● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.001

# 电渣重熔低 Al 钢过程中渣系对 Al 含量的影响

赵鸿燕[1],刘承志[2],杜晓建[2,3]
(1. 太原钢铁(集团)有限公司 先进不锈钢材料国家重点实验室,山西 太原 030003;2. 中北大学 特种金属材料与装备研究院,山西 太原 030051;3. 中北大学 机械工程学院,山西 太原 030051)

**摘 要**:低 Al 含量的控制是电渣重熔过程中的难点,针对低 Al 焊丝钢 ER90S、TT65-G 和低 Al 不锈钢 1Cr21Ni5Ti,对 Al 含量的控制进行了研究。在 500 kg 电渣重熔炉内,分别采用 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-$SiO_2$ 渣系和 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO -$TiO_2$ 渣系熔炼了低 Al 焊丝钢和低 Al 不锈钢。结果表明,经 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO -$SiO_2$(57:20:20:3)渣系冶炼的高 Si、高 Mn、低 Al 焊丝钢的钢锭 Al 含量均小于 0.015%。经 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$(51:20:20:3:6)渣系冶炼的高 Ti、低 Al 不锈钢的钢锭头尾 Al 增加量均小于 0.02%。

**关键词**:电渣重熔;低 Al 钢;渣系;Al 含量
**中图分类号**:TF142.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)10-0835-04

## Effect of Slag Composition on Al Content During Electroslag Remelting Process of Low-Al Steel

ZHAO Hongyan[1], LIU Chengzhi[2], DU Xiaojian[2,3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, China; 2. Institute of Special Metal Materials and Equipment Research, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract**: The control of low-Al content is difficult in the process of electroslag remelting. The control of Al content in low-Al wire steel ER90S, TT65-G and low-Al stainless steel 1Cr21Ni5Ti was studied. Low-Al wire steel and low-Al stainless steel were smelted by $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-$SiO_2$ slag system and $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$ slag system respectively in 500 kg electroslag remelting furnace. The results show that Al content in ingot of high Si, high Mn and low-Al wire steel smelted by $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-$SiO_2$ (57:20:20:3) slag system is less than 0.015%. The increase of Al in the ingot head and tail of high Ti and low-Al stainless steel smelted by $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$ (51:20:20:3:6) slag system is less than 0.02%.

**Key words**: electroslag remelting; low-Al steel; slag composition; Al content

在汽轮机转子钢、焊丝钢(高 Si、Mn,低 Al 钢)、高温高压容器用钢、核电用钢、航空用高钛低 Al 不锈钢、高温合金等钢中,Al 对钢的蠕变强度和应力断裂韧性有不良影响[1]。

在电渣重熔过程中,$Al_2O_3$ 是渣中的重要组元,一般渣系中都含有 20%~30%的 $Al_2O_3$[2]。另一方面,电极坯钢中的 Si、Mn、Ti 等元素的存在都会对最终产品的 Al 含量造成影响,重熔结束后,Al 含量比电极坯增加 0.01%~0.03%。在两大因素的影响下,经电渣重熔后的产品中 Al 含量一般在 0.02%~0.04%,这对于非低 Al 要求的钢种是合格的,但满足不了汽轮机转子钢、核电用钢、高温高压容器用钢、高温合金、焊丝钢等低 Al 钢的成分控制要求。因此低铝含量的控制是电渣重熔工艺的难点,通常很难达到 Al≤0.015%的要求。为此,本文作者在渣系设计的基础上,对低 Al 焊丝钢 ER90S、TT65-G 和低 Al 不锈钢 1Cr21Ni5Ti 进行了 Al 含量的控制研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 设备参数

采用 500 kg 保护气氛电渣炉,主要参数见表 1。

表 1 电渣重熔设备参数
Tab.1 Parameters of electro slag remelted (ESR) furnace

| 结晶器直径 /mm | 渣量 /kg | 电流 /A | 电压 /V | 充填比 | 熔化速度 /(kg/min) | 渣阻摆动 /mΩ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\phi$350 | 40 | 6 000~6 500 | 45~50 | 0.75 | 5.0 | 0.5 |

### 1.2 钢种成分

低铝钢种的成分见表 2,其中 ER90S 和TT65-G

**收稿日期**:2021-06-11
**基金项目**:山西省重点研发计划(201803D121023)
**作者简介**:赵鸿燕(1970—),女,山西忻州人,高级工程师.主要从事特种冶金研究方面的工作.
Eamil:zhaohy@tisco.com.cn

