

微合金化 HRB400 高强度热轧钢筋的试制

唐海燕¹ 李京社¹ 杨明生² 张亚斌² 郑全振²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 新兴铸管股份有限公司,武安 056300)

摘要 HRB400 高强度钢筋($\% : 0.19 \sim 0.25\text{C}, 0.40 \sim 0.60\text{Si}, 1.20 \sim 1.50\text{Mn}, \leq 0.040\text{P}, \leq 0.040\text{S}$)由 120 t 转炉-钢包吹氩-120 mm × 120 mm 连铸工艺冶炼。为提高 HRB400 $\Phi 12 \sim 22$ mm 热轧带肋钢筋的综合力学性能,冶炼时进行加 5 kg/t_钢 MnSiN + 0.4 ~ 0.9 kg/t_钢 FeV, 10 kg/t_钢 MnSiN + 0.25 ~ 0.40 kg/t_钢 FeNb 和只加 0.40 ~ 0.75 kg/t_钢 VN 三种微合金化工艺试验。钢坯均热温度 1 150 ~ 1 250 °C,终轧温度 ≥ 950 °C,粗轧每道次压下量 $\geq 30\%$,精轧每道次压下量 $\geq 15\%$,轧后风冷。结果表明,合适的 FeV 或 VN 加入量为 0.5 kg/t_钢,合适的 FeNb 加入量为 0.3 kg/t_钢,经 V 或 Nb 微合金化后,钢中晶粒明显细化,各项性能满足标准要求。

关键词 HRB400 高强度钢筋 V Nb 微合金化 控制轧制 力学性能

Research and Production of Hot-Rolled Microalloying HRB400 High Strength Reinforcing Steel

Tang Haiyan¹, Li Jingshe¹, Yang Minsheng², Zhang Yabin² and Zheng Quanzhen²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Xinxing Ductile Iron Pipe Co Ltd, Wu'an 056300)

Abstract HRB400 high strength reinforcing steel ($\% : 0.19 \sim 0.25\text{C}, 0.40 \sim 0.60\text{Si}, 1.20 \sim 1.50\text{Mn}, \leq 0.040\text{P}, \leq 0.040\text{S}$) is melted by 120 t BOF-ladle argon blowing-120 mm × 120 mm billet casting process. In order to improve the comprehensive mechanical properties of $\Phi 12 \sim 22$ mm ribbed bar of hot-rolled HRB400 steel the three kinds of microalloying process tests i. e. adding 5 kg/t MnSiN + 0.4 ~ 0.9 kg/t FeV, 10 kg/t MnSiN + 0.25 ~ 0.40 kg/t FeNb and only adding 0.40 ~ 0.75 kg/t VN have been carried out during steelmaking. The pitting temperature of billet is 1 150 ~ 1 250 °C, the finishing rolling temperature for reinforcing steel bar is ≥ 950 °C, reduction of each pass in rough rolling $\geq 30\%$ and reduction of each pass in finishing rolling $\geq 15\%$, fanning cooling after rolling. Results show that the available adding amount of FeV or VN is 0.5 kg/t and that of FeNb is 0.3 kg/t; with microalloying by V or Nb, the grain in steel is finer obviously and each property of reinforcing steel meets the requirement of standard.

Material Index HRB400 High Strength Reinforcing Steel, V, Nb, Microalloying, Control Rolling, Mechanical Properties

钢筋作为混凝土建筑结构的主要增强材料,应用广泛。随着高层、大跨度、抗震、耐低温、耐火建筑结构的出现以及资源、能源、环境面临的严峻形势,要求钢筋具有更高的强韧性及良好的焊接性等综合性能,对钢液进行微合金化是实现这一要求的重要途径^[1-5],而微合金化效果的好坏和与之匹配的控轧控冷工艺有密切的关系。本文根据以往的生产经验及微合金化技术的基本理论,确定了适合新兴铸管一轧车间生产 HRB400 的控轧控冷工艺参数。

1 冶炼工艺及实验方案

HRB400 基本钢液成分见表 1。国标要求屈服强度 $R_{e1} \geq 400$ MPa,抗拉强度 $R_m \geq 570$ MPa,伸长率 $A \geq 14\%$ 。为满足钢材的强度、韧性以及焊接性能,碳当量(Ceq)应小于 0.54。冶炼工艺流程为:120 t 转炉 → 吹氩站 → 连铸。转炉出钢温度控制在 1 590 ~ 1 610 °C,挡渣出钢,出钢过程进行脱氧合金化:出钢前往

