

500 MPa 汽车用 Ti-Nb 微合金高强度结构钢的优化和开发

殷 胜¹ 朱红丹²

(上海梅山钢铁股份有限公司 1 技术中心品种开发室; 2 制造部检测中心, 南京 210039)

摘 要 Ti-Nb 微合金高强度钢板的生产流程为 206 t 顶底复吹转炉-LF-RH-230 mm 铸坯-连轧成 3~7 mm 板工艺。将原 0.045Nb-0.015Ti 微合金化钢优化成 0.070Ti-0.015Nb 微合金化钢后, 其焊接性能和低温冲击性能优良, 并具有良好的综合力学性能。使用结果表明, 0.070Ti-0.015Nb 微合金化钢与 0.045Nb-0.015Ti 微合金化钢相同, 满足加工和服役要求, 但成本有明显降低。

关键词 Ti-Nb 微合金化 汽车用高强度钢 析出强化

Optimization and Development of 500 MPa Ti-Nb Microalloy High Strength Steel for Auto

Yin Sheng¹ and Zhu Hongdan²

(1 R&D Center; 2 Testing Center of Manufacturing Department, Shanghai Meishan Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210039)

Abstract The production flowsheet for Ti-Nb Microalloy high strength steel plate is 206 t top and bottom combined blown converter-LF-RH-230 mm slab casting-rolling 3~7 mm plate process. Through optimizing the original 0.45Nb-0.015Ti microalloy steel to 0.070Ti-0.015Nb microalloy steel has excellent welding and low temperature impact toughness properties and has better comprehensive mechanical properties. Service results show that the 0.07Ti-0.015Nb microalloy steel is identical to 0.045Nb-0.015Ti microalloy steel, satisfactory to requirement of process and service, while the production cost decreases obviously.

Material Index Ti-Nb Microalloying, High Strength Steel for Auto, Precipitation Strengthening

梅钢对屈服强度在 500 MPa 汽车结构钢一贯制工艺进行的重新设计过程, 新设计合金成本较原设计吨钢合金成本降低 150 元, 新设计满足标准要求, 经过用户使用, 未发现与原设计有显著性差异, 完全满足其加工要求和成品零件服役要求。

1 研究思路

梅钢对钢屈服强度在 500 MPa 级别原设计为低 C、高 Mn、微合金化设计 Nb 为主、Ti 为辅^[1], 为适应市场发展要求, 从当前合金价格来看 Ti 价格远低于 Nb 价格, 可考虑合金设计思路改变为低 C、高 Mn、Ti 为主、Nb 为辅^[2], 利用 Ti 元素的特性来实现低成本设计^[3]。

2 试验材料及研究方法

试验钢(表 1)的主要工艺流程: 转炉-LF-RH-CC-加热炉-粗轧-精轧-层流冷却-卷取, 转炉为 260 t 顶底复吹转炉, 连铸坯尺寸为 230 mm × 1 350 mm, 轧机为 1780。试验料的加热温度在 (1 210 ± 20) °C, 精轧出口温

度 (820 ± 20) °C, 卷取温度 (590 ± 20) °C, 产品订货厚度 3~7 mm。

采用 4% 的硝酸酒精溶液对金相试样进行腐蚀, 应用 LEICA-DMIRM 多功能光学显微镜和 FEI Quanta 600 扫描电镜对显微组织进行观察。拉伸试验在 INSTRON 9500 万能试验机上完成。低温冲击韧性测定采用“V”型缺口试样, 7 mm 板的冲击试样均为非标试样。采用气体保护焊的焊接工艺, 7 mm 钢板进行焊接性能评价。

3 试制结果与分析

3.1 显微组织

试验钢的室温组织以细小的多边形铁素体和珠光体为主, 晶粒度级别达到 12 级(图 1)。试验钢的精轧出口温度控制在未再结晶区靠近略高于相变点 800~840 °C, 精轧末机架压下率达到 12% 以上, 在

表 1 改进前后试验钢的化学成分 / %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	N
新设计	≤0.10	≤0.10	≤1.2	≤0.015	≤0.005	≤0.020	≤0.08	≥0.02	≤0.005 0
原设计	0.08	0.045	1.15	0.012	0.004	0.045	0.015	0.03	0.004 0
分析值	0.08	0.045	1.15	0.012	0.004	0.015	0.070	0.03	0.004 0

