



镍基合金埋弧焊焊剂的研制

李亚军 杨飞 李欣雨 蒋勇

【摘要】 研制了一种埋弧焊烧结焊剂CHF207，渣系为 $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$ ，碱度约为2.2，可用于镍基合金，如镍铬合金、镍铬铁合金和镍铁铬合金的焊接。使用该焊剂配套焊丝CHW-NiCr-3 (ERNiCr-3) 在镍基合金Incoloy825上焊接，工艺性能优良，熔敷金属化学成分满足要求，力学性能优异，耐晶间腐蚀性能好。同时，研制的焊材性能达到了国外同类产品水平，可替代进口焊材。

关键词： 镍基合金；埋弧焊；烧结焊剂

1. 概述

镍基合金是一种镍含量大于50%的工程合金，在高温和低温条件下，具有较高的强度、良好的抗氧化和耐腐蚀能力。自20世纪30年代后问世以来，相继出现了Inconel600、601和Incoloy800、801、825等多种牌号镍基合金，广泛应用于管道、石油化工、航天、核反应堆等领域。

国内镍基合金埋弧焊接材料主要依赖进口，如美国的SMC、TECHALLOY、LINCOLN，瑞

典的ESAB等。进口该类焊材成本高，价格昂贵，采购周期长，给我国的建造企业或单位带来了沉重负担。国内这类焊接材料研究起步晚，相关的应用和报道相对较少。因此，成功研制镍基合金如镍铬合金 (UNS N06075、N07080)、镍铬铁合金 (UNS N06600、N06601)、镍铁铬合金 (UNS N08800、N08825) 的配套埋弧焊材CHF207/CHW-NiCr-3，可缓解我国长期依赖进口的现状，减轻工业建设的负担。

2. 烧结焊剂CHF207的研制

(1) 焊剂CHF207渣系和碱度设计 镍基合金在焊接过程中，通常出现两种情况：①液态镍能够溶解大量的 H_2 、 O_2 和CO气体，在冷凝期溶解度迅速下降，造成气孔和氢脆；同时会在晶界上形成低熔点共晶体Ni-NiO，产生脆性相，降低焊缝金属低温韧性。②液态Ni与P和S的亲合力比较强，容易在晶界上形成低熔点共晶化合物 $\text{Ni}_3\text{S}_2\text{--Ni}$ 和 $\text{Ni}_3\text{P--Ni}$ ，降低焊缝金属强度并且导致结晶裂纹。因此，焊剂

基金项目：四川省科技支撑计划项目 (2015GZ0062)。

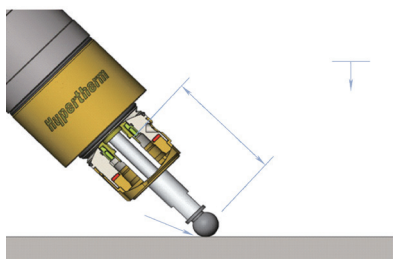


图 7

Key		Hypertherm				
Land or I Cut value		2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
Half angle		71.5				
Over Bevel Head Lin		48.3				

图 8

海宝坡口参数表格里，当然也在公式里，只要改变它，所有的参

数自动修正，满血复活，王者归来。

4. 结语

数控等离子坡口切割技术需要我们不断去实践，美国海宝愿帮助您提高生产效率，提高自动化水平，智造未来。

作者简介：汪宏亮，海宝中国。

中加入 CaF_2 可降低焊缝金属中的H含量,预防氢脆现象发生。同时,在保证工艺性能良好的情况下,适当提高焊剂的碱度,使焊剂渣系的氧化能力下降,并且能有效除去磷和硫,减少低熔点物质的生成,从而保证焊缝金属具有优异的力学性能。因此确定焊剂渣系为 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ 。依照国际焊接学会推荐的BIIW公式,其碱度约为2.2。

(2) 焊剂主要成分作用 首先, CaF_2 是中性或偏碱性的盐类化合物,对合金元素没有氧化能力。 CaF_2 具有调整熔渣粘度和碱度的作用,并能够降低焊缝金属中氢的含量。由于镍基合金的流动性较差,通常加入 CaF_2 来改善熔渣的流动性;但其含量过高时,容易造成电弧不稳定、焊道不规整。

