

钒氮微合金化 HRB500E 热轧带肋钢筋开发

郭跃华

(攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: HRB500E 热轧带肋钢筋开发难点在于既要满足高强度, 又要满足强屈比 ≥ 1.25 抗震要求。国内部分钢厂采用 VN16 合金化工艺生产 HRB500E 钢筋强屈比难以达到 1.25, 针对上述问题采用“VN16+FeV80”钒氮合金化工艺, 将钒控制在 0.07%~0.11%, 氮控制在 0.011%~0.015%, 通过既发挥钒的析出强化作用又不至于钒过量析出导致强屈比显著下降技术手段, 开发并批量稳定生产出强屈比富余量充足的 $\phi 12 \sim \phi 32$ mm 规格 HRB500E 热轧带肋钢筋, 解决了单独采用 VN16 合金化生产 HRB500E 钢筋强屈比不合格难题。

关键词: 钢筋; HRB500E; 钒微合金化; 钒氮合金; 钒铁合金; 强屈比; 强度

中图分类号: TF704.2 ;TG141 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2019)06-0113-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Development of Hot Rolled Ribbed Bars for V-N Micro-alloyed HRB500E

Guo Yuehua

(Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The difficulty in developing the HRB500E hot-rolled ribbed steel bars is not only to satisfy the high strength, but also ensure that the ratio of tensile/yield strength required for seismic resistance is greater than or equal to 1.25. Some domestic steel mills utilize the VN16 alloying process to produce HRB500E, but the ratio of tensile/yield strength (R_m/R_{eL}) is hard to reach 1.25. In view of the above problems, the "VN16+FeV80" V-N alloying process is added to control vanadium and nitrogen contents between 0.07%~0.11% and 0.011%~0.015%, respectively. Precipitation strengthening effect of vanadium had played its role, but on the other hand, excessive precipitation of vanadium had been avoided in order to control reasonable the R_m/R_{eL} . Through controlling the vanadium precipitation, HRB500E hot rolled rebars of $\phi 12 \sim \phi 32$ mm specifications had been successfully developed.

Key words: rebar, HRB500E, microalloy, VN16, FeV80, ratio of tensile/yield strength, strength

0 引言

生产高强度级别钢筋是钢铁工业实现减量化、低排放绿色发展的重要方向, HRB500E 具有强度高、塑性好、焊接性能和抗震性能优良等综合特性, 是国家重点推广应用的混凝土用热轧带肋钢筋升级换代产品^[1-3]。2011 年 7 月 GB 50010—2010 设计

规范纳入 500MPa 级钢筋^[4]和 2018 年 11 月 GB/T 1499.2—2018 新标准实施, 表明 HRB500E 热轧带肋钢筋的生产应用将成为大势所趋^[5]。HRB500E 热轧带肋钢筋主要应用于高层建筑、大跨度建筑、高速公路、水电站、机场等国家重点工程项目中的关键部位。

HRB500E 热轧带肋钢筋开发难点在于既要满

收稿日期: 2019-07-26

作者简介: 郭跃华(1985—), 男, 本科, 工程师, 主要从事型钢新产品新工艺研发工作。Email: guoyuehua158@163.com。

足高强度,又要满足强屈比 ≥ 1.25 抗震要求。我国钒资源丰富,钒作为首选析出强化元素提高钢材性能优势明显^[6]。我国学者经过多年研究与实践,钒钢中增氮后会使钒析出的第二相粒子尺寸大幅减小和密度大幅增加^[7],对于提高含钒钢的力学性能有益,不但可以显著提高钒的强化效果,而且一定程度上节约钒用量,降低成本^[8],对 HRB500E 热轧带肋钢筋的推广具有重要的意义。

为满足 500 MPa 级热轧带肋钢筋强度要求,国内部分钢厂采用 VN16 合金化工艺,钒含量在 0.09% 左右,反映出部分规格强屈比易出现小于 1.25 的情况,不满足抗震性能要求。分析认为钢中氮含量在 200×10^{-6} 左右,过高的氮促进了 V(C,N) 细小粒子在铁素体中过多析出,在细化晶粒的同时增加了铁素体基体的硬度,降低了铁素体与珠光体软硬相硬度差,强屈比显著下降^[9]。

