

## 钒微合金化在热轧带肋钢筋中的强化机理研究

余 伟<sup>1</sup> 陈银莉<sup>2</sup> 陈雨来<sup>1</sup>

(1 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心,北京 100083; 2 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083)

**摘 要** 利用钒氮合金和钒铁合金进行合金化,并研究了钒对热轧带肋钢筋(0.21%~0.23% C、1.33%~1.50% Mn)组织和性能的作用机理。结果表明,采用钒铁合金化、钒氮合金化方法,使含 0.06% 钒钢筋分别达到 HRB400 级、HRB500 级钢筋的力学性能要求;同样钒含量,钒氮合金化的钢筋中析出比例比钒铁合金化高 83%~110%,钒氮合金化的钢筋沉淀强化作用比钒铁合金化更强,析出物以 V(CN)为主,VC 析出量少。钒氮合金化能使钢的室温组织更细小,但游离氮较多,时效现象将更加显著。

**关键词** 带肋钢筋 钒 析出物 强化机理

### A Study on Strengthening Mechanism of Vanadium Microalloyed Hot Rolled Rebar

Yu Wei<sup>1</sup>, Chen Yinli<sup>2</sup> and Chen Yulai<sup>1</sup>

(1 National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Institute of Metallurgy Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The strengthening mechanism of effect of vanadium on structure and properties of hot rolled rebar (0.21~0.23C, 1.33~1.50Mn) has been studied by alloying using V-N and ferrovanadium alloy. Results showed that the mechanical properties of 0.06V rebar were up to the requirement of HRB400 grade and HRB500 grade rebar with alloying respectively by using ferrovanadium alloy and V-N alloy; with same vanadium content, the ratio of precipitates in rebar alloyed by V-N alloy was by 83%~110% more than that alloyed by ferrovanadium. The precipitate strengthen effect in rebar alloyed by V-N was stronger than that in rebar alloyed by ferrovanadium alloy, and main precipitate was V(CN) with less VC. The structure of rebar alloyed by V-N alloy was finer and the steel rebar had plenty of free nitrogen with obviously ageing phenomena.

**Material Index** Rebar, Vanadium, Precipitates, Strengthening Mechanism

通常生产在 GB1449-1997 标注 HRB400 和 HRB500 级热轧带肋钢筋,都需要在钢种中加入不同含量的合金元素钒。加入钒合金的形式有采用加钒铁合金(FeV)和钒氮合金(VN);根据合金对强度的作用不同,采用不同的添加方式和添加量<sup>[1,2]</sup>。不同的钒合金添加方式对带肋钢筋中的组织夹杂物以及析出物的影响,为选择最优的加钒方式提供了有力的证据。这对于提高生产效率和改善产品的质量并满足我国建筑业大量用钢的需求有着重大意义。

#### 1 试验材料及方案

试验钢分 3 种,一种是常规的不含钒的 20MnSi,通常用于生产 HRB335 级钢筋;一种是钒铁合金进行合金化的 20MnSiV 钢,另一种是采取了钒氮合金化进行合金化处理的 20MnSiV 钢,20MnSiV 主要用于生产 HRB400 和 HRB500 级钢筋。试验钢中的钒含量在 0.054%~0.076%,采用试验钢坯轧制 Φ16 mm 和 Φ32 mm 两种规格的钢筋。具体化学成分见表 1。

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test steels /%

加钒工艺	C	Si	Mn	S	P	V	Al	N
无 V	0.21	0.44	1.34	0.027	0.025	≤0.010	0.003 2	0.006 1
钒铁	0.21	0.53	1.33	0.028	0.026	0.061	0.004 0	0.006 1
VN 合金	0.23	0.51	1.50	0.026	0.024	0.054	0.003 7	0.009 4

热轧工艺制度:加热温度 1 050~1 100 ℃,采用 20 机架的全连轧机组轧制,开轧温度 950~1 000 ℃,轧后穿水冷却,终轧水冷却出口温度约 750 ℃,然后经输送辊道上冷床冷却。

将冷却至室温的钢筋取拉伸试样、金相试样和析出物分析试样,分别进行拉伸试验、金相试验和析出物定量分析。

#### 2 试验结果

##### 2.1 力学性能

试验热轧钢筋的力学性能(表 2)可以看出:采用钒铁(FeV)和钒氮(VN)合金化钢筋的强度指标都有明显的上升,钒铁合金化的钢筋性能达到了

表2 热轧试验钢筋的平均力学性能

Table 2 Average mechanical properties of rolled test steels

工艺及标准	晶粒度/级	力学性能			
		$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_b/\sigma_s$	$\delta_{10}/\%$
无V	8.8~	405~	550~	1.37~	26~
	9.0	415	580	1.43	32
钒铁	8.7~	465~	617~	1.30~	20~
	9.4	485	637	1.36	26
VN合金	9.3~	510~	635~	1.23~	20~
	9.5	530	665	1.27	24
国标HRB400		≥400	≥570		≥14
国标HRB500		≥510	≥610		≥12

