

HQ590DB 超低碳贝氏体钢中厚板的研制

赵志平 康永林

丛津功 张晓刚

(北京科技大学材料学院, 北京 100083)

(鞍山新轧钢股份公司, 鞍山 114021)

摘 要 采用 180 t 转炉-RH-LF(Ca 处理)-连铸坯(mm):230(300)×1 650×6 000-4300 轧机控轧控冷工艺试制了 HQ590DB 超低碳贝氏体钢(%) :0.05C, 1.5Mn, 0.04Nb, 0.02Ti, $\leq 0.000\ 2\text{B}$ 的 30~40 mm 中板。连铸坯的 $[\text{H}]1.7\times 10^{-6}$, $[\text{O}]21\times 10^{-6}$, $[\text{N}]29\times 10^{-6}$ 。终轧温度 800~850 °C, 控制终冷温度 590~630 °C, 获得铁素体+板条状贝氏体组织, 钢板抗拉强度 σ_b 650~690 MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 490~590 MPa, 延伸率 δ_5 20%, 并具有良好的成形性能。

关键词 超低碳 贝氏体钢 中厚板 控轧控冷

Research and Production on Medium and Heavy Plate of HQ590DB Ultra-Low Carbon Bainitic Steel

Zhao Zhiping and Kang Yonglin

(University of Science and Technology, Beijing 100083)

Cong Jingong and Zhang Xiaogang

(Anshan New Rolling Steel Co Ltd, Anshan 114021)

Abstract The 30~40 mm medium plate of HQ590DB ultra-low carbon bainitic steel - 0.05C-1.5Mn-0.04Nb-0.02Ti- $\leq 0.000\ 2\text{B}$ has been pilot-produced by 180 t converter - RH - LF(Ca treated) - concasting slab: 230(300) mm×1 650 mm×6 000 mm-4300 mill controlled rolling and cooling process. $[\text{H}]$ in concasting slab was 1.7×10^{-6} , $[\text{O}]21\times 10^{-6}$ and $[\text{N}]29\times 10^{-6}$. With controlled finishing rolling temperature between 800 and 850 °C and cooling temperature between 590 and 630 °C, the structure of ferrite + lath bainite was obtained, the tensile strength σ_b of plate was 650~690 MPa, yield strength $\sigma_{0.2}$ 490~590 MPa, elongation δ_5 20%, and the plate has excellent formability.

Material Index Ultra-Low Carbon, Bainitic Steel, Medium and Heavy Plate, Controlled Rolling and Cooling

我国在开展新一代钢铁材料重点基础研发项目中,要求钢板在维持较低成本增长的同时大幅度的提高性能^[1]。长期以来通过对传统钢种的深入研究,铁素体珠光体钢(包括微合金钢)的潜力已得到了较好的发挥,通过控轧控冷等措施,其晶粒度已接近 10 μm 的极限值。超低碳贝氏体钢具有高强度、高韧性、焊接性能优良的优点,研究表明当把钢中的碳含量降低到 0.05% 以下时,冷却后得到的贝氏体有很高的位错密度,板条之间没有脆性的碳化物,强度高又没有脆性,具有很高的综合性能,目前已成为与传统的铁素体-珠光体钢、马氏体淬火回火钢并列的一大新钢类^[2]。

鞍钢生产厚度为 16~50 mm 的贝氏钢板以少量的 Nb、B 等微合金化,通过控轧控冷来获得超低碳贝氏体组织,从而得到优良的强韧配合。钢

的强度不再主要依靠 C、Mn 的固溶强化作用而是以贝氏体为基准组织,运用位错强化、V、Nb、Ti 结合控轧控冷组织细化及沉淀强化。

该产品的工业性试制是在鞍钢第三炼钢厂 180 t 转炉和厚板厂 4300 mm 轧机上进行的,其工艺路线为:铁水预脱硫→转炉冶炼→RH→LF 处理→Ca 处理→连铸→板坯加热→控轧→控冷→矫直→剪切→入库。

1 成分设计及钢的冶炼试制

钢的化学成分设计见表 1,采用规格(mm)为 230×1 650×6 000、300×1 650×6 000 的连铸坯进行轧制。

连铸坯质量的硫印检测结果为:中心偏析 0.5 级,夹杂、裂纹、气泡等均为 0 级。对连铸坯

表 1 HQ590DB 超低碳贝氏体钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of HQ590DB ultra-low carbon bainitic steel /%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Nb	N	Ti	Al	B
2D7447	0.05	0.25	1.5	0.01	0.003	0.04	0.002 9	0.02	0.03	≤0.000 2

表 2 HQ590DB 超低碳贝氏体钢连铸坯电解夹杂物含量及钢中气体含量分析结果/ 10^{-6}
Table 2 Analysis results of electrolytic non-metallic inclusion and gas content in concasting slab of HQ590DB ultra-low carbon bainitic steel / 10^{-6}

