

微合金元素 Ti-Nb 对低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响

曹慧泉^{1,2} 颜慧成¹ 夏政海³ 罗 登³ 李广敏¹ 仇圣桃¹

(1 钢铁研究总院国家连铸技术工程研究中心,北京 100081; 2 湖南华菱管线股份有限公司,长沙 410011;
3 湖南华菱湘潭钢铁有限公司,湘潭 411101)

摘 要 试验的 700 MPa 级低碳贝氏体钢由 30 kg 真空感应炉熔炼铸成断面 100 mm × 50 mm 扁锭-轧成 12 mm 板。通过 CCT 曲线和 3 ~ 30 °C/s 冷却速度下组织的分析,研究 0.01Ti-0.03Nb 和 0.06Ti-0.05Nb 两种微合金化对 (%) 0.059 ~ 0.066C、1.41 ~ 1.67Mn、0.30 ~ 0.36Si、0.37 ~ 0.48Cu、0.21 ~ 0.24Ni、0.18 ~ 0.22Mo、0.0008 ~ 0.0022Bs、0.0026N 低碳贝氏体组织和力学性能的影响。结果表明,0.06Ti-0.05Nb 钢的强度高于 0.01Ti-0.03Nb 钢,但前者 Ti 含量高,-40 °C 冲击功较后者低。700 MPa 级低碳贝氏体钢合适的微合金化 Ti-Nb 成分为 0.04% ~ 0.05% Nb-0.015% ~ 0.025% Ti。

关键词 低碳贝氏体钢 Ti-Nb 微合金化 组织 力学性能

Effect of Microalloying Elements Ti-Nb on Structure and Mechanical Properties of Low Carbon Bainitic Steel

Cao Huiquan^{1,2}, Yan Huicheng¹, Xia Zhenghai³, Luo Deng³, Li Guangmin¹ and Qiu Shengtao¹

(1 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Hunan Valin Steel Tube and Wire Co Ltd, Changsha 410011;
3 Xiangtan Steel Co Ltd, Hunan Valin, Xiangtan 411101)

Abstract Test 700 MPa low carbon bainitic steel is melted by a 30 kg vacuum induction furnace, cast to 100 mm × 50 mm flat ingot and rolled to 12 mm plate. Based on CCT curves and analysis on structure of steel at cooling rate 3 ~ 30 °C/s, the effect of two group microalloying: 0.06Ti-0.05Nb and 0.01Ti-0.03Nb on structure and mechanical properties of low carbon bainitic steel- % : 0.059 ~ 0.066C, 1.41 ~ 1.67Mn, 0.30 ~ 0.36Si, 0.37 ~ 0.48Cu, 0.21 ~ 0.24Ni, 0.18 ~ 0.22Mo, 0.0008 ~ 0.0022Bs, 0.0026N has been studied. Results show that the strength of steel with 0.06Ti-0.05Nb is higher than that of steel with 0.01Ti-0.03Nb, but the impact energy at -40 °C of the former, of which the Ti content is higher, is lower than that of the later. The available microalloying Ti-Nb content in 700 MPa low carbon bainitic steel is 0.015% ~ 0.025% Ti-0.04% ~ 0.05% Nb.

Material Index Low Carbon Bainitic Steel, Ti-Nb Microalloying, Structure, Mechanical Properties

抗拉强度 700 MPa 级别的低碳贝氏体钢是该系列高强钢中产量比较大的一组钢,其成分设计大多采用高 Ti(0.04%)^[1,2],而文献[2]表明,Ti 含量根据 N 含量控制在 0.02% 左右为宜。为了澄清 Ti、Nb、B 微合金元素对组织与力学性能的影响,本试验测定了两组成分的静态转变曲线,分析了成分对组织与力学性能的影响,为成分设计提供参考。

1 试验材料与方法

试验钢成分见表 1,其中 1#、2# 钢代表当前 700 MPa 级低碳贝氏体钢两种典型的成分设计,分别为微合金元素 Ti、Nb 偏低与偏高型。实验室模拟 TM-CP 过程,30 kg 真空感应炉熔炼-浇铸成 400 mm × 100 mm × 50 mm 扁钢锭-二辊轧机轧制成 12 mm 厚

表 1 试验钢成分/%
Table 1 Composition of test steels / %

试验钢	C	Mn	Si	P	S	Ti	Nb	Cu	Ni	Mo	Bs	N
1# 钢	0.059	1.41	0.30	0.010	0.004	0.014	0.032	0.37	0.21	0.18	0.0008	0.0026
2# 钢	0.066	1.67	0.36	0.009	0.004	0.059	0.053	0.48	0.24	0.22	0.0022	0.0026

