

Nb-Ti 微合金化对热轧 0.5 ~ 0.7Cr 铲斗刀板型钢组织和性能的影响

费俊杰^{1,2} 周桂峰^{1,2} 吴 润¹ 齐江华² 周剑华² 朱 敏²

(1 武汉科技大学材料科学与冶金学院,武汉 430081;2 武汉钢铁(集团)公司研究院,武汉 430080)

摘 要 试验 0.5 ~ 0.7Cr 铲斗刀板型钢(/% : 0.22 ~ 0.30C, 0.25 ~ 0.45Si, 0.95 ~ 1.20Mn, 0.006 ~ 0.009P, 0.008 ~ 0.010S, 0.5 ~ 0.7Cr, 0.015 ~ 0.065Nb, 0 ~ 0.040Ti) 由 50 kg 真空感应炉熔炼, 热轧成 16 mm 厚板, 终轧温度 850 ~ 900 ℃, 空冷。通过光学显微镜、扫描、透射电镜和力学性能测试研究了 Nb-Ti 含量(0.015Nb, 0.035Nb-0.010Ti, 0.065Nb-0.040Ti) 对热轧态铲斗刀板钢组织和力学性能的影响。结果表明, 试验钢组织为 F + P, 随 Nb-Ti 含量增加, 钢板的晶粒细化, 珠光体片层间距降低, (Nb, Ti)C 和 (Nb, Ti)(C, N) 析出物增多, 强度增加, 0.065Nb-0.040Ti 钢板的力学性能为屈服强度 632 MPa, 抗拉强度 916 MPa, 延伸率 17.7%, K_{AV} 40 J, HB 硬度值 234。

关键词 0.5 ~ 0.7Cr 铲斗刀板型钢 Nb-Ti 微合金化 析出强化 组织 力学性能

Effect of Nb-Ti Microalloying on Structure and Properties of Hot-Rolled 0.5 ~ 0.7Cr Steel for Bucket Blade

Fei Junjie^{1,2}, Zhou Guifeng^{1,2}, Wu Run¹, Qi Jianghua², Zhou Jianhua² and Zhu Min²

(1 College of Material Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430080)

Abstract Tested 0.5 ~ 0.7Cr steel for bucket blade (/% : 0.22 ~ 0.30C, 0.25 ~ 0.45Si, 0.95 ~ 1.20Mn, 0.006 ~ 0.009P, 0.008 ~ 0.010S, 0.5 ~ 0.7Cr, 0.015 ~ 0.065Nb, 0 ~ 0.040Ti) is melted by a 50 kg vacuum induction furnace and hot-rolled to 16mm plate with finished rolling temperature 850 ~ 900 ℃, air cooling. The effect of Nb-Ti content (0.015Nb, 0.035Nb-0.010Ti and 0.065Nb-0.040Ti) on structure and mechanical properties of hot-rolled steel for bucket blade has been studied by optical, scanning electron and transmission electron microscope and mechanical properties examination. Results show that the structure of tested steel is ferrite + pearlite; with increasing Nb-Ti content in steel, the grain in steel plate is fined, the lamellar spacing of pearlite decreases and the amount of precipitates of (Nb, Ti)C and (Nb, Ti)(C, N) and the strength increase; and the mechanical properties of steel plate containing 0.065Nb-0.040Ti is yield strength 632 MPa, tensile strength 916 MPa, elongation 17.7%, impact energy K_{AV} 40 J and HB hardness value 234.

Material Index 0.5 ~ 0.7 Cr Steel for Bucket Blade, Nb-Ti Microalloying, Precipitation strengthening, Structure, Mechanical Properties

铲斗刀板型钢主要用于装载机、推土机等施工机械的铲斗底板与刀刃连接处, 铲斗刀板是与土方、石块、泥沙等接触最频繁的部件之一, 其性能和质量直接影响装载机的使用性价比^[1-2], 一般通过 Nb-Ti、Nb-V、Ti、V 等复合微合金化可以获得综合力学性能^[3-4]。

1 试验材料及方法

设计的试验钢采用实验室 50 kg 真空感应炉冶炼并真空浇铸成钢锭, 其成分见表 1。

将试验钢在 Φ800 mm 二辊可逆式轧机上轧制成 16 mm 厚的钢板: 加热温度 1 200 ℃, 开轧 1 150 ℃, 终轧 850 ~ 900 ℃, 空冷。利用 GA4035 型带锯床和 M1432B 型外圆磨加工标准 Φ10 mm × 220 mm 圆形拉力试样。利用 V8U-B 型冲击试样拉床加工成 (mm) 10 × 10 × 55 标准 V 型缺口试样。在轧制钢板取薄膜用试样, 经机械研磨后, 在 -20 ℃ 双喷减

