

DOI: 10. 11973/jxgccl240310

Q500ME 高强钢板埋弧焊接头的组织及力学性能

陆 辉¹, 张 赫², 李子豪²

(1. 泰胜风能集团股份有限公司, 上海 201508; 2. 中国机械总院集团

哈尔滨焊接研究所有限公司, 哈尔滨 150028)

摘 要:采用KGF-70FD焊丝搭配KGF-102G焊剂对不同厚度Q500ME钢板进行埋弧焊接, 厚度20 mm钢板开V形坡口, 正面3道2层焊, 背面单道单层焊, 厚度40 mm钢板开X形坡口, 正面7道4层焊, 背面2道2层焊, 研究了埋弧焊接头的组织及力学性能。结果表明: 不同钢板厚度下焊缝的组织均主要为先共析铁素体+针状铁素体+粒状贝氏体, 40 mm钢板厚度条件下焊缝中还存在无碳化物贝氏体。接头全厚度(20, 40 mm)拉伸试样的抗拉强度分别为666, 692 MPa, 均高于母材, 180°弯曲后接头均未发生开裂。与20 mm钢板厚度相比, 40 mm钢板厚度条件下焊缝中心的一40℃冲击吸收功更大, 热影响区的冲击吸收功更小。接头冲击断口的断裂形式均为韧性断裂和解理断裂共存的混合断裂。

关键词: Q500ME 高强钢; 埋弧焊; 力学性能; 显微组织**中图分类号:** TG407; TG442**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2025)06-0105-05

0 引 言

随着陆上风电资源逐渐饱和, 越来越多的国家将海上风电资源的开发与利用作为风电发展的重要目标^[1-2]。相比于陆上风电, 海上风电具有更持续稳定的风资源和更高的能源密度, 且不受土地面积限制, 是一种极具潜力的清洁能源发电方式^[3-4]。风电塔筒是支撑风力发电机组的主要结构部件, 为了满足稳定性和耐久性的要求, 常采用高强度钢板如Q355C低合金高强度钢板^[5]、Q420级别高强度钢板等通过焊接工艺进行制造。海上风电塔筒的服役环境更加恶劣, 传统的Q355和Q420等高强度钢板已难以满足一些极端条件下塔架设计承载极限的技术要求。Q500M系列钢板属于低合金高强度钢板, 具有良好的焊接性能, 其中E级钢板的冲击韧性优于D级和C级, 在更低温度下能保持较好性能, 更适用于对钢材性能要求苛刻的环境。Q500ME钢板是一种热机械轧制高强度钢板, 抗拉强度在610~770 MPa, 屈服强度不低于500 MPa, 相较于Q420高强度钢板具有更优的综合力学性能和更低的成本, 是海上风电塔筒的优选材料之一。

国内海上风电塔筒的焊接工艺以埋弧焊、焊条电弧焊和CO₂气体保护焊为主, 其中埋弧焊的

现场生产效率较高, 更符合实际生产需求。风电塔筒所用高强度钢板的厚度变化范围较大(通常在17.5~54.0 mm), 会显著影响焊接效果, 而目前关于海上风电塔筒用不同厚度Q500M系列钢板埋弧焊接研究较少。作者以厚度分别为20, 40 mm的Q500ME钢板为母材, 利用KGF-70FD埋弧焊丝搭配KGF-102G焊剂进行埋弧焊接试验, 研究了不同钢板厚度下接头的组织及力学性能, 以为海上风电塔筒的生产和应用提供技术支持和保障。

1 试样制备与试验方法

母材为山钢集团生产的Q500ME钢板, 厚度分别为20, 40 mm, 碳当量为0.47, 抗拉强度为648 MPa, 屈服强度为521 MPa, 断后伸长率为18%, -40℃冲击吸收功为(111.6±7.1) J, 满足GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》的要求; 焊接材料为KGF-70FD埋弧焊丝与KGF-102G焊剂的组合, 由苏州骐骥焊材公司提供, 焊丝直径为4.0 mm。母材与KGF-70FD埋弧焊丝的化学成分见表1, KGF-102G焊剂通常由SiO₂、CaF₂和Al₂O₃等氧化物组成。按照GB/T 5293—2018《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊剂》对焊丝熔敷金属的力学性能进行检验, 测得抗拉强度为696 MPa, 屈服强度为629 MPa, 断后伸长率为23%, -40℃冲击吸收功为(127.3±5.7) J。

