

酸性渣 SiO₂ 含量对电渣重熔 S-Pb-Te 易切削不锈钢冶金质量的影响

赵鸿燕
(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003)

摘 要 通过 500 kg 保护气氛电渣炉试验研究三元渣(/% : 65CaF₂, 25Al₂O₃, 5SiO₂)、四元渣(/% : 55CaF₂, 20Al₂O₃, 20SiO₂, 5CaO) 和五元渣(/% : 45CaF₂, 20Al₂O₃, 25SiO₂, 5CaO, 5MgO) 对 S-Pb-Te 易切削不锈钢(/% : 19 ~ 21Cr, 1.5 ~ 2.5Mo, 0.1 ~ 0.3Pb, 0.25 ~ 0.40S, 0.03 ~ 0.10Te) 电渣锭冶金质量的影响。结果表明, 四元渣和五元渣 S 收得率较三元渣高; 三元渣 Pb 收得率相对较高; 3 种渣系 Te 收得率无明显差异; 含 SiO₂ 为 25.0% 的五元渣系, 所重熔的 S-Pb-Te 易切削不锈钢电渣钢锭小头和大头 S、Pb 和 Te 偏差最小, 分别为 ΔS 0.03%、ΔPb 0.02% 和 ΔTe 0.028%, 且电渣钢锭表面质量良好。

关键词 电渣重熔 酸性渣 SiO₂ 含量 S-Pb-Te 易切削不锈钢 冶金质量

Effect of SiO₂ Content in Acid Slag on Metallurgical Quality of Electro-Slag Remelting S-Pb-Te Free Cutting Stainless Steel

Zhao Hongyan
(Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The effect of ternary slag (/% : 65CaF₂, 25Al₂O₃, 5SiO₂), quaternary slag (/% : 55CaF₂, 20Al₂O₃, 20SiO₂, 5CaO) and quinary slag (/% : 45CaF₂, 20Al₂O₃, 25SiO₂, 5CaO, 5MgO) on metallurgical quality of electro-slag ingot of S-Pb-Te free cutting stainless steel (/% : 19 ~ 21Cr, 1.5 ~ 2.5Mo, 0.1 ~ 0.3Pb, 0.25 ~ 0.40S, 0.03 ~ 0.10Te) has been tested and studied by 500 kg shielding atmosphere electro-slag remelting (ESR) furnace. Results show that the yield of S in steel remelting by quaternary slag and quinary slag is higher than that by ternary slag; the yield of Pb remelting by ternary slag is relative higher; the yield of Te remelting by three kind of slag series is no-obvious difference; with SiO₂ content in steel remelting by quinary slag is 25.0% the deviation of S, Pb and Te content in S-Pb-Te free cutting stainless steel ESR ingot from top to bottom is minimum, that are respectively ΔS 0.03% , ΔPb 0.02% and ΔTe 0.028% , and the surface quality of electro-slag ingot is best.

Material Index Electro-Slag Remelting, Acid Slag, SiO₂ Content, S-Pb-Te Free Cutting Stainless Steel, Metallurgical Quality

在 Cr19 型铁素体不锈钢中加入 S、Pb、Te 元素, 是一种应用较为广泛的易切削不锈钢, 该钢种主要采用电渣重熔的冶金方式进行生产, 其中在电渣重熔过程中, 渣系选择不当易造成重熔过程 S 元素损失大、电渣钢锭小头(顶部) 和大头(底部) S、Pb、Te 偏差大的现象, 对产品性能造成不利影响。采用 SiO₂ 含量较高的酸性渣, 可以有效地降低电渣重熔过程的 S 损失, 但是需要研究不同组份配比下的酸性渣对电渣钢锭小头和大头 S、Pb、Te 偏析的影响。