其次, Al_2O_3 是比较稳定的氧化物,对Ni、Cr、Si和Mn等元素的氧化作用很小。 Al_2O_3 属于高熔点物质,具有调整熔渣熔点和粘度,提高电弧集中性的作用。但其含量过高时,会使熔渣的熔点过高,流动性变差,出现咬边等缺陷,影响焊缝成形。

最后,Mn可起到脱硫、脱氧作用,降低焊缝中低熔点物质的生成,还可以向焊缝过渡锰元素,提高焊缝强度的同时还能改善韧性。

根据镍基焊丝的焊接特点,并经过大量焊剂配方调试,最终确定了一种具有良好焊接工艺性能和力学性能的配方,其主要成分如表1所示。

3. 试验材料与方法

(1) 试验材料 试验所用母材为镍基合金Incoloy825,尺寸为 $600\text{mm} \times 150\text{mm} \times 30\text{mm}$,试板开V形坡口,板与板间隙 18mm ,坡口角度 10° 。埋弧焊丝为CHW-NiCr-3,规格为 2.4mm ,其化学成分如表2所示。

(2) 焊接方法 焊接使用交直流两用MZE—1250型埋弧焊机,采用研制的埋弧焊剂CHF207配合焊丝CHW-NiCr-3在Incoloy825钢板上进行多层、多道堆焊,如图1所示。焊丝干伸长为 $20 \sim 25\text{mm}$,焊剂堆积高度为 $26 \sim 32\text{mm}$,具体焊接参数:电弧电压为 $28 \sim 30\text{V}$,焊接电流为 $280 \sim 330\text{A}$,焊接速度为 $35 \sim 42\text{cm/min}$,道间温度控制在 100°C 以下。

(3) 检测方法 依据JB 4730—2005,在变频X射线XXG—3005型探伤机上对试板进行探伤测试;依据GB/T 228—2010,拉伸试验在30t微机控制电液伺服万能材料试验机RE—8030上进行试验;依据GB/T 229—2007,在ZBC2452—C摆

锤式冲击试验机上测定试样的冲击功;依据GB/T 13298—1991,在Olympus-tokyo型光学显微镜上观察金相组织,浸蚀剂为10%草酸水溶液。

4. 试验结果与分析

(1) 焊接工艺性能 首先,电弧稳定性。由于焊剂中 CaF_2 电离电位较高,电离的F-离子容易夺取电弧中的电子,造成焊接电弧不稳定下降。因此,在焊剂中加入一定量的 CaSiO_3 和 K_3AlF_6 ,同时采用钾钠1:1的水玻璃作为粘结剂,这些 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 碱性氧化物足以保证电弧的稳定性而满足埋弧焊接要求。研制的焊剂在焊接过程中,电弧燃烧稳定。

其次,脱渣性能。脱渣性能的好坏是焊接工艺性能的重要指标之一,脱渣性能在多层埋弧自动焊中具有特别重要的意义。影响脱渣性的主要因素就是熔渣与焊缝金属之间的化学反应,此外还与渣壳的线膨胀系数和相变应力有关。CHW-NiCr-3中铬含量较高,在焊接过程中容易被氧化,在熔渣中形成 Cr_2O_3 等的尖晶石氧化物,这些氧化物晶格常数与氧化铁相似,若搭接在金属表面的氧化铁晶格上,会牢固地结合在一起,造成脱渣困难。研制的焊剂在试板坡口中焊接,脱

表1 焊剂CHF207配方成分(质量分数) (%)

CaF_2	Al_2O_3	$\text{Mn} + \text{CaSiO}_3 + \text{K}_3\text{AlF}_6$	其他
40~55	25~40	5~15	≤ 15

表2 焊丝CHW-NiCr-3化学成分(质量分数) (%)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Nb	Fe	Ti	Cu
0.018	2.96	0.13	0.002	0.008	20.98	70.27	2.40	1.72	0.34	0.01

