



EQ70埋弧焊焊接工艺 试验研究

李鹏飞

【摘要】 采用药芯焊丝气体保护焊 (FLUXOFIL M42) 打底, 埋弧焊 (FLUXOCORD 42) 填充盖面焊接工艺焊接EQ70高强钢, 进行了相应焊接接头力学性能试验、NDT探伤及金相组织分析, 结果表明: 选用埋弧焊焊接方法, 匹配的焊接材料, 合理的焊接参数和保护措施, 能使焊接接头力学性能达到工程技术的要求, 完成了产品生产前的焊接工艺评定工作。

关键词: EQ70高强钢; 埋弧焊; 力学性能

海上钻井及采油平台等海洋工程结构是人类开发利用海洋资源的重要的超大型焊接结构。海洋环境条件具有复杂性、随机性和多样性的特点。海洋平台要在波浪、海潮、风暴及寒冷流冰等严峻的海洋工作环境中, 支撑总质量超过数千吨的平台和钻井设备, 保证远离陆地的操作人员的生存条件和安全, 对设计和焊接制造要求非常苛刻。为了减轻海洋工程结构的质量, 同时又增加结构整体的安全性, 采用材料的强度级别也越来越高, 材料厚度也不断增加。

为了满足各种大厚度、高强度结构钢在新型海洋平台结构中的性能要求, 促使焊接结构向高参数、大型化方向发展, 各国都在大力开发具有良好的综合性能和加工工艺性能的新钢种, 以期能够满足海洋平台这种特殊结构的建造要求。本文针对海洋平台

用EQ70高强钢, 重点研究埋弧焊的焊接工艺对其焊接性的影响。

1. 试验材料及设备

(1) 试验材料 试验母材选用规格为65mm×260mm×1000mm的EQ70高强钢钢板。EQ70是一种超细晶粒、高均性、超洁净度的低合金高强钢, 在生产过程中通过冶金处理和各种强化途径使钢材获得较高的强度及强韧性, 其屈服强度一般在690MPa左右。其化学成分和力

学性能分别如表1和表2所示。

焊接材料选用法国OERLIKON公司生产的牌号为FLUXOFIL M42 (级别相当于AWS A5.28; E110C—GMH4) 药芯焊丝进行打底, 焊丝均采用真空包装, 确保焊丝使用前不受潮、不受损。其化学成分和力学性能分别如表3和表4所示。

填充盖面焊也选用法国OERLIKON公司生产的牌号为FLUXOCORD 42 (级别相当于AWS A5.23; F11A8—EC—F5)

表1 EQ70钢的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.13	0.08	0.8	0.006	0.003	0.21	0.73	0.74
Mo	V	Ti	Nb	Al	N	B	—
0.38	0.04	0.011	0.01	0.06	0.0023	0.0012	—

表2 EQ70钢的力学性能

屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	横向冲击吸收能量 /J (-40℃)
690	770~940	14	69

表3 FLUXOFIL M42的化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0.0493	1.42	0.4627	0.0105	0.0088	0.3466	2.024	0.4011
V	Cu	Nb	—	—	—	—	—
0.0026	0.0716	0.0005	—	—	—	—	—

表4 FLUXOFIL M42的力学性能

温度 /℃	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	横向冲击吸收能量 /J (51℃)
室温	700	770	22	60

的埋弧焊焊丝及牌号为OP 121TT W (级别相当于EN 760—S A FB 1 55 AC H5) 的焊剂。焊剂使用前要进行350℃×2h烘焙处理。此烧结焊剂熔点较高, 密度较小, 适合于较大热输入焊接, 与FLUXOCORD 42焊丝配合使用, 可使焊接工艺性良好、焊缝成形美观、易脱渣。其化学成分和力学性能分别如表5~表7所示。

(2) 试验设备 该试验采用型号为ZD5—1250B的埋弧焊机进行焊接, 焊机外观如图1所示。

2. 焊接工艺方案

(1) 坡口形式设计 该试验中EQ70高强钢焊接试板板厚为

65mm, 坡口形式选用X形 (见图2)。

(2) 预热温度选择 EQ70高强钢在焊接过程中主要易造成氢致裂纹 (延时裂纹) 以及焊接热影响区软化、韧性下降等问题。为了避免产生氢致裂纹, 同时减小焊缝及热影响区的淬硬倾向, 提高焊接接头的抗裂性, 焊前须将EQ70高强钢试板进行预热。

EQ70钢材在较为苛刻的拘束条件下, 选用常温焊接条件下的表面裂纹率为63%、断面裂纹率为100%; 而在预热温度80℃、150℃时, 表面裂纹率以及断面裂纹率均为零。因此, EQ70预热温度的选用至少在80℃以上

