Gr420E大型铸钢件与F36低合金钢厚板焊接工艺研究

吴建新，陈潇潇，刘琴，吴凤民
启东中远海运海洋工程有限公司　江苏南通　226200

摘要：以某海工装备的大型铸钢件焊接制造为背景，对150mm厚的NORSOK M-122 Gr420E铸钢件和75mm厚的F36低合金钢试板进行了异种焊接接头工艺试验，介绍了焊接方法、焊接材料选择、坡口设计、焊接参数优化、焊接试板的性能检测，以及焊接质量控制要点。工艺试验结果和生产建造表明：在充分预热条件下，严格控制层间温度和焊接热输入，可以获得满足建造要求的焊接接头。

关键词：铸钢件；厚板；焊接工艺评定；CTOD试验

Studying on the welding procedure of heavy casting Gr420E and low alloy steel heavy plate F36

WU Jianxin, CHEN Xiaoxiao, LIU Qin, WU Fengmin
COSCO Shipping(Qidong) Offshore Co., Ltd., Nantong 226200, Jiangsu, China

Abstract: Based on the welding fabrication of heavy cast steel components for offshore equipment, welding procedure qualification test is conducted on dissimilar weld joint between casting NORSOK M-122 Gr420E with thickness 150mm and low alloy steel F36 with thickness 75mm. This study details the welding process, welding consumable selection, groove design, optimization of welding parameters, mechanical property test, and critical point of welding quality control. The results of process test and construction production show that welded joints meeting construction requirements can be obtained through adequate preheating before welding, strict control of interpass temperature and welding heat input.

Keywords: cast steel; heavy plate; welding procedure qualification; CTOD test

1　序言

铸钢作为一种常见的焊接结构材料，在载荷大、受力复杂的节点部位有着广泛应用。然而，铸钢自身碳当量高，多为厚壁件，结构复杂，组织晶粒粗大且致密性差，导致其焊接难度远高于轧制碳素钢[1]。随着现代海工平台不断向大型化发展，设计日益复杂，性能要求持续提高，铸钢的应用变得更加普遍。在此背景下，提高铸钢与高等级异种材料的焊接工艺水平，成为保证铸钢得以有效应用的关键举措与必要措施。

第一作者：吴建新，高级工程师，主要研究方向为船舶与海洋工程焊接及金属热加工。

异种材料因物理性能、化学成分和线膨胀系数的不同，焊接时应力大，容易影响焊接接头的质量。太原重工股份有限公司的王波[2]研究了高锰铸钢ZG120Mn13和承压铸钢ZG25CrNi2Mo异种材料的焊接工艺，徐工矿业机械有限公司的侍孝建等[3]研究了高锰铸钢ZGMn18与低合金铸钢G20Mn5异种材料的焊接工艺，海洋石油青岛有限公司的陆传航等[4]研究了ASTM A148 Gr.90-60铸钢与E36低温碳锰钢焊接工艺，这些都具有很好的借鉴意义。我公司承接的非标大型铸钢件具有强度高、低温韧性要求高，以及刚性约束大的特点，容易在焊缝及热影响区出现焊接性能不合格或裂纹等缺陷，为解决以上焊接难点，本文以该大型非标铸钢件与低合金钢厚板的异种材料焊接工艺为研究对象，展开详细探讨，旨在满足建造需求，为实现高质量焊接提供可靠的技术支持，积累低温高强铸钢件焊接经验。

图 1　铸钢件三维

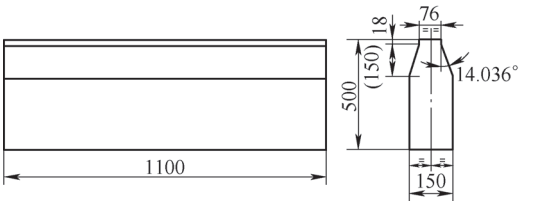

图2　铸钢件试板结构尺寸

2　材料性能

2.1　铸钢材料性能

本项目所使用的铸钢件为满足NORSOK M-122 Gr420级别要求的KRAYLOS 420材料，供货状态为淬火＋回火。铸钢件是一个直径约3.6m的管状支撑结构件，最大壁厚约450mm，重量约130t。铸钢件立向和周向焊接区域的厚度从150mm减薄到75mm，如图1所示。为了更好地模拟生产现场焊接，使用同牌号、同厚度以及同减薄形式的铸钢件试板与低合金钢F36进行焊接工艺评定，铸钢件试板结构尺寸如图2所示，力学性能见表1。

