

基于正交试验设计的双丝埋弧焊焊接参数的优化

曹文辉 吕仲光 宋满堂 赵祥鸿

【摘要】 采用多目标、多步骤的5因素多水平正交试验，对影响焊接质量的焊接参数进行组合优化设计。试验结果表明：采用前丝电流900A，后丝电流400A，前丝电压36V，后丝电压40V，焊接速度60cm/min的参数组合，可得到最优的焊接质量，并通过小批量试验进行了验证，为双丝埋弧焊焊接参数组合优化和质量控制提供指导依据。

关键词： 双丝埋弧焊；正交试验；工艺优化

双丝埋弧焊作为一种先进高效的焊接方法，在各类高压、超高压压力容器设备焊接中得到了日益广泛的应用，可以满足对接中厚壁压力容器在焊接效率和质量方面的要求。与传统的单丝埋弧焊相比，双丝埋弧焊有其独特的工艺参数：双丝电流的种类和大小、双丝的位置组合、双丝的间距、双丝熔池共用与否、不同的坡口形式等。工艺参数的增多，增加了控制焊道成形的因素，同时也增加了质量控制难度。

本文以Q345R为研究对象，多目标、多步骤的5因素多水平正交试验，对影响焊接质量的焊接参数进行组合优化设计。首先通过单因素试验确定各因素的水平范围，再设计5因素2水平正交试验，通过对试验结果的极差值和方差值的分析，得出影响焊接

质量的主次因素，最后结合焊缝质量和力学性能进行综合评价确定焊接参数。

1. 焊接试验

(1) 焊接试件 试验采用Q345R、厚度为26mm的钢板，其力学性能为：屈服强度532MPa，抗拉强度405MPa，伸长率26%，加工成150mm×800mm试件，母材的化学成分如表1所示。

(2) 试验焊材 试验采用 $\phi 4.0$ mm的H08MnA和H10Mn2的焊丝，F4A2—H08MnA和F48A4—H10Mn2的焊剂。焊剂在使用前需烘干，烘干温度为300~400℃，恒温2h。

(3) 试验焊机 山东奥太

电气有限公司的双丝埋弧焊机MZ—1200。焊接电源为串列双丝埋弧焊，采用直流-交流双丝埋弧焊的前置焊丝采用平特性直流焊接电源和等速送丝式焊机，后置焊丝采用空载电压较高的下降特性交流焊接电源，配合变速送丝式焊机。

(4) 焊前准备 试验坡口组对装配间隙 $b=0$ mm，钝边 $p=20$ mm，坡口角度 $\alpha=80^\circ$ ， $h=6$ mm，如图1所示。焊接前应去除焊件坡口及坡口两侧20~50mm的铁锈、氧化皮及油污等，防止含氢物质进入焊接区，降低焊缝中的含氢量，避免出现氢气球。

(5) 焊接工艺试验方案设

表1 母材的化学成分(质量分数) (%)

C	Mn	Si	S	P	Al	Ni	Cr	Mo	Cu
0.16	1.29	0.23	0.013	0.002	0.033	0.01	0.03	0.001	0.01

定 双丝埋弧焊前后丝直径均为4.0mm,前丝直流反接,与焊接方向呈 $75^{\circ} \sim 80^{\circ}$;后丝交流,与焊接方向呈 $100^{\circ} \sim 105^{\circ}$,前后丝间距 $L=10 \sim 15\text{mm}$,如图2所示。

2. 正交试验及结果分析

(1) 单因素试验确定正交水平数 在焊接过程中,双焊丝(电极)前丝直流后丝交流,前电极为直流反接,采用大焊接电流低电弧电压,充分发挥直流电弧的穿透力,获得大熔深;后电极为交流,采用相对较小焊接电流大电弧电压,增加熔宽,克服前道大电流可能形成的熔化金属堆积,配合高速度焊接,从而形成美观的焊缝成形。在不断调整焊接电流、焊接速度的同时,合理匹配前后丝焊接参数,改善焊缝成形,提高焊缝质量。

仅适用前丝进行焊接试验,优化后确定前丝电流800A、900A;前丝电压为34V、36V。仅采用后丝进行焊接试验,优化

后确定后丝电流350A、400A;后丝电压为36V、40V。

(2) 正交试验设计 根据上述讨论,兼顾生产效率确定了5个因素,即前丝电流、后丝电流、前丝电压、后丝电压、焊接速度,每个因素取2个水平,设计5因素2水平正交表 $L_8(2^5)$,如表2所示。

(3) 正交试验数据记录和极差分析 焊后焊接试件放置24 h后,对焊接接头进行外观及无损检测按照JB/T4730.2—2005《压力容器无损检验》,进行焊缝外

观检验,记录不同工艺参数下的熔深、熔宽、熔高,如表3所示。

利用极差分析,来确定各因素对焊缝熔深、熔宽和熔高的显著程度,极差越大显著程度越高。由极差分析结果可见,各因素对熔深影响程度 $A>C>E>B>D$,各因素对熔宽影响程度 $D=E>B=C>A$,各因素对熔高影响程度 $B>A>D>C=E$ 。

