

· 工艺技术 ·

## 热处理对耐热钢 X12CrMoWVNbN10-1-1 力学性能的影响

杨 钢<sup>1</sup> 刘军和<sup>2</sup> 宋玺玉<sup>2</sup> 李许明<sup>2</sup> 马凤春<sup>2</sup>

(1 钢铁研究总院,北京 100081; 2 沈阳黎明发动机有限公司,沈阳 110043)

**摘 要** 研究了淬火温度 1 025 ~ 1 125 °C + 570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷和 1 050 ~ 1 075 °C 淬火后二次回火温度 680 ~ 780 °C 对马氏体耐热钢 X12CrMoWVNbN10-1-1 ( % : 0. 11C, 10. 28Cr, 0. 77Ni, 1. 0Mo, 0. 96W, 0. 18V, 0. 04Nb, 0. 053N ) 力学性能的影响。结果表明,随淬火温度的提高,钢的强度增加,塑性变化不大,但冲击韧性显著下降。随回火温度的提高,强度下降,塑性、韧性增加。该钢优化的热处理工艺为: 1 050 ~ 1 075 °C 1 ~ 2 h 油冷 + 570 °C 4 h 空冷 + 715 ~ 725 °C 2 h 空冷。

**关键词** 热处理 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢 力学性能

## Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of Heat Resistant Steel X12CrMoWVNbN10-1-1

Yang Gang<sup>1</sup>, Liu Junhe<sup>2</sup>, Song Xiyu<sup>2</sup>, Li Xuming<sup>2</sup> and Ma Fengchun<sup>2</sup>

(1 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;  
2 Shenyang Liming Engine Manufacturing Co, Shenyang 110043)

**Abstract** The effect of quenching temperature 1 025 ~ 1 125 °C + 570 °C 4 h air cooling + 720 °C 2 h air cooling and secondary tempering temperature 680 ~ 780 °C after 1 050 ~ 1 075 °C quenching on mechanical properties of martensite heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1 ( % : 0. 11C, 10. 28Cr, 0. 77Ni, 1. 0Mo, 0. 96W, 0. 18V, 0. 04Nb, 0. 053N ) has been studied. Results show that with increasing quenching temperature, the strength of steel increases, of which the plasticity has no appreciable change, but the impact toughness obviously decreases; with increasing tempering temperature, the strength of steel decreases, while the plasticity and impact toughness of steel increase. The optimizing heat treatment of the steel is 1 050 ~ 1 075 °C 1 ~ 2 h oil cooling + 570 °C 4 h air cooling + 715 ~ 725 °C 2 h air cooling.

**Material Index** Heat Treatment, Heat Resistant Steel X12CrMoWVNbN10-1-1, Mechanical Properties

12% Cr 型马氏体耐热钢具有高的耐蚀性和良好的减振性能,广泛用做汽轮机的叶片、转子等部件的材料<sup>[1]</sup>。近 30 年来,随汽轮机蒸汽参数提高到超临界及超超临界,常规的 12% Cr 型耐热钢已不能满足参数要求,为此世界发达国家制订了一系列的研究发展计划,开发了大量的新型 12% Cr 马氏体耐热钢。

X12CrMoWVNbN10-1-1 ( COSTE 型 ) 是在 X21CrMoV12-1 的基础上,采用多元复合强化原理,添加 Nb、N、W 元素,并调整其它强化元素的含量,于 20 世纪 80 年代由欧洲 COST 501 计划开发出来的转子用钢<sup>[2]</sup>。该钢在 600 °C 具有较高的持久强度,在欧洲广泛用做超(超)临界机组汽轮机叶片、转子和燃气轮机涡轮盘大锻件。

### 1 试验材料

试验材料冶炼工艺为 4 t 真空感应炉 + 电渣重熔,Φ550 mm 电渣锭,锻造开坯后轧成 Φ20 mm 的棒材并退火处理,化学成分(%)为:0. 11C、0. 04Si、0. 40Mn、0. 002S、0. 004P、10. 28Cr、0. 77Ni、1. 0Mo、

