第7卷 第4期

2013年12月

文章编号:1673-9981(2013)04-0229-06

铬钒 HRB400 钢筋强化机理的研究

霍向东,李烈军

华南理工大学机械与汽车工程学院,广东 广州 510641

摘 要:对铬钒 HRB400 钢筋的强化机理进行了研究,结果表明,VCN 析出物有显著的沉淀强化作用, 形变诱导析出 VCN 粒子通过抑制奥氏体的再结晶细化晶粒;20MnSiVCr 钢中的铬与碳的结合降低了 碳的扩散速度,而铬的加入又使共析相变点左移,这是 20MnSiVCr 钢中珠光体含量明显增加的主要原 因,20MnSiVCr 钢主要通过 VCN 的沉淀强化和珠光体强化提高强度.

关键词:钢筋;微合金化;沉淀强化;晶粒细化;珠光体 中图分类号:TG113.25 _________文献标识码:A

用屈服强度 400 MPa 级的三级钢筋替代屈服 强度 335 MPa 级的 20MnSi 二级钢筋,不仅可以保 证工程结构的正常使用和安全,而且可以显著节约 钢筋用量,产生巨大的经济效益和社会效益^[1-2].目 前,HRB400 钢筋的开发主要采用钒微合金化技术, 铌微合金化和铌钒复合微合金化技术也得到了应 用^[3-4],但铌铁和钒铁的价格长期居高不下,造成生 产成本的显著增加,这也是国内三级钢筋难以普遍 推广的重要原因. 铬是一种重要的合金元素,与钒铁 相比,铬铁的价格便宜得多,并且也有显著提高强度 的作用. 因此,在低成本的钢筋中添加合金元素,生 产三级钢筋具有重要的意义.

本文在电炉-连轧生产线上生产了不同铬、钒含

量的 HRB400 钢筋,在力学性能测试的基础上,采 用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜研究了铬钒 HRB400 钢筋的强化机理,并用 Thermo-calc 软件 进行热力学计算,分析了在铬钒 HRB400 钢筋中珠 光体含量明显增多的原因.

1 实验材料和方法

采用大功率直流电炉—精炼炉—连铸—连轧的 工艺流程生产了不同铬、钒含量的 HRB400 钢筋, 钢筋中的其它元素的含量基本相同,实验用钢筋的 化学成分和力学性能列于表 1.

编号	钢种								力学性能			
		С	S	Р	Si	Mn	Cr	v	YS/MPa	TS/MPa	E/%	YS/TS
1	20MnSi	0.20	0.032	0.033	0.38	1.25	0, 06	0.004	370	580	23.5	0.64
2	20MnSiV	0.19	0.040	0.038	0.56	1.33	0.02	0.052	460	595	26.5	0.77
3	20MnSiV	0.20	0.024	0.023	0.51	1.36	0, 05	0.092	615	760	24.0	0.81
4	20MnSiVCr	0.19	0.040	0.040	0.44	1.30	0. 36	0.052	510	644	20.5	0.79

表 1 实验用钢筋的化学成分和力学性能 Table 1 Chemical composition and mechanical properties of experimental steel

收稿日期:2013-11-01

作者简介:霍向东(1972-),男,山东临邑人,副教授,博士.

在钢筋上用线切割的方法截取小段试样,将试 样的横截面磨平、机械抛光,并用 4%的硝酸酒精溶 液浸蚀后在徕卡金相显微镜和 JSM-7001F 场发射 扫描电镜下观察金相组织和析出物.用 Image Tool 图像分析软件测量铁素体晶粒的平均尺寸.

用线切割的方法在钢筋上切取厚度为 0.2 mm 的薄片,机械研磨至厚度约 60 μm,冲压成 Φ3 mm 的圆片,然后离子减薄制备成金属薄膜试样,在 JEM-2100 透射电镜下对其组织形貌进行微观分析 和研究.

2 实验结果

2.1 力学性能

由表1可见,没有添加V和Cr的20MnSi钢的 屈服强度最低,并且具有很低的屈强比;添加了 0.052%V的20MnSiV钢的屈服强度显著升高,而 抗拉强度变化不大,因此屈强比升高;V含量为 0.092%的3号20MnSiV钢的屈服强度大于600 MPa,抗拉强度达到760 MPa,屈强比升高到0.81; 在2号钢中添加0.36%的Cr得到4号钢.4号钢的 屈服强度和抗拉强度虽然都有明显地升高,但它的 延伸率有所降低.

由此可见,在 20MnSi 二级钢筋中添加适量的 V和Cr可明显地改善其力学性能.

