

# 高氮钒铁微合金化生产 HRB500E 抗震钢筋试验研究

贾怡晗, 王清晨, 曹长山, 翁玉娟

(承德锦科科技股份有限公司, 河北 承德 067102)

**摘 要:**以转炉、连铸、轧钢工艺装备为基础,进行了高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋的试验研究,结果表明:与钒氮合金相比,使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 抗震钢筋节约 22.2%,钒合金化成本降低 17.98 元/t。钢筋力学性能稳定,具有低应变时效性。 $\text{Ø}28$  mm 和  $\text{Ø}32$  mm 规格时效 15 天,  $R_{eL}$  均降低 15 MPa,  $R_m$  分别降低 2 MPa 和 3 MPa,  $A_{g1}$  分别提高 0.7 个百分点和 0.8 个百分点,之后力学性能不变,时效后的钢筋强屈比和屈标比更合理,抗震性能更好。钢筋金相组织为珠光体+铁素体,晶粒度等级 10 级,比使用钒氮合金提高 1.0 级。钢筋拉伸试验断口为等轴韧窝断口。钢筋帮条焊后进行拉伸在母材断裂,缩颈显著,焊接性能良好。疲劳检验 200 万次时未发生断裂,满足新国标 GB/T 1499.2—2018 的疲劳寿命要求。

**关键词:**HRB500 E; 高氮钒铁合金; 微合金化; 力学性能

中图分类号:TF76, TG113

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2022)06-0149-04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Experimental study on HRB500E seismic reinforcement bar produced by microalloying of high nitrogen ferrovanadium alloy

Jia Yihan, Wang Qingchen, Cao Changshan, Weng Yujuan

(Chengde Jinke Technology Co., Ltd., Chengde 067102, Hebei, China)

**Abstract:** Based on the process and equipment of converter, continuous casting and rolling, the experimental study on the production of HRB500E high strength anti-seismic steel rebar by microalloying with high nitrogen ferrovanadium alloy was carried out. The results show that compared with vanadium-nitrogen alloy, the production of HRB500E anti-seismic steel rebar by microalloying with high nitrogen ferrovanadium alloy can save 22.2% vanadium and reduce the cost of vanadium alloying by RMB 17.98/ ton steel. The mechanical properties of steel rebars are stable and have low strain aging. The yield strength of  $\text{Ø}28$  mm and  $\text{Ø}32$  mm specifications are both reduced by 15 MPa, and tensile strength decreased by 2 MPa and 3 MPa respectively after aging for 15 days. The uniform elongations are increased by 0.7% and 0.8%, respectively. The strength yield ratio and yield standard ratio of steel rebars after aging are more reasonable and the seismic performance gets better. The metallographic structure of the steel rebar consists of pearlite + ferrite, and the grain size is ASTM 10, 1.0 grade higher than that of vanadium-nitrogen alloy. The tensile fracture contains equiaxed dimple. For welding test the fracture located in base metal, showing good weldability. There was no fracture after 2 million times of fatigue

收稿日期:2022-08-05

基金项目:承德市科学技术研究与发展计划项目(燃烧合成氮化钒硅锰铁技术研究,项目编号:201706A067)。

作者简介:贾怡晗, 1974 年出生, 男, 河北衡水人, 硕士, 技术中心主任, 主要从事钒及钒产品的开发和应用、钒钛功能性新材料制备和钒钛磁铁矿综合利用工艺技术方面的研究, E-mail: jia.yihan@qq.com。

test, which met the fatigue life requirements of the new national standard GB/T 1499.2—2018.

**Key words:** HRB500E, high nitrogen ferrovanadium alloy, microalloying, mechanical properties

## 0 引言

钒是生产热轧带肋钢筋最主要的微合金化元素,向钢中加入钒的氮化物可有效提高钢材的力学性能,因此近年来钢铁行业普遍采用钒氮合金(V77N16)、氮化钒铁(FeV55N12或FeV45N10)进行钒的微合金化<sup>[1-4]</sup>。但随着钢筋产品的升级换代,钢筋强度级别提高,微合金化加入的钒含量需要提高,而现有的钒氮合金和氮化钒铁产品的N/V值低(0.20~0.22),微合金化过程增钒时带入的氮含量不足,不能满足V的析出强化需求,存在钒资源浪费,钒微合金化成本高的弊端。通过对钒在钢中析出强化机理的深入研究,承德锦科科技股份有限公司研发了高氮钒铁合金,并与某钢厂合作,共同对高氮钒铁合金微合金化生产HRB500E高强抗震钢筋进行试验研究,大幅降低了HRB500E高强抗震钢筋钒合金成本。

