

微合金化铌钒对高碳钢组织转变影响

沈奎 江卓俊 于学森 张宇
(江苏省(沙钢)钢铁研究院,张家港 215625)

摘要 研究了四种成分铌钒微合金化(Nb 0~0.072%, V 0.09%~0.12%)高碳钢(0.70%~0.73% C)在900~1 200 ℃的加热温度下的奥氏体晶粒长大规律,并采用热模拟试验机测定了连续冷却相转变行为,利用金相显微镜、硬度仪等研究了冷却速度对金相组织、硬度等指标的影响。结果表明: Nb 和 V 含量增加可细化奥氏体晶粒尺寸,降低高温晶粒长大倾向,并且 CCT 曲线转变区向右下方移动,贝氏体和马氏体形成和结束点向低冷速方向扩大,结束点由 8 ℃/s 降低至 3 ℃/s,样品硬度也随之增加。

关键词 高碳钢 铌 钒 连续冷却相转变 组织

Effect of Nb-V Microalloying on Phase Transformation Behavior of High Carbon Steel

Shen Kui, Jiang Zhuojun, Yu Xuesen and Zhang Yu
(Institute of Research of Iron & Steel, Sha steel, Zhangjiagang 215625)

Abstract Effect of Nb-V addition (Nb 0~0.072%, V 0.09%~0.12%) on austenite grain growth behavior of high-carbon steels (0.70%~0.73% C) in 900~1 200 ℃ is studied, and the continuously cooled transformed curves of steel are investigated by Gleeble-3800 thermal-mechanical simulator, and the influence of cooling rates on microstructure and hardness of steel is investigated using optical microscope and hardness tester. The results show that with increasing Nb and V content in steel the austenite grain size is fining and grain grown tendency of the steel is smaller, and CCT curves move to the lower right, and the formation and end point of bainite and martensite shift towards low cooling rate, the end point decreases from 8 ℃/s to 3 ℃/s, and the hardness of sample increase with increase of Nb/V content.

Material Index Microalloy, Niobium, Vanadium, Continuous Cooling Phase Transformation, Microstructure

随着纺织业的蓬勃发展,对金属针布使用寿命要求也越来越高。而针布钢丝的材质是新型针布高产的基础,为了保证针布的平面度、锋利度、耐磨度等性能,要求金属针布钢丝具备良好的淬透性和韧性,淬火后齿尖硬度高均匀性好,同时具有较好的表面质量^[1]。目前国产金属针布使用的针布钢丝主要采用普碳钢制造,使用寿命较短;而进口材料寿命为国产材料 2~3 倍,主要是在中高碳钢基础上进行铌钒微合金化。

低碳钢领域铌钒微合金化研究较多^[2-4],但是在中高碳钢方面研究较少。为此,通过对不同铌钒含量下的高碳钢的晶粒度、连续冷却转变过程中的组织性能变化进行分析和研究,以期工业化生产工艺制定提供参考。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验材料采用 80 kg 真空冶炼炉冶炼的 4 个成分的钢锭,分别为 1[#]~4[#],其中 1[#]添加了 0.072% 的

Nb, 2[#]添加了 0.035% Nb, 3[#]和 4[#]未添加 Nb, 且 3[#]V 含量为 0.12% 与 1[#]和 2[#]保持一致, 4[#]的 V 含量最低为 0.09%, 其余成本基本一致, 如表 1 所示。将四个成分的钢锭经锻造、焊接和轧制成 10 mm 的样品, 分别加工成若干个 5.5 mm × 3 mm 的试样, 进行晶粒度测定和 6 mm × 82 mm 的 Gleeble 模拟试样进行轧制模拟, 测定材料的连续冷却转变曲线。

1.2 实验方法

采用型号为 VL2000DX 高温激光共聚焦显微镜观察奥氏体晶粒大小, 从室温以 5 ℃/s 的速度分别升至 900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 ℃, 分别保温 60 min, 以 10 ℃/s 的冷速冷至室温, 使用