表 1 试验钢化学成分 / %							
Table 1 Chemical composition of tested steels / %							
试验钢	C	Si	Mn	Cr	Nb	Ti	P S
1 [#]	0.22 ~ 0.30	0.25 ~ 0.45	0.95 ~ 1.20	0.50 ~ 0.70	0.015	-	0.006 0.008
2 [#]	0.22 ~ 0.30	0.25 ~ 0.45	0.95 ~ 1.20	0.50 ~ 0.70	0.035	0.010	0.007 0.010
3 [#]	0.22 ~ 0.30	0.25 ~ 0.45	0.95 ~ 1.20	0.50 ~ 0.70	0.065	0.040	0.009 0.006

薄, 液氮冷却, 利用 JEM-2000FX II 型透射电镜观察第二相析出, 利用 HB-3000 布氏硬度计测量硬度, 利用 MEF4A 型数码光学显微镜进行组织观察, 腐蚀溶液为 4% 硝酸酒精, 利用 GALDABINI SUN10 型电液伺服材料拉伸试验机进行拉力试验。

2 试验结果

2.1 力学性能

屈服强度为 541 ~ 632 MPa, 抗拉强度 820 ~ 916

表 2 试验钢力学性能
Table 2 Mechanical properties of tested steels

试验钢	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A / %	K_{AV} /J (20℃)	HB 硬度值
1 [#] (0.015Nb)	541	820	19.2	39	226
2 [#] (0.035Nb-0.010Ti)	579	853	19.8	43	221
3 [#] (0.065Nb-0.040Ti)	632	916	17.7	40	234

MPa,室温 20℃冲击韧性为 40 J 左右,HB 硬度值最高达到 234(表 2)。

与 1[#]试验钢相比,2[#]试验钢中 Nb 含量增加,同时加入微量的 Ti,可以发现试验钢的强度和冲击韧性也随之提高,这与 Nb、Ti 微合金元素细化晶粒的作用有关。3[#]试验钢中,Nb、Ti 含量进一步增加,试验钢冲击韧性略有降低,这可能是 Nb、Ti 生成铁素体 δ 相或其它脆性相而使冲击韧性降低,同时 3[#]试验钢的强度和硬度显著提高,这得益于试验钢中

Nb、Ti 细晶强化和析出强化的双重作用。

2.2 金相组织

试验钢组织均为铁素体和珠光体,从图 1 可以看出,随着 Nb、Ti 含量的逐渐增加,试验钢晶粒组织变细,珠光体片层也得到明显细化,1[#]试验钢(图 1a₂)珠光体片层间距平均为 247 nm,2[#]试验钢(图 1b₂)为 219 nm,3[#]试验钢(图 1c₂)为 207 nm,这是因为 Nb、Ti 的碳氮化物析出有利于铁素体形核,同时能钉扎奥氏体晶界,阻止奥氏体长大,从而细化晶粒;另一方面,Nb、Ti 能使钢的 C 曲线向右下移动,降低碳的扩散速度和珠光体相变温度,并能增加过冷度,使珠光体片层间距减小。同时可以发现,相比 2[#]试验钢,3[#]试验钢中晶粒细化效果不显著,说明 3[#]试验钢中 Nb、Ti 在起到细化晶粒作用的同时,析出强化作用也在增强。

2.3 析出相分析

从图 2 可以发现,1[#]试验钢中析出相主要为

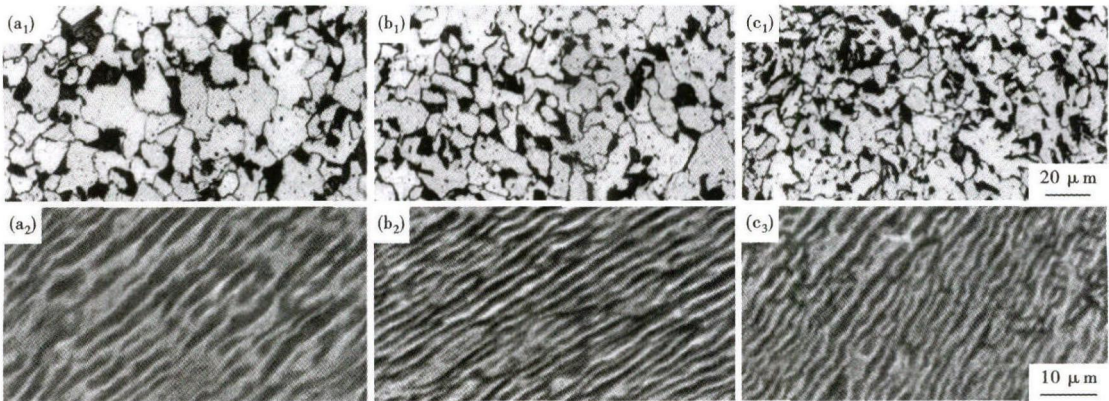


图 1 试验铲斗钢板钢金相组织和珠光体片层形貌:(a₁)(a₂)1[#]钢(0.015Nb);(b₁)(b₂)2[#]钢(0.035Nb-0.010Ti);(c₁)(c₂)3[#]钢(0.065Nb-0.040Ti)

