

· 组织和性能 ·

Ti-Nb 微合金化对低碳高强度钢组织和性能的影响

甘晓龙 岳江波 陈子宏 张青

(武汉钢铁(集团)公司研究院,武汉 430080)

摘要 0.153Ti-0.038Nb 和 0.080Ti-0.062Nb 两种 Ti-Nb 微合金化低碳钢(∕% : 0.061 ~ 0.075C, 0.22Si, 1.76 ~ 1.77Mn, 0.002 ~ 0.003S, 0.006P, 0.003Als, 0.0038 ~ 0.0042N, 0.0040 ~ 0.0045O) 由 50 kg 真空感应炉冶炼,轧成 10 mm 板,终轧温度 880 °C,水冷至 630 °C。试验结果表明,两种 Ti-Nb 微合金化钢的析出物均为(Nb,Ti)(C,N)复合析出物;当 Ti 含量由 0.080% 增加至 0.153%,同时 Nb 含量由 0.062% 降至 0.038% 时,钢屈服和抗拉强度分别从 558 MPa 和 653 MPa 提高至 633 MPa 和 756 MPa,屈强比、伸长率和断面收缩率变化较小。表明,添加 Ti 代替部分 Nb 进行复合微合金化可提高钢材强度,降低生产成本。

关键词 钛 铌 微合金化 高强度钢 (Nb,Ti)(C,N)析出物

Effect of Ti-Nb Microalloying on Structure and Properties of Low Carbon High Strength Steel

Gan Xiaolong, Yue Jiangbo, Chen Zihong and Zhang Qing

(Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp, Wuhan 430080)

Abstract 0.153Ti-0.038Nb and 0.080Ti-0.062Nb two kind of Ti-Nb microalloying low carbon steel (∕% : 0.061 ~ 0.075C, 0.22Si, 1.76 ~ 1.77Mn, 0.002 ~ 0.003S, 0.006P, 0.003Als, 0.0038 ~ 0.0042N, 0.0040 ~ 0.0045O) are melted by a 50 kg vacuum induction furnace and rolled to 10 mm plate with finishing rolling at 880 °C, water cooling to 630 °C. Test results show that the precipitates in both Ti-Nb microalloying steels are (Nb, Ti)(C, N) compound precipitates; with increasing Ti content from 0.080% to 0.153% and decreasing Nb content from 0.062% to 0.038%, the yield and tensile strength of steel respectively increase from 558 MPa and 653 MPa to 633 MPa and 756 MPa, besides, the variations in ratio between yield and tensile strength, elongation and reduction of area of steels are minor. It indicates the strength of steel products could be increased by adding Ti to replace part of Nb to carry out compound microalloying and the production cost is decreased.

Material Index Titanium, Niobium, Microalloying, High Strength Steel, (Nb,Ti)(C,N) Precipitates

钢的微合金化通常是指添加微量的 Nb、V、Ti 等碳氮物形成元素,在钢的加热和冷却过程中通过溶解-析出行为对钢起到强化作用,这种微合金钢主要的强化机制是细化晶粒和沉淀强化^[1]。此外微合金元素以置换溶质原子形式在钢铁中存在,容易在位错线上偏聚,对位错产生强烈的拖拽作用,最终对再结晶起到强烈的阻止作用^[2]。Nb、Ti、V 是最常用的微合金化元素,它们对晶界的钉扎作用依次降低。微合金钢广泛应用于汽车高强钢、石油运输管线钢、桥梁用钢、造船用钢以及工程机械用钢等领域,生产的钢品种繁多,涉及到板带材、型材、管材等^[3-6]。由于产品品种繁多钢材开发的高强钢多依赖于这些微合金元素,导致这些微合金元素用量越来越大,而微合金元素如铌铁、钒铁和钛铁的价格也不断攀升,因此导致钢铁厂的成本上升,盈利额减少。其中铌铁和钒铁的价格远远超过了钛铁,其中铌铁的价格约是钛铁的 10 倍。

为了降低生产成本,提高经济效益,在实验室试

制了一种以钛代替铌的微合金钢,并对比研究分析了其力学性能和析出物形貌与组成。

1 实验材料与方法

为了研究微合金钢中 Ti、Nb 合金元素的作用,设计了两种不同 Ti-Nb 微合金复合合金钢,A 号实验钢(A 钢)中钛含量高达 0.153%,B 号实验钢(B 钢)中钛含量为 0.080%,实验钢的化学成分见表 1。

