

埋弧自动横焊在海上风电导管架吸力桶 环缝焊接的应用

罗运良, 李井双, 王 旭

(蓬莱巨涛海洋工程重工有限公司, 山东 蓬莱 265607)

摘 要: 针对某海上风电导管架吸力桶管径大、筒壁厚且立式建造导致的焊接工作量较大的问题, 采用埋弧自动横焊焊接工艺, 通过坡口设计、焊接工艺参数的合理选择, 克服了横焊埋弧焊焊接过程中铁水下垂、层间未熔合、焊剂敷洒等操作难点, 实现了埋弧横焊在吸力桶环缝的应用。风电导管架吸力桶埋弧自动横焊的焊接工艺试验结果显示, 焊缝外观、硬度、力学性能均符合相关标准要求。该工艺的应用表明, 吸力桶环缝焊接作业效率得到大幅提升, 并且节约了人工成本。

关键词: 埋弧自动横焊; 导管架吸力桶; 环焊缝; 焊接工艺试验

中图分类号: TG457

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.08.005

Application of Submerged Arc Automatic Horizontal Welding in Girth Seam Welding of Suction Bucket of Offshore Wind Pipe Rack

LUO Yunliang, LI Jingshuang, WANG Xu

(Penglai Jutao Offshore Engineering Heavy Industries Co., Ltd., Penglai 265607, Shandong, China)

Abstract: In view of the large diameter, thick wall and large welding workload caused by the vertical construction of the suction bucket of a certain offshore wind pipe rack, the submerged arc automatic horizontal welding process is adopted. Through the groove design and the reasonable selection of welding process parameters, the operation difficulties such as water sagging, interlayer incomplete fusion and flux spraying in the horizontal submerged arc welding process are overcome, and the application of submerged arc horizontal welding in the girth seam of the suction bucket is realized. The welding process test results of the submerged arc automatic horizontal welding of the suction bucket of wind pipe rack show that the appearance, hardness and mechanical properties of the weld meet the requirements of relevant standards. The application of this process shows that the efficiency of girth seam welding of suction bucket is greatly improved and the labor cost is saved.

Key words: submerged arc automatic horizontal welding; wind pipe rack suction bucket; girth weld; welding process test

0 前 言

英国某海上风电导管架项目, 吸力桶部分管径达到 11.5 m, 高度约 12 m, 材质为 S355NL/ML, 筒体厚度为 55~60 mm。由于管径大、桶壁厚, 采用立式建造方案, 其环焊缝需要在横焊位置焊接, 环焊缝周长超过 30 m, 焊接量较大。传

统的焊接方法是采用 CO₂ 气体保护半自动焊, 其周期较长, 人工成本较高。为了提高作业效率, 降低作业成本, 最终选择埋弧横焊工艺。但埋弧横焊熔池要用焊剂敷埋, 焊接熔池温度高, 横焊位置铁水容易下垂, 所以应用较少。经过反复试验摸索最终掌握了该工艺的使用要点, 完成了焊接工艺试验, 并在项目上得以应用。

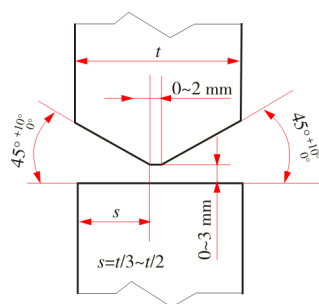
1 埋弧自动横焊介绍

埋弧横缝焊机是能够完成大型（直径大于 4.5 m）立式筒体环缝焊接的通用自动焊接设备，按照施工方式可分为正装埋弧自动横焊机和倒装埋弧自动横焊机，如图 1 所示。埋弧横焊技术在 20 世纪 80 年代中期引进中国，国内从 90 年代初开始自行研制出完全自主知识产权的埋弧横焊机。近年来，埋弧横焊技术及装备在工程中的推广应用取得良好效果，其焊接质量好，熔敷速度高，综合成本低，具有广阔的应用前景^[1-3]。



图 1 埋弧自动横缝焊机

埋弧自动横焊可用于碳钢、低合金钢、不锈钢、低温钢及其合金的优质焊接，广泛应用于石油储罐、LNG 罐、LPG 储罐、高炉和电厂烟囱等立式筒体的焊接。埋弧自动焊适用于中厚板的焊接，因具有焊缝成形美观、质量可靠、探伤合格率高、劳动强度低和生产效率高等优点，在焊接工程中得到广泛应用。横缝埋弧焊是埋弧自动焊的一种特殊形式，通常采用平特性焊接电源，等速送丝方式、直流反接，以及较小的焊接电流、电弧电压和较高焊速。在罐体类结构横缝焊接中应用自动埋弧焊^[4-6]，需要解决电源、焊剂敷洒和焊车行走问题。