炉号	总量	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	FeS	MnS	MnO	TiO ₂	H	O	N
2D7447	84	26	23	7	16	12	5	50	1.7	21	29

气体含量及电解夹杂物含量进行了检验,检验结果见表 2。检验结果显示超低碳贝氏体系列钢连铸坯的质量良好。

2 超低碳贝氏体钢的轧制及冷却工艺控制

超低碳贝氏体系列钢是采用 TMCP-RPC 工艺,细化中温转变贝氏体组织,利用弛豫工艺控制轧制后,在奥氏体区域利用控冷装置加速冷却,使钢板从奥氏体区过冷到贝氏体转变区域,最终获得板条状贝氏体和一定量的针状铁素体以及少量的粒贝团构成的金相组织^[3]。

2.1 加热温度

超低碳贝氏体系列钢含有一定量的 Ti,其氧化物和氮化物或碳氮化物可以阻止奥氏体原始晶粒在板坯加热过程中长大,考虑要把 Nb 固溶到奥氏体中及确保在再结晶区域轧制,因此加热温度设定为 1 150 ~ 1 200 ℃。

2.2 变形量

一般情况下,在奥氏体再结晶区轧制时,为了避免混晶,获得完全的再结晶,道次变形量 ≥ 15%,总变形量 40% ~ 50%。在未再结晶区轧制时,为获得较细化的晶粒,所需的变形量较大,使奥氏体晶粒变薄、拉长,增大有效的晶界面积,使轧后结晶时获得细小的相变组织,这样未再结晶区道次变形量 ≥ 10%,总变形量应为 50% ~ 75%。依据上述变形量分配原则控制轧制后,提高了钢板强度和脆性转变温度,低温韧性得到明显改善,后几道次由于钢板板形的要求采用较小的道次变形量。4300 轧机实测轧制图表见表 3。

2.3 终轧温度

在避免塑性下降的前提下提高强度的最有效途径就是细化晶粒,晶粒的细化可以带来明显的晶界强化效果。如果终轧温度明显高于相变点 A_{R3} ,产品的最终组织不是充分细化的晶粒,将导

表 3 4300 轧机 40 mm HQ590DB 钢板实测轧制图表
Table 3 Actual rolling schedule of 4300 mm heavy plate mill for 40 mm HQ590DB steel plate

道次	辊缝/mm	宽度/mm	长度/mm	压下量/mm	压下率/%	咬入角/(°)	轧制力矩/N·mm	轧制速度/m·s ⁻¹
1	267	1 819.25	3 930	31	10.4	14.17	4 329.6	1.9
2	252	1 927.54	3 930	15	5.6	9.84	2 979.8	-1.4
3	237	2 049.54	3 930	15	6.0	9.84	2 665.1	2.0
4	222	2 188.02	3 930	15	6.3	9.84	2 963.3	-1.6
5	214	2 269.81	3 930	8	3.6	7.18	1 678.1	2.1
6	206	2 357.96	3 930	8	3.7	7.18	1 563.2	-1.9
7	185	2 357.96	4 376	21	10.2	11.65	2 623.9	2.1
8	160	2 357.96	5 060	25	13.5	12.72	2 788.6	-1.7
9	135	2 357.96	5 997	25	15.6	12.72	3 066.1	1.7
10	114	2 357.96	7 102	21	15.6	11.65	2 494.9	-1.9
11	100	2 357.96	8 096	14	12.3	9.51	1 892.0	2.1
12	68	2 357.96	11 906	32	32.0	14.40	5 040.3	-1.4
13	57	2 357.96	14 203	11	16.2	8.43	2 971.9	1.7
14	50	2 357.96	16 192	7	12.3	6.72	2 051.0	-1.7
15	43	2 357.96	18 827	7	14.0	6.72	1 869.8	2.1
16	40	2 357.96	20 240	3	7.0	4.40	946.2	-2.1
17	38	2 357.96	21 305	2	5.0	3.59	643.8	2.1

注:板坯(mm):298 × 1 630 × 3 930

致钢板塑性劣化;如果低于 A_{r3} , 在轧制过程中将有铁素体析出, 铁素体将会受到加工变形, 经过缓慢冷却后回复而使晶粒粗化, 也会得到混晶组织, 破坏钢的韧性。因此在轧制工艺控制中确定终轧温度为 $A_{r3} + (50 \sim 100) ^\circ\text{C}$, 约为 $800 \sim 850 ^\circ\text{C}$ 。

2.4 控制冷却

对于超低碳贝氏体系列钢, 在控轧后需要通过快速冷却来得到所需要的显微组织。表 4 为 HQ590DB 钢板现场实测冷却温度及金相组织, 图 1 为 HQ590DB 钢板在不同热轧后不同温度控冷的金相组织。

