

## 增进核电焊材用钢 508Ⅲ洁净度的工艺实践

张欣杰<sup>1</sup> 赵雷<sup>1</sup> 陈保梁<sup>1</sup> 董方<sup>2</sup> 闫瑞军<sup>2</sup>

(1 中航上大高温合金材料有限公司, 邢台 054000; 2 内蒙古科技大学材料冶金学院, 包头 014010)

**摘要** 核电焊材用钢 508Ⅲ (/% : 0.09 ~ 0.12C, 0.30 ~ 0.40Si, 1.45 ~ 1.65Mn, ≤0.008P, ≤0.008S, 0.45 ~ 0.60Mo, 0.60 ~ 0.75Ni) 的生产工艺流程为 20 t EAF-LF-VD-4 t 铸锭-锻造 150 mm × 150 mm 坯-轧制 Φ5.5 mm 盘条。采用精选炉料, 以及高碱度渣、高 FeO 含量, 钢水温度 1 550 ~ 1 570 °C 等措施控制, 电弧炉终点 [P] ≤ 0.002%, 并选用低磷合金, 使钢中磷含量 ≤ 0.006%; LF 采用硅钙合金沉淀脱氧, SiC 粉扩散脱氧, CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系, 碱度 5.0 ~ 5.5, VD 真空度 ≤ 67 Pa, Ar 流量 30 ~ 50 L/min, 保护浇铸等措施后, 3 炉钢的分析结果表明, 钢中气体含量为 1.3 × 10<sup>-6</sup> ~ 1.5 × 10<sup>-6</sup> [H], 10 × 10<sup>-6</sup> ~ 14 × 10<sup>-6</sup> [O] 和 44 × 10<sup>-6</sup> ~ 58 × 10<sup>-6</sup> [N], 满足核电焊材用钢 508Ⅲ洁净度的要求。

**关键词** 20 t EAF-LF-VD-铸锭工艺 508Ⅲ钢 渣系 脱氧工艺 真空脱气 洁净度

## Process Practice of Improving Cleanliness of Steel 508Ⅲ for Nuclear Power Welding

Zhang Xinjie<sup>1</sup>, Zhao Lei<sup>1</sup>, Chen Baoliang<sup>1</sup>, Dong Fang<sup>2</sup> and Yan Ruijun<sup>2</sup>

(1 High Temperature Alloy Material Corporation of Aviation Industry of China, Xingtai 054000;  
2 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

**Abstract** The production process flowsheet of steel 508Ⅲ for nuclear power welding (/% : 0.09 ~ 0.12C, 0.30 ~ 0.40Si, 1.45 ~ 1.65Mn, ≤0.008P, ≤0.008S, 0.45 ~ 0.60Mo, 0.60 ~ 0.75Ni) is 20 t EAF-LF-VD-4 t ingot- forged to 150 mm × 150 mm billet-rolled to Φ5.5 mm coil. With process measures including using quality charge, high basicity slag and high FeO content, and controlling liquid temperature 1 550 ~ 1 570 °C, the EAF end [P] is ≤ 0.002%, and using low phosphorus alloys, the phosphorus content in steel is ≤ 0.006%; in LF refining process using silicon-calcium alloy for killing and SiC powder for diffusion deoxidation, and using CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> slag series with basicity 5.0 ~ 5.5, in VD process vacuum ≤ 67 Pa and Ar flow rate 30 ~ 50 L/min, and shielding casting etc measures the analysis results of 3 heats steel show that the gas content in steel is 1.3 × 10<sup>-6</sup> ~ 1.5 × 10<sup>-6</sup> [H], 10 × 10<sup>-6</sup> ~ 14 × 10<sup>-6</sup> [O] and 44 × 10<sup>-6</sup> ~ 58 × 10<sup>-6</sup> [N] to meet the cleanliness requirement of steel 508Ⅲ for nuclear power welding.