表 1 试验钢筋目标化学成分 / %

Table 1 Aim chemical composition of test reinforcing steel / %

C	Si	Mn	P	S
0.19 ~ 0.25	0.40 ~ 0.60	1.20 ~ 1.50	≤ 0.040	≤ 0.040

钢包内加约 2/3 总量的 SiAlBa 脱氧剂,在钢水出至 1/4 ~ 1/3 时开始加入 SiC、SiMn,余下部分的 SiAlBa 以及 FeV 或 FeNb 和 SiMnN,出钢至 2/3 ~ 3/4 时加完全部合金;出钢完毕钢包进入 Ar 站,喂线、吹 Ar 精炼。浇铸温度 1 515 ~ 1 530 °C,铸坯断面 120 mm × 120 mm。铸坯热送至轧钢车间,编号装炉加热、轧制。设计冶炼方案如表 2 所示。

2 控轧控冷工艺条件的选择

2.1 轧制温度的确定

目前新兴铸管 HRB400 钢筋采用 FeNb 或 FeV 进行微合金化。钕微合金化冶炼的三级钢为裂纹敏感型钢种,连铸控制需做到以下几点:(1)实施保护

表 2 微合金化冶炼方案
Table 2 Scheme for microalloying smelting

方案	炉次	合金加入量/(kg·t ^{钢-1})			
		MnSiN	VN	FeV	FeNb
S-1	1,2	5		0.4	
	3,4	5		0.5	
	5,6	5		0.9	
S-2	7,8	10			0.25
	9,10	10			0.30
	11,12	10			0.40
S-3	13,14		0.4		
	15,16		0.5		
	17,18		0.75		

浇铸,保证铌铁的回收率;(2)保证二冷水的冷却均匀且拉速稳定;(3)矫直温度 ≥ 950 °C,以避免裂纹敏感区;(4)轧制时加热温度 ≥ 1100 °C,时间 ≥ 1.5 h,以保证Nb(C,N)充分固溶。终轧温度 ≥ 950 °C,以保证在再结晶区域轧制而不发生混晶。综合加热温度对各因素产生的影响,并采用比较适合实际生产和各钢厂试验数据的公式(1)计算合金化元素的完全固溶温度,以此作为加热温度的参考值。表3是根据式(1)计算的微合金化钢中C、N、Nb含量和固溶温度的关系。

$$\lg[\text{Nb}] \left([\text{C}] + \frac{12}{14}[\text{N}] \right) = 3.97 - \frac{8800}{T} \quad (1)$$

表 3 不同 C、N 含量和温度下的平衡固溶 Nb 含量 / %
Table 3 Equilibrium solution Nb content in steel with different C, N content and temperature of liquid / %

均热 温度/°C	0.2C, 0.004N	0.2C, 0.008N	0.2C, 0.012N	0.2C, 0.016N	0.2C, 0.020N	0.2C, 0.024N
1300	0.1167	0.1148	0.1129	0.1111	0.1094	0.1077
1250	0.0765	0.0752	0.0740	0.0728	0.0716	0.0705
1200	0.0487	0.0479	0.0471	0.0463	0.0456	0.0449
1150	0.0300	0.0295	0.0290	0.0286	0.0281	0.0277
1100	0.0179	0.0176	0.0173	0.0170	0.0167	0.0165
1050	0.0102	0.0101	0.0099	0.0097	0.0096	0.0094
1000	0.0056	0.0055	0.0054	0.0053	0.0053	0.0052
950	0.0029	0.0029	0.0028	0.0028	0.0027	0.0027
900	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013

从表3中可以看出,在给定温度下,随钢中N含量增加,钢中平衡固溶的Nb含量逐渐减小。在相同的C、N含量下,随着温度的降低,平衡固溶的Nb含量也在降低。当钢中含0.020%~0.070%Nb时,均热温度在1150~1250 °C即可以完全固溶。当采用V微合金化时,由于其固溶度积比Nb(C,N)的大,故在与上表示出的相同含量下所需的固溶-析出温度更低,在生产中可采用和Nb微合金化时相同的加热温度,以保证V(C,N)的完全固溶-析出。由于