收稿日期: 2024-06-21; **修订日期:** 2025-03-25**作者简介:** 陆辉(1981—), 男, 上海人, 高级工程师, 学士

表1 Q500ME 钢板和 KGF-70FD 埋弧焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q500ME steel plate and KGF-70FD submerged arc welding wire

材料	质量分数/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu
Q500ME 钢	0.10	0.22	1.66	0.008	0.003	0.35	0.04	0.01
KGF-70FD 埋弧焊丝	0.07	0.21	1.56	0.006	0.003		0.33	

为了确定合理的预热温度,按照GB/T 32260.2—2015《金属材料焊缝的破坏性试验 焊件的冷裂纹试验 弧焊方法 第2部分:自拘束试验》,采用前述的焊接材料,对2种厚度钢板进行室温(20℃)不预热以及80℃预热的斜Y型坡口焊接裂纹试验,采用埋弧焊工艺,焊接电流为550 A,电弧电压为31 V,焊接速度为420 mm·min⁻¹。焊接完成后目视检查,所有接头焊缝均未出现明显的表面裂纹和根部裂纹,表面裂纹率和剖面裂纹率均为0。故选择室温不预热条件进行后续焊接试验。

焊接前对试样表面可能存在的氧化皮、锈蚀、油脂、水等杂质进行清理,采用ZD5-1000E型埋弧焊机在室温不预热条件下进行埋弧焊接试验,待焊试样尺寸分别为600 mm×400 mm×*t*(*t*为钢板厚度),焊接坡口形式及焊道排布如图1所示,焊接工艺参数如表2所示。

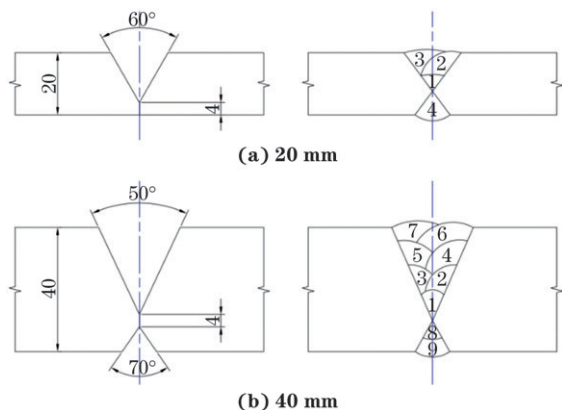


图1 不同厚度钢板的焊接坡口形式及焊道排布

Fig. 1 Welding groove forms and weld bead arrangements of steel plate with different thicknesses

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

施焊步骤	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm·min ⁻¹)
打底	480~520	28~30	500
填充	500~550	30~32	420
盖面	550~620	30~34	400~420

焊接完成后,对接头进行磁粉检测和射线检测,确保接头中不存在裂纹、气孔、未熔合等缺陷。以焊缝为中心在检测合格的接头上取样,经过打磨、抛光及腐蚀后,采用BX51M-OLYMPUS型光学显微镜观察显微组织。以焊缝为中心垂直于焊接方向切取如图2所示的全厚度拉伸试样和尺寸为150 mm×10 mm×*t*的全厚度弯曲试样,去掉焊缝余高。按照GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》、GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》以及GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》,采用SY-YQ-01/SY-YQ-126型微机控制电液伺服万能试验机进行室温拉伸和横向侧弯试验,拉伸速度为24 mm·min⁻¹,采用圆形压头使试样弯曲,压头直径为40 mm。

