微合金化

HRB400热轧带肋钢筋的微合金化研究

唐海燕[1], 李京社[1], 杨明生[2], 张亚斌[2], 郑全正[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, 河北 武安 056300)

摘 要: 为提高热轧带肋钢筋 HRB400的综合力学性能, 试验了三种增氮剂 Si_3N_4、VN 和 MnSiN 的增氮效果, 并将它们与 FeV、FeNb、FeTi等合金配比进行微合金化研究。以钢筋的屈服强度、抗拉强度和延伸率作为力学性能的评价指标。研究结果表明: MnSiN的增氮效果最为明显, 且它的使用可降低 FeV、FeNb合金的消耗量, 从而降低生产成本。采用 MnSiN、FeV微合金化生产 HRB400钢筋时, 当 MnSiN在钢中的加入量为 5 kg/t时, FeV 的适宜加入量为 0.50 kg/t。

关键词: HRB400; 微合金化; 增氮剂; 力学性能
中图分类号: TF 704.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-7638(2010)04-0028-05

Microalloying Study on HRB400 Hot Rolled Ribbed Reinforced Bar

Tang Haiyan[1], Li Jingshe[1], Yang Mingsheng[2], Zhang Yabin[2], Zheng Quanzheng[2]

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

Abstract To improve comprehensive mechanical properties of hot-rolled ribbed reinforced bar HRB400, the effects of increasing nitrogen of nitride alloys Si_3N_4, VN and MnSiN were tested respectively. Microalloying research was carried out by the combination of nitride alloys and FeV, FeNb and FeTi. The yield strength, tensile strength and elongation of bar were used as the evaluation index of mechanical properties. The results show that the effect of increasing nitrogen of MnSiN is the most obvious, and its use can reduce the consumption of alloys FeV and FeNb, further reduce production costs. When producing HRB400 with MnSiN and FeV microalloying, 5 kg of MnSiN alloy and 0.50 kg of FeV for one ton of steel are appropriate ratios.

Key words HRB400; microalloying; nitrogen increase agent; mechanical properties

0 引言

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。文献报道的微合金化技术大多是用 FeV、FeNb、VN进行微合金化[1-6], 但由于近年来铁合金价格上涨, 导致生产钢筋的利润下降。因此笔者尝试了 Si_3N_4、VN 和 MnSiN 的增氮效果, 并将它们与 FeV、FeNb、FeTi等合金进行了各种配比, 以探索生产高强度热轧钢筋 HRB400的新合金化工艺。

收稿日期: 2010-07-02
作者简介: 唐海燕(1970-), 女, 内蒙古人, 讲师, 博士, 主要从事纯净钢工艺与理论研究。

1　工业试验冶炼工艺及条件

试验钢种是 HRB400, 基本钢液成分见表 1。国标要求屈服强度 $R_{eL} \geqslant 400$ MPa, 抗拉强度 $R_m \geqslant 570$ MPa, 延伸率 $A \geqslant 14\%$。为满足钢材的强度、韧性以及焊接性能, 碳当量 C_{eq}应小于 0.54%。冶炼工艺流程为: 转炉→吹氩站→连铸。出钢温度控制在 1 590~1 610 ℃, 挡渣出钢, 出钢过程进行脱氧合金化。合金加入顺序为: 出钢前往钢包内加约 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和增氮剂, 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气进行精炼。精炼完毕上连铸平台, 进行浇注, 浇注温度 1 515~1 530 ℃, 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。

表 1　试验钢种成分

Table 1　Steel compositions for industrial test　%

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

2　试验方案及结果分析

2.1　增氮剂的选取

选用 Si_3N_4、VN 和 SiMnN 三种含氮合金作为增氮剂, 其成分见表 2。微合金化使用的合金种类及成分列于表 3, 试验方案如表 4所示。

表 2　增氮剂种类及主要成分

Table 2　Varieties of nitrogen increasing agents and main compositions　%

增氮剂	Si	Mn	Ca	V	N	Fe	C	P	S	Al	Cr
VN	0.07			76	12.0		7.0	0.02	0.20	0.10	
Si_3N_4	54.0				≥37.0						
SiMnN	17~18	60.0			5~6						

表 3　合金种类及主要成分

Table 3　Alloy varieties and main components　%

合金	V	Ti	Nb	C	Si	P	S	Al	Mn
FeV	≥50.0			≤0.40	≤2.0	≤0.07	≤0.04	≤0.5	≤0.50
FeNb			66.5	≤0.20	≤3.00	≤0.20	≤0.10	≤2.00	
FeTi		32.5		0.1	4.5	0.05	0.03	6.5	2.4

