

Mone1400合金焊接技术研究

王多明, 张亚森, 侯彦龙, 李青春, 包国强, 武斌, 李文强

中核四〇四有限公司第一分公司 甘肃兰州 732850

摘要: 通过分析研究Mone1400镍铜合金焊接方法和焊接参数, 确定采用手工钨极氩弧焊, 填充材料为国际钛合金公司Mone160 ($\phi 2.4\text{mm}$), 钨极直径应选为3.2mm, 层间温度控制在100~150℃, 氩气气体流量控制在8~12L/min, 焊机喷嘴直径应选为12mm, 焊接电流控制在155~175A, 电弧电压控制在14~20V, 焊接速度控制在25~75mm/min; 通过该工艺参数, 可有效地避免Mone1400镍铜合金焊接过程中出现的裂纹和气孔。焊缝经过100%X射线检测, 达到I级指标要求, 焊接接头的抗拉强度相当于母材强度的96.6%, 焊接接头弯曲(面弯、背弯)180°后均未发现裂纹产生。

关键词: Mone1400合金; 焊接工艺; 裂纹; 气孔

1 序言

耐腐蚀Mone1400镍铜合金主要元素为Ni和Cu, 由于Ni和Cu能够形成无限固溶体, 使其组织可成为单相奥氏体^[1]。由于Mone1400合金具有优良耐氟、耐氢氟酸性能, 具有良好的力学性能和加工性能, 能在较为恶劣的腐蚀环境中工作, 因此被广泛应用于腐蚀性较强的化工、海洋开发、核工业等领域^[2-4]。

反应器器体作为主要核心设备, 伴随核工业快速发展, 反应器器体在中温状态和强腐蚀的环境下运行, 因而对反应器器体焊接性能提出更高的要求。由于反应器器体尺寸较大, 焊接坡口不易成形, Mone1400合金材料在卷制过程中, 延展率较大, 因此焊接坡口角度对于焊接质量影响很大, 焊接过程中易变形, 焊后极易出现裂纹、气孔等缺陷。本文通过对Mone1400合金材料进行焊接性分析, 在焊接方法、焊接材料、焊接参数等方面进行焊接工艺评定^[5], 选择最佳的焊接参数和操作技术, 应用于反应器器体的焊接。

2 反应器器体结构和技术指标

(1) 反应器器体结构 反应器器体结构如图1所示。由于反应器器体焊接坡口不易成形, 焊接过程中板材易产生变形, 因此焊后极易出现裂纹、气孔等, 在实际使用过程中存在焊缝缺陷及焊接质量

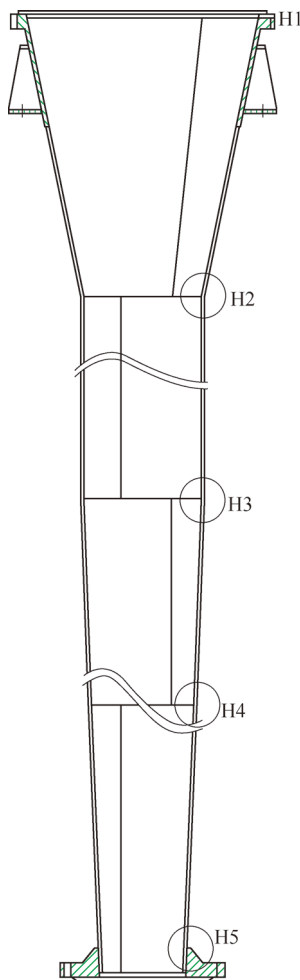


图1 反应器器体结构及主焊缝布局

问题,焊缝易出现腐蚀减薄。通过对Monel400合金材料进行焊接性分析,在焊接方法、焊接材料、焊接参数等方面进行研究,拟解决焊接变形、焊缝缺陷,提高焊接接头质量,降低焊缝腐蚀。

