

# Si 含量对超超临界汽轮机转子钢 30Cr2Ni4MoV 组织和性能的影响

范 倚<sup>1</sup> 范新有<sup>2</sup> 李士琦<sup>1</sup> 韩建军<sup>1</sup> 刘 超<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 新兴铸管有限公司,武安 056300)

**摘 要** 30Cr2Ni4MoV 钢(% : 0.15 ~ 0.16C, 0.03 ~ 0.45Si, 0.12 ~ 0.14Mn, 0.005P, 0.005 ~ 0.006S, 1.62 ~ 1.72Cr, 3.60 ~ 3.63Ni, 0.52 ~ 0.53Mo, 0.07V, ≤0.005Al) 由 10 kg 真空感应炉冶炼, 锻后经 930 °C 空冷 + 900 °C 空冷 + 640 °C 空冷处理, 再经 850 °C 水淬 + 600 °C 回火调质处理。试验结果表明, 当钢中的 Si 含量由 0.03% 增加至 0.45% 时, 钢中马氏体量增加, 晶粒更为粗大; 钢的抗拉和屈服强度分别从 922 ~ 936 MPa 和 868 ~ 873 MPa 增至 1 015 ~ 1 028 MPa 和 950 ~ 959 MPa, 但平均冲击功由 205 J 降至 154 J。

**关键词** 超超临界汽轮机转子钢 30Cr2Ni4MoV Si 含量 组织 力学性能

## Effect of Si Content on Structure and Mechanical Properties of Ultra Supercritical Steam Turbine Rotor Steel 30Cr2Ni4MoV

Fan Yi<sup>1</sup>, Fan Xinyou<sup>2</sup>, Li Shiqi<sup>1</sup>, Han Jianjun<sup>1</sup> and Liu Chao<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Xinxing Ductile Iron Pipe Co Ltd, Wu'an 056300)

**Abstract** Steel 30Cr2Ni4MoV (% : 0.15 ~ 0.16C, 0.03 ~ 0.45Si, 0.12 ~ 0.14Mn, 0.005P, 0.005 ~ 0.006S, 1.62 ~ 1.72Cr, 3.60 ~ 3.63Ni, 0.52 ~ 0.53Mo, 0.07V, ≤0.005Al) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace, forged bar treaded at 930 °C air cooling + 900 °C air cooling + 640 °C air cooling, then water quenched at 850 °C following tempered at 600 °C. Examination results show that as the Si content in steel increases from 0.03% to 0.45%, the amount of martensite in steel increases and the grains become more coarse; and the tensile and yield strength of steel increase respectively from 922 ~ 936 MPa and 868 ~ 873 MPa to 1 015 ~ 1 028 MPa and 950 ~ 959 MPa, while the average impact energy of steel decreases from 205 J to 154 J.

**Material Index** Ultra Supercritical Steam Turbine Rotor Steel 30Cr2Ni4MoV, Si Content, Structure, Mechanical Properties

美国、日本、欧洲等世界先进工业国家早在 20 世纪五六十年代就开始了超临界汽轮机组的研制, 现在仍在致力于提高超超临界汽轮机组的热效率, 30Cr2Ni4MoV 作为大型超超临界汽轮机组广泛采用的低压转子用钢, 具有良好的淬透性, 优良的机械性能, 如高的屈服强度, 高的抗拉强度, 高的硬度。

20 世纪 80 年代, 我国从美国引进了一批发电设备的用材, 其中就包括低压转子用钢 30Cr2Ni4MoV, 此后我国开始研制这些高效发电机组用钢, 并取得了一系列成果。对于汽轮机转子钢 30Cr2Ni4MoV, 从 1993 年至今, 我国相继出台的 JB/1265-1993 和 JB/T11020-2010, 在其他化学成分基本没有变动的情况下, Si 的含量要求却有了很大的变化, JB/1265-1993 要求 Si 的含量为 0.17% ~ 0.37%, 而 JB/T11020-2010 要求 Si 含量在 0.07% 以下。合金钢中 Si 的含量会影响屈服强度和拉伸强度, 进而影响其力学性能<sup>[1]</sup>。在此基础上, 本文针对低压转子用钢 30Cr2Ni4MoV, 研究了 Si 含量对汽轮机转子钢 30Cr2Ni4MoV 的组织 and 力学性能的

