

· 组织和性能 ·

直接淬火 800 MPa 低合金高强度钢板的开发

王世森¹ 余宏伟² 张云燕¹ 李德发¹ 熊涛¹

(1 武汉钢铁集团研究院, 武汉 430080; 2 武汉钢铁集团鄂城钢铁有限责任公司技术中心, 鄂州 436002)

摘要 开发的 20 mm 低成本铌钛硼微合金化低碳钢板(∕% : 0.06C, 0.40Si, 1.60Mn, 0.010P, 0.005S, 0.050Nb, 0.012Ti, 0.002B)的生产流程为 130 t 顶底复吹转炉-LF-RH-250 mm 板坯连铸-4300 轧机轧制-直接淬火-回火工艺。通过终轧 ≥900 ℃, 以 ≥20 ℃/s 冷却速度直接淬火, 500 ℃ 回火, 20 mm 钢板抗拉强度 R_m 为 855 MPa, 屈服强度 $R_{p0.2}$ 771 MPa, 伸长率 A 16%, 0 ℃ 冲击功 A_{KV2} 217 ~ 238 J, -40 ℃ A_{KV2} 137 ~ 181 J。该钢的回火组织为细小的贝氏体板条, 宽度为 0.5 ~ 1.0 μm, 并有较多弥散分布的 30 ~ 90 nm Nb + Ti 碳氮化物析出。

关键词 800 MPa 低合金高强度钢 铌-钛-硼微合金化 钢板 直接淬火 回火 贝氏体

Development of Direct Quenching 800 MPa High Strength Low Alloy Steel Plate

Wang Shisen¹, Yu Hongwei², Zhang Yunyan¹, Li Defa¹ and Xiong Tao¹

(1 Research and Development Center, Wuhan Iron and Steel Group, Wuhan 430080;
2 Technical Center, Echong Iron and Steel Co Ltd, Wuhan Iron and Steel Group, Ezhou 436002)

Abstract The production flow sheet for developed 20 mm low cost niobium-titanium-boron microalloying low carbon steel plate (∕% : 0.06C, 0.40Si, 1.60Mn, 0.010P, 0.005S, 0.050Nb, 0.012Ti, 0.002B) is 130 t top and bottom combined blown converter-LF-RH-250 mm slab casting-4300 mill rolling-direct quenching-tempering process. With end rolling ≥900 ℃, ≥20 ℃/s direct quenching and tempering at 500 ℃, the tensile strength R_m of the 20 mm steel plate is 855 MPa, yield strength $R_{p0.2}$ 771 MPa, elongation A 16%, impact energy A_{KV2} at 0 ℃ 217 ~ 238 J and impact energy A_{KV2} at -40 ℃ 137 ~ 181 J. Tempered structure of the steel is fine bainite lath with width 0.5 ~ 1.0 μm and there are lots of dispersed 30 ~ 90 nm Nb + Ti carbo-nitride precipitates.

Material Index 800 MPa HSLA Steel, Niobium-Titanium-Boron Microalloying, Steel Plate, Direct Quenching, Tempering, Bainite

随着我国石油天然气开发和工程机械向大型化、轻型化发展,对高强度高韧性钢板的需求越来越大^[1]。本文采用简单的低碳铌微钛微硼复合的成分设计,通过顶底复吹转炉-炉外精炼-真空处理-控制轧制-直接淬火(Direct Quenching: DQ)-离线回火(Tempering)的优化工艺获得 800 MPa 级别的钢板。其特点是通过直接淬火+回火工艺代替了传统的离线淬火+回火生产工艺,并依靠细化轧制晶粒、加快贝氏体形成和阻止热处理晶粒长大及析出纳米相微合金碳氮化物强化基体提高钢的屈服强度,从而获得较高性能的钢材。

1 试验材料

试验采用低碳铌钛硼体系进行设计,主要化学成分如表 1 所示。

Nb 在钢中的作用,最主要为细化晶粒^[2-3]。在临界温度以上,铌元素对再结晶的影响表现为溶质拖曳机制,而在临界温度以下,则表现为析出钉扎机制。一方面

在临界温度以上,铌固溶于钢中时,易在位错线上偏聚,其偏聚浓度也相对增高,从而对位错攀移产生较强的拖曳作用。另一方面,在临界温度以下,形成的碳氮化物在晶界上析出,阻止了奥氏体再结晶晶粒的长大,对晶界产生钉扎作用。