铸钢件试板化学成分见表2。从表2可知，铸钢件试板碳当量C_{eq}=0.479%。一般认为，当C_{eq}≤0.4%时，材料的焊接性较好，当0.4%＜C_{eq}＜0.6%时，材料的焊接性稍差，当C_{eq}＞0.6%时，材料的焊接性很差，难以焊接[5]。综合以上分析，该铸钢件结构复杂，壁厚较厚，碳当量较高，焊接难度较大。

表1　铸钢件试板力学性能

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	－40℃冲击吸收能量/J	伸长率（%）	裂纹尖端张开位移值（CTOD）/mm
标准值	≥420	≥540	≥42	≥20	≥0.25
实测值	468	583	106	26	0.57

表2　铸钢件试板化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	S	P	Mn	Si	Al	Sn	As
标准值	≤0.140	≤0.008	≤0.012	≤1.600	≤0.600	≤0.050	≤0.015	≤0.020
检测值	0.097	0.001	0.008	1.402	0.497	0.041	0.008	0.006
元素	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Sb	Cr	
标准值	≤1.500	≤0.300	≤0.250	≤0.050	≤0.0400	≤0.0100	≤0.250	
检测值	1.363	0.085	0.134	0.024	0.0017	0.0011	0.135	

因铸钢件试板厚度较厚，且因铸造工艺本身的局限性，可能达不到厚度方向性能的均匀性。为了验证试板厚度方向上的性能，提高工艺的成功率，分别选取1/2和3/4板厚处进行圆棒拉伸试验，结果见表3。从表3可知，实测结果满足材料力学性能要求。另外，选取厚度方向上的横截面进行维氏硬度

试验，结果见表4。从表4可看出，厚度方向上近上表面、1/2板厚处、近下表面的维氏硬度值在184～211HV10，在一定程度上验证了其厚度方向上铸造组织的均匀性。

表3　铸钢件试板性能实测值

试验项目	最大力/kN	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率（%）	断面收缩率（%）
1/2板厚处试样	85.066	558.970	455.437	26.5	71.8
3/4板厚处试样	84.183	562.831	456.749	25.0	74.3

表4　铸钢件试板厚度方向硬度　（HV10）

位置	硬度					
距上表面2mm	187	196	197	199	195	201
1/2板厚	196	209	202	203	208	201
距下表面2mm	186	193	208	190	189	197

2.2　F36低合金钢材料性能

F36低合金钢（执行GB/T 712—2022《船舶及海洋工程用结构钢》）供货状态为正火，具体化学成分见表5，力学性能见表6。

表5　F36低合金钢试板化学成分（质量分数）　（%）

元素	C	S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
标准值	≤0.160	≤0.025	≤0.025	≤1.600	≤0.500	≤0.200	≤0.080	≤0.800	≤0.350	≥0.020
检测值	0.120	0.0015	0.011	1.560	0.300	0.040	0.010	0.180	0.030	0.040

表6　F36低合金钢力学性能

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	−60℃冲击吸收能量/J	伸长率（%）
标准值	≥355	≥40	≥50	≥21
实测值	416	542	222	31.5

3　焊接工艺试验

3.1　焊接方法的选择

焊条电弧焊（SMAW）及药芯焊丝电弧焊（FCAW）都是焊接铸钢件的可靠方法，考虑到该大型铸钢件体积大、焊接区域多、焊接量大，因此选择药芯焊丝电弧焊（FCAW）作为首选焊接方法。

3.2　焊材的选择

该铸钢件和F36低合金钢的焊接要求满足焊态下焊缝的裂纹尖端张开位移值在最高热输入下≥0.25mm（−10℃），夏比V型冲击试验冲击吸收能量平均值≥42J（−40℃），因此对焊接材料的韧度要求很高。考虑到纯CO_2气体氧化性较强，冶金焊接性不理想，选择使用DW-A55LSR（AWS A5.29 E81T1-Ni1M）焊接材料配合80%Ar＋ 20%CO_2混合气体进行焊接。以期减少合金元素的烧损，提高焊缝的低温韧度。

3.3　坡口设计

因铸钢件较厚，为了减少焊接量及焊接应力，经计算，建造时采用双面40°小坡口设计，间隙R＝3～5mm，钝边f＝1～2mm。焊接工艺试验坡口形式模拟建造坡口设计（见图3），并采用机械加工方式切割制备坡口。