注: 原设计成本 - 新设计成本 = 150 (元/t)

晶粒内部积累了大量的变形带、孪晶和位错,增加了相变的形核点,因此显著细化成品晶粒尺寸,获得细小均匀的多边形铁素体。冷却模式采用前段连续冷却的方式,卷取温度控制在 $570 \sim 610 \text{ }^{\circ}\text{C}$,既可以“固定”相变后铁素体晶粒尺寸,又可兼顾获得大量的析出物。

3.2 析出物分析

图2(a)为含 Ti、Nb 的析出物,其化学成分为 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}^{[4]}$;图2(b)同样为试验钢含 Ti、Nb 的碳氮化物析出物,通过能谱分析可知其化学成分为 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{CN}$ 。钛与氮具有很好的亲和力,从液态或凝固初期就形成了粗大的 TiN 颗粒,

只有钢中氮消耗尽后,钛才会与碳结合。因此,在利用钛的析出强化作用来提高钢板强度时要尽量降低氮的含量,降低氮对钛的消耗。当板坯加热到 $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,大部分的铌溶解,而 TiN 的固溶温度较高^[5],仍处于稳定的状态。随着板坯温度的降低,含铌的粒子附着在 TiN 上重新析出,即形成了尺寸相对较大的析出物 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{CN}$ 。由于铌或钛的碳化物的晶格类型相同,都是有 NaCl 型的面心立方晶体结构,晶格常数相差不大,很容易相互溶解,从而形成铌和钛的复合碳化物。在试验钢中,10 nm 以下的析出物可以达到 90% 左右,5 nm 以下的析出物达 50% 左右,具有强烈的弥散强化作用,能显著提高试验钢的强度。因此,试验钢的强化机制包括细晶强化和析出强化。

3.3 焊接性能评价

采用气体保护焊的焊接工艺,保护气体流量为 17 L/min ,气体成分为 $80\% \text{ Ar} + 20\% \text{ CO}_2$,焊接坡口为 I 型,焊丝为 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 的 HS-80(相当于 ER76-G)对 7 mm 钢板进行对焊。结果表明,在常规焊接条件下,焊接接头弯曲试验未发现任何裂纹或缺陷,无焊缝咬边等缺陷,焊接熔池与母材熔合良好,如图3所示。

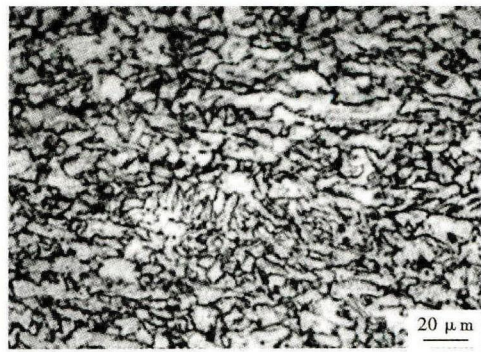


图1 0.070Ti-0.015Nb 钢的组织形貌

Fig.1 Morphology of structure of 0.070Ti-0.015Nb steel

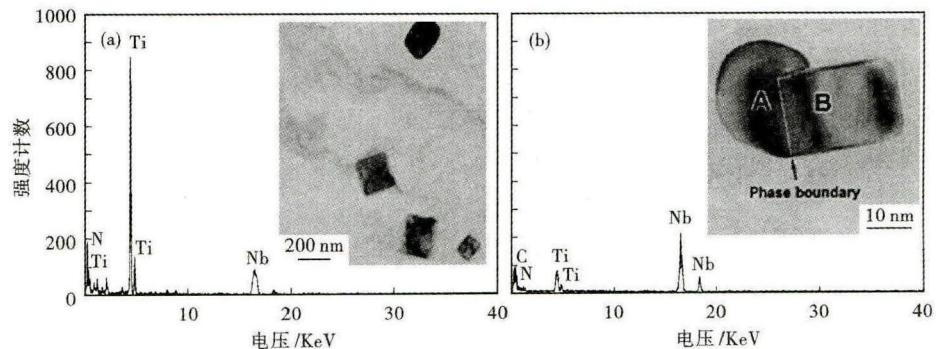


图2 0.070Ti-0.015Nb 钢析出物 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{N}$ (a) 和 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{CN}$ (b) 的形貌和分析,TEM
Fig.2 Morphology and analysis of precipitates $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{N}$ (a) and $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{CN}$ (b) of 0.070Ti-0.015Nb steel, TEM