表5 FLUXOCORD 42的化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0.066	1.368	0.2299	0.0123	0.0031	0.4003	2.444	0.3446	0.0718

表6 FLUXOCORD 42的力学性能

温度 /℃	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	横向冲击吸收能量 /J (-60℃)
室温	694	803	20	80

表7 OP 121TT W的化学成分 (质量分数) (%)

SiO ₂	CaF ₂	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃
14	24.19	0.87	18	30	6.63	0.52



图1 ZD5—1250B埋弧焊机

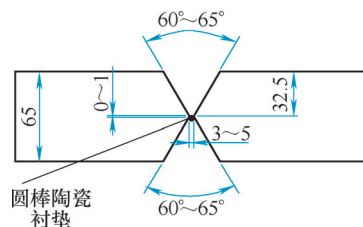


图2 焊接试板坡口形式

才能预防焊接冷裂纹的发生。在此, 选用预热温度为150℃进行试验。

(3) 焊接参数及顺序 经查阅法国OERLIKON公司焊材手册, 选定焊接参数, 具体如表8所示。

焊前将坡口两侧20~30mm范围内的水分油污等杂质清理干净, 并通过打磨呈现出金属光泽, 焊丝表面进行相应处理, 以防有害杂质对焊接过程造成不利影响。

对于EQ70超高强度钢应采用专用标识, 以区别于其他钢材, 避免在装配及焊接过程中混淆, 严格按照焊接工艺的坡口角度、装配间隙进行, 避免过大的装配应力产生, 装配定位焊长度≥50mm, 并确保有足够的强度。

表8 EQ70钢焊接参数

焊道	焊接方法	焊材规格 φ/mm	电流种类 和极性	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	热输入 /kJ·cm ⁻¹	气体流量 /L·min ⁻¹
1~2	FCAW	1.2	DCEP	207~253	24~28	11.3~26.8	16.8~23.9	20~22
3~n	SAW	4.0	DCEP	572~711	26~31	34.7~54.3	22.6~27.6	—

焊接时首先用FCAW进行打底焊接，然后采用SAW按照表8焊接工艺参数进行多层多道焊接至1/4T处，其后反面气刨清根处理，将反面焊接直到坡口填满，最后再焊接正面剩余部分。

(4) 焊后热处理 EQ70高强度钢在焊接以后，其焊接接头易出现淬硬组织，使材料力学性能下降。此外，这种淬硬组织在拘束应力及氢的作用下，易导致焊接接头破坏。如经后热处理，焊接接头金相组织可得到改善，提高焊接接头的塑韧性，从而改善焊接接头的综合力学性能。

本文中EQ70高强度钢板焊接完成后经200℃后热处理，保温2h后缓冷，冷却速度≤50℃/h。

3. 焊接工艺评定标准及组性能试验

本试验依据的标准为AWS D1.1：2010《钢结构焊接规范》，并根据此规范要求进行拉伸、冲击、冷弯、硬度和宏观金相等一系列力学性能试验，以及外观检查（VT）、磁粉探伤（MT）、超声波探伤（UT）等无损探伤（NDT）试验。此外，还进行了采用500倍放大倍数来观察母材、焊缝及HAZ显微组织试验，将焊接后的试样截出有代表性的部位。样品先用砂轮机和砂带机粗磨，再用不同粗细的水磨机上进行细磨、抛光，将处理好的试样用4% HNO₃酒精溶液浸

蚀，取出后吹干，然后观察其微观组织。具体评定试验如表9所示。

4. 试验结果及分析

(1) 力学性能试验结果及分析 试样经4%硝酸酒精溶液腐蚀，表面无缺陷，宏观试验照片如图3所示。从EQ70钢焊接接头的宏观形貌可知，焊缝、熔合线、热影响区均未发现裂纹、未熔合、气孔及夹渣等焊接缺陷，焊缝成形良好。

结合焊接接头硬度值（见表10）及不同区域硬度变化趋势分

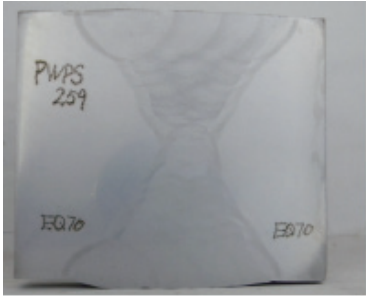


图3 宏观试验照片

析可知，EQ70钢热影响区和熔合线的硬度值偏高，超过平均水平5%~10%，符合相关要求。焊缝硬度和母材相当，这和EQ70配用的焊材接头强度匹配较好有关。

按照ABS船级社规范要求，EQ70钢焊接接头在-40℃时的冲击吸收能量不低于46J，夏比V型缺口试样规格：10mm×10mm×55mm，试验温

表9 对接焊接工艺评定试验种类

类别	试验类型	试验数量、种类及范围
对接	拉伸试验	2个横向拉伸
	弯曲试验	4个侧弯
	宏观金相	1个
	硬度试验	1个
	冲击试验	7组，3个/组；取样位置：焊缝中心，熔合线，熔合线+2mm，熔合线+5mm，熔合线+7mm，焊缝中心（根部），熔合线+2mm（根部）
	VT	100%
	MT	100%
	UT	100%
	微观金相	3组，2个/组（盖面焊及填充焊区域各1个）；取样位置：焊缝区，HAZ过热区，回火区

