

VN合金化对HRB400钢筋力学性能的影响

张 伟, 阎志华, 鞠艳美

(莱芜钢铁股份有限公司, 山东 莱芜 271104)

摘 要: 用VN合金生产的HRB400钢筋强度明显提高, VN的细化效果比VFe好, 大量细小弥散的V(C, N)析出相是钒氮钢筋强度增加的主要原因。同时分析认为, 为确保钢筋力学性能合格, 炼钢工序应提高化学成分的均匀稳定性, 其中钒含量应控制在0.05%以上, 轧钢工序应严格执行加热和停轧降温制度。HRB400钢筋最佳的生产工艺是VN复合微合金化加控轧控冷工艺。

关键词: HRB400钢筋; 力学性能; 钒氮合金; 沉淀强化; 控轧控冷

中图分类号: TG142.33 文献标识码: B 文章编号: 1004-4620(2004)05-0053-03

Effects of VN Alloying on Mechanical Properties of HRB400 Hot Rolled Ribbed Bars

ZHANG Wei, YAN Zhi-Hua, JU Yan-Mei

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

Abstract: Investigates the effects of adding VN alloy and VFe alloy on mechanical properties and their strengthening mechanism of HRB400 hot rolled ribbed steel bar. The results show that the intensity of the HRB400 hot rolled ribbed steel bars produced by VN alloy is improved obviously, the refined effects of VN alloy are better than VFe alloy and a great deal dispersed V(C, N) is the main cause increasing the intensity of VN alloying reinforcing steel bars. At the same time, in order to insure the qualified mechanical properties, the content of main element should be enhanced control for increasing the uniformity and stability of the chemical components, the V content should be controlled than 0.05% in steel making and heating and rolling cooling schedule should be performed strictly in steel rolling. Therefore the best production process of HRB400 is VN microalloying following controlled rolling and controlled cooling technology.

Keywords: HRB400 hot rolled ribbed steel bar; mechanical properties; vanadium nitrogen; precipitation strengthening; controlled rolling and controlled cooling

1 前 言

通过在钢中加入少量的钒、铌、钛等微合金化元素起到细化晶粒和沉淀强化作用, 从而提高钢筋的强韧性。其中, 钒是最为常用的微合金化元素之一。本研究结合莱芜钢铁集团股份有限公司(简称莱钢)的生产实践, 探讨了添加VFe合金与VN合金对HRB400钢筋力学性能的影响。

2 生产检验情况

2.1 工艺流程

40t转炉冶炼→钢包内微合金化→吹氩→连铸150mm×150mm方坯→连轧。为保证碳氮化物充分溶解，开轧温度为1100~1200℃。

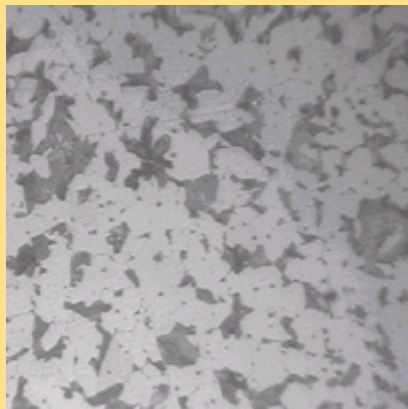
2.2 理化检验

对VFe和VN强化的钢筋进行性能统计，结果表明：VN钢筋的屈服强度比VFe钢筋高50MPa以上，抗拉强度平均高30MPa。采用VN合金的强化效果较稳定，每增加0.01%V，可提高屈服强度15MPa。取样进行理化检测，结果见表1。

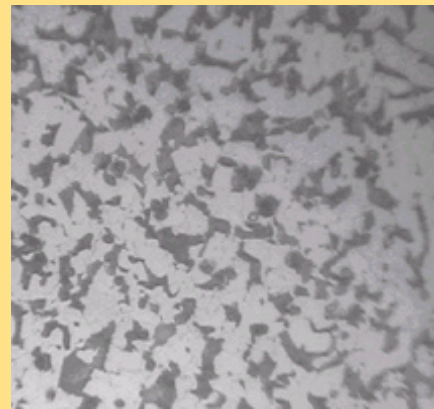
表1 HRB400热轧带肋钢筋理化检验结果

批号	屈服强度/MPa	化学成分/%						N×10 ⁻⁶	合金化
		C	Si	Mn	P	S	V		
01	395	0.19	0.45	1.47	0.020	0.037	0.076	57.6	钒铁
02	415	0.21	0.45	1.39	0.023	0.031	0.093	61.9	
03	425	0.23	0.50	1.42	0.021	0.028	0.095	63.2	
04	545	0.21	0.51	1.40	0.019	0.029	0.073	135.7	钒氮
05	558	0.20	0.49	1.45	0.026	0.028	0.075	134.0	
06	435	0.19	0.39	1.30	0.017	0.030	0.052	124.3	