0. 96W、0. 18V、0. 04Nb、0. 053N。试验料的原始退火态组织为回火马氏体,晶粒度为 11 级,未见 δ 铁素体。

叶片技术条件中规定的力学性能要求为: $R_m = 870 \sim 970 \text{ MPa}$ ,  $R_{p0.2} = 750 \sim 830 \text{ MPa}$ ,  $A \geq 14\%$ ,  $Z \geq 55\%$ ,  $A_{kv2} \geq 50 \text{ J}$ ;推荐的热处理为: 1 050 ~ 1 100 °C 油冷或空冷 + 570 °C 4 h 空冷或油冷 + 700 °C  $\geq 2 \text{ h}$  空冷二次回火。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 淬火温度和保温时间对力学性能的影响

在相同的 570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷回火工艺下,随淬火温度的提高,由图 1(a)可见,抗拉强度、屈服强度均逐渐增加,并且可以看出,在 1 025 ~ 1 125 °C 淬火温度内,抗拉强度、屈服强度均能达到技术条件要求;由图 1(b)可见,伸长率和断面收缩率变化不大,均达到技术条件的要求,冲击韧性先升后降,1 050 °C 达到最高后,逐渐下降,1 075 °C 淬火时的冲击值下降到仅略高于技术条件的要求,继续提高淬火温度,冲击功下降显著,已不能达

到技术条件的要求,高于1 100 °C 淬火,冲击功降至非常低,发生了显著的脆化。

由图 2(a) 可见,1 050 °C 淬火试样经二次回火后,由于第二次的回火温度较高,马氏体板条发生了显著的回复,形成了较多的低位错密度区域;由图 2(b) 可见,在马氏体板条界存在大量粗大的碳化物,衍射标定为 $M_{23}C_6$ 型碳化物,见图 2(a) 中右上角,而细小、弥散析出的碳化物较少;由图 2(c) 可见,1 075 °C 淬火试样经二次回火后,马氏体板条中的

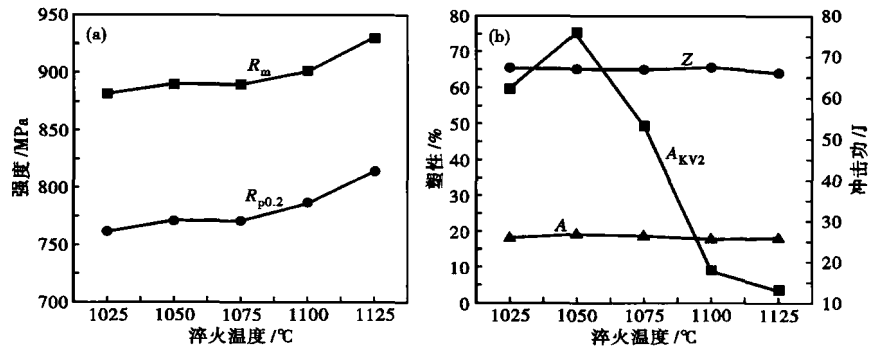


图 1 淬火温度对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢强度 (a)、塑性和冲击功 (b) 的影响 (570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷回火)

Fig. 1 Effect of quenching temperature on strength (a), plasticity and impact energy (b) of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1 (tempering: 570 °C 4 h air cooling + 720 °C 2 h air cooling)

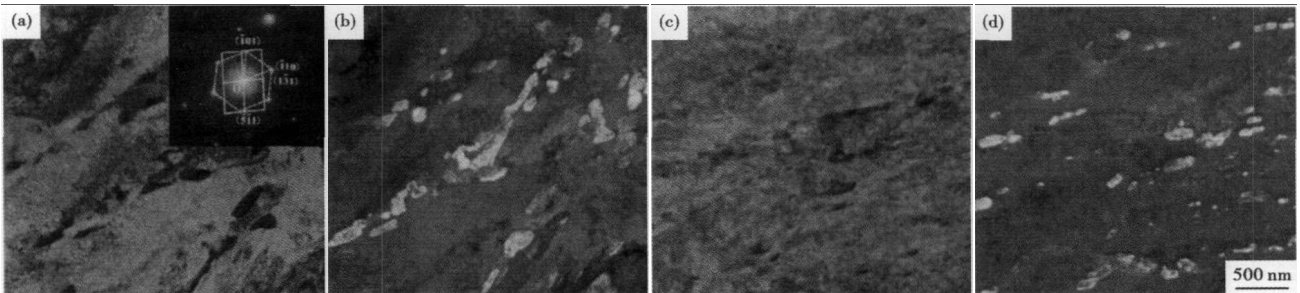


图 2 淬火温度对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢组织的影响, TEM: (a) 1 050 °C, 明场; (b) 1 050 °C, 暗场; (c) 1 075 °C, 明场; (d) 1 075 °C, 暗场

