

30 t EAF-LF-VOD/VHD 流程冶炼 MHT10Ta 钢 钽含量控制的工艺实践

沙卫星¹ 王 坤¹ 陈秀强¹ 张丽娜² 秦四伟¹

(抚顺特殊钢股份有限公司 1 第二炼钢厂; 2 技术中心, 抚顺 113001)

摘 要 工业试验和分析了 [N]、[O] 和钢水温度对 MHT10Ta 钢钽收得率的影响。9 炉工业生产试验结果表明, 电弧炉采用氧化法冶炼; LF 用 C 粉脱氧; VOD 真空度 ≤ 67 Pa, 时间 ≥ 15 min; 进 VHD 加热, 确保 Al 含量 $\geq 0.02\%$, 温度 $1\ 635 \sim 1\ 645$ °C, Ar 气流量 100 L/min, 按 0.125% 加入钽条, 出钢前按 0.01% 插入 Fe-B, 出钢温度 $1\ 580 \sim 1\ 595$ °C, Ar 气保护浇注, MHT10Ta 钢成品钽含量 0.08% ~ 0.105%, 通过工艺优化, 钽的收得率可达 60%。

关键词 MHT10Ta 钢 30 t EAF-LF-VOD/VHD 钽 收得率 工艺实践

Practice of Process for Control of Tantalum Content in Steel MHT10Ta Melting by 30 t EAF-LF-VOD/VHD Flowsheet

Sha Weixing¹, Wang Kun¹, Chen Xiuqiang¹, Zhang Lina² and Qin Siwei¹

(1 2nd Steelmaking Plant, 2 Technical Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The effect of [N], [O] and liquid temperature on tantalum yield of steel MHT10Ta is analyzed by commercial test. The results of pilot 9 heats commercial production show that with melting in EAF by oxidation method, deoxidizing in LF by C powder, VOD refining vacuum ≤ 67 Pa for ≥ 15 min, VHD heating insuring Al content in steel $\geq 0.02\%$, liquid temperature $1\ 635 \sim 1\ 645$ °C, Ar flow rate 100 L/min, adding tantalum bar 0.125%, inserting Fe-B according 0.01% content before tapping, tapping temperature $1\ 580 \sim 1\ 595$ °C and Ar shielding casting; the tantalum content in finish products of steel MHT10Ta is 0.08% ~ 0.105%, the yield of tantalum is up to 60% by process optimization.

Material Index Steel MHT10Ta, 30 t EAF-LF-VOD/VHD, Tantalum, Yield, Process Practice

不同的合金元素在钢中具有不同的作用, 钢中加入钽, 可有效提高钢的高温强度和耐热性能。研究表明, 钢中钽含量从 0.027% 增加到 0.059% 时, 钢的强度和高温持久性将大幅提高^[1]。钽在元素周期表中位于第 VB 族, 和铌一样, 钽是强碳、氮化物形成元素。具有密度大 (16.65 g/cm^3)、熔点高 ($2\ 996$ °C)、耐蚀、优异的高温强度及低的韧-脆性转化温度等特点, 被广泛应用于电子、化工、高温合金等领域^[1]。目前钽在炼钢中应用较少^[2], 钽是仅次于钨、铼的第 3 个最难熔金属, 加热到高于 500 °C 则加速氧化生成 Ta_2O_5 , 钽和氮在 300 °C 以上开始反应生成固溶体和氮化合物。在高温下, 能与多种物质反应。

1 主要工艺设备和生产工艺

抚顺特钢第二炼钢厂钢锭生产工艺为: 30 t EAF → LF → VOD/VHD → 模铸(下注), 抚顺特钢第二炼钢厂主要装备参数如表 1 所示。

MHT10Ta 钢的标准化学成分, 如表 2。工艺流程为: 装料 → 30 t 电弧炉初炼 → 30 t LF 精炼 → 30 t VOD/VHD 吹氧精炼 → 模铸。

