

## 返红温度对钒钛微合金非调质钢 45MnVTi 组织性能的影响

薛伟江<sup>1</sup> 屈小波<sup>1</sup> 王 军<sup>1</sup> 包耀宗<sup>2</sup>

(1 江苏永钢集团有限公司, 张家港 215628; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘 要** 试验研究了Φ52 mm 45MnVTi 钢终轧 917 ~ 922 °C 水冷返红 680 ~ 830 °C 的组织 and 力学性能。结果表明, 随着返红温度的降低, 钢材的屈服强度及抗拉强度不同程度的升高, 韧性先升高再降低, 组织类型为铁素体和珠光体。当返红温度 750 ~ 770 °C 时, 钢材组织为均匀细小的铁素体和珠光体组织, 且试验钢的珠光体片间距平均 2.39 μm; 钢材的抗拉强度平均 841 MPa, 屈服强度平均 547.5 MPa, 平均冲击功 50.5 J, 强韧性匹配最佳, 满足使用要求。

**关键词** 返红温度 钒钛微合金钢 45MnVTi 钢 珠光体片间距

## Effects of Self-Tempering Temperature on Microstructure and Performance of Vanadium and Titanium Microalloyed 45MnVTi Non Quenched and Tempered Steel

Xue Weijiang<sup>1</sup>, Qu Xiaobo<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1</sup> and Bao Yaozong<sup>2</sup>

(1 Jiang Su Yong Gang Group Co Ltd, Zhangjiagang 215628; 2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The structure and mechanical properties of Φ52 mm 45MnVTi steel finished rolling at 917 ~ 922 °C and water-cooling-self-tempering with 680 ~ 830 °C have been tested and researched. Results show that the microstructure of as-prepared steel consists of ferrite and pearlite, with the decrease of self-tempering temperature, the yield strength and tensile strength of steel gradually increase, and toughness increases at first and then decreases. When the range of self-tempering temperature is 750 to 770 °C, the microstructure of steel products is fine ferrite and pearlite, and the test steel average value of tensile strength 841 MPa, yield strength 547.5 MPa, impact energy 50.5 J with an optimal match between the strength and toughness of steel and pearlite lamellar spacing 2.39 μm, to meet the use requirements.

**Material Index** Self-Tempering Temperature, Vanadium and Titanium Microalloyed Steel 45MnVTi, Pearlite Inter-lamellar Spacing

钒钛微合金化具有细化晶粒和弥散强化的作用, 在钢铁产品中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。控轧控冷技术是钒钛微合金非调质钢生产中主要工艺步骤之一, 除微合金化的影响外, 微合金钢组织和性能还取决于控轧控冷工艺的关键参数, 如加热温度、轧制温度、变形量、变形速率、冷却速率、终轧温度等<sup>[2-3]</sup>。

目前有关控轧控冷工艺中加热温度、轧制温度、变形量及变形速率等参数对微合金化组织和性能影响的报道很多<sup>[4-8]</sup>, 但关于返红温度对钒钛微合金非调质钢影响的研究鲜有报道。因此, 本文通过对生产过程中冷却工艺参数的设置, 研究返红温度对钒钛微合金非调质钢组织和性能的影响, 为钒钛微合金非调质钢的工业生产提供工艺参考, 这对于钒钛微合金非调质钢的开发具有重要的指导意义。

### 1 试验材料及方法

试验材料取自钢厂生产的Φ52 mm 规格钒钛微合金非调质钢 45MnVTi 棒材, 化学成分见表 1。试

验钢材在保持终轧温度基本不变的前提下, 控制返红温度在 680 ~ 830 °C (见表 2), 随后空冷至室温, 获得具有铁素体和珠光体组织的钢材。

试验钢材生产工艺流程: 60 t 转炉 → LF → VD → 220 mm 方连铸机 → 缓冷 → 加热 → 除鳞 → 粗轧 → 中轧 → 精轧 → 穿水 → 冷床收集 → 分段 → 堆冷 → 精整 → 成品检验。

按照 GB/T 2975-2018《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》标准要求制样, 分别制备 10 mm × 10 mm × 55 mm 的 U 型冲击和标准拉伸试样, 其中拉伸和冲击均纵向检测; 金相试样制成 10 mm × 20 mm × 20 mm。试样制成后, 在 UTM5305

表 1 45MnVTi 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 45MnVTi steel/%