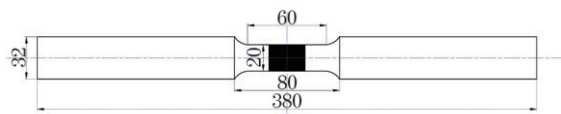


图2 拉伸试样的形状与尺寸

Fig. 2 Shape and size of tensile specimen

在接头上距上表面2 mm处垂直于焊接方向截取夏比V型冲击试样,缺口分别位于焊缝中心及热影响区(距熔合线2 mm处),按照GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,采用SY-YQ-127型金属摆锤式冲击试验机进行低温冲击试验并测试冲击吸收功,试验温度为-40℃,测3个平行试样取平均值。冲击试验完成后,将试样断口依次用Alconox清洗剂和无水乙醇进行超声清洗,烘干,采用德国ZEISS EVO 18型扫描电子显微镜观察冲击断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

2种接头均由焊缝、热影响区和母材组成,其中热影响区包括过热区、正火区和不完全正火区。由图3可知:2种接头焊缝的组织均主要由先共析铁素体(PF)、针状铁素体(AF)和粒状贝氏体(GB)组成,

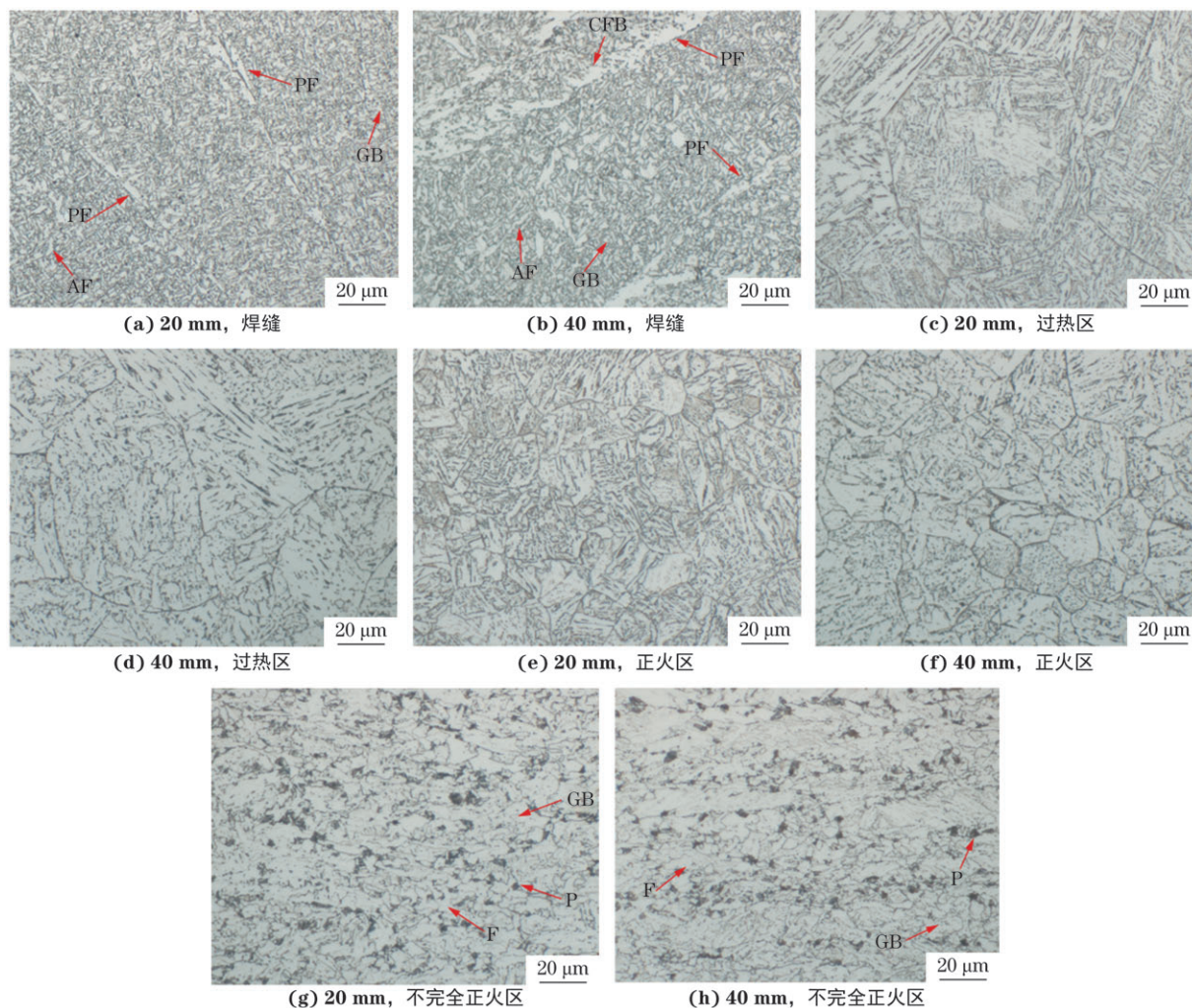


图3 不同钢板厚度下接头焊缝、过热区、正火区和不完全正火区的显微组织

Fig. 3 Microstructure of weld (a-b), overheated zone (c-d), normalized zone (e-f) and incomplete normalized zone (g-h) of joint with different steel plate thicknesses