(4) 成形质量评定与工艺参数优化 由于焊缝成形质量需要综合熔深、熔宽和熔高三者进行考虑,而这三者的评优标准是

表2 正交试验因素水平表

水平	因素A 前丝电流/A	因素B 后丝电流/A	因素C 前丝电压/V	因素D 后丝电压/V	因素E 焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
1	800	350	34	36	60
2	900	400	36	40	90

表3 正交试验方案及结果

试验号	列号					试验结果		
	因素A	因素B	因素C	因素D	因素E	熔深/mm	熔宽/mm	熔高/mm
1	800	350	36	36	60	11.9	24.2	3.9
2	800	350	36	40	90	11.4	24.1	3.7
3	800	400	34	36	60	13.2	24.5	4.3
4	800	400	34	40	90	12.2	24.6	4.4
5	900	350	34	36	90	14.5	23.2	3.8
6	900	350	34	40	60	15.5	25.8	3.5
7	900	400	36	36	90	12.2	23.9	4.1
8	900	400	36	40	60	13.7	25.1	4.3
熔深/mm	K1	48.7	53.3	55.4	51.8	54.3	—	
	K2	55.9	51.3	49.2	52.8	50.3		
	k1	12.175	13.325	13.85	12.95	13.575		
	k2	13.975	12.825	12.3	13.2	12.575		
	R	1.8	0.5	1.55	0.25	1		
熔宽/mm	K1	97.4	97.3	98.1	95.8	99.6	—	
	K2	98	98.1	97.3	99.6	95.8		
	k1	24.35	24.325	24.525	23.95	24.9		
	k2	24.5	24.525	24.325	24.9	23.95		
	R	0.15	0.2	0.2	0.95	0.95		
熔高/mm	K1	16.3	14.9	16	16.1	16	—	
	K2	15.7	17.1	16	15.9	16		
	k1	4.075	3.725	4	4.025	4		
	k2	3.925	4.275	4	3.975	4		
	R	0.15	0.55	0	0.05	0		

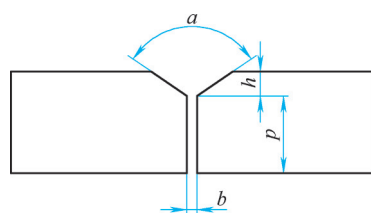


图1 焊接坡口形式

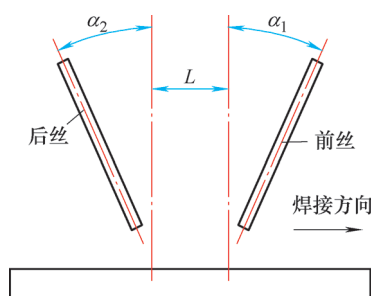


图2 双丝埋弧焊

熔深深、熔宽和熔高小，可见其期望值并非一致，所以引入信噪比(S/N)分析，其中熔深选择望大特性公式，其余采用望小特性公式。

先分别对每个成形因素信噪比排序，按照最大值到最小值依次得8~1分，采用综合比较法，在对每个试件计算综合得分，即为其成形质量综合得分，综合得分如表4所示。

通过表中成形质量综合评分可得，最优的工艺参数为第8组，即前丝电流900A，后丝电流400A，前丝电压36V，后丝电压40V，焊接速度60cm/min。

(5) 焊接质量综合评定与工艺参数 焊接工艺是否优良应该更加注重力学性能，按照NB/T47014—2011《承压设备焊接工艺评定》，先对各焊件分别进行射线检测，其中2号试件未通过。对其余七组试件按照相关标准进行冲击试验，以每个试件三次冲击功之和进行排序，按照从大到小分别计8~2分，如表5所示。

但是对于焊接工艺是否优良的评价更注重其力学性能。本文中主要是指冲击吸收能量，所以在综合评价时，力学性能的权重更大，一般取值0.6，而成形质量权重则为0.4。进行综合评价的得分如图3所示。

因此，综合考虑成形质量和力学性能，较好的工艺参数为第6组，即前丝电流900A，后丝电流350A，前丝电压34V，后丝电压40V，焊接速度60cm/min。

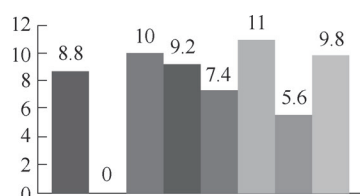


图3 综合评价得分

3. 小批量焊接试验与检测

按照正交试验结果，采用获得的第6组工艺参数进行焊接小批量试验。共拍片32张，其中Ⅰ级（无缺陷）共31张，Ⅱ级（气孔）1张，一次合格率为100%。

从以上焊接试件中任选一件，分别进行宏观和微观金相分

析。由图4可以看出，焊接接头宏观金相无裂纹、未熔合及未焊透等缺陷，焊缝成形良好。试件正面熔深为17.4mm，反面熔深为15.5mm。与单丝埋弧焊相比，双丝埋弧焊在焊接时所形成的熔池更长，熔池中金属处于液态的时间也相对较长，因此其冷却速度相应地变慢，焊缝中的合金元素有较长的时间进行扩散，冶金反应也更充分，焊缝中的气孔和熔渣更易于排出，使得双丝埋弧焊有更好的成形。