HRB400级,几乎相同钒含量的钒氮合金化钢筋性能达到HRB500级钢筋的要求;但是其伸长率和强屈比与无微合金化的HRB335级钢筋相比均有不同程度的下降。

将不同试验钢的强度进行比较,可以看出:两种含钒钢中尽管钒含量接近,但是不同的钒合金化方式对力学性能影响的差距却很大。钒铁合金化使钢筋屈服强度平均增加65 MPa,抗拉强度增加值为52 MPa,但是伸长率下降6%;每增加0.01%钒,钢筋的强度增加值约10 MPa。钒氮合金化使屈服强度的增加值在110 MPa,抗拉强度增加值为85 MPa,但是伸长率下降7%。钒氮合金化比钒铁合金化的屈服强度的提高作用高出近59%,对抗拉强度的提高作用高出近63%。

2.2 金相组织

对带肋钢筋进行金相分析后发现,室温组织的铁素体晶粒度级别在8.7以上。两种钒合金化方式都能够细化铁素体晶粒,从表2中不同试验钢的晶粒度来看,钒氮合金化方法细化铁素体晶粒的作用更强。

2.3 钒对析出物及游离氮的影响

钒在钢中的析出有多种形式,包括面心立方晶系的VC, V(CN)等。电解萃取的方法在获得钒的碳氮化合物的同时,还会得到其他类型的化合物,如Fe、Mn、Ni与碳形成的M<sub>3</sub>C类型正交晶系的碳化物,以及MC类型、面心立方的MnS等。各相的结构参数如表3所示。

经过检测和分析,确定M<sub>3</sub>C相组成结构式为(Fe 0.951 + Cr 0.007 + Mn 0.040 + Ni 0.001 + V 0.002)3C。MC相组成结构式为:(V 0.914 + Ti 0.068 + Mo 0.017)(C 0.214 + N 0.786)。

钢中V(CN)和VC析出的定量分析结果如表4所示。采用钒铁合金化时,钢中的VC、V(CN)析出

表3 析出相的结构参数

Table 3 Structure parameters of precipitates

相类型	点阵常数	晶系
M <sub>3</sub> C	$a_0 = 0.4523 \sim 0.4530, b_0 = 0.5080 \sim 0.5088, c_0 = 0.6743 \sim 0.6772$	正交晶系
MnS	$a_0 = 0.5224$	面心立方
V(CN)	$a_0 = 0.415 \sim 0.416$	面心立方
VC	$a_0 = 0.417 \sim 0.418$	面心立方
TiN痕	$a_0 = 0.422 \sim 0.424$	面心立方
Ti(CN)痕	$a_0 = 0.425 \sim 0.427$	面心立方

表4 钒析出物的定量分析结果/%

Table 4 Quantitative analysis results of vanadium precipitates / %

加钒方式	钒元素含量	VC		V(CN)		析出V		固溶V	
		含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例
钒铁	0.062	-	-	0.013	21.0	21.0	0.049	79.0	
钒铁	0.061	-	-	0.015	24.6	24.6	0.046	75.4	
VN合金	0.054	0.003	5.56	0.0199	36.85	42.4	0.0311	57.6	

物中的钒含量占钢中含钒总量的比例为20%~24%,其余以呈固溶态存在钢中。采用钒氮合金化的钢中,钒的析出量占钢中含钒总量的比例为42.4%,析出比例比钒铁合金化提高近1倍,其中钒主要以V(CN)形式析出占总钒量的36.9%,而以VC形式析出的量很少,只占总钒量的5.5%左右;固溶态存在的比例为57.6%。

根据NACIS H99007标准,采用热导法和红外吸收法对试样进行气体分析,测定的钢中总氮量,结果发现:钒铁合金化钢中的氮含量 $47 \times 10^{-6}$ 和 $56 \times 10^{-6}$ ,而钒氮合金化钢中的氮含量 $94 \times 10^{-6}$ ,接近国标的上限要求的 $120 \times 10^{-6}$ ,较前者高出近1倍。根据钢中V(CN)、AlN的析出总量,可以计算出钢中的游离氮量和化合氮(表5)。采用钒铁合金化钢筋中的游离氮含量和比例都较低。

表5 热轧钢筋中氮的含量

Table 5 Nitrogen content in hot rolled rebar

加钒方式	总N量/ $10^{-6}$	化合氮				游离氮	
		V(CN)中氮/ $10^{-6}$	AlN中氮/ $10^{-6}$	合计量/ $10^{-6}$	比例/%	含量/ $10^{-6}$	比例/%
钒铁	47.0	25	18	43	91.5	4	10.7
钒铁	56.0	23	25	48	85.7	8	14.3
VN合金	94.0	47	26	73	77.7	21	22.34

