攀矿钛渣电炉副产半钢炼铁和炼钢工艺研究*

袁宗阳　李谊大

（冶金部钢铁研究总院）

本文从理论探索到小规模工业试验结果证实，含硫0.11～0.8%，碳2.1～2.45%，低硅锰的半钢通过喷射冶金新工艺可得到优质铸铁和电炉强化脱硫工艺炼成优质钢。对于该两种工艺的经济效益分析，认为半钢炼成优质铸铁比较合理。

喷射冶金工艺流程为：半钢温度大于1400°C，在铁水包中先喷吹1.3～2.8%碳粉，增碳至3.5%C以上，然后向已增碳的铁水中喷吹1～2%脱硫剂，脱硫至小于0.05%，最后进行合金化处理可得到优质铸铁。

一、前　言

攀枝花钒钛磁铁矿是我国目前所发现的最大铁矿之一。为了综合回收铁、钛、钒资源，遵义钛厂，锦州铁合金厂分别用6300KVA，1800KVA电炉生产75%TiO_2的钛渣，并副产近25～30%的低硅锰高硫半钢。多年来高硫半钢无法应用，限制了资源的全面开发，直接影响了钛渣的成本。

国外生产钛渣的主要厂家均实现了在电炉生产钛渣的同时，经炉外处理直接副产出可供炼钢和铸造用生铁。如：加拿大魁北克铁钛公司索雷尔工厂是世界上最大的钛渣工厂，年产70～72%TiO_2的钛渣90万吨和优质生铁60万吨〔1〕。南非Richards Bay铁钛公司，在生产85%TiO_2高钛渣同时，每年还得23.5万吨优质低锰生铁。美国阿尔巴尼冶金研究中心对低品位钛铁矿系用电炉熔炼钛渣，将副产半钢炉外处理得到炼钢和铸造生铁〔2〕。

本试验研究钛渣电炉副产高硫半钢炼钢和炼铁的工艺方法。

二、试验用原料和试验结果

（一）实验用原料

1．由遵义钛厂用攀矿钛精矿未经脱硫预处理，经6300KVA钛渣电炉副产高硫夹渣的半钢。综合分析化学成份：

1.9—2.3%C，0.6—0.8%S，<0.2%Si，<0.2%Mn，0.09%V，约0.16%Ti。

2．由锦州铁合金厂研究所用攀矿钛精矿经回转窑预氧化脱硫焙烧，用250KVA钛渣电炉副产半钢。平均分析化学成份：

2.1—2.45%C，0.11—0.16%S，0.05～0.19%Si，0.05—0.084%Mn，0.003～0.04%P。

3，为研究高硫铁水的钠盐喷吹、造渣脱硫制度，在实验室用FeS配置高硫原料，其化学成份列于表1。

* 参加试验者：刘荣福，李双文，李正等

（二）试验方法和结果

1．实验室条件试验

试验在100KVA中频感应电炉碱性MgO坩埚中进行，研究纯铁液和铁水脱硫条件。采用$CaO-CaF_2$渣系造渣，钠盐喷吹处理脱硫。

铁水喷吹Na_2CO_3前加5％的$CaO-CaF_2$渣料造渣，然后分三次向铁水中喷吹4％（铁水重）的Na_2CO_3，铁水温度为1560℃。钠盐喷吹以氩作载气源，流量为2～3.5m^3/h，喷吹时间2 min。

纯铁液的脱硫喷吹制度同铁水喷吹方法同，但喷吹前不用渣料造渣。

实验室脱硫条件试验结果列于表2。

化学成分（%） 表1

名称	C	Si	Mn	S
高硫纯铁	0.03	0.14	0.045	0.38
高硫生铁	4.00	/	/	0.54

脱硫条件试验结果 表2

原料	脱硫方法		造渣脱硫率		喷吹Na_2CO_3脱硫率		总脱硫率
	$CaO-CaF_2$ %	喷吹Na_2CO_3 %	$\frac{(S)_{始}}{(S)_{终}}$	η_S，%	$\frac{(S)_{始}}{(S)_{终}}$	η_S，%	%
纯铁液	/	4	/	/	$\frac{0.38}{0.27}$	30	30
4%C的铁水	5	4	$\frac{0.54}{0.04}$	93	$\frac{0.04}{0.005}$	87.5	99