Fig. 1 Morphology of metallurgical structure and pearlite lamella of tested steel for bucket blade: (a₁)(a₂) steel 1[#], 0.015Nb; (b₁)(b₂) steel 2[#], 0.035Nb-0.010Ti; (c₁)(c₂) steel 3[#], 0.065Nb-0.040Ti

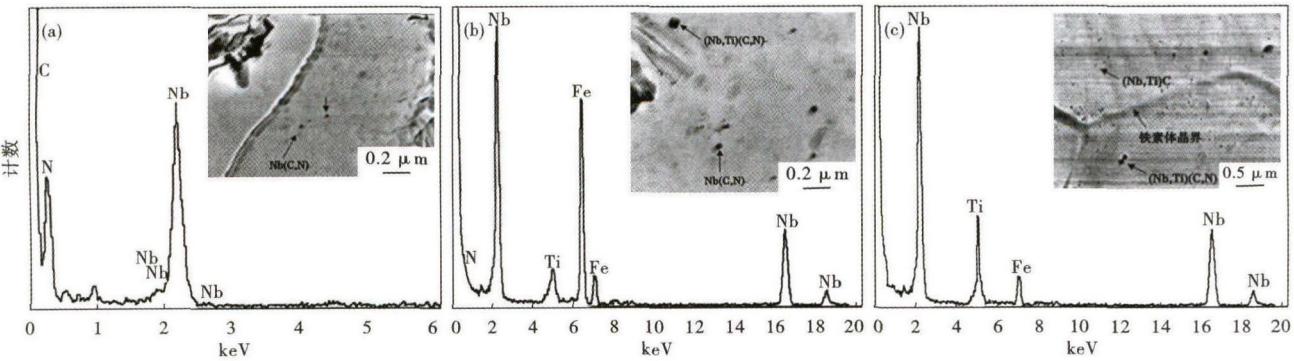


图 2 试验铲斗钢板钢析出相形貌(TEM)和能谱图:(a)1[#]钢(0.015Nb);(b)2[#]钢(0.035Nb-0.010Ti);(c)3[#]钢(0.065Nb-0.040Ti)
Fig. 2 Morphology of precipitated phases (TEM) of tested steel for bucket blade and energy spectrum diagram: (a) steel 1[#], 0.015Nb; (b) steel 2[#], 0.035Nb-0.010Ti; (c) steel 3[#], 0.065Nb-0.040Ti

Nb(C, N), 为圆形或椭圆形, 尺寸相对较小(尺寸在 10~30 nm), 2[#] 试验钢中 Nb、Ti 含量增加, 其析出相为圆形的 Nb(C, N) (10~30 nm) 和少量矩形的 (Nb, Ti)(C, N) (60~90 nm)。3[#] 试验钢中主要析出相为圆形的 (Nb, Ti)C (10~20 nm) 和少量的 (Nb, Ti)(C, N), (Nb, Ti)C 主要在轧后冷却过程中于铁素体晶内和晶界弥散析出, 由于析出的温度低而形成细小圆形颗粒状, 增强了细化晶粒和析出强化的作用, 在冲击韧性不显著降低的情况下, 大幅提高了 3[#] 试验钢的强度和硬度。

3 分析和讨论

3.1 细晶强化

在外加应力的作用下, 晶体中的位错源会不断形成位错, 晶体发生滑移, 晶粒越细, 晶界越多, 对位错运动的阻碍就越大, 宏观力学表现就是材料强韧性的增加^[5]。材料强度和晶粒尺寸的关系可以大致用 Hall-Petch 方程表示: $\sigma = \sigma_0 + Kd^{-\frac{1}{2}}$

