

超厚S355NL 钢管桩焊接接头超低温冲击实验研究

冯健¹ 沈大明¹ 邓鉴棋²

(1 上海振华重工股份有限公司长兴分公司; 2 上海市焊接学会)

[摘要]随着国内外海上风电项目的不断发展,各种恶劣环境对风电设备的质量要求也越来越高,特别是对于作为风电设备中关键部件的管桩的焊接质量要求更是苛刻。本研究通过优选焊接材料、改变碳弧气刨清根根部宽度等方法,成功制造了厚度为70mm 的S355NL 钢管桩焊接接头,其冲击性能完全满足-60℃下达到40J 的要求。

[关键词] 厚钢板 冲击韧性 超低温

一、前言

海上风电由于其资源丰富、风速稳定、对环境负面影响小;风电机组距离海岸较远,噪音、视觉干扰小;单机容量大,年利用小时数高;且不占用土地资源等优势,近几年发展迅速。到2009 年为止,全世界建成的海上风电电厂有30多座,装机容量达到1 0 0 万K W [1]。但是随着海上风电的日益发展,各种恶劣环境对风电设备的质量要求也越来越高,特别是对于作为风电设备中关键部件的管桩的焊接质量要求更是苛刻。上海振华重工股份有限公司(Z P M C)近几年来已顺利完成多项海上风电管桩制造项目。图1 和图2 为ZPMC 制造的海上风电管桩制造单元和风电管桩。某英国风电管桩由于使用环境恶劣,业主要求所用钢板为S355NL,厚度为50mm 至110mm,且所有厚板管桩接头必须满足在-60℃的超低温环境下



的V 形缺口冲击吸收功达到4 0 J。这一要求,远高于常规S355NL 钢板在-50℃低温环境下,冲击吸收功为2 7 J 的要求。为了达到这一要求,本研究通过调整焊接材料、改变坡口宽度以及调整焊道布置等方法,采用SAW 制备了厚度为70mm 的S355NL 钢管桩焊接接头,对其-60℃下的低温冲击性能进行了分析和研究。



图2 风力发电管桩

二、实验方法与分析

由于实际使用时母材为S355NL，厚度范围为50mm至110mm，经综合考虑，本研究采用T=70mm的S355NL 钢材进行焊接工艺研究。S355NL 是一种正火轧制的细晶粒结构钢，其标准要求为低温-50℃时，冲击吸收功为27J。母材成分见表1。但由于特殊的使用环境，客户要求其焊接接头的最低使用温度为-60℃时，冲击吸收功为40J。因此，本实验采用焊材优选、工艺改进以及调整焊缝与母材成分熔合比等方法提高焊接接头的性能。

基于提高实际生产效率的考虑，本研究采用SAW 的焊接方法。为了便于实际生产加工，

表1 S355NL的主要化学成分

钢材	化学成分 0.001%									碳当量
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Cu	Ni	
S355NL	170	320	1540	13	2	50	32	80	40	450

表2 焊接工艺参数表

焊道	焊丝直径 mm	预热温度 ℃	焊接电流 A	焊接电压 V	焊接速度 mm/min	热输入 KJ/mm	备注
1	Ø4.0	110	450	29	580	1.35	正面打底
2	Ø4.0	110	450	29	580	1.35	反面打底
3-n	Ø4.0	110	500	30	500	1.80	填充

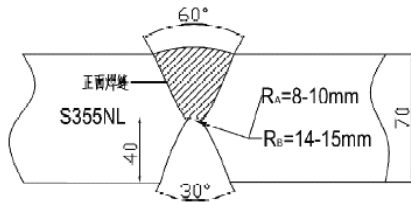


图3 A组和B组试板坡口形状及反面开槽尺寸

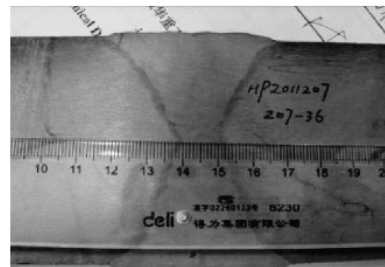


图4 A组实验坡口宏观金相 图5 B组实验坡口宏观金相

坡口为X型，坡口角度为60°。坡口形状示意图见图3。正面埋弧焊接完成后，反面采用碳弧气刨清根。在焊接过程中，为了避免焊接应力引起的变形，选用正/反交替焊接。埋弧焊

焊丝为伊萨OK Autrod 12.32, 焊剂选用OK FLUX 10.62。此焊剂为超低氢型焊剂, 熔敷金属扩散氢含量[H] ≤ 4ml/100g, 低温冲击-60℃可达到70J以上。为了防止焊接裂纹, 保证焊缝金属力学性能, 本研究采用多层多道焊, 且通过调整电流/电压, 控制速度等来保证焊接热输入以及焊缝成型系数 ϕ 。在打底焊接时适当地减小焊接电流, 增大焊接速度, 也可有效防止裂纹的产生。

本实验采用A、B 两组试样进行实验。A、B两组实验均采用表2 所示焊接工艺参数。A 组采用X 形坡口, 反面采用常规碳弧气刨清根, 根部U 型坡口R 为8-10mm; B 组采用加大碳弧气刨清根根部宽度, 保证成型为U 形坡口, 根部U型坡口R 为14-15mm。A、B 两组实验反面清根U 型R 对比如图3 所示。图4、5 为A、B 两组实验坡口宏观金相, 可以看出B 组根部宽度大于A 组根部宽度。