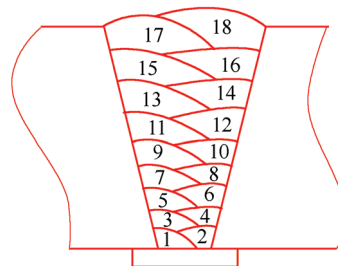


图1 焊接示意

渣性能良好，渣壳稍微敲击即可脱离，没有粘渣现象。

最后，焊缝成形性能。埋弧焊焊缝成形的质量与焊剂的氧化性、堆积密度、稳弧性、表面张力和熔渣粘度等因素有关。研制的焊剂CHF207氧化性较小，堆积密度小，电弧燃烧稳定，表面张力和熔渣粘度适中，配合焊丝焊接焊缝成形良好，无粘渣和压坑、气孔、裂纹现象，焊缝边缘与母材过渡平缓。

试板焊接完成后，在XXG-3005型变频X射线探伤机上进行探伤检测，检测结果为I级。

(2) 化学成分和力学性能 焊剂CHF207配套焊丝CHW-NiCr-3进行交直流焊接，其熔敷金属化学成分和力学性能分别如表3和表4所示。从表3可看出，熔敷金属中S、P低于国外某知名品牌产品，Mn元素含量比国外产品高，其他成分相当，完全满足研制的技术要求。从表4可知，熔敷金属的抗拉强度、屈服

强度、断后伸长率和-196℃冲击吸收能量均满足要求，弯曲试验合格，达到了研制的目标。同时研制的焊剂配套焊丝的性能达到了国外某知名品牌水平，尤其是在-196℃时的冲击吸收能量数据高于国外产品。

(3) 显微组织 熔敷金属焊缝的显微组织形貌如图2所示，从图2可以看出各区域无裂纹现象。焊缝金属组织为奥氏体和极少量δ铁素体，没有其他的过烧组织和晶粒粗大成分。δ铁素体对焊缝中的P、S、Si和Nb等元素的溶解度较大，能防止这些元素偏析和形成低熔点共晶物，防止热裂纹的产生。图3为焊缝金属试样冲击断口的扫描电镜，从图3可看到明显的塑性变形而产生的韧窝，为韧性断裂。而奥氏体组织本身就为典型的韧窝特征，可以保证良好的低温冲击韧性，表4中的冲击值数据正好印证了这一观点。

(4) 晶间腐蚀 依据GB/T

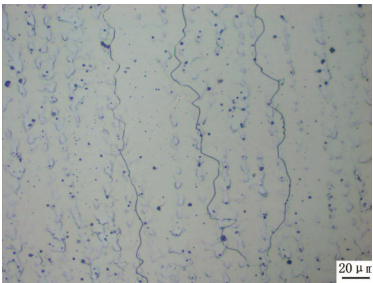


图2 焊缝金属显微组织

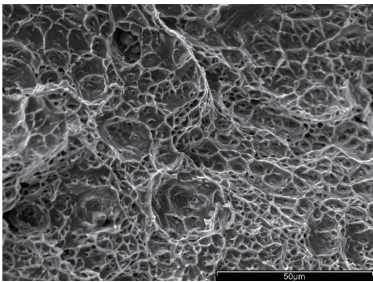


图3 试样冲击断口扫描电镜

4334—2008 C法对焊缝金属进行晶间腐蚀试验，腐蚀液为65%的硝酸溶液。试验分5个周期进行，每个周期为48h，结果如表5所示。从表5可以看出，每个周期的腐蚀速率都较低，平均值为每月0.062mm，其数据明显优于相同条件下进行试验的镍基合金。

5. 结语

(1) 研制的焊剂CHF207配套焊丝CHW-NiCr-3，焊接工艺性能良好，脱渣好，电弧燃烧稳定，无粘渣、压坑、气孔和裂纹现象，焊缝边缘与母材过渡平缓。

表5 晶间腐蚀试验

周期	腐蚀速率 (mm/月)
1	0.057
2	0.048
3	0.058
4	0.071
5	0.076
平均值	0.062

表3 熔敷金属化学成分 (质量分数) (%)

