

铌钒复合高强屈比 HRB500E 钢筋生产技术开发

黄飞¹, 冯岩青², 邢磊³, 杨飞¹, 张浩¹, 梁田¹

- 乌海市包钢万腾钢铁有限责任公司, 内蒙古 乌海 016000;
- 包头职业技术学院, 内蒙古 包头 014030;
- 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 国内厂家在生产 HRB500E 钢筋的过程中均存在强屈比偏低或者少量不合格现象。文章对工业试制的铌钒复合钢筋和钒氮钢筋进行了对比试验, 结果表明, 采用铌钒复合工艺后, 钢筋强屈比提高 0.04, 由于铌元素的存在, 推迟了铁素体相变, 珠光体含量增加了约 10 个百分点, 使得钢筋抗拉强度提高; 由于加入铌后, 钒氮合金加入量相对减少, 从而降低了钒氮合金析出强化、细晶强化效果, 钢筋的屈服强度略有下降。实践表明, 采用铌钒复合工艺后, 钢筋的强屈比明显提高, HRB500E 钢筋抗震性显著提高。

关键词: HRB500E 抗震钢筋; 铌钒合金化; 强屈比

中图分类号: TG335.63; TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)01-0070-05

Production Technology Development for Niobium Vanadium Composite HRB500E Rebar with High Strength – to – yield Ratio

Huang Fei¹, Feng Yan-qing², Xing Lei³, Yang Fei¹, Zhang Hao¹, Liang Tian¹

(1. Wuhai Baotou Steel Wanteng Iron & Steel Co., Ltd., Wuhai 016000, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Baotou Vocational Technical College, Baotou 014030, Inner Mongolia Autonomous Region, China;

3. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the process of producing HRB500E rebar for domestic manufacturers, there are often low strength – to – yield ratio or a small amount of nonconformity. In this paper, the comparative experiment of niobium vanadium composite rebar and vanadium nitrogen rebar manufactured with industrial trial production is carried out. The results showed that the strength – to – yield ratio of rebar was increased by 0.03 with the niobium vanadium composite process, ferrite transformation was delayed due to presence of niobium, pearlite content was increased by about 10 percentage points so that tensile strength was increased; vanadium nitrogen alloy was relatively reduced due to the addition of niobium so that its precipitation strengthening and fine grain strengthening effects were reduced as well as yield strength of rebar was slightly decreased. The practices show that the strength – to – yield ratio of rebar and seismic resistance of HRB500E rebar are significantly improved with the niobium vanadium composite process.

Key words: HRB500E aseismic rebar; niobium vanadium alloying; strength – to – yield ratio

HRB500E 钢筋是 GB/T 1499.2—2018 中强度级别最高的抗震钢筋,因其需要具备较高的屈服强度,同时兼具 1.25 以上的强屈比,是目前国标螺纹钢生产中强屈比控制难度最大的牌号^[1]。2021 年以来,随着西北地区市场对 HRB500E 抗震钢筋的需求增加,HRB500E 钢筋开始批量生产,但在生产中出现了强屈比不合现象,从低成本和高强屈比两个方面综合考虑,企业在高强度 HRB500E 钢筋生产中调整了微合金化元素含量,通过降低原有的钒氮合金加入量,并加入超微量铌元素,实现了降低生产成本的同时,达到提高钢材强屈比的目的。

1 工艺路线

HRB500E 钢筋的生产工艺路线:铁水预处理→120 t 转炉冶炼→钢包微合金化→炉外处理→

165 mm × 165 mm 方坯连铸→步进式加热炉→初轧、中轧、精轧控温连续轧制→倍尺剪切→步进式冷床→检验→包装→入库。

2 设计试制方案及结果

2.1 技术指标

标准 GB/T 1499.2—2018《钢筋混凝土用钢第 2 部分:热轧带肋钢筋》中 HRB500E 钢筋的化学成分和碳当量应符合表 1,并根据各企业的实际情况,钢中还可以加入 V、Nb、Ti 等元素,不同国家的标准,对 500 MPa 级钢筋的化学成分和性能的规定也有差异。 $C_{eq} = \omega(C) + \omega(Mn)/6 + [\omega(Cr) + \omega(V) + \omega(Mo)]/5 + [\omega(Cu) + \omega(Ni)]/15$,力学性能要求见表 2。

表 1 英标 B500C 与国标 HRB500E 抗震钢筋化学成分对比(质量分数)

标准	牌号	C	Si	Mn	P	S	Ceq
GB/T 1499.2—2018	HRB500E	≤0.25	≤0.8	≤1.6	≤0.045	≤0.045	≤0.55
BS 4449—2005	B500C	≤0.24			≤0.055	≤0.055	≤0.52