表 4　增氮剂试验方案

Table 4　Experiment scheme for nitrogen increase agent

方案	炉次	合金加入量 /(kg·t^{-1})				
		Si_3N_4	MnSiN	VN	FeV	FeNb
S-1	1#, 2#	0.4			0.6	
	3#, 4#	0.5			0.6	
	5#, 6#	0.6			0.6	
S-2	7#, 8#		5.0			0.3
	9#, 10#		7.5			0.3
	11#, 12#		10			0.3
S-3	13#, 14#			0.4		
	15#, 16#			0.5		
	17#, 18#			0.75		

2.2　增氮剂增氮效果分析

各炉次铸坯中元素的化学成分及氮含量如表 5所示。

由表 5可知, 各炉次铸坯的化学成分基本满足企业内控标准。对于 S-1方案, 碳当量 C_{eq}平均值为 0.44%, 远小于国家标准的 0.54%。当吨钢 Si_3N_4 的加入量为 0.5 kg/t时, 3#、4#炉次钢中 T[N] 含量分别为 99×10^{-6}、105×10^{-6}, 平均 102×10^{-6}。

但当 Si_3N_4 的加入量增加到 0.6 kg/t时, 钢中的 T[N]含量不再增加, 这可能是由于 Si_3N_4 的密度过小, 部分合金没有溶解就上浮到渣中, 没有达到增氮效果。这说明使用 Si_3N_4 与 FeV (0.6 kg/t)配比进行增氮合金化时, Si_3N_4 的合适加入量为 0.5 kg/t, Si_3N_4 与 FeV 的最佳配比为 1∶1.2。

对于以 MnSN 为增氮剂的 S-2方案, 随着其加入量的增加, 钢中的 Mn含量没有明显增加, 而氮含量增加的趋势比较明显。与 Si_3N_4 相比, 当 MnSN加入量为 5 kg/t时, 其增氮效果就远远超过 Si_3N_4 加入量为 0.6 kg/t时的效果。对比其成本, 使用 MnSN 作为增氮剂比使用 Si_3N_4 经济, 可进一步降低含 V、Nb合金的消耗量。但是, 使用 MnSN 作为增氮剂时, 合金元素 Mn的回收率不高。同时, 由于 MnSN 在出钢过程中加入, 钢中的夹杂物也会增加。

对于使用 VN 增氮剂的 S-3方案, 其加入量的增加对钢中 V 含量有较大影响。VN 加入量由 0.4 kg/t提高到 0.5 kg/t时, 钢中 V 含量由 0.31% 提高到 0.44%。但当 VN 加入量提高到 0.75 kg/t时, 钢中 V 含量不再增加。从合金元素 V 的收得率考虑, VN 的加入量不宜过高, 加入 0.5 kg/t已能够满足 HRB400的成分要求。

综合考虑以上三种增氮剂的增氮效果和成本消耗, 采用 MnSN 作为 HRB400钢筋的增氮剂是比较经济合理的。

表 5　各炉次铸坯中元素的化学成分及氮含量

Table 5　The chemical compositions of billet with different heats and nitrogen content

炉次	铸坯化学成分 / %								铸坯 T[N] × 10^6
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	C_{eq}	
1#	0.23	0.55	1.49	0.027	0.016	0.033		0.485	82
2#	0.20	0.57	1.40	0.032	0.034	0.030		0.439	79
3#	0.20	0.50	1.38	0.029	0.018	0.030		0.436	105
4#	0.20	0.55	1.37	0.024	0.018	0.032		0.435	99
5#	0.20	0.60	1.38	0.021	0.016	0.033		0.437	97
6#	0.20	0.63	1.36	0.022	0.028	0.034		0.433	98
平均	0.21	0.57	1.40	0.026	0.022	0.032		0.444	93
7#	0.18	0.47	1.33	0.02	0.04		0.02	0.402	140
8#	0.18	0.48	1.24	0.02	0.04		0.02	0.387	146
9#	0.19	0.58	1.44	0.02	0.04		0.02	0.430	155
10#	0.20	0.53	1.36	0.03	0.04		0.02	0.427	164
11#	0.19	0.58	1.34	0.02	0.04		0.02	0.413	200
12#	0.20	0.50	1.26	0.02	0.04		0.01	0.410	199
平均	0.19	0.52	1.33	0.02	0.04		0.02	0.410	167
13#	0.23	0.65	1.45	0.018	0.023	0.030		0.475	91
14#	0.23	0.58	1.37	0.019	0.035	0.032		0.462	93
15#	0.19	0.61	1.38	0.020	0.018	0.040		0.428	117
16#	0.19	0.55	1.48	0.027	0.018	0.047		0.446	115
17#	0.21	0.57	1.44	0.016	0.015	0.042		0.458	121
18#	0.17	0.48	1.37	0.029	0.012	0.044		0.407	120
平均	0.20	0.57	1.42	0.020	0.020	0.035		0.446	110