由表1可知，与添加VN合金相比，添加VFe合金的HRB400热轧带肋钢筋强化效果差，其N含量也较低。图1为两种钢筋的金相组织，均为等轴状的先共析铁素体+珠光体。VN合金化钢筋的金相组织与VFe合金化钢筋相比晶粒较细（VFe钢筋8~9级，VN钢筋10级左右），且组织均匀，偏析较轻。



添加VFe合金 ×400



添加VN合金 ×400

图1 HRB400热轧带肋钢筋金相组织

VN的细化效果比VFe好，加上氮的强化，因此，VN微合金化钢筋的力学性能优于VFe微合金化钢筋。

2.3 检验结果分析

钒是较容易固溶到钢中、又较容易从钢中析出的微合金化元素，除了与钢中的C元素形成VC之外，更容易与钢中的氮相结合形成VN，以碳、氮化物的形式存在于基体和晶界上，起到沉淀强化和抑制晶粒长大的作用。此外，钢中加入微合金化元素钒，在轧制过程中会因形变诱导析出，生成钒化合物颗粒，一方面阻止奥氏体晶粒长大，另一方面又能阻止或推迟奥氏体再结晶，细化了奥氏体，从而细化了铁素体晶粒^[1]。钒的强化作用见图2。

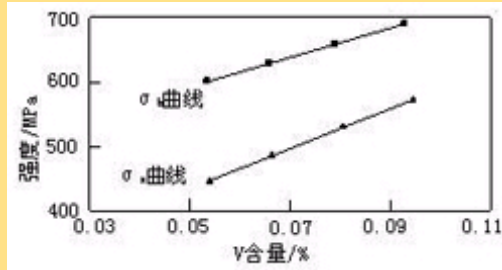


图2 20mm钢筋强度随钒含量变化的曲线

资料表明：用VN合金化的钢中析出的钒大约是VFe合金化钢的2倍。钢中氮含量越高，轧制期间在奥氏体中析出的V(C, N)将越多^[2]。奥氏体中V(C, N)颗粒的存在，将为 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变提供较多的非均匀形核位置，有利于细化铁素体晶粒。

3 讨论

3.1 强化机理

钒在HRB400级热轧带肋钢筋中主要起沉淀强化作用，沉淀强化的效果取决于析出相的数量和弥散度，质点越多、越细小弥散，沉淀强化的效果越大。钢中V与C和N都能形成化合物，析出物为VC和VN，V与N的亲合力大于V与C的亲合力，即首先生成VN，随后生成VC。但实际生成速度与钢中N和C的浓度有关，特别是与N的浓度有关，有研究表明^[3]：V/N比例越小（即越接近理想当量比4:1）钢中V(C, N)中VN比例越高，即VN多，VC少，强化沉淀效果越好。低氮钒钢中，大部分（高达56%）的钒固溶于铁素体基体，只有35.5%的钒形成V(C, N)，钒钢中大量的微合金化元素没有起到沉淀强化作用，钒的浪费较大。高氮钒钢情况完全相反，70%的钒析出形成V(C, N)，只有20%的钒固溶于基体。这表明氮的加入改变了钒在相间的分布，促进了钒从固溶状态向V(C, N)析出相中转移，从而使钒起到了更强的沉淀强化作用。

钢中增氮还减小了V(C, N)颗粒尺寸，明显增加细小V(C, N)析出相的体积分数。细小弥散V(C, N)析出相数量的增加是钒氮钢筋强度升高的主要原因。当V/N比达到理想化学配比时（V/N=3.64），钒能最大程度地析出。添加VFe微合金化的钢V/N远高于理想化学配比，钒的固溶量偏高。为了充分发挥钒的沉淀强化作用，需要钢中增氮。目前最有效的增氮方式是添加VN合金。