C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Al
0.40 ~ 0.50	0.15 ~ 0.35	0.80 ~ 1.40	≤ 0.035	≤ 0.035	0.005 ~ 0.020	0.010 ~ 0.040	0.015 ~ 0.030

表 2 45MnVTi 钢轧制和返红温度

Table 2 Rolling temperature and self-tempering temperature of 45MnVTi steel

试样	温度/℃			
	开轧	终轧	返红	上冷床
1#	1051	917	680	660
2#	1054	921	735	703
3#	1055	920	750	711
4#	1048	915	770	720
5#	1052	918	800	750
6#	1050	922	830	773

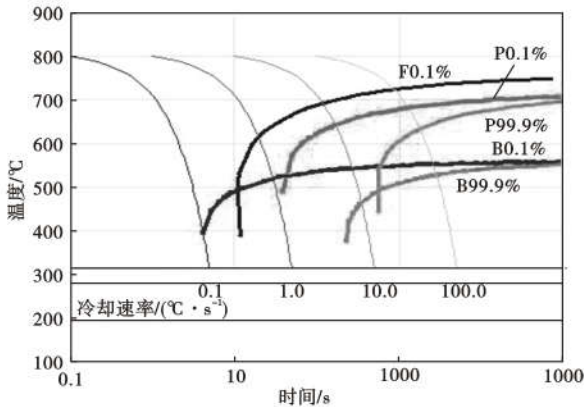


图 1 45MnVTi 钢 CCT 曲线

Fig. 1 CCT curves of 45MnVTi steel

表 3 返红温度对 45MnVTi 钢力学性能的影响

Table 3 Effect of self-tempering temperature on mechanical properties of 45MnVTi steel

试样编号	返红温度/℃	$R_m$ /MPa	$R_{e1}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$A_{KU2}$ /J	HBW101300 硬度值		
							心部	半径 1/2 处	边部
1#	680	868	558	19	51	46	248.5	258.2	255.9
2#	735	857	554	21	50	47	245.4	255.7	258.2
3#	750	845	548	21.5	52	49	243.7	257.4	255.9
4#	770	837	547	22	53	52	244.5	259.4	246.1
5#	800	815	549	21	53	52	242.0	252.0	251.9
6#	830	805	525	20	51	43	250.5	252.5	257.0

示。在返红温度 680 ~ 830 ℃, 随着试验钢材返红温度的降低, 试验钢材的屈服强度由 525 MPa 升高到 558 MPa, 抗拉强度由 805 MPa 提高到 868 MPa, 变化较大; 断后伸长率和断后面缩量变化较小; 室温冲击功先由 43 J 升高到 52 J, 然后再降低至 46 J。试验钢材在 750 ~ 770 ℃, 具有良好的强韧性匹配。

### 2.3 布氏硬度

试验钢材横截面布氏硬度实测结果见表 3。随着返红温度的降低, 钢材横截面半径 1/2 处 HBW 布氏硬度值在 252 ~ 259.4 波动, 整体硬度变化不大。

### 2.4 显微组织

在垂直于轧制方向取样检测钢材显微组织, 取样位置分别有边部、半径 1/2 处和心部, 不同返红温度下试验钢的显微组织见图 2。

型号万能试验机和 PTM2452-C1 型号冲击试验机上进行拉伸和冲击试验, 冲击试验温度为 25 ℃。在 KB 3000B-Video 型号布氏硬度机上检测钢材横截面的布氏硬度。金相试样经过研磨抛光后, 用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀, 在 Axio Imager M2m 型号光学显微镜下观察钢材的显微组织, 并在 SUPRA 55 Sapphire 型号场发射扫描电镜下, 观察珠光体片间距。

## 2 试验结果

### 2.1 试验用钢 CCT 曲线

为研究钒钛微合金非调质钢 45MnVTi 的相变规律, 利用 JMatPro 软件对试验用钢进行 CCT 曲线计算, 结果如图 1 所示, 其  $Ac_3 = 760$  ℃,  $Ac_1 = 718$  ℃,  $Bs = 560$  ℃,  $Ms = 314$  ℃。当冷却速率  $\leq 0.1$  ℃/s 时, 相变区间为 520 ~ 760 ℃, 相变产物为铁素体、珠光体和少量贝氏体; 冷却速率在 0.1 ~ 10 ℃/s 时, 相变区间为 450 ~ 720 ℃, 相变产物为铁素体、珠光体和贝氏体; 冷却速率大于 100 ℃/s 时即出现马氏体相变。

