

叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 1.1 t 电渣锭重熔工艺的优化

严清忠¹ 陈 列¹ 李发文¹ 佐 辉¹ 吴 彬¹ 鲁延明¹ 李 征¹ 赵海东¹ 成国光²

(1 西宁特殊钢股份公司二炼分厂, 西宁 810005; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要 叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 电极坯母材(/% : 0.10C, 0.24Si, 0.81Mn, 0.013P, 0.002S, 11.75Cr, 2.63Ni, 1.70Mo, 0.32V, 0.033N) 的生产流程为 30 t EAF-VOD-LF-2.67 t 铸锭-退火-Φ250 mm 锻坯。通过将 ANF-6 二元渣改成高纯度、低杂质 NEU_D06 预熔四元渣, 平均熔速由 5.27 kg/min 降低至 3.5~4.0 kg/min 等工艺措施, 成功地生产出 Φ430 mm 叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 电渣锭(/% : 0.10~0.12C, 0.75~0.86Mn, 0.21~0.24Si, 0.011~0.014P, 0.000 1S, 11.76~11.82Cr, 2.54~2.61Ni, 1.63~1.71Mo, 0.31~0.32V, 0.039N)。检验结果表明, 电渣锭的组织为马氏体 + 0.5%~1.5% δ-铁素体, 非金属夹杂物总和为 1.5~2.0 级, [O] 15×10^{-6} ~ 17×10^{-6} , [H] 1.24×10^{-6} ~ 1.47×10^{-6} , 保证了电渣钢的质量。

关键词 叶片钢 1Cr12Ni2Mo2VN 电渣重熔 夹杂物 工艺优化

Optimization on Remelting Process of 1.1 t ESR Ingot of Blade Steel 1Cr12Ni2Mo2VN

Yan Qingzhong¹, Chen Lie¹, Li Fawen¹, Zuo Hui¹, Wu Bin¹, Lu Yanming¹,
Li Zheng¹, Zhao Haidong¹ and Cheng Guoguang²

(1 No2 Steelmaking Plant, Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005;
2 Metallurgical and Ecological School, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The production flowsheet of electrode of blade steel Cr12Ni2Mo2VN (/% : 0.10C, 0.24Si, 0.81Mn, 0.013P, 0.002S, 11.75Cr, 2.63Ni, 1.70Mo, 0.32V, 0.033N) is 30 t EAF-VOD-LF-2.67 t ingot casting-annealing-Φ250 mm bloom forging process. With the process measures including to modify ANF-6 binary slag to high cleanliness low inclusion NEU_D06 premelting quaternary slag, decrease the average remelting rate from 5.27 kg/min to 3.5~4.0 kg/min, the Φ430 mm blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN ESR ingots (/% : 0.10~0.12C, 0.75~0.86Mn, 0.21~0.24Si, 0.011~0.014P, 0.000 1S, 11.76~11.82Cr, 2.54~2.61Ni, 1.63~1.71Mo, 0.31~0.32V, 0.039N) are successfully produced. Examination results show that the structure of ESR ingot is martensite + 0.5%~1.5% δ ferrite, total rating of nonmetallic inclusions is 1.5~2.0, the [O] is 15×10^{-6} ~ 17×10^{-6} and the [H] is 1.24×10^{-6} ~ 1.47×10^{-6} to insure the quality of ESR steel.

Material Index Blade Steel 1Cr12Ni2Mo2VN, ESR, Inclusion, Process Optimization

在我国电源结构中火电占 75% 左右, 不断提高火发电机组的运行参数和热效率, 建设超超临界火电机组, 是优化我国电源结构和实现国家节能减排战略目标的重要举措之一。到 2010 年底, 我国 600 °C 蒸汽参数超超临界火电机组的装机容量已跃居世界前列, 但我国电站建设用的高端耐热钢及合金长期以来基本依靠进口, 特别是 600 °C 超超临界火电机组次末级大叶片尚没有实现国产化^[1], 目前西宁特钢正组织相关单位进行技术攻关。

1Cr12Ni2Mo2VN (类似西门子的 X10CrNiMoV12-2-2) 是一种综合性能优良的低碳马氏体不锈钢, 可用于制作 600 °C 超超临界火电机组汽轮机次末级大叶片。为满足 600 °C 超超临界火电机组汽轮机次末级大叶片的技术要求, 本文就 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢电渣重熔生产中的渣系、渣