**Material Index** 20 t EAF-LF-VD-ingot casting process, Steel 508Ⅲ, Slag Series, Deoxidation Process, Vacuum Degassing, Cleanliness

目前国内核级压力容器制造企业所采用的主焊缝焊接材料均为进口<sup>[1]</sup>, 核电设备的关键焊接材料的技术水平, 批量间以及同批次产品质量的稳定性、均匀性和同类进口产品还存在差距, 很难满足核电国产化的需求。为此, 中航上大高温合金材料有限公司组织进行了核电焊材用钢 508Ⅲ的试制, 采用电弧炉 + LF + VD 工艺冶炼, 锻造开坯后轧制盘条。在工艺策划后, 连续生产了 3 炉 508Ⅲ钢, 锻造后对每炉锻材都进行了全面的分析检验, 各项指标满足标准要求, 而且不同炉次间各项技术质量指标差异较小, 能够满足核电用焊材钢的要求。

### 1 工艺流程

核电焊材用钢 508Ⅲ冶炼的主要难点在于钢水洁净度和连续生产条件下钢材内部质量的稳定性和均匀性的控制。针对以上难点, 从原材料的精选开

始, 到调整工艺过程中精炼渣系的组成和脱氧制度, 制定如下工艺流程: 原料严格精选 → 20 t 电弧炉冶炼 → LF 精炼 → VD 真空精炼 → 全封闭氩气保护浇铸 4 t 锭 → 锻造成 150 mm × 150 mm 坯 → 轧制 Φ5.5 mm 盘条。对每个工序的工艺控制点都进行严格的量化控制。

### 2 技术要求

核电焊材用钢 508Ⅲ由于其特殊用途, 对钢中合金元素及有害元素均有严格控制<sup>[2]</sup>。根据目前性能最优的核电焊材用钢 508Ⅲ对成分控制以及进一步限制钢中有害成分, 试制更高级别核电焊材用钢 508Ⅲ成分要求如表 1 所示; 对钢中气体含量的控制要求如表 2 所示; 对钢中非金属夹杂物控制要求如表 3 所示。

表 1 核电焊材用钢 508 III 化学成分要求 / %  
Table 1 Requirement of chemical composition of steel 508 III for nuclear power welding / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	V	Cr	Ti	Co	B	Al	As	Sn	Sb	Nb
0.09 ~ 0.30	~ 0.40	~ 1.45	≤ 0.008	≤ 0.008	≤ 0.05	0.60 ~ 0.75	0.45 ~ 0.60	≤ 0.01	≤ 0.10	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.0005	≤ 0.01	≤ 0.006	≤ 0.005	≤ 0.003	≤ 0.01

表 2 核电焊材用钢 508 III 气体含量要求 /  $10^{-6}$

Table 2 Requirement of gas content in steel 508 III for nuclear power welding /  $10^{-6}$

[H]	[O]	[N]
≤ 2.0	≤ 25	≤ 60

表 3 508 III 钢中非金属夹杂物合格级别 (GB/T10561-2005 A 法、附录 A)

Table 3 Qualified rating of non-metallic inclusions in tested steel 508 III, method A and appendix A, GB/T10561-2005

A		B		C		D	
细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0

### 3 工艺设计及生产实践

#### 3.1 研制工艺

核电焊材用钢 508 III 在使用过程中易发生辐照脆化现象,脆化原因主要为辐照产生的稳定缺陷团、富 Cu 沉淀、以及磷沉淀等<sup>[3-5]</sup>。为降低辐射脆化的不利影响,核电用焊材钢逐渐向高洁净化方向发展,这就要求钢中的氢、氧、氮含量要尽可能降低,严格控制钢中 Cu、S、P、As、Sn、Sb 等增加辐照脆化元素的含量。所以在工艺策划时从原材料选择、电弧炉脱磷、精炼渣系调整、VD 真空脱气等各工序都围绕上述两点要求做了详细的策划,以力求保证 508 III 钢高洁净的技术要求。

#### 3.2 原材料成分控制

选用优质废钢,按技术标准中残余元素的要求设定废钢采购标准,为保证废钢质量的一致性,采购废钢时选用优质铁矿粉企业的边角余料,同时废钢进厂要进行检验,保证 Cu、As、Sn、Sb 等有害元素符合标准要求。实际生产中采用的国内船厂同期下来的余料,余料废钢进厂后,每吨废钢抽样不少于 10 个,经检验所有废钢残余元素符合要求后入炉生产。同时,优质原材料的选用也为 S、P 及钢水洁净度的控制创造了有利的前提条件。