### 2.2 力学性能

返红温度对试验钢材力学性能的影响见表 3 所

从图 2 ( $a_1, b_1, c_1$ ) 可以看出, 在返红温度为 680 ℃ 的试样边部和半径 1/2 处, 显微组织主要为铁素体 + 珠光体, 少量粗大的珠光体团, 同时边部出现贝氏体组织, 与冷却速率过快有关。图 2 ( $a_2, b_2, c_2$ ) 组织结果显示, 在返红温度为 750 ℃ 的试样边部、半径 1/2 处、以及心部, 显微组织为多边形铁素体 + 珠光体, 晶粒尺寸较小且均匀, 较返红温度 680 ℃ 下的组织有一定的改善。图 2 ( $a_3, b_3, c_3$ ) 组织结果表明, 在返红温度为 830 ℃ 的试样边部、半径 1/2 处以及心部, 显微组织为铁素体 + 珠光体, 但组织粗化倾向明显, 边部晶粒尺寸 < 半径 1/2 处 < 心部, 相比返红温度 750 ℃ 的组织恶化。

因此, 在返红温度 750 ℃ 的试验钢材上, 不同取样位置的组织晶粒尺寸均较小。在一定的返红温度

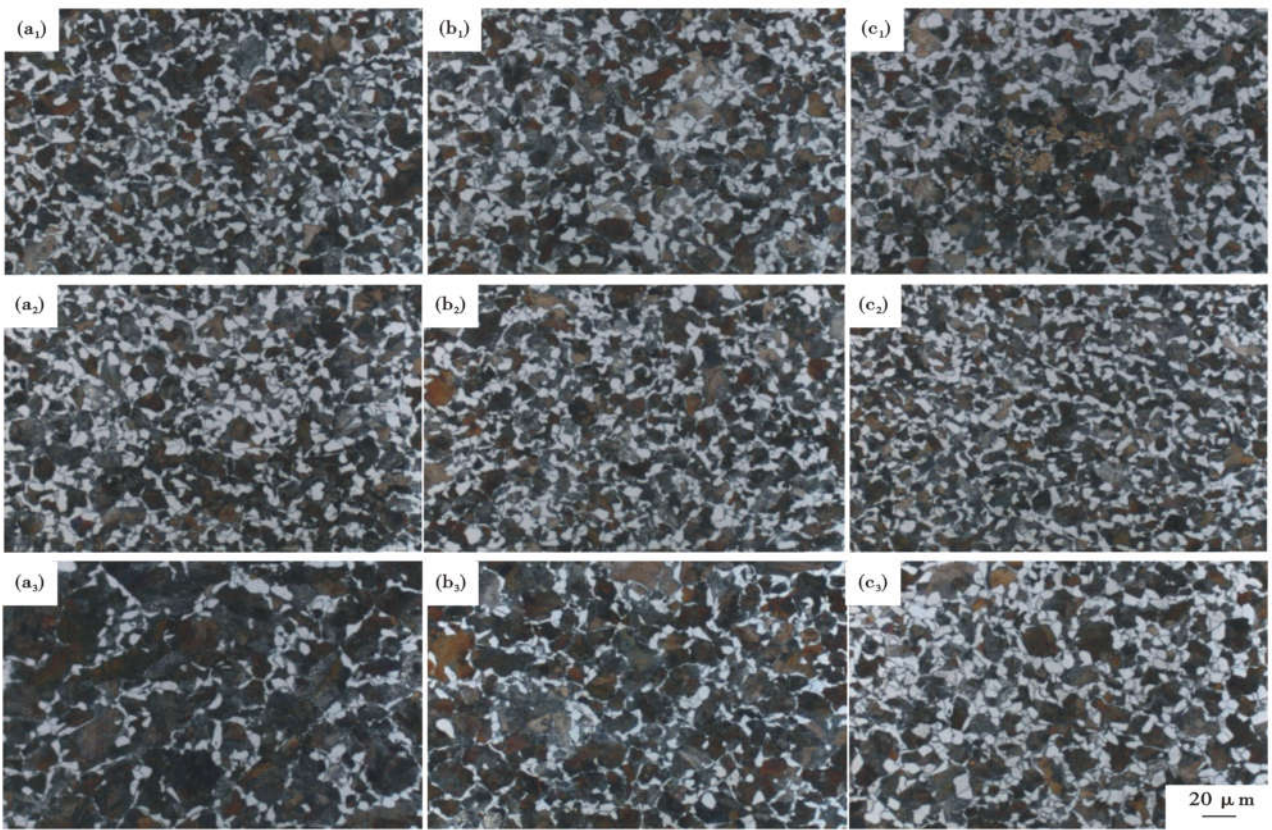


图 2 45MnVTi 钢  $\Phi 52$  mm 材返红温度 680 °C (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>), 750 °C (a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>) 和 830 °C (a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>) 的组织形貌:(a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>) 心部;(b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)(b<sub>3</sub>) 半径 1/2 处;(c<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(c<sub>3</sub>) 边部