		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Nb	Cu	Ti	Fe
	焊接方法	≤0.100	2.00 ~ 6.00	≤ 0.50	≤ 0.015	≤ 0.020	19.50 ~ 23.50	余量	2.00 ~ 3.00	≤ 0.500	≤ 0.50	≤ 3.00
具体实例	直流	0.017	5.08	0.35	0.006	0.001	20.25	68.64	2.31	0.055	0.11	2.71
	交流	0.017	5.19	0.34	0.007	0.001	20.57	69.01	2.38	0.052	0.11	2.80
知名品牌	直流	0.020	4.53	0.31	0.013	0.005	20.12	68.69	2.59	0.048	0.14	2.74
	交流	0.020	4.67	0.31	0.012	0.006	20.46	68.89	2.60	0.042	0.13	2.66

表4 熔敷金属力学性能

	焊接方法	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 (%)	-196℃冲击吸收能量/J	弯曲试验 D=4t, α=180°	
		≥360	≥600	≥27	≥34	面弯	背弯
具体实例	直流	430	615	37	122、114、122	合格	合格
	交流	421	620	35	120、124、135	合格	合格
知名品牌	直流	410	620	37	86、91、77	合格	合格
	交流	430	632	36	84、91、88	合格	合格



大厚度E36钢板药芯焊丝 焊接试验

吴光辉 陈成 王树勇 蒋笑

【摘要】 60mm厚E36板平对接CO₂气体保护药芯焊丝焊接, 采用符合GB/T17493-2008 E551T1-Ni1C型Y CJ81Ni1药芯焊丝。试板检测按中国船级社焊接工艺评定规范要求执行, 检测结果满足规范技术要求。

关键词: 大厚度; E36钢板; 药芯焊丝气保护焊接; E551T1-Ni1C

1. 概述

船舶及海洋工程平台结构建造中广泛使用E36钢板, 各种厚度都有涉及, 厚度超过50mm的结构也时有出现。高强钢E36大厚板一般采用埋弧焊, 采用CO₂气体保护焊焊接工艺的研究及应

用也时有报道。当对低温韧性要求高时, 如需要满足-40℃冲击韧性要求, 所用药芯焊丝一般为E551T1-K2C型, 其含有较高的镍, 一般 $w_{Ni} \approx 1.5\%$, 在存在硫化物应力腐蚀开裂风险的环境或一些含有H₂S如开采过程中受到油

气污染的海域中, 其抗应力腐蚀性能将难以满足要求。

NACE规范要求, 在要求抗硫化物应力腐蚀断裂或应力腐蚀裂纹时, $w_{Ni} < 1\%$ 。E551T1-Ni1C型药芯焊丝要求 $w_{Ni} = 0.80\% \sim 1.10\%$, 而实际

(2) 研制的焊剂CHF207配套焊丝CHW-NiCr-3, 熔敷金属化学成分满足要求, 力学性能优异, 耐晶间腐蚀性能好, 达到了研制的目标。

(3) 研制的焊剂CHF207配套焊丝CHW-NiCr-3力学性能达到了国外同类产品水平, 尤其是-196℃冲击吸收能量高于国外产品, 可替代进口焊材。

参考文献:

[1] 汤传健, 等. 镍基合金换热管与管板的焊接[J]. 金属加工: 热加工, 2012(8): 36-38.

[2] 李文新. 真空直读光谱仪对镍基合金中多种元素的测定[J]. 甘肃科学学报, 2008, 20(2): 86-88.

[3] 严华, 顾芝敏. Incoloy 800H热交换器的焊接评定试验[J]. 焊接技术, 2013, 42(5): 45-47.

[4] 唐中杰, 等. 镍基高温合金的研究现状与发展前景[J]. 金属世界, 2014(1): 36-40.

[5] 闫建义. N06600镍基管材的焊接工艺探析[J]. 金属加工: 热加工, 2010(4): 36-38.

[6] 苏仲鸣. 焊剂的性能与使用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

[7] 王效莲, 马明亮, 王青云. 不锈钢埋弧焊烧结焊剂研制[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(1): 21-24.

[8] 陈世修, 秦宗琼. 奥氏体不锈钢中铁素体含量计算[J]. 阀门, 2005(1): 20-25.

[9] Erich Folkhard. 不锈钢焊接冶金[M]. 栗卓新, 朱学军, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.

作者简介: 李亚军等, 四川大西洋焊接材料股份有限公司。

MW 20160826