2.3　微合金化工业试验

2.3.1　试验方案

在以上研究的基础上, 分别将增氮剂 Si_3N_4 的吨钢加入量定为 0.5 kg/t, MnSN 的吨钢加入量定为 5 kg/t, 然后配入不同的 FeV、FeNb、FeTi合金进行微合金化, 铸坯经轧制后测定其力学性能, 以确定工业试验的最优增氮添加剂以及合金化方式。冶炼方案见表 6。

2.3.2　各方案的微合金化效果分析

经检验, 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%, 远小于国标规定值 (小于 0.54%), 保证了钢筋具有较高的强度和良好的韧性、焊接等综合性能。各炉次屈服强度 R_{eL}、抗拉强度 R_m、延伸率 A 见图 1。

从图 1看出, 以上炉次钢的力学性能均符合国标要求。

在 S-4方案 (19~24炉次)中, Si_3N_4 的加入量相同而 FeV 不同。可以看出, 随着 FeV 加入量的增大, 屈服强度、抗拉强度以及延伸率均增大。且每增加 0.05 kg/t的 FeV, 钢中的 V平均增加 0.2%。

表 6　冶炼方案安排

Table 6　Smelting scheme

方案	炉次	吨钢合金加入量 / (kg·t⁻¹)					
		Si_3N_4	MnSN	VN	FeV	FeNb	FeTi
S-4	19, 20	0.5			0.70		
	21, 22	0.5			0.75		
	23, 24	0.5			0.80		
S-5	25, 26		5		0.4		
	27, 28		5		0.5		
	29, 30		5		0.9		
S-6	31, 32	0.5				0.55	1.5
	33, 34	0.5				0.65	1.5
	35, 36	0.5				0.70	1.5
S-7	37, 38		10			0.25	
	39, 40		10			0.30	
	41, 42		10			0.40	
S-8	43, 44			0.4			
	45, 46			0.5			
	47, 48			0.75			

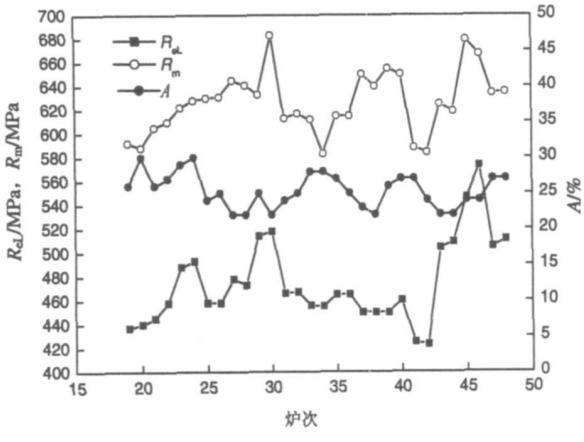

图 1　试验方案各炉次的力学性能

Fig 1　The mechanical performances of heats in the experiment

仅从钢的性能上看, FeV 加入量为 0.80 kg/t时效果最好, 但考虑到成本问题, FeV 加入量为 0.70 kg/t时, 钢的质量就已经达到国家标准。由于 Si_3N_4 密度较小, 生产中应考虑加入时机和粒度对氮的回收率的影响。

S-5方案 (25~30炉次) 中, MnSN 的加入量相同而 FeV不同。由图 1可以看出, 当 FeV 加入量增大时, 屈服强度和抗拉强度明显增加, 而延伸率相差不多。当 FeV 加入量提高到 0.9 kg/t时, 虽然总体上其性能大大提高, 但性能不够稳定。因此, 采用 MnSN、FeV 微合金化生产时, 将 FeV 加入量定为 0.50 kg/t。当对钢的强度要求较高时, 可以提高 FeV 合金的加入量。

S-6方案 (31~36炉次) 中, Si_3N_4、FeTi的加入量相同而 FeNb不同。生产的各炉次钢的元素含量均满足 HRB400钢的国家标准, 但 FeNb加入量的增加并没有使钢中 Nb含量明显增加。当 FeNb的加入量为 0.65 kg/t时, 屈服强度最低 (为 456 MPa), 而当 FeNb为 0.55 kg/t和 0.7 kg/t时屈服强度基本相同 (为 465 MPa)。当 FeTi的加入量为 0.65 kg/t时, 延伸率较其他两种含量高, 达到 28%, 而抗拉强度略小一些。由此可见, 当 FeNb的加入量控制在 0.55 kg/t时, 能够取得性能和成本的最优值。

