

低焊接裂纹敏感性低碳贝氏体高强度钢板 Q800CFE 的研发

刘丽华

(南京钢铁股份有限公司新产品研发推广中心,南京210035)

摘要 研发的25 mm Q800CFE 钢板(/% :0.04 ~ 0.08C, 0.20 ~ 0.50Si, 1.50 ~ 1.80Mn, ≤0.015P, ≤0.005S, 0.015 ~ 0.060Nb, ≤0.30Mo, ≤0.03Ti, 0.0008 ~ 0.0030B; 裂纹敏感性指数 ≤0.23) 的冶金流程为铁水预处理-120 t 转炉-LF-RH-220 mm CC-轧制工艺。成品板终轧 ≤850 °C, 水冷至 ≤400 °C, 冷却速度 20 ~ 30 °C/s, 并进行 530 ~ 635 °C 回火处理。测试了 Q800CFE 钢板的动态连续冷却转变(CCT) 曲线, 研究了回火温度对组织和力学性能的影响, 以及试验了该钢的焊接性能。结果表明, 随回火温度增加, 板条组织尺寸增大; 在 530 °C 回火时, Q800CFE 钢板具有较优的力学性能, 抗拉强度 ≥900 MPa、伸长率 ≥15%, -40 °C 夏比冲击功 ≥100 J; 25 mm 板室温下预热 75 °C 焊接接头即可防止产生冷裂纹。

关键词 低碳贝氏体高强度钢 Q800CFE 在线淬火 回火 组织 力学性能 焊接性能

Research and Development of Low Welding Sensitiveness Low Carbon Bainite High Strength Steel Q800CFE Plate

Liu Lihua

(New Product Development and Application Center, Nanjing Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210035)

Abstract The metallurgical flow sheet of developed 25 mm Q800CFE steel plate (/% : 0.04 ~ 0.08C, 0.20 ~ 0.50Si, 1.50 ~ 1.80Mn, ≤0.015P, ≤0.005S, 0.015 ~ 0.060Nb, ≤0.30Mo, ≤0.03Ti, 0.0008 ~ 0.0030B; crack sensitivity index ≤0.23) is metal pretreatment-120 t BOF-LF-RH-220 mm CC-rolling process. Finishing plate rolling temperature is ≤850 °C, water cooling to ≤400 °C with cooling rate 20 ~ 30 °C/s, and tempering treatment is carried out at 530 ~ 635 °C. The dynamic continuous cooling transformation (CCT) curves of Q800CFE steel plate is measured and the effect of tempering temperature on structure and mechanical properties and the welding behavior of steel plate are studied. Results show that with increasing tempering temperature the size of lath structure increases; with tempering at 530 °C, the Q800CFE steel plate has optimum mechanical properties, its tensile strength ≥900 MPa, elongation ≥15%, -40 °C Charpy impact energy ≥100 J; and the cold crack in weld joint shall be avoided as the ambient 25 mm plate is preheated to 75 °C.

Material Index Low Carbon Bainite High Strength Steel Q800CFE, Quenching in Line, Tempering, Structure, Mechanical Properties, Welding Behavior

目前高强度焊接结构钢的生产发展趋势从以往的中碳、淬火+回火逐步趋向于采用低碳微合金化、钢质纯净化、热轧后加速冷却等先进技术, 以降低生产成本, 提高产品质量。低碳贝氏体钢(ULCB)主要通过细晶(组织)强化, 位错及亚结构强化, 铌、钒、钛微合金元素析出强化, 以及 ε-Cu 沉淀强化等方式来保证钢的强度, 钢的强韧性匹配极佳, 尤其是具有优良的野外焊接性。

近年来在开发 Q550、Q690 等低碳贝氏体高强度钢的基础上又开发屈服强度 800 MPa 以上的低焊接裂纹敏感性高强板 Q800CFE (CF 是 crack free 的缩写), 并对钢板的焊接性能进行试验研究^[1-2]。

1 化学成分与性能要求

Q800CFE 高强钢的成分设计见表 1, 力学性能要求见表 2。

表 1 Q800CFE 钢化学成分 /%

C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo	Ti	B
0.04 ~ 0.08	0.20 ~ 0.50	1.50 ~ 1.80	≤0.015	≤0.005	0.015 ~ 0.060	0.30	0.03	0.0008 ~ 0.0030

