

冷轧变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢组织和性能的影响

冯岩青^{1,2} 王福明²

(1 包钢技术中心, 包头 014010; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 试验研究了 Nb-Ti 微合金化无间隙原子 (IF) 钢 (成分: 0.006C、0.005Si、0.15Mn、0.008P、0.006S、0.039Al、0.01Nb、0.048Ti、0.0034N) 在实验 4 辊冷轧机由 3.98 mm 热轧机冷轧至 0.4mm (变形量 40%~90%) 过程组织和力学性能的变化。结果表明, 随着冷轧变形量的增加, Nb-Ti 微合金化 IF 钢组织中晶粒逐渐变为细小且纤维化, 第二相粒子趋于沿轧制方向排列; 钢的硬度、屈服强度、抗拉强度均增加, 伸长率下降。变形量在 75% 和 77% 时出现低的屈强比, 并可获得好的综合力学性能。

关键词 Nb-Ti 微合金化 IF 钢 冷轧变形量 组织 第二相粒子 力学性能

Effect of Cold-Rolling Reduction on Structure and Mechanical Properties of Nb-Ti Microalloying IF Steel

Feng Yanqing^{1,2} and Wang Fuming¹

(1 Technical Center, Baotou Iron and Steel Co Ltd, Baotou 014010;

2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The change of structure and mechanical properties of Nb-Ti microalloying IF steel (composition: 0.006C, 0.005Si, 0.15Mn, 0.008P, 0.006S, 0.039Al, 0.01Nb, 0.048Ti, 0.0034N) during cold rolling process from 3.98 mm hot rolled plate cold-rolling to 0.4 mm sheet (deformation 40% to 90%) by a four cold-rolling mill in laboratory has been tested and studied. Results show that with increasing cold-rolling reduction ratio the grains of Nb-Ti microalloying IF steel gradually decrease and flat, and the secondary phase particles are more arranged to orientate rolling direction, and the hardness, yield and tensile strength of steel increase while the elongation of steel decreases. With deformation 75% and 77% the yield strength-tensile strength ratio are lowest and the comprehensive mechanical properties of steel could be gotten.

Material Index Nb-Ti Microalloying IF Steel, Cold-Rolling Reduction, Structure, Secondary Phase Particles, Mechanical Properties

IF 钢经冷轧后要要进行退火 (晶粒的再结晶), 消除加工硬化产生的应力。研究表明^[1-6], 随着变形量的增加, 再结晶温度降低, 所以较大的变形量是保证再结晶的必要条件。但过大的变形量受轧机能力的限制, 同时变形量还与板坯厚度、热轧板厚度以及产品厚度有关, 所以寻找该钢种的合适变形量是冷轧工艺的首要任务。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为热轧 Nb-Ti 微合金化 IF 钢板 (表 1), 厚度为 3.98 mm, 热轧工艺制度为: 板坯加热温度 1 250 ℃, 终轧温度 900 ℃, 卷取温度 705 ℃。

1.2 实验方法

实验在包钢冷轧实验室进行, 采用 (mm) Φ 550 ×

Φ 200 × Φ 150 × Φ 110 × 450 直拉式 4 辊冷轧实验机, 冷轧变形量取 (成分) 40、65、70、72、75、77、80、85、90。冷轧压下共 5 道次实现, 方案见表 2。变形量经冷轧变形后的样品加工成拉伸样品及金相试样。使用蔡司显微镜分别观察试样纵向和横向金相组织及晶粒变化规律, 利用 LEO HV5.0 型扫描电子显微镜 (SEM) 进一步观察组织及析出物。取金相试样测定不同变形量下的维氏硬度, 分别测 3 点取其平均值。根据标准 GB/T228-2002 加工拉伸试样, 取样如图 1 所示, 测量不同变形量下横向、纵向、45° 方向屈服强度、抗拉强度、伸长率, 并绘制加工硬化曲线。

2 实验结果与讨论

2.1 冷轧变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢组织及析出物的影响

从图 2 中可以看出, 纵向及横向组织随冷轧变形量的增加, 组织变形程度增大。纵向变形量大于 70% 时, 组织出现纤维状, 随变形量的增大, 纤维状组织明显。横向随变形量的增加, 晶粒的饼形程度

表 1 实验 IF 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test IF steel / %

C	Si	Mn	P	S	Al _s	Al _t	Nb	Ti	N
0.006	0.005	0.15	0.008	0.006	0.033	0.039	0.010	0.048	0.0034