笔者利用钒氮微合金化技术,采用“VN16+FeV80”合金化工艺,在充分利用碳、锰等廉价强化元素情况下开发低成本 HRB500E 热轧带肋钢筋,批量生产 10 万余吨 $\phi 12 \sim \phi 32$ mm 规格 HRB500E 钢筋,合格率 100%,对钒在 HRB500E 钢筋中应用起到积极推广作用。

1 试验材料

1.1 工艺流程

利用钒氮微合金化技术,采用“VN16+FeV80”合金化工艺制备 HRB500E 热轧带肋钢筋,工艺流程如下:高炉铁水脱硫 $\rightarrow$ 120 t 转炉冶炼 $\rightarrow$ LF 精炼 $\rightarrow$ 小方坯连铸(160 mm $\times$ 160 mm) $\rightarrow$ 铸坯加热 $\rightarrow$ 18 机架棒材机组连轧 $\rightarrow$ 空冷 $\rightarrow$ 剪切 $\rightarrow$ 包装 $\rightarrow$ 成品入库。

1.2 成分控制

钒氮微合金化 HRB500E 热轧带肋钢筋成分设计与控制范围见表 1。轧制规格 $\phi 12 \sim \phi 32$ mm。考虑充分利用碳、锰等廉价强化元素作用,碳、锰化学成分均靠国标上限设计,硅的强化作用不如碳和锰,但添加适量的硅可保障钢液具备较低氧活度,为钢液稳定增氮创造良好条件。为达到 500 MPa 级强度要求,根据钢筋不同规格组距,钒含量需控制在 0.07%~0.11% 内某个区间,氮含量控制在 0.011%~0.015%,既发挥钒的析出强化作用来提高强度,又保障钒不过多析出导致强屈比指标显著下降。钒、氮含量控制具体措施为采用“VN16+FeV80”合金化工艺,转炉出钢 1/3~2/3 过程中,VN16 合金按 0.7 kg/t 钢定量加入,其余钒用 FeV80 合金加入补充。

表 1 钒氮微合金化 HRB500E 成分控制
Table 1 Compositions of V-N micro-alloyed HRB500E

牌号	C	Si	Mn	P	S	V	N	Ceq
HRB500E	0.22~0.25	0.40~0.60	1.40~1.60	≤ 0.040	≤ 0.040	0.07~0.11	0.011~0.015	≤ 0.54

1.3 轧制工艺

由于采用“VN16+FeV80”合金化工艺,已充分考虑将氮含量控制在 0.011%~0.015%,既让钒析出又不能过于析出,未析出的钒可发挥固溶强化作用,因此铸坯加热应尽量保证钒全部溶解,均热温度控制在 1 120~1 200 $^{\circ}\text{C}$,炉内加热时间 90~120 min,终轧温度 910~990 $^{\circ}\text{C}$,轧后空冷获得铁素体+珠光体组织,使钢筋具备良好的综合力学性能。

2 试验结果及分析

2.1 化学成分

采用“VN16+FeV80”合金化技术生产的各规格组距 HRB500E 试验钢化学成分统计结果见表 2,各规格组距内试验钢整体化学成分控制较稳定,钢中氮

含量在 0.011 0%~0.015 5% 基本满足成分设计要求。试验钢钒、氮成分控制措施为吨钢定量加入 VN16 合金 0.7 kg,其余钒用 FeV80 加入补充,从小到大 3 个规格组距 FeV80 的补充量依次增多,平均氮含量分别为 0.012 0%、0.012 8%、0.014 1% 依次升高,说明 FeV80 中的钒也起到一定的固氮作用。

2.2 钒、氮收得率

采用“VN16+FeV80”合金化技术生产的各规格组距 HRB500E 试验钢平均钒、氮收得率见表 3,其中 VN16 中 V 按 78%、N 按 16%,FeV80 中 V 按 80%,钢液中残 V 按 0.004%,钢液中残 N 按 0.004 5% 计算。试验钢平均钒收得率在 95.89%~96.07%,钒收得率稳定且处于较高水平。试验钢从小到大 3 个规格组距平均氮收得率分别为 66.86%、74.08%、85.97% 依次升高,而 3 个规格组距钢筋唯

一区别在于 FeV80 吨钢加入量依次增多,进一步表明当 VN16 与 FeV80 混合加入时 FeV80 中钒起到部分固定 VN16 中氮的作用,而且 FeV80 吨钢加入量越多,固氮作用越强,氮收得率越高。

表 2 钒氮微合金化 HRB500E 试验钢化学成分
Table 2 Chemical compositions of V-N micro-alloyed HRB500E