表 1 实验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test steels / %

钢锭	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Nb
1 [#]	0.73	0.20	0.65	0.008 1	0.002 0	0.30	0.12	0.072
2 [#]	0.70	0.20	0.65	0.007 8	0.001 8	0.30	0.12	0.035
3 [#]	0.71	0.20	0.66	0.007 8	0.002 0	0.30	0.12	-
4 [#]	0.72	0.22	0.62	0.006 5	0.005 2	0.22	0.09	-

Zeiss 光学显微镜观察金相组织。采用 Gleeble3800 热力模拟试验机,对实验材料的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)进行测定,将试样以 10 °C/s 的速度加热至 1 100 °C,保温 10 min,然后以 5 °C/s 冷速降至 960 °C,保温 5 s,以 10 /s 的变形速率给予试样 60% 的压缩变形,然后在 3 s 内冷至 890 °C,分别以 $V_c = 2 \sim 18$ °C/s 的冷速冷至室温。对样品进行切割研磨,观察金相组织;最后用 Instron Trkon2100B 维氏硬度计测量试样的维氏硬度。

2 实验结果及分析讨论

2.1 不同加热温度下 Nb、V 对奥氏体晶粒尺寸的影响

按照预设程序,采用高温激光共聚焦显微镜,将 1#~4# 样品分别加热至 900~1 200 °C,然后统计保温 60 min 后的奥氏体晶粒尺寸,根据统计的尺寸结果绘制的晶粒度尺寸曲线图,如图 1 所示,可以看出,随着加热温度的提高,奥氏体晶粒尺寸呈长大趋势,但是 1# 和 2# 样品在 1 050 °C 以下,晶粒长大比较缓慢,1 100 °C 以上时晶粒长大的趋势才比较明显,而且,同一温度下,添加的 Nb/V 微合金含量越高,

奥氏体晶粒尺寸越低。图 2 为 1 050 °C 时,4 个成分样品的奥氏体晶粒尺寸,与图 1 中的曲线一致,1# 和 2# 相差较小,3# 和 4# 晶粒较大。

通常认为奥氏体晶粒长大主要表现为晶界的迁移,加热时,在晶界驱动力的作用下发生晶界迁移,导致晶粒长大,钟云龙等人^[5-6]认为可以采用阿伦尼乌斯方程的形式,基于金属学原理,进行推导。

奥氏体大角度晶界迁移的速率 M 与晶界扩散系数成比例关系,并且与温度 T 之间服从阿伦尼乌斯方程(1),且晶界移动速率 dD/dt 为其净驱动力与晶界迁移率 M 的乘积,经推算可得方程(2):

$$M = M_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{1}$$

$$\ln \bar{D} = \frac{1}{2 \ln A} - \frac{Q}{2RT} \tag{2}$$

式中, M_0 -常数, Q -晶界迁移的表观激活能/ $(J \cdot mol^{-1})$; R -气体常数/ $[J/(mol \cdot K)^{-1}]$; T -热力学温度/K。

对 1#~4# 样品的晶粒尺寸按照公式(2)进行回归,如图 3 所示。能够得出温度与晶粒尺寸间的关系式(3)~(6),其中 R' 指拟合相关系数,可以发现 2#~4# 样品的拟合的相关系数较高,拟合较好,1# 的偏差较大,可信度不高,可能与 Nb 含量的增加,改变了晶粒正常长大的规律。说明 2#~4# 样品的晶粒长大遵从一定的规律,可用关系式(4)~(6)对不同温度下的晶粒尺寸进行预测,而当 Nb 含量提高到 0.072% 时,温度在 1 100 °C 以下时,随着加热时间的提高,晶粒长大较为缓慢。

