

## 氮含量对 500E 抗震钢筋 20MnVN 组织和性能的影响

李宝秀<sup>1,2</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

**摘要** 研究的  $\Phi 6.5$  mm 500E 抗震钢筋 20MnVN (C: 0.19 ~ 0.20, Si: 0.23 ~ 0.26, Mn: 1.26 ~ 1.31, N: 0.016 ~ 0.023, P: 0.006 ~ 0.012, S: 0.10 ~ 0.11, Nb: 0.0038 ~ 0.0163) 的生产流程为 50 t 顶底复吹转炉-LF-160 mm  $\times$  160 mm 方坯连铸-控轧控冷工艺。结果表明, 随着钢中氮含量增加, 500E 20MnVN 钢盘条拉伸断口的韧窝变深, 口径增大, 组织中 ferrite 含量由 63.6% 增加至 74.8%; 增加氮含量有助于 20MnVN 钢盘条屈服强度、抗拉强度和伸长率的提高, 当氮含量由 0.0038% 增加到 0.0163% 时, 该钢屈服强度、抗拉强度和伸长率分别由 513 MPa、650 MPa 和 10.5% 提高到 571 MPa、703 MPa 和 13.0%。分析了 V-N 微合金化和 V(C, N) 析出的强韧化机理。

**关键词** 500E 抗震钢筋 20MnVN 氮 V(C, N) 析出强化 力学性能

## Effect of Nitrogen Content on Structure and Mechanical Properties of 500E Anti-Quake Reinforced Bar Steel 20MnVN

Li Baoxiu<sup>1,2</sup>

(1 Technology Center, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;  
2 Hebei Engineering and Technology Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

**Abstract** The production flowsheet for studied  $\Phi 6.5$  mm 500E anti-quake reinforced bar steel 20MnVN (C: 0.19 ~ 0.20, Si: 0.23 ~ 0.26, Mn: 1.26 ~ 1.31, N: 0.016 ~ 0.023, P: 0.006 ~ 0.012, S: 0.10 ~ 0.11, Nb: 0.0038 ~ 0.0163) is 50 t top and bottom combined blowing converter-LF-160 mm  $\times$  160 mm billet casting-rod control rolling and control cooling process. The results show that with increasing the nitrogen content in steel, the tough dimples of tensile fracture of 500E 20MnVN steel coil become deeper and their diameters become larger, and the ferrite content in structure increases from 63.6% to 74.8%; increasing nitrogen content is available to increase the yield strength, tensile strength and elongation of 20MnVN steel coil, and with increasing the nitrogen content in steel from 0.0038% to 0.0163%, the yield strength, tensile strength and elongation of steel increases respectively from 513 MPa, 650 MPa and 10.5% to 571 MPa, 703 MPa and 13.0%. The V-N microalloying and V(C, N) precipitated strengthening-toughening mechanism is analyzed.

**Material Index** 500E Anti-Quake Reinforced Bar Steel 20MnVN, Nitrogen, V(C, N) Precipitated Strengthening, Mechanical Properties

具有高强度和良好焊接性能的 500 MPa 抗震钢筋的开发对提高大型建筑物的安全性具有重要意义<sup>[1]</sup>。近年来, 随着国内外对低碳钒氮微合金化钢的研究工作不断深入, 钒作为常用微合金化元素, 并结合控轧控冷工艺, 通过细晶强化和第二相沉淀析出强化使钢的强韧性匹配得到明显改善<sup>[2]</sup>。本文将钒-氮微合金化技术应用在  $\Phi 6.5$  mm 规格 20MnVN 抗震钢筋 500E 中, 在 V 元素和其他化学成分含量基本相同的前提下, 研究不同氮含量对试验盘条组织和性能的影响, 为 20MnVN 抗震钢筋 500E 的开发提供参考。

### 1 试验材料和方法

20MnVN 抗震钢筋 500E 的生产流程为: 高炉铁水 + 废钢  $\rightarrow$  50 t 顶底复吹转炉冶炼  $\rightarrow$  50 t LF 精炼  $\rightarrow$  四机四流小方坯连铸 (160 mm  $\times$  160 mm)  $\rightarrow$  铸坯热