过热区和正火区均为贝氏体,不完全正火区为粒状贝氏体、铁素体(F)和珠光体(P);40 mm钢板厚度下焊缝中还存在无碳化物贝氏体(CFB)组织,该贝氏体从奥氏体晶界先共析铁素体的侧面以板条状向晶内生长,而20 mm钢板厚度下焊缝中几乎不存在无碳化物贝氏体;20 mm钢板厚度下焊缝中的晶粒相较于40 mm钢板厚度下更细小,分布更均匀。当钢板厚度为40 mm时,热量散失较慢,为无碳化物贝氏体的生长和晶粒长大提供了形成温度和时间。

2.2 力学性能

当接头拉伸试样的厚度为20 mm时,测得的抗拉强度为666 MPa,厚度为40 mm时为692 MPa,均高于母材,40 mm厚度下的抗拉强度相对略高。图4中虚线为经过FeCl₃溶液腐蚀后确定的熔合线位置。可见40 mm厚度下拉伸试样在焊缝处断裂,但大多数拉伸试样在母材处断裂,且靠近熔合线。

20, 40 mm厚度下接头强度与母材强度的比值^[6]分别为1.02, 1.07, 接头为高组配接头,母材相对薄弱,拉伸断裂位置通常出现在母材处。当40 mm厚度下接头在焊缝处断裂可能与焊接残余应力有关:钢板厚度的增加会导致焊接过程中产生的热量和热变形难以迅速散失,使接头产生较大的残余应力^[7],拉伸时在局部应力集中的作用下,焊缝也会成为裂纹源。经过180°弯曲后不同钢板厚度下接头均未发生开裂,具有良好的弯曲性能。

由表3可知,焊缝中心的冲击吸收功在钢板厚度为40 mm时达到93.0 J,高于厚度为20 mm时的75.7 J,而热影响区的冲击吸收功在厚度为20 mm时达到291.8 J,高于厚度为40 mm时的265.2 J。相较于40 mm厚钢板,20 mm厚钢板接头的散热更快,焊缝晶粒相对细小且分布均匀,晶界数量更多,抵抗位错移动和塑性变形的能力增强,当受到冲击作用时,