由以上讨论可知，V析出强化引起的强度增量取决于析出物的数量和粒子尺寸两个因素。大量研究表明：VN钢中析出相不但数量多，而且粒子尺寸很小，这是VN钢强度提高的主要原因。

3.2 影响力学性能的主要因素

3.2.1 炼钢因素 造成热轧带肋钢筋性能不合格的炼钢因素包括：成分控制不理想、偏析严重；钢中气体夹杂含量高。

统计莱钢两年以来出现的热轧带肋钢筋性能不合格情况表明：试样成分超标或偏下限是造成热轧带肋钢筋强度指标不合格的主要原因。由于碳、硅、锰、钒都是螺纹钢中起强化作用的元素，成分偏低必然导致热轧带肋钢筋强度指标下降，当一个以上的元素同时处于下限时易于造成钢筋性能不合格。

3.2.2 轧钢因素 主要是加热不当和冷速过快。2001年9月莱钢中小型车间生产HRB400期间，由于未严格执行停轧降温制度，使得钢坯在高温区停留时间过长，造成钢筋晶粒粗大，从而导致连续4炉HRB400强度不合格。

统计表明：负差率在3%以内时，对屈服强度的影响在5~10MPa。当钢筋主要强化元素（碳、锰、钒）的化学成分偏下限时，为避免钢筋力学性能不合，轧钢工序不宜采用负差轧制。

3.3 提高强度的措施

在钢的各种强化形式中，细化晶粒强化是最理想的强化手段。同时，由于晶粒细化的作用，部分抵消了沉淀强化对塑韧性的不利影响。

一般来说，细化晶粒强化在钢材终轧温度较低的情况下才能实现。HRB400钢坯的加热由于受钒的固溶温

度的影响，加热温度通常在1150℃以上。常规轧制条件下，钢的加热温度、终轧温度均较高，易造成钢筋晶粒粗大，也不利于发挥V(C, N)的沉淀强化作用，建议生产中适当降低钢材的终轧温度。根据莱钢现有的轧机负荷，可考虑在中、精轧段7[#]~12[#]轧机间配置水冷导槽进行弱水冷却，也可在终轧后轻穿水。通过在两相区加速冷却，可以防止晶粒粗大，控制碳、氮化物的析出，提高强化效果。

3.4 HRB400最佳的生产工艺

3.4.1 V—N复合微合金化 充分利用廉价的氮元素，在保证相同的强度水平下，至少可节约20%的钒元素，明显降低钢的成本。因此，V—N复合微合金化是一条发展高强度钢筋的经济有效途径。

由统计可知，为确保钢筋的屈服强度在400MPa以上并有一定的富余量，加VN12合金的钢筋的V含量保持在0.05%~0.06%就可保证钢筋的屈服强度在440MPa以上、抗拉强度在620MPa以上。VN12合金加入量为0.8kg/t即可，而钒铁加入量为2kg/t，使用VN12合金比明显比使用VFe成本低。

3.4.2 控轧控冷工艺 V—N微合金化应与控轧控冷工艺相结合。控轧控冷条件下，化合物质点更细小、均匀、稳定析出，有利于相变后获得细的铁素体晶粒，改善钢筋的综合性能^[4]。

综上所述，HRB400最佳的生产工艺是：V—N复合微合金化+控轧控冷工艺。不仅可降低生产成本，而且可有效提高产品内在质量。

4 结 论

4.1 为确保热轧带肋钢筋力学性能合格，炼钢工序应重点加强对主要元素含量的控制，提高化学成分的均匀稳定性，其中钒含量应控制在0.05%以上。轧钢工序应严格执行加热制度和停轧降温制度，避免钢坯过热。

4.2 钒在钢筋中的主要作用是沉淀强化。采用VN合金不仅可降低生产成本，而且强化效果稳定，可有效提高产品内在质量。

4.3 VN微合金化应与控轧控冷工艺相配合，以进一步改善钢筋的综合性能。

参考文献：

- [1] 刘祖林. 冶金质量分析[M]. 北京：机械工业出版社，1989.
- [2] 唐代明，等. VN合金化对20MnSiV钢筋钢组织的影响[J]. 钢铁钒钛, 2001(1):26~29
- [3] 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(11):42~47
- [4] 王有铭，等. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京：冶金工业出版社，1995.

[返回上页](#)