送热装  $\rightarrow$  步进梁式加热炉加热  $\rightarrow$  高速线材控轧控冷轧制  $\rightarrow$  检验  $\rightarrow$  入库。其中为保证氮含量控制在目标范围, 采取在转炉冶炼和 LF 精炼工序多次加入氮化锰铁并多次取样、分析的手段, 确保了氮含量的有效控制。轧制过程主要工艺参数见表 1。

试验所采用钢坯的熔炼成分见表 2, 可见基本成分 (%) 为 0.19C-0.24Si-1.3Mn-0.11V, 大致相同, 1# 钢的氮含量为 0.0038%, 2# 钢增加氮含量至 0.0091%, 3# 钢在 2# 钢的基础上进一步增加氮含量至 0.0163%。

表 1  $\Phi 6.5$  mm 钢筋轧制过程主要工艺参数

Table 1 Main technology parameters of rolling process for  $\Phi 6.5$  mm reinforcing steel bar

均热段 温度/°C	进精轧 温度/°C	吐丝 温度/°C	风机 状态	保温罩 状态	辊道速度/ (m $\cdot$ s <sup>-1</sup> )
1 120 $\pm$ 10	820 $\pm$ 15	900 $\pm$ 15	关闭	关闭	2.5

表 2 试验 20MnVN 钢的化学成分/%

试样	C	Si	Mn	P	S	V	N
1	0.20	0.23	1.31	0.016	0.006	0.11	0.003 8
2	0.19	0.26	1.26	0.026	0.012	0.10	0.009 1
3	0.19	0.24	1.28	0.023	0.009	0.11	0.016 3

将试验钢坯送入加热炉加热后先后经过粗轧、中轧和精轧轧制成  $\Phi 6.5$  mm 的热轧盘条, 利用 WDW50 微机电子万能试验机对试验盘条进行力学性能测试, 利用日本电子 JSM-5610LV 电子显微镜进行拉伸断口形貌分析, 利用 Leica DM2700M 光学显微镜(OM)进行显微金相组织观察。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同氮含量下力学性能对比

不同氮含量下的 20MnVN 盘条的力学性能检测结果见表 3。由表 3 可见, 随钢中氮含量增加, 钢的屈服强度、抗拉强度和平均伸长率均有所升高, 当钢中氮含量由 0.003 8% 提高至 0.016 3% 时 20MnVN 钢中  $\Phi 6.5$  mm 盘条的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别从 513 MPa、650 MPa 和 10.5% 提高到 571 MPa、703 MPa 和 13.0%; 氮含量由 0.003 8% 增加至 0.009 1% 时, 屈强比未发生变化, 均为 1.26, 但当氮含量进一步增加到 0.016 3% 时, 屈强比由 1.26 降至 1.23。说明氮含量由 0.009 1% 增加至 0.016 3% 时, 抗拉强度的绝对增量小于屈服强度的绝对增量。

表 3  $\Phi 6.5$  mm 试验 20MnVN 钢 N 含量对力学性能的影响  
Table 3 Effect of N content in steel on mechanical properties of  $\Phi 6.5$  mm tested steel 20MnVN

试样	N/ %	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈强比	平均伸长 率/%
1	0.003 8	513	650	1.26	10.5
2	0.009 1	546	685	1.26	11.5
3	0.016 3	571	703	1.23	13.0

