

· 组织和性能 ·

60 mm 厚低屈强比高强钢板 Q500qE 组织与性能研究

孙宪进, 杜鹏举, 赵乾

(江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江阴 214400)

摘要: 通过 JMatpro 软件、扫描电镜、力学性能测试, 对 Q500qE 60 mm 厚度 500 MPa 级低屈强比高强钢板进行了连续冷却转变 (CCT) 曲线、钢板显微组织与力学性能、焊接接头力学性能分析。结果表明, 通过控轧控冷工艺: 终轧温度 800 ~ 840 °C, 入水温度 660 ~ 680 °C 和终冷温度 400 ~ 450 °C, 该钢组织为铁素体 + 贝氏体 + 马氏体/奥氏体岛, 两相交界处和贝氏体内部存在大量大角度晶界。钢板 1/4 和 1/2 厚度位置屈服强度 ≥ 500 MPa, 抗拉强度 ≥ 640 MPa, 屈强比 ≤ 0.80 , -40 °C 低温冲击功 ≥ 200 J, 焊接热影响区 -40 °C 低温冲击功 ≥ 100 J。

关键词: 低屈强比; 多相组织; Q500qE 高强钢板; 60 mm 厚板

Microstructure and Properties of Q500qE Low Yield Ratio High Strength Steel 60 mm Thickness Plate

Sun Xianjin, Du Pengju, Zhao Qian

(Insitute of Research of Special Steel, JiangyinXingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214400)

Abstract: The continuous cooling transformation (CCT) curve, microstructure and mechanical properties of Q500qE low yield ratio high strength steel 60 mm thickness plate have been studied by JMatpro software, scanning electron microscope and mechanical property tests. The results show that by control rolling and control cooling process; the final rolling temperature 800-840 °C, the into water temperature 660-680 °C and the final cooling temperature 400-450 °C, the microstructure of steel is composed of ferrite, bainite and MA (martenite/austenite) island, and many large angle grain boundaries exist in junction of two phases and in bainite. The properties of the steel at 1/4 and 1/2 thickness are yield ratio 0.78-0.79, yield strength ≥ 500 MPa, tensile strength ≥ 640 MPa, charpy impact energy of 1/2 thickness at -40 °C ≥ 200 J, for HAZ charpy impact test at -40 °C, the charpy impact energy of HAZ ≥ 100 J.

Material Index: Low Yield Ratio; Multi-Phases Microstructure; Q500qE High Strength Steel; 60 mm Thickness Plate

为预防自然灾害对大型钢结构工程构件造成严重破坏, 保证钢结构在一定变形条件下的使用安全, 工程设计上对材料抗变形能力提出了更为严格的要求。屈强比作为衡量钢板抗变形能力的一个重要指标, 已经广泛应用在高层建筑、桥梁、管线用钢的材料规范中^[1-2]。低屈强比成为第三代高性能特殊钢的典型特征之一。当前调控屈强比主要采用得到软硬相交错分布的多相组织来实现^[3-6], 从生产工艺上主要分为在线控轧控冷热机械控制工艺 (thermo mechanical control process, 简称 TMCP) 和离线热处理工艺两种。对于厚规格钢板来讲, 目前主要采用两相区淬火 + 回火、直接淬火 + 回火和超快冷却 + 在线感应加热等工艺生产^[7-8], 在线 TMCP 工艺生产厚规格低屈强比高强钢板技术尚处于探索状态。本项目依托 4300 双机架生产线, 研究了在线 TMCP 工艺生产 60 mm 厚度 Q500qE 低屈强比高强钢板的可

行性, 并对钢板显微组织、力学性能和焊接接头力学性能进行分析, 探讨了显微组织与力学性能之间的规律。

1 试验材料和方法

试验用钢工艺流程为: 转炉冶炼 → LF + RH 真空精炼 → 板坯连铸 → 板坯加热 → 控轧控冷 → 探伤 → 取样 → 表面尺寸检查 → 成品入库。采用 150 t 碱性顶底复吹转炉冶炼、经 LF + RH 真空精炼处理和 370 mm × 2 200 mm 断面连铸坯浇铸, 获得高洁净连铸坯, 试验钢化学成分见表 1。铸坯加热温度 1 180 ~ 1 250 °C, 运用 TMCP 轧制技术, 终轧温度设定为 800 ~ 840 °C, 入水温度设定为 660 ~ 680 °C, 终冷温度在 400 ~ 450 °C, 成品钢板尺寸为 60 mm × 2 400 mm × 90 000 mm。从钢板厚度的 1/4 和 1/2 位置取样进行显微组织和力学性能测试, 拉伸试验