2.2 组织特征

图1为各实验用钢筋的显微组织形貌. 由图1 可见,未添加V和Cr的20MnSi钢的铁素体晶粒尺 寸较粗大,并且有明显的魏氏组织. 魏氏组织是一种 有害组织,它会改变钢筋的韧脆转变温度,导致钢筋 脆断. 对于亚共析钢而言,魏氏铁素体是指从晶界向 晶内生长形成的一系列具有一定取向的片状(或针 状)铁素体. 魏氏组织的形与钢的碳含量、奥氏体晶 粒度和冷却速度等有关. 由于四种实验用钢筋的碳 含量基本相同,所采用的轧制和冷却工艺也相同,所 以奥氏体晶粒粗大是20MnSi钢中出现魏氏组织的 主要原因,导致20MnSi钢筋不但强度较低而且韧 性也较差.

同 20MnSi 钢相比,20MnSiV(0.052%V)钢的 铁素体晶粒尺寸细小,没有出现魏氏组织,珠光体的 体积分数明显降低.20MnSiVCr 钢的铁素体晶粒尺 寸进一步细化,而珠光体的体积分数明显增加,珠光 体团的尺寸增大,铁素体沿珠光体团的边界分布.



图 1 不同化学成分的实验用钢金相组织
(a)20MnSi钢;(b) 20MnSiV(0.052%V)钢;(c)20MnSiVCr(0.052%V,0.36%Cr)钢
Fig. 1 Optical micrographs of experimental steel with different composition

由图 2 可见,不同 Cr,V 含量对实验钢的组织 有较大的影响.V 含量由 0.052%增加到 0.092%, 铁素体晶粒和珠光体团的尺寸都明显细化,组织更 均匀;20MnSiVCr钢的铁素体晶粒尺寸虽然也较细,但其珠光体尺寸和体积分数与其它实验钢相比发生了明显的变化.



图 2 不同 Cr,V含量的实验钢的金相组织 (a)20MnSiV(0.052%V)钢;(b) 20MnSiV(0.092%V)钢;(c)20MnSiVCr(0.052%V, 0.36%Cr)钢 Fig. 2 Optical microstructure of experimental steels with different chromium and vanadium content

2.3 珠光体形貌

用场发射扫描电镜观察实验钢中的珠光体形 貌,结果如图 3 所示.由图 3(a)可见,20MnSi 钢中 的珠光体团尺寸较大,但渗碳体片较薄,片间的距离 较大;由图 3(b)可见,20MnSiV 钢中珠光体团的尺 寸和渗碳体片层间距均较小;而由图 3(b)可见, 20MnSiVCr钢中的珠光体片破碎成短棒状,称为退 化的珠光体.各实验用钢中的珠光体的透射电镜照 片如图 4 所示.



图 3 实验钢中珠光体团的扫描电镜照片 (a)20MnSi钢;(b)20MnSiV(0.092%V)钢;(c)20MnSiVCr(0.052%V,0.36%Cr)钢 Fig. 3 SEM images of pearlite in experimental steel



图 4 实验钢中珠光体的透射电镜照片 (a)20MnSi钢;(b) 20MnSiV(0.092%V)钢;(c)20MnSiVCr(0.052%V, 0.36%Cr)钢 Fig. 4 TEM images of pearlite in experimental steel

2.4 钢中的析出物

硫化物是钢中常见的析出物,有圆形、椭圆形、 鸭蛋形和不规则形状,也有球形核心和壳层结构.实 验钢中较为典型的硫化物的形貌和能谱如图 5 所 示.由图 5 可见,硫化物的尺寸约 1 μm,未见较大的 硫化物夹杂,这种小尺寸的硫化物一般不会对钢的 性能产生明显的影响.



图 5 实验钢中硫化物和能谱分析结果 Fig. 5 Morphology and ESD result of sulfide in experimental steel

实验钢中纳米尺寸析出物的透射电镜照片如图 6 所示. 在 V 含量为 0. 092%的 20MnSiV 钢中有大 量纳米尺寸的析出物,这些析出物粒子在钢中弥散 分布,有明显的沉淀强化作用. 而 20MnSiVCr (0. 052%V,0. 36%Cr)钢中的析出物粒子尺寸较大 且数量较少.另外,V含量为0.052%的20MnSiV 钢中析出物的尺寸和数量同20MnSiVCr中的相当, 而20MnSi钢筋中则没有发现这类析出物粒子.分 析结果表明,纳米尺寸析出物为VCN.