实验材料在实验室用 50 kg 真空感应炉冶炼,并浇铸成小型 Φ150 mm 的钢锭,铸锭冷却后为了模拟现场实际生产,将铸锭在加热炉内加热到 1 150 °C 保温 1.5 h 后出炉,在实验室二辊轧机上轧制,模拟轧制分为两个阶段粗轧和精轧模拟,粗轧(包括开坯轧制)采用 3 道次轧制,开轧温度为 1 150 °C,粗轧各道次出口厚度 100-80-60 mm,然后空冷到精轧开轧温度 950 °C,精轧用 4 道次轧制,各个道次出口厚度为 60-40-20-14-10 mm,终轧温度控制在 Ar₃ + (50 ~ 100) °C,因此终轧温度设定为 880 °C,轧后水

冷到终冷温度(模拟卷取温度),终冷温度设定为 630 ℃,然后空冷至室温。

将轧后板材加工成金相和透射电镜试样,经过研磨和抛光后用 4% 的硝酸乙醇溶液浸蚀 6~7 s 后,用乙醇溶液冲洗并吹干,用 QUANTA400 扫描电镜观察两个实验钢种的组织形貌,并通过二次复型制样方法将试样表面微观析出形貌和成分复制下来,并运用 JEM-2100F 型透射电镜观察试样的析出情况。将轧后板材按照 GB228-2002 加工成标准拉伸试样,在 SHIMADZUAG-IS 100kN 万能试验机上进行拉伸试验,测量两个钢种的屈服强度、抗拉强度和伸长率。

2 实验结果与分析

2.1 轧材组织和力学性能

由图 1 可见,A 钢和 B 钢的显微组织主要由变形的长条状不规则的铁素体和少量等轴铁素体组成。由于实验钢种含有较高的 Ti 和 Nb 微合金元素,这些元素会提高钢种的再结晶温度,实验钢的终轧温度为 870 ℃,而实验钢种精轧模拟最后一道次压下量为 30%,此时在高速大压下的变形条件下,两个实验钢种仍然处于奥氏体部分再结晶区域,所以奥氏体变形后有一部分的变形奥氏体发生了再结晶形成的等轴状奥氏体,此时高温奥氏体由变形奥氏体和再结晶等轴状奥氏体组成,最后过冷奥氏体发生相变的时候变形的奥氏体转变形成的铁素体为长条状变形铁素体;发生了部分再结晶形成的少量等轴状奥氏体最后相变生成了等轴状铁素体,所以实验钢种相变后的组织为不规则铁素体和等轴状铁素体的混合组织。

两个轧制后的钢种制备成标准圆棒 $L_l \times L_c \times d_0 = 140 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的拉伸试样在 SHIMADZU AG-IS 100 kN 拉伸试验机上进行拉伸,拉伸力学性能结果见表 2。由表 2 可见,试样的屈服强度在 550 MPa 以上,抗拉强度在 650 MPa 以上,屈强比都超过了 0.8,两个钢种的伸长率和断面收缩率都比较相近。由成分和力学性能数据可知,随着钛含量由 0.08% 增加到 0.153% 和铌含量由 0.062%

表 1 试验钢种化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steels / %

实验钢	C	Si	Mn	S	P	Ti	Nb	Als	O	N
A 钢	0.075	0.22	1.76	0.003	0.006	0.153	0.038	0.003	0.004 5	0.004 2
B 钢	0.061	0.22	1.77	0.002	0.006	0.080	0.062	0.003	0.004 0	0.003 8

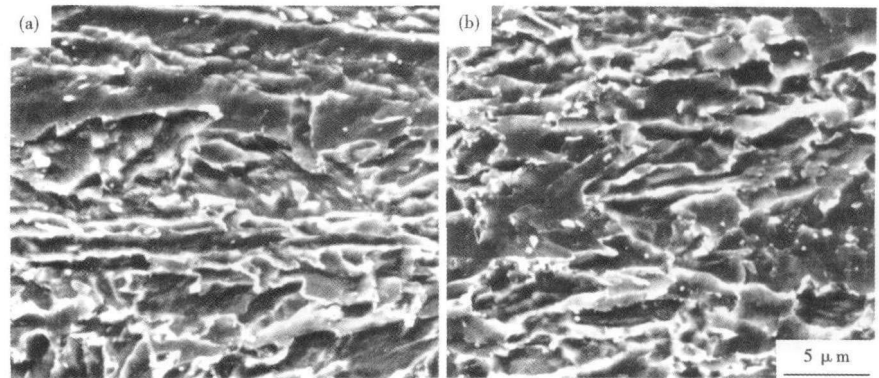


图 1 A 钢(0.153Ti-0.038Nb)(a)和 B 钢(0.080Ti-0.062Nb)(b)的组织形貌,SEM
Fig.1 Morphology of structure of A steel (0.153Ti-0.038Nb) (a) and B steel (0.080Ti-0.062Nb) (b), SEM