2．铁水喷吹钠盐和造渣脱硫，喷吹增碳炼铁综合条件试验。

试验在100KVA单相渣电阻炉（MgO炉衬）中进行，研究单独排放口钛渣电炉副产半钢渣洗脱硫的渣型、铁水增碳、钠盐脱硫喷吹制度。

渣洗脱硫用渣型60％CaO＋20％CaF_2＋20％Al_2O_3，渣料重为铁水量的20-30％，铁水温度1370～1400℃。

钠盐喷吹脱硫用2％Na_2CO_3作脱硫剂，氮气作载气源。

半钢增碳采用喷吹2％（铁水重）碳粉的方法，载气源为氮气。

工艺过程为试料熔清→造渣精炼→喷吹增碳→喷吹苏打脱硫→合金化→出铁。

半钢通过渣洗，喷吹炭粉增碳和苏打脱硫炼铁综合条件试验结果列于表3。

三、生铁脱硫增碳过程反应热力学

通过实验室和炼铁综合条件试验结果，对脱硫和增碳热力学理论分析如下：

（一）渣洗脱硫热力学条件

脱硫反应式：$[S]+(O^{2-})=(S^{2-})+[O]$

脱硫指数：$L_S=\frac{(\%S)}{[\%S]}=K_S \times \frac{N(O^{2-})\cdot\gamma(O^{2-})\cdot f_S}{[\%O]\cdot f_O\cdot\gamma(S^{2-})}$

炼铁综合试验结果　　表3

编号		试验工艺	造渣脱硫率 $\frac{(S)_{始}}{(S)_{终}}$	造渣脱硫率 η_S，%	喷吹苏打脱硫率 $\frac{(S)_{始}}{(S)_{终}}$	喷吹苏打脱硫率 η_S，%	总脱硫率%	喷吹炭粉增碳 $\frac{(C)_{始}}{(C)_{终}}$	喷吹炭粉增碳 炭粉收得率%
2.1%C的铁水	F_1	$CaO+CaF_2+Al_2O_3$ 渣量20～30%	$\frac{0.13}{0.013}$	90	/	/	90	/	/
	F_2		$\frac{0.13}{0.01}$	92	/	/	92	/	/
	F_3		$\frac{0.13}{0.014}$	89	/	/	89	/	/
	F_4		$\frac{0.13}{0.016}$	88	/	/	88	/	/
	F_5	$CaO+CaF_2+Al_2O_3$ 渣量20～30%	$\frac{0.13}{0.013}$	90	$\frac{0.013}{0.006}$	54	95	$\frac{2.0}{3.1}$	65
	F_6	喷吹2%炭粉 喷吹2%苏打	$\frac{0.13}{0.009}$	93	$\frac{0.009}{0.006}$	33	95	$\frac{2.1}{3.1}$	59

炭粉含固碳85%

通过上式可知，要提高脱硫率，必须升高熔池温度，使平衡常数K_S增大；增加渣中CaO，MgO等氧化物浓度，使渣中氧离子摩尔分数$N(O^{2-})$增大，增大硫的活度系数f_S。

（二）喷吹苏打脱硫热力学条件

反应式：$Na_2CO_3 \overset{\Delta}{=} Na_2O + CO_2\uparrow$

$$(Na_2O)+[FeS]=[Na_2S]+(FeO)$$

$$\lg K_S = \lg\frac{a_{Na_2S}\cdot a_{FeO}}{a_{Na_2O}\cdot a_{FeS}} = \frac{64.92}{T}+1.51$$

平衡时的硫含量为

$$[\%S]=\frac{a_{(O)}\cdot a_{Na_2S}}{f_S\cdot a_{Na_2O}\cdot K_S}$$

可见，喷吹苏打提高脱硫率的热力学条件也需高温，增加渣中Na_2O浓度和硫的活度系数f_S。

（三）铁液中含碳量对硫活度系数 f_S 的影响

从启普曼发表的资料可知，f_S和[%C]有以下关系式：

$$\log f_S^C = 0.11[\%C]+0.006[\%C]^2$$

不同含碳量铁液中f_S^C值列于表4。

由此看出，铁液中的碳含量能成倍地提高硫的活度，因此高碳铁水比钢液易脱硫。

铁液中硫活度系数值　　表4

铁液含C，%	4	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	0.03
f_S^C	3.4	2.87	2.42	2.05	1.75	1.5	1.0

（四）半钢喷吹增碳

反应式：$3Fe_{液}+C_{固}=Fe_3C-2500cal$

由于增碳反应是吸热反应，提高温度能促使半钢中碳的溶解，生铁中饱和含碳量随温度的提高而提高，$\%C_{饱}=1.3+0.00257t$；饱和含碳量越高，增碳程度越