(2) 主要技术指标 反应器主要技术指标见表1。另外,反应器焊接接头A、B类焊缝采用NB 47013.2—2015标准进行100%RT检测,技术等级为A、B级。

表1 主要设计参数

设计压力/MPa	最高工作压力/MPa	设计温度/℃	最高工作温度/℃	工作介质	工作介质特性	主体材料	气压试验/MPa
0.1	0.09	450	440	HF气体、F ₂ 、N ₂	高度危险	Monel400	0.05

3 Monel400合金的焊接特点

由于Monel400合金材料在液态下的流动性及浸润性较差,焊接过程中焊缝极易产生气孔、夹渣、裂纹、未熔合和咬边等缺陷。这些缺陷直接影响着反应器器体的使用寿命,具体Monel400合金材料焊接存在以下特点^[6]。

(1) 容易氧化 镍和铜的互溶性很好,同时与氧的结合力较强,在高温时与氧结合易生成氧化膜,这种氧化膜极易产生气孔、夹渣、裂纹、未熔合和咬边等缺陷,使焊接性能降低。

(2) 易产生气孔 Monel400合金的焊接气孔主要为H₂气孔、CO气孔和H₂O气孔。其中以H₂O气孔为主。在焊接过程中,焊缝金属中的镍熔化为液态能溶解大量的氧(1720℃氧在镍合金中的溶解度为1.18%)。当焊缝金属凝固时,氧的溶解度逐渐减小,过剩的氧将镍氧化成氧化亚镍,NiO和Ni与H反应,镍被还原后,而氢与氧反应生成H₂O在熔池凝固时来不及逸出,而形成H₂O气孔。由于在焊接过

程中焊道周边区域冷却快,结晶速度大,造成熔池中的氢来不及逸出,而形成H₂O气孔。

(3) 焊接接头的力学性能下降 Monel400合金焊后焊接接头的组织发生较大的变化,在焊接应力和电化学腐蚀作用下,焊接接头性能明显下降。这主要体现在Monel400合金在腐蚀介质中首先发生电化学腐蚀,一定时间后,被焊金属表面产生较长的微裂纹,受应力集中和渗入裂纹内部吸附物质的楔入作用,促使裂纹扩张,从而暴露了新鲜的表面,继续在介质中腐蚀,其过程反复进行,直到材料断裂为止。

(4) Monel400合金的耐腐蚀性能下降 在生产实际中,焊接接头的耐腐蚀性能会远低于母材,主要原因是焊接的保护不良易产生高温氧化、气孔、裂纹和焊缝表面不平整等缺陷。焊接时合金元素的烧损及脆化等造成其在焊接接头中相对减少,极易降低Monel400合金的耐蚀性。

(5) 焊接热裂纹倾向大 Monel400合金中的Cu对O、S、Pb、P等杂质元素很敏感,焊接时易形成焊接热裂纹。在焊接过程中,铜与杂质反应产生低熔点共晶体,低熔点共晶体再结晶过程中分布在晶间或晶界处,使镍铜合金具有明显的热脆性。

(6) 存在黏稠和“浅熔深”的特性 Monel400合金焊接时,Monel400合金高温下黏稠度比较大。熔池的合金表面张力非常大和气体电离中多数离子向两侧偏离特点,较多离子不易向下流动,而是从中心向四周流动,形成“浅熔深”现象,这主要是由Monel400合金特性决定的。

4 Monel400合金焊接工艺研究

4.1 试验材料

试验材料为Monel400合金,试板规格为650mm×125mm×12mm,其化学成分、力学性能和物理性能见表2~表4。

表2 Monel400合金材料的化学成分(质量分数)

(%)

元素	C	Si	Mn	Fe	S	Ni	Cu	Ti	Cr	Co	Mo
标准值	≤0.3	≤0.5	≤2.0	≤2.5	≤0.024	≥63.0	28~34	—	—	—	—
分析值	0.12	0.37	1.04	1.15	0.004	65.80	31.80	0.045	0.085	0.012	0.014

表3 Monel400合金材料的力学性能

R_m /MPa	R_{el} /MPa	A (%)	HBW
565	305	43	128

表4 Monel400合金材料的物理性能

熔点/℃	线膨胀系数/ $\times 10^{-6}K^{-1}$	热导率/ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
1360	13.8	25.8

