

# 双相不锈钢 F55 电渣重熔过程夹杂物的控制

陈帅超,赵轶鹏,朱晓锋,任书旺,梁晓辉

(洛阳双瑞特种装备有限公司,河南 洛阳 471000)

**摘要:**本文重点研究了双相不锈钢 F55 的电渣重熔工艺,研究发现,F55 电极经过电渣重熔后钢中氧含量增加,经扫描电镜检测分析,钢中的夹杂物类型主要为高熔点的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。通过优化电渣工艺,采用  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2$  五元渣系,同时渣中加 SiCa、Al 对熔渣进行脱氧, $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物发生变性,形成低熔点复合夹杂物,易于从钢中去除,从而实现 F55 电渣过程夹杂物的有效控制。

**关键词:**双相不锈钢;电渣重熔;夹杂物;变性

**中图分类号:**TF141.1

**文献标识码:**A

## Control of Inclusion in Electroslag Remelting Process of F55 Duplex Stainless Steel

CHEN Shuaichao, ZHAO Yipeng, ZHU Xiaofeng, REN Shuwang, LIANG Xiaohai

(Luoyang Shuangrui Special Equipment Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The electroslag remelting of F55 duplex stainless steel is investigated. Results show that the oxygen content increases after the electroslag remelting of the F55 electrode. The inclusions in the steel are mainly  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by SEM analysis. By optimizing the ESR process, using the slag of  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2$  and adding SiCa and Al to deoxidize, the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions become deformed and the melting point becomes low, so the inclusion is easy to be removed from the steel, realizing the control the inclusions in the process of electroslag remelting of F55.

**Keywords:** duplex Stainless steel; electroslag remelting; Inclusions; modification

双相不锈钢 F55 具有较高的强度、良好的成型性、可焊性、优异的耐氯化物局部腐蚀及应力腐蚀性能。典型的应用领域为:石油化工、肥料工业、电站烟道气脱硫(FGD)装置、海水及热海水环境等<sup>[1]</sup>。

钢中的夹杂物尤其是脆性夹杂会对钢的热加工塑性及产品的疲劳、腐蚀等使用性能产生不利影响。因此,需对钢中夹杂物的种类和数量进行严格控制。

高端 F55 产品通常采用电渣重熔方式生产,能获得良好的凝固组织和纯净度,产品各项性能优异。

## 1 影响夹杂物去除的因素

### 1.1 自耗电极中的原始夹杂物

电渣重熔过程中,夹杂物的去除影响因素,与自耗电极中的夹杂物的类型和数量有关,而自耗电极中夹杂物的类型和数量,主要与电极冶炼所采用的终脱氧制度有关。

耿鑫等人<sup>[2]</sup>通过实验研究了终脱氧方式对夹杂物去除的影响。研究数据表明:用 Al 进行终脱氧生产的自耗电极,电渣重熔后夹杂物的去除率较低,其原因是脱氧产物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  熔点高,质点尺寸小,不易被熔渣吸收。另外, $\text{Al}_2\text{O}_3$  使夹杂物

收稿日期:2019-06-06

作者简介:陈帅超,男,1986年生,高级工程师,主要从事特种钢产品技术研发工作。

与液态金属间的界面张力变小,亦不利于夹杂物从钢液中析出。当自耗电极改用复合脱氧剂 AMS 和 Ca-Si 进行终脱氧后,经电渣重熔,钢中的夹杂物含量大幅度下降,其原因是复合脱氧产物的熔点较低,尺寸较大,在钢中易上浮被熔渣吸附去除。

## 1.2 熔渣的组成

熔渣中的  $\text{FeO}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{SiO}_2$  等杂质氧化物,由于是变价金属氧化物,会导致钢中 Si、Mn、Al、Ti 等活泼元素发生氧化,因此,电渣重熔阶段,通常需对熔渣进行脱氧,尽可能减少熔渣中的不稳定氧化物。

周德光、王昌生<sup>[3]</sup>等为改善轴承钢中的夹杂物类型和分布,采用复合脱氧剂及酸性渣重熔进行了研究。研究发现:采用复合脱氧方式生产的自耗电极,经酸性渣重熔后,钢中的夹杂物类型以硫化物和硅酸盐为主,钢材的疲劳寿命明显改善。