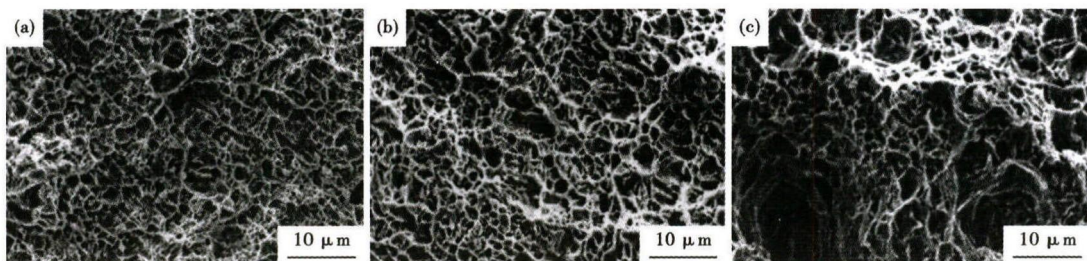
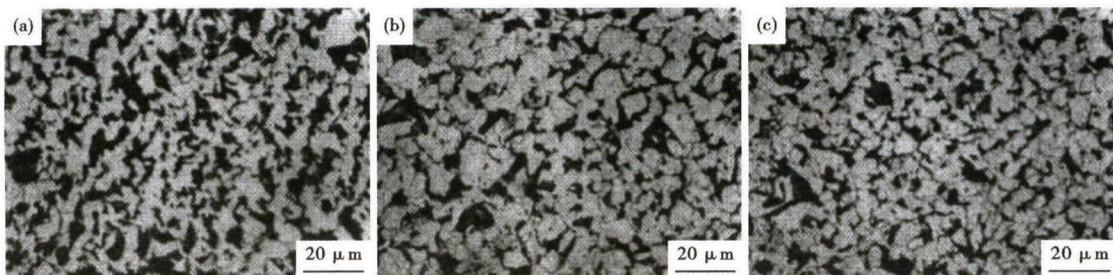
屈服强度和抗拉强度升高的同时平均伸长率升高, 说明盘条的强度增加的同时, 塑性指标不仅没有降低, 反而得到了提高。

### 2.2 不同氮含量下拉伸断口形貌对比

不同氮含量下 20MnVN 盘条拉伸断口的形貌如图 1。可见不同氮含量下该钢种的拉伸断口形貌均为韧窝断裂。但在不同氮含量下, 韧窝的大小和深度存在差异。随着氮含量的增加, 韧窝口径逐步变大, 深度逐渐增加, 且撕裂痕逐渐明显。

### 2.3 不同氮含量下显微组织对比

不同氮含量下 20MnVN 盘条的显微组织如图 2。可见不同氮含量条件下该钢种的显微组织均为铁素体 + 珠光体。但在不同氮含量条件下, 钢的铁素体所占百分比存在差异。试验钢 1 的显微组织中铁素体含量较试验钢 2 和试验钢 3 的铁素体含量少, 利用 Image pro plus 软件进行处理, 其铁素体占整个视野面积的比例分别为 63.6%、72.9% 和 74.8%。推测, 随氮含量的增加, 有利于试验钢铁素

图 1  $\Phi 6.5$  mm 试验 20MnVN 钢的拉伸断口形貌: (a) 0.003 8% N; (b) 0.009 1% N; (c) 0.016 3% NFig. 1 Morphology of tensile fracture of  $\Phi 6.5$  mm tested steel 20MnVN: (a) 0.003 8% N; (b) 0.009 1% N and (c) 0.016 3% N图 2  $\Phi 6.5$  mm 试验 20MnVN 钢盘条的组织形貌: (a) 0.003 8% N; (b) 0.009 1% N; (c) 0.016 3% NFig. 2 Morphology of structure of  $\Phi 6.5$  mm tested steel 20MnVN coil: (a) 0.003 8% N; (b) 0.009 1% N and (c) 0.016 3% N

体的形成。同时在试验钢 2 和试验钢 3 的铁素体基体上出现大量的 V(C,N)析出相。

### 2.4 讨论

钒、氮微合金化,是提高试验钢晶粒细化和沉淀强化作用的有效途径。当氮含量增加至 0.016 3% 时,奥氏体中析出的 V(C,N)驱动力增加,析出量增多,这些细小的析出相粒子在热轧过程中能够钉扎奥氏体晶界,从而抑制晶粒长大,细化奥氏体晶粒,而晶粒细化是既能提高韧性又能提高强度的强化方式<sup>[3]</sup>。除晶粒细化以外,由于钒在奥氏体中的溶解度比较高,可以在奥氏体转变成铁素体过程中或之后产生沉淀强化作用。