## 1 高氮钒铁合金微合金化机理

高氮钒铁合金(FeV30N14)是一种新型含氮钒合金,与钒氮合金比较具有比重大、N/V高的特性,N/V值达到0.45,是钒氮合金(0.20~0.22)的2倍以上,在增V量相同的情况下,增N量也是钒氮合金的2倍以上。钢中的氮能与钒形成大量弥散的细小碳氮化钒粒子,通过析出强化和细晶强化显著提高钢的强度,改善或保持钢的良好塑性和韧性。钢中氮含量提高,对促进晶内铁素体的生成,细化钢的铁素体晶粒非常有效,同时较高的氮含量可以促进VN在奥氏体区的析出,VN析出越多,奥氏体晶粒就越细。氮可提高V(C,N)在奥氏体中析出的驱动力,并且显著促进V(C,N)粒子在铁素体区的相间析出。钒的析出量达到80%以上,V的强化效果得到充分发挥。因此使用高氮钒铁合金进行微合金化可大幅度节钒,显著提高钢的析出强化效果,而且还能显著控制强化作用。

## 2 试验条件

### 2.1 生产工艺流程

采用高氮钒铁合金微合金化生产HRB500E高强抗震钢筋工艺流程如下:

铁水包→转炉→钢包→吹氩→方坯连铸→加热

炉→连轧机组→空冷→精整打包入库。

使用高氮钒铁代替钒氮合金进行微合金化生产HRB500E高强抗震钢筋,高氮钒铁与钒氮合金的加入方法相同,即出钢加入脱氧剂和硅锰合金后立即加入。

高氮钒铁合金主要化学成分如表1所示。

表1 高氮钒铁合金FeV30N14主要化学成分  
Table 1 Main chemical composition of high nitrogen ferrovanadium alloy %

V	N	P	S	C
30	14.5	0.041	0.02	0.3

### 2.2 钢筋成分控制

根据高氮钒铁合金微合金化机理,设计Ø28 mm~Ø32 mm规格HRB500E试验钢筋成分控制如表2所示。试验工艺与原钒氮合金工艺成分要求相比,两种工艺的C、Si、Mn含量要求相同,试验工艺的V含量平均值为0.070%,比原工艺平均值0.090%降低了0.020个百分点,节钒22.2%。

表2 Ø28 mm~Ø32 mm规格HRB500E使用不同合金时的成分控制

Table 2 Composition control of high nitrogen ferrovanadium and vanadium nitrogen alloy used in Ø28 mm~32 mm HRB500E reinforcement bar

项目合金类别	w/%				
	C	Si	Mn	V	P/S
试验工艺	0.22~0.25	0.40~0.50	1.35~1.45	0.068~0.072	≤0.045
原工艺				0.088~0.092	

## 3 试验结果与分析

### 3.1 化学成分

采用高氮钒铁合金试制生产Ø28 mm规格HRB500E高强抗震钢筋25炉,Ø32 mm规格HRB500E高强抗震钢筋18炉,实际成分如表3所示。Ø28 mm和Ø32 mm两个规格吨钢使用高氮钒铁合金(FeV30N14)2.333 kg,原工艺每吨钢使用钒氮合金(VN16)1.169 kg,结合2021年6月份的高氮钒铁合金和钒氮合金价格,使用高氮钒铁合金微合金化工艺可比钒氮合金吨钢降低钒合金成本17.98元。

### 3.2 力学性能

试样力学性能统计结果如表4所示,由表4可

看出使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 抗震钢筋, 钢筋屈服强度 ( $R_{eL}$ )、抗拉强度 ( $R_m$ )、最大力下伸长率 ( $A_{gt}$ )、强屈比 ( $R_m/R_{eL}$ )、屈标比 ( $R_{eL}/500$ )、

正弯、反弯全部符合新国标 GB/T 1499.2—2018 要求, 力学性能稳定且有一定的余量。

表 3 高氮钒铁合金化生产 HRB500E 实际成分控制

Table 3 Actual compositions control of HRB500E reinforcement bars produced by high nitrogen ferrovanadium alloy

规格/mm	类别	w/%						
		C	Si	Mn	P	S	V	N
Ø28	范围	0.23 ~ 0.25	0.43 ~ 0.47	1.39 ~ 1.43	0.015 ~ 0.038	0.028 ~ 0.039	0.068 ~ 0.072	0.018 0 ~ 0.019 5
	平均值	0.235	0.46	1.41	0.029	0.034	0.070	0.019 2
Ø32	范围	0.23 ~ 0.25	0.43 ~ 0.46	1.40 ~ 1.44	0.021 ~ 0.032	0.025 ~ 0.040	0.068 ~ 0.073	0.018 1 ~ 0.020 0
	平均值	0.236	0.45	1.40	0.027	0.035	0.070	0.019 0