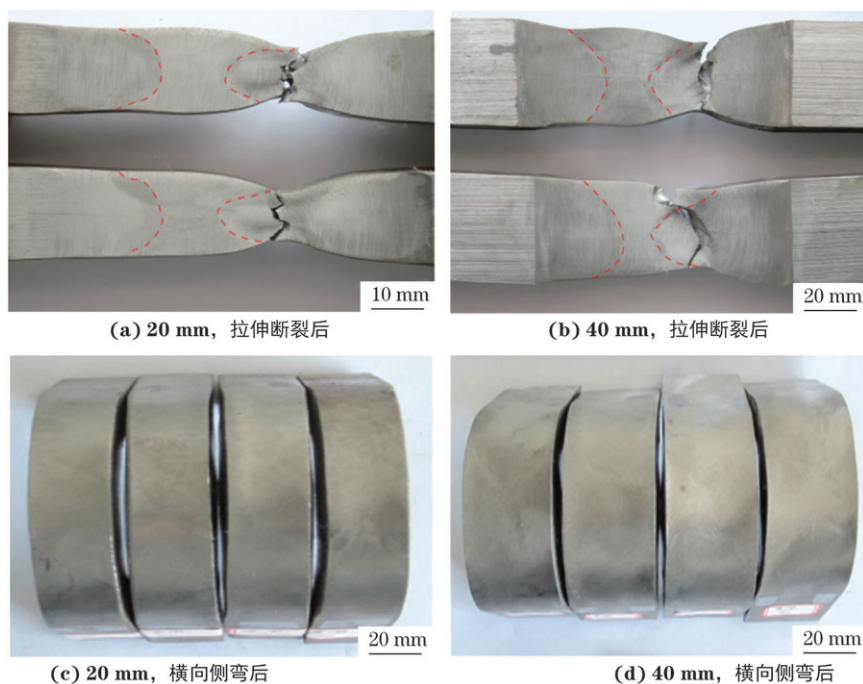


图4 不同钢板厚度下接头试样拉伸断裂和横向侧弯后的宏观形貌

Fig. 4 Macromorphology of joint samples with different steel plate thicknesses after tensile fracture (a-b) and lateral flexion (c-d)

表3 -40 °C 下不同厚度钢板接头的冲击试验结果

Table 3 Impact test results of joints with different steel plate thicknesses at -40 °C

厚度/mm	缺口位置	冲击吸收功/J	
		测试值	平均值
20	焊缝中心	81.5, 68.8, 76.8	75.7
	热影响区	303.5, 304.6, 267.2	291.8
40	焊缝中心	83.6, 104.8, 90.6	93.0
	热影响区	251.5, 249.1, 294.9	265.2

晶界能够有效阻止裂纹扩展,从而提高韧性^[8-9];理论上20 mm钢板厚度下接头的冲击韧性应整体优于40 mm钢板厚度下,但焊缝中心处的试验结果却与此相反,这可能与40 mm钢板厚度下焊缝中还存在无碳化物贝氏体组织有关。无碳化物贝氏体中存在高密度位错和残余奥氏体,不存在硬而脆的碳化物;高密度位错会通过运动耗散冲击能量,残余奥氏体能够通过相变来吸收能量并提高韧性,二者协同作用提高了接头的冲击吸收能力^[10]。

2.3 冲击断口形貌

由图5可知,不同接头试样的冲击断口中均存在韧性断裂区域(DFZ)和解理断裂区域(CFZ),断裂形式均为混合断裂。解理断裂区域相对平坦,伴有明显的解理面与河流花样,并且可观察到撕裂棱;韧性断裂区域出现断裂韧带,断裂方式均为微孔聚集

断裂。不同厚度钢板焊接接头焊缝中心韧性断裂区的韧窝形态不同:焊缝中心冲击断口的韧性断裂区域在钢板厚度为20 mm时主要由深度相对较浅的剪切韧窝组成,基本呈抛物线状,开口朝向缺口根部,在钢板厚度为40 mm时主要存在等轴韧窝。热影响区冲击断口的韧性断裂区域在不同钢板厚度条件下均出现明显的撕裂倾向,撕裂方向与所受冲击载荷的作用方向一致,韧窝被拉长,且尺寸普遍较大。

3 结 论

(1)在20 °C不预热条件下,埋弧焊接不同厚度Q500ME钢板接头焊缝的组织均主要为先共析铁素体+针状铁素体+粒状贝氏体,当钢板厚度为40 mm时焊缝中还存在无碳化物贝氏体。

(2)接头全厚度(20, 40 mm)拉伸试样的抗拉强度分别达666, 692 MPa,均高于母材,并且经过180°弯曲后接头试样均未发生开裂,具有良好的弯曲性能。与20 mm钢板厚度条件下相比,40 mm钢板厚度条件下焊缝中心的-40 °C冲击吸收功更大,热影响区的冲击吸收功更小。

(3)不同钢板厚度条件下,接头焊缝和热影响区的冲击断口均为韧性断裂与解理断裂共存的混合断裂。焊缝中心的韧性断裂区域在钢板厚度为20 mm条件下存在较浅的剪切韧窝,在厚度为40 mm时存