(a) 坡口形式

2 焊接过程准备

2.1 材料

筒体材料为 EN 10025-3/4 S355NL/ML，设计温度为 0℃，材料的冲击性能要求在 -40℃ 满足冲击功平均值不小于 34 J，单个值不小于 24 J。吸力桶结构如图 2 所示。

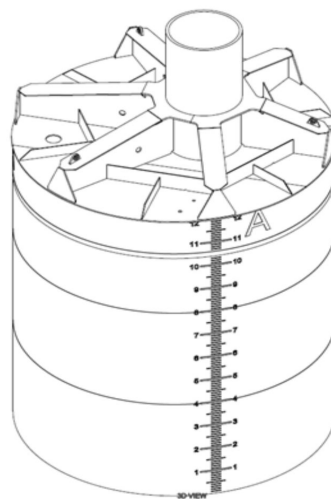


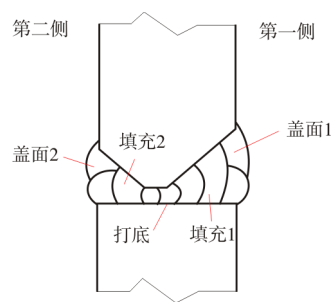
图 2 吸力桶 3D 模型

2.2 焊接材料选择

焊接工艺采用 FCAW+SAW，FCAW 用于打底焊接，SAW 用于填充盖面焊接。药芯气体保护焊焊丝选用京群 GFL-71Ni 焊丝，焊丝直径 1.2 mm，埋弧焊选用林肯 JW-1 焊丝和 JF-B 焊剂，焊丝直径 3.2 mm。

2.3 焊接坡口设计

为避免焊接过程中铁水下垂过于严重，上坡口采用 K 形坡口，下侧为直边，如图 3 所示。焊接时，第一侧焊接完成后，在第二侧碳弧气刨清根后进行填充盖面焊。



(b) 焊接顺序

图 3 焊接坡口形式和焊接顺序

2.4 焊接参数

由于焊接为横焊位置，同时埋弧焊时参数较大，焊接熔敷金属较多，铁水很容易下坠。因此要求焊接参数不易过大，以防止焊接时熔敷金属大量流出，导致焊接成形差及层间未熔合等问题^[7-10]。埋弧焊电流要求不超过 450 A。

2.5 埋弧横焊焊前准备

(1) 焊接之前要确定各设备实际的焊接输出电流、电压，尽量保证主机和横焊设备始终匹配。另外焊接电缆线要足够长，避免焊机行走过程中出现焊接故障，以及焊接电源方面的问题。

(2) 焊机安装自动焊剂回收装置，如图 4 所示。焊接过程中注意观察焊机回收装置位置，如有窜动错位，需及时调整。



图 4 焊剂回收装置

(3) 焊前应调节好焊枪角度，填充前两层保证 25°~30°，后续填充角度随着填充厚度增加可逐渐减少，但不应小于 15°。盖面焊时角度应保证 15°~20°（角度过大或过小容易产生咬边及焊

瘤过高）。

(4) SAW 横焊填充时若发现严重咬边，在焊接下一道之前必须打磨处理并调整焊接参数，否则容易出现未熔合缺陷。

(5) 焊接上坡口一侧时，焊丝不要直接搭在上坡口上，否则容易产生气孔，应尽量使熔池靠近上坡口面。

(6) 盖面焊之前，填充找平之后，必须整体打磨平整，否则盖面后会出现高低不平。

(7) 横焊焊机悬挂在筒壁上，通过滚轮行走保证焊机头始终沿着环焊缝周向移动，解决埋弧横焊行走问题。行走过程中注意观察滚轮上的胶皮，若损坏严重应及时更换，否则焊剂下漏造成铁水下流，导致焊缝成形不良。

3 焊接工艺试验及应用

业主建造规格书要求焊接工艺试验按照标准 DNVGL-OS-C401：2018 执行，焊接试板的无损检测 results 和力学性能应符合标准要求。

3.1 试验材料

按照 DNVGL-OS-C401：2018 标准，产品最大覆盖的板厚为焊接工艺试验板厚的 2 倍，为满足产品材质 EN 10025 S355NL/ML、厚度 55~60 mm 的覆盖要求，焊接工艺试验母材选用某钢厂生产的 30 mm 厚度的 EN 10025-3 S355NL 钢板。钢板化学成分见表 1，其中碳当量 CEV 值为 0.41%，符合标准要求。

表 1 EN 10025-3 S355NL 钢板化学成分

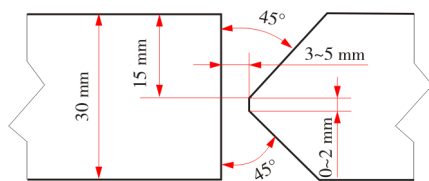
%

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(N)$	$w(Cr)$	$w(Nb)$	$w(V)$	$w(Ti)$	$w(Mo)$	$w(Ni)$
0.13	0.28	1.55	0.016	0.002 4	0.005	0.04	0.021	0.051	0.01	0.01	0.02