表 2 Q800CFE 钢板的力学性能要求

Table 2 Requirement of mechanical properties of Q800CFE steel plate

$R_{p0.2}$ (横向) / MPa	R_m (横向) / MPa	A / %	A_{KV} (纵向) / (-40 °C) /J	横向冷弯 $b=2a,$ $180^\circ, d=3a$	P_{cm}
≥800	880 ~ 1050	≥12	≥47	合格	≤0.23

注: P_{cm} 为裂纹敏感性指数, $P_{cm} (%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

2 Q800CFE 高强板设计开发方案和试验流程

Q800CFE 高强板的设计开发思路为: (1) 采用低碳成分设计, 以下贝氏体为组织特征, 提高钢板的强韧性, 并具有良好的焊接性; (2) 利用硼+钼成分

设计以提高钢的淬透性和回火稳定性;(3)采用微合金化和控轧工艺相结合,充分利用铌微合金化作用,扩大钢种的非再结晶区变形温度范围,以保证轧后基体中有很高的位错密度,在变形和变形后有很快的微合金元素碳、氮化物析出相在应变诱导下、于高密度位错及亚结构上析出,产生明显的强化效应;(4)在轧后快冷条件下变形奥氏体可以转变为细小的下贝氏体组织。

试验工艺流程:铁水脱硫预处理 $S \leq 0.005\%$, 120 t 转炉冶炼,吹炼终点 $C \leq 0.05\%$, LF 精炼, RH 真空脱气,连铸坯厚度 220 mm,成品钢板断面尺寸(厚×宽)为 25 mm×2 000 mm,终轧温度 $\leq 850\text{ }^\circ\text{C}$,水冷终了温度 $\leq 400\text{ }^\circ\text{C}$,冷却速度 20~30 $^\circ\text{C}/\text{s}$,钢板进行高温回火热处理。

3 Q800CFE 高强钢的试验研究

3.1 Q800CFE 高强钢的连续冷却过程的相变规律

试验从 25 mm 厚的钢板上取样,采用热膨胀法并结合金相组织分析来测定变形奥氏体的连续冷却相变温度,它是利用热加工模拟实验机对试样进行热变形后立即采取控温或惰性气体以不同冷却速度进行恒速冷却,测量出试样的温度-膨胀量变化曲线,根据这种曲线上的特征点来确定奥氏体的各种相变温度的一种方法,实验钢的成分(%)为:0.07C, 1.7Mn, 0.010P, 0.002S, 0.3Si, 0.05Nb, 0.016Ti, 0.3Mo, 0.0015B。

动态 CCT 的试验采用 3 阶段压缩变形,首先,将试样以 20 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度加热至 1 200 $^\circ\text{C}$,保温 3 min,然后以 10 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度冷却至 1 100 $^\circ\text{C}$,再以应变速率 5 s^{-1} 施加 20% 变形,变形完成后以 10 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 速度冷却至 850 $^\circ\text{C}$,再以 5 s^{-1} 的应变速率施加 20% 的变形,变形完成后以 10 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 速度冷却至 800 $^\circ\text{C}$,再以 5 s^{-1} 的应变速率施加 20% 的变形,最后分别以 3、8、15、20、30 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度冷却至室温^[3]。动态 CCT 的转变曲线如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在冷却速度为 3 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,组织中主要为粒状贝氏体(GB)和板条贝氏体(LB);当冷却速度为 8 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,组织中主要为板条贝氏体,并且粒状贝氏体在减少,板条贝氏体在增多;当冷却速度为 15、20、30 $^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,组织中主要为板条贝氏体和板条马氏体(LM)。

3.2 回火工艺

针对 Q800CFE 的成分设计,对 Q800CFE 钢板进行不同工艺的回火试验^[4]。

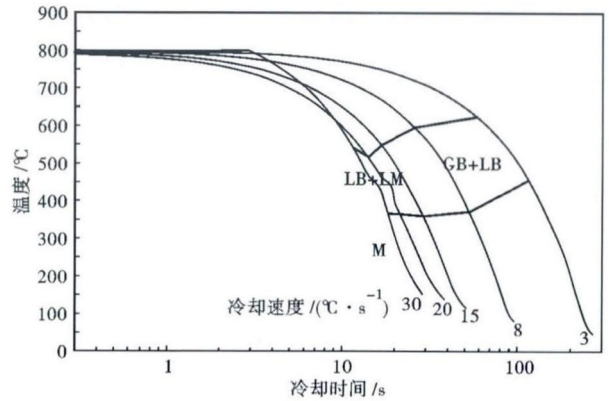


图 1 Q800CFE 钢板动态连续冷却转变(CCT)曲线
Fig. 1 Dynamic continuous cooling transformation (CCT) curves of Q800CFE steel plate