表 2 力学性能

牌号	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	最大力总延伸率 $A_{gt}/\%$	R_m^o/R_{eL}^o	R_m/R_{eL}
HRB500E	500	630	9.0	1.25	1.30
B500C	500		7.5	1.15	1.35

2.2 设计方案

试验钢牌号为 HRB500E,执行标准 GB/T 1499.2—2018,冶炼过程保证钒氮合金化,微铌+钒氮合金化方坯同浇次进行,工业试制一个浇次的前 10 炉采用钒氮合金化生产工艺,在精炼处加入钒氮合金,后面 11 至 13 炉采用微铌+钒氮合金化生产工艺,在精炼处加入少量铌铁和一定量的钒氮合金,设计成分见表 3,其中取第 9 炉(试验钢 1)和 12 炉(试验钢 2)进行对比试验。铌钒复合微合金化钢的高温塑性低谷区范围在 950 ~ 1 100 °C^[2],因此在生

产过程中拉矫温度应尽量避开该区域。中包温度为 1 500 ~ 1 550 °C,试验钢连铸拉速为 1.6 ~ 2.6 m/min,拉矫温度为 830 ~ 930 °C,试制过程中钢坯表面未出现裂纹和其他缺陷。试验钢 1 与试验钢 2 采用热装热送工艺,同时进入加热炉,同一班组进行轧制,以保证轧制过程参数的一致性。轧制规格为 Φ12 mm、Φ25 mm,上冷床温度为 890 ~ 910 °C,钢筋表面无水锈。分析添加微量铌后钢筋性能变化情况,确定最优化学成分及生产工艺。

表 3 试制设计化学成分(质量分数)

编号	C	Si	Mn	P	S	V	Nb
试验钢 1	≤0.25	≤0.8	≤1.6	≤0.045	≤0.045	≤0.055	
试验钢 2	≤0.25	≤0.8	≤1.6	≤0.045	≤0.045	≤0.045	≤0.018

2.3 试制结果

企业在 2023 年、2024 年进行两次工业试制,熔炼成分符合设计目标,力学性能达到设计和标准要求,试验产品合格率为 100%,试验结果见表 4、表 5。试验钢 1 的平均屈服强度为 537 MPa,平均抗拉

强度为 684 MPa,强屈比的平均值为 1.26,屈标比平均值为 1.08,最大力总伸长率 A_{gt} 平均值为 16.4。试验钢 2 平均屈服强度为 533 MPa,平均抗拉强度为 695 MPa,强屈比的平均值为 1.30,屈标比平均值为 1.07,最大力总伸长率 A_{gt} 平均值为 16.8。

表 4 试验钢 1 力学性能及标准要求

规格	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	强屈比	屈标比	最大力总延伸率 A_{gt} /%
GB/T 1499.2—2018	≥ 500	≥ 630	≥ 1.25	≤ 1.30	≥ 9.0
	543	695	1.28	1.09	16.4
$\Phi 12$ mm	569	700	1.25	1.14	15.8
	547	695	1.27	1.09	16.4
	525	672	1.26	1.05	16.3
$\Phi 25$ mm	520	671	1.25	1.04	17.2
	520	671	1.27	1.04	16.2

表 5 试验钢 2 力学性能及标准要求

规格	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	强屈比	屈标比	最大力总延伸率 A_{gt} /%
GB/T 1499.2—2018	≥ 500	≥ 630	≥ 1.25	≤ 1.30	≥ 9.0
	543	700	1.29	1.09	16.8
$\Phi 12$ mm	543	700	1.29	1.09	16.5
	547	700	1.28	1.09	17.4
	520	690	1.32	1.04	15.8
$\Phi 25$ mm	520	690	1.32	1.04	16.0
	525	690	1.31	1.05	16.9

2.4 显微组织

从 $\Phi 12$ mm 规格的试验钢 1 上切取长度为 20 mm 的钢筋一块,试样编号为 1[#],从 $\Phi 12$ mm 规格的试验钢 2 上切取长度为 20 mm 的钢筋两块,试样编号分别为 2[#] 和 3[#]。样品利用钼丝切割机切取 15 mm × 12 mm × 10 mm 的试验试样,再利用 120[#] 至 800[#] 砂纸从粗到细进行打磨。采用 1.5 μm 金刚石抛光剂抛光,利用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后观察显微组织,如图 1 所示。低倍结果表明钢筋组织均为铁素体 + 珠光体,晶粒度为 10.0 ~ 11.0 级,对同一区域进行局部放大,发现珠光体与铁素体含量有一定差别,加铈的试验钢 2 黑色的珠光体组织要略多于未加铈的试验钢 1。