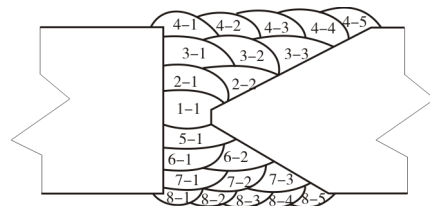
3.2 焊接工艺试验参数

FCAW 采用松下 YD-500EL 焊机，SAW 采用青岛开元松下 MZC-1000F 焊机，坡口为 K 形

坡口^[11]，焊接位置采用横焊 2G。工艺试验的坡口尺寸和焊接顺序如图 5 所示，焊接工艺试验的相关工艺参数见表 2。



(a) 坡口形式



(b) 焊接顺序

图 5 坡口尺寸和焊接顺序

表 2 埋弧自动横焊接工艺参数

焊道/焊层	焊接方法	焊丝直径/mm	电特性参数			焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	热输入/ (kJ·mm ⁻¹)
			焊接极性	电流/A	电压/V		
打底	FCAW	1.2	DCEP	185	25	144	1.9
填充	SAW	3.2	DCEP	400~450	27~30	430~470	1.4~1.9
盖面	SAW	3.2	DCEP	350~380	27~29	426~453	1.3~1.4

3.3 无损检测

焊接完成后按照要求对焊接接头进行 100% VT、MT 和 UT 检验, 检验结果符合 DNVGL-OS-C401: 2018 要求。

3.4 力学性能检测

3.4.1 拉伸性能

拉伸试验按照 DNVGL-OS-C401 和 DNVGL-OS-B101 方法进行, 2 个试样的抗拉强度分别为 552 MPa 和 556 MPa, 断裂位置均在母材区域, 拉伸试验结果满足标准规定的不低于 470 MPa 的要求。

3.4.2 弯曲性能

弯曲试验按照 DNVGL-OS-C401 和 DNVGL-OS-B101 要求, 厚度 12 mm 以上可采用侧弯试验, 侧弯试验压头直径为 40 mm, 弯曲角度为 180°, 试验结果表明 4 件侧弯试样弯曲面无焊接缺陷, 满足标准要求。

3.4.3 冲击试验

冲击试验按照 DNVGL-OS-C401: 2018 和 DNVGL-OS-B101: 2018 要求进行, 采用 10 mm×10 mm×55 mm 标准试样, 试验温度 -40 ℃, 冲击摆锤采用 KV2, 试验结果见表 3, 满足标准和业主规格书要求 (冲击功均值≥34 J、单值≥24 J)。

表 3 焊接接头冲击试验结果

缺口部位	冲击功/J	
	单值	均值
焊缝	68、64、53	62
熔合线	70、110、50	77
熔合线+2 mm	176、182、194	184

3.4.4 宏观检测

按照 DNVGL-OS-C401 取宏观试样进行检验, 焊接区域未发现焊接缺陷, 检测结果符合标准 EN ISO 5817: 2014-B 的要求。

3.4.5 硬度检测

硬度检测时, 参照 ISO 9015-1 标准进行打点, 打点位置如图 6 所示, 检测结果见表 4。从表 4 可以看出, 硬度满足业主规格书及 DNVGL-OS-C401 标准要求 (不超过 350HV₁₀)。

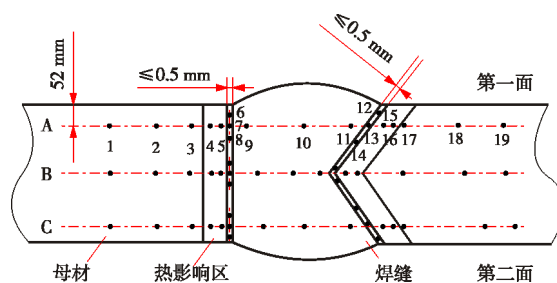


图 6 硬度打点示意图

表 4 硬度试验结果

位置	HV ₁₀																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A	185	185	186	218	271	286	287	272	220	218	219	298	307	310	222	185	185	185	180
B	188	191	185	185	206	238	249	235	220	245	252	245	249	234	230	209	186	190	192
C	185	185	186	189	220	258	250	259	212	224	224	316	303	260	220	185	185	186	185

最终焊接工艺试验结果全部符合标准和业主规格书的要求, 焊接工艺试验 (PQR) 得到业主的认可和批准。该焊接工艺成功在英国海上风电导管架项目得到焊接应用, 不仅提高了焊接作业的效率 and 产品质量, 而且节约了人工成本。

4 结 论

(1) 通过坡口设计、焊接工艺参数的合理选择, 克服了埋弧焊横焊过程中铁水下垂、层间未

(下转第 39 页)