[C]远超出[N]、[Nb],由式(1)可知,[C]对轧制加热温度及时间有很大的影响。当[Nb]一定时,实际生产中一般根据[C]对加热时间作出相应的调整。

新兴铸管一轧车间确定的基本轧制制度(规格: $\Phi 12$ 、14、16、18、20、22 mm)如表4所示。具体轧制工艺参数根据钢中成分及规格作相应调整。

表 4 确定的轧制制度
Table 4 Defined schedule for rolling

项目	参数值	
温度控制/°C	均热段	1150~1250
	加热段	1050~1200
配风控制(空煤比)	均热段	0.5~0.6:1
	加热段	0.7~0.8:1
烟气温度控制/°C	80~120	

一般1号、4号和7号风机的开度分别为60%、50%和30%,配水量目前还无法准确定量,根据经验水箱阀门半开。

2.2 道次压下量的确定

每道次变形量愈大,最终再结晶后的晶粒尺寸愈小。如果最后3道次变形至少约25%,再结晶控制轧制的25 mm板可以获得20 μm 的细小奥氏体晶粒。新兴铸管一轧车间在头几道次采用高温大压下,平均每道次压下量大于30%,而后几道次采取每道次大于15%的相对较小的压下量,轧后采取空冷。

3 HRB400 钢筋微观组织和性能分析

3.1 微观组织

对V和Nb微合金化生产的HRB400钢筋从轧后不同部位取样(距外壁1 mm、2 mm、中心),采用NIKON OPTIPHOT-100光学显微镜和LUZEX-F图像分析仪检测了试样的金相组织,如图1所示。

由图1可知,用V和Nb微合金化后,HRB400钢筋中的显微组织主要是铁素体和珠光体。N以及V、Nb等微合金化元素的加入明显细化了晶粒,增加了珠光体的体积分数。图1也可看出,从试样外壁到中心,其微观组织比较均匀,这表明本研究选择的轧制制度较为合理,均热温度及均热时间保证了钢中的组织均匀性。

3.2 性能分析

所有炉次的化学成分均满足企业内控成分标准,其 C_{eq} 平均值仅为0.45,远小于国标的规定值(< 0.54)。各炉次屈服强度(R_{eL})、抗拉强度(R_m)、伸长率(A)均符合国标要求(图2)。

由图2可以看出:(1)当FeV加入量增大时,屈

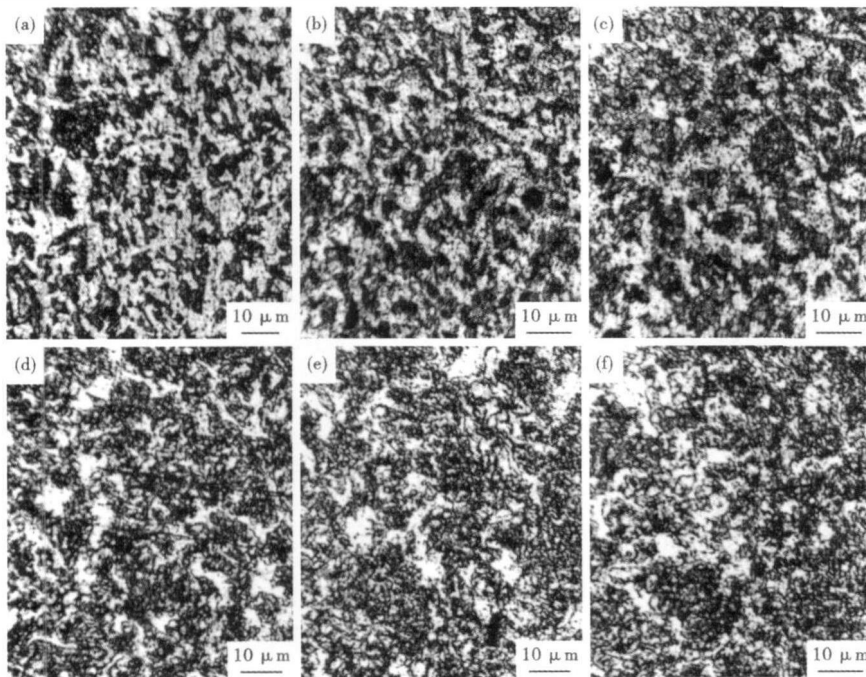


图1 HRB400 钢筋的组织形貌, ×500: (a) (b) (c) V 微合金化; (d) (e) (f) Nb 微合金化; (a) (d) 距表面 1 mm; (b) (e) 距表面 2 mm; (c) (f) 中心