1 试验材料及电渣重熔工艺参数

试验用易切削不锈钢的主要成分见表 1。电渣重熔工艺参数见表 2。

电渣重熔传统使用的 70F 渣系, 虽然原始渣料中不含有 SiO₂, 但在电渣重熔过程渣中主要成分 CaF₂ 与其它组分发生反应^[1], 生成 CaO, 呈碱性, 有较强的脱硫能力, 不能用于冶炼易切削钢。所以冶

表 1 S-Pb-Te 易切削不锈钢主要标准成分 / %
Table 1 Main chemical composition of standard of S-Pb-Te free cutting stainless steel / %

Cr	Mo	S	Pb	Te
19.0 ~ 21.0	1.5 ~ 2.5	0.25 ~ 0.40	0.1 ~ 0.3	0.03 ~ 0.10

表 2 电渣重熔工艺的主要工艺参数
Table 2 Main technique parameters of electro-slag remelting (ESR) process

结晶器尺寸/ (mm × mm)	充填 比	渣量/ kg	电流/ A	电压/ V	熔速/ (kg · min ⁻¹)	渣阻摆 动/Ω	气氛
Φ350 × 1 650	0.75	40	7 000 ~ 7 500	50 ~ 53	4.5	≤0.3	Ar

炼该钢种需要配制酸性渣系, 以保证硫的收得率。
碱度可用下式表示:

$$N = (mCaO + mMgO) / (mSiO_2 + 0.5 mAl_2O_3)$$

式中: mCaO、mSiO₂- 氧化物百分含量。碱度 N < 1 为酸性渣。试验选择了 A、B、C 三种渣系进行试验,

表 3 试验用渣系配比和碱度
Table 3 Ingredient of experimental slag series and basicity

渣系	组成 /%					碱度 (CaO/SiO ₂)
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	
A	65	25	5			
B	55	20	20	5		0.25
C	45	20	25	5	5	0.20

见表 3。为了加强去除钢中 Al₂O₃ 夹杂物效果,渣系 B、C 配比 5% 的 CaO。

在 500 kg 保护气氛电渣炉上,分别用 A、B、C 渣系重熔 Cr19 型易切削不锈钢各 3 炉,对电渣钢锭小头和大头分别钻孔取样,检验 S、Pb、Te 成分,电渣锭小头和大头直径分别为 Φ340 mm、Φ360 mm。

2 试验结果

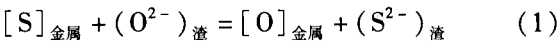
电渣钢锭小头和大头平均成分见表 4。对试验电渣钢锭小头和大头 S、Pb、Te 收得率进行化学分析,见表 5。由表 4 和表 5 可见,3 种渣系重熔的易切削不锈钢中 Cr、Mo 含量相对稳定,但 S、Pb、Te 含量有明显差别,三元渣系 A 和四元渣系 B 重熔的电渣锭 S 收得率较低,小头和大头 S 偏差较大,分别为 ΔS 0.12% 和 ΔS 0.07%,用五元渣系 C 重熔的电渣锭 S、Pb、Te 收得率相对较高,大、小头偏差均相对较小,为 ΔS 0.03%, ΔPb 0.02% 和 ΔTe 0.028%。

3 分析讨论

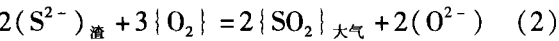
3.1 渣系对 S 元素收得率的影响

电渣重熔 S 损失主要包括:碱性炉渣脱硫和大气脱硫。

炉渣脱硫:在钢渣界面发生如下反应。



大气气化脱硫^[2]:转移进渣中的硫与大气中氧反应而溢出。



渣系 A 虽然原始配比中不含 CaO,但在电渣重熔的高温下,渣中 CaF₂ 与 SiO₂ 反应生成 CaO,所以渣系 A 碱度接近中性渣,故硫收得率较低,大头区域达 60%。

渣系 B 与渣系 C 碱度基本相同,但渣系 C 中有 5% 左右的 MgO, MgO 在电渣冶炼过程中在渣池表面形成一层半凝固膜^[3],阻碍了式(2)渣中硫与大气中氧反应的进行,所以使用渣系 C 冶炼的钢锭 S 收得率高。