量、熔化速度等进行了优化研究。

1 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢棒材的主要技术要求

采用电弧炉冶炼并经电渣重熔。化学成分和非金属夹杂物检验结果如表 1 和表 2。棒材按 GB/T10561-2005 中 A 法检验非金属夹杂物, 按 JK 图评定合格级别应符合表 2 的规定。

铁素体含量按 GB/T8732-2004 中规定检验方法, 棒材的 δ 铁素体含量最严重视场应小于 5%, 取样方向为纵向。

棒材热处理后横向力学性能不低于纵向力学性能的 10%。

2 生产工艺流程

30 t EAF 冶炼 + VOD + LF 精炼 → 铸 2.67 t 方锭 → 退火 → 锻造 (Φ250mm) 电极坯 → 坑冷、表面清

表1 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N
0.08 ~ 0.13	0.15 ~ 0.35	0.70 ~ 0.90	≤ 0.025	≤ 0.015	11.50 ~ 12.50	2.20 ~ 2.80	1.60 ~ 1.80	0.25 ~ 0.40	0.02 ~ 0.04

表2 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢的非金属夹杂物要求/级

Table 2 Requirement for rating of inclusions in blade steel 1Cr12Ni2Mo2VN /rating

A		B		C		D	
粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5

注:(1)A+B+C+D 粗细 8 类夹杂物总和 ≤ 2.5 级。

(2)球形夹杂物(D类)的数量应符合 $IR(D \leq) = n_1 + 2.5n_2 \leq 10$, n 为球形及夹杂物数量 ($n_1: 25 \sim 50 \mu\text{m}$, $n_2: 51 \sim 75 \mu\text{m}$; IR(D) 转化成区域面积为 160 mm^2 。

理→电渣重熔 $\Phi 430 \text{ mm}$ 电渣锭→坑冷→退火、修磨→锻拔锻造 $\Phi 210 \text{ mm}$ 棒材→坑冷、退火→超声波探伤→车加工 $\Phi 200 \text{ mm}$ 棒材→检验、研究。

3 电渣重熔过程存在问题及分析

在 1Cr12Ni2Mo2VN 叶片钢检验中发现电渣重熔生产中存在如下主要问题:

(1)电渣重熔过程增氧严重;(2)非金属夹杂物检验超标;(3)因电渣重熔过程熔速不稳定,致使棒材的头尾化学成分偏差大、 δ -铁素体含量不满足技术要求。

3.1 渣系因素分析及新渣系的开发

试制初期使用的电渣重熔渣是将 $\text{CaF}_2 \geq 96\%$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 1.5\%$ 的萤石粉与 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99\%$ 、 $\text{SiO}_2 \leq 0.5\%$ 三氧化二铝粉采用铁铝电极重熔提纯的 ANF-6 渣(俗称三七渣, $\text{CaF}_2: \text{Al}_2\text{O}_3 = 70\%: 30\%$), 通过三批次的生产试验与检验, 均发现电渣重熔过程有明显增氧、电渣锭化学成分波动大、非金属夹杂物评级超标、铁素体分布不均等问题。电渣重熔前后钢中气体含量与化学成分变化、棒材上非金属夹杂物评级与不同部位铁素体含量分别如表 3、表 4 所示。

根据电渣重熔过程钢的化学成分变化大、增氧严重以及棒材非金属夹杂物评级超标等问题, 认为使用一般原料及自提纯的 ANF-6 渣不能满足此钢种的质量要求, 同时该渣系与此钢种也有不相适应问题。预熔渣是电渣重熔生产高质量和高端材料的

必要条件^[2], 通过查阅文献及调研, 决定选用高纯度、低杂质 (SiO_2 、P、S、FeO 等) 的预熔渣。为此, 课题组与东北大学姜周华教授合作开发预熔渣 NEU_D06(四元渣系)。通过多批次的生产实践与检验表明, 该预熔渣解决了电渣重熔过程的合金元素烧损、非金属夹杂物超标及钢中增氧、氧含量波动等问题。

3.2 渣量($G_{\text{渣}}$)的计算及确定

电渣重熔时熔渣的加入量多少与熔渣密度、结晶器平均直径、渣池深度有直接的关系, 其计算公式

$$\text{如下}^{[3]}: G_{\text{渣}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{结}}^2 \cdot \rho_{\text{渣}} \cdot H_{\text{渣}} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{渣}}$ - 熔渣密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $D_{\text{结}}$ - 结晶器平均直径 / mm; $H_{\text{渣}}$ - 渣池深度 / mm。