取 25 mm 厚的热轧态试样,分别在实验炉进行 530、570、635 $^\circ\text{C}$ 不同温度的回火试验,回火保温时间均为 1 h,试验结果如表 3。得出 Q800CFE 钢板 530 $^\circ\text{C}$ 回火时,强度、塑性、冲击功良好;570 $^\circ\text{C}$ 回火,则强度有所降低,冲击功明显下降;630 $^\circ\text{C}$ 回火,强度最高,冲击功有所离散。

对经过 530、570、635 $^\circ\text{C}$ 三种不同温度回火的试样进行全尺寸厚度取样,用砂纸研磨,机械抛光,并经 4% 的硝酸酒精浸蚀处理,分别观察其 1/4 厚度处的组织。25 mm 厚样品的透射电镜(TEM 照片)分析,如图 2 所示。

可以看出,随着回火温度的不断上升,回火后样品中的组织类型没有明显改变,只是板条组织尺寸显得越来越大,导致宏观的力学性能有一定的变化。另外,随着回火温度的升高,板条组织内部的位错结构也出现一定的变化,从原来的混乱位错结构变成了位错胞状结构,同时伴随一些析出的产生。

4 高强钢的焊接试验研究

采用 $\Phi 1.2$ mm 配套焊丝,80% Ar + 20% CO_2 气体保护焊对 25 mm 厚的回火态 Q800CFE 钢板进行了不同焊接热输入量(0.9、1.5、2.0 kJ/mm)和不同

表 3 回火温度对 Q800CFE 钢板力学性能的影响
Table 3 Effect of tempering temperature on mechanical properties of Q800CFE steel plate

回火工艺/ $^\circ\text{C}$	横向屈服强度($R_{p0.2}$)/MPa		横向抗拉强度(R_m)/MPa		伸长率(A)/%	纵向冲击功/J	
						-40 $^\circ\text{C}$	-60 $^\circ\text{C}$
530	902	928	15.7	129,130,128	106,125,168		
	907	930	15.4	135,120,108	114,90,102		
570	902	924	16.0	91,86,127	89,88,84		
	903	917	15.1	90,90,135	78,75,75		
635	936	952	15.8	94,117,65	100,98,105		
	940	955	15.7	119,90,86	78,84,79		

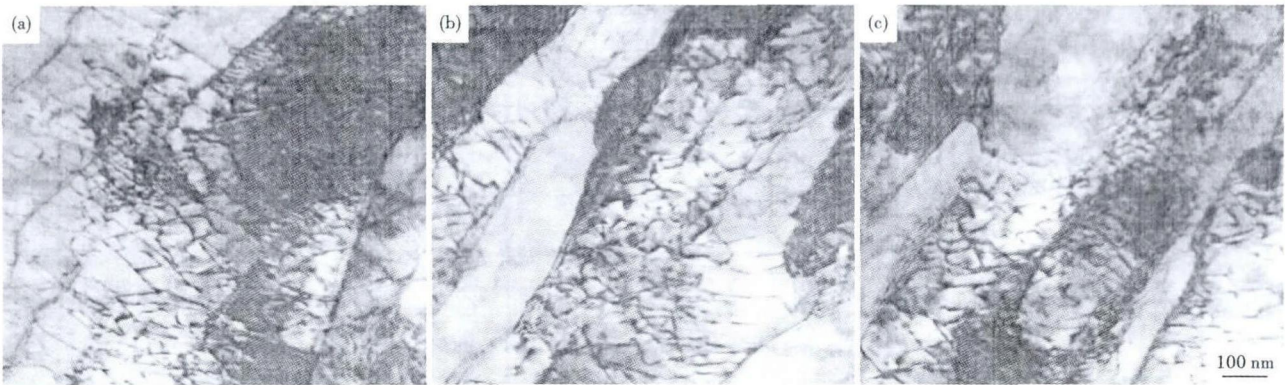


图2 530 °C (a), 570 °C (b) 和 635 °C (c) 回火 Q800CFE 钢板的板条组织形貌, TEM

Fig. 2 Morphology of lath structure of Q800CFE steel plate tempered at 530 °C (a), 570 °C (b) and 635 °C (c), TEM