4.2 焊接接头形式

由于Monel400合金液态焊缝金属流动性较差,存在“熔深浅”的特性,若单纯通过增大焊接电流来提升焊缝金属流动性和熔池深度,反而不利于焊接。因为增大焊接电流的同时增大了焊接热裂纹的敏感性,所以使焊缝金属中脱氧剂蒸发,造成气孔。为了保证接头的熔透和减少“浅熔深”现象,选择适当增大坡口角度、减小钝边高度的焊接接头形式,对纵、环焊缝采用单面焊双面成形,具体坡口形式如图2所示。

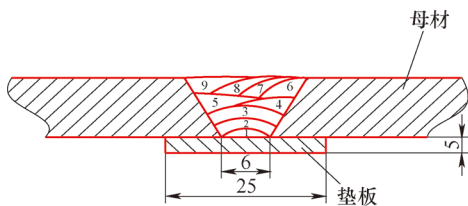


图2 反应器环、纵焊缝焊接坡口形式

4.3 焊前准备

Monel400合金材料焊接关键点是焊接区、填充材料保护。由于Monel400合金材料和焊丝表面存在油污、水分以及被氧化膜覆盖,妨碍焊丝填充金属与Monel400母材金属结合且氧化膜熔点高(约3680℃),易形成微裂纹或隐裂纹等焊接缺陷^[7],因此焊接前必须对焊件表面进行清理,以保持焊件的清洁度。清理方式采用机械方法清理坡口及两侧50mm范围钝边和坡口内杂质,如脂、油、漆、标记用蜡笔、切削液等。并将焊道表面的氧化物使用机械打磨清除后用丙酮清洗。

4.4 焊接方法的选择

由于Monel400合金材料本身对于气体杂质敏感,容易导致局部脆弱形成裂纹和偏吹产生夹渣,因此常规的电弧焊不适用该设备高质量的焊接要求。该设备母材板厚为12mm,为保证内部的焊接质量,提高耐腐蚀性能,同时减小内部焊缝的打磨

量,综合考虑,该设备纵、环焊缝焊接接头宜在惰性气体保护气氛进行焊接,最终选择采用手工钨极氩弧焊进行焊接。选择使用TIG焊接设备,是因为TIG焊具有高频引弧和滞后的保护气流。

Monel400合金材料焊接时,应注意以下几个方面:①保护气体流量。②焊枪喷嘴直径。③钨极直径与电流大小。

(1) 保护气体 氩气是一种无色无味的单原子惰性气体,在焊接高温时不易分解,不易与金属起化学反应,不易溶解于Monel400合金材料熔池金属中。在氩气的氛围中焊接,能有效避免Monel400合金形成氧化膜,防止气孔、夹渣、裂纹、未熔合和咬边等缺陷的产生,提高焊接性能。

该设备焊接接头的保护效果同氩气的流量和焊枪的喷嘴直径相关:①当焊枪喷嘴直径一定时,氩气流量过低时,气流挺度差,排除焊缝熔池周围空气的能力弱,对焊接接头的保护效果不佳;氩气流量过高时,容易形成紊流,将空气卷入焊缝熔池,容易产生裂纹,降低焊接接头保护效果。②当氩气流量一定时,焊枪喷嘴直径过小,对焊接接头周围保护范围小,并且容易造成氩气气流速度过高而形成紊流;喷嘴直径过大时,妨碍焊工观察,同时造成氩气气流流速降低,降低保护效果。

根据查阅资料,喷嘴直径同气体流量关系见表5,通过试验确定喷嘴直径同气体流量的最佳关系。

表5 喷嘴直径与气体流量关系

喷嘴孔径/mm	气体流量/ $L \cdot min^{-1}$	喷嘴孔径/mm	气体流量/ $L \cdot min^{-1}$
6	6~8	12	10~12
8	8~10	14	10~12
10	8~10	16	12~16