影响。

### 1 试验方案

试验材料制备工艺流程为 10 kg 真空感应炉-锻造-热处理。两炉 30Cr2Ni4MoV 钢的 Si 含量, 第 1 炉钢锭为 0.03%, 第 2 炉钢锭为 0.45%, 试验钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢 30Cr2Ni4MoV 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel 30Cr2Ni4MoV /%

炉号	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	V
1 <sup>#</sup>	0.16	0.03	0.12	0.005	0.006	≤ 0.005	1.72	3.63	0.52	0.07
2 <sup>#</sup>	0.15	0.45	0.14	0.005	0.005	≤ 0.005	1.62	3.60	0.53	0.07

锻造的钢锭坯料横截面积  $F$  为 38.5 cm<sup>2</sup>, 钢锭质量约为 5 kg, 可确定拔长锻锤吨位为 100 kg<sup>[2]</sup>, 本试验先选用 400 kg 空气锤锻造合金锭, 然后再用 100 kg 空气锤锻造。始锻温度 1 180 °C<sup>[2]</sup>, 终锻温

度 850 °C<sup>[2]</sup>, 然后沙冷。冶炼得到的钢锭最大直径为 Φ70 mm, 断后形状为直径 35 mm 的棒条, 锻造比约为 4。

锻件使用马弗炉加热。据热处理手册可知<sup>[3]</sup>, 保温时间  $t = AKD$ , 其中: A- 加热系数, 1.3 ~ 1.6 min/mm; K- 装炉条件修正系数, 取 1.0 ~ 1.5; D- 锻

件的直径/35 mm; 确定保温时间约为 90 min。根据 30Cr2Ni4MoV 钢的热处理工艺相关要求<sup>[4]</sup>, 制定其热处理工艺如图 1 所示。

每炉热处理后的合金经机加工成 3 组性能试样, 试样先在砂纸上研磨, 然后抛光, 最后在 4% 的 HNO<sub>3</sub> 酒精溶液中浸蚀, 在光学显微镜下观察 Si 对

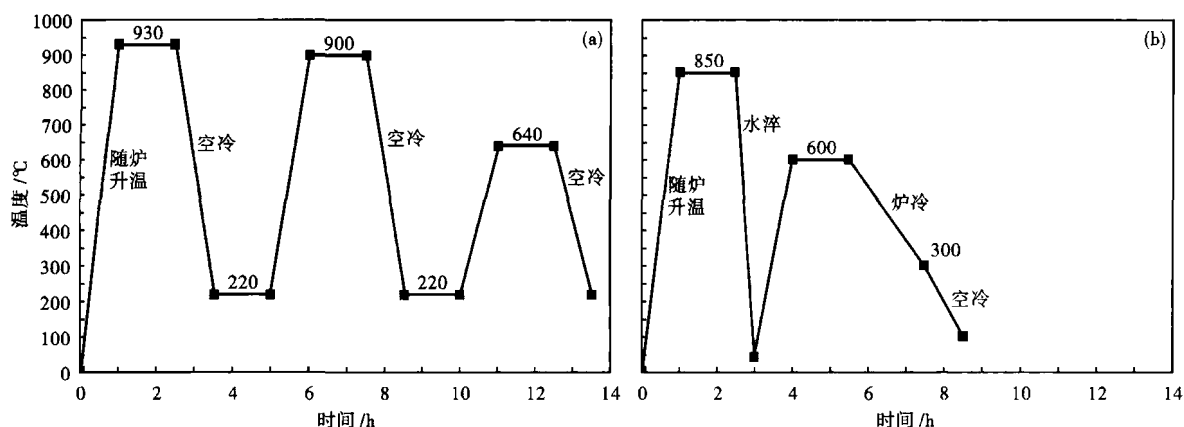


图 1 30Cr2Ni4MoV 钢的热处理工艺: (a) 锻后热处理; (b) 调质处理

Fig. 1 Heat treatment process for steel 30Cr2Ni4MoV: (a) after forging; (b) quenching and tempering

各合金组织的影响。

试样在万能材料试验机上按 GB/T228-2002 测试室温抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率, 采用标准比例拉伸试验。室温冲击试验按 GB/T229-1994 在摆锤式冲击试验机上测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 金相组织

