

## 高温回火对 1Cr12Ni3Mo2VN 耐热钢力学性能和组织的影响

谢学林<sup>1</sup> 杨 钢<sup>2</sup> 王泽忠<sup>1</sup> 傅 骏<sup>1</sup> 雍歧龙<sup>2</sup>

(1 四川工程职业技术学院材料工程系, 德阳 618000; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

**摘 要** 研究了 1Cr12Ni3Mo2VN 钢 1 010 ℃ 1 h 油冷, 2 次 580 ~ 620 ℃ 1 h 回火空冷后的力学性能和组织。试验结果表明, 在 620 ℃ 回火拉伸试样中, 回火马氏体板条界析出大量聚集的粗化的块状  $M_{23}C_6$  碳化物, 试样塑性变形以孪晶方式进行, 塑性较低; 580 ℃ 回火拉伸试样塑性变形以滑移方式进行, 塑性较好。该钢最佳回火工艺为两次 580 ℃ 1 h 空冷。

**关键词** 耐热钢 1Cr12Ni3Mo2VN 高温回火 拉伸性能 组织

## Effect of High Temperature Tempering on Structure and Mechanical Properties of Heat-Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN

Xie Xuelin<sup>1</sup>, Yang Gang<sup>2</sup>, Wang Zezhong<sup>1</sup>, Fu Jun<sup>1</sup> and Yong Qilong<sup>2</sup>

(1 Dept of Materials Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000;  
2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** Structure and mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 010 ℃ for 1 h, oil cooling and double tempered at 580 ~ 620 ℃ for 1 h, air cooling have been studied. Test results show that in tensile specimen tempered at 620 ℃, a large amount of coarsening block  $M_{23}C_6$  carbides precipitate at boundary of tempered martensite lath, and the plastic deformation of specimen goes on by means of twin's motion with lower plasticity; but the plastic deformation of tensile specimen tempered at 580 ℃ goes on by means of slipping motion with better plasticity. The optimum tempering process of the steel is double tempering at 580 ℃ for 1 h, air cooling.

**Material Index** Heat-Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN, High Temperature Tempering, Tensile Properties, Structure

1Cr12Ni3Mo2VN 属于新型 12% Cr 型马氏体耐热钢, 主要用于制造超临界火电机组汽轮机末级长叶片 (1 100 mm), 相比常规的 1Cr13 马氏体叶片钢, 添加了 Mo、V、Ni、N 等合金元素<sup>[1~3]</sup>, 具有更好的韧性、高温热强性、高温组织和性能稳定性、高温抗氧化性及抗蒸汽腐蚀能力。

通常, 淬火合金钢经高温回火时, 随着回火温度的升高, 其强度和硬度会不断下降, 而塑性和韧性会不断升高。但本试验中, 试验钢随着回火温度从 580 ℃ 升高到 620 ℃, 其强度、塑性都呈下降趋势, 特别是断面收缩率下降明显, 而伸长率变化不大, 与常规不符, 本文通过对金相组织、电镜微观组织的分析, 研究引起试验钢断面收缩率下降的组织变化以及塑性变形方式的变化。

### 1 实验材料及方法

实验材料为攀长钢生产的  $\Phi 220$  mm 锻材, 冶炼工艺: 30 t 电弧炉冶炼 + 电渣重熔 (电渣锭重 2.5 t)。实验材料的化学成分 (%) 为: 0.14C、0.17Si、0.77Mn、0.005S、0.016P、11.41Cr、2.96Ni、1.67Mo、0.26V、0.039N。试验钢淬火制度均为 1 010 ℃ 1 h

油冷, 回火制度分别为 580 ℃ 1 h 空冷 (2 次)、600 ℃ 1 h 空冷 (2 次)、620 ℃ 1 h 空冷 (2 次), 每种回火制度下取 2 支试样, 试验结果为两者的平均值。

将热处理后的毛坯试样加工成尺寸为  $\Phi 10$  mm  $\times$  110 mm 的标准拉伸试样, 拉伸试验在 WE-300 型拉伸试验机上进行, 用奥林巴斯 GX51 型光学显微镜和 H-800 透射电镜观察显微组织。