表 1 第二炼钢厂主要装备参数

Table 1 Main parameters of units at 2nd Steelmaking Plant

装备	项目	参数
EAF	电弧炉公称容量/t	30
	变压器容量/MVA	12.5
	电弧炉平均出钢量/t	31
LF	额定处理容量/t	30
	钢液升温速度/(°C · min ⁻¹)	≥ 4
	电极直径/mm	300
VOD/ VHD	公称容量/t	30
	最小钢水处理量/t	23
模铸	最大钢水处理量/t	35
	最大氧流量/(m ³ · h ⁻¹)	1 500
	极限真空度/Pa	20
	钢包自由空间/mm	570-775-1 075
	电极直径/mm	350
	变压器公称容量/KVA	10 000
	钢液加热速率/(°C · min ⁻¹)	3 ~ 4
	钢包底吹氩气流量/(L · min ⁻¹)	25 ~ 250
模铸	钢锭重量/t	0.71 ~ 27
	浇注方式	模铸(下注法)

1.1 电弧炉初炼

电弧炉采用氧化法冶炼, 炉料由生铁和优质废钢组成。配 C 量在 1.55% 左右, 保证电弧炉的去碳量和快速升温, 电弧炉氧化至 $P \leq 0.004\%$, $Si \leq$

表2 MHT10Ta 钢化学成分,9 炉/%
Table 2 Chemical composition of steel MHT10Ta, 9 heats /%

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	W	V	Mo	Nb	N	Co	Ta	B
电极	0.10 ~	0.10 ~	0.15 ~	≤	≤	10.00 ~	1.70 ~	0.15 ~	0.65 ~	0.04 ~	0.010 ~	3.00 ~	0.07 ~	0.007 ~
内控	0.18	0.25	0.30	0.005	0.012	10.75	1.85	0.25	0.75	0.06	0.035	3.50	0.13	0.009
目标	0.15	0.18	0.20	低	低	10.50	1.80	0.20	0.70	0.05	0.030	3.25	0.10	0.008
均值	0.126	0.159	0.189	0.001	0.007	10.300	1.780	0.197	0.690	0.05	0.025	3.22	0.089	0.008

0.20%, 温度 $T \geq 1690$ °C, 扒净氧化渣。出钢条件:
C ≤ 0.60%, 温度 $T \geq 1630$ °C。

1.2 LF 精炼

电弧炉出钢后,吊扒渣台扒净氧化渣。LF 到位加入白灰、萤石、铝钙渣,给电烧渣大于 10 min,过程采用纯 C 粉进行扩散脱氧,渣白取样全分析,样回调成分。 $T \geq 1650$ °C,各成分符合下部工序要求,吊至 VOD 扒渣台扒渣。

1.3 VOD/VHD 工艺

VOD (Vacuum Oxygen Decarburization) 到位扒净初炼渣,入罐取成分样,裸露钢水面 80% 以上,确认好钢水量。Ar 气流量 20 ~ 50 L/min,设定真空度 $2.0 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$ Pa,开 E5A-E4A 泵,氧枪下降高度 1200 ~ 1400 mm,当真空度 $\leq 2.0 \times 10^4$ Pa,开始吹氧,氧气流量设定 300 ~ 360 m³/h,然后根据实际情况进行逐渐提高,氧气流量最大不超过 720 m³/h,氧利用率设定 65% 左右。

在吹氧后期,开启极限真空泵。同时提高 Ar 气流量 30 ~ 50 L/min,逐渐降低氧气流量。当 MTA 碳氧分析仪曲线下,实际吹氧量与理论耗氧量相当时,停止吹氧。停氧后,真空度 ≤ 100 Pa,进行真空碳脱氧,保持 3 ~ 5 min。真空碳脱氧后,测温(吹后温度 ≥ 1600 °C),加入渣料(白灰、萤石)及脱氧剂粉、Ca-Si 块及部分合金料。开 E5A-E1 至极限真空度,提高 Ar 气流量至 100 L/min,真空度 ≤ 67 Pa 保持 15 min,破真空,取样。VOD 还原渣主要成分和碱度见表 3。

入 VHD (Vacuum Heat Degassing),小电流加热,温度 $T \geq 1640$ °C,炉中 [Al] 控制在 $\geq 0.02\%$,按 0.125% 加入钽条,加入金属钽时大氩气搅拌,确保钽条加入到氩气流上,搅拌 15 ~ 20 min 后取样分析,若搅拌后温度偏低,可小电流加热。