表 4 高氮钒铁合金化生产 HRB500E 的试样力学性能统计

Table 4 Mechanical properties of HRB500E reinforcement bars produced by high nitrogen ferrovanadium alloying

规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	$A_{gt}/\%$	强屈比	屈标比	正弯、反弯
Ø28	540 ~ 570	690 ~ 705	12.3 ~ 13.5	1.25 ~ 1.28	1.08 ~ 1.15	完好
Ø32	540 ~ 565	690 ~ 720	12.1 ~ 13.2	1.25 ~ 1.28	1.08 ~ 1.13	

### 3.3 钢筋性能时效

对 Ø28 mm 和 Ø32 mm 规格 HRB500E 各取 10 批同一位置力学分析试样, 力学性能时效情况如图 1~3 所示, 从图 1~3 可以看出: 2 个规格钢筋都具有低应变时效性, Ø28 mm 和 Ø32 mm 规格时效 15 天  $R_{eL}$  均降低 15 MPa,  $R_m$  分别降低 2 MPa 和 3 MPa,  $A_{gt}$  分别提高 0.7 个百分点和 0.8 个百分点。之后力学性能基本不变, 时效后的钢筋强屈比和屈标比更合理, 抗震性能更好。

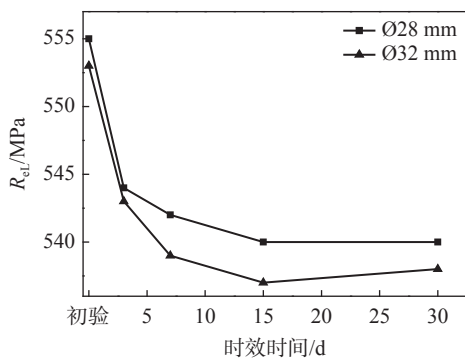


图 1 试样  $R_{eL}$  时效

Fig. 1  $R_{eL}$  aging diagram of sample

### 3.4 钢筋金相组织

对 Ø32 mm 规格 HRB500E 试验钢材进行金相组织分析, 边部、1/2 半径和心部的金相组织均为珠光体+铁素体, 无异常组织, 钢筋晶粒度等级为 10 级, 如图 4 所示, 晶粒度等级比使用钒氮合金提高 1.0 级。

### 3.5 钢筋断口形貌

钢材拉伸试验断口为韧性断口, 对断口进行电镜扫描均为等轴韧窝, 断口正常, 具体见图 5。

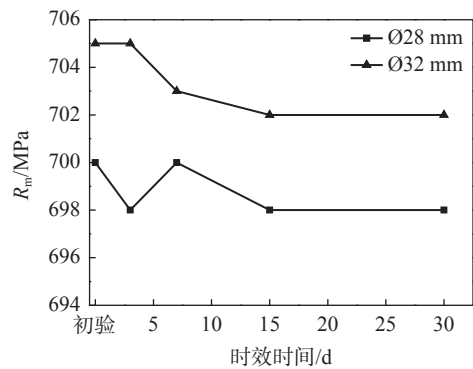


图 2 试样  $R_m$  时效

Fig. 2  $R_m$  aging diagram of sample

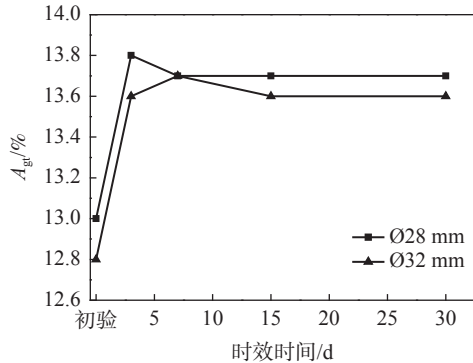


图 3 试样  $A_{gt}$  时效

Fig. 3  $A_{gt}$  aging diagram of sample

### 3.6 焊接性能

游离氮会降低焊接热影响区的韧性, 选择合适的微合金化进行固氮, 高氮含量的含钒钢可以获得良好的低温韧性。钢材经帮条焊后进行拉伸试验, 焊接钢筋拉伸后均在母材断裂, 钢筋缩颈显著, 均为韧性断裂, 使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋焊接性能良好, 具体见图 6。