Fig. 2 Effect of quenching temperature on structure morphology of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1, TEM: (a) 1 050 °C, BF, (b) 1 050 °C, DF; (c) 1 075 °C, BF, (d) 1 075 °C, DF

位错密度较高,发生的回复程度较低;由图 2(d) 可见,在马氏体板条界也存在粗大碳化物,但数量较 1 050 °C 淬火试样少,而弥散析出的碳化物数量显著增加。

由此可见,较高温度的淬火,回火后弥散析出的细小碳化物较多,且马氏体基体中的位错密度较高,表现出较高的强化效果。这是由于随淬火温度的提高,原始退火态析出的碳化物在奥氏体化时的溶解增加,随后在回火时可以析出更多细小的碳化物;而且,弥散析出的细小碳化物阻碍位错运动的能力强,延缓了回复过程<sup>[3]</sup>,因此位错密度表现为较高。

由表 1 可见,根据叶片钢的技术条件中推荐的 1 050 ~ 1 100 °C 淬火温度,宜控制在中下限温度淬火,保温时间可以适当延长,对冲击韧性有利。

### 2.2 回火温度和保温时间对力学性能的影响

1 050 ~ 1 075 °C 淬火后,随二次回火温度的提高,由图 3(a) 可见,钢的强度急剧下降,高于 730 °C 回火时,试样的抗拉强度、屈服强度均不能达到技术条件的要求(图 3a 中虚线);由图 3(b) 可见,钢的塑性、韧性均提高,尤其是冲击韧性显著增加,塑性在回火温度范围内均满足技术条件的要求,而韧性在不低于 715 °C 回火时才满足技术条件的要求。

回火温度对组织的影响见图 4,随回火温度的提高,粗大的碳化物析出增加,高于 750 °C 回火时,

表 1 1 075 °C 固溶时间对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢力学性能的影响  
Table 1 Effect of solid solution time at 1 075 °C on mechanical properties of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1

热处理工艺		$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A / %	Z / %	$A_{KV}$ / J
淬火	回火					
1 075 °C 0.5 h 油冷	570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷	910	780	17.0	64.0	55.5
1 075 °C 1 h 油冷	570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷	890	772	19.0	65.2	53.5
1 075 °C 2 h 油冷	570 °C 4 h 空冷 + 720 °C 2 h 空冷	910	780	19.0	64.5	60.0

发现局部区域发生了显著的回火、再结晶的痕迹,见图4(c,d)中的箭头所指,马氏体板条束中形成了再结晶晶粒或亚晶,导致强度显著下降,塑性、韧性提高。

由图5(a)可见,随720℃回火保温时间的延长,钢的强度下降,且长于3h回火的试样的抗拉强度、屈服强度均不能达到技术条件的要求(图5a中虚线);由图5(b)可见,钢的塑性变化不大,而韧性显著提高。

由此可见,叶片钢的二次回火温度控制在715~730℃为宜,

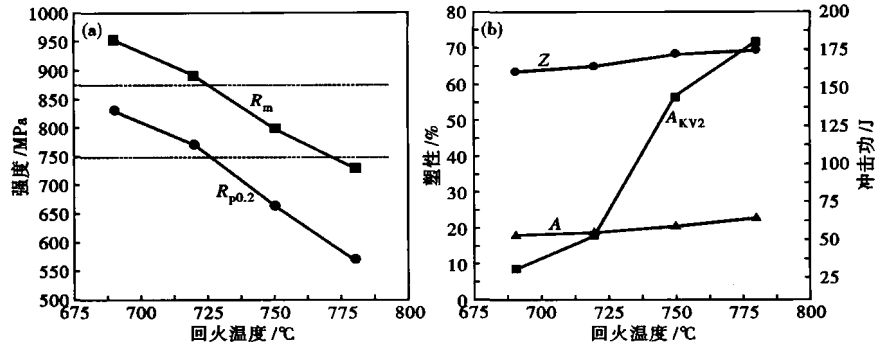


图3 二次回火温度对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢强度(a)、塑性和冲击功(b)的影响,1 075℃淬火,570℃一次回火

