

## 汽轮机叶片用钢 X10CrNiMoV12-2-2 锻造棒材的开发

吴江枫 陈新建 张甫飞

(宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司, 上海 200940)

**摘要** X10CrNiMoV12-2-2 钢(%: 0.08 ~ 0.13C, 11.4 ~ 12.5Cr, 2.2 ~ 2.8Ni, 1.6 ~ 1.8Mo, 0.25 ~ 0.40V, 0.020 ~ 0.040N) 经 20 t EAF-AOD-LF 冶炼后铸成 Φ490 mm 电极, 电渣重熔成 Φ600 mm 钢锭, 锻造成 Φ180 ~ 240 mm 棒材。检验结果表明, 钢中有害元素 Sb 为 0.002%, As 0.010%, Sn 0.010%, 其夹杂物级别、晶粒度、力学性能、FATT(脆性转变温度)、晶间断裂百分比、δ-自由铁素体含量均达到技术标准要求。

**关键词** 汽轮机叶片用钢 X10CrNiMoV12-2-2 锻材

## Development of Forged Bar of Steel X10CrNiMoV12-2-2 for Turbine Blade

Wu Jiangfeng, Chen Xinjian and Zhang Fufei

(Special Steel Branch, Baoshan Iron & Steel Co Ltd, Shanghai 200940)

**Abstract** Steel X10CrNiMoV12-2-2 (%: 0.08 ~ 0.13C, 11.4 ~ 12.5Cr, 2.2 ~ 2.8Ni, 1.6 ~ 1.8Mo, 0.25 ~ 0.40V, 0.020 ~ 0.040N) melted by 20 t EAF-AOD-LF process cast to Φ490 mm electrode, electroslag-remelted to Φ600 mm ingot and forged to Φ180 ~ 240 mm bar products. Examination results show that the residual deleterious element content is 0.002% Sb, 0.010% As and 0.010% Sn; the rating of inclusions, grain size, mechanical properties, fracture appearance transition temperature (FATT), percentage of intercrystalline fracture and free δ ferrite content in steel all meet the requirement of technical standard.

**Material Index** Steel for Turbine Blade, X10CrNiMoV12-2-2, Forged Product

X10CrNiMoV12-2-2 合金是一种 Cr-Ni-Mo-V-N 型超临界、超超临界叶片钢<sup>[1,2]</sup>。X10CrNiMoV12-2-2 合金钢与 GX-8 和 1Cr12Ni3MoVN 钢相近, 其主要特征为: (1) 具有明显的回火脆性区 450 ~ 550 ℃。(2) 具有良好的综合性能: 塑性、疲劳性能、持久性能、蠕变性能、抗腐蚀性能、焊接性和成型性。(3) 从金相组织考虑, 该钢已处于马氏体-铁素体边界上, 因此, 任何铁素体形成元素的增加, 都会明显影响钢中铁素体含量, 这对钢的力学性能将产生不良作用。

### 1 研制工艺及过程

锻棒用钢的生产工艺: 20 t 电弧炉冶炼合金, 经 AOD 和 LF 后浇铸成 Φ490 mm × 3 250 mm 电极; 表

面精整后, 电渣重熔成 Φ600 mm × 2 000 mm 钢锭; 精整处理、取化学分析样后, 采用 4000T 快锻/2000T 快锻锻造加工成所需的 Φ180 ~ 240 mm 成品锻棒; 退火处理后进行超声波探伤, 并取样检测性能。

#### 1.1 电弧炉与电渣炉的冶炼

X10CrNiMoV12-2-2 合金的化学成分如表 1 所示。电弧炉冶炼时, 由于该合金中 Si 含量要求低, 因此电弧炉冶炼过程须采用 Al 粉来脱氧; 该钢中含 N 且要兼顾到钢中 Mn 含量控制, 必须考虑冶炼过程中 N 及 Mn 的烧损量, 保证其含量要求; 该钢种纯洁度要求苛刻, 炼钢时要采取特殊的冶炼工艺技术, 以利夹杂物上浮, 保证纯净度的要求。

电渣重熔时应减少有益元素的烧损和控制好残

表 1 X10CrNiMoV12-2-2 钢成分要求、电渣母材和电渣锭的化学成分/%

Table 1 Requirement of chemical composition and analysis of electrode and ESR ingot of steel X10CrNiMoV12-2-2 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N	Ti	Al	Cu	Sn	Sb	As
标准要求	0.08 ~ 0.13	0.10 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 0.025	≤ 0.020	11.40 ~ 12.50	2.20 ~ 2.80	1.60 ~ 1.80	0.25 ~ 0.40	0.020 ~ 0.040	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.10	≤ 0.020	≤ 0.005	≤ 0.04
电渣母材 (电极)	0.11	0.24 ~ 0.27	0.70 ~ 0.73	0.013 ~ 0.014	0.003	11.71 ~ 11.90	2.64 ~ 2.69	1.63 ~ 1.69	0.33 ~ 0.34	0.022	0.010	0.002	0.05 ~ 0.07	0.01	0.002	0.01
电渣锭	0.11 ~ 0.12	0.19 ~ 0.28	0.63 ~ 0.72	0.011 ~ 0.014	0.003	11.73 ~ 11.99	2.56 ~ 2.66	1.67 ~ 1.69	0.31 ~ 0.32	0.024 ~ 0.030	0.01	0.002	0.05 ~ 0.07	0.010	0.002	0.01

