.335	1.6
8	0.35	0.006	0.356	2.3
9	0.43	0.007	0.437	2.1
10	0.54	0.008	0.548	2.7
11	0.58	0.007	0.587	6.0
12	0.60	0.008	0.608	断裂

2.2 弯曲裂纹的金相组织观察

通过12组弯曲试验对比,5号试样为开始出现裂纹的临界条件,为此选择5号试样对裂纹区域进行金相分析,检验面平行于原始弯曲面。裂纹的整体形貌如图1所示。此形貌非裂纹原始状态,因受弯曲拉应力作用,裂纹形状变化,张口较大,但裂纹主方向与柱状晶基本平行。裂纹位于焊道交汇处附近,裂纹边缘处局部可见细小裂纹存在,有沿晶开裂特征。金相和宏观试样如图1~2所示。

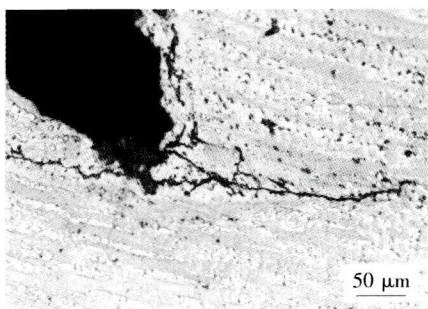


图1 弯曲裂纹面金相组织

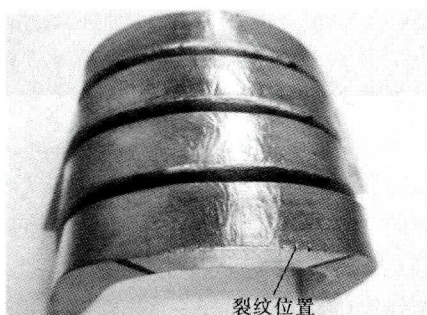
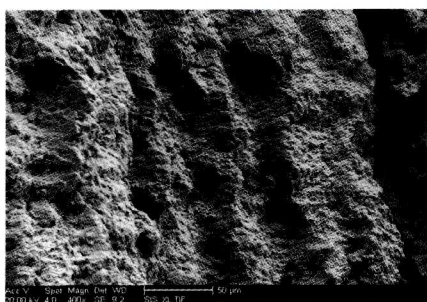


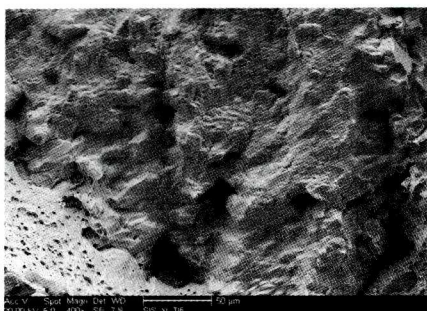
图2 弯曲宏观试样

2.3 SEM 断口分析

5号试样在弯曲试验过程中产生裂纹情况,通过SEM和能谱对断口进行观察和成分分析,同时与4号未产生裂纹弯曲试样进行了对比分析,试验结果如图3和表7所示。



(a) 4号试样



(b) 5号试样

图3 SEM断口形貌

表7 4号和5号试样能谱成分分析(质量分数,%)

元素	4号	5号
AlK	0.10	0.28
SiK	1.64	1.93
PK	0.06	0.58
ZrL	1.19	0.36
NbL	13.92	22.33
SK	6.58	8.12
CrK	17.29	14.91
MnK	0.20	0.36
FeK	15.79	13.71
NiK	43.23	37.41

结合图1和图3从试验结果上看,5号试样断口为典型的共晶花样,开裂是由结晶裂纹引起,结晶裂纹较为严重。裂纹处呈现柱状晶形貌^[9],枝晶轮廓清晰可见,基本沿着枝晶晶界开裂,断口表面没有韧窝,可观察到共晶花样,并在鹅卵石类自由表面上分布着较多的析出物,说明枝晶间存在较多的第二相物质。进一步通过能谱成分对比定性分析,在断口两侧共晶花样位置进行能谱分析,其中重点关注S,Si含量,分析结果见表7。4号试样S+Si含量为8.22%,5号试样S+Si含量为10.05%,其结果同表6熔敷金属化学成分分析规律基本一致,进一步认为裂纹是由于S,Si杂质元素引起的。主要机理在于两种元素的溶解度很小,当其含量较高时,晶界偏析严重,并由偏析形成的低熔点共晶物引起的裂纹。其中,S和Ni易形成Ni-NiS低熔点共晶,在焊缝金属凝固过程中,这种低熔点共晶在晶界间形成一层液态薄膜,在焊接应力的作用下容易形成晶间裂纹。同时,Si在焊接过程中Si和O等形成复杂的硅酸盐,在晶界间形成一层脆的硅酸盐薄膜,在焊缝金属凝固过程中或凝固后的高温区,会导致高温失塑裂纹的形成。为此,文中通过定量和定性分析,认为S+Si含量对镍基625合金焊接材料热裂纹影响较大,需要严格控制。