为了更加直观地观察铈的加入对两项组织占比的影响,进行了试验钢 1 和试验钢 2 的显微组织与硬度对比试验。试验钢在 200 倍下观察显微组织,

利用 ImageproJ 软件进行数据处理,将珠光体组织添加为红色,铁素体组织添加为绿色,典型组织如图 1 所示。明显发现加铈后的 2[#]、3[#] 试验钢红色的珠光体含量增加,每个试样统计 10 个不同低倍视域,统计其铁素体和珠光体含量的变化,如图 2 所示。统计结果表明,试验钢 1 铁素体含量占 67%,珠光体含量占 33%,加铈后试验钢 2 的铁素体含量为 56.5%,珠光体含量为 43.5%,所以加入铈后 HRB500E 钢筋珠光体含量的占比增加了 10.5 个百分点。

对磨抛后的试验钢进行显微硬度测试,结果如图 3 所示,1[#] 未加铈的试验钢 1 硬度 (HV) 为 178,2[#]、3[#] 加入铈的试验钢 2 硬度 (HV) 分别为 199 和 201,因此加入铈的 2[#] 和 3[#] 试样硬度大于未加铈试验钢 1[#] 试样。试样钢的维氏硬度与珠光体含量占比相关,随着钢中珠光体含量增大,试验钢的维氏硬

度增加,从金相分析可知试验钢2的珠光体占比高于试验钢1,因此试验钢2的硬度高于试验钢1。

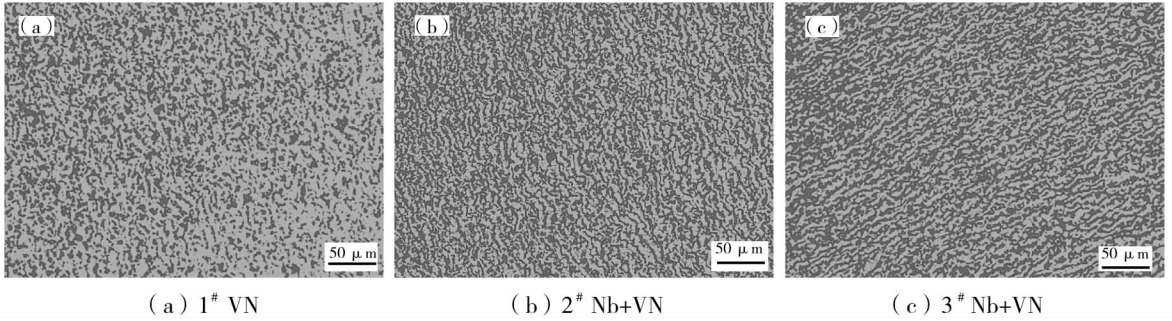


图1 珠光体与铁素体占比统计

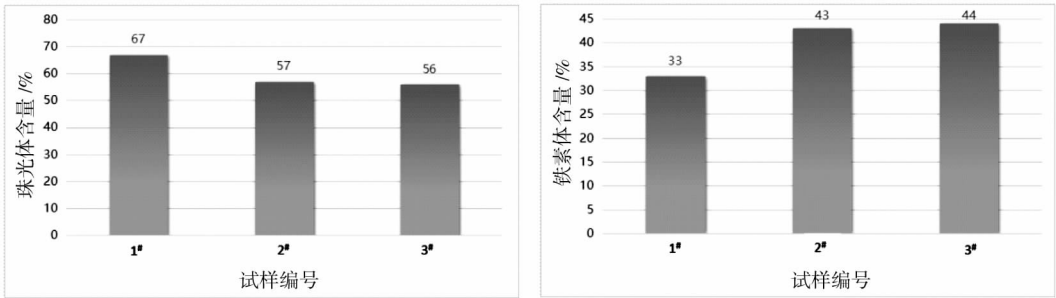


图2 珠光体和铁素体比例统计结果

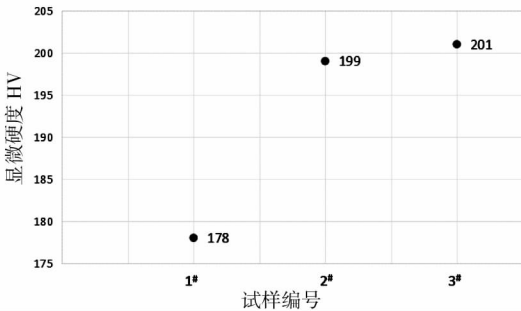


图3 显微硬度

3 分析讨论

钒微合金化在钢筋中可以起到细晶强化、固溶强化和析出强化的作用,当钢中氮含量在0.004 0%~0.007 0%情况下,钒主要以固溶的形式存在于钢中,仅有很少一部分的钒形成 VC_xNy 析出;当钢中的氮含量在0.009 0%~0.015 0%时,由于氮和钒具有很强的亲和力,促进了VC、VN的析出,钒与氮形成 VNy ,随着钢中氮含量的增加还会促进碳氮化钒在奥氏体和铁素体界面的析出,有效阻止铁素体晶粒尺寸的长大,细化了铁素体晶粒,因