(2) 钨极直径及端部形状 钨极直径与焊接电流大小、电流种类相关;钨极端部形状是钨极直径选择重要的工艺参数。根据所用焊接电流种类,选用不同的端部形状。同样,尖端角度的大小会影响钨极电流、引弧及稳弧性能。钨极直径与电流关系见表6。

4.5 焊接材料的选择

Monel400合金间焊接时,应选用的焊丝成分与母材基本接近或优于母材的焊丝,但是为了补充在焊接过程中元素的烧损,控制气孔、裂纹的产生,

表6 钨极直径与电流关系

钨极直径 /mm	尖端直径 /mm	尖端角度 / (°)	恒定电流 /A
2.0	0.2	20	10~70
2.4	0.4	22	12~90
2.4	0.5	26	15~150
3.2	0.6	28	20~200
3.2	0.8	30	25~250

需在焊丝中加入一些合金元素，如Mo、W、Mn、Cr、Nb等，可有效控制焊缝多边形晶界的产生和发展，提高Monel400合金焊缝抗热裂纹能力。因此，

表8 Monel400合金焊接参数

层次	道次	喷嘴直径 /mm	氩气流量 /L·min ⁻¹	焊接速度 /cm·min ⁻¹	电弧电压 /V	焊接电流 /A	钨极直径 /mm	最大热输入 /kJ·cm ⁻¹
第一层	单道	12	8~10	4.5~6	16~20	160	3.2	32
第二层	单道	12	8~10	5~7	16~18	160	3.2	33.4
第三层	单道	12	8~10	5.5~7	16~18	160	3.2	33.4
第四层	第一道	12	10~12	5~7	16~18	150	3.2	31.3
	第二道	12	10~12	5~7	16~18	150	3.2	31.3
第五层	第一道	12	10~12	5.5~7.5	16~18	150	3.2	33.7
	第二道	12	10~12	5.5~7.5	16~18	150	3.2	33.7
	第三道	12	10~12	5.5~7.5	16~18	150	3.2	33.7
	第四道	12	10~12	6~8	14~16	145	3.2	34.7

4.7 焊接过程控制

1) 由于Monel400镍铜合金的熔敷金属流动性差，因此严禁通过提高焊接电流来增加焊缝金属的流动性，因为焊接热输入过大，焊接接头容易过热，造成晶粒长大，同时会增加热裂纹和气孔产生的概率。

2) 在焊接过程中，应避免电弧搅动熔池；加热焊丝端应保护在氩气中，避免热的末端氧化和造成污染；焊接收弧时，熄弧前液态金属应填满弧坑。

3) 在焊接过程中，当钨极触及熔池或焊丝熔化端时，应立即停止焊接作业，并清除钨极接触部分的焊缝金属后再继续施焊。

4) 填充焊丝应从熔池的前端进入熔池，避免其与钨极接触。

5) 为防止焊缝被氧化，应将层间温度控制在

手工钨极氩弧焊选用国际钛合金公司（简称SMC公司）生产的Monel60（ ϕ 2.4mm）的填充材料，其化学成分见表7。

表7 Monel60焊丝的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	Fe	S	Ni	Cu	Ti	Cr	Co	Mo	P
—	1.0	2.0	1.5	—	65	32	2.2	—	0.02	—	—

4.6 焊接参数

通过对Monel400合金间焊接工艺研究和焊接试验，确定该设备直筒段纵焊缝、直筒段与下锥体环焊缝，以及下锥体纵焊缝的焊接参数见表8。

100~150℃。

6) 焊接过程中保护气体流量选择在8~12L/min，保护气体流量过大时，可能造成气体紊流，影响焊缝的冷却速率，从而对焊缝造成不利影响。

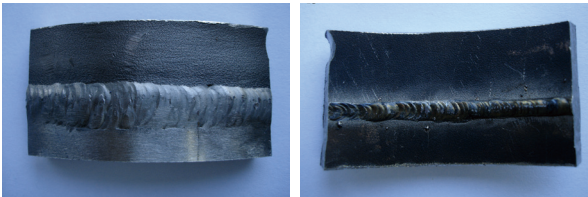
7) 选用带垫板焊接工艺，确保根部焊透，提高熔池保护效果。焊接接头的X射线检测、力学性能检测、金相组织检测都满足材料性能指标。