是在 Instron 试验机上进行,采用圆棒拉伸,取样方向与轧制方向垂直,冲击取样方向与轧制方向平行,冲击试验是在 ZBC2302N-3 自动冲击试验机上进行,利用美国 Psem 型扫描电镜进行组织观察。金相试样经过 10% 高氯酸、甘油和酒精混合溶液进行电解抛光后,利用 JSM7001 + Inca Energy 型配备电

子背散射衍射仪(EBSD)的扫描电镜进行晶体学特征表征。焊接试验条件见表 2,采用埋弧焊(SAW),焊接热输入量为 15 kJ/cm 和 50 kJ/cm,K 型坡口,焊接接头分别进行拉伸和冲击试验,冲击试样取样位置为钢板 1/4 厚度位置,冲击试样缺口位置分别为焊缝中心、熔合线、熔合线外 2 mm、5 mm、20 mm。

表 1 试验 Q500qE 钢的化学成分/wt%
Table 1 Chemical composition of tested Q500qE steel/wt%

C	Si	Mn	Alt	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Ti
0.06 ~ 0.09	0.20 ~ 0.30	1.50 ~ 1.60	0.02 ~ 0.04	0.10 ~ 0.30	0.15 ~ 0.30	0.10 ~ 0.30	0.15 ~ 0.30	0.03 ~ 0.06	0.02 ~ 0.04	0.01 ~ 0.02

表 2 焊接试验条件
Table 2 Welding conditions for each welding method

焊接方式	热输入量/(kJ·cm ⁻¹)	电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)
SAW	15	440	30	50
SAW	50	720	36	32

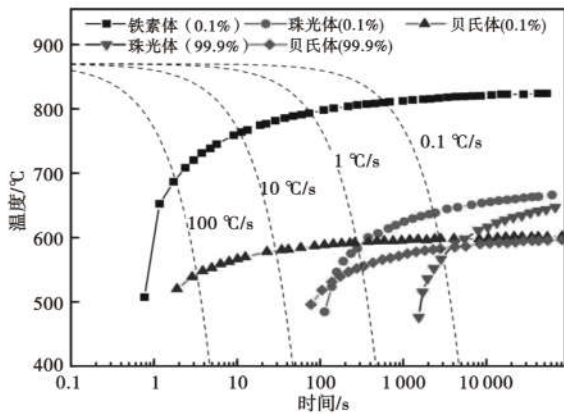


图 1 用 JMatpro 软件计算试验 Q500qE 钢的 CCT 曲线
Fig. 1 Continuous cooling transformation curves of Q500qE steel calculated By JMatpro soft ware

表 3 Q500qE 低屈强比钢板的力学性能
Table 3 Mechanical properties of Q500qE low yield ratio steel plate

钢板	取样位置	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	R_{eL}/R_m	$A/\%$	$A_{kv2}(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
60 mm 厚 Q500qE 钢	1/4 厚度	≥ 480	≥ 630	无要求	≥ 18	≥ 120
标准要求						
60 mm 厚试验 Q500qE 钢	1/4 厚度	522	662	0.79	22	285/271/272
实物性能	1/2 厚度	506	648	0.78	27	226/229/211

试验钢各个位置性能均满足 GB/T 714-2015 《桥梁用结构钢》国家标准要求。

2 试验结果

2.1 模拟计算

图 1 是利用 JMatpro 相图软件计算的相变曲线,从计算结果上看,奥氏体向铁素体转变开始温度 800 ~ 850 °C,铁素体的转变终止温度在 600 °C 以下,通过计算,可以初步确定得到铁素体的温度范围在 600 ~ 800 °C。考虑到铁素体转变后,由于成分偏聚等因素,剩余未转变奥氏体中的合金元素发生显著变化,因此,贝氏体转变所需的冷速及终冷温度,需要通过现场实践验证。