此当钢筋中氮含量高时,钒在钢筋中起到的是析出强化和细晶强化作用。也就是说钢中氮含量低的情况下,钒微合金化的析出强化和细晶强化作用很弱,而析出强化和细晶强化对钢的屈服强度提高显著,对抗拉强度提高不明显,因此当钢中氮含量低的情况下,加入钒铁比加入钒氮合金对钢强屈比降低的程度要小,当钢中氮含量高时,析出强化和细晶强化作用随氮含量增加而逐渐增大,对强屈比降低的作用增强,降低了钢筋的抗震性。

钒主要通过细晶强化提高强度,钒主要是通过析出强化提高强度。铌钒复合微合金化兼有铌、钒氮微合金化的效果,即细晶强化和析出强化。钒氮合金中氮的加入提高了在轧制和冷却过程中碳氮化物析出强化能力,由于钢筋中的氮含量较高,微量钒表现出强烈的形成碳氮化物的倾向,夺走钒氮合金中的氮,形成 NbC_xNy 析出物,其余的钒固溶和形成少量 NbC_xNy 析出物。成品钒的收得率非常稳定,高达94%~96%。钒的熔点比较高,理论上加热温度在1 250℃仅能固溶0.03%的钒,固溶的钒可提高钢的再结晶温度,同时在轧制的过程中起到细晶强化的作用。未完全固溶的碳氮化钒在加热时可阻

止奥氏体晶粒长大,在轧制时可以阻止奥氏体的再结晶,从而促进铁素体形核达到细晶强化的目的。实际生产时当钢坯加热温度低于 $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ 时,即便铌的加入量超过 0.03% ,由于实际固溶量小于 0.03% ,多加也无益。加入小于 0.015% 的铌,即加入少量的铌就可以起到细晶强化的作用,因此,为提高铌的固溶度,同时防止奥氏体晶粒粗化,确定钢坯加热的最佳温度范围为 $1\ 100\sim 1\ 150\ ^\circ\text{C}$ ^[3],铌含量与屈服强度并非呈线性关系,因此需确定合理且有效的铌含量。由于市场钒氮合金价格和铌铁价格的波动,钢筋微合金化方式可以采用添加微量铌铁配合钒氮合金为主的设计思路。

采用铌钒复合工艺后,由于少量铌元素使CCT曲线向右移动,且铌元素具有推迟铁素体相变作用,可提高珠光体比例,使抗拉强度增加。同时,在实际生产中,考虑到合金成本,由于加入少量铌后,可以减少钒氮合金的加入量,从而降低了钒氮合金析出强化、细晶强化效果,屈服强度略有下降,因此拉大了屈服强度与抗拉强度的差值,钢的强屈比增加。通过金相组织观察及数据统计,表明加入铌后会增加HRB500E钢筋的珠光体含量约10个百分点,而铁素体含量降低。钢中铁素体含量越高,钢的强屈比越低,因此当钢中的铁素体含量减少时,也说明提高了钢筋的抗震性。

4 结论

(1)采用铌钒复合工艺后,钢筋的抗拉强度略

高于采用添加钒氮合金工艺的钢筋,屈服强度略低于采用添加钒氮合金工艺的钢筋,强屈比提高 0.04 ,提高了高强钢筋的强屈比。

(2)铌钒微合金化钢筋通过加入铌元素可推迟铁素体相变,提高珠光体比例,使抗拉强度提高。当钒氮合金加入量适当减少时,降低了钒氮合金析出强化、细晶强化效果,使屈服强度下降。抗拉强度的增加和屈服强度的降低拉大了抗拉强度和屈服强度之间的差值,强屈比提高。

(3)金相组织表明加入铌后会增加HRB500E钢筋的珠光体含量约10个百分点,减少了铁素体含量。

参 考 文 献

- [1] 张存旺,徐兵伟,张联兵. 铌钒复合HRB500E钢筋的研制与生产[J]. 山西冶金,2021(6): 100-104.
- [2] 杜国权,周大伟,邱达全,等. 钒铌复合微合金化抗震钢筋工艺研究[J]. 四川冶金,2019,41(1):32-35.
- [3] 王婷婷,牟立君,孙晓明,等. 低成本铌钒复合微合金化抗震钢筋HRB400E生产实践[J]. 金属制品,2020,46(3):31-34.