式中: σ_0 - 单晶体的强度; K - 晶界对强度影响程度的常数; d - 晶粒直径。

细化晶粒还可以提高材料的韧性, 使得裂纹不易形成和扩展传播, 材料中裂纹扩展临界应力 σ_c 可

大致表示为: $\sigma_c \approx \frac{2\mu\gamma_p}{k_y} d^{-\frac{1}{2}}$

式中: μ - 材料切变模量; γ_p - 比表面能; k_y - Petch 斜率。可以发现, 形成裂纹临界应力与晶粒尺寸成反比, 同时细化晶粒增加晶界数量, 会阻碍裂纹的扩展, 吸收更多裂纹扩展的能量, 提高材料的韧性^[6-7]。

当钢中 Nb 含量增至一定量时, 在精轧阶段通过形变诱导作用使得细小的 Nb(C, N) 大量析出, 分布在奥氏体晶界、亚晶界和形变带上, 阻止奥氏体的形变再结晶, 形成细小的形变奥氏体, 为相变细化晶粒创造条件, 同时为铁素体形核提供形核位置, 最终获得细化的铁素体晶粒, 提高刀板钢的强韧性。

3.2 析出强化

材料中析出相弥散分布引起的强度增量 $\Delta\sigma$ 可近似表示为:

$$\Delta\sigma \approx \frac{Gb_a}{4r} \ln\left(\frac{d-2r}{2b}\right) \left(\frac{2}{d-2r}\right)$$

式中: G - 剪切模量; b - 伯氏矢量; a - 常数; r - 析出相颗粒半径; d - 析出相颗粒间距。可以发现, 析出相颗粒越细, 间距越小, 产生的弥散强化效果越好^[8]。

Nb、Ti 的碳氮化物析出和试验钢强韧化是相互

作用的, 在轧制阶段形变诱导析出细小 Nb(C, N), 促进了铁素体和晶内铁素体的形核转变, 细化铁素体和珠光体。铁素体转变又为冷却阶段中 (Nb, Ti)C 的析出提供了形核位置, 促进了 (Nb, Ti)C 的弥散析出, 分布在铁素体晶界及位错线上, 而纳米级 Nb(C, N) 和 (Nb, Ti)C 粒子反过来又细化了铁素体组织, 同时能有效阻碍位错运动, 在韧性不显著降低的情况下, 大幅提高材料强度。

4 结论

(1) 热轧态 Cr-Nb-Ti 合金化试验钢的组织由铁素体和珠光体组成, 屈服强度最高达 632 MPa, 抗拉强度达到 916 MPa, 延伸率为 17.7%。

(2) 合金元素 Nb、Ti 的加入细化了铁素体晶粒和珠光体片层间距, 同时细小的微合金 Nb、Ti 的碳氮化物作为第二相弥散析出, 析出相主要有细小的 (Nb, Ti)C 粒子, 尺寸为 10~20 nm; 以及较大的 (Nb, Ti)(C, N) 粒子, 尺寸为 60~90 nm。

(3) Nb 含量较低时 ($\leq 0.035\%$), 其主要强化机制为细化晶粒, Nb、Ti 含量增加后, 细小的 Nb、Ti 碳氮化物析出同时起到细化晶粒和弥散增强的作用, 在铲斗刀板韧性不显著降低的情况下, 大幅提高强度。

参考文献

- [1] 徐晓美, 唐倩倩, 王哲. 装载机研究现状及发展趋势[J]. 工程机械, 2012(6): 17-19.
- [2] 赵士善, 夏兆沂. 铲斗刀板常用材料的性能分析[J]. 工程机械, 2003(3): 32-36.
- [3] 陈颜堂, 郭爱民. Nb-Ti 微合金化超低碳低合金高强度钢中第二相的析出行为[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 51-55.
- [4] Girina O A, Fonstein N M, Bhattacharya D. Effect of Nb on the Phase Transformation and Mechanical Properties of Advanced High Strength Dual-Phase Steels[J]. International Conference of New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels, Buenos Aires, 2008, 17(1): 29-35.
- [5] 李新生, 王能为. 钢的微合金化强化机理浅析[J]. 冶金丛刊, 2007(6): 42-45.
- [6] Akhilaghi S, Yue S. Effect of the Thermo Mechanical Processing on the Hot Ductility of a Nb-Ti Microalloyed Steel[J]. ISIJ International, 2001, 41(11): 1350-1356.
- [7] 代晓莉, 范建文. Nb-Ti 微合金化钢板的工业试制[J]. 轧钢, 2005, 22(1): 11-15.
- [8] 郑东升, 朱伏先, 张明亚, 等. Nb-Ti 微合金化热轧多相钢的组织 and 性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 31-36.

费俊杰(1988-), 男, 博士研究生(武汉科技大学), 工程师, 2009 年河北工业大学(本科)毕业, 钢铁型材产品研发。

E-mail: feijunjie8000@163.com

收稿日期: 2016-03-28