2.2 钢板力学性能

60 mm 厚 Q500qE 低屈强比钢板 1/4 和 1/2 厚度位置的力学性能见表 3,钢板 1/4 和 1/2 厚度位置屈服强度分别为 522 MPa 和 506 MPa,抗拉强度分别为 662 MPa 和 648 MPa,1/4 比 1/2 厚度位置大约高 20 MPa;屈强比分别为 0.79 和 0.78, - 40 °C 夏比冲击功均大于 200J,1/4 厚度位置韧性更好。

2.3 焊接接头力学性能

焊接接头力学性能见表 4 所示,在 15 kJ/cm

表 4 Q500qE 钢焊接接头力学性能
Table 4 Mechanical properties of Q500qE steel welded joints

热输入量	R_m/MPa	断裂位置	$A_{kv2}(-40\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$				
			焊缝中心	熔合线	熔合线 + 2 mm	熔合线 + 5 mm	熔合线 + 20 mm
15 kJ/cm	644	母材	107,98,110	142,152,144	191,201,198	216,203,198	289,302,265
50 kJ/cm	639	母材	89,92,98	123,131,128	119,131,133	132,127,144	246,256,221

和 50 kJ/cm 线能量下,该钢级的焊接接头的抗拉强度均在 630 MPa 以上,与母材强度相比略有下降;-40 ℃ 试验温度下,焊缝中心冲击功均在 80 J 以上,熔合线及焊接热影响区位置冲击功均在 100 J 以上,与高热输入量相比,低热输入量的焊接接头低温韧性更好。

2.4 显微组织

试验钢 1/4 和 1/2 厚度位置显微组织如图 2,由图 2 可见,试验钢主要由准多边形铁素体、贝氏体、部分 MA 组织构成。其中 1/4 板厚位置铁素体比例约占到 60%,贝氏体以板条贝氏体为主,而 1/2 板厚位置铁素体比例约占到 40%,贝氏体以粒状贝

氏体为主。图 3 为试验钢板的晶界分布情况,45° 以上大角晶界主要分布于贝氏体中,铁素体晶界角基本都小于 45°。45° 以上大角晶界能够阻碍裂纹扩展,对双相钢材料低温韧性有很大改善^[9]。从晶粒取向衬度图可以看出,铁素体晶粒取向一致,相邻铁素体晶粒取向不同,这是由于原奥氏体晶粒本身就存在取向差。而由一个原奥氏体晶粒转变而来的贝氏体晶粒,由于存在变体选择,导致晶粒内部存在取向差,体现在晶粒取向分布图上为相邻晶粒存在渐变颜色。但是由于获取的贝氏体组织为粒状贝氏体组织,所以从晶粒取向分布图上可以看出,贝氏体内变体选择比较严重。

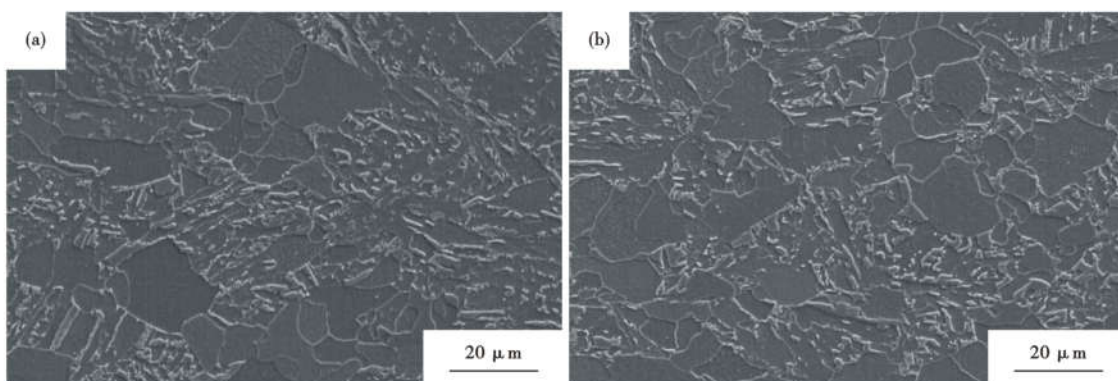


图 2 试验钢 SEM 显微组织:(a)1/4 板厚, (b)1/2 板厚
Fig.2 SEM images of test steel: (a) the quarter thickness, (b) the centre of the plate