S-7方案 (37~42炉次) 中, MnSN 的加入量相同而 FeNb不同。随着 FeNb加入量的增大, 延伸率增大, 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升高到 0.40 kg/t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与轧制制度有关, 轧制制度不尽合理造成了力学性能的下降。另外, 钢中 Nb含量过高时, 过量的 Nb无法固溶, 反而会形成夹杂。因此, 本试验方案中 FeNb的最优加入量为 0.3 kg/t。

S-8方案的各炉次只使用了 VN 合金, 当其加

入量由 0.4 kg/t提高到 0.5 kg/t时,钢中 V含量大大提高。但当 VN加入量提高到 0.75 kg/t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,而延伸率一直增大。也就是说,VN的加入,会改善 HRB400钢的质量,但是如果加入量过大,钢的性能也不稳定,同时也会使生产成本增加。因此,本研究得出 VN的适宜加入量为 0.5 kg/t。

通过以上对比分析,各方案中较优配比(kg/t)是(0.5 Si_3N_4+ 0.70 FeV)、(5 MnSiN+ 0.5 FeV)、(0.5 Si_3N_4+ 0.55 FeNb+ 1.5FeTi)、(10 MnSiN+ 0.3 FeNb)、0.50VN。

在钢筋力学性能满足国标的前提下,使用(5 MnSiN+ 0.5 FeV)进行配比,其 FeV加入量比使用(0.5 Si_3N_4+ 0.70 FeV)配比时钢材力学性能好,且加入量可大大减少。使用(10 MnSiN+ 0.3 FeNb)配比较 S-6方案既节约 FeNb用量又提高了钢筋性能。由此可见,MnSiN合金是较理想的高氮微合金化增氮剂。

3 结论

1)通过对 Si_3N_4、MnSiN、VN三种增氮剂增氮效果的比较分析得出:MnSiN的增氮效果最为明显,它的使用可降低 FeV、FeNb合金的消耗量,从而降低生产成本。但是,使用 MnSiN作为增氮剂时,元素 Mn的回收率不高。同时,由于 MnSiN在出钢过程中加入,钢中的夹杂物也会增加。

2)采用 MnSiN、FeV微合金化生产 HRB400钢筋时,当 MnSiN加入量为 5 kg/t时,FeV的适宜加入量为 0.50 kg/t。

3)使用 MnSiN、FeNb微合金化生产 HRB400钢筋时,随着 FeNb加入量的增大,延伸率有所增大,而屈服强度和抗拉强度有下降趋势,所以 FeNb不宜加太多。

参考文献

[1] Li Mingru, Yue Feng. Trial production of HRB400 bar by microalloying process of "FeV + nitrogen enrichment agent" [J]. Research on Iron & Steel, 2005 (6): 14-17.
(李明儒, 岳峰. "钒铁 +富氮剂"微合金 HRB400钢筋生产试验[J]. 钢铁研究, 2005 (6): 14-17.)

[2] Zhang Decai. Productive practice of Nb micro-alloyed HRB400 reinforced bar [J]. China Metallurgy, 2008, 18(4): 12-14.
(张德才. HRB400(Nb)钢筋的生产实践[J]. 中国冶金, 2008, 18 (4): 12-14)

[3] Wan Weiguo, Wang Ying, Wu Jiecai. The review of researches and applications of V-N microalloying technology [J]. Jiangxi Metallurgy, 2004, 24 (5): 26-31.
(完卫国, 王莹, 吴结才. 钒氮微合金化技术的研究与应用综述[J]. 江西冶金, 2004, 24 (5): 26-31.)

[4] Dong Tao, Fu Junyan. Production technology of Nb/V microalloying 400 MPa III grade reber [J]. China Metallurgy, 2004 (5): 1-6.
(东涛, 付俊岩. 铌/钒微合金化 400 MPa III级钢筋的生产技术[J]. 中国冶金, 2004 (5): 1-6.)

[5] Wang Houxin, Li Zhengbang. Status and development of hot ribbed bars in China [J]. China Metallurgy, 2006, 16 (6): 6-10.
(王厚昕, 李正邦. 中国热轧带肋钢筋的发展和现状[J]. 中国冶金, 2006, 16 (6): 6-10.)

[6] Wang Peng, Yang Fan, Li Hongwei, *et al*. A new method to analyze nitrogen content of VN alloy [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2005, 26 (3): 64-68.
(王蓬, 杨帆, 李宏伟, 等. 钒氮合金中高氮检测的新方法[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26 (3): 64-68.)

编辑　阮驰程　余文华