表 2 IF 钢冷轧方案
Table 2 Cold-rolling schemes for IF steel

道次	总压下量 / %											
	65		70		75		80		85		90	
	ϵ / %	板厚 / mm	ϵ / %	板厚 / mm	ϵ / %	板厚 / mm	ϵ / %	板厚 / mm	ϵ / %	板厚 / mm	ϵ / %	板厚 / mm
1	28	2.88	33	2.68	33	2.68	37	2.52	37	2.52	45	2.20
2	25	2.16	30	1.88	30	1.88	37	1.59	37	1.59	45	1.21
3	22	1.68	24	1.43	30	1.31	36	1.02	37	1.00	42	0.70
4	15	1.43	14	1.23	22	1.02	20	0.81	37	0.63	40	0.42
5	2	1.40	2	1.20	2	1.00	2	0.80	5	0.60	5	0.40

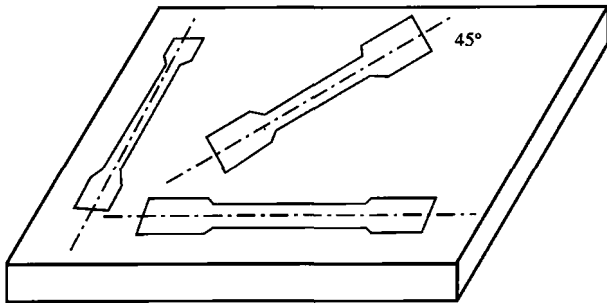


图 1 拉伸试验取样图
Fig. 1 Schematic of sampling for tensile test

增加,组织趋于均匀。钢经过冷变形后,纵向试样上的晶粒变形程度要比横向试样上的变形程度大。不同变形量下都可以观察到 TiN 颗粒(图 3, SEM),随变形量的增加 TiN 颗粒不发生变形,且由晶内位置逐渐向大变形量的纤维状组织晶界处移动。从图 4 中可以看出,80% 变形量时,位错密度较

高,晶界细窄,呈弯曲状态,亚晶形态不同,形变不均匀性明显,在位错处有细小的第二相粒子钉扎。

冷变形过程中,晶粒组织会受到拉应力和剪切应力的作用而发生滑移和转动^[1]。随着冷轧变形量的增加,晶粒沿轧制方向被拉长,外观表现为晶粒由多边形逐步变为长条形、扁平形、纤维状;内部表现为一些相互平行的滑移带和滑移线,出现许多鱼鳞状的亚晶粒,在亚晶界上聚集有大量的位错,存在着严重的晶格畸变和变形不均匀性。随着变形量的