表 2 Ti 含量对 Ti-Nb 微合金化钢力学性能的影响

Table 2 Effect of Ti content on mechanical properties of Ti-Nb microalloying steel

实验钢	Ti / %	Nb / %	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	伸长率 / %	断面收缩率 / %	屈强比
A 钢	0.153	0.038	633	756	22	70	0.84
B 钢	0.080	0.062	558	653	25	71	0.85

降低到 0.038%,试样的屈服强度由 558 MPa 提高到 633 MPa,抗拉强度由 653 MPa 提高到 756 MPa,而伸长率和断面收缩率略微有些降低。

2.2 夹杂物组成和形貌

根据 GB/T10561-2005 取样标准制备试样,试样经过抛光后,运用 QUANTA400 扫描电镜拍摄的 100 倍抛光夹杂物形貌,两个钢种的夹杂物都成颗粒状独立分布,有的夹杂物呈方形,更多的夹杂物呈不规则球形,方形的夹杂物可能是 Ti 的夹杂物,通过夹杂物的能谱图可以得知,夹杂物由 Ti、Al 和 O 元素组成(表 3)。根据能谱图各元素的种类和各元素的原子百分比可知,夹杂物可能由 TiO_2 和 Ti_2O_3

表 3 A 钢(0.153Ti-0.038Nb)和 B 钢(0.080Ti-0.062Nb)中夹杂物组成,原子 / %

Table 3 Ingredient of inclusions in A steel (0.153Ti-0.038Nb) and B steel (0.080Ti-0.062Nb), atomic / %

实验钢	O	Al	Ti
A 钢	63.40	1.00	35.61
B 钢	64.07	1.64	34.29

组成并混有一定量的 Al_2O_3 。B 钢中的夹杂物形貌和组成和 A 钢的夹杂物类似。

根据 GB/T10561-2005 进行夹杂物评级, A 钢 100 倍的金相图中的球状氧化夹杂物评级为 D1 级; B 钢 100 倍的金相图片中的球状氧化夹杂物评级为 D1.5 级, 两个实验钢种的夹杂物平均尺寸大约为 6 μm 。经过观察大量的夹杂物形貌图片发现, B 钢中的夹杂物比 A 钢的要密集一些, 夹杂物能谱表明其含有大量的 Ti 元素。

实验钢种有如此多的氧化夹杂物, 可能是实验钢冶炼时脱氧不充分, 在凝固过程中 Ti 元素和 O 元素相结合就生成了 TiO_2 和 Ti_2O_3 , 过多的 TiO_2 和 Ti_2O_3 夹杂物势必会造成有效 Ti 的降低, 从而影响析出强化效果。

2.3 析出相类型和分布

在 C-Mn 钢中加入微合金元素 Ti 和 Nb 所形成的微合金钢强度明显得到了提升, 这是因为微合金元素 Ti 和 Nb 会和钢中的 C 和 N 相结合形成微小的第二相粒子, 这些粒子不单起着沉淀强化的作用, 还能够起到细化晶粒的作用, 同时还可以提高钢种的再结晶温度从而为控轧控冷技术的运用提供条件^[7]。

为了研究 A 钢和 B 钢的析出物状态、数量和形貌, 本研究采用碳萃取复型的方法制备透射电镜观察试样; 将抛光后的试样表面滴上几滴丙酮并贴上醋酸纤维纸, 20 min 后撕下醋酸纤维纸并向贴过试样表面一面的纤维纸上喷碳, 然后将喷了碳的醋酸纤维纸放在丙酮溶液里面浸泡几小时直至醋酸纤维完全溶解只剩下碳薄膜, 然后用水和乙醇的混合溶

液对薄膜进行清洗, 最后用铜网滤出薄膜并让薄膜自然干燥。试样制备完毕后在将试样放在工作电压为 120 kV 的 JEM-2100F 场发射透射电镜下观察析出物的形貌, 并用探针测定析出物的元素组成。

由透射电镜析出物形貌和分布(图 2a, c)可以看出, 两个实验钢种的析出物都呈现出规则的球状(椭球状)且分布比较弥散, 经过对析出点进行能谱测试(图 2b, d)以后发现, 析出物的组成元素包含了 Ti、Nb、C 和 N, 因此可判定实验钢的析出是 Ti-Nb 的复合析出, 析出物组合形式为 (Nb, Ti)(C, N), 通过测定两个实验钢析出物尺寸发现大多数析出物的尺寸在 50 ~ 120 nm, 有少量的析出物尺寸粗达 120 ~ 200 nm。A 钢的析出数量明显比 B 钢的析出密集, 且析出物数量也明显多于 B 钢。

