

文章编号:1000-582X(2012)07-072-05

## 氮含量对 SWRH82B 盘条组织和性能的影响

盛光敏<sup>1</sup>, 吴莉莉<sup>1</sup>, 邓永强<sup>1</sup>, 魏福龙<sup>2</sup>, 李正嵩<sup>2</sup>, 张东升<sup>2</sup>, 杨茂麟<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 水城钢铁(集团)有限责任公司, 贵州 六盘水 553028)

**摘要:** 为了研究不同含氮量的 SWRH82B 盘条在组织和性能等方面的差异, 利用液压万能试验机对盘条进行拉伸试验, 利用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察盘条的微观组织、拉伸断口及第二相析出情况。结果表明: 增氮使索氏体组织的层片间距更细小; 增加  $1.38 \times 10^{-4}$  的氮可使盘条的屈服强度提高 8 MPa、抗拉强度提高 28 MPa、延伸率降低 1.8%、断面收缩率降低 5.8%; 高氮盘条比低氮盘条的拉伸断口上有更多的夹杂物; 高氮盘条中的析出物更多且分布较弥散, 析出物主要集中在位错线或原奥氏体晶界上, 经标定, 析出物中含有细小的 V(C,N) 颗粒。

**关键词:** 盘条; 组织; 力学性能; 拉伸断口; 第二相

**中图分类号:** TG142.1

**文献标志码:** A

## Effect of nitrogen on microstructure and properties of SWRH82B wire rod

SHENG Guangmin<sup>1</sup>, WU Lili<sup>1</sup>, DENG Yongqiang<sup>1</sup>, WEI Fulong<sup>2</sup>,  
LI Zhengsong<sup>2</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>2</sup>, YANG Maolin<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Shuicheng Iron & Steel (Group) Co. Ltd., Liupanshui, Guizhou 553028, China)

**Abstract:** The microstructure, mechanical properties, tensile fractures and the precipitation of the second phase of vanadium microalloyed wire rods with different nitrogen contents are studied by hydraulic universal testing machine, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that the interlamellar spacing of pearlite is smaller in high nitrogen steel; the high nitrogen steel has higher yield strength, tensile strength and lower elongation and reduction of area; there are more inclusions on the tensile fracture surfaces of the high nitrogen steel; and in high nitrogen steel, the size of precipitation, mainly precipitating at dislocation or the boundary of austenite, is finer than that of low nitrogen steel, what is more, fine V(C,N) particles are concluded in the precipitations.

**Key words:** wire rod; microstructure; mechanical properties; tensile fractures; second phase

高强度低松弛预应力钢丝、钢绞线在公路、铁路、高层建筑、桥梁、核电站、水泥制品等领域都有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>, SWRH82B 盘条作为一种生产高强度预应力钢丝的原材料<sup>[5]</sup>, 其质量直接关系到盘条

的后续拉拔性能和成品钢丝的使用性能。

SWRH82B 盘条要求具有高的强度、良好的塑形, 为了达到高的强度, 盘条含碳量一般为 0.80%~0.85%, 为了具有良好的塑性, 盘条的金相组织中索

收稿日期: 2012-02-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAE16B00)

作者简介: 盛光敏(1958-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事金属材料表面纳米化技术及其应用等研究,  
(Tel)023-65103045; (E-mail)gmshe@cqu.edu.cn.

氏体体积分数应达到 85% 之上。由于生产高碳钢盘条过程中易出现中心偏析<sup>[6]</sup>问题,严重影响着盘条的后续拉拔生产<sup>[7]</sup>,因此不能为了提高强度而一味地提高含碳量。微合金化盘条在不太影响材料塑性的情况下能够显著提高材料强度,因此实际生产中通常都添加 Nb、V、Ti 等中的一种或几种合金元素<sup>[8-10]</sup>。氮比碳元素更易与合金元素形成化合物,是一种十分有效的强化元素,氮的适当加入会提高合金元素的利用率<sup>[11-12]</sup>,但目前为止,SWRH82B 钢中合金元素与氮的相互作用研究甚少。笔者通过研究两种含氮量不同的 SWRH82B 盘条微观组织、力学性能、常温拉伸断口及第二相析出情况等方面差异,分析氮对钒微合金化高碳钢盘条性能的影响机制。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用钢由国内某钢厂提供,两种不同含氮量的直径为 12.5 mm 的 SWRH82B 盘条化学成分(质量分数)见表 1,其中两种盘条的氮含量由 TC-436 型氧氮分析仪测定。