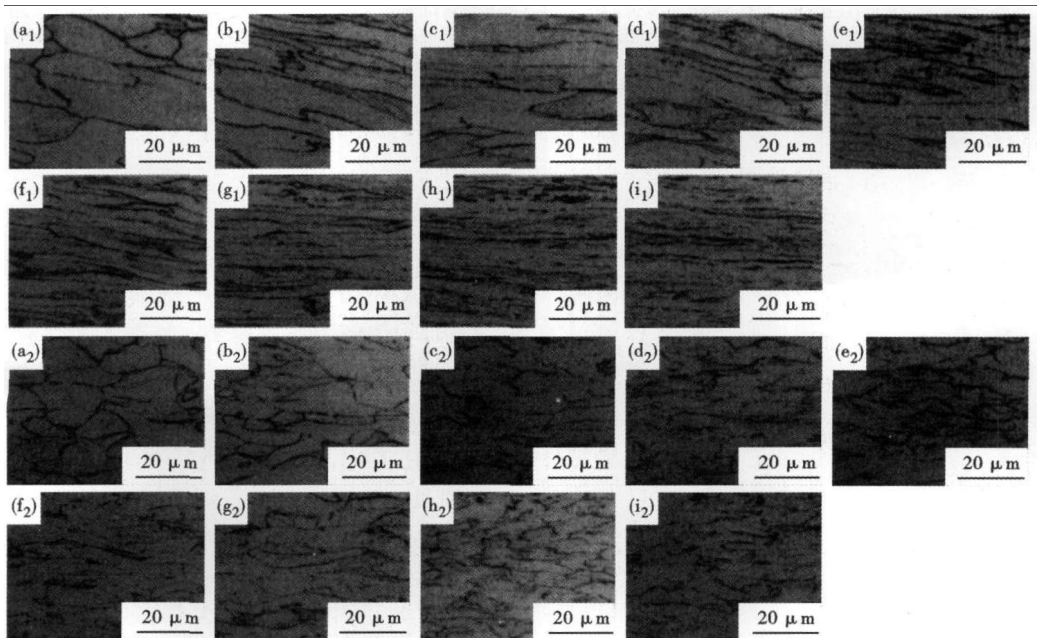


图 2 变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢组织的影响:(a₁ ~ i₁) 纵向;(a₂ ~ i₂) 横向;变形量 / % - (a₁, a₂) 40; (b₁, b₂) 65; (c₁, c₂) 70; (d₁, d₂) 72, (e₁, e₂) 75; (f₁, f₂) 77; (g₁, g₂) 80; (h₁, h₂) 85; (i₁, i₂) 90
Fig. 2 Effect of deformation on structure of Nb-Ti microalloying IF steel: (a₁ ~ i₁) longitudinal; (a₂ ~ i₂) transversal; deformation / % - (a₁, a₂) 40; (b₁, b₂) 65; (c₁, c₂) 70; (d₁, d₂) 72; (e₁, e₂) 75, (f₁, f₂) 77; (g₁, g₂) 80; (h₁, h₂) 85; (i₁, i₂) 90

增加,位错密度增加,形变晶胞的不均匀性加大,晶粒间有大颗粒的第二相粒子存在。当变形量大于 70% 时,形变不均匀性更加明显,有大颗粒、不规则形状的第二相粒子呈方向性分布。变形量大于

70% 时,晶粒更加细化,变形不均匀性明显,变形大的晶粒间形成一定角度位错墙,有不规则形状的第二相粒子存在,晶内析出的第二相粒子数量少,且有破碎的迹象;在晶界处聚集第二相粒子。

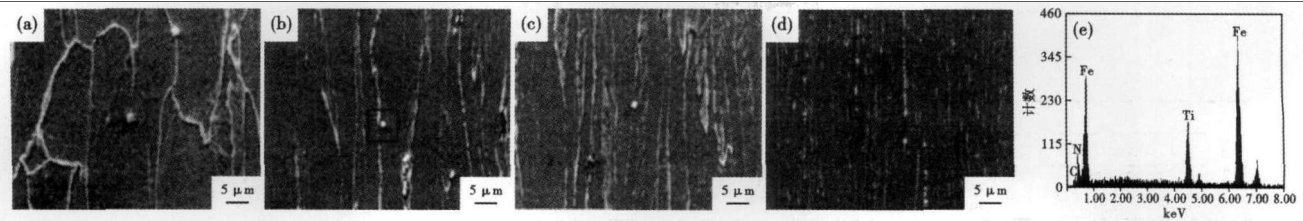


图 3 Nb-Ti 微合金化 IF 钢中第二相形貌(a) ~ (d) 和能谱分析(e), SEM; 变形量/% - (a)40; (b)75; (c)77; (d)90

Fig. 3 Morphology of second phase in Nb-Ti microalloying IF steel (a) ~ (d) and energy spectrum analysis (e), SEM, deformation /% - (a) 40; (b) 75; (c) 77; (d) 90

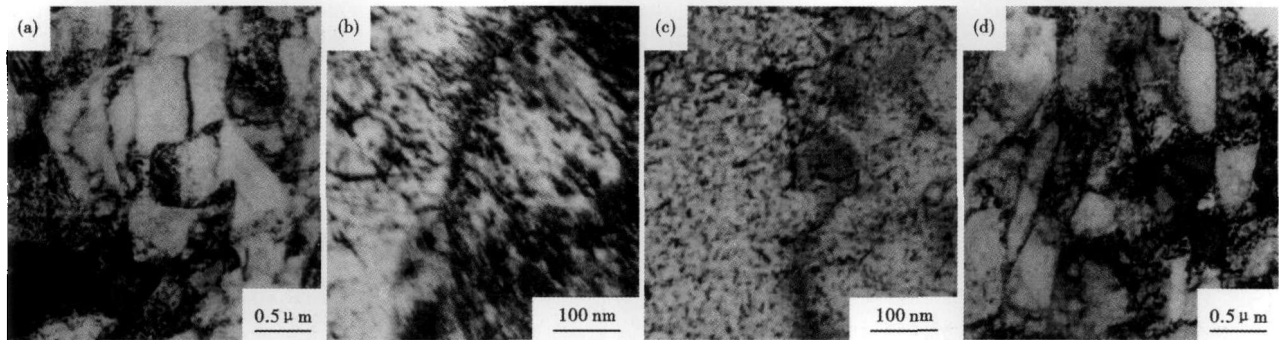


图 4 80% 冷轧变形 Nb-Ti 微合金化 IF 钢板的组织形貌, TEM: (a) 细小的亚晶; (b) 高密度位错; (c) 位错与第二相; (d) 不均匀变形的条形亚晶