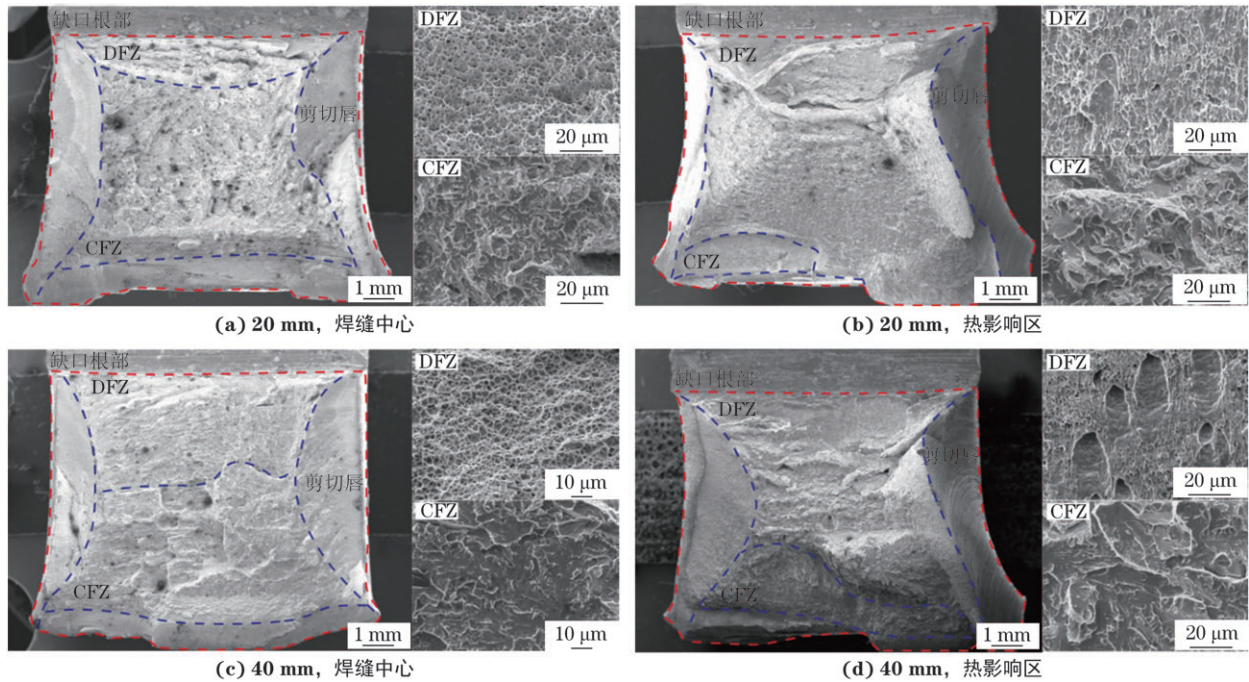


图 5 不同钢板厚度下接头不同区域的冲击断口形貌

Fig. 5 Impact fracture morphology in different zones of joints with different steel plate thicknesses:
(a, c) weld center and (b, d) heat affected zone

在等轴韧窝;热影响区的韧性断裂区域存在较为明显的撕裂倾向。

参考文献:

- [1] JUNG C, SCHINDLER D. The properties of the global offshore wind turbine fleet[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 186: 113667.
- [2] 林玉鑫, 张京业. 海上风电的发展现状与前景展望[J]. 分布式能源, 2023, 8(2): 1-10.
LIN Y X, ZHANG J Y. Development status and prospect of offshore wind power[J]. Distributed Energy, 2023, 8(2): 1-10.
- [3] BILGILI M, YASAR A, SIMSEK E. Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 905-915.
- [4] HOSIUS E, SEEBAß J V, WACKER B, et al. The impact of offshore wind energy on Northern European wholesale electricity prices[J]. Applied Energy, 2023, 341: 120910.
- [5] 王志鹏. Q355C激光-MAG复合焊接工艺及接头性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
WANG Z P. Study on laser MAG hybrid welding process and joint properties of Q355C[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [6] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
FANG H Y. Welding structure[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [7] LU W L, SUN J L, SU H, et al. Experimental research and numerical analysis of welding residual stress of butt welded joint of thick steel plate[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01991.
- [8] 潘金生, 全健民, 田民波. 材料科学基础[M]. 修订版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
PAN J S, TONG J M, TIAN M B. Fundamentals of materials science[M]. Revised ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [9] 朱浩, 张梅, 叶青亮. 不同焊接工艺下FB780钢焊接接头热影响区的显微组织和冲击韧性[J]. 机械工程材料, 2019, 43(1): 54-57.
ZHU H, ZHANG M, YE Q L. Microstructure and impact toughness of heat affected zone of FB780 steel welded joint with different welding processes[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(1): 54-57.
- [10] LONG X Y, ZHANG F C, YANG Z N, et al. Study on microstructures and properties of carbide-free and carbide-bearing bainitic steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 715: 10-16.