#### 3.3 电弧炉冶炼工艺

电弧炉冶炼主要工艺控制点是创造有利于脱磷的条件,对钢中磷含量进行控制,根据脱磷反应的方程式  $3(\text{CaO}) + 5(\text{FeO}) + 2[\text{P}] = (3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) +$

$5[\text{Fe}]$ ,脱磷反应的热力学条件是高碱度(3.0 ~ 4.0)、渣中较高的 FeO 含量(15% ~ 20%)、控制较低的反应温度(1550 ~ 1570 °C),动力学条件是增加熔池内钢液的流动,增加反应界面<sup>[6]</sup>。也可采用换新渣操作,进行深度脱磷。

实际生产时吨钢白灰加入量控制在 60 ~ 70 kg/t,为增加渣中 FeO 含量,经试验每炉加入氧化铁皮 130 ~ 150 kg,可以将渣中(FeO)控制在磷分配系数最佳区域。为控制脱磷反应的进行,脱磷期间钢水稳定控制在 1550 ~ 1570 °C,脱磷期间不断变换氧枪位置,增加熔池的搅拌,采取上述措施后,可以稳定控制电弧炉终点 P 含量在 0.002% 以下,同时再选用低磷合金,最终实现了钢中磷含量的控制。

#### 3.4 LF 及 VD 精炼工艺

因该钢种对氧含量和夹杂物要求非常严格,要想获得较高的钢水洁净度,合理的脱氧制度和渣系组成都是必不可少的。在工艺设计时,脱氧制度主要应该考虑脱氧中心前移,增加 LF 预脱氧剂的使用量,使脱氧产物有充足的上浮时间。为了有利于脱氧产物的上浮选用硅钙复合脱氧剂,一方面脱氧产物容易上浮排除,另一方面可有效控制钢中铝含量在较低水平,满足技术标准要求。二次精炼过程中,精炼渣通过与钢液的相互作用起到脱氧和夹杂物改性的作用,工艺设计时根据国内外特钢企业的经验确定目标渣系见表 4。

采取上述 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 三元渣系,炉渣碱度控制在 5.0 ~ 5.5,理想的夹杂物是 CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub> 及相邻的低熔点区域。

LF 精炼采用硅钙合金沉淀脱氧,吨钢使用量控制在 2 kg/t, SiC 粉扩散脱氧吨钢使用量 1.5 ~ 2.5 kg/t,采用优质白灰和精炼渣造渣,吨钢使用量 30 kg/t,渣系配比 1:1,为保证脱氧和钢中夹杂物充分

表 4 国内外特钢厂渣系组成及试验目标渣系  
Table 4 Ingredient of slag series at special steel works at home and abroad, and tested target slag series

厂家	渣系组成 / %					碱度 (R)
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	
山阳特钢	50 ~ 55	15 ~ 20	10 ~ 15	≤ 5	≤ 0.5	5.0 ~ 5.5
国内特钢	50 ~ 55	30 ~ 35	8 ~ 12	≤ 5	≤ 0.8	4.0 ~ 6.0
目标渣系	50 ~ 55	25 ~ 30	10 ~ 15	≤ 5	≤ 0.5	5.0 ~ 5.5

上浮,控制白渣精炼时间大于 30 min,LF 精炼时间 60 ~ 70 min,LF 除尘模式为外除尘罩式,保证了精炼过程中钢包内良好的还原性气氛。

VD 真空精炼的主要工艺参数控制为,真空度控制在 67 Pa 以下,真空脱气期间 Ar 气流量控制 30 ~ 50 L/min,真空脱气后弱搅拌时间控制在 15 ~ 20 min。

### 3.5 钢锭浇铸

因该钢洁净度要求高,夹杂物要求严格,为避免浇铸过程中的二次氧化和吸气,浇铸工序的工艺设计主要考虑保护浇铸措施,其余浇铸工艺按常规工艺进行,钢锭浇铸过程中如无专用的保护浇铸设备,钢包下水口至中注管之间 100 ~ 150 mm 的裸露钢水很容易二次氧化,造成钢水夹杂物和氮含量超标,为此,试验设计了专门的全封闭氩气保护装置,如图 1 所示。