3 讨论

钢铁材料中存在的细小的第二相粒子会阻碍钢铁材料变形时位错的运动, 而这些粒子有的是不可变形粒子, 有的是可变形粒子。位错在遇到不可变形粒子时绕过粒子, 当遇到可变形粒子时切过粒子, 然而不管是绕过机制还是切过机制位错在钢铁材料中要继续运动都需要极大的能量支持^[8]。而且第二相粒子数量越多、尺寸越小需要的能量就越大, 宏观表现出来的材料的强度也就越高。微合金元素 Nb 和 Ti 都是强碳、氮化物形成元素。微量合金元素的添加, 在钢中都会形成稳定的碳化物、氮化物或碳氮化物, 这些细小的碳氮化物粒子在钢中呈弥散形式分布以提高钢材的强度。

本研究设计的两个钢种中均含有一定量的 Ti

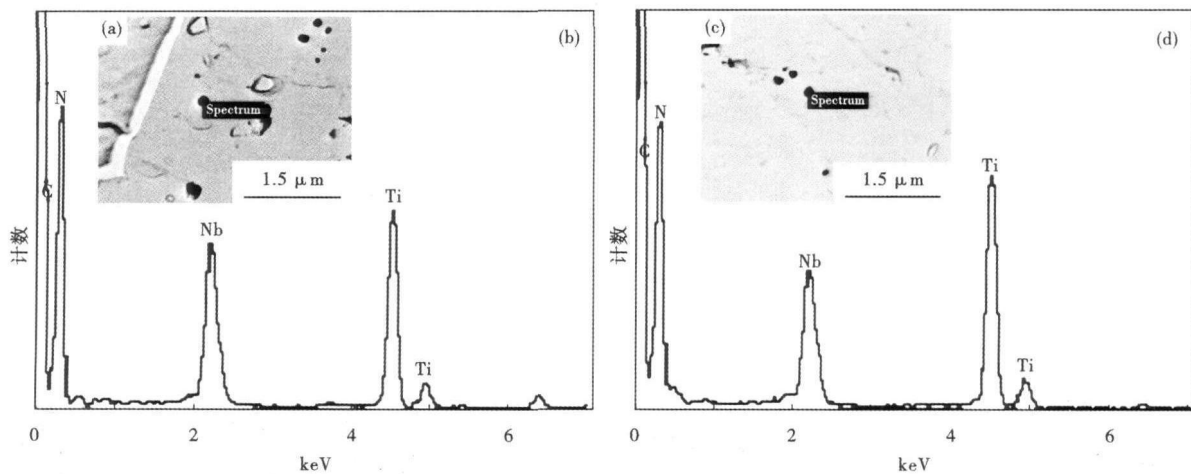


图 2 实验钢碳氮化物析出形貌(a, c)和能谱图(b, d): (a)(b) A 钢(0.153Ti-0.038Nb); (c)(d) B 钢(0.080Ti-0.062Nb)

Fig. 2 Morphology (a, c) and energy spectrum (b, d) of carbo-nitride precipitates in test steels: (a) (b) A steel (0.153Ti-0.038Nb); (c) (d) B steel (0.080Ti-0.062Nb)

和 Nb 微合金元素,且 B 钢的 Ti 含量明显比 A 钢要少,Nb 含量比 A 钢要多。本研究的目的是探索降 Nb 增 Ti 对钢材性能的影响,中试结果表明,Ti 含量的增加明显影响了钢铁材料的力学性能,A 钢比 B 钢的屈服和抗拉强度均有大幅的提升。

从实验结果来看,所研究的 A 钢和 B 钢的晶粒尺寸比普通 C-Mn 钢要细小,其原因是钢中的 Nb 和 Ti 在浇铸过程中形成了 TiN、TiC、NbN 和 NbC 等粒子,这些粒子在轧制加热的过程中由于溶解比较缓慢,所以阻碍了相变过程中奥氏体晶界的迁移,从而使加热后原始奥氏体晶粒尺寸比普通 C-Mn 钢要细小,最终使得轧后层冷相变后的组织也更加细小。

两个钢种中都添加了一定量的 Ti 和 Nb,这两个元素都具有提高再结晶温度的作用,因此,在精轧的后两个道次实验钢应该处于部分再结晶区域,使得两个钢种的微观组织都是长条状不规则的铁素体和少量等轴铁素体的混合组织,而且组织都比较细小。