$$\ln D_1 = 9.27 - 7157 T \quad R'_1 = 0.796 \tag{3}$$

$$\ln D_2 = 14.84 - 144627 T \quad R'_2 = 0.968 \tag{4}$$

$$\ln D_3 = 13.70 - 12090 T \quad R'_3 = 0.989 \tag{5}$$

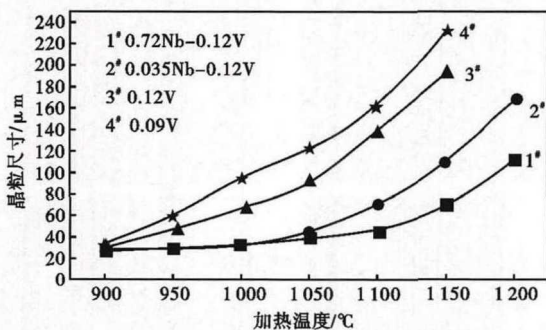


图 1 加热温度保温 1 h 对 Nb-V 微合金化高碳钢奥氏体晶粒尺寸的影响

Fig. 1 Effect of heating temperature for 1 h on austenite grain size of Nb-V microalloying high carbon steel

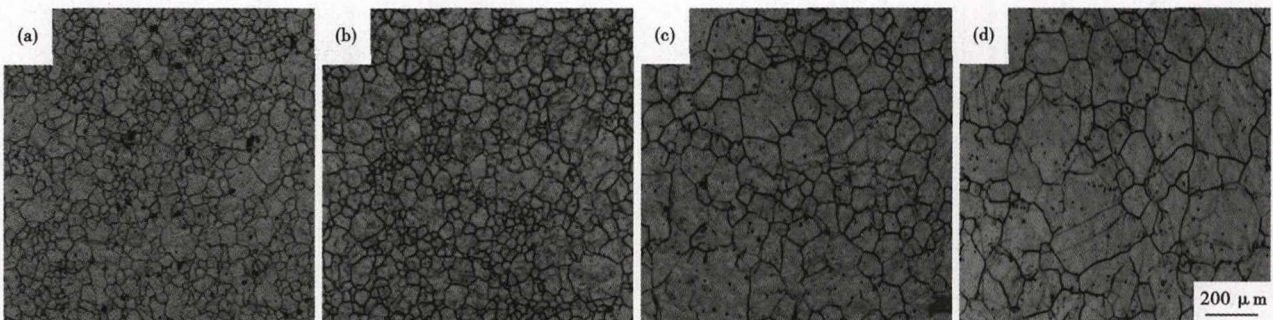


图 2 (a) 1# 0.072Nb-0.12V, (b) 2# 0.035Nb-0.12V, (c) 3# 0.12V 和 (d) 4# 0.09V 钢 1 050 °C 1 h 加热后奥氏体晶粒形貌
Fig. 2 Morphology of austenite grains in No1 0.072Nb-0.12V (a), No2 0.035Nb-0.12V (b), No3 0.12V (c), No4 0.09V steel (d) heating at 1 050 °C for 1 h