表 4 S-Pb-Te 易切削不锈钢电渣锭小头和大头分析成分/%
Table 4 Analysis composition of top and bottom ESR ingot of S-Pb-Te free cutting stainless steel /%

项目		Cr	Mo	S	Pb	Te
电极成分		20.10	1.98	0.35	0.20	0.10
A 渣系钢	小头	20.14	1.98	0.33	0.19	0.081
	大头	20.01	1.97	0.21	0.21	0.048
B 渣系钢	小头	20.11	1.97	0.34	0.16	0.100
	大头	19.98	1.98	0.30	0.23	0.069
C 渣系钢	小头	20.12	1.97	0.35	0.18	0.099
	大头	20.08	1.97	0.33	0.21	0.071

3 种渣系冶炼的钢锭大头区域 S 损失都大于小头区域,因为大头区域先结晶,随着钢锭高度增加,渣中硫离子(S²⁻)逐步趋于饱和,硫损失减小。

3.2 渣系对 Pb 元素收得率的影响

Pb 元素有显著特点:一方面密度为 11.35 g/cm³,比 Fe 的密度大得多,在冶金过程中极易由于重力因素形成偏析;另一方面 Pb 熔点 327.4 ℃。沸点 1 740 ℃, Pb 的熔点、沸点都远低于 Fe,在冶金过程中,冶金温度越高 Pb 越易变成蒸汽挥发掉。

电渣重熔过程中,随着钢锭高度增加,渣池的温度逐步升高,所以在蒸发损失以及重力偏析综合作用下,3 种渣系冶炼的钢锭小头区域 Pb 都低于大头区域 Pb。

另一方面电渣过程熔池钢液温度主要取决于渣的电导率,重熔电流与熔渣电导率之间有以下关系^[4]:

I = \frac{UA\kappa}{L} (3)

式中:U- 渣池两端电压降/V;A- 渣池的有效导电面积/cm²;κ- 熔池的电导率/(Ω · cm⁻¹);L- 电极与金属熔池的间距,简称极间距/cm。

从(3)式可知,当 I、U、A 一定的条件下,极间距的大小与熔渣的电导率成正比。电导率越小,极间距越小,则电极下方熔渣的发热密度越大,熔渣温度也越高,电极的熔化速度也越大,越易使蒸汽压高的元素形成蒸发损失。

温度1 400 ℃ 以上时,渣系 C 的电导率高于渣

表 5 渣系对易切削不锈钢电渣锭小、大头 S、Pb、Te 收得率的影响
Table 5 Effect of slag series on yield of S, Pb and Te in top and bottom of ESR ingot of free cutting stainless steel

渣系	收得率 /%						两头偏差 /%		
	小头			大头					
	S	Pb	Te	S	Pb	Te	ΔS	ΔPb	ΔTe
A	94.3	95.0	81.0	60.0	105.0	48.0	0.12	0.01	0.033
B	97.1	75.0	100.0	85.7	110.0	69.0	0.07	0.07	0.031
C	100.0	90.0	99.0	94.28	105.0	71.0	0.03	0.02	0.028

系 B 电导率,且温度越高,二者电导率差值越大^[5]。而 A 渣系在1 600 ℃时电导率为 2.8 Ω/cm,是 3 种渣系中电导率最大的,所以相同的输入功率情况下,使用渣系 B 重熔渣池温度较高,熔速快,加剧了 Pb 的挥发损失,A 渣系的电导率最大,在相同功率情况下,熔速最小,Pb 损失最小(即 Pb 收得率最高)。

3.3 渣系对 Te 元素收得率的影响

Te 的熔点 449.5 ℃,沸点 989.9 ℃,熔沸点较低,在炼钢温度下也易挥发损失。由于电渣重熔初期渣氧化性强及空气中氧的影响,钢锭大头区域 Te 收得率低于小头区域。电渣全过程使用 3 种渣系 Te 收得率无明显差别。