Fig. 2 Morphology of structure of 45MnVTi steel  $\Phi 52$  mm bar with self-tempering temperature 680 °C (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>), 750 °C (a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>) and 830 °C (a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)(c<sub>3</sub>): (a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>) center; (b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)(b<sub>3</sub>) 1/2R; (c<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(c<sub>3</sub>) edge

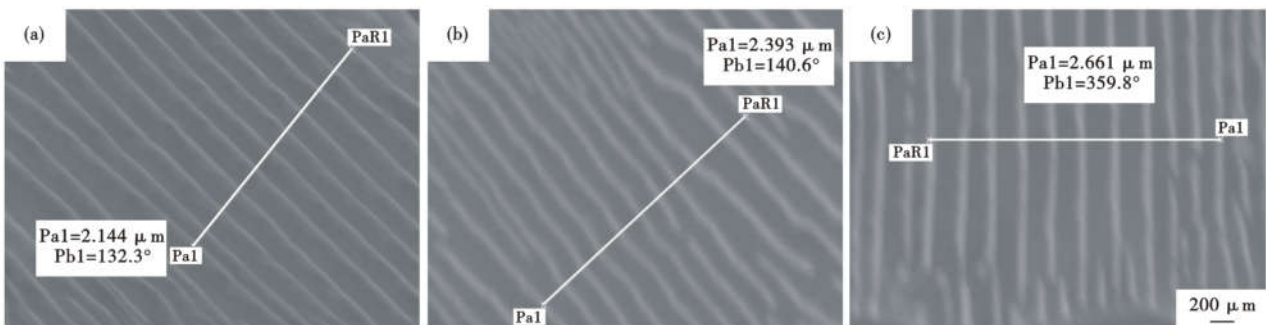


图 3 680 °C (a), 750 °C (b) 和 830 °C (c) 返红的 45MnVTi 钢珠光体片层间距

Fig. 3 Pearlite interlamellar spacing of 45MnVTi steel self-tempering with 680 °C (a), 750 °C (b) and 830 °C (c)

范围内,随着返红温度越低,钢材轧后冷却速度越大,钢材晶粒越细小;当返红温度处于较低水平时,钢材组织开始出现贝氏体等异常组织。另外,不同返红温度下,试验钢边部晶粒尺寸 < 半径 1/2 处 < 心部,这与轧材在返红过程中心部返红温度比半径 1/2 处和边部的返红温度高,且边部温度降低较快,冷却速度较大有关。在返红温度低即冷却速率大的情况下,均匀形核的临界形核自由能比晶界及位错等处

要高,即晶界或位错处形核率高,且形核率大于晶粒长大速率,最终得到的相变组织更加细小<sup>[9]</sup>。

### 2.5 珠光体片间距

珠光体片间距是衡量综合力学性能的关键指标。为研究试样钢材的珠光体片间距,采用扫描电镜(SEM)观察试验钢材半径 1/2 处的间距大小,经测量片间距为 2.14 ~ 2.66 μm,基本达到索氏体组织级别,综合性能良好。

不同返红温度下试验钢材的珠光体片间距如图 3 所示,返红温度为 680 ℃ 时,珠光体片间距 2.14 μm;返红温度为 750 ℃ 时,珠光体片间距 2.39 μm;返红温度为 830 ℃ 珠光体片间距 2.66 μm。随着钢材返红温度的降低,珠光体片间距逐渐变小,呈现明显细化的趋势。