沉淀强化效果决定于沉淀颗粒的弥散程度,弥散程度越高,强化效果越好。兰纳伯格等认为,随氮含量的增加,析出相中碳氮组分发生明显变化,低氮的情况下,析出相以碳化钒为主,随氮含量增加析出相逐渐变化为以氮化钒为主,当钢中氮含量增加到 0.020 0% 时,在整个析出温度范围内,均是析出 VN 或富氮的 V(C,N)<sup>[4]</sup>。钢中碳、氮虽然都是间隙固溶原子,但氮化物比碳化物更稳定更细小,质点更稳定,从而解释了 20MnVN 钢随着氮含量增加,屈服强度和抗拉强度均有所升高。张永权的研究也认为与相同钒含量的 V 钢相比,VN 钢的抗拉强度和屈服强度都明显提高<sup>[5]</sup>。

对于氮含量为 0.003 8% 时,试验钢的钒大部分固溶于基体,只有少量的钒以 V(C,N)的形式析出,说明钒钢中的钒没有得到充分利用<sup>[6]</sup>。而随着试验钢中氮含量的增加,钢中的钒逐步演变为主要以 V(C,N)形式析出,晶粒细化和沉淀强化作用逐渐明显。同时由于氮含量增加,一部分碳能富集于 V(C,N)等  $\epsilon$  碳化物和碳氮化物之中,减少基体中碳含量,显微组织中铁素体量增加,提高了钢的韧性<sup>[7]</sup>。综合表现为,试验钢的强韧性指标 Agt 值升高,拉伸断口的韧窝变深,口径增大,出现明显的撕裂痕。

### 3 结论

(1) 增加氮含量有助于 20MnVN 盘条屈服强度、抗拉强度和平均伸长率的提高。

(2) 氮含量由 0.003 8% 增加到 0.016 3% 时,屈服强度由 513 MPa 增加到 571 MPa,抗拉强度由 650 MPa 增加到 703 MPa,平均伸长率由 10.5% 增加到 13.0%。

(3) 随着氮含量增加,轧制过程中析出的 V(C,N)颗粒起到钉扎奥氏体晶界,抑制晶粒长大的作用;部分碳富集于的 V(C,N)等  $\epsilon$  碳化物和碳氮化物之中,减少基体中碳含量,这是提高强韧性的主要原因。

(4) 随着钢中氮含量增加,20MnVN 盘条拉伸断口的韧窝变深,口径增大,出现明显的撕裂痕;显微组织中铁素体含量降低。

### 参考文献

- [1] 陈伟,施哲,赵宇. 钒微合金化控冷工艺生产 HRB500 抗震钢筋强化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1604-1609.
- [2] 尹桂全,黄贞益,杨才福,等. 氮含量和 TMCP 对微合金 V-N 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2008,33(3):4-8.
- [3] 胡筱旋,王瑞珍,周芸,等. 钒、氮含量对耐磨钢 NM400 组织及性能的影响[J]. 钢铁,2014,49(10):89-94.
- [4] 兰纳伯格 R. 钒在微合金化钢中的作用[M]. 杨才福,柳书平,张永权,译. 北京:钢铁研究总院结构材料研究所,2000:5-79.
- [5] 张永权,杨才福,柳书平. 钒氮微合金化钢筋的研究[J]. 钢铁钒钛,2000,21(3):12-15.
- [6] 杨才福,张永权,柳书平. 钒、氮微合金化钢筋的强化机制[J]. 钢铁,2001,36(5):55-78.
- [7] 杨庚蔚,雍岐龙,孙新军,等. 热处理工艺对 1500 MPa 级低碳 Nb-Ti 低合金钢组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(7):65-72.

李宝秀(1987-),女,硕士(2011 年东北大学),工程师,2009 年内蒙古科技大学(本科)毕业,微合金钢、纯铁线材开发。  
E-mail: xuelovec@163.com

收稿日期:2016-04-25

**欢迎订阅 2017 年《特殊钢》杂志**

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183      定价:16.00 元/期 96.00 元/年      邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社