对于本次使用预熔渣 $\rho_{\text{渣}}$ 近似为 2.8 g/cm^3 , 电渣锭结晶器平均直径 D_m 为 430 mm , 而渣池深度 $H_{\text{渣}}$ 计算公式为:

$$H_{\text{渣}} = f_{\text{渣}} \times D_{\text{结}} \pm 20 \text{ mm} \quad (2)$$

式中: $f_{\text{渣}}$ - 渣深系数, $\Phi 430$ 结晶器渣深度系数选 0.36, 这样渣池深度 $H_{\text{渣}}$ 计算结果为:

$$H_{\text{渣}} = f_{\text{渣}} \times D_{\text{结}} \pm 20 \text{ mm} = 154.8 \pm 20 \text{ mm}$$

由渣量计算公式计算渣量值如下:

表3 使用 ANF-6 渣重熔后钢中主要元素和气体含量

Table 3 Analysis of main elements and gas content in steel remelting by using ANF-6 slag

取样部位	化学成分/%										气体含量/ 10^{-6}	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N	[O]	[H]
电极坯母材	0.10	0.24	0.81	0.013	0.002	11.75	2.63	1.70	0.32	0.033	27	2.65
267 炉 头部	0.12	0.22	0.70	0.014	0.002	11.72	2.54	1.68	0.31	0.039	62	1.86
267 炉 尾部	0.13	0.18	0.75	0.014	0.002	11.82	2.58	1.74	0.32	0.042	37	2.52
268 炉 头部	0.09	0.22	0.72	0.014	0.003	11.67	2.56	1.72	0.30	0.042	57	2.47
268 炉 尾部	0.11	0.17	0.77	0.014	0.004	11.81	2.61	1.71	0.31	0.041	32	2.07

表4 使用 ANF-6 渣重熔棒材的非金属夹杂物级别和铁素体含量

Table 4 Rating of nonmetallic inclusions and content of ferrite in steel products with ESR ingot remelting by using ANF-6 slag

取样部位	非金属夹杂物/级, ≤								铁素体/%	
	A		B		C		D			
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细		
评级标准	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	≤2.5	≤5
267 炉 头部	0	1.5	0	1.5	0	0	0.5	1.5	5.0	4
267 炉 尾部	0	1.0	0	1.5	0	0	0.5	1.0	4.0	7
268 炉 头部	0	1.5	0	1.5	0	0	0	1.5	4.5	3
268 炉 尾部	0	1.0	0	1.5	0	0	1.0	1.5	5.0	6

$$G_{渣} = \frac{\pi}{4} D_{结}^2 \cdot \rho_{渣} \cdot H_{渣} = 54.8 \sim 71 \text{ kg}$$

根据上面理论计算结果,实际生产可采用 54.8 ~ 71 kg 渣量。

在同样的锭型、电极坯及电力制度下,选用渣量分别为 60、65 kg 两组进行对比试验。试验结果表明,选用 60 kg 与 65 kg 渣量、正常冶炼时的平均熔速分别为 4.57、4.26 kg/min。根据熔炼过程工艺稳定性、电渣锭表面及熔速,最终确定渣量为 65 kg。

3.3 电力制度影响因素分析

冶炼电压、电流、功率参数选择与控制对重熔电渣锭的冶金质量影响是至关重要的,电流、电压的大小不仅直接影响了金属熔池的深度和冶炼速度,而这些因素对钢锭的结晶与凝固偏析、表面质量又有直接的影响。

试验初期设定工作电压 (55 ± 3) V、电流 (8 500 ± 500) A,电渣锭的平均熔速 5.27

kg/min,虽满足在 $d_{极}/D_{结} \approx 0.6 \pm 0.05$ 及经验式 $v_{结} = (0.7 \sim 0.8) D_{结}^{[3]}$ 的条件,但因冶炼过程使用的电流与电压,致使电渣锭从下到上的熔化速度不一致,未做到恒熔速精确控制,致使电渣锭出现头尾成分差别较大、偏析引起的铁素体含量波动等问题。

为此对冶炼电力参数设定与控制进行了优化,降低冶炼功率并重熔过程采用功率递减操作,即工作电压 (47 ± 3) V、电流 (8 000 ± 500) A,保持恒熔速控制,确定 $V_{熔}$ 目标 3.5 ~ 4.0 kg/min。