规格组距	C	Si	Mn	P	S	V	N	统计炉数
Ø12~Ø20	0.22~0.25	0.46~0.55	1.48~1.55	0.015~0.040	0.013~0.040	0.073~0.085	0.011 0~0.013 4	38
	0.23	0.51	1.53	0.026	0.026	0.079	0.012 0	
Ø22~Ø28	0.22~0.24	0.45~0.58	1.50~1.58	0.012~0.032	0.017~0.036	0.080~0.090	0.012 2~0.015 4	42
	0.23	0.50	1.54	0.020	0.027	0.085	0.012 8	
Ø32	0.22~0.24	0.46~0.58	1.46~1.57	0.010~0.035	0.010~0.038	0.090~0.105	0.012 5~0.015 5	50
	0.23	0.51	1.54	0.021	0.025	0.095	0.014 1	

注:分母为平均值,分子为波动范围。

表 3 HRB500E 试验钢钒、氮平均收得率
Table 3 Average yield of vanadium and nitrogen for the testing steel of HRB500E

规格组距	钢水量/t	VN16/kg	FeV80/kg	w_v /%	V 收得率 /%	w_N /%	N 收得率 %	统计炉数
Ø12~Ø20	135.5	95.0	39.8	0.079	95.93	0.0120	66.86	38
Ø22~Ø28	135.8	95.1	50.4	0.085	96.07	0.0128	74.08	42
Ø32	130.1	90.8	65.8	0.095	95.89	0.0141	85.97	50

2.3 力学性能

钒氮微合金化 HRB500E 热轧带肋钢筋力学性能见表 4,试验钢屈服强度在 520~560 MPa,平均 537 MPa,最大力总延伸率在 11.1~13.2,平均 12.0,强屈比在 1.28~1.35,平均 1.31。各项性能指标完全满足 GB/T 1499.2—2018 标准要求,力学性能稳定,且强屈比富余量充足,性能合格率 100%。结果表明,采用

“VN16+FeV80”合金化技术,将氮含量控制在 0.011%~0.015% 范围内,通过既发挥钒的析出强化作用又不至于钒过量析出导致强屈比显著下降技术手段,可有效解决单独采用 VN16 合金化生产 HRB500E 钢筋部分规格强屈比不合格难题。采用本技术手段生产 HRB500E 热轧带肋钢筋拥有较合适的屈服强度和优良的抗震性能匹配,满足批量生产要求。

表 4 钒氮微合金化 HRB500E 钢筋力学性能
Table 4 Mechanical properties of V-N micro-alloyed HRB500E rebar

规格组距	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A /%	A_{gt} /%	强屈比	屈标比	统计炉数
Ø12~Ø32	520~560	680~740	22.5~28.5	11.1~13.2	1.28~1.35	1.04~1.12	130
	537	711	24.9	12.0	1.31	1.07	

注:分母为平均值,分子为波动范围。

2.4 金相组织

三个规格组距中,分别取 Ø14 mm、Ø25 mm 和 Ø32 mm 典型规格 HRB500E 试验钢筋,进行金相检验,金相组织形貌见图 1。

可见,试验钢边部、1/4d 位置和心部均为铁素体+珠光体组织,完全满足 GB/T 1499.2—2018 组织要求,铁素体晶粒度约为 9.5~10.5 级,其中规格较大的心部冷速相对较慢,铁素体晶粒略粗,珠光体含量略高。

2.5 时效性能

针对 Ø32 mm 规格 HRB500E 试验钢筋,在同一

支钢筋截取试样开展自然时效试验,由于在同一支钢筋上取样,米重负偏差一致,屈服强度和抗拉强度随时效天数的变化曲线见图 2 和图 3。

屈服强度随时效天数的增加呈现先降低后上升趋势,7 d 以后屈服强度随时效天数变化基本处于稳定状态,屈服强度降幅在 5 MPa 内。抗拉强度对自然时效不敏感,抗拉强度基本不随时效时间的变化而发生改变。一般认为,钢筋规格越大,对时效越敏感,而试验钢 Ø32 mm 最大规格自然时效 7 d 后屈服强度降幅在 5 MPa 内,说明试验钢具有较低的时效敏感性。