3 结 论

(1)镍基625合金丝极埋弧焊材料热裂纹倾向较大,采用不同熔敷金属成分的侧弯试验进一步验证了热裂纹问题是镍基625合金焊接材料的主要破坏形式。

(2)通过一系列试验,找到了影响热裂纹的主要原

因,确定了熔敷金属成分中 S、Si 元素含量对热裂纹的影响规律。

(3)在实际产品应用中,要在焊丝和焊剂的制备过程中有效地控制杂质元素,才能有效防止微裂纹的产生,保证产品质量。

参 考 文 献

- [1] Aaltonen P. Study of snoek-type relaxation in hydrogenated inconel 600[J]. Philosophical Magazine A, 1998, 78(4): 979-994.
- [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] 董志波,马 瑞,王 勇,等.镍基合金焊接熔池凝固组织模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 27-30.
- [4] 王 刚,张秉刚,冯吉才,等.镍基高温合金叶片焊接修复

技术的研究进展[J]. 焊接, 2008(1): 20-23.

- [5] ASME. 锅炉及压力容器规范国际性规范 II 材料 C 篇[M]. 北京:中国石化出版社 2010.
- [6] 莫文林,路善平.一种核电核岛主设备用镍基焊丝的研制[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 90-94.
- [7] Dupont J N, Lippold J C, Kiser S D. Welding metallurgy and weld-ability of nickel-base alloys[M]. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2009.
- [8] 郝峰波.镍基合金可焊性和工艺性[J]. 现代焊接, 2015(2): 51-54.
- [9] 邢希学,邸新杰.一种镍基高温合金熔敷金属的组织及性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 73-76.

作者简介: 冯 伟, 1981 年出生, 硕士, 工程师。主要从事焊接材料的产品开发及应用、材料断裂行为的研究, 已发表论文 10 余篇。

Hastelloy C - 2000 合金的焊接工艺

中国石油集团东北炼化工程有限公司 吉林机械制造分公司(132021) 李桂秋

摘要 通过对 Hastelloy C - 2000 合金材料的化学成分、力学性能进行分析,采用手工钨极氩弧焊方法进行焊接试验研究,选用合理的焊接材料,拟定预焊接工艺规程,按照 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》进行检评,制定出合理的焊接工艺及技术措施,使焊接质量达到规范要求,对今后焊接同类材料起到积极的指导作用。

关键词: 手工钨极氩弧焊 预焊接工艺规程 焊接工艺评定

中图分类号: TG446⁺.1

0 序 言

公司承揽的某石化公司炼油项目分离料斗设备中的催化剂管口材料为 Hastelloy C - 2000 合金。Hastelloy C - 2000 合金属于 Ni-Cr-Mo“C”合金,是国外近年来开发的一种新型优化镍基合金,该合金能够应用于包括硫酸、盐酸、氢氟酸等多种苛刻腐蚀环境,因而得到国内外化工设备制造领域的高度重视。中国进口该合金主要用于制造压力容器等设备^[1-5],但该合金材

料在国内应用案例较少,此次制造是公司首次研究该材料焊接性能,进行焊接工艺评定试验,制定合理的焊接工艺,对保证焊接质量及使用要求尤为必要^[6]。

Hastelloy C - 2000 合金是在已经完善建立的 Ni-Cr-Mo 合金中加入 Cu。其合金中 Mo 和 Cu(分别在 16% 和 1.6% 水平上)的联合作用使合金具有出色的抗还原性介质腐蚀的能力,同时较高的 Cr 含量(质量分数 23%)保证了对氧化性介质腐蚀的抵抗能力。这种优异的耐腐蚀行为不仅表现为较低的金属损耗,而且表现为更好的耐局部腐蚀能力,特别是耐点蚀、缝隙腐