从金相检验的结果来看, 钢板的最终组织为针状铁素体 + 板条贝氏体, 不含有珠光体组织。

2.5 钢板轧后矫直

表 4 HQ590DB 钢板现场实测冷却温度及金相组织
Table 4 Actual measured cooling temperature and observed structure of HQ590DB steel plate

开冷温度/ $^\circ\text{C}$	终冷温度/ $^\circ\text{C}$	组织	晶粒度/级
801 ~ 817	589 ~ 634	铁素体 + 板条状贝氏体	10

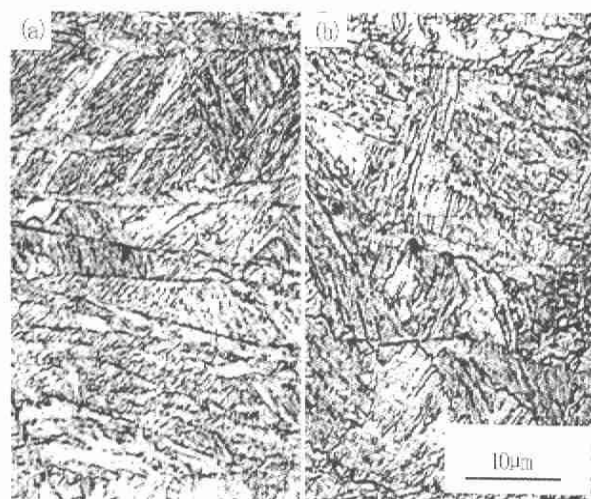


图 1 HQ590DB 钢板在热轧后的组织: (a) 终轧温度 $810 ^\circ\text{C}$, 终冷温度 $621 ^\circ\text{C}$; (b) 终轧温度 $817 ^\circ\text{C}$, 终冷温度 $634 ^\circ\text{C}$

Fig.1 Structure of hot rolled HQ590DB steel plate: (a) finished rolling at $810 ^\circ\text{C}$, finished cooling at $621 ^\circ\text{C}$; (b) finished rolling at $817 ^\circ\text{C}$, finished cooling at $634 ^\circ\text{C}$

为了消除钢板内部残余应力, 获得具有良好板形的钢板, 在轧制后必须经过矫直机矫直, 超低碳贝氏体系列钢由于相变结束点温度较低, 必须在低于此温度下矫直, 才能避免钢板冷却后由于相变应力而引起的钢板变形。

2.6 实际轧制图表和钢板的力学性能

表 3 和表 5 分别为 4300 轧机轧制超低碳贝氏体钢的轧制图表和 HQ590DB 钢板的力学性能。可见, 钢板的厚度在 $20 \sim 40 \text{ mm}$, 屈服强度在 $490 \sim 590 \text{ MPa}$, 抗拉强度在 $625 \sim 690 \text{ MPa}$, 延伸率在 20% 左右, 钢板具有良好的成形性能。

表 5 30 ~ 40 mm HQ590DB 钢板产品力学性能
Table 5 Mechanical properties of 30 ~ 40 mm HQ590DB steel plate products

$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$	$-20^\circ\text{C } A_{KV}/\text{J}$	冷弯
490 ~ 590	625 ~ 690	20 ~ 20.5	0.78 ~ 0.86	96 ~ 290	良好

3 结论

(1) 工业生产中所制定的超低碳贝氏体钢 HQ590DB、HQ650DB 轧制过程稳定, 二阶段控制轧制及轧后快速冷却工艺可行, 产品性能优良, 实物质量能够满足用户要求。

(2) 鞍钢新轧钢厚板厂已经具备批量生产 600 MPa 级的 HQ590DB, 685 MPa 级的 HQ620DB 的控制轧制和控制冷却工艺设备条件, 已经实际试制并应用了 HQ590DB 360 t, 综合性能合格率达到 96.7% 。

(3) 要获得良好的强度指标及稳定的冲击韧性, 一方面要保证钢中具有足够的贝氏体, 另一方面要使钢板的组织细化, 在生产中要严格地控制温度及冷却速度。

(4) 由于受设备条件限制, 国内 600 MPa 级的超低碳贝氏体钢供货厚度只能到 25 mm 。这次鞍钢开发的厚度为 30 mm 、 40 mm , 强度为 600 MPa 级超低碳贝氏体钢板是我国首批采用转炉连铸及 TMCP + RPC 工艺的新一代产品。

参考文献

- 1 王学敏, 尚成嘉, 贺信莱, 等. 组织细化的控制相变技术机理研究. 金属学报, 2002, 38(6): 661
- 2 贺信莱. 21 世纪新钢种——超低碳贝氏体钢. 金属世界, 1996 (6): 3
- 3 尚成嘉, 王学敏, 杨善武, 等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化. 金属学报, 2003, 39(10): 1010

赵志平, 男, 39 岁, 高级工程师, 在职博士研究生。从事轧钢工艺技术的调整和控制及生产技术管理。

收稿日期: 2004-07-14