Fig. 4 Morphology of structure of Nb-Ti microalloying IF steel cold-rolling-deformed by 80%, TEM: (a) fine sub-grain; (b) high density dislocation; (c) dislocation and second phase particles; (d) inhomogeneous-deformed lath sub-grain

2.2 冷轧变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢硬度、强度和塑性的影响

从图 5(a) 可以看到, 随着变形量的增加, 平均硬度值的总趋势增加。其中变形量的 60% ~ 65% 硬度增加速度最快, 65% ~ 77% 硬度值变化不大, 77% ~ 80% 硬度又开始增加。

随着变形量的增加, 屈服强度增加(图 5b)。从图 5(b) 中可以看到, 横向的屈服强度最高, 当变形量小于 50% 时, 45° 方向的屈服强度高于轧向的屈服强度, 当变形量大于 50% 时, 轧向的屈服强度高

于 45° 方向的屈服强度。变形量为 75% 时, 轧向的屈服强度出现较低值, 变形量为 77% 时, 45° 方向的屈服强度出现较低值。随着变形量的增加, 抗拉强度增加(图 5c)。从图 5(c) 可以看到, 横向的抗拉强度最高, 当变形量小于 74% 时, 45° 方向的抗拉强度高于轧向的抗拉强度, 当变形量大于 74% 时, 轧向的抗拉强度高于 45° 方向的抗拉强度。

随着变形量的增加, 3 个方向的屈服比都集中在 0.9 ~ 1.0 (图 6a), 其中纵向方向上变形量为 75% 和 45° 方向变形量为 77% 时出现了屈服强度低

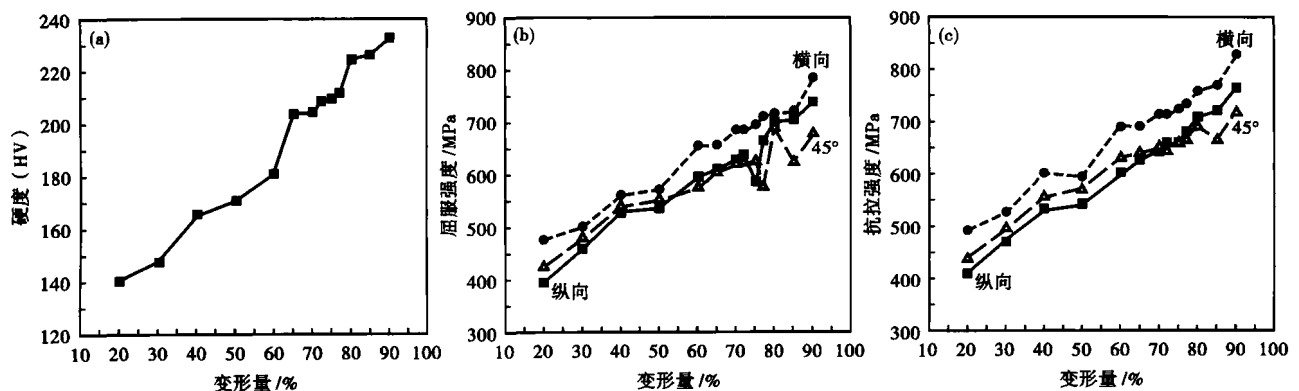


图 5 冷轧变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢硬度(a)、屈服强度(b)和抗拉强度(c)的影响

Fig. 5 Effect of cold-rolling deformation on hardness (a), yield strength (b) and tensile strength (c) of Nb-Ti microalloying IF steel

