

Welding Technology and Application of Copper-Nickel Alloy and Low Alloy Steel

Bao'an Wu*, Xu Qing, Liguang Liang, Xiaopeng Yang

China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Email: *gj-5c-wba@cnpc.com.cn, cppqingxu@cnpc.com.cn, liangliguo@cppmde.com,

cppyangxiaopeng@cnpc.com.cn

Received: Apr. 28th, 2020; accepted: May 28th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

The thermal conductivity of copper-nickel alloy is much higher than that of low-alloy steel. Therefore, it is difficult to weld copper-nickel alloy with low-alloy steel, and welding defects such as cracks and porosities are easy to occur in the welding seam and fusion zone, which brings great operational difficulties to the actual operation. Through the analysis of the welding technology quality of copper-nickel alloy and low-alloy steel, the welding technology and welding process are introduced emphatically, and the welding experience of copper-nickel alloy and low-alloy steel is summarized, which provides a reference for the similar engineering construction.

Keywords

Copper-Nickel Alloy, Low-Alloy Steel, Welding Technology, Application

*通信作者。

铜镍合金与低合金钢焊接工艺及其应用

武保安*, 青旭, 梁立国, 杨晓鹏

中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊

Email: *gj-5c-wba@cnpc.com.cn, cppqingxu@cnpc.com.cn, liangliguo@cppmde.com, cppyangxiaopeng@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年4月28日; 录用日期: 2020年5月28日; 发布日期: 2020年6月15日

摘要

铜镍合金的导热率远远大于低合金钢的导热率, 因此铜镍合金与低合金钢焊接的难度大, 焊缝及熔合区易产生裂纹、气孔等焊接缺陷, 给实际操作带来了极大的操作困难。通过铜镍合金与低合金钢的焊接工艺质量分析, 重点介绍焊接工艺和焊接过程, 并总结铜镍合金与低合金钢焊接经验, 为同类工程施工提供借鉴。

关键词

铜镍合金, 低合金钢, 焊接工艺, 应用

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沙特哈拉德油气田距沙特胡富夫市西南约 150 公里, 达曼西南 270 公里。沙特阿拉伯哈拉德 - 哈维亚天然气管道项目是沙特阿美公司哈拉德油田新规划建设的一项重点工程, 建成投产后, 将促进哈拉德油田大幅提高产能。项目主要包括主线路施工约 302 km, 10 座站场、3 座阀室。沙特阿美标准规范中要求, 在非酸性条件下, 场站水管线上的放空阀和排污阀设计为铜阀门, 连接阀门的铜镍材质丝头短节与低合金钢母管之间联接方式为焊接式联接。

铜镍合金与低合金钢的焊接性主要困难是在焊缝及熔合区易产生裂纹和气孔[1]。铜镍合金与低合金钢间焊接操作不易控制, 控制好此类焊接, 对于整个项目的焊接质量管控是具有重要意义的, 同时可以为今后同类工程施工提供借鉴的焊接经验。

2. 可焊性分析

2.1. 铜镍合金特性

铜镍合金: 铜镍合金是以铜和镍为主的合金。纯铜加镍能显著提高强度、耐蚀性、硬度、电阻和热电性, 并降低电阻率温度系数。因此铜镍合金较其他铜合金的机械性能、物理性能都异常良好, 延展性好、硬度高。

影响铜合金焊接性的工艺难点主要有四项元素：一是高导热率的影响。铜的热导热率比碳钢大7~11倍，当采用的工艺参数与焊接同厚度碳钢差不多时，则铜材很难熔化填充金属和母材也不能很好地熔合。二是焊接接头的热裂倾向大。焊接时，熔池内铜与其中的杂质形成低熔点共晶物，使铜及铜合金具有明显的热脆性，产生热裂纹。三是产生气孔的缺陷比碳钢严重得多，主要是氢气孔。四是焊接接头性能的变化。晶粒粗化，塑性下降，耐蚀性下降等[2] [3]。铜镍合金 C70600 的化学成分及力学性能如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Chemical composition of C70600

表 1. C70600 材料化学成份

材料	C	Mn	S	P	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Pb	V	Zn	Fe
C70600	--	0.014	--	--	--	--	--	9.76	REM	--	0.01	--	0.024	1.32