图 6 实验钢中的纳米尺寸析出物 (a) 20MnSiV(0.092%V)钢;(b) 20MnSiVCr(0.052%V, 0.36%Cr)钢 Fig. 6 Nanometer particles in experimental steel

3 分析与讨论

3.1 合金元素对 20MnSi 钢组织的影响

一般认为,钒微合金化技术的应用主要是发挥 VCN 粒子在钢中的沉淀强化作用.但图 1 和图 2 的 实验结果表明,在 20MnSi 钢中加入 V 可以起到明 显的细化晶粒作用,在板带材的生产中也得到过同 样的结果^[5].这种现象可以用形变诱导析出 VCN 粒子对奥氏体再结晶的抑制作用来解释,由于在轧 制过程中难以发生奥氏体再结晶,因此应变不断累 积,造成在 γ→α 相变过程中晶界和晶内的形核地点 和形核率显著增加.铁素体推进的前端存在富碳区, 碳富集到一定程度就会发生共析转变而形成珠光体 团;铁素体形核数量越多,形核地点越分散,形成富 碳区的部位越分散,因此共析转变后形成的珠光体 团就更加细小、分散,而铁素体晶粒尺寸也明显减 小.随着钢中V含量的增加,形变诱导析出VCN粒 子的数量增多,对奥氏体再结晶的抑制作用增强,因 此,相变后铁素体晶粒进一步细化. 铬既能固溶于铁素体中,又能与钢中的碳形成 多种碳化物.它与碳的结合能力大于 Fe 和 Mn 而次 于 W 和 Mo.由于实验钢中的 Cr 含量较低,它只能 在渗碳体中置换部分铁原子而形成含铬合金渗碳体 (Fe,Cr)₃C.在 20MnSiVCr 钢的珠光体团中发现 Cr 元素,珠光体的形貌和能谱分析结果如图 7 所示.





钢中加入 Cr 有缩小 γ 相区的作用, 使 γ 相中碳 的最大溶解度降低. 采用 Thermo-calc 软件进行热 力学计算,发现 20MnSi 钢和 20MnSiVCr 钢共析点 的碳含量分别为 w(C)=0.7%和 w(C)=0.66%. 因此, Cr 的加入使共析相变点左移,意味着形成珠 光体所需的碳含量降低,即在具有相同碳含量的条 件下可生成更多的珠光体. 但是这种影响并不显著, 还不能完全解释图 2 中 20MnSiVCr 钢中珠光体含 量明显增加的原因.

铬在奥氏体、铁素体和碳化物中的浓度差异,使 得铬在奥氏体分解时,需要重新分布.铬在奥氏体中 的扩散速度小,同时由于铬与碳有一定的结合力,又 降低了碳的扩散速度,因此碳的扩散不充分,无法形 成连续的层片状渗碳体.珠光体中渗碳体不连续,且 片层间距较大,而铬的加入又使共析相变点左移,因 此,造成了 20MnSiVCr 钢中珠光体含量的明显 增加.

3.2 合金元素对 20MnSi 钢力学性能的影响

大量研究报道表明,对于低碳钢和低碳锰钢来 说,主要的强化方式主要有:固溶强化 σ_s、晶粒细化 强化 σ_g、沉淀强化 σ_{pp}、位错和位错亚结构强化 σ_d以 及珠光体强化 σ_p等.

在铁素体-珠光体钢中,固溶强化增量与溶质元 素含量[M]%的关系为:

$$\sigma_{s} = 4570[C] + 4570[N] + 37[Mn] + 83[Si] + 470[P] + 38[Cu] + 80[Ti] + 0[Ni] - 30[Cr].$$
(1)

由于实验钢的化学成分相差不大,因此固溶强化 增量的差别可以忽略.由于式(1)中 Cr 元素的系数为 负值,因此 20MnSiVCr 的固溶强化效果略有降低.

位错强化效果可以由式(2)进行估算.

$$\sigma_{\rm d} = \alpha \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}. \tag{2}$$

式(2)中, α 是与晶体结构有关的常数, α =0.38;切 变模量 G=8.3×10⁴ MPa;位错的伯格斯矢量 b= 0.248 nm; ρ 是单位为1/cm²的位错密度.至今尚无 较为准确可靠的方法对位错密度直接进行测定.但 由于实验钢的成分基本相同,并且采取了相同的轧 制工艺,它们的位错密度不会有明显的差别,因此, 位错强化效果可以视为近似相等.

用 Hall-Petch 公式用来描述晶粒尺寸和细晶 强化效果间的关系.