元素	低氮钢	高氮钢
C	0.80	0.80
Si	0.23	0.205
Mn	0.81	0.853
P	0.018	0.022
S	0.007	0.006
Cr	0.276	0.276
V	0.046	0.054
N	0.003 8	0.017 6

### 1.2 试验方法

低氮和高氮盘条校直后,沿直径截取 12 mm 长的一段作为试样,磨制抛光腐蚀后用 SEM 观察微观组织;为检验两种不同含氮量的盘条常温力学性能的不同,进行了常温拉伸实验,测定了两种盘条的屈服强度、抗拉强度、延伸率及断面收缩率,并用 SEM 对盘条断口进行了观察;为检测含氮量不同是否影响第二相的析出,采用 Tecnai-20 型透射电子显微镜进行观察,并对电子衍射斑点进行了标定。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 微观组织

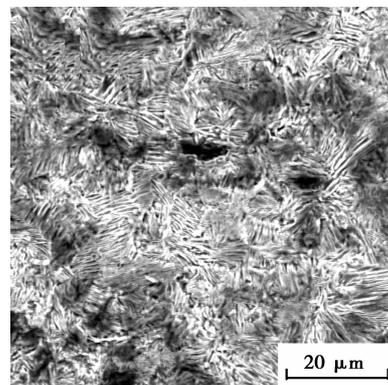
根据国家标准 YB/T 146—1998 规定,盘条的金相组织应主要为索氏体组织,不应有马氏体、网状

渗碳体及对性能有害的组织。试验钢的金相组织见图 1,由图可见,试验用钢的微观组织主要为层片状的珠光体类型组织,根据测量的层片间距结果,得知其大多为索氏体组织,并且高氮盘条的索氏体层片间距略比低氮盘条的小,这主要是因为氮含量的增加提高了钒的利用率,形成了更多的第二相质点,阻止了碳的长程扩散。由于盘条的主要组织为索氏体,其片层间距对试验钢的强度起着重要影响,根据文献<sup>[13]</sup>可知:

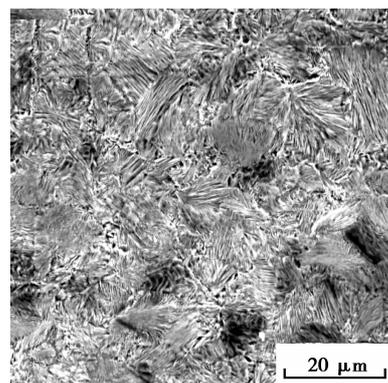
$$\sigma_s = (\sigma_0 + k_\gamma / 1.41) \times S_0^{-1/2},$$

$$\sigma_{0.2} = 26.9 - 6.11 g(S_0),$$

式中: $S_0$  为珠光体组织片层间距,Å; $k_\gamma$  为系数,MPa/Å<sup>-1/2</sup>; $\sigma_s$ 、 $\sigma_{0.2}$  为材料的屈服强度,MPa; $\sigma_0$  为纯铁的屈服强度,MPa。



(a) 低氮盘条



(b) 高氮盘条

图 1 盘条金相组织

索氏体变形主要是靠铁素体中位错的滑移,索氏体片层间距越小,位错的可滑移距离就越短,另外碳化物对位错的运动又有一定的阻碍作用,因此位错运动的阻力增加,由此可知片层间距  $S_0$  越小,材料的屈服强度越高,抗拉强度也越高。由于高氮盘条的片层间距更小,因此,理论上分析高氮盘条的屈服强度和抗拉强度应比低氮盘条高。

## 2.2 力学性能

根据 GB/T 228-200×对盘条进行常温拉伸实验,每组取 4 个试样,两种盘条的一些基本力学性能指标如表 2 所示。

高氮盘条比低氮盘条增加了  $1.38 \times 10^{-4}$  的氮,由表 2 可知,高氮盘条的屈服强度提高了 8 MPa、抗拉强度提高了 28 MPa,这也验证了由图 1 得到的结论,但盘条的延伸率和断面收缩率分别降低了 1.80% 和 5.77%,即增加含氮量提高了盘条的强度但降低了其塑性。理论上分析这主要是由于材料中增氮产生了更多的第二相颗粒,它的存在破坏了基体的连续性,并且使周围点阵产生畸变,影响了材料的塑性。含碳量的稍微差异对处于过共析成分盘条的组织性能都会有较大的影响,因此为了不产生异常组织同时在保证材料力学性能的情况下,可采取增加适量的氮来提高材料的强度。