### 2 实验结果与分析

#### 2.1 室温力学性能

由表 1 可见, 随着回火温度的升高,  $R_m$ 、 $R_{p0.2}$  呈下降趋势。随着回火温度的升高, 伸长率 ( $A$ ) 几乎没什么变化; 随着回火温度的升高, 580 ~ 600 ℃, 断面收缩率 ( $Z$ ) 明显下降, 从 71.5% 降到 61.8%, 600 ~ 620 ℃, 变化不大。

#### 2.2 金相组织

由图 1 可见, 580 ℃ 和 620 ℃ 回火的组织均为回火马氏体, 即马氏体板条 + 析出碳化物, 二者的马氏体板条大小相近; 580 ℃ 回火的马氏体板条清晰, 板条间的衬度较大, 原奥氏体晶界和板条界干净, 基体中弥散析出细小的碳化物, 而 620 ℃ 回火的马氏

体板条间的衬度较 580 °C 回火有所降低,沿原奥氏体晶界和板条界有大量的粗颗粒碳化物析出。

### 2.3 拉伸试样横向颈缩处组织 TEM 分析

表 1 回火温度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢拉伸性能的影响

Table 1 Effect of tempering temperature on tensile properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN

热处理工艺	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	Z/%		
				试样 1	试样 2	平均
1 010 °C 1 h 油冷 + 580 °C 1 h 空冷(2 次)	1 075	898	18.3	71.0	72.0	71.5
1 010 °C 1 h 油冷 + 600 °C 1 h 空冷(2 次)	980	825	18.3	61.5	62.0	61.8
1 010 °C 1 h 油冷 + 620 °C 1 h 空冷(2 次)	958	800	17.8	63.0	63.5	63.3

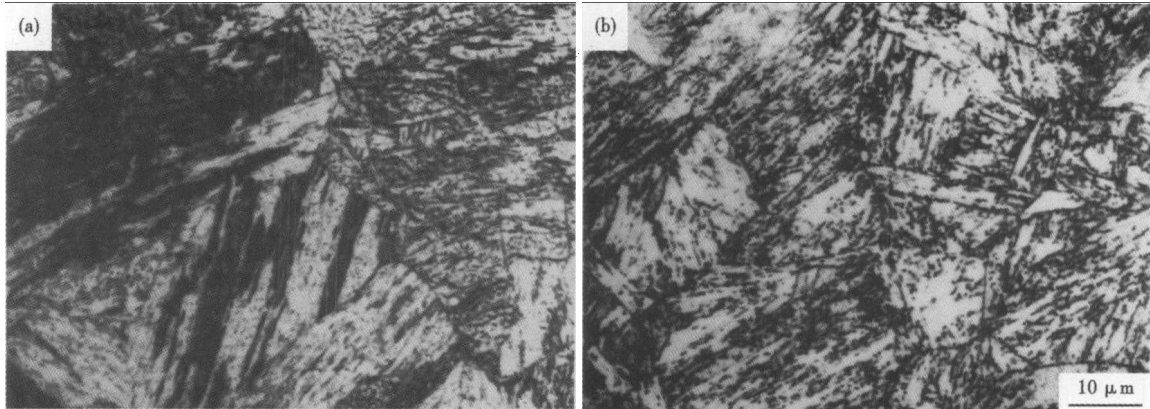


图 1 1 010 °C 油冷 580 °C (a) 和 620 °C (b) 回火 1Cr12Ni3Mo2VN 钢的组织形貌

Fig. 1 Structure morphology of steel 1Cr12Ni3Mo2VN oil quenched at 1 010 °C, then tempered at 580 °C (a) and 620 °C (b)

图 2(a) 中间白线两侧分别为位向不同的板条群,根据选区衍射及标定,白线左边板条群位向为 [001] 方向,白线右边板条群位向为 [111] 方向,其中右边板条群发生了塑性变形,板条群内的马氏体板条产生了滑移,马氏体板条明显变窄,板条最小宽度 ~100 nm,马氏体板条界干净,无明显的析出物,板条内位错密度较高;左边板条群的板条内产生了大量的多滑移(图 2b 箭头所指处),其滑移带宽度 ~50 nm,滑移线衬度较大,多滑移带至马氏体板条界时被阻止,多滑移的滑移方向几乎都与板条界成 ~50° 角度。同时,马氏体板条内弥散析出了一些长

