

钒微合金化HRB400热轧带肋钢筋加热制度探讨

栾兆亮, 焦红, 王学安, 董昌兴

(莱芜钢铁股份有限公司, 山东 莱芜 271104)

摘要: 通过探讨钒在HRB400热轧带肋钢筋中的强化作用机理, 对影响其弥散析出的加热制度进行了分析, 在此基础上, 改进了加热和冷却工艺, 杜绝了强度不合格的现象, 稳定并提高了产品质量。

关键词: HRB400; 热轧带肋钢筋; 钒; 强度; 加热制度

中图分类号: TG335 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620 (2006) 03-0054-03

Discussion of the Heating System for Vanadium Alloy HRB400 Hot Ribbed Steel Bars

LUAN Zhao-liang, JIAO Hong, WANG Xue-an, DONG Chang-xing

(Laiwu Iron and Steel Co., Ltd., Laiwu 271104, China)

Abstract: With the discussion of vanadium function mechanism for the HRB400 hot ribbed steel bars, the heating system which influenced dispersed precipitate is analyzed. On this basis, the heating and cooling systems are improved, then stopping the phenomenon of the strength disqualification of HRB400 hot ribbed bars, and stabilizing and improving the product quality.

Key words: RB400; hot ribbed steel bar; vanadium; strength; heating system

1 前言

莱芜钢铁股份有限公司(简称莱钢)在生产HRB400国标热轧带肋钢筋时采用强化元素V, 应用合金VN。但力学性能波动较大, 并存在强度不合格的炉次。通过一系列技术检查发现, 连铸坯的加热是V元素发挥作用的前提条件, 即钢筋的性能与V元素的弥散析出量存在明显的对应关系, 而合理的加热制度是保证V元素充分析出的先决条件。为此, 莱钢基于生产经验的总结和产品实物的检验, 结合V元素强化作用机理的分析, 对HRB400加热工艺及冷却系统进行了改进和改造, 确保了产品质量的稳定。

2 实物检验状态

2.1 标准规定

HRB400热轧带肋钢筋化学成分和强度的国家标准及莱钢内控标准要求见表1。

表1 HRB400热轧带肋钢筋化学成分和强度的标准要求

标准	化学成分/%						强度/MPa	
	C	Si	Mn	P	S	V	Re	Rm
国标GB1499-98	≤0.25	≤0.80	≤1.60	≤0.045	≤0.045		≥400	≥570
莱钢内控标准	0.18~ 0.25	0.30~ 0.60	1.30~ 1.60	≤0.040	≤0.040	0.04~ 0.10	≥410	≥580

2.2 正常生产检验数据统计

统计的正常生产的HRB400热轧带肋钢筋的化学成分和力学性能见表2。

表2 HRB400检验指标统计情况

项目	化学成分/%						强度/MPa	
	C	Si	Mn	P	S	V	Re	Rm
最大	0.24	0.60	1.55	0.034	0.039	0.080	540	695
最小	0.18	0.42	1.34	0.014	0.022	0.045	445	560
平均	0.205	0.519	1.420	0.020	0.030	0.063	496	636

由表2可见，主要化学元素均符合国标和企业内控标准要求，成分控制相对稳定。从强度值统计情况看，HRB400的屈服强度指标明显富余，保证能力较好，但抗拉强度波动较大，并有不合格炉次存在。统计中还发现，每个月大约5%左右的炉次抗拉强度在国标或内控标准下限边缘。

3 钒的强化作用机理与溶解析出规律

莱钢HRB335力学指标控制水平为：屈服强度360MPa，抗拉强度530 MPa。由于增加了元素V，HRB400的屈服和抗拉强度均提高了约100MPa。

元素V是较强的N、C化物形成元素，能够形成V(C, N)弥散颗粒。有资料显示^[1]，VN在奥氏体中的溶解度远远小于VC，冷却过程中在奥氏体温度范围区间，析出物为VN，随着温度的进一步降低，原子扩散受到限制，则析出物由VN转变为复合的V(C, N)。弥散析出物能够起到沉淀和细晶强化的效果，显著地提高金属的强度。