Table 2. Mechanical property of C70600

表 2. C70600 材料机械性能

材质	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率%
C70600	119	325	30

2.2. 低合金钢特性

A333-6 钢属于低合金钢，一般采用正火或正火加回火状态供货。A333-6 钢无缝钢管的化学成分及力学性能如表 3 和表 4 所示。

Table 3. Chemical composition of A333-6

表 3. A333-6 材料化学成份

材料	C	Mn	S	P	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Pb	V	Zn	Fe
A333-6	0.16	0.86	0.009	0.017	0.31	0.006	0.003	0.001	0.004	0.002	--	0.001	--	REM

Table 4. Mechanical property of A333-6

表 4. A333-6 材料机械性能

材质	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率%
A333-6	293	492	39

由表 3 和表 4 中可知，A333-6 钢在含碳量较低，因此淬硬和冷裂倾向都比较小，材质韧性和塑性较好，一般不易产生硬化和裂纹缺陷，可焊性好。

3. 焊接工艺及试验结果

3.1. 焊接方法及选择

3.1.1. 焊接方法

哈拉德场站的焊接执行沙特阿美焊接标准 SAES-W-011，同时执行国际通用标准 ASME SEC IX-2017、ASME B31.3-2016、ASME BPVC.II.C-2015。站内的铜镍合金与低合金碳钢的公称管径全部小于等于 50.8 mm，根据标准 SAES-W-011 中要求，公称管径小于等于 50.8 mm 的工艺管道的焊缝根焊必需采用氩弧焊方法，同时考虑到焊接的管径小，焊缝的填充与盖面也选用氩弧焊方法。

3.1.2. 氩弧焊

氩弧焊, 是使用氩气作为保护气体的一种电弧焊方法。氩弧焊按照电极的不同分为熔化极氩弧焊和非熔化极氩弧焊(通常指钨极氩弧焊)两种。钨极氩弧焊与熔化极氩弧焊相比, 操作技术更易被掌握, 对现场操作空间要求低, 已经广泛应用于石油天然气场站施工的管道焊接[4]。

3.1.3. 氩弧焊的优点

- 1) 氩气是惰性气体, 不与金属产生化学反应, 氩气保护可隔绝空气中氧气、氮气、氢气等对电弧和熔池产生的不良影响, 使高温下被焊金属中的合金元素不会氧化, 减少合金元素的烧损, 同时氩气不溶解液态金属, 能有效保护熔池金属, 保护效果好, 因此能获得较高的焊接质量。
- 2) 氩弧焊的电弧燃烧稳定, 热量集中, 弧柱温度高, 焊接生产效率高, 热影响区窄, 所焊的焊件应力、变形、裂纹倾向小。
- 3) 氩弧焊为明弧施焊, 操作、观察方便, 操作技术易于掌握, 而且焊缝成型美观, 质量好。
- 4) 氩弧焊几乎能焊接所有金属, 特别是一些化学性质活泼的金属和合金, 如铜、镁、钛、铝等及其合金。
- 5) 不受焊件位置限制, 可进行全位置焊接。
- 6) 无焊渣, 用于管道的根部焊接时, 能保证管道内部焊接的清洁度。

3.1.4. 焊接工艺确定

根据标准 SAES-W-011 中要求, 以及钨极氩弧焊操作简单, 能够适应现场复杂施工空间的特点, 确定铜镍合金 C70600 与低合金碳钢 A333-6 的焊接工艺为钨极氩弧焊。

3.2. 焊接材料

按与焊接管材化学成份及机械性能相匹配的原则, 选择焊接材料。与铜镍合金 C70600 管材最佳匹配的焊丝为铜镍焊丝 ERNiCu, 但 ERNiCu 焊接材料的机械性能低, 与低合金 A333-6 的机械性能不匹配; 而且 ERNiCu 焊材的抗裂性, 无法满足因低合金与铜合金的热导率差距大而产生的裂纹倾向。所以选择用机械性能高, 抗裂性好的镍铜焊丝 ERNiCu-7 [5] [6], 焊丝直径为 2.0 mm, 焊材化学成分详见表 5, 机械性能见表 6。

Table 5. Chemical composition of welding consumables

表 5. 焊材化学成份

焊接材料	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cu	Ti	Nb	Fe
ERNiCu-7	0.01	3.5	0.001	0.003	0.1	64.4	29.1	2.3	0.09	0.7