## 1.3 电极熔化速度

图 1 给出了滚珠钢氧化物夹杂的评级与重熔速度的对应关系。

由图 1 可见,电极熔化速度越高,金属熔池深度越深,夹杂物越不易上浮,对应钢中的夹杂物评级越高。

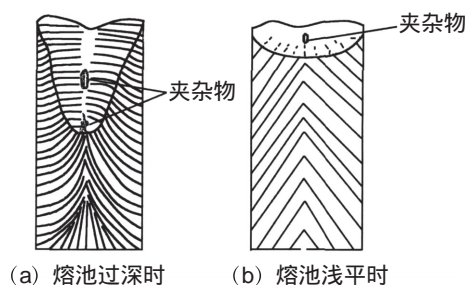


图 1 金属熔池钢锭结晶特点

Fig.1 Crystallization characteristic of molten steel

## 1.4 电渣重熔气氛

王昌生等<sup>[4]</sup>为了验证电渣重熔过程中气氛条件对精炼效果的影响,对氩气保护和大气条件下重熔锭的氧含量进行了比对试验,结果如图 2 所示。

可以看出,相比大气下电渣重熔,采用气氛保护能明显减少钢液增氧。

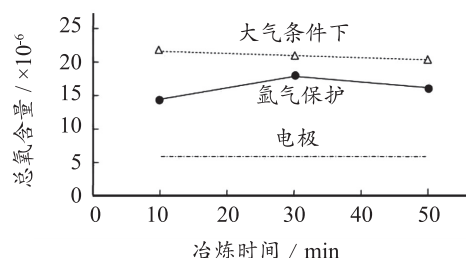


图 2 氩气保护与大气下重熔钢锭中的氧含量

Fig.2 Oxygen content of remelting ingot in the protection of argon and atmosphere

## 2 F55 电极制备

某公司采用“3 吨中频感应炉+3 吨 AOD”工艺冶炼双相不锈钢 F55 自耗电极。F55 电极 AOD 精炼阶段,吹炼完成后,采用 15~20kg/t 的 Si-Al 复合脱氧剂对钢水进行预还原,然后补加微铬、钼铁、电解镍等合金进行成分调整,出钢前按照 3~5kg/t 加入量向钢中加 Al 进行终还原,出钢阶段,钢包中加入 1kg/t 的 Si-Ca 合金,对钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂进行变性处理。

出钢温度  $(1\ 600\pm20)^\circ\text{C}$ ,钢液镇静时间 5~8 min,浇注温度  $(1\ 550\pm10)^\circ\text{C}$ 。浇注的电极规格和数量分别为: $\phi 160\text{ mm}\times 3\ 000\text{ mm}$ ,2 支,单重 0.5 t; $\phi 300\text{ mm}\times 2\ 900\text{ mm}$ ,1 支,单重 1.5 t。F55 电极的化学成分如表 1 所示。

表 1 F55 电极化学成分

Table1 The chemical composition of F55 electrode(w)

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	W	N	Al	O
标准	$\leq 0.03$	$\leq 1.0$	$\leq 1.0$	$\leq 0.01$	$\leq 0.03$	24.0~ 26.0	6.0~ 8.0	3.0~ 4.0	0.5~ 1.0	0.5~ 1.0	0.2~ 0.3	/	/
电极	0.02	0.398	0.734	<0.0050	0.019	24.89	6.84	3.55	0.736	0.725	0.26	0.018	0.0073

为判断电极中夹杂物的类型,取电极本体样进行 SEM 检测。夹杂物形貌如图 3(a)所示,图 3(b)中夹杂物能谱结果显示:电极中的夹杂物类型主要为低熔点的  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$  复合

