风电钢 Q420ME 焊接连续冷却相变行为研究

韩 钧,黄 利,袁晓鸣,何建中

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要:为研究风电钢 Q420ME 的焊接性,测定了 SH - CCT 曲线,测出风电钢 Q420ME 的 Ac_1 温度为 690 ℃, Ac_3 温度为 920 ℃。SH - CCT 曲线分析表明,冷速在 10 ~ 40 ℃/s 时,冷却过程中先发生贝氏体转变,而后发生马氏体的转变,组织为贝氏体和马氏体。随着冷却速度的增加,贝氏体含量减少,马氏体含量增加,风电钢 Q420ME 硬度增加。

关键词:风电钢;焊接性;冷却速度;组织

中图分类号:TG457.11 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0051 - 04

Study on Continuous Cooling Transformation Behavior of Welding Wind Power Steel Q420ME

Han Jun, *Huang Li*, *Yuan Xiaoming*, *He Jianzhong*

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In order to study the weldability of wind power steel Q420ME, the SH - CCT (simulated heat - affected zone continuous cooling transformation) curve is determined, temperatures of Ac_1 and Ac_3 for wind power steel Q420ME are 690 ℃ and 920 ℃ separately. The SH - CCT curve analysis shows that the bainite transformation occurs first, followed by martensite transformation during cooling process as well as the microstructure is bainite and martensite when cooling rate is 10 ~ 40 ℃/s. With the increase of cooling rate, the content of bainite is decreased, while content of martensite and hardness of wind power steel Q420ME are increased.

Key words: wind power steel; weldability; cooling rate; microstructure

风电装备的服役场景具有强特殊性,陆上风电多分布在高原高寒地区、戈壁,这些地区气温低、风沙大、昼夜温差大。海上风电面临盐雾腐蚀环境、高湿度环境,且装备一旦安装(如百米高塔、海上平台),维护难度极大、成本极高,焊接接头的失效将直接导致整机停机,甚至发生坍塌事故。焊接连续冷却相变行为的研究,本质是通过理解“热循环 - 相变 - 组织”的科学规律,实现对焊接接头性能的“精准调控”和对焊接缺陷的“主动预防”[1-5]。

1 焊接 CCT 曲线测定

为研究风电钢 Q420ME 的焊接性,按照标准 YB/T 5127—2018《钢的临界点测定 膨胀法》选择金相法和膨胀法测定 SH - CCT 曲线,试验机为

收稿日期:2025 - 11 - 24

作者简介:韩 钧(1983 -),男,辽宁省鞍山市人,博士,高级工程师,现从事钢板热处理工艺技术研究与产品开发工作。

Gleeble－3800,试验辅助硬度检测完善 SH－CCT。在板厚1/4处取样,根据试验机夹具尺寸要求加工试样,试件尺寸如图1所示。

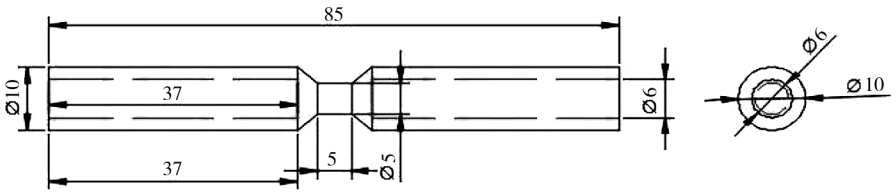


图1 CCT曲线测定试验试样

采用热膨胀法测平衡临界温度 Ac_1、Ac_3,多种升温速度试验得出相同结果,测出风电钢Q420ME的 Ac_1 温度为690 ℃,Ac_3 温度为920 ℃。

通过Gleeble－3800试验机进行焊接过程热模拟,升温速度设定为200 ℃/s,在高温区1 350 ℃保温2 s,以保证试件确实达到1 350 ℃,从1 350～950 ℃,冷却速度最快为100 ℃/s,防止降温过冲,热循环过程控制示意图如图2所示。950 ℃节点为 Ac_3 以上温度点,再采用不同的冷却速度将试样冷却至室温,测得试样在冷却过程中的温度－应变膨胀曲线。试验过程中通过膨胀量确定组织转变起始点和终止点温度,试验完成后采用显微镜观察转变组织,结合硬度得出冷却过程中的CCT曲线。