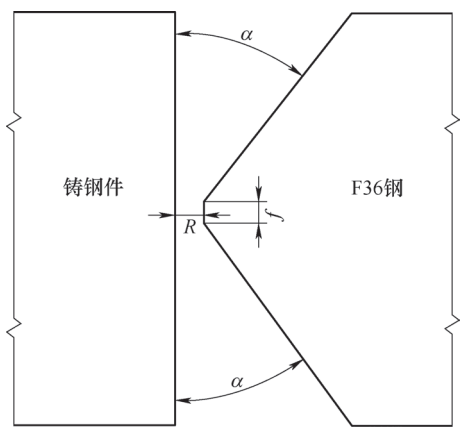

图3　坡口形式

3.4　焊接温度控制

铸钢焊接时，如果焊缝及其临近的母材快速冷却，会导致硬化，从而引起开裂，因此需要进行预热。此外，充分的预热还能有效减少焊接变形和焊接应力，确保尺寸精度。本焊接工艺中使用电阻丝加热带进行预热，使坡口及两侧各75mm内的温度

≥150℃，并尽量保证整个预热范围内温度均匀，温差≤30℃。

3.5 焊接过程控制

铸钢件焊接时，需要严格控制焊接时的热输入，每层焊道热输入＜1.8kJ/cm。焊接电流、电弧电压根据焊接位置的不同进行调控，具体焊接参数见表7。

表7 焊接参数

焊接参数	打底层	填充层	盖面层	打底层	填充层	盖面层
焊接位置	横焊			向上立焊		
焊接电流/A	220～250	230～270	230～250	180～200	200～230	180～200
电弧电压/V	24～26	25～28	25～27	22～23	23～25	22～23
焊接速度/（mm/min）	250～280	360～420	400～450	150～170	170～230	190～240
保护气流量/（L/min）	15～25	15～25	15～25	15～25	15～25	15～25

每层焊道焊接前，在试焊板上用表7中的焊接电流、电弧电压试焊，并根据焊接长度和时间计算焊枪移动速度，待计算的热输入在要求的范围内后，在工艺试板上按照确定的焊接电流、电弧电压和试焊时的焊接速度正式焊接，并记录焊接数据。

尽量保证连续施焊，避免多次引弧、熄弧，如不可避免时，可在试板的中间引弧、熄弧，同时应将引弧、熄弧点错开，以减少应力集中。

每次焊接前，将瓶装混合气先打开阀门放空15～20s，排出较轻的杂质，使正式焊接时的气体流量趋于稳定。在气压降到5MPa以下时需要更换气瓶，以免因气压不足，混入空气。

每焊接完成一道都要及时清理焊渣及飞溅物，禁止使用风铲，以免将焊缝及铸钢件热影响区振出裂纹。

严格控制焊接速度和摆动宽度，保证每层熔敷金属厚度≤5mm，焊道宽度≤16mm。使用摆动焊接操作时，应在靠近坡口面的焊接熔池边缘短时停留，保证坡口面金属熔化，防止出现未熔合。

严控层间温度，尽量将温度控制在150～220℃。焊接完成后，使用保温棉包裹铸钢件焊接试板，使其缓慢冷却到室温。

4 工艺试板性能检测

工艺试板完成焊接后，进行了超声波检测和磁粉检测，结果合格。根据力学性能试验规格书进行拉伸试验、弯曲试验、夏比V型冲击试验、维氏硬度检测、宏观金相检测及全厚度试样的裂纹尖端张开位移试验。

4.1 拉伸试验

每块焊接工艺试板取2组横向拉伸试样，每组2个试样的取样位置如图4所示。经过试验检测，横焊位置试板的抗拉强度达到561MPa，向上立焊位置试板的抗拉强度达到559MPa，断裂位置均在F36钢侧。每块焊接工艺试板在焊缝区取2个全焊缝圆棒拉伸试样，经拉伸试验，横焊位置焊缝抗拉强度达到626MPa，向上立焊位置焊缝抗拉强度达到617MPa。试验结果满足要求。

4.2 弯曲试验

每块焊接工艺试板取4组横向弯曲试样，每组2个试样的取样位置如图4所示。弯曲试验压头直径40mm，弯曲角度180°，弯曲后对试样的外表面进行目视检测，未发现缺陷，弯曲试验合格。

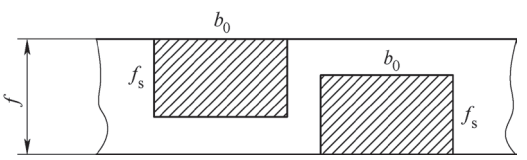

图4 拉伸和弯曲试验取样位置

4.3 冲击试验

每块焊接工艺试板取12组（每组3个）夏比V型冲击试样，试样尺寸10mm×10mm×55mm。焊缝和铸钢件侧冲击温度－40℃，F36钢母材侧冲击温度－60℃。冲击缺口分别位于试板第二次焊接面表面处的焊缝中心、焊缝熔合线、焊缝熔合线＋2mm和焊缝熔合线＋5mm位置，试板厚度中心处的焊缝中心、焊缝熔合线和焊缝熔合线＋2mm位置。试验结果表明，每组夏比V型试验的冲击吸收能量平均值均＞90J，满足技术要求。