表 2 两种盘条的力学性能

编号	屈服强度	抗拉强度	延伸率	断面收缩率
	/MPa	/MPa	/%	/%
1-1	797	1 181	15.9	28.7
1-2	802	1 194	15.2	28.2
低氮 1-3	794	1 185	15.7	28.0
1-4	805	1 191	14.9	28.7
平均	800	1 188	15.4	28.4
2-1	791	1 219	13.4	23.3
2-2	797	1 199	13.0	21.7
高氮 2-3	819	1 220	14.0	23.1
2-4	824	1 225	14.0	22.5
平均	808	1 216	13.6	22.7

## 2.3 拉伸断口

宏观观察低氮和高氮两种盘条的拉伸断口,均属于韧性断裂,宏观断口呈杯锥形,由纤维区、放射区和剪切唇三个区域组成,即断口特征三要素。图 2 和图 3 分别是低氮盘条和高氮盘条的宏观形貌(a)和韧窝形貌(b)。由图 2 和图 3 中的(a)图可看出,高氮盘条表面夹杂物明显比低氮盘条的多。两种盘条断口的微观形貌均由韧窝和准解理形貌组成,纤维区主要对应材料的塑性变形区,即图 2 和图 3 中的(b)图显示的微孔聚集断裂,它是塑性变形进行到一定程度后产生的第二相质点破裂或第二相与基体脱离形成的。韧窝的大小决定于第二相质点

的大小和密度、基体材料的塑性变形能力和应变硬化指数,以及外加应力的的大小和形态等<sup>[14]</sup>,图 3(b)明显比图 2(b)中的韧窝尺寸更小,这也从一方面说明了高氮盘条中第二相析出物的尺寸比低氮盘条中的更小。盘条中增氮提高了铁素体的过饱和度,使碳氮化物迅速生核,在钢奥氏体温度区间内通过控制轧制过程,可使应变诱导沉淀析出的第二相颗粒尺寸明显细化,产生较大的沉淀强化效果<sup>[15]</sup>。

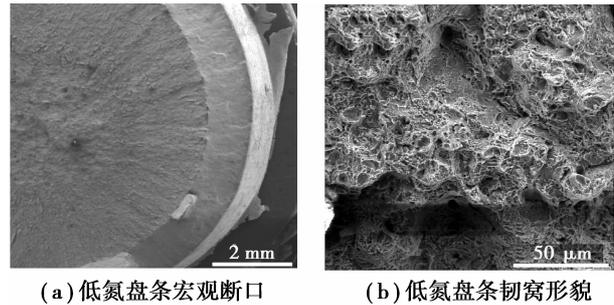


图 2 低氮盘条拉伸断口

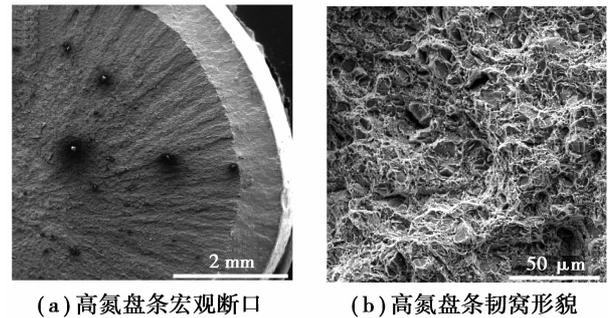


图 3 高氮盘条拉伸断口

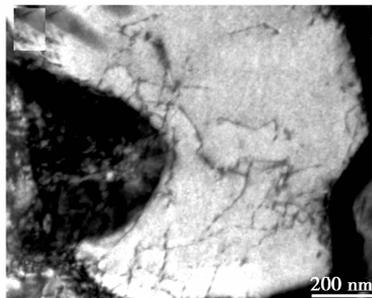
## 2.4 第二相析出

合金化钢通常利用第二相析出来产生强化作用,可动位错与第二相质点有两种作用机制:位错切过机制;位错绕过质点并留下位错环的 Orowan 机制。钢中的强化机制主要是 Orowan 机制,位错遇到第二相颗粒时,将受到粒子的阻挡而弯曲,从而使位错的线张力增大,需要更大的外加应力才能使位错绕过第二相颗粒,因此会提高材料的强度。屈服强度  $R_{YS}$  与第二相的体积分数  $f$  和颗粒尺寸  $d$  的关系为<sup>[16]</sup>:

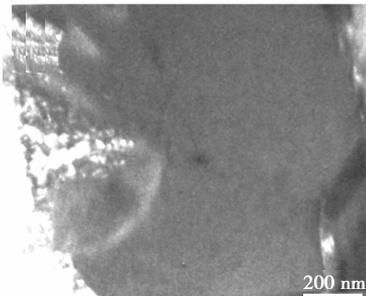
$$R_{YS} \propto f^{1/2} \cdot d^{-1} \cdot \ln d。$$

由此式可见第二相颗粒越细小,所占的体积分数越大对材料强度的提高越有利。由于暗场像中明亮色质点与明场像中的第二相质点对应,因此从图 4 和图 5 中的明暗场像可看出,高氮盘条中析出的第二相很多且分布较弥散,所占体积分数较大,经过

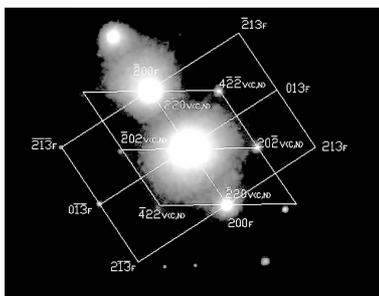
粗略测量,低氮盘条中析出物尺寸在10~40 nm之间,高氮盘条中大多析出物尺寸位于5~40 nm之间,但有个别析出物尺寸较大为70~100 nm。第二相析出不仅能起到沉淀强化作用,而且在轧后的冷却阶段还能够通过阻碍晶界的迁移来控制晶粒的长大过程使晶粒细化,细化晶粒能够同时提高材料的强度和塑性,因此盘条生产时应严格控制第二相析出物的尺寸大小,使其在不太影响材料塑性的情况下提高材料的强度。由图4(b)和图5(b)中的白亮第二相质点可知,低氮和高氮盘条中的析出物形状主要是对材料塑性影响最小的球形。总之,为了使析出的第二相起到最好的效果,第二相应具有不大的体积分数、细小的颗粒尺寸、均匀的分及较圆滑的形状等特点。



(a) 低氮盘条明场像

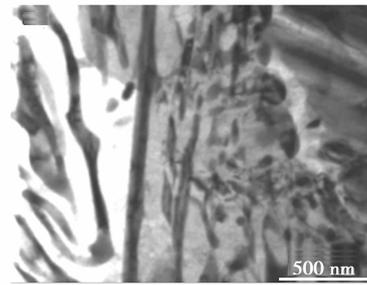


(b) 低氮盘条暗场像

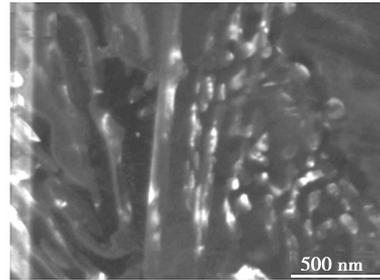


(c) 标定结果

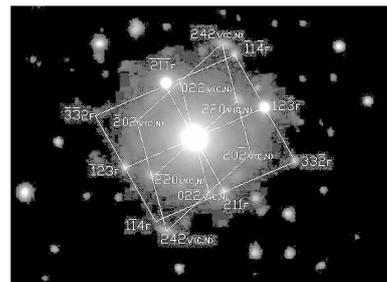
图4 低氮盘条透射电镜图片



(a) 高氮盘条明场像



(b) 高氮盘条暗场像



(c) 标定结果

图5 高氮盘条透射电镜图片

由于氮是含钒微合金钢中一种十分有效的合金元素,氮比碳更容易与钒结合生成VN,同时氮与碳也可共同与钒作用生成V(C,N),在碳氮共同存在的情况下,析出物主要以V(C,N)形式出现。衍射斑点标定的结果也验证了高氮低氮盘条的第二相析出物中均含有V(C,N)颗粒。钢中增氮,明显促进了碳氮化物的析出,大大提高了钒的利用率,同时由于第二相的析出,明显提高了钢的强度。另外,由于盘条中S含量很低,第一类析出很少,因此,第二相颗粒主要析出在奥氏体晶界和位错线上<sup>[17]</sup>,这是因为这些地方为第二相颗粒的形核长大提供了有利的结构起伏和能量起伏的条件。图4及图5也验证了这点,图4中析出物主要分布在铁素体上的位错线上,图5中析出物主要位于原奥氏体晶界上,即现在的铁素体和渗碳体相界面上。