高，因此提高半钢温度对增碳有利。试验在2%C半钢中喷吹增碳，增碳剂单位消耗波动在1.5～1.57kg/kg吸收碳范围内。

四、热接半钢炼铁扩大试验

根据实验室条件试验的理论分析条件，即先增碳后脱硫。用250KVA钛渣电炉副产半钢流入铁水包内进行。

工艺流程是热接半钢(温度大于1400℃)→喷吹1.3—2.8%碳粉增碳至3.5%C→喷吹1～2%苏打脱硫至小于0.05%S→合金化→出铁。

增碳和脱硫以氮气作载流气体喷吹。试验结果列于表5。

250 KVA 试验结果 表5

炉号	原材料用量，kg/炉						试验工艺过程 (镁砂衬铁水包 φ400×500mm)	样号	化学成份，%				
	半钢	碳粉	苏打	电石	Si-Mn 65%Mn	Si-Fe 72.5%Si			C	S	Mn	Si	P
1#	150	4.13	1.5		1.73	4.37	半钢→加炭粉取样1 →喷苏打(3min)取样2 →加合金→取样3	1 2 3	2.34 3.81 3.55	0.12 0 12 0.12	0.06 0.06 0.70	0.14 0.10 1.35	0.04 0.04 0.05
2#	150	4.13	1		1.73	4.37	半钢→加炭粉取样1 →喷苏打(4min)取样2 →加合金→铸锭→取样3	1 2 3	2.41 3.75 3.59	0.12 0.10 0.05	0.07 0.07 0.95	0.13 0.07 2.48	0.03 0.03 0.03
3#	150	2		2	1.73	4.37	半钢取样1→喷混合粉(9min)取样2→加合金→铸锭取样3 (混合粉：碳粉+电石)	1 2 3	2.14 3.50 3.14	0.11 0.05 0.01	0.08 0.10 1.04	0.19 0.25 2.88	0.03 0.04 0.05
4#	150	3	1		1.73	4.37	半钢取样1→喷碳粉(7min) 取样2→喷苏打(4min) →取样2→加合金→取样3	1 2 3	2.28 3.77 3.44	0.13 0.03 0.01	0.03 0.03 1.41	0.06 0.03 2.48	0.03 0.03 0.05

五、半钢炼钢试验

试验用0.5t碱性电弧炉，用遵义钛厂钛渣电炉副产半钢作原料，炼成45*碳结钢。

操作工艺是装料→熔化→预还原强化脱硫（造渣剂CaO + CaF_2 + 碳粉，三次造渣脱硫指数分别为15，40，50）→高温氧化→还原期精炼合金化→出钢。

炼钢操作采用熔清后高碳下强化预脱硫，脱硫率达96%，然后进入氧化期降碳，还远期脱硫率达36%，总脱硫率达98%。采用未经脱硫预处理半钢作原料时，夹杂严重，冶炼时间增加1/3，电耗增加30%。

六、热接半钢炼铁和炼钢技术经济分析

铸铁和钢锭处理过程成本、技术经济分析结果列于表6，各种材料单价参考资料[3]。

半钢炼铁和炼钢经济分析　　表6

序号	热接炼钢（产品钢锭A3）				热接炼铁（产品铸锭）			
	消耗项目	消耗量	单价	金额，元	消耗项目	消耗量	单价	金额，元
1	电力	400度/t	0.10元/度	40	电力	50度/t	0.10元/度	5
2	半钢	1000kg	30元/t	30	半钢	1000kg	30元/t	30
3	电极	7.5kg/t	2000元/t	15	炭粉	20kg/t	300元/t	6
4	渣料	30kg/t	60元/t	2	苏打	20kg/t	1000元/t	20
5	吹氧管	3kg/t	670元/t	2	氮气	20m³/t	0.8元/m³	16
6	氧气	30m³/t	0.8元/m³	24	喷吹管	1kg/t	2000元/t	2
7	合金料	Mn-Fe 11kg Si-Fe 6kg	0.9元/kg 1.2元/kg	17	合金料	35kg/t		39
8	炉衬	50kg/t	700元/t	35	铁水包材料	10kg/t	200元/t	2
9	浇注材料	20kg/t	800元/t	16	铁模	3kg/t	750元/t	2.25
10	水	20m³/t	0.12元/m³	2.4				
11	锭模	30kg/t	750元/t	22.5				
12	碳粉	10kg/t	300元/t	3				
	合计			209				122.25

考虑到炼钢过程铸余损失等，成锭率约80%。炼铁过程吹损约5%，因此处理成本为：

A3钢锭：209 + 80% = 261.25元/t

铸铁：122 + 95% = 128.42元

钢锭毛利 = 300元/t(钢锭单价) − 261.25元/t = 38.75元/t

铸铁毛利 = 230元/t(铸铁单价) − 128.42元/t = 101.58元/t

七、结　论

1．对于喷射冶金炼铁或是电炉炼钢，高碳金属液脱硫效果比低碳钢好。合理工艺应先增碳后脱硫、合金化。

2．半钢喷射冶金炼铁工艺：铁水温度大于1400℃，苏打用量2%，脱硫率达60—90%。碳粉用量2%，增碳剂单位消耗波动在1.5～1.7kg/kg吸收碳范围内。

3．攀枝花钛精矿钛渣电炉副产半钢通过喷射冶金可炼成铸铁，或电弧炉强化预脱硫炼钢、铸锭。半钢炼铁工艺操作简便，设备投资少，经济效益比炼钢好，可以大幅度降低钛渣成本。

参考文献

〔1〕Canadin Mining Journal, 2 (1964)

〔2〕Mining Annual Reveiw, 1979

〔3〕炼钢设计手册，冶金工业出版社，1978