夹杂,该复合夹杂物为电极浇注时,钢水中未来得及上浮的夹杂物,熔点较低,电渣重熔时容易从钢水上浮电渣中去除。

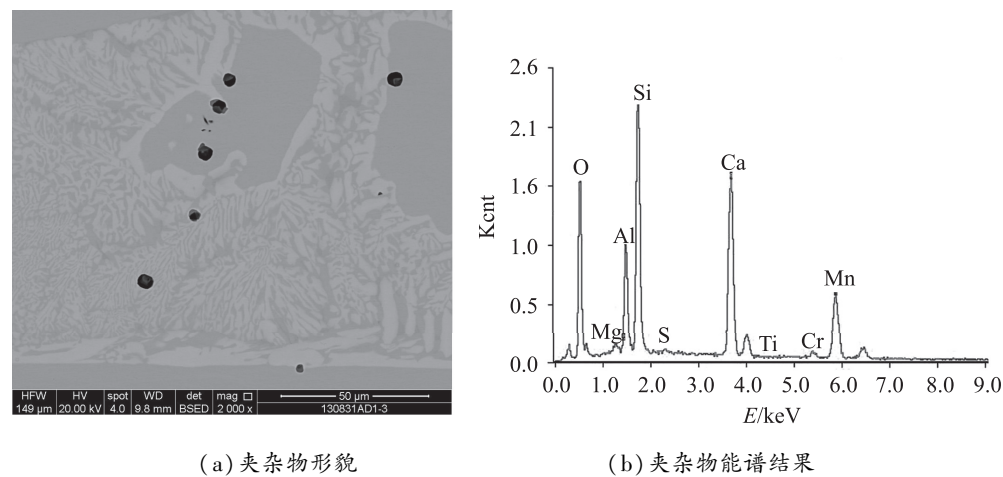


图 3 F55 电极夹杂物扫描电镜分析  
Fig.3 Inclusions analysis of F55 electrode by SEM

3 F55 电渣重熔试验方案

电渣重熔之前,对电极表面进行整体打磨,去除表面的氧化层、夹渣等杂质,并经600℃/5 h 烘烤处理,烘烤完毕,将电极焊接在假电极上,吊至电渣工位。

电渣重熔试验设备为0.5 t和1.5 t固定式电渣炉,结晶器规格分别为φ 260 mm和φ 460 mm。试验渣系配比及物性参数如表 2 所示。其中,渣

系 S1 为固定式电渣重熔的常用渣系,渣系 S2 中加适量的 MgO 能在渣池表面形成一层半凝固膜<sup>[5]</sup>,防止钢液吸氧,减轻渣中的变价氧化物向金属熔池传氧,渣中加适量的 SiO<sub>2</sub>,则是借鉴了酸性渣的作用,即渣中的 SiO<sub>2</sub> 和钢中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂能结合形成低熔点、易去除的硅铝酸盐复合夹杂。电渣重熔前,渣料均在 850℃ 温度条件下烘烤 6h 以上,渣中的 CaO 以预熔渣的形式配入。渣料烘烤完毕,加入结晶器内,采用固态渣起弧化渣,化渣时间约30~40 min。试验方案见表 3。

表 2 试验渣系配比及物性参数  
Table 2 The ratio and physical parameters of experimental slags

渣系	CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	电导率 (T=1 600℃)	熔点/℃	粘度/pa·s (T=1500℃)
S1	80%	/	20%	/	/	4.1	1 300	0.010
S2	55%	17%	20%	5%	3%	2.4	1 240	0.030

由于熔渣通常含有少量 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO 等不稳定氧化物,导致熔渣的氧化性增强,因此需对熔渣进行脱氧。本重熔试验脱氧剂加入量如表 4 所示。

4 试验结果与分析

4.1 化学成分分析

F55 电渣锭的化学成分如表 5 所示,可以看

出,当采用五元渣系(S2)进行重熔试验时,钢中的氧含量最低,而采用二元渣系(S1)进行重熔试验时,钢中的氧含量降幅很小,甚至略有上升。

表 3 电渣重熔试验方案

Table 3 The experimental plan of ESR

试验 序号	渣系 类型	$V_{\text{熔}}/$ (kg/h)	$D_{\text{结}}/$ (mm)	$V_{\text{熔}}/$ $D_{\text{结}}$
1	S1	140	260	0.54
2	S1	200	260	0.77
3	S1	220	260	0.85
4	S2	390	460	0.85