注:Bs- 酸溶硼含量。

度钢板-弛豫后冷却(空冷与淬水快冷两种模式)。在空冷轧板上取样制热膨胀分析样,利用 Formastor-

F 型全自动相变测定仪测定冷却过程相变点,进行静态 CCT 曲线测量。

2 控制轧制与力学性能

钢锭加热到 1 200 ℃ 保温 1 h, 1 050 ℃ 开轧, 经过 2 道粗轧、3 道精轧成 12 mm 板, 开始精轧 ≤ 950 ℃, 终轧 800 ℃, 精轧累计压下量 ≥ 60%。轧后工艺与不同处理条件下的力学性能见表 2。显然, 随着 Nb、Ti 含量的提高, 屈服强度、抗拉强度都相应提高, 但伸长率和低温冲击功下降。

表 2 轧后工艺和 Ti-Nb 对贝氏体钢力学性能的影响
Table 2 Effect of process after rolling and Ti-Nb on mechanical properties of bainitic steel

Ti-Nb/ %	条件	σ_s / MPa	σ_b / MPa	A/ %	-40 ℃ A_{KV} /J	屈强比
0.01Ti- 0.03Nb	弛豫 30 s 水 冷、回火	568	685	18.8	93	82.8
0.01Ti- 0.03Nb	弛豫 30 s 水 冷	500	725	19.5	21	69.0
0.06Ti- 0.05Nb	弛豫 30 s 水 冷、回火	647	807	15.0	15	80.2
0.06Ti- 0.05Nb	弛豫 30 s 水 冷	572	795	13.0	20	71.9

3 连续冷却转变曲线与组织变化

试样加热到 1 100 ~ 1 200 ℃ 保持 10 min、以 5 ℃/s 冷到 950 ℃ 后分别以 3、5、10、15、30 ℃/s 冷却到室温, 测量每一冷却过程的直径膨胀量, 由所采集的温度-膨胀量曲线利用切线法得出相变的开始点 B_s 和结束点 B_f 。试验钢静态 CCT 曲线见图 1。

1# 试样 Ac_1 为 768 ℃, Ac_3 为 880 ℃, 铁素体区较窄, 约 20 ℃, 铁素体转变鼻尖位于 15 ℃/s 处。2# 试样 Ac_1 为 784 ℃, Ac_3 为 870 ℃, 铁素体转变鼻尖位于 ≥ 30 ℃/s 处。冷却速度对转变温度影响不大。

对 1# 试验钢, 当冷却速度为 5 ℃/s 时(图 2a), 奥氏体晶界基本消失, 主要为准多边形铁素体和粒状贝氏体组织; 当以 10 ℃/s 冷却时(图 2b), 仍然为准多边形铁素体和粒状贝氏体的混合组织, 晶粒细化; 以 30 ℃/s 冷却时(图 2c), 主要为铁素体和粒状贝氏体组织, 少量板条组织。随着冷却强度提高, 晶粒细化, 贝氏体组织比例增加。对 2# 试验钢, 当冷却速度为 5 ℃/s 时(图 2d), 冷却试样组织以准多边形铁素体和粒状贝氏体为主, 有部分板条状贝氏体; 在 10 ~ 15 ℃/s 冷却时,

为板条状贝氏体组织(图 2e, f)。2# 钢所有高倍组织中奥氏体晶界清晰, 随着冷却速度提高, 板条间距变小。2# 钢组织贝氏体化趋势比 1# 钢明显。

4 微合金元素对低碳贝氏体钢组织与力学性能的影响

(1) Nb、Ti 含量增加后, 2# 钢比较 1# 钢, Ac_1 增加 16 ℃, Ac_3 减小 10 ℃, 说明非再结晶区温度范围增加, 增加了奥氏体基体中的畸变能积累, 贝氏体开始转变温度下降, 转变温度区间变小, 从而贝氏体转变的形核数大幅度增加, 组织细化, 提高强度, 连续冷却时, 同一冷却速度下, 贝氏体转变趋势更加明显。

(2) 图 2 表明, 在连续冷却过程中, Nb、Ti、B 的增加有效抑制了铁素体的形核和长大, 从而使组织发生了较大的变化, 前者主要为粒状贝氏体组织和部分准多边形铁素体, 后者为板条贝氏体组织。

试验钢在轧制后进行 RPC 处理 30 s, 分别按照表 2 条件进行回火与未回火处理, 轧制钢板的高倍组织(图 3) 显示, 未回火条件下, 1# 钢能见到奥氏体晶界, 主要为粒状贝氏体组织; 2# 钢奥氏体晶界消失, 主要为针状组织与板条组织, 晶粒相对细小些。回火条件下, 1# 钢主要为粒状贝氏体组织, 晶间与晶内含有许多残余奥氏体, 2# 钢则主要显示为粒状贝氏体组织, 组织明显比 1# 钢组织细小。