Fig. 1 Morphology of structure of HRB400 reinforcing steel, ×500: (a) (b) (c) V microalloying, (d) (e) (f) Nb microalloying; (a) (d) distance from surface- 1mm, (b) (e) distance from surface- 2mm, (c) (f) center

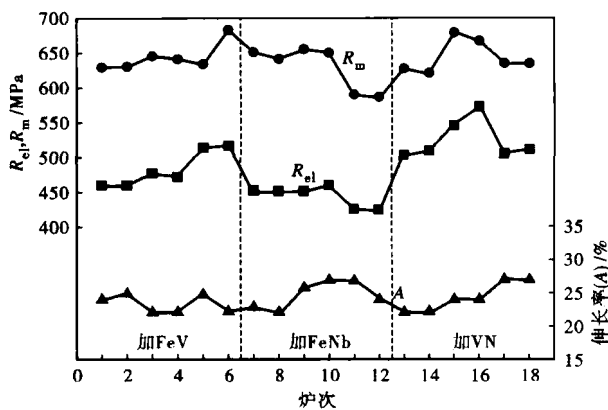


图2 各炉次微合金化 HRB400 钢筋的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of each heat of microalloying HRB400 reinforcing steel

服强度和抗拉强度明显增加, 而伸长率相差不大。当 FeV 加入量提高到 0.9 kg/t_钢 时, 虽然总体上其性能提高, 但性能不够稳定。因此, 采用 MnSiN、FeV 微合金化生产时, 将 FeV 加入量定为 0.50 kg/t_钢。

(2) 随着 FeNb 加入量的增大, 伸长率增大, 而屈服强度和抗拉强度先增大后减小。当 FeNb 的加入量由 0.25 kg/t_钢 升高到 0.40 kg/t_钢 时, HRB400 钢筋的屈服强度由 450 MPa 减至 423 MPa, 抗拉强度

由 645 MPa 减至 584 MPa。可见, Nb 的加入量过高, 反而使钢的性能变差。这可能是由于钢中 [Nb] 过高时, 过量的 [Nb] 无法固溶, 反而会形成夹杂影响钢的力学性能。本试验方案中 FeNb 的适宜加入量为 0.3 kg/t_钢。

(3) 当 VN 加入量由 0.4 kg/t_钢 提高到 0.50 kg/t_钢 时, 钢中 V 含量显著提高, 但当 VN 加入量提高到 0.75 kg/t_钢 时, 钢中 V 并无明显提高。从力学性能来看, 随着 VN 加入量的增大, 屈服强度和抗拉强度均是先增大后又减小, 而伸长率一直增大。可以认为 VN 的适宜加入量为 0.5 kg/t_钢。

4 结论

(1) 加入 Nb、V 明显细化 HRB400 高强度钢筋晶粒, 提高了钢筋的力学性能。

(2) 采用 MnSiN、FeV 微合金化生产 HRB400 钢筋时, 当 MnSiN 加入量为 5 kg/t_钢 时, 合适的 FeV 加入量为 0.50 kg/t_钢。

(3) 使用 MnSiN、FeNb 微合金化生产 HRB400 钢筋时, 随着 FeNb 加入量的增大, 伸长率有所增大, 而屈服强度和抗拉强度有下降趋势, 所以 FeNb 的适宜加入量为 0.3 kg/t_钢。

国家自然科学基金项目 (No51074021) 资助

参考文献

- 1 杨才福, 张永权, 柳书平. 钒、氮微合金化钢筋的强化机制. 钢铁, 2001, 36(5): 55
- 2 完卫国, 王莹, 吴结才. 钒氮微合金化技术的研究与应用综述. 江西冶金, 2004, 24(5): 26
- 3 东涛, 付俊岩. 钒/钒微合金化 400 MPa Ⅲ级钢筋的生产技术. 中国冶金, 2004, 14(5): 1
- 4 王厚昕, 李正邦. 中国热轧带肋钢筋的发展和现状. 中国冶金, 2006, 16(6): 6
- 5 王蓬, 杨帆, 李宏伟, 等. 钒氮合金中高氮检测的新方法. 钢铁钒钛, 2005, 26(3): 64

唐海燕 (1970-), 女, 博士, 讲师, 纯净钢的工艺与理论研究。

收稿日期: 2011-04-06