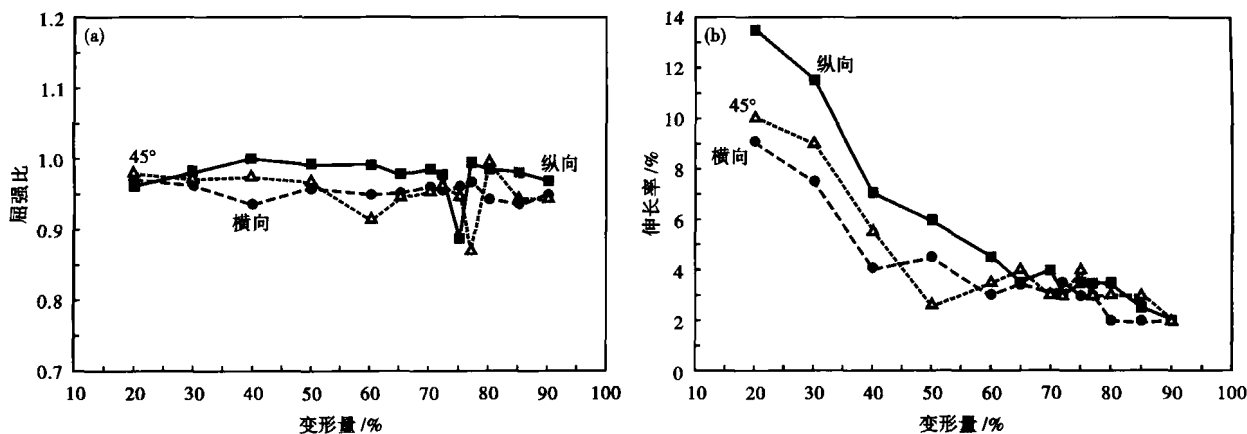


图 6 变形量对 Nb-Ti 微合金化 IF 钢屈服比(a)和伸长率(b)的影响

Fig. 6 Effect of cold-rolling deformation on yield strength-tensile strength ratio (a) and elongation (b) of Nb-Ti microalloying IF steel

谷。在钢板的成型性能评价指标中,屈服比越低,则钢板的成型性好,形状稳定。所以钢板的变形量在 75% ~ 77% 可获得好的成型性能。随着变形量的增加,3 个方向的伸长率均减小(图 6b)。从图 6(b)中可以看出,轧向的伸长率最高。变形量在 20% ~ 50% 的伸长率下降速率大于变形量 60% ~ 90% 的伸长率。

加工硬化是经过冷加工后金属的硬度、屈服强度、抗拉强度明显增加而塑性却下降的一种现象,它是由于位错运动受阻所造成的,即位错塞积、缠结及其相互作用,阻止了位错的进一步运动。在 IF 钢板中,评价钢板的成型性能指标中,屈服强度越小,成型性能越好,抗拉强度越大,变形抗力越大,成型性能好,屈服比越小,成型性越好、形状稳定。通过上述实验可以得出,75% 和 77% 变形量的综合力学性能最佳。

3 结论

(1) IF 钢的纵向及横向组织随冷轧变形量的增加,组织变形程度增大,且纵向试样上的晶粒变形程度要比横向试样上的变形程度大。纵向变形量大于 70% 时,组织出现纤维状,随变形量的增大,纤维状组织明显。横向随变形量的增加,晶粒的饼形程度增加,组织趋于均匀。随变形量的增加,TiN 颗粒由晶内位置逐渐向大变形量的纤维状组织晶界处移动。

(2) 随变形量的增加,IF 钢板平均硬度值,屈服强度、抗拉强度均增加,其中横向屈服强度、抗拉强度最高,当变形量小于 50% 时,45° 方向的屈服强度高于轧向的屈服强度;当变形量大于 50% 时,轧向

的屈服强度高于 45° 方向的屈服强度。变形量为 75% 时,轧向的屈服强度出现较低值,变形量为 77% 时,45° 方向的屈服强度出现较低值。当变形量小于 74% 时,45° 方向的抗拉强度高于轧向的抗拉强度,当变形量大于 74% 时,轧向的抗拉强度高于 45° 方向的抗拉强度。随着变形量的增加,伸长率均减小,轧向的伸长率最高。3 个方向的屈服比都集中在 0.9 ~ 1.0,其中纵向变形量为 75% 和 45° 方向变形量为 77% 时出现屈服强度低谷,因此造成在该变形量下的屈服比低谷。

(3) 冷轧变形量与性能有密切的关系,该 IF 钢的变形量在 75% 及 77% 可获得较好的综合力学性能。

参考文献

- 1 王敏莉,郑之旺. 冷轧变形量对 IF 钢组织结构和性能的影响. 钢铁钒钛, 2009, 30(4): 32
- 2 徐清亮,林大为,王 森,等. 冷轧高强 IF 钢再结晶温度的测定. 金属热处理, 2007, 32(10): 14
- 3 苏琪琦,林大为,王 森,等. 冷轧变形量对高强度 IF 钢再结晶温度和力学性能的影响. 上海金属, 2009, 31(2): 53
- 4 王昭东,李自刚. 冷轧变形量对铁素体区热轧 Ti-IF 钢冷轧板的再结晶结构特点和深冲性能的影响. 金属学报, 2000, 36(6): 613
- 5 郑之旺,刘庆春. 冷轧变形量对连续退火 Ti-IF 钢组织和结构的影响. 钢铁钒钛, 2010, 31(1): 40
- 6 Saha Rajib, Ray R K. Formation of Nano-to Ultrafine Grains in a Severely Cold Rolled Interstitial Free Steel. Materials Science and Engineering A 2007, 459: 223

冯岩青(1977-),女,博士研究生,工程师,板材产品研发。

收稿日期: 2011-08-15