(下转第 134 页)

Cracking Cause of 12Cr1MoV Steel Header Socket and Connecting Pipe Welded Joint in Ultra-supercritical Unit

SONG Hongfeng^{1,2}, DU Jinfeng³, ZHANG Xueling¹, LI Haizhao³, QIAO Zhan³,
ZHAO Yuanyuan³, YANG Haisong⁴

(1. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. NCS Jiangsu Testing Technology Co., Ltd., Kunshan 215333, China; 3. New Energy Technology Research Institute, CHN Energy, Beijing 102209, China; 4. Sanhe Power Generation Co., Ltd., Sanhe 065201, China)

Abstract: During 168 h full-load trial operation of an ultra-supercritical unit, cracking occurred at welded joints of 12Cr1MoV steel low re-export header socket and connecting pipe. The cracking cause was analyzed by macroscopic morphology observation, chemical composition analysis, mechanical property test and microstructure observation. The results show that the service temperature of the welded joint of 12Cr1MoV steel socket and connecting pipe was in the reheating crack sensitive temperature range. The reheating cracks were initiated quickly and expanded in the wide heat affected zone under the superposition of structural stress, constraint stress generated by forced welding and welding stress which was not eliminated by heat treatment, and eventually led to cracking of the joint. It was recommended to adopt a same-diameter and equal-wall-thickness connection method between 12Cr1MoV steel connecting pipe and socket. The strong matching was strictly prohibited in the welding process. Low welding heat input should be adopted and post-weld heat treatment should be carried out to reduce the sensitivity of reheating cracking.

Key words: ultra-supercritical unit; 12Cr1MoV steel welded joint; reheating crack; stress concentration; strength and toughness

(上接第109页)

Microstructure and Mechanical Properties of Q500ME High Strength Steel Plate Submerged Arc Welded Joint

LU Hui¹, ZHANG He², LI Zihao²

(1. TSP Wind Power Group Co., Ltd., Shanghai 201508, China; 2. Harbin Welding Institute Limited Company, China Academy of Machinery Science and Technology Group, Harbin 150028, China)

Abstract: The submerged arc welding was carried out on different thickness Q500ME steel plate with KGF-70FD welding wire and KGF-102G flux. For the 20 mm-thickness steel plate, the V-shaped groove was machined, two-layer three-pass welding was carried out on the front side and single-layer single-pass was on the back side. For the 40 mm-thickness steel plate, the X-shaped groove was prepared, four-layer seven-pass welding was carried out on the first side, and two-layer two-pass was on the back side. The microstructure and mechanical properties of the submerged arc weld joints were studied. The results show that the microstructure of the weld with different steel plate thicknesses was mainly composed of proeutectoid ferrite, acicular ferrite and granular bainite, and there was also carbide-free bainite in the weld with 40 mm steel plate thickness. The tensile strength of the full-thickness (20, 40 mm) tensile specimens of the joints was 666 MPa and 692.5 MPa, respectively, which were higher than that of the base metal. The joints did not crack after 180° bending. Compared with those under the steel plate thickness of 20 mm, the impact absorption energy at -40 °C of the weld center with the steel plate thickness of 40 mm was greater, and the impact absorption energy in the heat affected zone was smaller. The fracture form of the impact fracture of the joints was the mixture of ductile fracture and cleavage fracture.

Key words: Q500ME high strength steel; submerged arc welding; mechanical property; microstructure