表10 硬度试验结果

编号	母材			热影响区			熔合线			焊缝		
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	267	264	264	233	258	333	288	262	295	264	265	263
II	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	268	266	266	239	236	253	282	282	304	285	273	281
III	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	270	266	268	260	241	251	287	264	289	280	278	280

度：-40℃，从表11的冲击试验结果可知，在不同位置所截取的冲击试样不论是其单值还是平均值均达到要求，说明焊缝在低温条件下仍具有优良的冲击韧性。

拉伸试验和冷弯试验分别检测焊缝的抗拉强度和塑性及内部缺陷等性能，由表12和表13可知，这些试样都断裂于母材，焊缝的抗拉强度高于母材，并且冷弯试验结果均达到规范所要求

的标准，全部合格。

(2) NDT结果及分析 经100%外观检查，100%磁粉探伤，100%超声波探伤，探伤结果如表14所示。由该探伤结果可知，焊缝无焊接缺陷，全部合格。此结果表明，采用此焊接工艺焊接EQ70钢焊接性良好。

(3) 焊接接头金相组织分析 图4为焊缝区域的金相组织。由图4可看出，盖面焊组织为下贝氏体+少量针状铁素体，填充焊的组织为下贝氏体+屈氏体+少量针状铁素体。而盖面焊以下的填充焊由于后焊的再次加热，相当于经历了一次高温回火，则含有一定量的托氏体。由于埋弧焊整体热输入大，因此整个焊缝熔融金属的温度都较高，冷却速度也较慢，这样所得到的组织以贝氏体和托氏体为主，铁素体较少，焊缝的这种组织拥有较好的强塑性。

图5为焊接接头HAZ过热区（粗晶区）的金相组织。从图5可以看出，过热区的金相组织为板条状马氏体+粒状贝氏体组织。在此区域，焊接热循环的峰值温度超过了EQ70钢的A粗化温度，由于冷却速度快，因而产

表11 冲击试验结果

试样编号	取样部位	冲击试样缺口位置	试验结果/J			平均值/J
7、8、9	根	焊缝中心	160	150	160	156
10、11、12	面	熔合线	180	190	190	186
13、14、15	面	熔合线+2mm	80	70	80	76
16、17、18	面	熔合线+5mm	165	45	160	123
19、20、21	面	熔合线+7mm	200	220	210	210
22、23、24	根	焊缝中心（根部）	180	220	220	206
25、26、27	根	熔合线+2mm（根部）	190	180	200	190

表12 拉伸试验结果

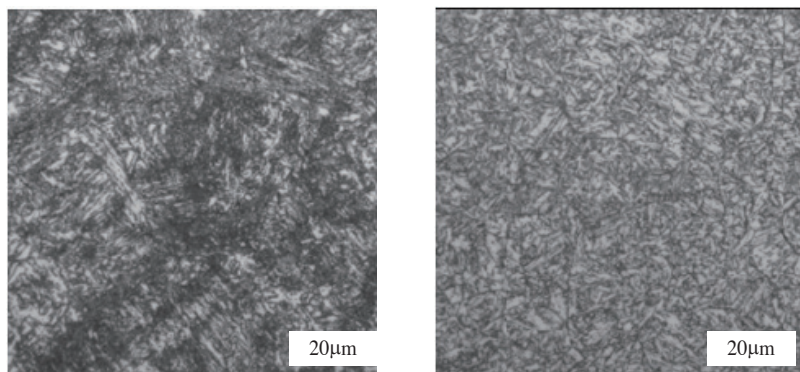
试样编号	取样位置及方向	抗拉强度/MPa	试样规格/mm×mm	断裂位置
1-1	横向拉伸	791	25.30×33.40	断裂于母材EQ70
1-2	横向拉伸	789	25.40×32.60	断裂于母材EQ70
2-1	横向拉伸	794	24.80×34.00	断裂于母材EQ70
2-2	横向拉伸	791	25.00×33.60	断裂于母材EQ70