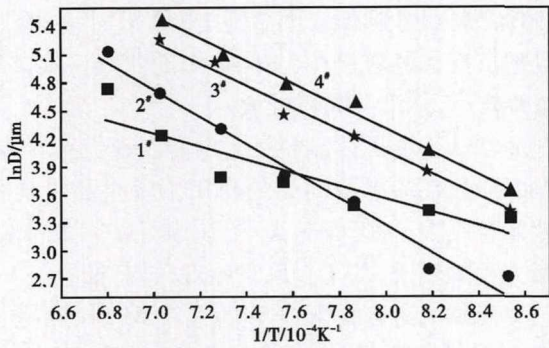


图 3 奥氏体晶粒尺寸与加热温度的关系

Fig. 3 Relationship between austenite grain size and heating temperature

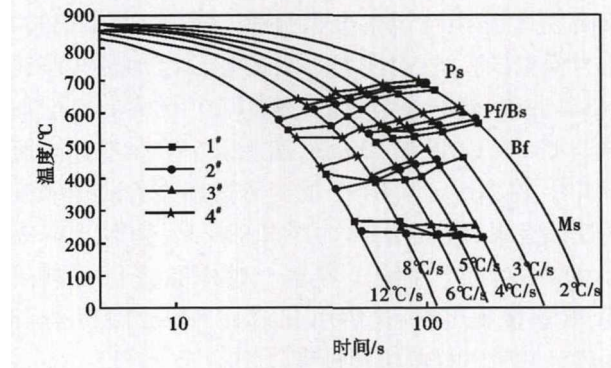


图 4 试验钢种 CCT 曲线

Fig. 4 CCT curves of the tested steels

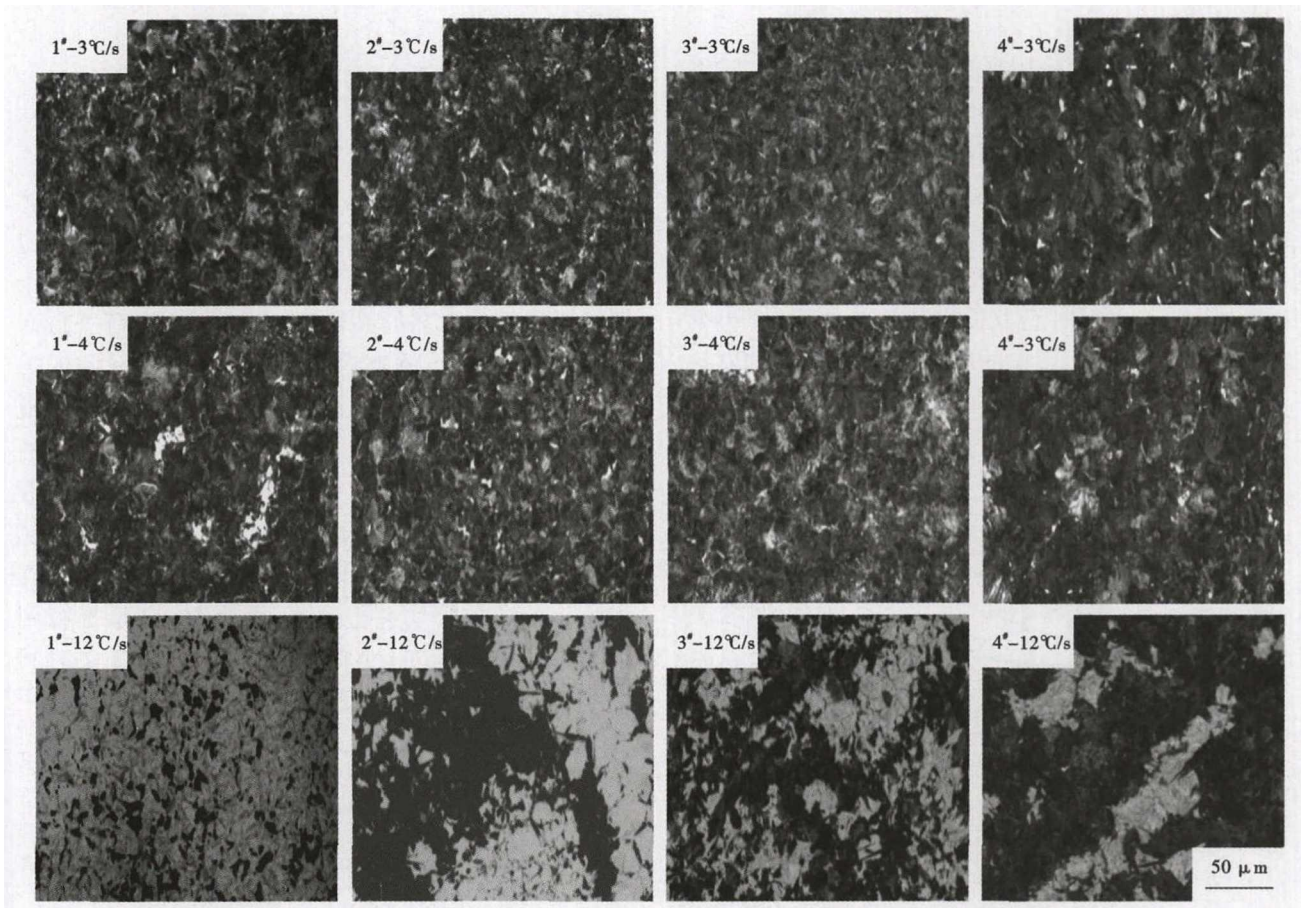


图 5 冷却速度 3 ~ 12 °C/s 试验钢种的金相组织

Fig. 5 Transformed microstructures of tested steels produced with cooling rates 3 ~ 12 °C/s

$$\ln D_1 = 13.98 - 14141 T R'_4 = 0.983 \quad (6)$$

2.2 Nb、V 对 CCT 曲线的影响

图 4 是 1# ~ 4# 成分的 CCT 曲线图, 其中 Ps、Bs、Ms、Pf、Bf 分别指珠光体、贝氏体、马氏体转变开始点以及珠光体和贝氏体转变结束点。

可以发现, 随着加入的合金元素含量的增加, 发生贝氏体和马氏体转变的冷速也就越小, CCT 曲线也逐渐向右下方移动, 1# 成分的 CCT 曲线在最右下