试样的金相组织见图 2, 合金的晶粒都比较均匀, 显微组织都为马氏体和下贝氏体。在热处理阶段, 30Cr2Ni4MoV 钢被加热到 930、900、850 °C, 经历了 3 次奥氏体化的过程, 在奥氏体化过程中, 铁素体

发生了多形性转变, 碳化物也要发生溶解或转化, C 与合金元素发生再分布, 奥氏体晶粒的大小也发生相应的变化。Si 在奥氏体向贝氏体转变的过程中, 减慢 C 的扩散, 从而强烈地阻止贝氏体转变时碳化物的形成, 促使未转变部分奥氏体富集碳, 从而推迟贝氏体的形成, 因此, 如图 2 所示, 当 Si 含量从 0.03% 增加到 0.45% 时, 下贝氏体组织显著减少。同时, Si 属于缩小奥氏体相区的元素, 也是增大过冷奥氏体稳定性的元素, 使钢的淬火临界冷却速度减小, 使组织更容易得到马氏体, 所以, Si 含量从 0.03% 增加到 0.45% 时, 金相组织中马氏体显著增

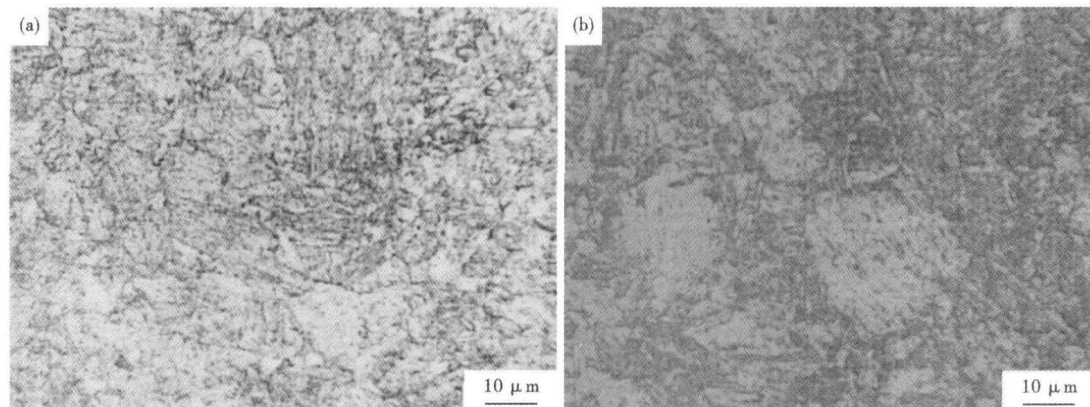


图 2 锻后处理和调质处理后 30Cr2Ni4MoV 钢的组织形貌: (a) 0.03% Si 试样 2; (b) 0.45% Si 试样 5

Fig. 2 Morphology of structure of steel 30Cr2Ni4MoV with heat treatment after forged and quenched + tempered treatment: (a) 0.03% Si, sample No2; (b) 0.45% Si, sample No5

多。此外,加入 Si < 0.2% 时,可细化奥氏体晶粒,但当 Si ≥ 0.2% 时,晶粒粗化<sup>[5]</sup>。图 2 中可以看出,第 1 炉 Si 含量为 0.03% 的合金试样的晶粒明显比第 2 炉 Si 含量为 0.45% 的合金晶粒略微细小。

## 2.2 拉伸性能

Si 属于非碳化物形成元素,能溶于铁素体和奥氏体中,有固溶强化的能力,其作用仅次于 P,较 Mn、Ni、Cr、W、Mo 和 V 等元素强,能提高钢的弹性极限、屈服强度,从而提高钢的强度。同时,从合金的金相图 2 可以看出,第 2 炉钢中的马氏体组织明显比较多,马氏体中的位错和应力场产生的强化,以及其亚结构强化和自回火现象产生的时效强化都会提高钢的强度,但是,第 1 炉的晶粒比第 2 炉略微细小些,细小的晶粒可提高试样的屈服强度。此外,Si 还会形成 Ni<sub>3</sub>Si 相产生沉淀强化作用。试样的拉伸性能如表 2 所示,当 Si 含量从 0.03% 增加到 0.45%,两炉试样平均抗拉强度和屈服强度从 930 MPa 和 870 MPa 都提高了近 100 MPa,同时,断面收缩率和断面伸长率也都有明显的提高。