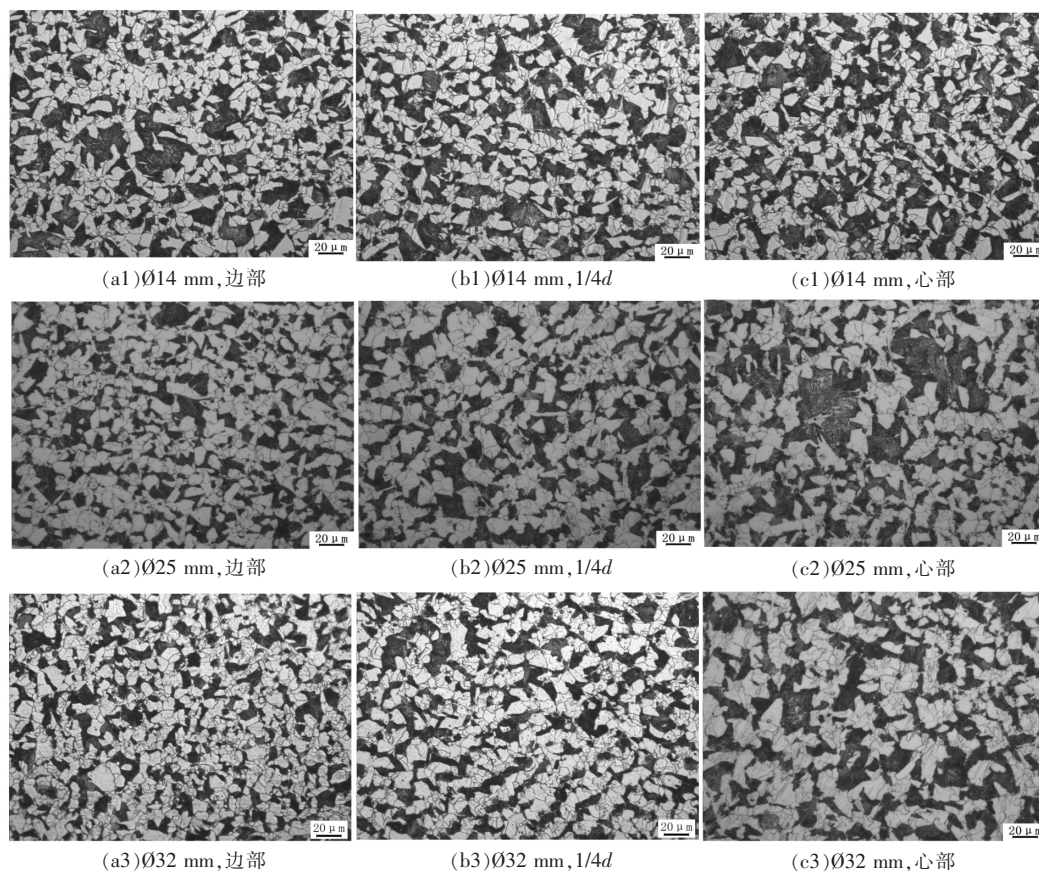
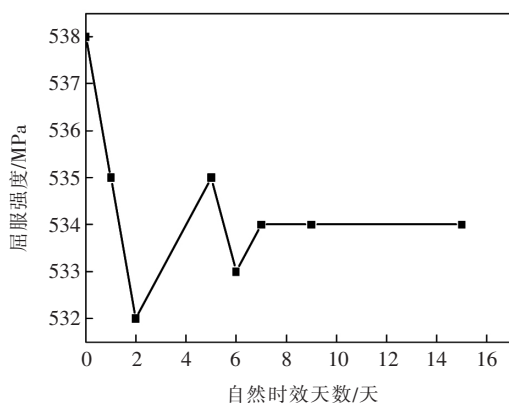
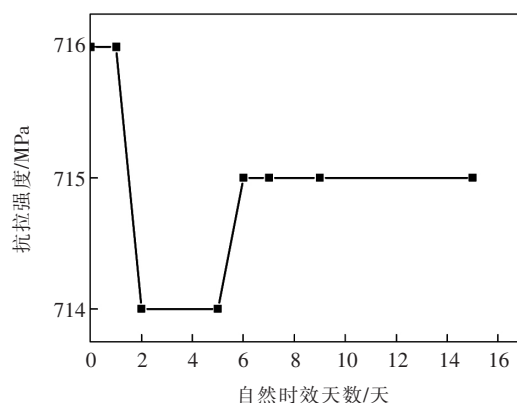