Ti 是强碳氮化物元素,易与 O、C、N 结合,形成非常稳定的 Ti(C、N),其只有在 1 000 ℃ 以上才缓慢的融入固溶体中,在铸坯加热时,能有效地阻碍奥氏体晶粒长大^[2]。同时, Ti 与 S 的结合能力大于 Fe,在钢中能减少 S 与 Fe 的结合形成 FeS,从而能减少钢的热脆性。但过高的 Ti 含量会导致在晶界上析出较多的氮化钛和硫化钛,降低钢的韧性。因此,添加微量钛。

表 1 试验 800 MPa 低合金高强度钢的化学成分/∕%

Table 1 Analysis of test 800 MPa HSLA steel / ∕%

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	B	[N]	[O]
0.06	0.40	1.60	0.010	0.005	0.050	0.012	0.002	0.003 5	0.002 0

钢中加入微量 B, 作为表面活性元素, 在钢中的溶解度极低, 吸附在奥氏体晶界上, 有延缓 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的作用, 其在奥氏体晶界的偏聚阻碍铁素体的形核而有利于贝氏体的形成和细化晶粒, 提高了淬透性和热轧态钢的强度^[2-3]。

本试验钢应用 Nb-Ti-B 复合合金化, 一方面通过 Nb、Ti 细化晶粒, 另一方面, 通过添加 B 增加钢的淬透性, 保证在不太大的冷却速度条件下能够获得强韧性较好的贝氏体组织, 从而达到直接淬火的目的。

2 试验工艺与方法

2.1 炼钢工艺

试验钢采用 130 t 顶底复吹转炉冶炼-LF 精炼-RH-250 mm 板坯直弧连铸机生产。转炉冶炼采用分阶段, 恒压变枪的吹氧模式, 双渣冶炼法, 辅加活性石灰、轻烧白云石及精料废钢进行冶炼, 冶炼过程全程底吹氩。冶炼终点保证 C-T 协调, 点吹不大于 2 次, 防止钢水过氧化。冶炼终点目标成分控制要求: $[C] 0.03\% \sim 0.05\%$; $[P] \leq 0.015\%$ 。出钢前冷面采用挡渣帽挡前期渣; 铌铁合金在转炉出钢 1/3 时开始加入, 出钢 2/3 ~ 3/4 前加完, 出钢至 3/4 ~ 4/5 的时间内采用带导向的挡渣锥挡后期渣。

钢水进行 LF 精炼前加入铝线, 保证 Als 在 0.05% ~ 0.06%, 以降低钢中的氧含量。然后升温加入石灰造渣, 造渣时间 ≥ 10 min, 造渣过程中加入电石、铝粒、AD、硅铁粉进行扩散脱氧, 控制炉渣成分中碱度 $R 4.0 \sim 6.0$, $Al_2O_3 20\% \sim 25\%$, $(FeO + MnO) \leq 1.5\%$ 。LF 精炼后钢中 $S \leq 0.003\%$ 。

RH 设定真空度 ≤ 67 Pa, 脱气时间 ≥ 15 min, 在脱气中期按目标成分加入钛铁、硼铁, 并进行其它成分微调, RH 真空处理后加入 SiCa 线并软吹氩时间 ≥ 10 min, 对夹杂物进行钙化处理并充分上浮。

板坯连铸采用长水口保护浇铸且 Ar 封, 中间包钢水温度控制在液相线温度以上 15 ~ 25 °C, 稳定拉速在 0.9 ~ 1.0 m/min, 浇铸成 250 mm 厚的板坯。连铸过程采用轻压下和电磁搅拌保证铸坯质量。连铸后板坯堆冷 24 h 以上后冷送。

2.2 轧制及热处理

4300 mm 轧机进行轧制, 工艺路线采用在步进梁式加热炉加热-高压水除鳞-轧制-直接淬火-回火的方式进行。试验板坯在步进梁式加热炉进行三段式加热, 加热速率为 8 ~ 10 min/cm, 出钢温度 ≤ 1200 °C。轧制采取两阶段控制轧制的工艺实施, 粗