## 2.3 硬度

径向和轴向的布氏硬度测试结果见表 3。根据国家规定,在同一圆周上各点间的 HB 硬度差

≤ 30,在同一母线上的 HB 硬度差 ≤ 40。两炉钢样在硬度上均满足标准要求,而且两炉合金各钢样的硬度值比较接近,没有明显差异。可见,Si 含量的不同对试样的硬度没有明显的影响。

## 2.4 冲击功

标准 JB/T11020-2010 要求 30Cr2Ni4MoV 钢的冲击功  $A_{KV} \geq 81$  J。由表 2 可见,2 炉钢样的冲击功平均值均能满足标准要求。但是,随着 Si 含量从 0.03% 增加到 0.45%,试样断裂的平均冲击功从 205 J 降低为 154 J,降低了 51 J;可见,Si 含量的提高使钢样的韧性降低,这主要是由于 Si 含量低的试样晶粒更为细小。研究表明<sup>[1]</sup>,晶粒细小时,晶内的空位数目和位错数目都较少,塞积位错数目减小,应力场的强度降低,推迟了裂纹萌生,增大了断裂应变。同时,晶粒细,裂纹穿过晶界进入相邻晶粒并改变方向的频率增加,消耗的能量增加,冲击功也就比较高。

## 3 结论

(1) 当 Si 含量从 0.03% 增加到 0.45%,30Cr2Ni4MoV 钢的金相组织中马氏体增多,下贝氏体减少,同时晶粒也变得更为粗大。

(2) 增加钢中 Si 含量,能显著提高钢的抗拉强度和屈服强度,同时,断面收缩率和伸长率也有提高。

(3) Si 含量在 0.03% ~ 0.45% 变化时,并没有明显影响 30Cr2Ni4MoV 钢的硬度大小。

(4) 冲击功随着 Si 含量的提高而降低,当 Si 含量从 0.03% 增加到 0.45%,试样断裂的平均冲击功从 205 J 降低为 154 J,降低了 51 J。

(5) Si 对 30Cr2Ni4MoV 钢的综合力学性能的影响既有利,又有弊,随 Si 含量的增加,既能提高钢的屈服强度和抗拉强度等拉伸性能,又会有粗化晶粒的作用,会降低其冲击韧性。

表 2 Si 含量对 30Cr2Ni4MoV 钢力学性能的影响

Table 2 Effect of Si content on mechanical properties of steel 30Cr2Ni4MoV

Si 含量/ %	试样 号	抗拉强 度/MPa	屈服强 度/MPa	断后伸长 率/%	断面收缩 率/%	平均冲击 功 $A_{KV}$ /J
0.03	1	922	868	12.3	52.5	205
	2	932	873	12.0	54.5	
	3	936	869	13.2	53.5	
0.45	4	1 015	950	16.3	69.5	154
	5	1 017	956	17.1	71.5	
	6	1 028	959	17.3	72.0	
标准		≥860	≥830	≥16	≥45	≥81

表 3 Si 含量对 30Cr2Ni4MoV 钢 HB 硬度值的影响

Table 3 Effect of Si content on HB hardness of steel 30Cr2Ni4MoV

Si 含量/%	试样号	测试位置	直径/mm	硬度值(HB)
0.03	1	轴向	1.782	291
		轴向	1.793	287
	2	轴向	1.762	298
		径向	1.768	296
	3	轴向	1.773	294
		径向	1.820	278
0.45	4	轴向	1.753	301
		轴向	1.752	301
	5	轴向	1.772	294
		径向	1.792	287
	6	轴向	1.803	284
		径向	1.788	289

## 参考文献

- 1 赵振业. 合金钢设计. 北京:国防工业出版社,1999
- 2 洪慎章,李名尧. 锻造实用数据速查手册. 北京:机械工业出版社,2007
- 3 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册-典型零件热处理. 第 4 版. 北京:机械工业出版社,2008
- 4 中华人民共和国国家经济贸易委员会. JB/T7027-2002 300 MW 及以上汽轮机转子体锻件技术条件. 北京:机械工业出版社,2003
- 5 宋维锡. 金属学. 第 2 版. 北京:冶金工业出版社,2007

范 倚(1988-),男,博士生,钢铁冶金研究。

收稿日期:2011-01-23