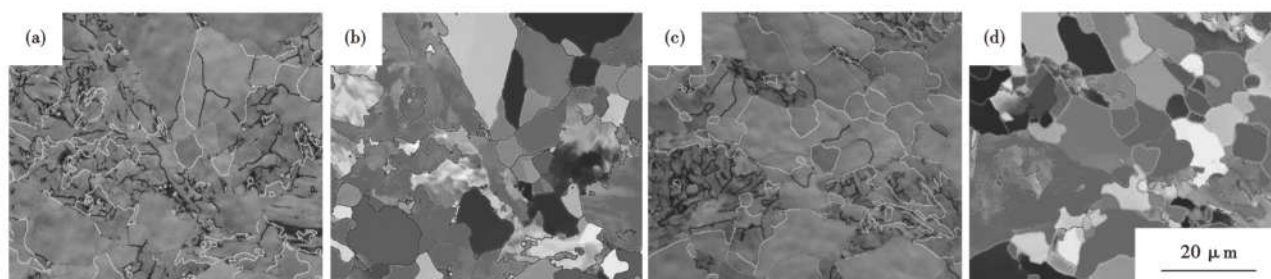


图 3 多相组织晶体结构 EBSD 标定:(a)和(b)1/4 板厚,(c)和(d)1/2 板厚,黑线为 5 ~ 15° 晶界角,灰线为 15 ~ 45° 晶界角,白线为 >45° 晶界角
Fi.3 Electron backscattering diffraction characterization of multi-phase crystal structure: (a) and (b) quarter thickness, (c) and (d) centre of the plate,black line:5 ~ 15° boundary; gray line:15 ~ 45° boundary; white line: >45° boundary

3 结果分析讨论

在铁素体贝氏体多相钢中,铁素体作为软相存在,保证材料具有足够的塑性,贝氏体作为硬相存在,保证材料具有必要的强度^[10-11]。而其中,软相与硬相的比例和形态是影响最终性能的关键因素,通过软相和硬相之间的协调变形能力,使材料在强韧塑的性能匹配达到最佳状态,同时获得屈强比较

低的特厚板材。尤其是材料的低温韧性,与单纯的贝氏体厚板相比较,铁素体和贝氏体的协调作用,使材料表现出更好的低温韧性。可见,控制相变过程是多相组织钢的关键。相比于薄规格钢板来讲,60 mm 厚度钢板在相变过程中,存在表面和厚度中心温度差大、快冷阶段冷速差大的不同点,为在整个厚度截面上均得到两相组织,需要考虑其差异性。

首先,由图 1 中所示的相变计算曲线可见,当温

度在 600 ~ 800 °C 时,均处于奥氏体向铁素体转变阶段,因此,终轧温度设定在 800 ~ 840 °C,使得在进入空冷阶段前,钢板表面和心部均未发生相变。空冷阶段终止温度,即入水温度设定在 660 ~ 680 °C,考虑到表面与心部温度差,此时心部温度预计在 690 ~ 720 °C,均处于奥氏体向铁素体转变温度区间内。在终轧到水冷开始阶段,主要发生奥氏体向铁素体转变,得到多边形铁素体组织 + 未转变完成的奥氏体组织。

随后,进入到快速冷却阶段,通过合理控制冷却速度,未完成转变的奥氏体在快速冷却作用下转变为板条贝氏体或粒状贝氏体组织,表面或 1/4 位置由于冷速快,得到了多边形铁素体 + 板条贝氏体组织,铁素体比例约占 60%;心部位置由于冷速较慢,得到了多边形铁素体 + 粒状贝氏体组织,铁素体比例约占 40%,铁素体晶粒平均尺寸在 5 ~ 10 μm,心部晶粒比 1/4 位置粗大。