表13 冷弯试验结果

试样编号	试样规格/mm×mm×mm	弯心直径/mm (D=6r)	弯曲角度(°)	弯曲项目	结果
3-1	10×25×240	63.5	180	侧弯	没有裂纹
3-2		63.5	180	侧弯	没有裂纹
4-1		63.5	180	侧弯	没有裂纹
4-2		63.5	180	侧弯	没有裂纹
5-1		63.5	180	侧弯	有裂纹L1=0.5mm
5-2		63.5	180	侧弯	没有裂纹
6-1		63.5	180	侧弯	有裂纹L1=0.8mm
6-2		63.5	180	侧弯	没有裂纹

表14 NDT探伤结果

类别	试验类型	试验范围	是否合格
对接	VT	100%	合格
	MT	100%	合格
	UT	100%	合格



(a) 盖面焊组织 (b) 填充焊组织

图4 焊缝区金相组织

生板条状马氏体和粒状贝氏体组织。

图6为焊接接头热影响区回火金相组织。图6表明，热影响区回火相组织与母材类似，皆为回火贝氏体组织，只是其晶粒尺寸显然大于母材。由于在回火区内，回火最高温度未超过钢材的

共析温度线，所以加热时不会发生再结晶现象，这也是二者金相组织相似原因。但由于最高回火温度超过母材的回火温度（640℃），使得母材进行一次高温回火，造成晶粒偏大。

5. 结语

(1) 屈服强度为690MPa级

别的高强钢采用埋弧焊工艺进行焊接，焊接接头力学性能及VT、MT、UT合格率均能达到AWS D1.1: 2010《钢结构焊接规范》要求。

(2) 只要严格按照已制定的焊接工艺要求去执行，采用埋弧焊工艺焊接屈服强度为690MPa级别的高强钢完全可以满足把AWS D1.1: 2010《钢结构焊接规范》作为技术要求的生产，可以用于实际生产。

参考文献:

- [1]李润培, 谢永和, 舒志. 深海平台技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(3): 1-5.

作者简介: 李鹏飞, 招商局重工(深圳)有限公司。

MW 20171027

盐城发电公司举办 焊工劳动技能竞赛

2017年10月26日下午, 盐城发电有限公司在10号机组中修冷油器改造现场, 举办了焊工技能竞赛, 检修部电焊班7名高压焊工参赛。经过3h的激烈角逐, 最终“盐城市技术能手”、“盐城市五一创新能手”朱彬荣获第一名。

火热的劳动技能比赛, 不仅促使职工安全优质高效地完成了生产任务, 同时以赛促练, 在职工中形成“比、学、赶、帮、超”的学技术、练技能氛围, 为企业安全生产经营发展提供了强劲动力。

(盐城发电有限公司)

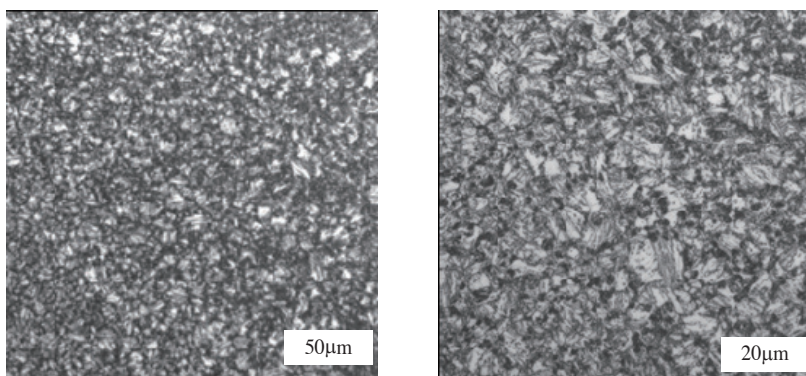


图5 HAZ过热区(粗晶区)金相组织

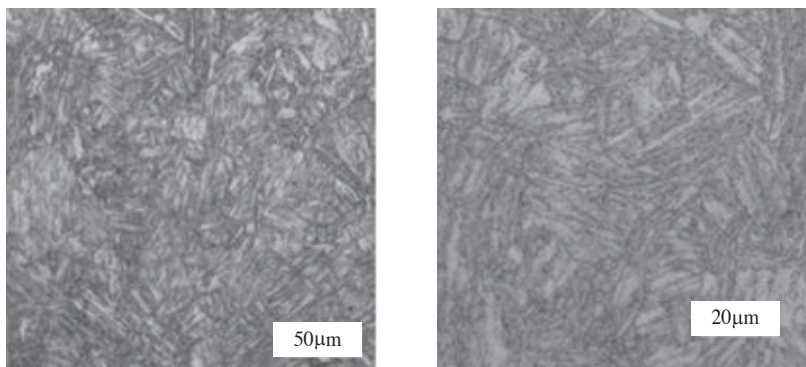


图6 回火区金相组织