弥散析出的首要条件是加热温度，即必须使连铸坯具有足够的奥氏体化温度，使合金元素充分溶入奥氏体中并均匀化。据相关资料经验公式^[2]：

$$\lg[V\%][N\%]=3.40-8830/T$$

按照莱钢HRB400成分的控制水平，V取0.060%，N取 90×10^{-6} ，则V的溶解和固溶温度约为976℃。要保证合金元素V的作用充分发挥，同时也考虑到合金元素的溶解速度、加热炉煤气质量和压力的波动、铸坯加热的不均匀性、生产节奏、轧机负荷等原因，在实际生产中，加热温度往往高于此温度。目前莱钢在生产HRB400时，规定加热段温度范围为1100~1230℃，均热段温度范围为1100~1200℃，两个温度段停留时间均为30min左右。

由于加热温度能够影响到V的溶解和析出，进而影响到钢材的性能，取连续生产的100炉，对实际连铸坯出钢温度进行了测量，并对应最终产品力学性能，结果见表3。由表3可知，在工艺规程范围内，出钢温度的提高反而能使HRB400的性能升高，尤其是温度大于1140℃后，性能提高更为明显。

表3 连铸坯出钢温度和对应的性能

温度范围/℃	炉数	平均抗拉强度/MPa
1100~1120	13	615
1120~1140	30	616.7
1140~1160	41	632.7
1160~1180	15	653.1
1180~1200	1	663.3

对出钢温度相对较低和较高的炉次进行分析时发现，产品实物的化学成分、钢筋的实际尺寸、金相组织均相差不大，但合金元素V的析出率随温度的变化有较为明显的差别。为此，取冶炼条件相对稳定的一批次，其中V含量为0.060%~0.064%，N含量为 $(80\sim90) \times 10^{-6}$ ，共计22炉，采用电解法测定V的析出率^[3]，并与出钢温度进行对照，结果见表4。

表4 HRB400的强度、出钢温度与析出率

序号	Re/MPa	Rm/MPa	出钢温度/°C	析出率/%
1	505	635	1133	55.1
2	540	655	1144	60.9
3	515	630	1131	49.1
4	475	585	1118	40.5
5	500	615	1098	39.8
6	465	575	1110	41.3
7	460	590	1125	49.8
8	500	625	1106	44.1
9	510	635	1120	45.6
10	505	625	1128	44.3
11	535	660	1179	68.3
12	525	650	1145	60.5
13	495	615	1126	44.1
14	530	650	1172	66.2
15	515	640	1136	54.9
16	540	660	1169	61.1
17	495	605	1103	40.1
18	495	600	1100	46.2
19	510	635	1127	43.8
20	525	650	1140	55.3
21	525	650	1156	59.2
22	525	650	1150	58.3
最大	540	660	1179	68.3
最小	460	575	1098	39.8
极差	80	85	81	28.5

由表4中的数据看出，析出率和出钢温度有较为明显的对应关系，随着出钢温度的提高，析出率提升。这也说明了加热温度是影响V弥散析出的一个重要因素。

4 工艺措施改进

4.1 加热制度

随着奥氏体温度的降低，V的弥散析出遵循沉淀动力学“C”曲线规律^[1]，根据不同成分尤其是V、N元素的含量，析出曲线位置和“鼻尖”温度不同，对HRB400钢筋（V0.06%~0.12%），一般认为该“C”曲线的鼻尖温度为870°C左右，此温度下，析出速率最大。

为保证合金元素溶入奥氏体中并且均匀化，实际生产中加热温度要控制在固溶温度以上，但考虑到合金元素充分固溶需要的扩散时间等因素，实际加热温度往往更高一些，相关的资料和研究^[4]也指出，为了确保V的作用充分发挥，加热一般控制在1150~1200°C。结合莱钢含V钢筋的生产实践与统计分析，HRB400加热段温度范围由1100~1230°C调整为1170~1230°C，均热段温度范围由1100~1200°C调整为1150~1200°C。