表2 低铝钢种化学成分 $w$(%)
Tab.2 Chemical composition of low-Al steel

| 钢种 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Al | 其他 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ER90S | 0.06~0.09 | 0.40~0.70 | 1.70~1.90 | ≤0.010 | ≤0.008 | 0.05~0.25 | 1.60~1.80 | ≤0.015 | 0.30~0.50 Mo |
| TT65-G | ≤0.05 | 0.30~0.60 | 0.95~1.25 | ≤0.015 | ≤0.010 | 1.20~1.60 | 3.80~5.00 | ≤0.015 | |
| 1Cr21Ni5Ti | 0.09~0.14 | ≤0.80 | ≤0.80 | ≤0.010 | ≤0.0.01 | 20.0~22.0 | 4.80~5.80 | ≤0.10 | 0.45~0.70 Ti |

属于焊丝钢，1Cr21Ni5T 属于不锈钢。

### 1.3 渣系组成

预熔渣的渣系组成见表 3。采用 A、B、C、D 4 种预熔渣对低铝焊丝钢 ER90S、TT65-G 进行冶炼，采用 E 预熔渣对 1Cr21Ni5T 进行冶炼。

表3 预熔渣渣系组成 $w$(%)
Tab.3 Chemical composition of premelted slag

| 渣系 | $CaF_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $SiO_2$ | MgO | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 70 | 30 | | | | |
| B | 60 | 20 | 20 | <0.5 | | |
| C | 47 | 30 | 20 | 3.0 | | |
| D | 57 | 20 | 20 | 3.0 | | |
| E | 51 | 20 | 20 | | 3 | 6 |

## 2 试验结果

### 2.1 低铝焊丝钢

对采用 4 种预熔渣冶炼的焊丝钢 ER90S 成分进行分析，如图 1 所示。可知，使用 A、B 两种渣后，钢中 Si、Mn 含量降低，Al 含量增加。使用 C、D 两种渣后，钢中 Si 含量增加，Al、Mn 含量降低。

对采用四种预熔渣冶炼的焊丝钢 TT65-G 成分进行分析，如图 2 所示。由图 2 可知，使用 A、B 两种渣后，钢中 Si、Mn 含量降低，Al 含量增加。使用 C、D 两种渣后，钢中 Si 含量增加，Al、Mn 含量降低。

### 2.2 低铝不锈钢

对采用渣系 A 冶炼低铝不锈钢 1Cr21Ni5Ti，分析电渣锭头尾的成分如图 3 所示。可知，在电渣锭头部，Si、Al 含量比原电极坯上的高，Mn 含量比原电极坯上的低；在电渣锭尾部，Mn、Al 含量比原电极坯上高，Si 含量略低。

## 3 分析与讨论

### 3.1 低铝焊丝钢分析

在电渣冶炼高温钢渣界面，存在如下反应[3]：

$$\frac{2}{3}(Al_2O_3)+[Si]=(SiO_2)+\frac{4}{3}[Al] \quad (1)$$

其反应自由能公式如下。

$$\Delta G^0=-RT\ln\frac{a_{Al}^{4/3}\cdot a_{SiO_2}}{a_{Si}\cdot a_{Al_2O_3}^{2/3}}=219\,400-35.7T \quad (2)$$

从式(2)知，虽然反应(1)在通常情况下不会发生，但在电渣系中都含有 20%~40%的 $Al_2O_3$，且电渣冶炼的熔渣温度高达 1 800~2 000 ℃，$a_{Al_2O_3}$升高、温度升高，都使反应自由能 $\Delta G^0$ 降低，有利于反应(1)