Fig.3 Effect of secondary tempering temperature on strength (a), plasticity and impact energy (b) of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1, quenched at 1 075℃, first tempering at 570℃

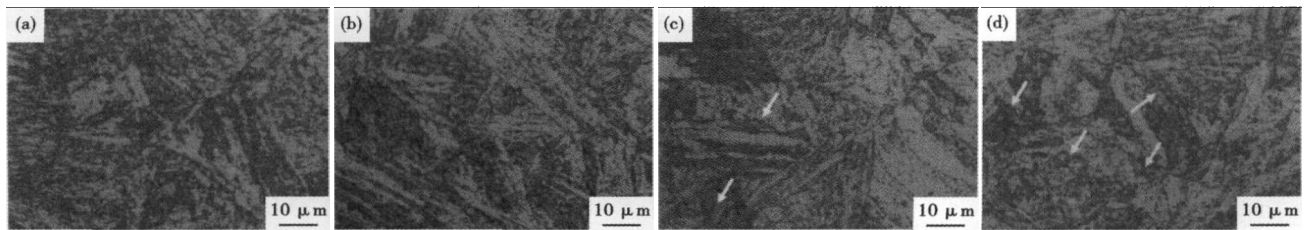


图4 回火温度对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢组织的影响:(a)690℃;(b)720℃;(c)750℃;(d)780℃

Fig.4 Effect of tempering temperature on structure of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1: (a) 690℃; (b) 720℃; (c) 750℃; (d) 780℃

回火保温时间控制在2~3h较好。

### 3 结论

(1) 随淬火温度的提高,钢的强度增加,塑性变化不大,但冲击功显著下降;1 075℃固溶时间对力学性能的影响较小。

(2) 随回火温度的提高,回火、再结晶过程加剧,导致钢的强度下降、塑性、韧性增加;随回火保温时间的延长,强度下降,塑性变化不大,而冲击功增加。

(3) 优化的热处理工艺为: 1 050~1 075℃ 1~2h 油冷 + 570℃ 4h 空冷 + 715~725℃ 2h 空冷回火。

国家高技术研究发展计划项目资助(863)(2009AA03Z509)

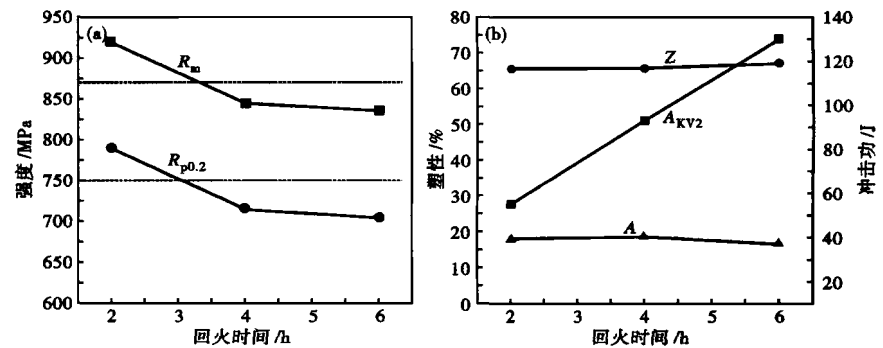


图5 720℃回火时间对 X12CrMoWVNbN10-1-1 耐热钢强度(a)、塑性和冲击功(b)的影响

Fig.5 Effect of tempering time at 720℃ on strength (a), plasticity and impact energy (b) of heat resistant steel X12CrMoWVNbN10-1-1

绍.国内外超超临界机组材料及焊接研究资料汇编.西安:西安热工研究院有限公司,2004

3 刘宗昌.材料组织结构转变原理.北京:冶金工业出版社,2006

杨钢(1963-),男,博士,教授级高级工程师,1984年浙江大学毕业,耐热钢及合金开发和研究。

### 参考文献

- 1 崔昆.钢铁材料及有色金属材料.北京:机械工业出版社,1980
- 2 周荣灿.国外超超临界发电技术研究计划材料研究项目简介

收稿日期:2010-01-13