5 试验结果与分析

5.1 无损检测

焊后经过严格的清理后，对试件焊接接头进行外观检测，焊缝成形良好，焊缝表面无明显缺陷，焊接试样如图3所示。反应器器体焊接完毕24h后，按照NB/T 47013.2—2015《承压设备无损检测》对直筒段纵焊缝、直筒段与下锥体环焊缝，以及下锥

体纵焊缝进行100%X射线检测，均未发现裂纹等缺陷，焊接质量达到 I 级要求。



a) 正面 b) 反面

图3 Monel400焊接试板

5.2 焊接接头拉伸与弯曲性能分析

按照标准GB 2651—1989《焊接接头拉伸试验方法》对Monel400合金焊接接头拉伸试验进行取样，如图4所示。采用GMT5105型万能试验机和弯曲试验机按照NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》对Monel400合金焊接接头进行力学性能和弯曲性能检测，试验结果见表9。

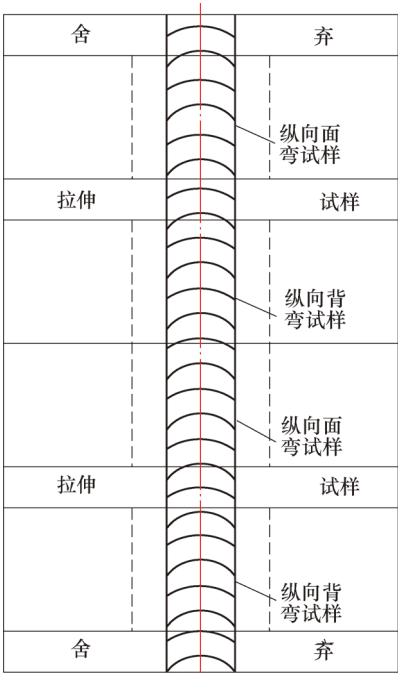


图4 焊接接头力学性能取样

Monel400合金母材的抗拉强度为585MPa，焊接接头的抗拉强度为565MPa，相当于母材强度的96.6%，基本达到与母材等强度的要求；焊接接头弯曲（面弯、背弯）180°后均未发现裂纹产生，表明Monel400合金焊接接头的强度和塑性较好，均能满足NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》的要求。

表9 Monel400合金焊接接头力学性能数据及结果

抗拉强度 /MPa	弯曲 (面弯) $d=4a$	弯曲 (背弯) $d=4a$	断裂位置	熔敷金属化学成分 (质量分数，%)			
				Ni	Cu	Fe	Mn
565	180° 合格	180° 合格	母材	64.8	30.2	1.23	1.01

5.3 焊接接头显微硬度

采用HXS-1000AY型数字式智能显微硬度计，分析Monel400合金焊接接头的显微硬度分布，从熔合线开始，沿着熔合线的方向，向熔合线两边进行测量，左侧数据代表焊缝距熔合线距离，右侧数据代表母材离熔合线距离，显微维氏硬度与熔合线距离的变化如图5所示。