热模拟试验采用的冷却参数如表1所示,不同冷却参数下的热模拟试样微观组织如图3所示。

对不同冷却速度条件下的试样进行维氏硬度测试,测试结果如表2所示。随着冷却速度的增加,硬度呈上升趋势。

绘制的SH－CCT曲线如图4所示。图中实测点由膨胀曲线测得,CCT曲线由实测点拟合而成。通过金相组织和SH－CCT曲线可以看出,冷速在0.5～1 ℃/s时,冷却过程中发生了铁素体相变和珠光体相变,组织为先共析铁素体和珠光体;冷速在1～2 ℃/s时,冷却过程中先发生铁素体相变,随后珠光体发生回溶,继续降温发生贝氏体相变,组织为少量先共析铁素体和贝氏体;冷速在2～10 ℃/s时,冷却过程中仅发生贝氏体相变,组织为贝氏体;冷速在10～40 ℃/s时,冷却过程中先发生贝氏体转变,而后发生马氏体的转变,组织为贝氏体和马氏体。随着冷却速度的增加,贝氏体含量减少,马氏体含量增加,硬度增加。

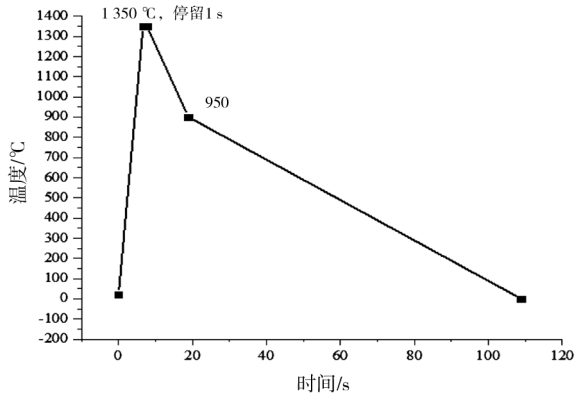
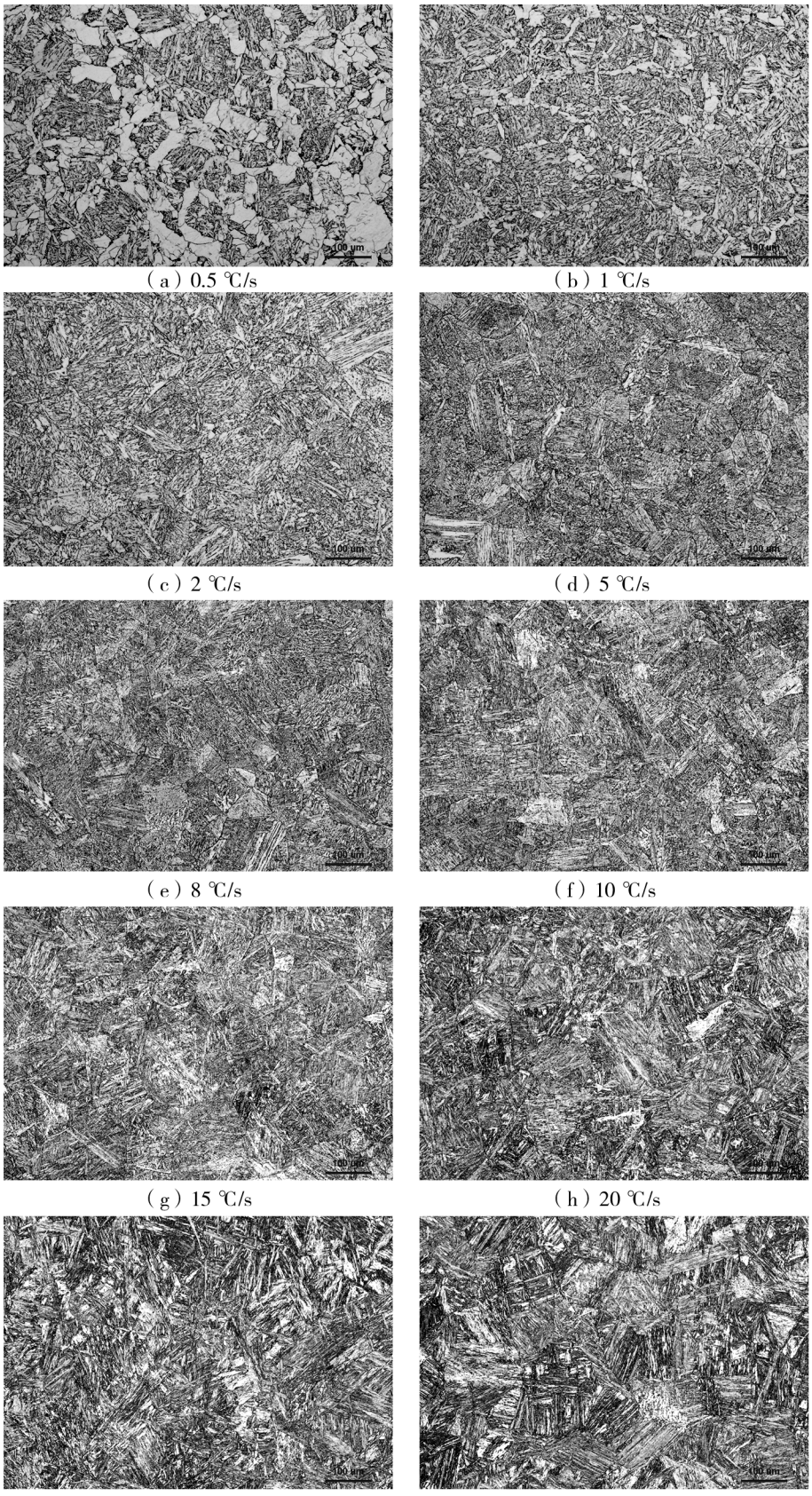