理论耗氧量 = (入罐 C% - 预计 C%) × 钢水量 × 0.93/碳氧利用率(0.6 ~ 0.8) + 入罐 Si% ×

表3 VOD 还原渣主要组分和碱度

Table 3 Main ingredient and basicity of reducing slag for VOD refining

渣的组成/%					碱度(R)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	
17.7	16.62	52.35	9.18	1.0	2.97

钢水量 × 0.80/硅氧利用率(0.90) + 入罐 Al% × 钢水量 × 0.63/铝氧利用率(0.9)。

1.4 浇铸

浇铸前 15 min 进行模内充 Ar,全程采用 Ar 气保护浇铸,浇铸锭型为 $\Phi 250$ mm(单重 0.64 t)电极棒,每锭盘 12 支,全炉浇铸 42 ~ 45 支。

2 实验结果及分析

采用 EAF → LF → VOD/VHD → 640 kg 模铸工艺共生产 9 炉 $\Phi 250$ mm 圆电极棒。

由表 4 可以看出,9 炉 MHT10Ta 钢的成品平均钽含量 0.089%,最大值 0.105%,最小值 0.080%,钽的平均收得率为 58.88%,最大值 69.49%,最小值 47.43%。前 3 炉由于是初期实验生产,一些过程参数的调整,导致了收得率的波动。

前 3 炉由于没有经验,钽的收得率不稳定,最高达到 69.49%,最低的仅 47.43%。后期逐渐对过程参数进行了优化,钽的收得率稳定在 60% 左右。

2.1 Ar 气搅拌对钽收得率的影响

氩气可有效改善冶金反应的动力学条件^[3],加快钢水脱氧、脱硫、温度和成分的均匀。但是底吹氩流量大小、吹氩时间难以把握^[4]。如果吹氩流量过

表4 MHT10Ta 钢中铝、氮、氧、钽含量和钽的收得率

Table 4 Aluminium, nitrogen, oxygen and tantalum content in steel MHT10Ta and yield of tantalum

炉号	成品成分/%				钢水量/t	加钽温度/°C	钽条加入量/(kg·炉 ⁻¹)	钽收得率/%
	[Al]	[N]	[O]	[Ta]				
121250	0.017	0.023 2	0.001 9	0.087	31.0	1 630	52.90	50.98
121482	0.029	0.024 0	0.001 3	0.105	32.0	1 636	48.35	69.49
121591	0.033	0.023 5	0.002 3	0.080	33.2	1 617	56.00	47.43
121649	0.042	0.025 3	0.001 9	0.085	34.5	1 643	49.50	59.24
121653	0.041	0.025 3	0.001 8	0.086	28.4	1 652	42.00	58.15
121682	0.044	0.023 2	0.001 7	0.083	32.4	1 641	46.40	57.96
121687	0.055	0.025 3	0.001 4	0.090	30.7	1 640	45.60	60.59
121764	0.044	0.025 1	0.001 8	0.099	33.4	1 644	51.00	64.84
121787	0.022	0.024 7	0.002 2	0.090	34.0	1 647	50.00	61.20
平均	0.040	0.024 4	0.001 8	0.089	32.2	1 639	49.08	58.88

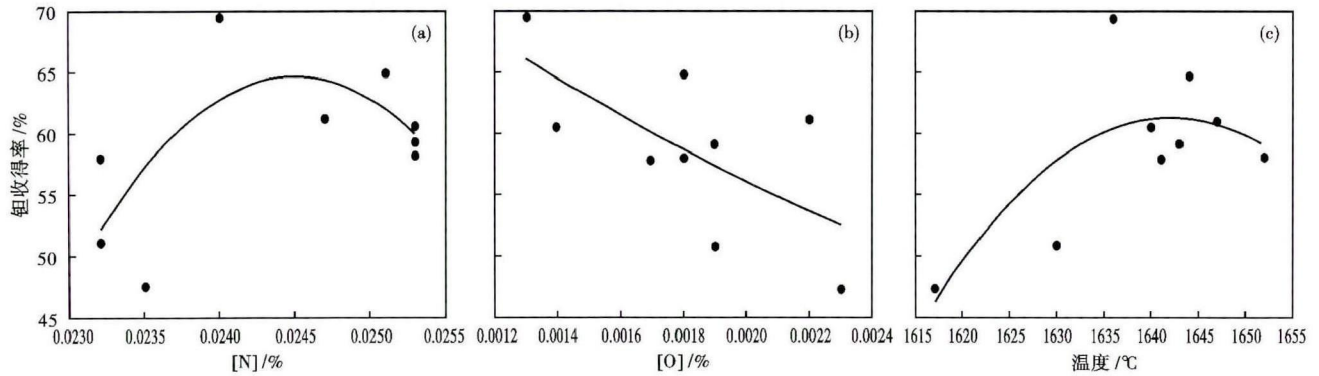


图 1 钢中氮含量(a)、氧含量(b)和钢液温度(c)对钽收得率的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen content (a) oxygen content (b) and liquid temperature (c) in steel on yield of tantalum