方, 并且贝氏体形成区域向低冷速方向扩大, 1# 成分的贝氏体结束点冷速为 3 °C/s。2# 和 3# 成分为 4 °C/s, 4# 成分贝氏体转变结束点冷速为 8 °C/s。由于珠光体相变过程要经过孕育期和形核长大区, Nb 和 V 的加入, 必然会影 响珠光体的相变过程, 影响 CCT 曲线的移动, Nb、V 均为强碳化物形成元素, 会对间隙原子 C 产生较强的拖拽作用, 从而增加了碳在过冷奥氏体中的扩散激活能^[7], 进而导致含微合

金元素 Nb、V 的钢珠光体转变的孕育期变长,因此,会导致其向右下方移动。

2.3 Nb、V 对组织转变的影响

图 5 为选取的冷速为 3 °C/s、4 °C/s、12 °C/s 时的四个钢种的金相组织图,可以发现当冷却速度为 3 °C/s 时,添加 0.12% V 和 0.072% Nb 的 1[#] 样品在晶界位置已经出现较多的贝氏体组织,2[#]~4[#] 样品中未发现贝氏体组织,但是添加 0.12% V 和 0.035% Nb 的 2[#] 样品晶界铁素体形态已经发生了变化,与 3[#] 和 4[#] 晶界铁素体形态存在差别。当冷却速度提高到 4 °C/s,1[#]~3[#] 样品均出现不同程度的贝氏体和马氏体组织,而 4[#] 样品仍为均匀的索氏体组织,添加 Nb 含量较高的 1[#] 样品马氏体和贝氏体的比例明显高于 2[#] 和 3[#] 样品。当冷却速度增加到 12 °C/s 时,4 个样品均出现马氏体组织,且马氏体含量 1[#] 样品几乎为 100%,2[#] 和 3[#] 马氏体含量在 50% 和 40% 左右,4[#] 样品 20% 左右,不同冷速下的组织转变,与图 4 中的 CCT 曲线对应性较好。