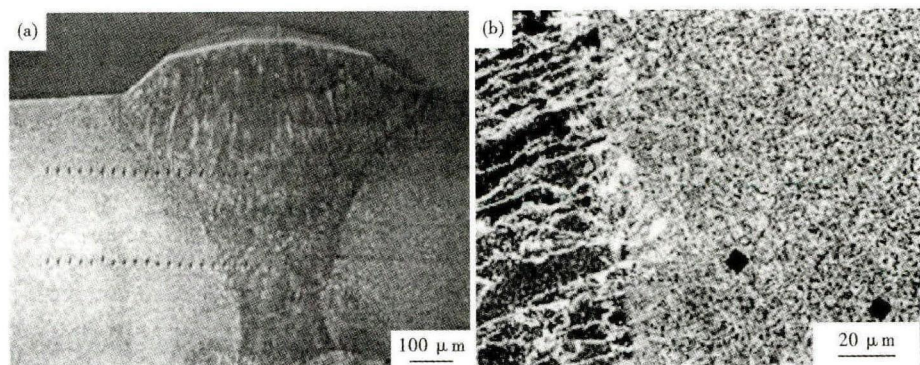


图3 0.070Ti-0.015Nb 微合金钢焊缝宏观形貌(a)和焊缝熔合线(b)组织形貌

Fig.3 Micro morphology of welding seam (a) and morphology of structure of weld seam fusion-line (b), 0.070Ti-0.015Nb microalloy steel

3.3.1 热影响区最高硬度

图4表示焊热影响区最高硬度分布情况,焊热影响区最高 HV10 硬度值为 218,远低于国际焊接学会(IIW)推荐的焊接冷裂纹倾向临界 HV 硬度值 $350 \sim 400$,说明该材料具有良好的抗焊接冷裂纹性能。

3.3.2 接头金相组织

图5为焊接接头的金相组织,其中焊缝组织为铁素体+针状铁素体+珠光体,热影响区中过热区组织为针状铁素体+珠光体+贝氏体,晶粒长大不

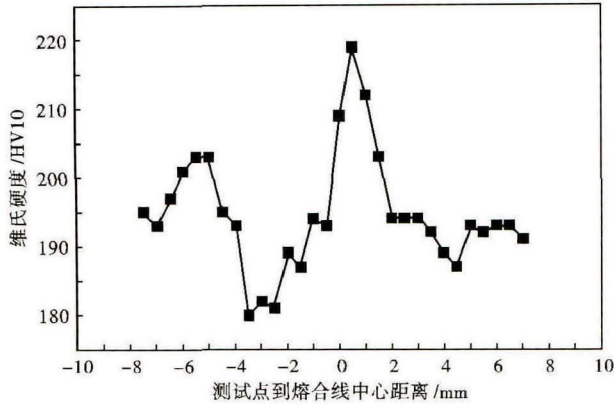


图 4 0.070Ti-0.015Nb 微合金钢焊接热影响区最高硬度分布
Fig. 4 Distribution of ultimate hardness of heat affected zone, 0.070Ti-0.015Nb microalloy steel

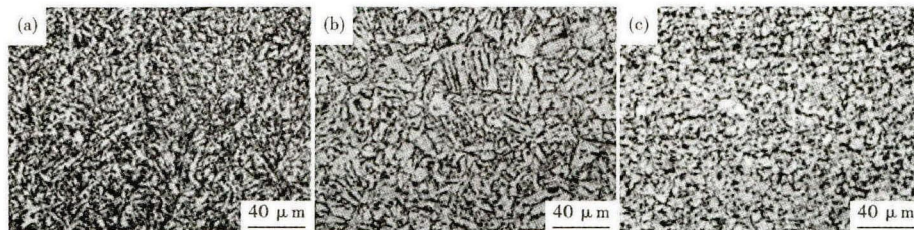


图 5 0.070Ti-0.015Nb 微合金钢焊缝 (a)、过热区 (b) 和正火区 (c) 组织形貌
Fig. 5 Morphology of structure in weld seam (a), overheated zone (b) and normalized zone (c) of 0.070Ti-0.015Nb microalloy steel