3.4 渣系对电渣钢锭表面质量的影响

电渣钢锭表面质量一方面取决于所用重熔渣系特性,即随温度变化粘度变化小的渣系有利于钢锭成型;另一方面,渣系熔点较低的渣系有利于钢渣分离,电渣钢锭表面质量良好。

由四元和五元渣系的黏度与温度的关系图^[5]可知,B 渣系黏度(Four-2 曲线)比 C 渣系(Five-3 曲线)黏度高,不利于电渣钢锭表面质量。且 C 渣系黏度随着温度变化的趋势在拐点处有一个温度范围比 C 渣系温度范围宽,这一特点有利于提高电渣重

熔钢锭表面质量。
同时,结合表 6 数据,渣系 C 熔点最低,在电渣重熔过程钢锭冷却凝固时,钢渣容易分离。综合得出渣系 C 所冶炼的 Cr19 型易切削不锈钢电渣钢锭表面质量良好。

4 结论

(1)三元渣系 A 和四元渣系 B 重熔的易切削不锈钢电渣锭小头和大头 S、Pb 偏差分别为 ΔS 0.12% 和 ΔPb 0.01% 以及 ΔS 0.07% 和 ΔPb 0.07%,而五元渣系 C 重熔的电渣锭小头和大头 S、Pb 偏差最小,分别为 ΔS 0.03%、ΔPb 0.02%;3 种渣系冶炼的电渣钢锭小头和大头 Te 偏差无明显差别,平均为 0.03%。

(2)五元渣系 C 冶炼的电渣锭表面质量最好。

参考文献

[1] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010:123.
[2] 丁永昌, 徐曾启. 特种熔炼[M]. 北京:冶金工业出版社,1995: 140-141.
[3] 赵鸿燕. 渣系对 Ar 气保护电渣重熔 Ni-Cr-Co 基高温合金质量影响[C]. 2012 年全国电渣冶金技术学术会议论文集. 沈阳:东北大学出版社,2012:66.
[4] 姜周华. 电渣冶金的物理化学及传输现象[M]. 沈阳:东北大学出版社,2000:40.
[5] 张家雯,熊 铁. 电渣重熔酸性渣的研究及应用[J]. 特殊钢, 1998,19(3):6-9.

赵鸿燕(1970-),女,高级工程师,1993 年包头钢铁学院(本科)毕业,真空感应熔炼、电渣重熔等特种冶金研究。
E-mail:zhaohy@tisco.com.cn

收稿日期:2016-02-18

表 6 3 种渣系熔化特征温度 /℃
Table 6 Melting eigen-temperature of three kinds of slag /℃

渣系	变形温度	半球温度	流动温度
A	1 270	1 292	1 310
B	1 207	1 226	1 233
C	1 140	1 182	1 185

下 期 要 目

20 t T 型中间包控流装置的模拟和优化	彭家清等
Φ16 mm GCr15 轴承钢棒材 KOCKS 轧机热连轧工艺数值模拟和分析	李小龙等
石灰活性和微观结构对铁水脱磷的影响	薄 荷等
稀土镧在 Fe-La 合金系中的晶界扩散行为	陈树明等
奥氏体不锈钢管热挤压过程挤压针冷却工艺的优化	王伯文等
80 t BOF-LF-VD-CC 流程生产 GCr15 轴承钢控氧的工艺实践	刘发友等
控轧控冷工艺对 SCM435 钢盘条组织和性能的影响	阮士朋等
氮含量对 10B21 冷镦钢 Φ12 mm 线材淬火硬度的影响	李永超等
车削非调质钢 SG4201 奥氏体晶粒的长大行为	赵文贵等
含钒非调质预硬型塑料模具钢 48MnV 的开发	邓通武等