轧阶段温度控制在 980 ~ 1070 °C, 累计变形量 $\geq 50\%$, 道次压下量 $\geq 15\%$; 精轧阶段温度控制在 900 ~ 950 °C; 终轧温度大于 900 °C, 成品厚度为 20 mm。轧制后钢板进入 ACC 冷却装置进行直接淬火至 250 °C 以下, 冷却速率 ≥ 20 °C/s。钢板直接淬火后通过离线回火的方式进行热处理, 回火工艺采用 500 °C 加热保温 60 min 后空冷至室温。试验采用的全程热处理工艺曲线如图 1 所示。

2.3 检验方法

在钢板宽度 1/4 处取样, 加工成拉伸和冲击试样。拉伸试验在 Zwick/Roell 拉伸试验机上进行, 在 SANS ZBC 摆锤式冲击试验机分别进行 0 °C 和 -40 °C 夏比冲击, 金相试样经抛光, 3% 硝酸酒精溶液腐蚀后, 放在 AXIO 金相显微镜上观察钢板的组织。试样制成透射电镜 (TEM) 薄膜样品, 在 JEM-2100F 型透射电镜中观察微观组织和析出物, 并用 INCA 能谱仪对析出相进行成分分析。

3 试验结果及分析

3.1 试验钢的性能

从表 2 中可以看出, 采用直接淬火 + 回火工艺的钢板抗拉强度级别达到 800 MPa, 钢板在 0 °C 冲击功保持在 210 J 以上, 冲击温度降低到 -40 °C, 冲击功仍可达到 130 J 以上, 具有良好的低温韧性。

3.2 组织形貌

从图 2(a) 中可以看出, 组织为板条贝氏体, 板

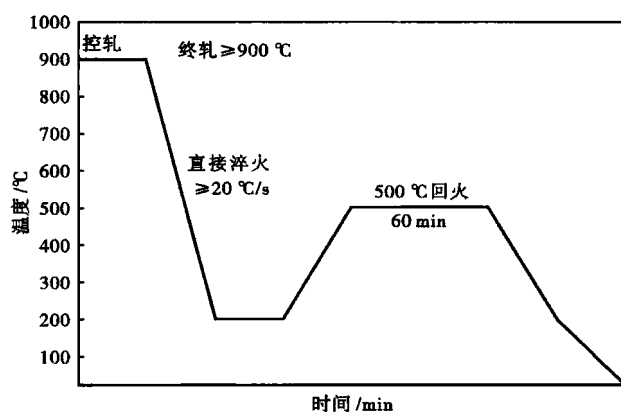


图 1 20 mm 钢板直接淬火-回火工艺曲线

Fig. 1 Curve of 20 mm steel plate direct-quenching and tempering process

表 2 20 mm 钢板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 20 mm steel plate				0 °C A_{KV2}/J				-40 °C A_{KV2}/J			
$R_{p0.2}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	J_1	J_2	J_3	J_{J_3}	J_1	J_2	J_3	J_{J_3}	
771	855	16	217	218	238	224	181	178	137	165	

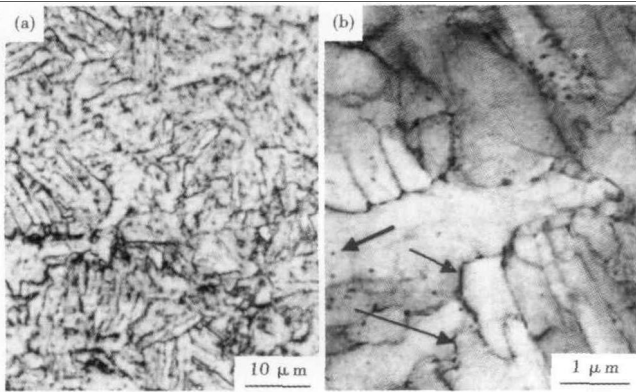


图2 直接淬火-回火的 20 mm 钢板的组织形貌:(a)板条贝氏体;(b)M/A 岛(短箭头),颗粒状碳化物(长箭头指向)

Fig. 2 Morphology of structure of direct quenching and tempering 20 mm steel plate: (a) lath bainite; (b) M/A island (short arrows point at), carbide particle (long arrow points at)