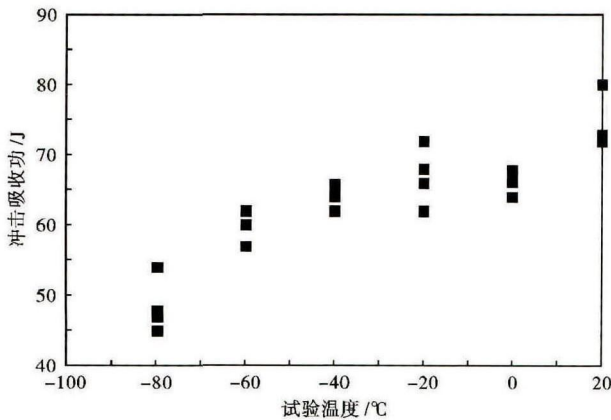


图 6 0.070Ti-0.015Nb 微合金钢低温冲击功
Fig. 6 Low temperature impact energy of 0.070Ti-0.015Nb microalloy steel

明显,正火区为铁素体 + 珠光体,结果表明焊接接头组织正常。

3.4 低温冲击韧性

随机抽取批量生产产品,加工成 (mm) 5 × 10 × 55 的 V 型冲击试样进行系列冲击韧性测试,结果表明新设计低温冲击韧性优良,见图 6。

3.5 力学性能

随机抽取批量生产产品,加工成拉伸试样,按照 GB228-2004 进行测试,结果表明新设计满足标准要求,综合性能指标良好,见表 2。

3.6 用户使用

新设计的产品发给用户使用,用户反馈成形性能和成品零件测试未发现与原供应的原料有差别,表明新设计满足其加工要求和成品零件服役要求。

4 结论

(1) 新设计的 Ti-Nb 微合金化钢采用较低的终轧温度 800 ~ 820 °C,卷取温度 570 ~ 590 °C,可以实现屈服强度 500 MPa 级低成本汽车结构钢的稳定工业化生产。

(2) 所开发的汽车结构钢具有良好的低温冲击韧性、冷弯性能和焊接性能,完全可以满足汽车零部件的加工及使用要求。

参考文献

- [1] 雍岐龙,刘正东,孙新军,等. 钛微合金钢中碳氮化钛固溶量及化学组成的计算与分析[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(3): 12-16.
- [2] 付俊岩. 汽车零部件用高品质特殊钢技术的最新发展[J]. 汽车工程, 2009, 31(5): 407-413.
- [3] 雍岐龙,田建国,杨文勇,等. 钛在钢中的物理冶金学基础数据[J]. 云南工业大学学报, 1999, 15(2): 7-10.
- [4] 周建,康永林,毛新平,等. Ti 微合金化高强耐候钢的析出相观察和物理化学相分析[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(增刊): 85-90.
- [5] 雍岐龙,吴宝榕,白埃民,等. 钕微合金钢中碳氮化钕化学组成的计算与分析[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(2): 37-42.

表 2 新设计 0.070Ti-0.015Nb 钢和原设计 0.045Nb-0.015Ti 钢的力学性能检测结果

Table 2 Examination results of mechanical properties of new designed 0.070Ti-0.015Nb steel and original designed 0.045Nb-0.015Ti steel

项目	屈服强度/MPa		抗拉强度/MPa		断后伸长率/%		冷弯	
	新设计 0.070Ti- 0.015Nb	原设计 0.045Ti- 0.015Nb	新设计 0.070Ti- 0.015Nb	原设计 0.045Ti- 0.015Nb	新设计 0.070Ti- 0.015Nb	原设计 0.045Ti- 0.015Nb	新设计 0.070Ti- 0.015Nb	原设计 0.045Ti- 0.015Nb
标准差	30	28	19	24	4	2		
最小值	500	530	563	601	17.0	17.5		
最大值	677	662	696	716	25	27	良好	
均值	553	550	635	656	23	25		
标准	≥500		550 ~ 700		17		d = 1a, 180°	

殷 胜 (1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 2002 年南京理工大学毕业, 汽车用钢开发。

E-mail: yinsheng@baosteel.com

收稿日期: 2015-08-03