余元素 Ti、Al 等含量,保证合金具有理想的组织。

电弧炉冶炼的 X10CrNiMoV12-2-2 钢电极成分和电渣锭成分见表 1。

## 1.2 锻造

研制的锻棒用钢的钢锭、钢坯均采用室式炉加热,加热温度为 1 150 ℃。该钢高温热塑性变形能力大,易于加工,但为避免晶粒粗大,还是需要特定的加热锻造工艺,停锻温度亦不宜过高。钢锭锻造时两端应留有足够的切除量,以确保锻坯无缩孔、夹渣、疏松、严重偏析等缺陷。

## 2 锻棒用钢的试样测试结果

研制的锻棒用钢的试样为 90 mm × 90 mm。

### 2.1 横向低倍和断口

8 炉研制的锻棒用钢试样的横向低倍和断口检测结果为一般疏松 0.5 级,中心疏松 0 级,锭型偏析 0.5 级,断口检验合格。

### 2.2 纯洁度

研制的锻棒用钢的纯洁度检验结果见表 2。表 2 结果可以看出,研制的锻棒用钢的纯洁度完全可以达到西门子的技术标准要求,与国外产品相当。

### 2.3 探伤检验

按照有关标准对研制的锻棒用钢产品进行超声波检验,评定标准按 A 级(Φ1.2 mm 孔)。所研制的产品(Φ100 ~ 240 mm 圆棒)检测结果均无伤波,全部合格。

### 2.4 力学性能及组织

研制的电弧炉 + 电渣锻棒用钢的试样坯料按一定的热处理工艺制度热处理后加工成标准试样,测试其力学性能结果为:纵向  $R_m$  1 060 ~ 1 090 MPa,  $R_{p0.2}$  920 ~ 930 MPa, A 16% ~ 20%, Z 65.5% ~ 68.5%, HB 321; 横向  $R_m$  1 050 ~ 1 070 MPa,  $R_{p0.2}$  890 ~ 900 MPa, A 19.5% ~ 20%, Z 64.5% ~ 66%, HB 298 ~ 383。

本研制的锻棒用钢的力学性能完全达到了 X10CrNiMoV12-2-2 锻棒用钢的技术性能指标,各炉号合金性能稳定,一致性很理想。

### 2.5 FATT 测试和晶间断裂百分比测试

按照脆性转变温度 FATT 和晶间断裂百分比测试标准和测试方法检测了研制合金的 FATT 和晶间断裂百分比。8 炉钢的测试结果表明,研制的 X10CrNiMoV12-2-2 钢脆性转变温度 FATT 为

表 2 X10CrNiMoV12-2-2 锻棒用钢的夹杂物和晶粒度检验结果

Table 2 Examination results of inclusions and grain size of forged products of steel X10CrNiMoV12-2-2

冶炼炉号	夹杂物/级								晶粒度/级	
	A		B		C		D			IR(D)
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗		
锻材	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5 ~ 1.0	0.5	0	7 ~ 4
技术要求	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤0.5	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤0.5		7 ~ 4

-39.0 ~ -39.5 ℃,晶间断裂百分比为 ≤10%,完全达到了 X10CrNiMoV12-2-2 锻棒用钢 FATT ≤ -35 ℃ 和断口纤维率 ≤10% 的技术性能指标,满足使用性能要求。

### 2.6 夏比 V 型冲击功 $A_{KV}$ 及 $\delta$ 自由铁素体

研制合金的夏比 V 型冲击功  $A_{KV}$ : 纵向 144 ~ 192 J, 横向 120 ~ 160 J;  $\delta$  自由铁素体含量为 1%, 均超过西门子 X10CrNiMoV12-2-2 钢  $A_{KV} \geq 50$  J 和  $\delta$  自由铁素体 ≤5% 的技术性能指标。

## 3 结论

(1) 采用 20 t 电弧炉-AOD-LF + 电渣重熔研制的 X10CrNiMoV12-2-2 锻棒用钢,经规定热处理制度热处理后材料的力学性能、FATT、晶间断裂百分比及  $\delta$  自由铁素体等性能均达到和超过技术性能指标。

(2) X10CrNiMoV12-2-2 锻棒用钢有两个明显的回火脆性区,尤其是第 1 回火脆性区(400 ~ 520 ℃)更为明显,需要选择合适的热处理工艺才能发挥该钢的优良特性,使其既有很高的强度又有最好的韧性配合。

(3) 首次测试了材料的脆性转变温度 FATT 和晶间断裂百分比,其测试内容和方式方法的探索与积累,为今后“X 系列”不锈钢的开发与应用,奠定了技术基础。

### 参考文献

- 林富生. 中国电力发展及其对高温材料的需求. 2006 年火力发电设备用材料研讨会论文集, 2006
- 周荣灿, 范长信. 超超临界火电机材料研究及选材分析. 中国电力, 2005(8): 41

吴江枫(1953-), 男, 工程师, 1987 年吴淞大学毕业, 特殊钢新材料开发。

收稿日期: 2009-05-06