条取向各不相同,且出现有少量的板条合并的现象,贝氏体板条较细,宽度为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 。板条边界有少量薄膜状 M/A 岛(如图 2b 中短箭头所指),原奥氏体晶界存在较多颗粒状渗碳体,如图 2(b)中长箭头所指,板条内部存在很多胞状亚结构。在贝氏体板条上可见有更加细小且弥散分布的球形析出物,如图 2(b)中粗箭头所指。

3.3 析出相

如图 3 所示,在贝氏体板条上析出较多的细小颗粒析出相,分布均匀,主要为球形或不规则形,尺寸主要为 $30 \sim 90 \text{ nm}$,析出相成分主要为 Nb + Ti。

贝氏体屈服强度依从以下经验公式^[4,5]:

$$\sigma_{0.2}(\text{MPa}) = 15.4 \times [-12.6 + 11.3 d^{-1/2} + 0.98 n^{1/4}] \quad (1)$$

式中: d - 贝氏体中铁素体晶粒尺寸/ mm ; n - 每平方毫米截面中碳化物颗粒数。

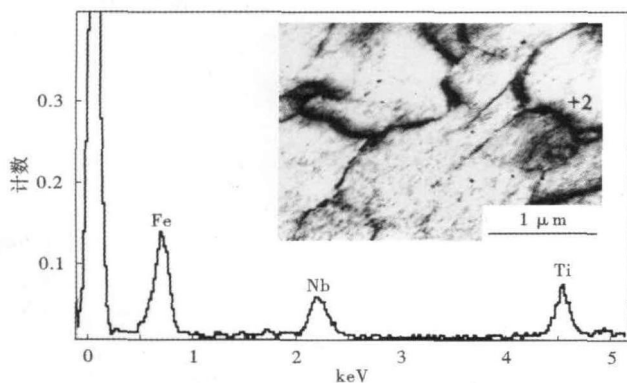


图3 20 mm 钢板中析出物的形貌和能谱图

Fig. 3 Morphology and energy disperse spectrum analysis of precipitates in 20 mm steel plate

从公式(1)可见,贝氏体钢屈服强度是受贝氏体铁素体和碳氮化物的尺寸和形态所控制的,试验钢通过直接淬火和回火后,贝氏体板条很细小,且析出纳米级弥散分布的析出物,保证了试验钢的强度。

由于 Nb、Ti 在轧制过程中产生的细化奥氏体晶粒作用,且在奥氏体未再结晶区轧制过程中形成了大量位错、形变带,使得淬火后形成的马氏体或贝氏体板条和包块组织得到细化,有利于提高强度和韧性^[6,7]。在形变过程中形成的大量形变带,使奥氏体相变后形成的马氏体或贝氏体板条中含有大量高密度位错和亚结构,为回火后碳氮化物的析出提供更多的形核位置,细化了析出物尺寸。在适当的温度下回火后,这些碳氮化物的析出分布将更加弥散和均匀,增强了碳氮化物的析出强化效果,提高了回火后钢的强度。在回火过程中,由于位错的合并、消失,位错密度的下降,有利于回火后韧性的提高,从而获得较好的强韧性的匹配^[6]。

4 结论

(1)采用低成本低碳铌微钛微硼复合的成分设计,通过控制轧制-直接淬火-离线回火的工艺成功获得了 800 MPa 级高强度钢板。

(2)该钢板具有均匀良好的 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温冲击韧性。

(3)钢板的回火组织为细小的贝氏体板条,宽度为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$,有较多弥散分布 Nb + Ti 碳氮化物析出。

参考文献

- [1] 李德发,王世森,熊玉彰. 低碳贝氏体工程机械用 Q460 级厚钢板研制[J]. 钢铁研究, 2011, 39(4): 27-29.
- [2] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006: 39-69.
- [3] 颜慧成,曹慧泉,罗登,等. 钛、铌、硼对低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 55-58.
- [4] 赵连城. 金属热处理原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1987: 187-189.
- [5] 徐洲,赵连城. 金属固态相变原理[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [6] 俞德刚,谈育熙. 钢的组织强度学——组织与强韧性[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983.
- [7] 胡淑娥,孙卫华,冯勇,等. 高强度结构钢直接淬火回火工艺试验研究[C]. 2009 高品质特殊钢技术与市场论坛, 2009: 151-154.

王世森(1974-),男,博士,高级工程师,1998 年武汉大学大学毕业,高强度工程机械钢板开发和质量控制。

收稿日期:2013-02-21