### 3 结 论

1) 高氮盘条和低氮盘条在微观组织上未见有明显差异, 但高氮盘条索氏体的层片间距略比低氮盘条小。

2) 增加  $1.38 \times 10^{-4}$  的氮使盘条的屈服强度提高 8 MPa、抗拉强度提高 28 MPa、延伸率降低 1.8%、断面收缩率降低 5.8%, 高碳钢盘条中增氮的强化效果虽不如低碳钢或非调质钢中增氮那样显著, 但对于避免盘条生产中出现的偏析或异常组织等问题有一定作用。

3) 高氮盘条拉伸断口比低氮盘条断口上有更多的夹杂物, 并且高氮盘条里的第二相质点密度更大, 尺寸更小。

4) 经透射电镜观察, 高氮盘条中的析出物更多且尺寸更细小, 析出相中有细小的 V(C,N) 颗粒, 并且, 析出物主要集中析出在位错线上或原奥氏体晶界上。

#### 参考文献:

- [1] Sychkov A B, Zhigarev M A, Perchatkin A V, et al. High-carbon wire rod made of high-chromium steel[J]. Metallurgist, 2006, 50(3/4):183-188.
- [2] Zhang J Q, Liang Y L, Xiang S, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of SWRS82B wire rod [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101:752-755.
- [3] Carneiro filho C J, Mansur M B, Modenesi P J, et al. The effect of hydrogen release at room temperature on the ductility of steel wire rods for pre-stressed concrete [J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527(18/19): 4947-4952.
- [4] Sychkov A B, Zhigarev M A, Zhukova S Y, et al. Production of wire rod for high-strength reinforcing cord [J]. Steel in Translation, 2010, 40(1):78-81.
- [5] Liang Y L, Xiang S, Yang M, et al. Effect of the interlamellar spacing on mechanical properties of SWRS82B wire rod before and after drawing [J]. Advanced Materials Research, 2011 (146/147): 374-377.
- [6] Sychkov A B, Zhigarev M A, Zhukova S Y, et al. Effect of dendritic segregation in the continuous-cast semifinished product on the formation of the structure of high-carbon-steel wire rod [J]. Metallurgist, 2008, 52(5/6): 275-282.
- [7] Komori K. Evolution of void volume fraction for simulating inner fracture defects related to in drawing of high-carbon steel wire rods [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2008, 50(2): 157-166.
- [8] Jorge badiola D, Iza mendia A, López B, et al. Role of vanadium microalloying in austenite conditioning and pearlite microstructure in thermomechanically processed eutectoid steels [J]. ISIJ International, 2009, 49(10): 1615-1623.
- [9] Bang K S, PARK C, LIU S. Effects of nitrogen content and weld cooling time on the simulated heat-affected zone toughness in a Ti-containing steel [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(18): 5994-6000.
- [10] Chanda T. Reverse ageing in hot-rolled high-carbon steel wire rod [J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(22): 6068-6074.
- [11] Fang F, Yong Q L, Yang C F, et al. Microstructure and precipitation behavior in HAZ of V and Ti microalloyed steel [J]. International Journal of Iron and Steel Research, 2009, 16(3): 68-72.
- [12] Mackenzie M, Craven A J, Collins C L. Nanoanalysis of very fine VN precipitates in steel [J]. Scripta Materialia, 2006, 54(1): 1-5.
- [13] Korchynsky M. Microalloyed high-carbon wire rod [J]. International Wire Journal, 1988: 25-32.
- [14] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [15] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [16] Orowan E. Zur kristall plastizität[J]. Zeitschrift Fur Physik, 1934, 89:605.
- [17] 方芳, 雍岐龙, 杨才福, 等. 含钒微合金钢的析出行为研究[J]. 钢铁, 2010, 45(3): 66-69.
- FANG Fang, YONG Qilong, YANG Caifu, et al. Precipitation behavior in vanadium micro-alloyed steel[J]. Iron and Steel, 2010, 45(3): 66-69.

(编辑 王维朗)