### 3 结果分析与讨论

本研究主要描述试样钢材在不同返红温度下组织和性能之间的差异。在返红温度 680 ~ 735 ℃,试验钢材的屈服强度和抗拉强度较高,室温冲击功最低为 46 J;在返红温度 750 ~ 770 ℃,试验钢材的屈服强度和抗拉强度有所降低,但伸长率和面缩率变化较小,室温冲击功最低为 49 J;在返红温度 800 ~ 830 ℃,试验钢材的屈服强度和抗拉强度相对较低,且伸长率和断面收缩率变化不大,但室温冲击功最低为 43 J。

从显微组织上分析,返红温度低即钢材轧后冷却速率大,随着冷却速率的增加,试验钢材析出铁素体 + 珠光体组织,晶粒尺寸细化,钢材的屈服强度、抗拉强度以及冲击性能增大。但随着返红温度继续降低,贝氏体组织随之出现,对钢材的塑性和韧性有一定的负面影响,所以在返红温度为 680 ℃ 时,试验钢材的伸长率为 19%,室温冲击功为 46 J。

试验钢材径向显微组织的差异是因为返红温度越低,冷速越大,钢材径向的温度梯度越大,不同部位(边部、半径 1/2 处、心部)冷速差异就越大,此时边部冷速 > 心部,导致获得不同的相变组织,甚至是硬脆的贝氏体或马氏体组织,这也是试验钢材在返红温度较低时,塑韧性差的影响因素<sup>[10]</sup>。

对比不同返红温度的珠光体片层间距,随着返红温度的降低,珠光体片层间距逐渐变小,此时,钢材的强度呈现升高趋势,韧性则先升高后降低。除珠光体对强度和塑韧性的影响外,珠光体片间距越小,单位体积的铁素体和渗碳体相界面越多,对位错运动阻碍越大,因而硬度和强度都增高。同时铁素体和渗碳体片越薄,塑性变形能力越大<sup>[11-13]</sup>。

### 4 结论

(1) 不同的返红温度对钒钛微合金非调质钢 45MnVTi 的组织和性能有重要影响。

(2) 随着返红温度的降低,钢材的屈服强度和抗拉强度均升高,韧性先升高再下降。当返红温度控制在 750 ~ 770 ℃,钢材的平均抗拉强度 841 MPa,平均屈服强度 547.5 MPa,平均冲击功 50.5 J,钢材的强韧性最佳;同时显微组织为均匀细小的铁素体和珠光体,且珠光体片间距平均 2.39 μm。

### 参考文献

- [1] 付俊岩,东涛. 试论我国钢的微合金化发展方向[J]. 中国冶金,2005(5):16-19.
- [2] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [3] 阴树标,刘清友,张志波,等. 热变形参数对含铌钢奥氏体未再结晶区变形相变的影响[J]. 钢铁,2008,43(2):81-85.
- [4] 阮土朋,赵爱民,陈继林,等. 控轧控冷工艺对 Qst32-3 盘条组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(1):146-148.
- [5] 孔令波,董庆,杨栋. 控轧控冷工艺对 SCM435 钢热轧盘条组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(17):155-160.
- [6] 徐士新,余伟,李舒筋,等. 控轧控冷工艺对杆杆用 22CrNi3Mo 钢耐磨性能的影响[J]. 热加工工艺,2017,46(19):36-40.
- [7] 王权,武鹏祥,孙婷婷,等. 控轧控冷条件下 X100 管线钢的组织转变及性能[J]. 金属热处理,2016,41(11):21-25.
- [8] 刘志勇,陈吉清,贺信莱,等. 终轧温度对高强度耐候钢 Q450NQR1 组织和性能的影响[J]. 金属热处理,2009,34(6):42-45.
- [9] 王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [10] 吴战芳,徐李军,王洪,等. 返红温度对钨微合金高强度耐蚀船板钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理,2014,39(2):43-46.
- [11] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [12] 吴迪,李壮. 低碳 490 MPa 级铆螺钢控轧控冷的研究[J]. 钢铁,2008,43(4):61-65.
- [13] 杜海军,赵德文,杜林秀,等. 温度参数对钨微合金高强度结构钢组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2010,22(6):36-39.

薛伟江(1988-),男,硕士(2013年东南大学),工程师,2011年华北水利水电学院(本科)毕业,特殊钢开发和研究。  
E-mail: xueweijiang-1988@163.com

收稿日期:2021-04-12