经过大量观察两个实验钢种夹杂物形貌和能谱图片发现,两个实验钢中的夹杂物尺寸相当,但 B 钢的夹杂物数量明显比 A 钢要多,且夹杂物主要由前述的 $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ 和 Ti_2O_3 复合型夹杂物。由于本研究的实验材料是在实验室冶炼的没有经过生产中的精炼程序且虽然加入了脱氧剂,明显表现出实验材料脱氧不够充分,最终 O 元素和 Ti 元素结合形成了 Ti 的氧化物,从而造成钢中 Ti 元素的浪费,降低了微合金元素 Ti 的利用率。

实验观察发现两个实验钢中的析出物尺寸大都在 50 ~ 120 nm,有少量的析出物尺寸粗达 120 ~ 200 nm,且都为 (Nb,Ti)(C,N) 复合型析出。在微合金钢中当温度一定时 Ti 和 Nb 的碳氮化物在钢中溶度积是以 TiN、NbN、TiC、NbC 递增的。所以钢液中首先形成 TiN 析出相,在随后的冷却过程中优先形成的粒子会为随后析出的 NbN、TiC、NbC 粒子提供形核点,所以析出粒子的尺寸会增大、变粗。同时高温变形会在钢中引入高密度的位错和晶体缺陷,这些缺陷为碳氮化物提供了大量非自发形核点,碳氮化物形核后会沿着位错管道快速扩散使得这些碳氮化物迅速生长和粗化。

本研究实验室轧制控制效果不理想以及轧后冷却速度很难控制造成冷却速度过慢,最终导致材料在高温大量析出粗大的第二相粒子减少了材料的低温细小 NbC 和 TiC 的析出,析出物最后表现为 Ti 和

Nb 的复合析出且尺寸比较粗大。在析出数量上 A 钢比 B 钢要多,且 B 钢本来钛含量就不及 A 钢,还有一部分浪费在了夹杂物上,最终 B 钢在屈服强度和抗拉强度上明显低于 A 钢。

在实际热连轧生产中,精轧道次间隙时间很短,而且可以较好的控制轧后冷却速度,因此能够有效地控制析出物的尺寸,进一步提高所研究钢种的力学性能。

4 结论

(1) 含不同钛和铌的微合金钢都是 Ti-Nb 复合析出物,且钢的强度随着钛含量的增加有很大的提高。

(2) 实验钢中夹杂物主要为 TiO_2 和 Ti_2O_3 ,B 钢中夹杂物比 A 钢要多,造成 Ti 元素的利用率不高,最终导致 B 钢中的析出物数量不及 A 钢,宏观表现为 B 钢的强度明显低于 A 钢。

(3) 两个实验钢中的析出物尺寸都比较粗大,造成这种情况的原因是实验室采用的单机架轧机,道次间隙时间比较长,所以析出物容易在高温析出,随后的低温析出以先析出颗粒为形核点,从而使得钢中的析出物变粗。

(4) 试验结果表明,可以通过增加 Ti 含量、降低 Nb 含量来得到所要求的力学性能,以降低生产成本。

参考文献

- 1 狄国标,陈连生,刘振宇,等.薄板坯连铸连轧低温卷取生产双相钢的工业试验[J].钢铁,2009,44(6):65-68.
- 2 Hong S G, Kang K B, Park C G. Strained-Induced Precipitation of NbC in Nb and Nb-Ti Microalloyed HSLA Steels [J]. Scripta Materialia, 2002, 46(2): 163-168.
- 3 王春明,吴杏芳,刘 玠,等. X70 针状铁素体管线钢析出相[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(3): 253-257.
- 4 Xu Guang, Gan Xiaolong, Ma Guojun, et al. The Development of Ti-alloyed High Strength Microalloy Steel [J]. Materials and Design, 2010, 31(6): 2891-2896.
- 5 刘立群,刘凤莲,刘仁东,等.汽车结构用 Nb-Ti 复合微合金化热轧钢板的研制[J].特殊钢,2002,23(增刊),93-95.
- 6 Xu Guang, Xu Chushao, Zhao Jiarong, et al. Research on Flow Stress in Ferrite Deformation of a Ti-IF Steel [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology (English Version), 2006, 21(1): 1-3.
- 7 赵 刚,解国宏,余驰斌,等.含铌钛微合金汽车用钢力学性能与控轧控冷工艺关系的研究[J].钢铁研究,2003,31(2):30-32.
- 8 雍岐龙.钢铁材料中的第二相[M].北京:冶金工业出版社,2006: 15-17.

甘晓龙(1984-),男,硕士,助理工程师,金属加工工艺及组织性能控制的研究。E-mail:GXL1028@126.com

收稿日期:2012-05-10