4.4 宏观金相检测和硬度检测

每块焊接工艺试板取1个焊缝横截面，冷切割后使用砂纸抛光，并使用硝酸酒精溶液进行腐蚀，直至清晰地显示出焊缝焊道及热影响区，用5倍放大镜对横截面进行目视检测，未发现裂纹或未熔合等缺陷，宏观金相检测合格。

然后，在宏观试样上进行维氏硬度检测，在距上下表面2mm处及焊缝根部的两侧母材、两侧热影响区和焊缝中心位置至少取3个点进行检测，具体检测位置如图5所示。各检测区域平均硬度见表8。从表8可知，硬度符合要求。

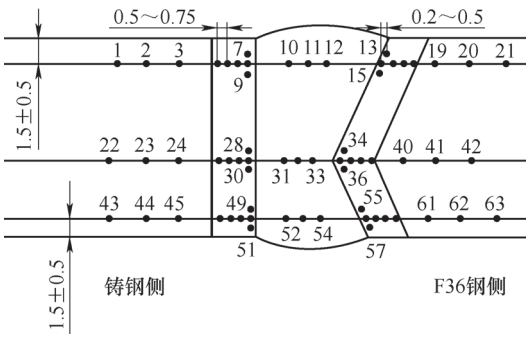

图5　硬度检测位置

表8　硬度检测结果　（HV10）

位置	硬度				
	铸钢侧母材	铸钢侧热影响区	焊缝中心	F36钢侧热影响区	F36钢侧母材
距上表面2mm	190	272	210	261	183
焊缝根部	206	258	230	228	185
距下表面2mm	204	252	218	242	179

4.5　裂纹尖端张开位移试验（CTOD试验）

按照规格书要求，需要在热输入最大的试板上取3个试样进行焊缝中心全厚度试样的裂纹尖端张开位移试验，以验证焊接接头阻止裂纹扩展的能力。选取热输入最大（向上立焊）的工艺试板取样，使用机械加工方式加工3个全厚度试样，并通过高频疲劳试验机预制焊缝中心处的疲劳裂纹。

最终经过检测，在－10℃的环境中，3个试样的CTOD值分别为0.740mm、0.872mm、0.754mm，具体数据见表9。CTOD试验结果表明，焊接接头的抗开裂性能较好，满足项目规格书对焊接接头的要求。

表9　CTOD试验结果

试样号	裂纹位置	试验温度/℃	CTOD值/mm
F1	焊缝中心线	－10	0.740
F2			0.872
F3			0.754

5　结束语

1）本文对大型Gr420E铸钢件与F36低合金钢厚板的异种材料焊接工艺进行了深入探讨，通过开展一系列严格的力学性能试验，充分验证了该焊接工艺的有效性与可靠性。

2）在焊接中，严格控制焊接参数，确保每层的焊接热输入＜1.8kJ/cm。充分预热并严格控制焊接温度，保证预热温度≥150℃，焊接中的层间温度≤220℃。控制合适的焊接速度和摆动宽度，确保每层焊道厚度在5mm左右、宽度≤16mm。

3）此焊接工艺已成功应用于实际生产，在长达135m的焊缝中，一次焊接合格率高达 96.7%。对于在焊接过程中发现的少量未熔合缺陷，在后续的一次返修中也得以彻底解决。这一显著成果不仅满足了船级社的相关标准要求，还赢得了业主的高度认可。综上所述，本文提出的焊接工艺为大型铸钢件与低温碳锰钢异种材料的高质量连接提供了可靠的技术支持，同时也为类似复杂工程项目的实施积累了宝贵的经验。

参考文献：

[1] 沈阳晨，魏建军. 铸钢件焊接及缺陷修补[M]. 北京：机械工业出版社，2015.

[2] 王波. 锁具部件异种材料焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2024（12）：66-70.

[3] 侍建孝，武树成，魏守盼，等. 高锰铸钢ZGMn18与低合金铸钢G20Mn5焊接工艺研究[J]. 金属加工（热加工），2024（4）：66-69.

[4] 陆传航，耿建成，颜克柯，等. 吸力锚用高强铸钢焊接工艺[J]. 焊接技术，2020，49（9）：43-45，48.

[5] 路权，钟红春，汪永胜. 大型超厚G20Mn5铸钢件异种钢焊接施工技术[J]. 焊接技术，2015，44（3）：37-43.

（收稿日期：20250220）