Table 6. Mechanical property of welding consumables

表 6. 材料机械性能

材质	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率%
ERNiCu-7	300	500	30

3.3. 焊接工艺参数

焊接过程中采用多层多焊道, 焊接工艺参数详见表 7。

氩气流量 25~30 L/min, 背氩流量 25~30 L/min。

Table 7. Parameter in WPS

表 7. 焊接工艺参数

焊接层 Weld Pass(es)	焊接方法 Process	焊接材料 Fille Metal		电特性 Current Type		焊接电压 Volts (V)	焊接速度 Travel speed (mm/min)	线能量 Heat Input (KJ/mm).
		型号 Classification	规格 Diameter (mm)	极性 Polarity	焊接电流 Amps (A)			
Root	GTAW	ERNiCu-7	2.0	DCEN	126-130	10-13	51-77	1.380
Hot	GTAW	ERNiCu-7	2.0	DCEN	127-130	10-13	56-120	1.007
Cap	GTAW	ERNiCu-7	2.0	DCEN	117-119	10-13	45-53	1.662

3.4. 焊接缺陷

铜镍合金与低合金碳钢焊接容易出现的缺陷有：裂纹，气孔。

3.4.1. 裂纹的控制

选用硫，磷含量较低，镍含量高的镍铜焊丝 ERNiCu-7，防止熔敷金属中低熔点夹杂物产生，提高焊接接头的抗裂能力；清理干净焊缝坡口及两侧的污物、氧化层等杂质，防止杂质混入熔敷金属中；控制热输入量与层间温度，防止焊缝过热及热影响区过热产生热裂纹；控制焊接摆速与摆宽，防止铜合金熔池与低合金的导热不同而产生的收缩冷裂纹；焊缝表面要均匀平整，圆滑过渡，防止超高或高低不平应力集中。

3.4.2. 气孔的控制

焊接前焊件的坡口及两侧各至少 25 mm 范围内的焊件表面附着杂物清理干净；选择合适的焊接喷嘴直径，喷嘴与焊件间的距离在 8~14 mm，控制钨极端部突出喷嘴的伸出长度在 3~4 mm，焊枪氩气流量 25~30 L/min，使焊接熔池处于氩气的完全保护之中；做好环境防风措施，减少自然风对焊接过程的影响。

3.5. 质量检查

3.5.1. 外观检查

根据阿美焊接检验标准 SAES-W-011 要求，焊缝表面应无飞溅、裂纹、气孔、咬边、余高过高、凹陷等缺陷，宽窄均匀、圆滑过渡。

焊缝表面的飞溅、裂纹、气孔、咬边、余高过高等缺陷，采用打磨的方法进行处理；表面凹陷可采用补焊与打磨相结合的方法进行处理。

3.5.2. 无损检测

焊缝内部未熔合，夹渣、气孔等焊接缺陷需要进行无损检测。对接焊缝采用 100% 射线检测 RT (Radiography Testing)，角焊缝采用 100% 液体渗透检测 PT (Liquid Penetrant Test)，承插焊还需要进行 10% RT 抽查检测，检测结果要符合 ASME B31.3 中的要求。

检测不合格的焊缝按返修工艺进行返修，同一不合格部位的返修次数不得超过 2 次。

3.5.3. 机械性能试验

焊接工艺评定试件按 ASME B31.3-2016 射线检测标准评定合格后，根据 ASME SEC IX-2017 中 QW-451 要求进行拉伸和弯曲试验，并宏观检测，机械性能试验要均符合规范要求[7] [8]。机械性能结果详见表 8，试件详见图 1、图 2、图 3。

4. 返修工艺

根据 ASME SEC IX-2017 中 QW-202.1 的规定, 在坡口试件上评定合格的焊接工艺可以作为坡口焊缝及角焊缝的返修焊接工艺。本文中铜镍合金与低合金钢的返修焊接工艺与其主焊接工艺为同一焊接工艺。

Table 8. Mechanical performance results

表 8. 机械性能结果

试样编号	拉伸试验		弯曲试验		
	抗拉强度 MPa	结果	试样编号	180°弯曲方向	结果
T1	392	合格	FACE-1 FACE-2	面弯	合格
T2	353	合格	ROOT-1 ROOT-2	背弯	合格