三、实验结果与讨论

通过焊接材料优选[2], 采用的埋弧焊丝为伊萨OK Autrod 12.32, 焊剂选用OK FLUX10.62。采用EN 15614-1《金属材料焊接工艺规范与评定》对两组试样进行-60℃低温冲击实验, 试验位置为正面焊缝中心(Weld metal)、焊缝根部中心(Weld metal(Root))、正面焊缝熔合线区+2mm(HAZ+2mm)、焊缝根部熔合线+2mm(HAZ+2mm(Root))。冲击试样尺寸为10 × 10 × 55 mm, 缺口为夏比V 形缺口。

由表3 可以看出, 采用常规反面清根的A 组实验, 焊缝中心(Weld metal)、正面焊缝熔合线区+2mm(HAZ+2mm)、焊缝根部熔合线+2mm(HAZ+2mm(Root))在-60℃时, 冲击吸收功值均可达到70J 以上, 满足实际使用需求; 但是焊缝根部中心(Weld metal(Root))的-60℃低温冲击吸收功值仅分别为28J、32J 和40J, 平均值为33J。表4 为采用加大的反面清根工艺的B组实验, 焊缝中心(Weld metal)、正面焊缝熔合线区+2mm(HAZ+2mm)、焊缝根部熔合线+2mm(HAZ+2mm(Root))在-60℃时, 冲击吸收功值

表3 A组试样冲击吸收功值

试样号 [Specimen No.]	缺口位置/方向 [Notch location/direction]	实验温度 [Temperature]	吸收功值(J) [Absorbed Values:1 2 3]	平均值(J) [Average]
A1/A2/A3	Weld metal	-60℃	48/144/118	93
A4/A5/A6	Weld metal(Root)	-60℃	28/32/40	33
A7/A8/A9	HAZ+2mm	-60℃	42/192/30	88
A11/A12/A13	HAZ+2mm(Root)	-60℃	190/214/170	191

表4 B组试样冲击吸收功值

试样号 [Specimen No.]	缺口位置/方向 [Notch location/direction]	实验温度 [Temperature]	吸收功值(J) [Absorbed Values:1 2 3]	平均值(J) [Average]
B1/B2/B3	Weld metal	-60?	150/142/148	147
B4/B5/B6	Weld metal(Root)	-60?	100/70/126	99
B7/B8/B9	HAZ+2mm	-60?	74/96/166	112
B11/B12/B13	HAZ+2mm(Root)	-60?	152/174/190	172

也均能达到70J 以上; 且焊缝根部中心(Weld metal(Root))的-60℃低温冲击吸收功值也分别达到了100J、70J 和126J, 平均值为99J。四个区域的-60℃低温冲击吸收功值均大于70J, 满足客户要求的低温冲击要求。

A 组和B组实验的区别主要是反面清根根部U型R的差异。A组反面根部碳刨U型R为8-10mm, 正面为V形坡口; B组根部碳刨U型R为14-15mm, 正面为V 形坡口。根部碳刨开口宽度R 和坡口形状直接造成焊缝中焊接材料和母材的熔合比的不同, 从而导致焊缝根部中心(Weld metal(Root))的冲击吸收功值的大小不同。研究认为[3,4], 焊缝金属是

由填充金属和局部熔化的母材金属组成的，焊接接头可分为母材、热影响区、熔合区和焊缝四部分。当母材和焊材性能有差异时，则熔合区中焊材和母材的比例即熔合比 γ 对焊缝金属的成分有很大影响。

熔合比 $\gamma = FB / (FB + FD)$ (1-1)

式中FB ——单道焊缝母材熔化部分的横截面积；FD ——单道焊缝熔敷金属在焊缝横截面积上所占的面积。

焊缝金属中合金元素的实际浓度 C_w 为： $C_w = \gamma C_b + (1 - \gamma) C_d$ (1-2)

式中 C_b ——该元素在母材中的质量百分浓度(%) C_d ——该元素在焊材中的质量百分浓度(%)

根据以上分析可以认为，A组实验根部碳刨开口宽度较小（为R=8-10mm），导致母材熔入焊缝中质量百分浓度大；B组实验根部碳刨开口宽度大（为R = 14 - 15 mm），母材熔入焊缝中质量百分浓度小。改进的根部开口，造成焊缝根部中心（Weld metal (Root)）的合金成分得到优化，-60℃低温冲击吸收功值的均值达到了99J。完全满足客户要求的冲击性能在-60℃下达到40J的要求。

四. 结论

本研究通过优选焊接材料、改变根部开口宽度等方法，成功制备了厚度为70mm的S355NL钢管桩焊接接头。

研究表明，通过增大根部碳刨开口宽度，可以达到调整焊缝金属化学成分的目的。当根部碳刨开口宽达到14-15mm时，能够保证S355NL钢管桩焊接接头的焊缝中心（Weld metal）、正面焊缝熔合线区+2mm（HAZ+2mm）、焊缝根部熔合线+2mm（HAZ+2mm(Root)）以及焊缝根部中心（Weld metal (Root)），在-60℃下的低温冲击吸收功值达到40J的要求。

参考文献

- [1] 周艳荣等. 国内外海上风电发展现状及海域使用中的有关问题研究[J]. 海洋开发与管
理, 2011(7):6-9
- [2] 沈大明. 海洋工程产品国产焊材的应用及焊接研究[J]. 机械工人, 2012(8): 19-20
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊手册. 材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [4] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004