采用氩气保护装置后,实现了钢水浇铸过程中的全程保护浇铸,保证了钢水的洁净度。

为控制钢锭铸态组织的偏析和疏松,4 t 钢锭浇铸工艺按表 5 设定;该锭型采用铸造软件 MAGMA 和 Procast 进行了模拟分析,钢锭全凝固时间 2 h,通过模拟发现该锭型按上述工艺浇铸钢锭内部没有明显的缩孔缺陷,锭身中上段心部有疏松类缺陷,需要经过锻造工序改善,可以满足高端品种的生产。

## 4 检验结果分析

试验材料采用电弧炉 + LF + VD 工艺冶炼,浇铸成 4 000 kg 钢锭,化学成分见表 6 和表 7。钢锭经 25MN 快锻机锻造,始锻温度 1 180 °C,终锻温度 850 °C,锻打成 280 mm × 325 mm 方坯,气体和夹杂物试样在锻造方坯上制取,检验结果见表 8 和表 9。锻造坯料经铣光后经 850 轧机轧制成 150 mm × 150

mm 中间坯,轧制温度 1 120 °C,力学性能试样在中间坯上制取,室温拉伸试样采用 10 mm 圆棒,检验结果见表 10,中间坯经修磨后,在线材生产线加工成 Φ5.5 mm 盘条,吐丝温度 890 °C。

主要元素全部符合技术标准要求。S、P 含量比技术要求还有很大富余,都控制在较低的水平。

各项残余元素和 As、Sn 等有害元素也得到了有效控制,由于生产用原材料采用同一批次,各炉次之间一致性较好。

钢中气体含量检验全部合格,低铝钢氧含量控制在  $15 \times 10^{-6}$  以下,从检验结果来看,采用真空脱气 + 保护浇铸工艺措施,使钢中氮含量稳定控制在  $60 \times 10^{-6}$  以下。

在 150 mm × 150 mm 锻坯上切取钢的夹杂物试

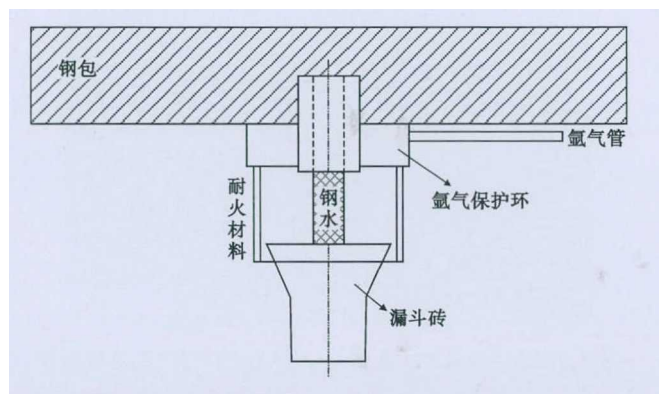


图 1 全封闭氩气保护浇铸装置示意图

Fig.1 Schematics of enclosed argon shielding pouring casting device

表 5 钢锭浇铸工艺参数  
Table 5 Parameters of ingot casting process

锭型/ t	锭模锥度/ %	高径比	浇铸温度/ °C	浇铸速度/ (m · min <sup>-1</sup> )
4	10	1.55	1 565 ~ 1 675	130 ~ 150

表 6 试验 3 炉 508 III 钢化学成分的分析结果/%

Table 6 Analysis results of chemical composition of tested steel 508 III, 3 heats /%

炉次	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Co	B	Al
7M10073	0.10	0.35	1.50	0.004	0.001	0.049	0.65	0.05	0.48	0.004	0.007	0.002	0.004 0	0.000 4	0.008 0
7M10074	0.10	0.37	1.53	0.005	0.001	0.029	0.63	0.05	0.48	0.004	0.007	0.002	0.003 8	0.000 5	0.001 0
7M10075	0.12	0.34	1.48	0.006	0.001	0.030	0.64	0.03	0.49	0.004	0.008	0.002	0.004 0	0.000 5	0.008 0

表 7 试验 3 炉 508 III 钢有害残余元素含量/%

Table 7 Content of residual elements in tested steel 508 III, 3 heats /%

炉次	As	Sn	Sb
7M10073	0.004 4	0.004 3	0.001 8
7M10074	0.004 1	0.002 6	0.001 5
7M10075	0.002 0	0.003 0	0.002 0