度 ~300 nm 的短棒状碳化物(图 2c),这些短棒状碳化物几乎都与马氏体板条界成 ~65° 角度。

由图 3 中 620 °C 回火横向颈缩处的 TEM 显微组织可见,相互平行的马氏体板条宽度 ~500 nm,板条内的位错密度相对于 580 °C 回火有所降低,板条界有大量聚集、粗化的块状碳化物析出(图 3a 箭头所指处);相对于 580 °C 回火横向颈缩处的 TEM 显微组织,马氏体板条内产生了较少的多滑移(图 3b 箭头所指处),滑移带宽度 ~100 nm,滑移线模糊,衬度较小,其滑移方向几乎都与板条界成 ~70° 角度,而在一些板条间发现了孪晶(图 3c)。

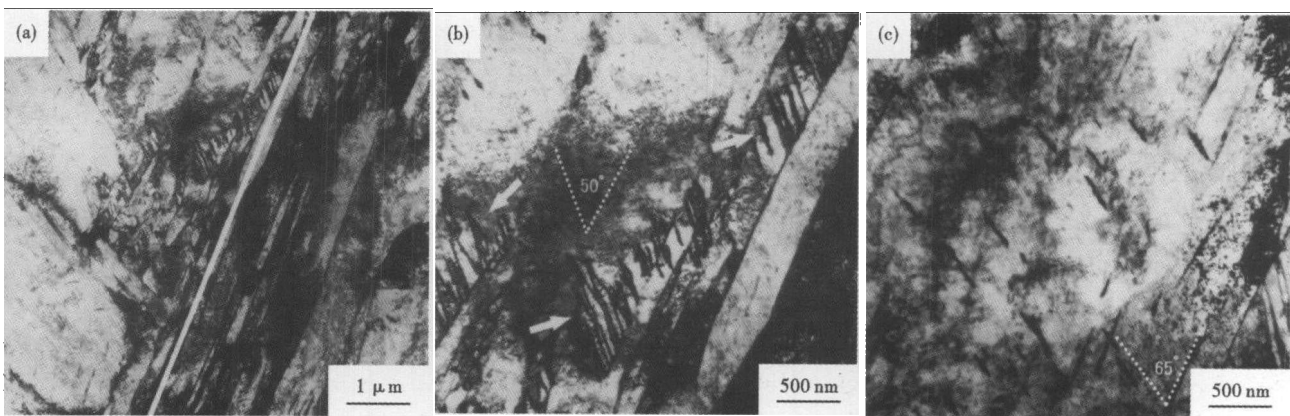


图 2 580 °C 回火 1Cr12Ni3Mo2VN 钢拉伸试样横向颈缩处的形貌,TEM:(a)(b) 滑移带;(c) 马氏体板条内析出物

Fig. 2 Structure morphology at cross section in necking-down area of tensile specimen of steel 1Cr12Ni3Mo2VN double tempered at 580 °C, TEM: (a) (b) slipping band; (c) precipitates in martensite lath

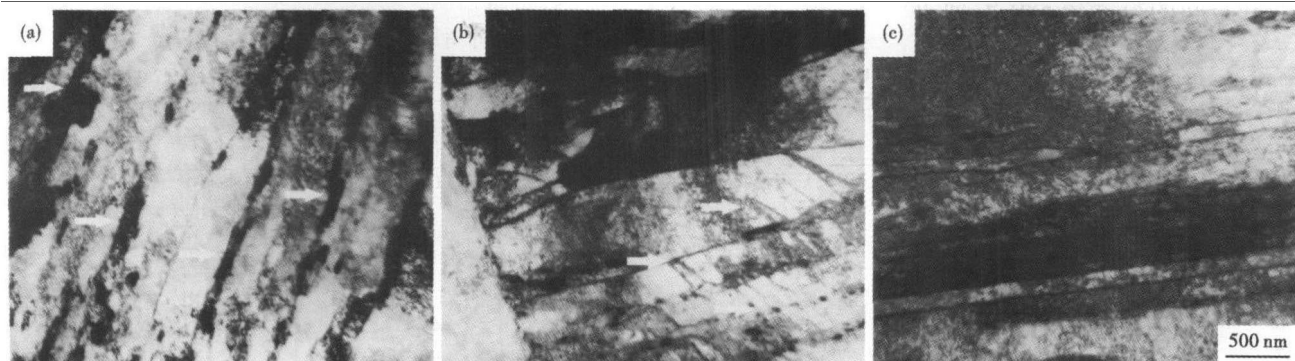


图3 620 °C回火1Cr12Ni3Mo2VN横向颈缩处的组织形貌,TEM:(a)马氏体板条界析出物;(b)滑移带;(c)孪晶

Fig. 3 Structure morphology at cross section in necking-down area of tensile specimen of steel 1Cr12Ni3Mo2VN double tempered at 620 °C, TEM: (a) precipitates in martensite lath; (b) slipping band; (c) twins