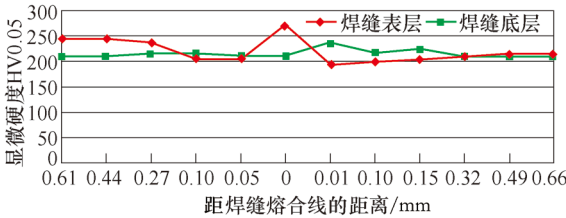


图5 Monel400合金焊接接头显微硬度分布

从图6可以看到，表面焊缝硬度值较高，热影响区硬度值较低；底层焊缝硬度值较低，热影响区稍高；在接近熔合线位置硬度显著提高，在熔合线上的硬度最高，并且高于母材。

6 结束语

- 1) Monel400合金间焊接，焊丝选用国际钛合金公司（简称SMC公司）Monel60（ ϕ 2.4mm）的填充材料，焊接方法采用手工钨极氩弧焊进行焊接。
- 2) Monel400合金间焊接层间温度控制在100~150℃。
- 3) Monel400合金间焊接过程中氩气气体流量控制在8~12L/min。
- 4) Monel400合金间焊接焊机喷嘴直径应选为 ϕ 12mm，钨极直径应选为 ϕ 3.2mm，焊接电流控制在155~175A，焊接电压控制在14~20V，焊接速度控制在25~75mm/min。
- 5) Monel400合金焊缝进行100%X射线检测，焊接质量达到 I 级要求。
- 6) Monel400合金焊接接头的抗拉强度为

超低温管系MIG焊接工艺技术研究

吴妍

中国焊接协会 黑龙江哈尔滨 150028

摘要：通过对超低温管系MIG焊接关键技术的分析研究，提出了解决措施，改善了超低温管系MIG焊焊接难、效率低的问题。

关键词：超低温；MIG焊；焊接工艺

1 序言

LNG-FSRU船的主要特点之一是大量应用了超低温液货及控制管系。超低温管系设计温度为 -196°C ，材质为奥氏体不锈钢（304L和316L），大部分管材为大口径薄壁管（最大 $\phi 600\sim\phi 700\text{mm}$ ），管子制作对接焊精度要求高、难度大，焊接过程的任何缺陷及焊接应力都很可能造成管系制作的质量问题，制作过程中必须通过100%射线检测。超低温管系传统的焊接方法均采用手工TIG焊，效率低、质量难保证。为适应当前的造船形势，应用高效率的MIG焊接方法及焊接材料，开展相关的焊接试验及力学性能、化学成分分析，以满足超低温管系焊接技术要求，对于LNG-FSRU船的建造十分关键。

2 MIG焊接工艺研究

(1) MIG焊接设备及工艺特点

1) 焊接设备：选用瑞典ESAB的MIG焊接设备，型号为MIG 4004i pulse（见图1），焊接设备由焊接电源、送丝机构、供气系统和焊枪构成。

2) 工艺特点：熔化极惰性气体保护焊熔敷效率高，熔深较大，焊缝成形较好，焊接电弧稳定、飞溅小、速度快、变形小，是一种高效的焊接方法，可应用于全位置焊接。

(2) 焊接材料的选择 由于超低温不锈钢管在低温条件下工作，具有耐低温等特点，因此在焊接材料的选择匹配上要保证焊接接头的低温冲击韧度（试验温度为 -196°C ）。

(3) 保护气体的选用 MIG焊焊接不锈钢管

565MPa，低于母材，相当于母材强度的96.6%，基本达到与母材等强度的要求；焊接接头弯曲（面弯、背弯） 180° 后均未发现裂纹产生，满足NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》的要求。

参考文献：

- [1] VENTRELLA V A, BERRETTA I R, ROSSI W. Micro welding of Ni-based alloy Monel400 thin foil by pulsed Nd: YAG laser[J]. Physics Procedia, 2011 (12): 347-354.
- [2] 叶唐, 胡传顺, 秦华, 等. Monel400合金腐蚀行为的研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35 (22): 36-38.
- [3] 阮鑫, 谷菲菲, 齐光辉, 等. 化工用Monel400容器的

焊接裂纹成因及优化工艺[J]. 焊接, 2001 (9): 38-39.

- [4] 单忠斌, 张先龙, 都宏海, 等. Monel400合金焊接工艺应用研究[J]. 金属加工（热加工）, 2016 (10): 52-53.
- [5] 王生章. Monel400的焊接技术研究[J]. 化工设备与装置, 2019 (8): 215-219.
- [6] 王培, 赵生胜, 陈红卫, 等. 氟化生产中蒙乃尔焊接接头抗腐蚀性能研究[J]. 焊接, 2009 (8): 45-47.
- [7] 冯成红. 蒙乃尔合金复合钢板焊接接头结构设计[J]. 化工设备与管道, 2002, 3 (39): 41-42.

MW 20210708