(3) Nb 能显著提高钢的强韧性。适量的 Ti 能促进强度的提高, 但过多的 Ti 含量会引起 Ti 的氮化物粗化, 对低温韧性不利, 降低冲击功。对 2# 钢而言, 当钢中 Ti 为 0.059% 时, 有效 Ti 含量为^[3]:

$$Ti^* = W_t - 3.4W_{(N)} - 3W_{(S)} = 380 \times 10^{-6}$$

式中: W_t - 总的 Ti 含量; $W_{(N)}$ - 生成 TiN 消耗 Ti 量; $W_{(S)}$ - 生成 TiS 消耗 Ti 量, 较多的有效 Ti 含量说明

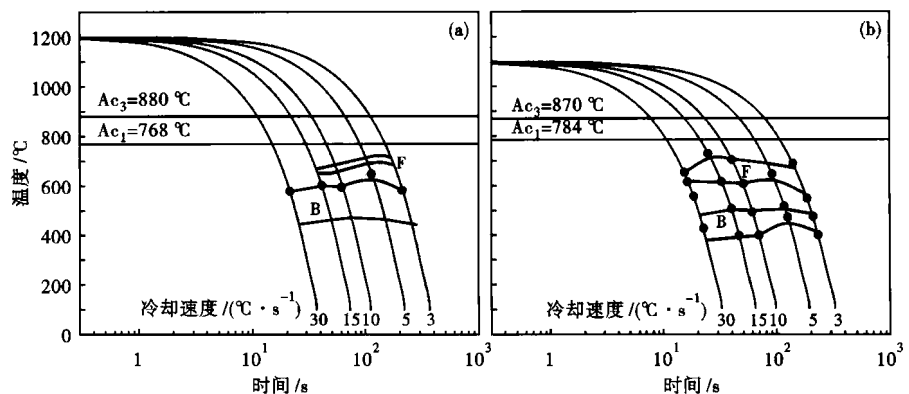


图 1 (a) 1# 钢(0.01Ti-0.03Nb)和(b)2# 钢(0.06Ti-0.05Nb)的 CCT 曲线
Fig. 1 CCT curves of (a) 1# steel (0.01Ti-0.03Nb) and (b) 2# steel (0.06Ti-0.05Nb)