表 8 试验 3 炉 508 III 钢的气体含量/ $10^{-6}$

Table 8 Content of gases in tested steel 508 III, 3 heats /  $10^{-6}$

炉次	[H]	[O]	[N]
7M10073	1.3	14	44
7M10074	1.5	10	53
7M10075	1.3	11	58

表 9 试验 3 炉 508 III 钢夹杂物检验结果/级

Table 9 Examination results of inclusions in tested steel 508 III, 3 heats /rating

类别	A		B		C		D	
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
7M10073	0.5	0	0.5	1.0	0	0	1.0	0.5
7M10074	0.5	0	0.5	0.5	0	0	1.0	0.5
7M10075	0.5	0	0.5	0.5	0	0	1.0	0.5

表 10 试验 508 III 钢 150 mm × 150 mm 锻坯的力学性能

Table 10 Mechanical properties of 150 mm × 150 mm forged billet of tested steel 508 III

热处理制度	炉次	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
850℃ 淬火	7M10073	490	630	27.0	70.0
400℃ 回火	7M10074	485	625	27.5	69.5
	7M10075	485	625	28.0	70.0

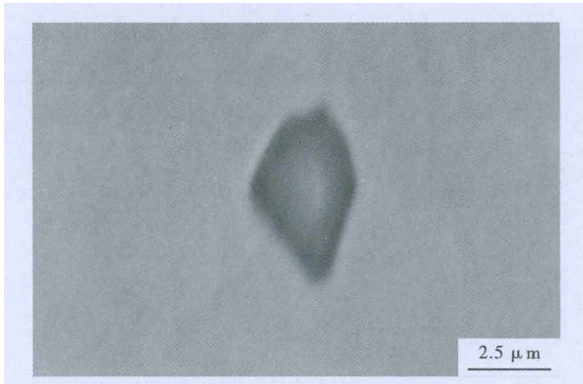


图 2 试验 508 III 钢 150 mm × 150 mm 锻坯中夹杂物形貌

Fig. 2 Morphology of inclusion in 150 mm × 150 mm forged billet of tested steel 508 III

样, 取样、制样及检验按 GB/T10561-2005 标准执行, 各类夹杂物都控制在 1.0 级以下, 显微镜下观察夹杂物形貌如图 2 所示。能谱分析得知, 钢中夹杂

物的主要元素有 O、Mg、Al, 以及少量的 S、Ca、Mn 元素。

### 5 结论

(1) 采用优质废钢原料, 按产品残余元素的要求制定废钢残余元素标准, 并严格检验, 保证核电焊材用钢 508 III 的杂质元素要求。

(2) 通过合理的制定脱氧制度和渣系组成, 钢中氧含量可控制在  $15 \times 10^{-6}$  以下和夹杂物的精确控制, 满足核电焊材高洁净度的要求。

(3) 真空脱气和保护浇铸技术的应用使钢中氮含量控制在  $60 \times 10^{-6}$  以下, 氢含量控制在  $1.5 \times 10^{-6}$  以下。

### 参考文献

- [1] 李昌义, 刘正东, 林肇杰. 核电站反应堆压力容器用钢的研究与应用[J]. 特殊钢, 2010, 31(4): 14-17.
- [2] 张文广, 李茂林, 郭德朋, 等. 核电 SA-508-3 钢研究进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(16): 10-12.
- [3] 施耀新, 田洪志. 反应堆压力容器母材 60 年寿命性能要求及工艺措施[J]. 发电设备, 2012, 26(2): 134-137.
- [4] 杨文斗. 反应堆材料学[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 261-273.
- [5] 李正操, 陈 良. 核能系统压力容器辐照脆化机制及其影响因素[J]. 金属学报, 2014, 50(11): 1285-1293.
- [6] 朱苗勇. 现代冶金工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 169-171.

张欣杰(1975-), 男, 高级工程师, 1999 年包头钢铁学院(本科)毕业, 特殊钢冶炼工艺和产品质量控制。

E-mail: Zhangxinjie0524@sina.com

收稿日期: 2017-08-07

## “讲文明树新风”公益广告

绿色 环保  
爱我 家园