图2 热循环控制过程示意图

表1 冷却参数

试样编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#
950 ℃～室温冷却速度/(℃·s^{-1})	0.5	1	2	5	8	10	15	20	30	40	60	100	300
冷却速度对应 $T_{8/5}$ 时间/s	600	300	150	60	37.5	30	20	15	10	7.5	5	3	1



（a）0.5 ℃/s　（b）1 ℃/s

（c）2 ℃/s　（d）5 ℃/s

（e）8 ℃/s　（f）10 ℃/s

（g）15 ℃/s　（h）20 ℃/s

（i）30 ℃/s　（j）40 ℃/s

图 3　不同冷却速度的微观组织照片

表 2 不同冷却速度下的硬度值

冷却速度 /(℃·s^{-1})	HV10 硬度值			
	单值			平均
0.5	204.5	213.3	200.5	206.1
1	209.7	206.6	207.8	208.0
2	203.3	210.8	208.5	207.5
5	223.2	220.7	222.4	222.1
8	243.9	240.8	244.5	243.1
10	235.3	271.4	260.6	255.8
15	283.2	277.2	266.8	275.7
20	313.4	321.3	317.0	317.2
30	315.7	329.5	317.0	320.7
40	355.6	350.9	350.2	352.2
60	350.5	363.9	356.3	356.9
100	363.9	377.1	363.1	368.0

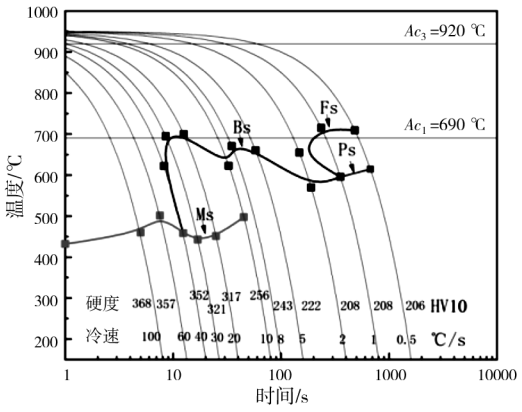


图 4 试验钢 SH－CCT 图

2 结论

(1)采用热膨胀法测出风电钢 Q420ME 的 Ac_1 温度为 690 ℃，Ac_3 温度为 920 ℃。

(2)风电钢 Q420ME 的 SH－CCT 曲线分析表明，冷速在 10～40 ℃/s 时，冷却过程中先发生贝氏体转变，而后发生马氏体的转变，组织为贝氏体和马氏体。随着冷却速度的增加，贝氏体含量减少，马氏体含量增加，硬度增加。

参 考 文 献

[1] 张文明. 窄间隙埋弧焊的特点及未来发展[J]. 新技术新工艺，2011(11)：59－60.

[2] 王斌，郑卫刚. 窄间隙埋弧焊焊接曲轴[J]. 热加工工艺，2013，42(9)：174－175.

[3] 徐国，郑卫刚. 风电塔筒用 Q345E 钢窄间隙埋弧焊性能研究[J]. 热加工工艺，2018，43(17)：201－205.

[4] 王树明，张兵兵，智敏. 低合金高强度钢的焊接性研究[J]. 金属加工(热加工)，2011(18)：44－45.

[5] 王春生，周振丰. 低合金奥－贝球铁焊接峰值温度(T_m)对热影响区组织与力学性能的影响[J]. 吉林工业大学学报，1997(1)：28－32.