Figure 1. Tensile test

图 1. 拉伸试验



Figure 2. Bend test

图 2. 弯曲试验

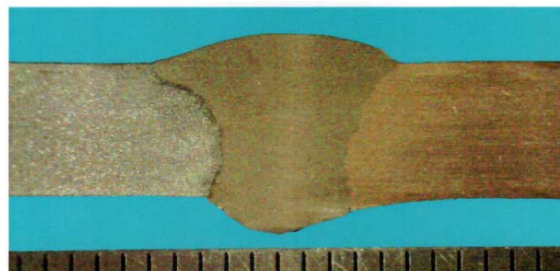


Figure 3. Macro test

图 3. 宏观试验

5. 应用

铜镍合金与低合金钢焊接工艺在该项目 HGP 站中得到实际应用。在应用过程中,通过采用有效管理控制措施,获得了高质量的焊缝。

5.1. 材料验收

铜镍合金管材及焊材 ERNiCu-7 严格按沙特阿美标准 Inspection Requirements for Contractor Procured Materials and Equipment SAEP-115 进行验收,重点验收材料的外观质量、出厂质量资料是否齐全,并按阿美标准 Positive Material Identification SAES-A-206 进行材料化学分析 PMI (Positive Material Identification),经过验收合格后方可进场使用,确保施工材料的质量符合标准规范要求。

5.2. 焊前培训

正式施焊前,项目部组织电焊工进行焊前培训,对初期培训焊接的 10 道焊口进行 RT 检测,其中有 5 道焊口不合格,全部为气孔缺陷。经过原因分析,改进行焊工操作手法及氩气保护措施后,再培训焊接的 10 道焊口,经检测全部合格。焊前培训为铜镍合金焊接提供了合格的焊接操作人员。

5.3. 现场焊接管理

现场焊接过程中采取了以下管理措施:

- 1) 坡口清理:坡口及两侧各 25~30 mm 范围内的焊件表面附着杂物清理干净。
- 2) 气体保护:控制焊枪氩气流量在 25~30 L/min 之间,使焊缝内表面及外表面处于氩气的完全保护之中,并做好防风措施,减少风对焊接过程的影响。
- 3) 控制焊接电流:因铜合金导热率高,需要大焊接电流才能将其熔化;液态铜流动性好,焊接电流过大,熔池容易出流淌现象,所以焊接电流要控制在 120~130 A 之间。
- 4) 控制焊接摆动:铜镍合金一侧母材导热率高,焊接时不易完全熔合,在焊接摆动的时,铜镍合金一侧减缓焊接摆速,低合金一侧保持正常焊接摆速。

5.4. 检测结果

HGP 站中铜镍合金与低合金钢的焊口共 30 道,外观检测 100% 合格,焊口 RT 检测全部合格,焊接一次合格率为 100%。

6. 结论

- 1) 实践证明,采用焊丝 ERNiCu-7 焊接铜镍合金与低合金钢,其焊接工艺参数及坡口角度的选择是正确的。
- 2) 铜镍合金与低合金钢的导热率差距很大,焊接过程中易产生裂纹,相对铜与铜之间有色金属焊接难度更大。通过合理控制焊接热输入量及层间温度,能够有效控制焊接裂纹。
- 3) 液态铜中氢的溶解度很大;凝固后,溶解度又降低。焊接时,焊缝冷却很快,过剩的氢来不及逸出,容易形成氢气孔。做好气体防护措施,使焊接熔池处于氩气的完全保护之中,可以避免焊缝产生气孔缺陷。
- 4) 本文总结的铜镍合金与低合金钢焊接经验可以为同类工程施工提供借鉴。

参考文献

- [1] 李亚江,王娟,刘强. 有色金属焊接及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006:32-36.

- [2] 严连菊, 傅存海. C70600 铜镍合金焊接工艺[J]. 科技信息; 2012(29): 170.
- [3] 陈明奎, 陈伟, 赵祖康. 白铜复合板的焊接工艺试验[J]. 焊接技术, 2001, 30(z1): 43-44.
- [4] 孙景荣. 氩弧焊技术入门与提高[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 5-9.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. 镍及镍合金焊丝[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] The American Society of Mechanical Engineers (2016) ASME B31.3-2016. ASME Code for Pressure Piping, B31.
- [7] ASME 锅炉及压力容器材料委员会, 著. ASME BPVC.II.C-2015 [S]. 中石协 ASME 规范产品专业委员会, 译. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- [8] ASME 锅炉及压力容器焊接、钎接和粘接委员会, 著. ASME SEC IX -2017 [S]. 中石协 ASME 规范产品专业委员会, 译. 北京: 中国石化出版社, 2017.