4 电渣重熔工艺优化及效果

渣系与冶炼工艺优化后,1Cr12Ni2Mo2VN钢重

表 5 使用 NEU_D06 预熔渣和工艺优化后钢中主要元素和气体含量
Table 5 Analysis of main elements and gas content in steel remelting by using NEU_D06 premelting slag and after process optimization

取样部位	主要元素									气体含量/10 ⁻⁶			锭重/t	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	N	O	H		
电极坯母材	0.10	0.81	0.24	0.013	0.002 0	11.75	2.63	1.70	0.32	330	26	2.76		
631 炉	头部	0.12	0.82	0.23	0.014	0.000 1	11.78	2.58	1.66	0.31	390	15	1.24	1.125
	尾部	0.11	0.86	0.24	0.011	0.000 1	11.80	2.59	1.70	0.31		17	1.30	
632 炉	头部	0.12	0.80	0.24	0.014	0.000 1	11.82	2.54	1.68	0.31	390	15	1.26	1.135
	尾部	0.12	0.86	0.25	0.011	0.000 1	11.80	2.61	1.71	0.31		16	1.32	
710 炉	头部	0.11	0.75	0.22	0.011	0.000 1	11.80	2.57	1.63	0.31	390	14	1.28	1.110
	尾部	0.10	0.80	0.23	0.012	0.000 1	11.76	2.58	1.69	0.32		16	1.25	
711 炉	头部	0.10	0.76	0.21	0.011	0.000 1	11.80	2.56	1.66	0.32	390	17	1.47	1.120
	尾部	0.11	0.80	0.23	0.012	0.000 1	11.79	2.58	1.67	0.32		16	1.32	

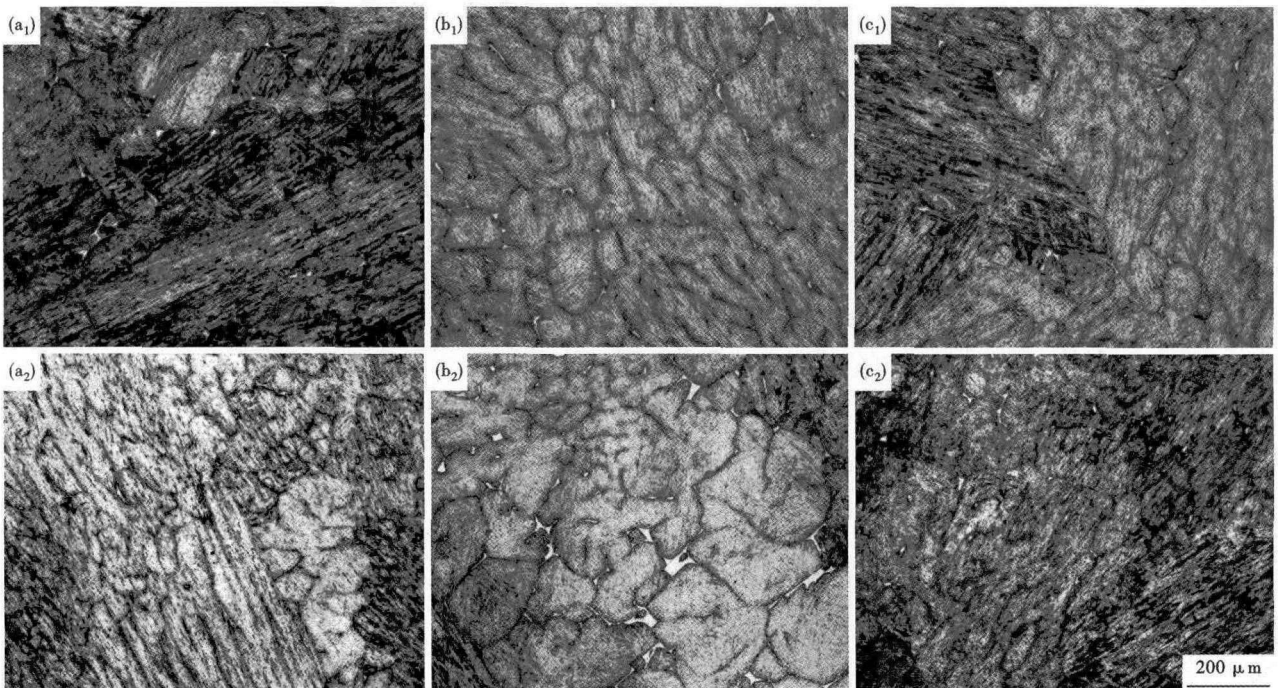


图 1 使用 NEU_D06 预熔渣和改进工艺后电渣锭头部(起弧端) (a₁, b₁, c₁) 和尾部(冒口) (a₂, b₂, c₂) 的组织形貌: (a₁, a₂) 边部, (b₁, b₂) 半径 1/2 处, (c₁, c₂) 心部