钢中氧含量与残铝量呈线性关系,如图 4 所示,残铝量越高,钢中的氧含量就越高。

## 4.2 夹杂物分析

为进一步验证残铝量与氧含量的关系,对 F55 电渣锭中的夹杂物进行了扫描电镜分析,如图 5 所示。EDS 能谱结果显示,4 次试验电渣锭中的夹杂物主要类型均为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,而且氧含量越高,对应的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物数量越多。因此认为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂直接导致 F55 电渣锭氧含量上升。

表 4 电渣重熔脱氧剂加入量

Table 4 The quality of deoxidizer during the ESR

试验序号	脱氧剂类型	加入量/(kg/t)
1	Al	0.4
2	Al	0.4
3	Si-Ca、Al	0.4、0.4
4	Si-Ca、Al	0.4、0.4

表 5 F55 电渣锭化学成分

Table 5 The chemical composition result of F55 ingot (w)

%

试验序号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	W	N	Al	O
1	0.020	0.415	0.716	<0.005	0.020	24.52	6.85	3.60	0.752	0.722	0.256	0.035	0.007 5
2	0.019	0.426	0.727	<0.005	0.019	24.54	6.82	3.59	0.767	0.720	0.257	0.044	0.008 6
3	0.019	0.426	0.702	<0.005	0.021	24.57	6.89	3.60	0.762	0.720	0.260	0.030	0.006 4
4	0.022	0.427	0.702	<0.005	0.022	24.60	6.90	3.54	0.766	0.718	0.259	0.028	0.004 4

由于双相不锈钢 F55 电极母材中的夹杂物类型主要为  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$  复合夹杂,而电渣重熔后钢中主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂,说明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂并非来源于电极,从而确定  $\text{Al}_2\text{O}_3$  来源于电渣脱氧产物。因而,为解决电渣重熔后钢锭增氧的问题,需满足以下条件:(1)金属熔池温度不能太高,应采用较低熔速冶炼;(2)渣系粘度较高,或采用气氛保护,减少吸气;(3)重熔渣系需对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂具有较强的吸附能力。

试验 3 和 4 中,均采用复合脱氧剂 Si-Ca 对熔渣进行扩散脱氧,形成的硅酸盐类化合物能与钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂形成低熔点的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  复合夹杂,容易被熔渣吸附去除,从而减少钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物数量,降低钢中氧含量。由于五元渣系 S2 比二元渣系 S1 熔点低,流动性好,且本身偏酸性,与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂结合能力强,因此,试验 4 采用五元渣系,进行重熔后钢中氧含量和夹杂物含量更低。

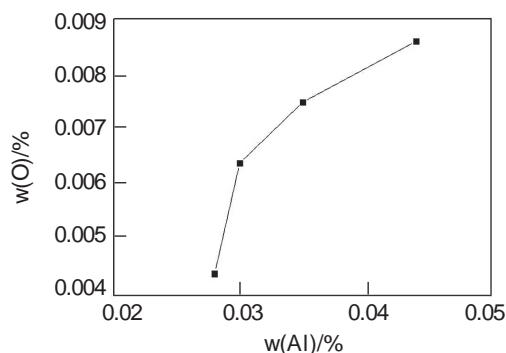


图 4 F55 电渣锭中残铝与氧含量的关系

Fig.4 Relationship between residual aluminum and oxygen content in F55 ingot

## 4.3 锻造试验

双相不锈钢 F55 电渣锭表面质量良好,在 5 t 电液锤上锻造,锻造加热温度 1 200~1 220  $^{\circ}\text{C}$ ,保温 3~4 h,终锻温度 980  $^{\circ}\text{C}$ 。

锻造毛坯尺寸为  $\phi 515/\phi 265 \text{ mm} \times 145 \text{ mm}$ ,锻坯表面无肉眼可见裂纹,超声波探伤合格。