 $\sigma_g = k_y d^{-\frac{1}{2}}.$ (3)

式(3)中,*d* 是以 mm 为单位的铁素体平均晶粒直 径; k_y 是合金钢常数,在高强度低合金钢中取 k_y = 17.4 N/mm^{3/2}.统计结果表明,1~4 号实验钢的铁 素体的平均晶粒尺寸分别为 12.7,8.7,6.8 和 7.8 μ m,计算其细晶强化效果分别为 154.4,186.5, 211.0,197.0 MPa. 尽管细晶强化效果存在差别,但

233

是显然无法解释表1中各实验钢屈服强度之间显著的差异.

Gladman 采用 Ashby-Orowan 机制计算 HSLA 钢中纳米尺寸析出物的沉淀强化效果^[6].

$$\sigma_{\rm p} = \frac{5.9\sqrt{f}}{\overline{x}} \cdot \ln\left(\frac{\overline{x}}{2.5 \times 10^{-4}}\right). \tag{4}$$

式(4)中,f 是析出物的体积分数,x 是以 mm 为单位的粒子的平均直径.从式(4)可以看出:粒子尺寸越小,体积分数越高,沉淀强化的效果越显著.从图 6 可见,VCN 粒子弥散分布在铁素体基体中,V 含量高的实验钢 VCN 的体积分数越高,其沉淀强化效果越明显,这就是随 V 含量的增加钢筋的强度显著升高的主要原因.

20MnSiV(0.052%V)和 20MnSiVCr(0.052% V,0.36%Cr)钢筋中除 Cr 外其余元素的含量基本 相同,而屈服强度和抗拉强度却分别相差了 50 MPa 和 49 MPa,这种差别可以用珠光体强化来解释.

4 结 论

(1)在 20MnSi 钢筋中适量添加 V 和 Cr 可显著 提高钢的强度,适量添加 V 还可明显细化铁素体晶 粒尺寸. 20MnSi 钢中可见明显的魏氏组织,与未额 外添加 Cr 元素的其它实验钢筋相比,20MnSiVCr 钢中珠光体的含量明显增加.

(2)20MnSiV 和 20MnSiVCr 钢中存在许多纳 米尺寸析出物,而 20MnSi 钢筋中没有发现这类粒 子,V 含量为 0.092%的钢筋中纳米尺寸碳化物的 沉淀强化是其强度显著提高的主要原因.

(3)20MnSiVCr 钢中铬与碳的结合降低了碳的 扩散速度,同时 Cr 的加入又使共析相变点左移,造 成了钢中珠光体含量明显增加.20MnSiVCr 钢通过 VCN 的沉淀强化和珠光体强化提高强度.

参考文献:

- [1] 唐海燕,李京社,杨明生,等. 微合金化 HRB400 高强度 热轧钢筋的试制[J]. 特殊钢,2011,32(6):31-33.
- [2] 赵瑞明,徐胜功,武剑,等. 热轧带肋钢筋控轧工艺生产 实践[J]. 轧钢,2012,29(6):67-70.
- [3] 许磊,杨现亮,付成安,等. 热轧 HRB400 螺纹钢筋降钒 生产工艺研究[J]. 热加工工艺,2013,42(1):27-31.
- [4] 黄振晖,李烈军,侯大华,等. 广钢铌及铌钒复合 HRB400 钢筋的开发生产[J].冶金丛刊,2007(2):6-10.
- [5] 霍向东,毛新平,郑晓伟,等. CSP 生产的钒氮微合金钢 的组织细化和析出物研究[J]. 钢铁,2009,44(4):64.
- [6] GLADMAN T, DULIEU D, MCIVOR I D. Structureproperty relationships in high strength microalloyed steels[C]//Proc of Symp on Microalloying 75 Union Carbide Corp. New York: [s. n.], 1976:32-55.

Strengthening mechanism of HRB400 rebar bearing chromium or vanadium

HUO Xiangdong, LI Liejun

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: The strengthening mechanism of HRB400 rebar chromium and vanadium bearing is researched. The experimental results show that vanadium carbides and nitrides (VCN) precipitation have obvious effect on hardening. Austenite grain refinement can be achieved by deformation which induced VCN precipitation and inhibited austenite recrystallization. Combination of chromium and carbon in 20MnSiVCr steel decreases the diffusion of carbon, at the same time, chromium addition pushes the eutectoid transformation temperature to left in a phase diagram of iron-carbon. That is the main reason for volume fraction of pearlite increasing obviously. The strength of 20MnSiVCr is enhanced by precipitation hardening of VCN particles and pearlite strengthening.

Key words: rebar; micro-alloying; precipitation hardening; grain refinement; pearlite