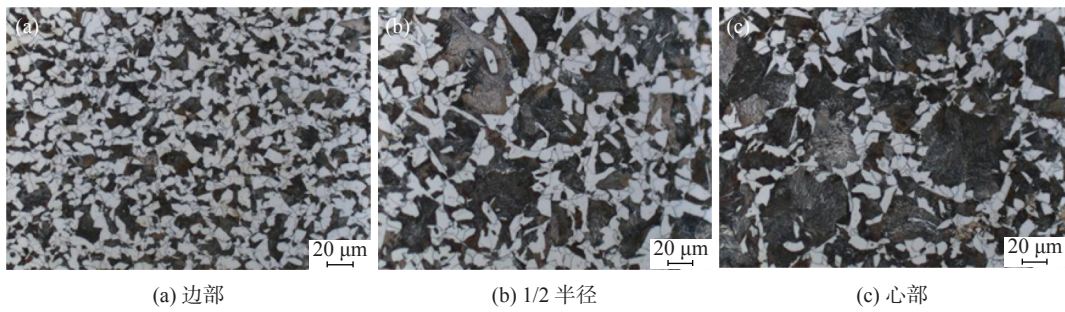


图 4 试样显微组织

Fig. 4 Microstructure of sample

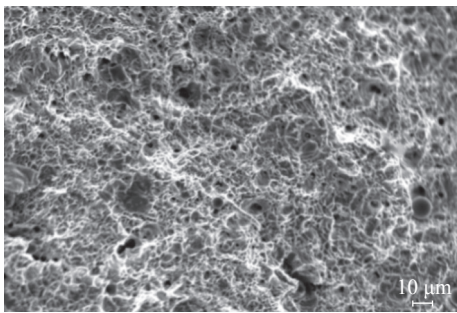


图 5 钢筋断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of tensile sample



图 6 钢筋焊接后拉伸断裂

Fig. 6 Tensile fracture of steel rebars after welding

### 3.7 疲劳寿命

分别取  $\text{Ø}28\text{ mm}$  和  $\text{Ø}32\text{ mm}$  规格 HRB500E 钢筋进行疲劳寿命检验, 疲劳检验 200 万次时未发生

断裂, 满足新国标 GB/T 1499.2—2018 疲劳寿命要求。

## 4 结论

1) 与钒氮合金微合金化工艺相比, 使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋可节钒 22.2%, 钒合金化吨钢成本降低 17.98 元。

2) 使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋, 钢筋力学性能全部符合新国标 GB/T 1499.2-2018 要求, 性能稳定且有一定的余量, 钢筋具有低应变时效性,  $\text{Ø}28\text{ mm}$  和  $\text{Ø}32\text{ mm}$  规格时效 15 天时  $R_{eL}$  均降低 15 MPa,  $R_m$  分别降低 2 MPa 和 3 MPa,  $A_{gt}$  分别提高 0.7 个百分点和 0.8 个百分点。之后力学性能基本不变, 时效后的钢筋强屈比和屈标比更合理, 抗震性能更好。

3) 使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋, 钢筋金相组织为珠光体+铁素体, 钢筋晶粒度等级为 10 级。钢材拉伸试验断口均为等轴韧窝断口, 断口正常。

4) 使用高氮钒铁合金微合金化生产 HRB500E 高强抗震钢筋, 钢筋经帮条焊后进行拉伸均在母材断裂, 钢筋缩颈显著, 均为韧性断裂, 焊接性能良好。疲劳检验 200 万次时未发生断裂, 满足新国标 GB/T 1499.2—2018 疲劳寿命要求。

## 参考文献

[1] Yang Fucui, Zhang Yongquan, Wang Ruizhen. Principles and applications of iron and steel metallurgy[M]. Beijing : Metallurgical Industry Press, 2012: 82-88.  
(杨福才, 张永权, 王瑞珍. 钢铁冶金原理与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 82-88.)

[2] Sun Qiaomei. Application and process optimization of micro nitrogen alloy in high strength rebar steel[J]. Hebei Metallurgy, 2018, (5): 6-9.  
(孙巧梅. 微氮合金在高强度螺纹钢的应用与工艺优化[J]. 河北冶金, 2018, (5): 6-9.)

[3] Chen Wei, Zhao Yu, Zhang Weiqiang, et al. Using nitrogen-rich vanadium microalloying to produce large HRB500 steel[J]. Steel Research, 2011, 39(1): 23-27.  
(陈伟, 赵宇, 张卫强, 等. 采用富氮钒微合金化生产大规格HRB500钢筋[J]. 钢铁研究, 2011, 39(1): 23-27.)

[4] Deng Jianxin. Comparison of vanadium microalloying effect of ASEISMIC rebars in Xuangang[J]. Hebei Metallurgy, 2017, (7): 41-44.  
(邓建新. 宣钢抗震钢筋钒微合金化效果对比[J]. 河北冶金, 2017, (7): 41-44.)