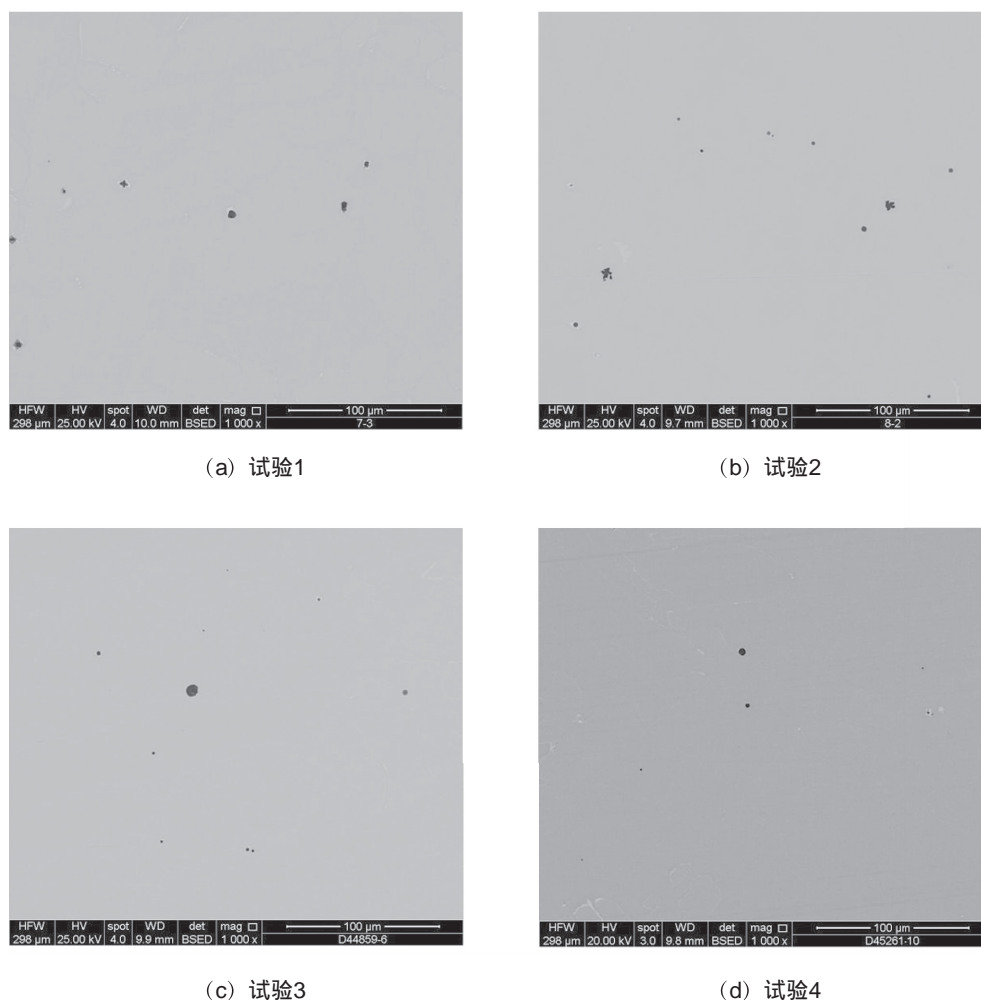


图 5 F55 电渣锭中夹杂物扫描电镜分析

Fig.5 Inclusions analysis of F55 ingot by SEM

## 5 结论

(1) 双相不锈钢 F55 电渣重熔过程中,电极熔化速度越高,对应的金属熔池就越深,不利于钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的去除,宜采用较低的重熔速度。

(2) 采用二元渣系进行电渣重熔时,如果仅采用 Al 脱氧,渣系对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物的吸附能力较弱,脱氧去夹杂效果不明显。使用复合脱氧剂 Si-Ca 对熔渣进行脱氧和改性,有利于钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的去除,五元渣系对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的吸附能力要比

二元渣系的强,去夹杂效果更佳。

### 参考文献:

- [1] 吴玖. 双相不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000: 428-429.
- [2] 耿鑫,姜周华,刘福斌,等.电渣重熔过程中夹杂物的控制[J]. 钢铁, 2009, 44(12): 42-49.
- [3] 周德光,王昌生,钱万力,等. Ca-Si 脱氧及酸性渣重熔改善轴承钢的夹杂物[J]. 钢铁, 1994, 29(7): 25-28.
- [4] 王昌生,刘胜国,许明德,等. 降低电渣重熔 GCr15 钢的氧含量[J]. 特殊钢, 1997, 18(3): 31-35.
- [5] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M], 北京:冶金工业出版社, 2011: 123.