表4 热输入量对 Q800CFE 钢板焊接接头力学性能的影响

Table 4 Effect of heat input on mechanical properties of Q800CFE steel plate weld joint

编号	热输入量/ (kJ · mm ⁻¹)	焊接接头拉伸性能		焊接接头 A _{KV} (-40 °C)/J			焊接接头弯曲 D=3 a, 180°
		抗拉强度/MPa	断裂位置	焊缝中心	均值	热影响区	
1	0.958	915,940	母材	40,44,32	39	104,132	完好
2	1.527	910,895	焊缝	82,57,44	61	100,90,62	完好
3	2.048	890,890	焊缝	27,44,23	31	75,42,47	完好

表5 焊后热处理对 Q800CFE 钢板焊接接头力学性能的影响

Table 5 Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties of Q800CFE steel plate weld joint

编号	PWHT(°C × h)	焊接接头拉伸性能		焊接接头 A _{KV} (-40 °C)/J			焊接接头弯曲 D=3 a, 180°
		抗拉强度/MPa	断裂位置	焊缝中心	均值	热影响区	
1	250 × 2	910,895	焊缝	82,57,44	61	100,90,62	完好
2	480 × 2	895,895	焊缝	38,29,51	39	160,164,60	完好

焊后热处理工艺(250、480、580 °C)的对接接头焊接试验,分别对焊接接头的拉伸、弯曲、低温冲击性能进行了测定和分析,其中焊缝金属冲击缺口开在焊缝中心,热影响区冲击缺口开在熔合线外 1 mm^[5],试验钢的 P_{cm} 值为 0.21。

热输入量对焊接接头力学性能的影响见表 4,焊后热处理对焊接接头力学性能的影响见表 5。

采用在中等热输入量(1.527 kJ/mm)条件下焊接,25 mm 厚 Q800CFE 钢焊接接头抗拉强度 ≥ 890 MPa,焊缝金属及热影响区 -40 °C 冲击功均能满足 ≥ 47 J 的技术要求。

焊后热处理对 Q800CFE 钢焊接接头的拉伸性能影响不大,经两种不同参数焊后热处理,焊接接头拉伸均断于焊缝金属,抗拉强度保持在 900 MPa 左右,焊接接头的弯曲性能均表现良好。

5 结论

(1) 采用低碳设计、在线淬火工艺生产的 Q800CFE 高强钢板回火后具有优异的力学性能,抗拉强度 ≥ 900 MPa,伸长率 ≥ 15%, -40 °C 条件下的

夏比冲击功 ≥ 100 J,性能稳定且有富余。

(2) 采用配套焊丝富氩混合气体保护焊,焊接 25 mm 厚 Q800CFE 钢板,室温下预热 75 °C 焊接即可防止焊接冷裂纹的产生。在中等热输入量(1.527 kJ/mm)下焊接, Q800CFE 钢板接头焊缝金属及热影响区 -40 °C 冲击功均满足 ≥ 47 J 的要求。

参考文献

- [1] 姚连甓,赵小婷,焦胜利. 屈服强度 800 MPa 级低碳贝氏体钢试验研究[J]. 宝钢技术,2007(2):22-25.
- [2] 杨颖,侯华兴,孟凡盛,等. 800 MPa 级含钨低碳贝氏体钢的实验研究[J]. 鞍钢技术,2007(4):15-18.
- [3] 侯华兴,于功利,张鹏远,等. 冷却工艺对超低碳贝氏体钢韧性影响的研究[J]. 钢铁,2006,41(3):44-48.
- [4] 关焯,蔡庆伍,武会宾,等. 回火温度对轧后直接水淬 15CrMoV 钢组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢,2009,30(2):66-68.
- [5] 王青峰, E 亚楠,尚成嘉,等. 超细化低碳贝氏体钢焊接性能的研究[J]. 钢铁,2006,41(3):77-80.

刘丽华(1968-),女,高级工程师,1990 年华东冶金学院毕业,高强板产品研发. E-mail:njngllh@163.com

收稿日期:2013-09-17