4.2 冷却制度

加热温度的提高，使终轧温度由原先的1030°C提升到1080°C。终轧温度的提高，一方面能够导致晶粒尺寸长大，另一方面将导致最终钢材表面氧化严重，影响了产品的外观质量。为此，对轧后穿水冷却工艺进行了改进，穿水箱由原先的1节增加为3节，适当加大水压，使钢筋表面温度降低90~120°C。这样使经过穿水冷却后钢筋的温度在950°C左右，根据上述对析出规律分析可知，工艺措施实施后，钢材的轧后温降对V的析出影响不大。

4.3 合金元素V的控制

在对加热和冷却制度调整的同时，经过统计分析发现，保证加热和冷却前提下，V含量在0.050%以上的性能更加稳定，不但满足标准，而且波动范围也明显减小。但考虑到合金的节约，在炼钢工序根据不同

的合金成分含量和收得率水平，保持工艺稳定的条件下，严格按照规程进行操作，准确计算合金的加入量，提高控制精度，V的控制范围在0.050%~0.070%就可以满足国标及企业内控标准要求。

5 改进效果

5.1 杜绝了性能废品

工艺措施改进实施后，钢材成分稳定、内部组织均匀、性能良好，HRB400热轧带肋钢筋，没有出现性能废品。对2005年5~8月份生产的HRB400力学性能进行了统计，Re最大565MPa，最小460MPa，平均509MPa；Rm最大690MPa，最小605MPa，平均645MPa。

措施实施后，抗拉强度的最小值大于莱钢内控标准25MPa，大于国家标准35MPa，平均值比原来提高了约10MPa，而强度上限没有明显的变化。钢筋的性能波动范围减少，强度指标得到了有效的保证。

由于穿水冷却可能增加钢材强度的时效敏感性，对不同规格的HRB400钢筋多次取双倍样进行分析，时间间隔为两个月，发现时效后钢材强度值平均下降5MPa左右，与未穿水HRB400强度的时效效果相同。此外，弯曲试验结果良好，未发现不合格的炉次。对延伸率的统计显示，HRB400钢筋的延伸率保持在21%左右，与措施实施前没有显著的变化，钢材的塑性指标良好。

改进轧后穿水冷却系统后，有效地避免了钢材表面的氧化起皮现象，提高了钢材的表面质量。

5.2 显微组织

对HRB400钢筋的金相检验，发现基体组织正常，由于表面冷却相对较快，所以边部晶粒尺寸明显较心部小（见图1、图2）。



图1 金相组织（F+P）400×（边部）



图2 金相组织（F+P）400×（心部）

5.3 焊接性能

对HRB400焊接性能进行了检验与试验，焊接试验结果显示，钢材的可焊性未受到影响，焊接后钢材的强度指标没有明显的下降，见表5（其中1、2分别代表两支同规格的钢筋）。

表5 HRB400焊接前后钢材强度值对比 MPa

序号	Re1	Re2	焊接后e	Rm1	Rm2	焊接后Rm
1	525	510	510	655	645	640
2	540	520	525	680	680	670
3	500	505	505	635	640	635
4	495	500	500	630	640	635
5	510	510	515	650	655	645
6	540	530	530	650	645	650
7	510	510	505	650	650	645
8	490	510	490	625	635	625
9	495	495	490	630	630	630
10	500	495	495	625	635	640

5.4 促进了生产节奏的提高

加热温度提高后，减轻了轧机负荷，释放了轧线产能。改进轧后穿水工艺后，加快了钢材的冷却，缩短了取样等待与检验时间，促进了钢材的快速入库和及时发货。

参考文献：

- [1] 斯坦尼什洛, 扎雅克. 含钒钢的沉淀和晶粒细化[C]. 钒应用技术国际研讨会论文集[A]. 北京, 2001, 282~295.
- [2] 白宗奇. 承钢HRB500螺纹钢试制[C]. 高强度钢筋研究与应用国际研讨会论文集[A]. 杭州, 2003, 268~270.
- [3] 阴海静. 运用电解方法分离碳、氮化物析出物[J]. 包钢科技, 2001, 27(2): 87~89.
- [4] 杨才福. V-N微合金化高强度钢筋的研究、生产与应用[C]. 高强度钢筋研究与应用国际研讨会论文集[A]. 杭州, 2003, 249~255.

[返回上页](#)