焊接接头微观金相组织如图5所示，母材区、焊缝区和热影响三个区域的微观组织均为铁素体+珠光体，但在先共析铁素体的分布形态和柱状晶的生长程度上有较大差别。由于焊接电流较大，在热影响区存在一定的过热组织，块状先共析铁素体呈网状沿奥氏体晶界分布，其他区域为回火贝氏体组织，在网状分布的铁素体附近有少量珠光体分布。

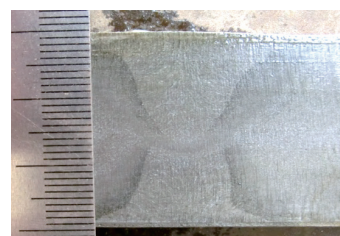


图4 焊接接头宏观金相



图5 焊接接头金相组织

焊接接头的力学性能按NB/T47014—2011工艺评定标准进行：拉伸试验抗拉强度值高于标准要求，拉伸试件大部分断于母

表4 试验结果的信噪比值与成形质量评分

试验号	熔深S/N	熔深评分	熔宽S/N	熔宽评分	熔高S/N	熔高评分	成形质量综合评分
1	21.511	2	-27.676	4	-11.821	4	10
2	21.138	1	-27.64	3	-11.364	2	6
3	22.411	5	-27.783	5	-12.669	6	16
4	21.727	3	-27.819	6	-12.869	8	17
5	23.227	7	-27.31	1	-11.596	3	11
6	23.807	8	-28.232	8	-10.881	1	17
7	21.727	4	-27.568	2	-12.256	5	11
8	22.734	6	-27.993	7	-12.669	7	20

表5 冲击吸收能量评定得分

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8
冲击值/J	578	—	526	450	454	528	356	434
评分	8	—	6	4	5	7	2	3



海上风力发电塔项目塔架 焊接工艺研究

朱达新

【摘要】 根据风塔的塔体结构材料规格分布考虑选配焊接材料,采用模拟试验的方法进行力学试验,分析材料的焊接性,验证焊缝区的力学性能及焊接参数,对试验结果中涉及海洋风塔的力学指标、低温冲击韧性、接头性能、热影响区的韧性等进行分析,并对预热、效率等相关问题进行探讨,由此产生的数据供相关技术人员参考。

关键词: 焊接材料; 氩弧焊; 冲击试验; 抗拉强度

风力发电塔架(以下简称风塔)主要坐落三种形式的风场,即陆上、海滨、离岸三种位置。陆上风塔通常设置在山区或丘陵地带,那里相对于陆地有较大风力,一般坐落在3km以上的内陆;海滨风塔通常坐落于离岸线3km的内陆和不超过10km的水域里;离岸风塔离开陆地超过10km,比陆上和海滨的风场强度更大,所以要求风塔结构、强度也更大。

海上风塔指的是海滨水域和离岸风塔,但通常指的是离岸风塔,在技术要求和施工难度上是最高的,为了进一步提高风塔制造水平,提升市场竞争能力,我们进行了海上风塔专项焊接工艺研究。

1. 焊接性分析

(1) 工程概况 本工程是海上风塔的基础段,大部分处于海面以下,全长约46m。在中部和底部有支腿相连,只涉及主管

段工程,因此研究对象是主管的焊接工艺。从顶部至底部,整个塔体结构材料规格分布如表1所示。

(2) 材料特点 由表1看出,本工程外形尺寸大,板厚最大处为110mm,筒体材料采用海洋工程用钢S355 G8+M,要求符合EN 10225:2001《固定式海上设施焊接结构钢-技术交付条件》标准。S355 G8+M的力学性能要求与Q345E及船EH36类似,

材;侧弯试验检验全部合格;焊接接头焊缝区、热影响区硬度与母材区接近,满足工艺要求;焊接热输入较为合理,冲击值满足试验要求。

4. 结语

(1) 采用双丝埋弧焊进行厚度为26mm, Q345板材焊接时,优化后的建议工艺参数为前丝电流900A,后丝电流350A,

前丝电压34V,后丝电压40V,焊接速度60cm/min。

(2) 用正交表设计的试验方案,既可以减少试验次数,又能够比较全面地反映各因素的不同水平对试验指标的影响。对于因素复杂的试验问题,它是一种行之有效的方法,可以进一步在不同板厚、材质的焊接参数选择中使用。

参考文献:

- [1] 韩彬,等.双(多)丝埋弧焊方法及应用[J].焊管,2003,26(4):7-8.
- [2] 马永福,鲍光辉.中厚板双丝埋弧焊焊接工艺探讨[J].热加工工艺,2006,35(19):22-23

作者简介:曹文辉等,中石油第二建设公司。MW 20170822