大,会造成裸露钢水面,过小起不到良好的搅拌效果,针对加钽时的氩气流量,通过摸索确定在 100 L/min 左右为最佳。能确保钽最大限度的快速熔化,同时不造成钢水大面积裸露。

2.2 氮含量对钽收得率的影响

由于钽的化学性质很活泼,可以与许多非金属元素形成具有良好机械性能的化合物^[5]。钽和氮在 300 °C 以上开始反应生成固溶体和氮化合物。

由图 1(a) 可见,随钢中氮含量增加,钽的收得率呈现下降趋势。由于此钢种有氮含量要求,氮含量必须控制在规格范围内。因此通过先进行氮的合金化,后加钽的方式来保证钽的收得率。

2.3 氧含量对钽收得率的影响

由图 1(b) 可以看出,钢中氧含量越高,钽的收得率越低。在实际冶炼过程中,钢水中 $[Al] \geq 0.020\%$ 时,对应的 $[O]$ 溶解 $\leq 4.0 \times 10^{-6}$,将钢中残余铝控制在 0.02% ~ 0.05%,通过底吹氩气搅拌,改善冶金反应的动力学条件,可将钢中氧含量控制在极低的水平^[3]。在 VOD 精炼后期,根据炉中实际 $[Al]$,适量向钢中加入铝粒,保证加钽前炉中 $[Al] \geq 0.02\%$ 等措施,最大限度降低钢中氧含量。

2.4 温度对钽收得率的影响

对于密度大、熔点高的金属,温度越高越有利于其溶解,但是温度过高则会加快钢液的吸氧、吸气,对稳定钢中易氧化元素不利,同时温度过高,会加速钢包耐火材料的侵蚀与剥落。

由图 1(c) 可以看出,随着加钽时炉中温度的提高,钽的收得率逐渐提高,但当温度大于 1 645 °C 时,钽的收得率又开始呈现下降趋势,因此,控制加钽时

炉中温度在 1 635 ~ 1 645 °C,对钽的收得率最有利。

3 结论

(1) MHT10Ta 钢生产时,加钽时控制炉中 $[Al] \geq 0.02\%$,最大限度的降低钢中氧含量,可稳定提高钽的收得率。

(2) 改善冶金反应的动力学条件,调整底吹氩气流量至 100 L/min 左右,可强化钢液搅拌效果,同时,温度控制在 1 635 ~ 1 645 °C,可有效提高钽的收得率。

(3) 先进行氮的合金化(VOD 底吹氮或加氮化铬),后加钽,可有效稳定钽的收得率。

(4) 通过(1) ~ (3)的各项控制措施,钽的收得率可稳定在 60% 以上。

参考文献

- [1] 史显波,赵连玉,严伟,等.钽在 Fe-C-Ta 合金中的强化作用[J].钢铁研究学报,2013,25(12):58-62.
- [2] 王振东,曹孔健,何纪龙,等.感应炉冶炼[M].北京:化学工业出版社,2009:231-233.
- [3] 孙永喜,李法兴,张君平,等.冶炼硼钢控制硼含量的工艺实践[J].特殊钢,2013,34(4):33-35.
- [4] 李文双,朱荣,鲍翔,等.150 t 钢包底吹氩气的水模型研究[J].特殊钢,2013,34(3):18-21.
- [5] 李忠文,唐光泽,马欣新. GCr15 钢表面沉积及氮离子注入的磨损性能[J].稀有金属材料与工程,2010,39(1)增刊:77-80.

沙卫星(1982-),男,工程师,2007 年河南科技大学(本科)毕业,特殊钢冶炼工艺及钢锭质量控制研究。

E-mail:shaweixing6688@163.com

收稿日期:2015-11-02