钢板的屈服强度主要受软相组织多边形铁素体的晶粒度影响,1/4 厚度位置多边形铁素体晶粒尺寸比心部略大,因此,屈服强度值 1/4 位置比心部高 16 MPa。抗拉强度受软硬相形态、比例共同作用影响,试验钢种 1/4 厚度位置显微组织为多边形铁素体 + 板条贝氏体,1/2 厚度位置显微组织为多边形铁素体 + 粒状贝氏体,硬相贝氏体组织的形态有所不同,板条贝氏体强度更高,综合作用下 1/4 厚度位置抗拉强度比 1/2 位置高 14 MPa。屈强比由屈服

强度和抗拉强度共同决定,试验钢中厚度 1/4 厚度位置和 1/2 厚度位置屈强比无明显差异,均 < 0.80。钢板的低温韧性受晶粒度和贝氏体形态共同影响,晶粒尺寸越大,韧性越差,同时,板条贝氏体韧性高于粒状贝氏体组织,综合作用下,1/4 厚度位置冲击功比 1/2 厚度位置高约 54 J,各位置均具有良好的低温韧性。

4 结论

(1) 采用低碳及 Ni-Cr-Cu-Mo-Nb-V-Ti 微合金化成分设计,在 4300 轧制生产线上采用控轧控冷工艺,终轧温度 800 ~ 840 °C、入水温度 660 ~ 680 °C,终冷温度 400 ~ 450 °C 时,能够得到 60 mm 厚度低屈强比多相组织高强度钢板 Q500qE。

(2) 钢板 1/4 和 1/2 厚度位置显微组织由铁素体 + 贝氏体 + MA 岛构成,其中 1/4 板厚位置铁素体比例约占 60%,贝氏体以板条贝氏体为主,而 1/2 板厚位置铁素体比例约占 40%,贝氏体以粒状贝氏体为主。在铁素体与贝氏体交界处以及贝氏体内部,存在大量的大角度晶界。钢板屈服强度 ≥ 500 MPa,屈强比 ≤ 0.80, -40 °C 低温冲击吸收功 ≥ 200 J。

(3) 焊接试验结果显示,钢板在 15 kJ/cm 和 50 kJ/cm 的线能量下,焊接接头具有良好的低温韧性和拉伸性能,可很好的满足高层建筑、桥梁等低屈强比高强度钢板的技术要求。

参考文献

- [1] 陈星宇,徐振,王宁,等. 低屈强比高强度海工钢研究进展[J]. 特殊钢, 2020, 41(6):1-5.
- [2] 李鹤林,油气管道基于应变的设计及抗大变形管线钢的开发与应用[J]. 石油科技论坛, 2008(2):19-25.
- [3] 邵春娟,邵伟,镇凡,等. 控轧控冷工艺对 X70 级抗大变形管线钢组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(3):110-115.
- [4] 王明明,高秀华,杜林秀,等. V-N 微合金化 X80 抗大变形管线钢的组织与力学性能[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2020, 41(6):801-806.
- [5] 栗建辉,张星,董跃星,等. FTSR 产线低屈强比高强钢的开发实践[J]. 轧钢, 2021, 38(2):72-75.
- [6] 刘美艳,马龙腾,王彦锋,等. Mo 添加对低屈强比 460 MPa 级焊接结构钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(8):109-114.
- [7] 唐帅,刘振宇,王国栋. 低屈强比 590/780MPa 建筑用钢 DL-T 工艺研究[J]. 轧钢, 2010, 27(1):6-10.
- [8] 赵国昌,张海军,刘生,等. 500MPa 级 S500QL 调质高强度钢板在线直接淬火(DQ)工艺研究及应用[J]. 特殊钢, 2021, 42(3):57-62.
- [9] 由洋,王学敏,尚成嘉. 奥氏体化温度对 HSLA100 高强度低合金钢组织及冲击韧性的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(11):1290-1298.
- [10] 吉玲康,李鹤林,赵文珍. X70 抗大变形管线钢管的组织结构和形变硬化性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(9):108-113.
- [11] 武凤娟,杨浩,曲锦波. 强化机制对高强度桥梁钢 Q500qE 屈强比的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(12):52-58.