Fig. 1 Morphology of structure at top (arcing) (a₁, b₁ and c₁) and bottom (riser head) (a₂, b₂ and c₂) of ESR ingot remelting by using NEU_D06 premelting slag and after process optimization: at edge (a₁, a₂); 1/2 radius (b₁, b₂) and center (c₁, c₂)

表6 使用 NEU_D06 预熔渣和工艺改进后非金属夹杂物评级和铁素体含量

Table 6 Rating of nonmetallic inclusions and content of ferrite in steel products with ESR ingot remelting by using NEU_D06 premelting slag and after process optimization

取样 部位	非金属夹杂物/级, ≤								总和	铁素 体/ %
	A		B		C		D			
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细		
631 头部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	2.0	0.5
炉 尾部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0.5	2.5	1.5
632 头部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	2.0	1.0
炉 尾部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	2.0	1.5
710 头部	0	0.5	0	1.0	0	0	0	0.5	2.0	1.5
炉 尾部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	2.0	1.5
711 头部	0	0.5	0	1.0	0	0	0	0	1.5	0.5
炉 尾部	0	1.0	0	1.0	0	0	0	0	2.0	1.5

熔前后化学成分变化,气体含量及锭重见表5。

4.1 电渣锭显微组织

试样取自电渣锭两端,即头部和尾部(冒口),电渣锭各部位显微组织如图1所示,电渣锭各部位显微组织均为马氏体+ δ -铁素体。

由图1可知,尾部半径1/2处 δ -铁素体如图1(b_1 、 b_2)中白亮块含量明显多于其它部位,这与电渣重熔过程后期熔速较快有关。

4.2 非金属夹杂物检验

锻制后 $\Phi 200$ mm 钢材的非金属夹杂物检验评级结果和 δ -铁素体检验见表6。

研究表明^[4],叶片钢中 δ -铁素体含量控制主要是通过控制钢的化学成分与锻造时的加热温度,但本研究发现降低电渣重熔熔速及恒熔速冶炼可减少钢中 δ -铁素体的产生。

5 结论

(1)研制开发的高纯度、低杂质的四元预熔渣重熔 1Cr12Ni2Mo2VN 钢可明显降低钢中氧含量、提高纯净度及减少化学成分波动,非金属夹杂物级别满足 GB/T10561-2005 的技术要求。

(2)采用 $\Phi 250$ mm 电极坯、选定 65 kg 预熔渣渣量重熔 $\Phi 430$ mm 电渣锭为合适的渣量,重熔过程稳定,表面质量良好,并对降低熔速起到一定的作用。

(3)电渣重熔冶炼时适当降低冶炼功率及中后期的功率递减(递减电压、递减电流)操作,将熔化速度控制在 3.5~4.0 kg/min,电渣锭中 δ -铁素体含量明显减少。

国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)
(2012AA03A502)

参考文献

- [1] 刘正东. 中国 700 °C 燃煤发电机组耐热材料研发[C]. 2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集. 西宁, 2011:66-67.
- [2] 姜周华,董艳伍,张新法,等. 电渣重熔用预熔渣的开发和应用[J]. 特殊钢, 2011, 32(3):17-19.
- [3] 李正邦,洪彦若,张祖贤,等. 电渣熔铸[M]. 北京:国防工业出版社, 1981:150-167.
- [4] 陈亚宁. 叶片钢 2Cr11Mo1VNbN 轧制大型材 δ 铁素体含量控制[J]. 特钢技术, 2010, 16(1):18-23.

严清忠(1971-),男,工程师,1996年北京科技大学(本科)毕业,电渣冶金工艺技术研究。E-mail:095295396@163.com

收稿日期:2014-10-24

**欢迎全国冶金、机械、耐
材及相关行业在《特殊钢》杂
志上刊登工艺设备和技术、产
品研发宣传广告**