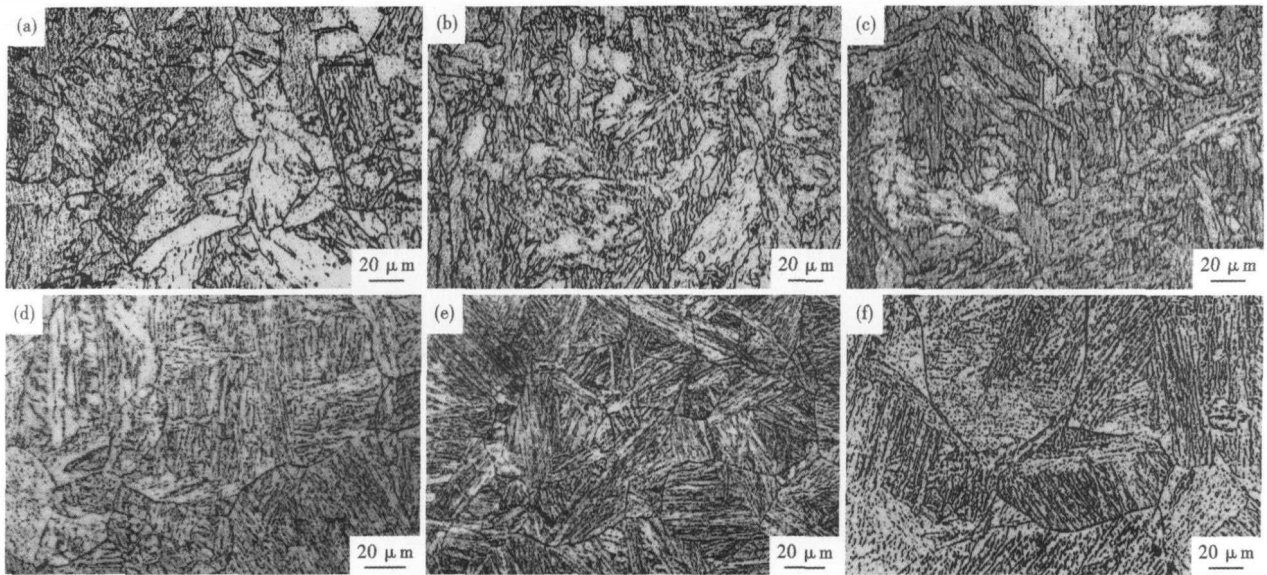


图 2 低碳贝氏体钢连续冷却相变组织:1#钢(0.01Ti-0.03Nb)- °C/s:(a)5,(b)10,(c)30;2#钢(0.06Ti-0.05Nb)- °C/s:(d)5,(e)10,(f)15
 Fig. 2 Morphology of continuously cooled structure of low carbon bainitic steel; °C/s- (a) 5, (b) 10, (c) 30, 1# steel (0.01Ti-0.03Nb); (d) 5, (e) 10, (f) 15, 2# steel (0.06Ti-0.05Nb)

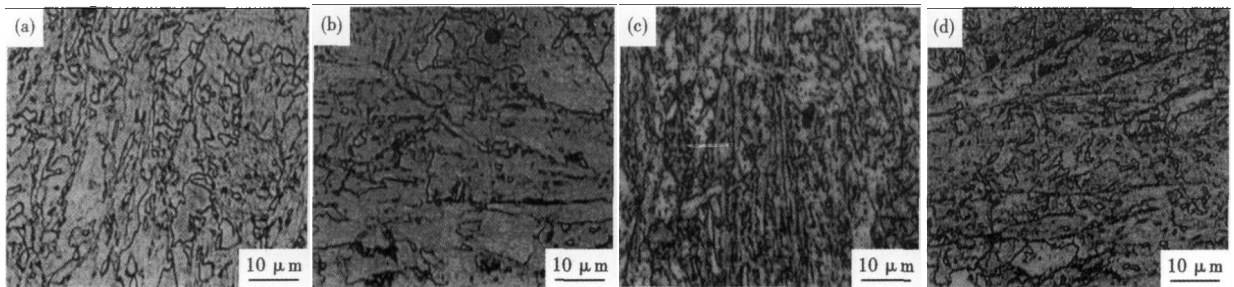


图 3 低碳贝氏体钢轧后组织形貌:1#钢(0.01Ti-0.03Nb)- (a)弛豫 30 s,水冷,(b)弛豫 30 s,水冷+回火;2#钢(0.06Ti-0.05Nb)- (c)弛豫 30 s,水冷,(d)弛豫 30 s,水冷+回火
 Fig. 3 Morphology of structure of rolled low carbon bainitic steel: 1# steel (0.01Ti-0.03Nb) - (a) relaxation for 30 s, water cooling, (b) relaxation for 30 s, water cooling + tempering; 2# steel (0.06Ti-0.05Nb) - (c) relaxation for 30 s, water cooling, (d) relaxation for 30 s, water cooling + tempering

有机会析出 TiC,能够起到性能强化作用。另外 2# 钢的 B 含量相对较高,也是其比 1# 钢强度提高、韧性下降的原因。

对照表 2 与图 3,2# 钢 Ti、Nb 含量高,回火状态存在明显的板条组织,强度高,但是韧性比未回火状态时差,说明回火处理对高 Nb、Ti 低碳贝氏体钢的韧性有损,并且两种状态下低温冲击功都低。但是回火有利于提高低 Nb、Ti 钢的冲击功,1# 钢 -40 °C 时冲击功达到 92 J,满足强度与韧性要求。由于转炉流程生产钢 N 含量在 $(40 \sim 60) \times 10^{-6}$,因此钢中 Ti 含量宜在 0.015% ~ 0.025%。

5 结论

(1) Nb、Ti 含量增加后,Ac₁ 温度增加,Ac₃ 温度减小,非再结晶区温度范围增加,贝氏体开始转变温度下降,转变温度区间变小,板条贝氏体组织增加,

提高强度,显微硬度提高,低温冲击功呈降低趋势。

(2) 0.04% ~ 0.05% Nb、0.015% ~ 0.025% Ti 是 700 MPa 级别低碳贝氏体钢的适宜成分,该成分钢在进行 TMCP + RPC 与回火处理后,可以获得理想的力学性能。

参考文献

- 1 武会宾,尚成嘉,赵运堂,等.回火对低碳贝氏体钢组织稳定性及力学性能的影响.钢铁,2005,40(3):62
- 2 李成军.工艺过程对 JB700 贝氏体钢组织与性能影响的研究[硕士论文].北京:北京科技大学,2006
- 3 齐俊杰,黄运华,张跃.微合金化钢.北京:冶金工业出版社,2006

曹慧泉(1966-),男,博士研究生,钢铁冶金和品种开发。

收稿日期:2009-07-06