3 结果分析

在钒合金化钢中,钒的析出物以VN、VC或V(CN)析出,而析出的量与钢中的氮含量和固溶的钒含量直接有关,另外还和钢中的Al有关。它们固溶平衡满足以下条件<sup>[3]</sup>:

$$\lg[Al][N] = 1.03 - \frac{6\ 670}{T} \quad (1)$$

$$\lg[V][N] = 3.40 - \frac{8\ 330}{T} \quad (2)$$

$$\lg[V][C] = 6.72 - \frac{9\ 500}{T} \quad (3)$$

式中:  $T$ - 钢的实际温度/ $K$ 。

由(1)~(3)式可知,氮含量和固溶钒含量越高,固溶的量就越少,析出的数量就越多;同样,温度越低,固溶量就少,导致析出会增加。钒的碳氮化物在钢中固溶温度的顺序是  $VN > AlN > VC$ 。即  $V$  的氮化物比碳化物稳定。在奥氏体中,氮化物比碳化物的溶解度至少要小两个数量级,所以氮化物更易于在奥氏体中过饱和,从而也就具有较大的析出驱动力。这样,氮化物就更容易弥散析出。当然,其析出物的尺寸还与冷却速度有直接关系。

根据以上关系式可以计算出平衡条件下  $VN$  (或 $V(CN)$ )、 $AlN$ 、 $VC$  的析出规律。计算可知,钢中  $VN$  或 $V(CN)$  的开始析出温度较高,在  $925\ ^\circ C$  左右。由于钢中固溶  $Al$  含量很低,平衡条件下  $AlN$  的析出开始温度  $800 \sim 825\ ^\circ C$ ,在非平衡条件下,其终止析出的温度更低。 $VC$  的平衡析出温度  $825 \sim 780\ ^\circ C$ ,接近铁素体相变开始温度,在珠光体转变(铁素体和碳化物共析转变)终止时的  $600\ ^\circ C$  析出结束,这也说明  $VC$  的析出是在奥氏体向铁素体转变中完成的,在轧后的快速冷却过程中,由于析出时间短,这种析出过程受到极大抑制,因此  $VC$  的析出很少。透射电镜分析表明,钒的析出物质点多在  $5\ nm$  以下,主要原因就是其析出的温度低。

从钒的强化作用和细化晶粒的作用来看,由于用钒氮合金进行合金化的螺纹钢析出物的量多,因此沉淀强化效果更好,钢筋的屈服强度和抗拉强度更高,不利的作用是沉淀强化作用过强会降低钢的塑性和韧性。上述结果表明,相近的钒含量,钒氮合金化使  $V$  的析出比例比钒铁合金化方法提高  $83\% \sim 110\%$ ;无论哪种合金化方法,固溶钒的比例都在  $57\%$  以上,只是钒氮合金化下,固溶比例相对下降  $24\% \sim 30\%$ 。这也说明钒氮合金化更有利于

沉淀强化作用发挥。

钒析出增加导致钢中的钒固溶量减少,降低奥氏体稳定性,相变温度会提高,相变组织有粗大的趋势。不容忽视的是,增加钒氮合金导致钢中的固溶氮增加,它可以增加奥氏体稳定性,降低相变温度。另外 $V(CN)$ 的高温析出,能有效阻碍奥氏体晶粒长大,同样可以细化奥氏体晶粒。综合作用的结果是:钒氮合金化能够得到更细小的奥氏体晶粒和室温组织,钢筋的强度更高。

钢中的氮主要是靠  $V$  和  $Al$  来固定的,钢中的游离氮低,会降低钢的时效性能。含钒钢中的钒固溶量过多,会增加游离氮量。试验中的无钒钢、钒铁合金化钢筋中游离氮很低,而钒氮合金化钢筋中的游离氮明显偏多,可以推断,后者的时效现象会更加显著。

#### 4 结论

(1) 含钒  $0.06\%$  的钒铁合金化的钢筋性能达到了 HRB400 级,相近钒含量的钒氮合金化钢筋性能达到 HRB500 级钢筋的要求。

(2) 相近的钒含量,钒氮合金化使钒的析出比例比钒铁合金化方法提高  $83\% \sim 110\%$ 。钒氮和钒铁合金化,固溶钒的比例都在  $57\%$  以上。钒氮合金化时沉淀强化作用更强。

(3) 钒氮合金化能够得到更细小的奥氏体晶粒和室温组织,但钢中的游离氮较多,可能会导致时效现象更加显著。

#### 参考文献

- 1 张国富,岑永权. 电弧炉/钢包钒渣直接还原合金化工艺. 特殊钢, 1997, 18(5): 42
- 2 张永权,杨才福,柳书平. 钒氮微合金化钢筋的研究. 钢铁钒钛, 2000, 21(3): 12
- 3 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相. 北京:冶金工业出版社, 2006

余 伟(1968-),男,硕士,副研究员,1993年北京科技大学毕业,金属材料加工新工艺开发与研究。

收稿日期:2007-11-26

欢迎订阅《特殊钢》杂志

(邮发代号:38-183) 定价:16.00元/期,全年96.00元