### 3 讨论

在常温和低温下,金属塑性变形主要通过滑移方式进行,此外,还有孪生等其它方式。一般说来,孪生的临界分切应力比滑移的临界分切应力大得多,只有在滑移很难进行的条件下,晶体才进行孪生变形,也就是当金属的塑性变形能力下降时,将产生较多的孪生变形,孪生对塑性变形的贡献比滑移小得多<sup>[4]</sup>。

580 °C回火试样的板条界干净,相界的结合力大,有利于滑移、多滑移的进行(图2),板条内位错密度较高,起到马氏体相变强化的作用,板条内同时有短杆状碳化物和纳米级第二相粒子弥散析出,由于它们与位错的交互作用,阻碍了位错的运动,从而提高了合金的塑性变形抗力,起到弥散强化的作用,导致了580 °C回火试样的强度高,塑性变形容易以滑移方式进行,塑性较好。

与580 °C回火试样相比,620 °C回火试样板条内位错密度较低,板条内几乎没有弥散析出的短杆状碳化物,这有利于晶体在滑移过程中的位错源开动,产生位错增殖,又由于板条界有大量聚集、粗化的块状碳化物 $M_{23}C_6$ 析出(图3a),当拉伸试样开始发生不均匀塑性变形并形成颈缩时,在切应力的作用下,位错源所产生的大量位错沿滑移面的运动过程中,遇到这些板条界的块状碳化物的阻碍,领先的位错在块状碳化物前被阻止,后续的位错被堵塞起来,结果形成位错的平面塞积群,并在这些块状碳化物的前端形成高度应力集中,当应力大小介于孪生的临界分切应力和引起微裂纹的应力之间时,则塑性变形以孪生方式进行,产生孪晶,引起颈缩以后较大的加工硬化,从而造成颈缩部位的倾斜度明显比580 °C的小,断面收缩率明显下降。620 °C回火试样

里发现较少的多滑移(图3b),而发现了一些孪晶(图3c),体心立方金属如 $\alpha$ -Fe,室温下只有承受冲击载荷时才产生孪生变形<sup>[4]</sup>,说明620 °C回火试样难以滑移方式进行塑性变形时,如果切应力大小介于孪生的临界分切应力和引起微裂纹的应力之间时,则塑性变形以孪生方式进行。

### 4 结论

(1)620 °C回火试样,板条内位错密度较低,板条内几乎没有弥散析出的短杆状碳化物,板条界大量聚集、粗化的块状碳化物 $M_{23}C_6$ 析出,是造成其断面收缩率明显下降的主要原因。

(2)580 °C回火试样的塑性变形以滑移方式进行,塑性较好;620 °C回火试样的塑性变形当以滑移方式进行较为困难时,如果切应力大小介于孪生的临界分切应力和引起微裂纹的应力之间,则塑性变形以孪生方式进行,塑性下降。该钢的最佳回火制度为580 °C 1 h空冷(2次)。

#### 参考文献

- 1 Fujimitsu, Masuyama. History of Power Plants and Progress in Heat Resistant Steels. ISIJ International, 2001, 41(6):612
- 2 Ennis P J, Quadackers W J. High Chromium Martensitic Steels-Microstructure, Properties and Potential for Further Development. VGB Power Tech, 2001, 8:87
- 3 太田定雄. 铁素体系耐热钢. 张善元, 张绍林译. 北京:冶金工业出版社, 2003
- 4 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理. 第2版. 北京:机械工业出版社, 2007

谢学林(1972-),男,助理工程师,硕士研究生,主要从事超(超)临界火电机组汽轮机叶片钢的开发研究。

收稿日期:2009-09-10