图1 不同规格 HRB500E 钢筋金相组织形貌

Fig.1 Microstructures of HRB500E rebars with different diameters

图2 Ø32 mm 规格 HRB500E 钢筋屈服强度时效曲线
Fig.2 Aging curve of yield strength of Ø32 mm HRB500E rebar

比显著下降技术手段,开发出强屈比富余量充足的 Ø12~Ø32 mm 规格 HRB500E 热轧带肋钢筋,实现批量稳定生产,解决了单独采用 VN16 合金化生产 HRB500E 钢筋部分规格强屈比不合格难题。

图3 Ø32 mm 规格 HRB500E 钢筋抗拉强度时效曲线
Fig.3 Aging curve of tensile strength of Ø32 mm HRB500E rebar

3 结论

1) 采用“VN16+FeV80”钒氮合金化,将钒控制在 0.07%~0.11%,氮控制在 0.011%~0.015%,通过既发挥钒的析出强化作用又不至于钒过量析出导致强屈

2) 试验钢钒收得率稳定,钒收得率 95.89%~

96.07%。氮收得率按规格组距从小到大 66.86%、74.08%、85.97% 依次升高,表明当 VN16 与 FeV80 混合加入时 FeV80 中钒起到部分固定 VN16 中氮的作用,FeV80 吨钢加入量越多,固氮作用越强,氮收得率越高。

3) 试验钢全断面金相组织为铁素体+珠光体,铁素体晶粒度 9.5~10.5 级。试验钢自然时效后屈服强度降幅在 5 MPa 内,抗拉强度基本不变,具有较低的时效敏感性。

参考文献

- [1] Chen Wei Zhao Yu Zhang Weiqiang *et al.* Production of large size HRB500 rebars by using nitrogen rich and vanadium microalloyed process [J]. Research on Iron & Steel 2011, 39(1): 23-27, 45.
(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):23-27,45.)
- [2] Xu Zhijun, Chen Boyu, Wei Yong *et al.* Influence of cooling process on phase inversion temperature of HRB500E [J]. Hot Working Technology 2016, 45(14): 85-88.
(徐志军 陈伯瑜 魏勇,等.冷却工艺对 HRB500E 相转变温度的影响[J].热加工工艺,2016,45(14):85-88.)
- [3] Chen Wei Shi Zhe Zhao Yu. Development of HRB500E seismic grade rebars by using VN microalloyed and controlled cooling process [J]. Journal of Chongqing University 2011, 34(11): 56-64.
(陈伟 施哲 赵宇.钒氮微合金化控冷工艺开发 HRB500E 抗震钢筋[J].重庆大学学报,2011,34(11):56-64.)
- [4] Chinese Academy of Building Sciences. Code for design of concrete structures GB 50010—2010 [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
(中国建筑科学院.混凝土结构设计规范 GB 50010—2010 [M].北京:中国建筑工业出版社,2011.)
- [5] National High-strength Steel Promotion and Application Production Technical Guidance Group. High strength bars production technology guide [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
(全国高强钢筋推广应用生产技术指导组.高强钢筋生产技术指南 [M].北京:冶金工业出版社,2013.)
- [6] Li Wenyuan Zhao Zhengzhi Zhao Aimin *et al.* Research on V-N microalloyed high-strength weathering steel [J]. Hot Working Technology 2012, 41(24): 101-104.
(李文远 赵征志 赵爱民,等.钒氮微合金化高强耐候钢开发研究[J].热加工工艺,2012,41(24):101-104.)
- [7] Weng Yuqing. Ultra-fine grain steel-structure refinement theory and control technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
(翁宇庆.超细晶钢—钢的组织细化理论与控制技术 [M].北京:冶金工业出版社,2003.)
- [8] Yang Caifu Zhang Yongquan. Applications of V-N microalloying technology in HSLA steels [J]. Iron and Steel 2002, 37(11): 42-47.
(杨才福 张永权.钒氮微合金化技术在 HSLA 钢中的应用[J].钢铁,2002,37(11):42-47.)
- [9] Li Yang Zuo Longfei Zhang Jianchun *et al.* Influence of alloying elements on yield strength ratio of HRB600 steel [J]. Transactions of Materials and Heat treatment 2016, 37(Supplement): 61-67.
(李阳 左龙飞 张建春,等.合金元素对 HRB600 钢筋屈服比性能的影响[J].材料热处理学报,2016,37(增刊):61-67.)

编辑 杨冬梅