2.4 Nb、V 对样品硬度的影响

对不同冷速下的 4 个成分的样品进行硬度检测,如图 6 所示,可以很明显地发现,随着冷却速度的提高,硬度也逐渐提高,1[#] 样品在冷却速度 6 °C/s 以下时,硬度上涨幅度不大,从 400 HV5 增加到 460 HV5 左右,当冷却速度大于 6 °C/s 时,硬度上升较快,到 12 °C/s 时 HV5 硬度值达到 800,结合金相组织可以发现,主要是形成了大量的马氏体组织。2[#]~3[#] 样品冷速在 10 °C/s 以下时,硬度增幅较小,从 350 HV5 以下增加到 400 HV5,随后增速提高,2[#] 样品硬度要高于 3[#] 和 4[#],主要与添加的元素有关,Nb 和 V 的添加,使得 CCT 曲线右移,促进了相变的进行,奥氏体冷却过程中,更容易形成马氏体等过饱和的组织,提高材料硬度。这也为后续开发耐磨微合金化钒布钢丝用钢提供理论依据。根据上述的组织转变结果,已开发出高强度钒布钢丝 72/82NbV,并成功运用至高端梳棉针布上。

3 结论

(1) 随着 Nb、V 含量的增加,奥氏体晶粒尺寸越小,高温时长大倾向也越小,并且,2[#]~3[#] 样品,温度

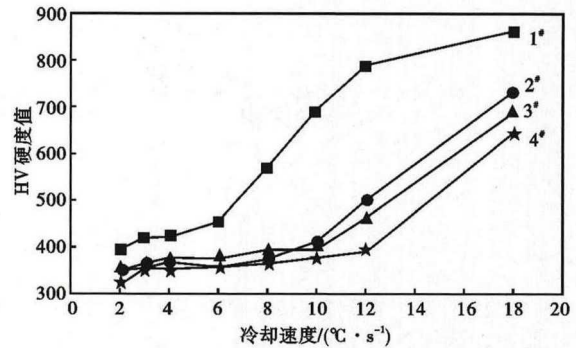


图 6 冷却速度对试验钢硬度(HV5)的影响

Fig. 6 Effect of cooling rates on hardness (HV5) of test steels

与晶粒尺寸的对数值呈一定线性关系,可以利用这种关系来预测不同温度下的晶粒尺寸,1[#] 样品添加了较多的 Nb,晶粒长大较为缓慢,温度与晶粒尺寸对数间的关系不明显。

(2) 随着 Nb、V 含量的增加,C 曲线珠光体转变区向右下方移动,并且贝氏体和马氏体形成向低速方向扩大。

(3) 比较了不同冷速下的金相组织和硬度,铌钒含量越高,样品出现贝氏体组织的冷速也就越低,同样冷速下的硬度也就越高,并且铌含量达到 0.072% 时,与其他 3 个成分相比,硬度提高幅度最大。

参考文献

- [1] 宋清华,刘世锋,王伯健. 影响金属针布组织性能的因素[J]. 金属制品, 2007, 33(2): 16-19.
- [2] 刘乘余,于景媛,李宝绵,等. 微量 Nb 对低合金钢组织转变的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(3): 393-396.
- [3] 李志欣,王春旭,刘宪民,等. 微量 Nb 元素对 DT300 钢奥氏体晶粒长大的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(22): 110-115.
- [4] Yu Qing-bo, Sun Ying. Abnormal Growth of Austenite Grain of Low-Carbon Steel[J]. Materials Science Engineering, 2006, A420: 34-38.
- [5] 钟云龙,刘国权,刘胜新,等. 新型油井管钢 33Mn2V 的奥氏体晶粒长大规律[J]. 金属学报, 2003, 39(7): 699-703.
- [6] 赵英利,时捷,曹文全,等. 加热温度对含 Nb 中碳钢奥氏体晶粒长大的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(4): 67-70.
- [7] 杨超飞. Nb 及热变形对高碳钢连续冷却时组织转变的影响[D]. 北京:钢铁研究总院, 2012.

沈奎(1986-),男,硕士(2011年北京科技大学),工程师,2008年合肥工业大学(本科)毕业,棒线材产品和工艺研究。E-mail:shenkui2004@163.com

收稿日期 2019-02-28