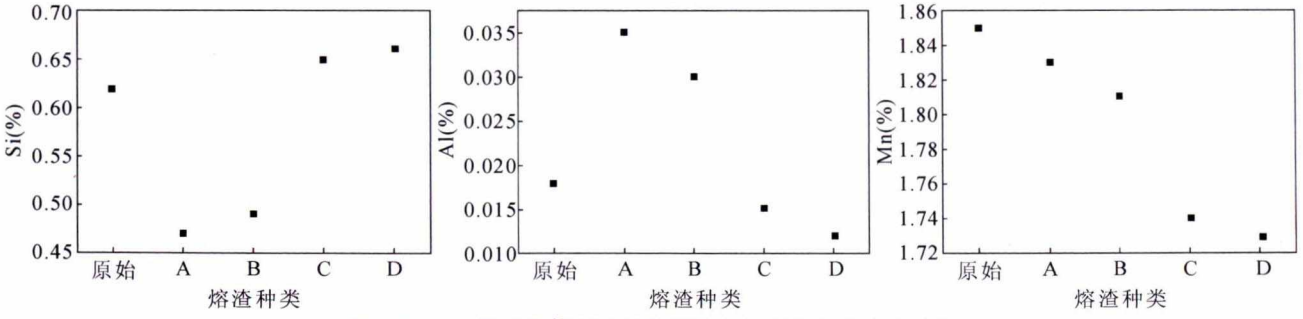


图 1 ER90S 焊丝钢使用不同预熔渣电渣重熔后的成分对比
Fig.1 Chemical composition of ER90S steel after ESR with different premelted slag

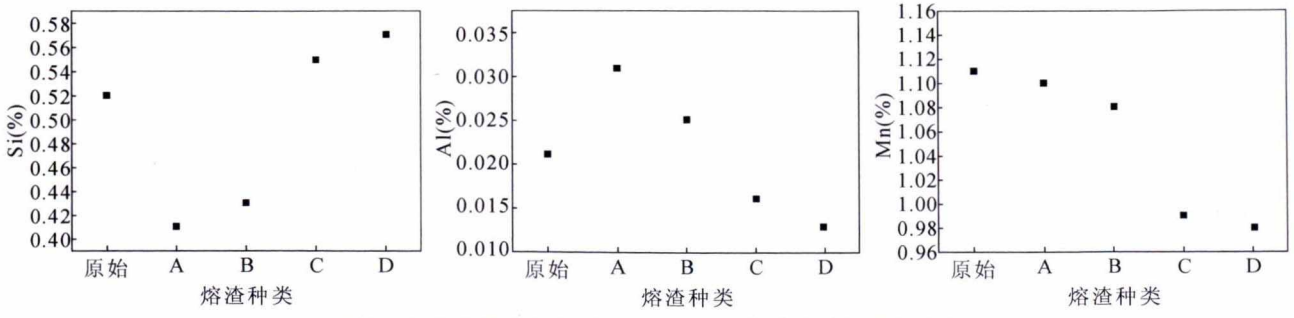


图 2 TT65-G 焊丝钢使用不同预熔渣电渣重熔后的成分对比
Fig.2 Chemical composition of TT65-G steel after ESR with different premelted slag

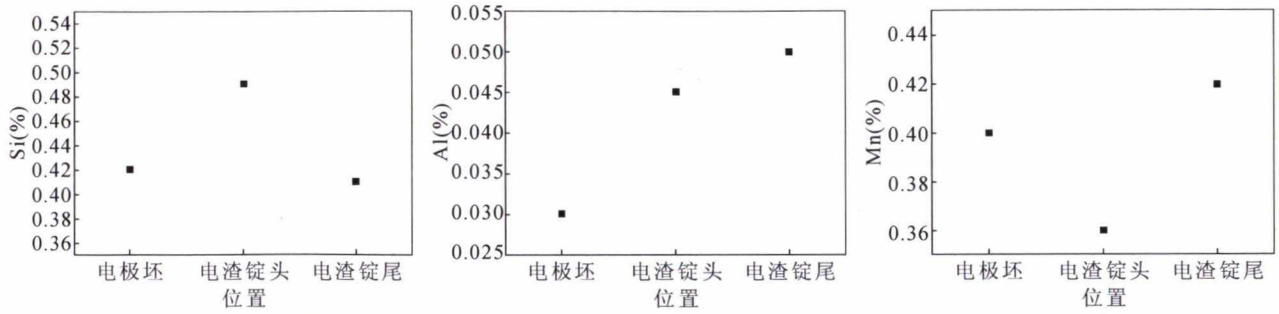


图 3 1Cr21Ni5Ti 不锈钢采用渣系 A 电渣重熔钢锭不同位置的成分

Fig.3 Composition at different location of stainless steel 1Cr21Ni5Ti ESR ingots with slag A

进行，出现钢中增 Al 现象。渣系组成对 $SiO_2$ 活度的影响[4]，见图 4。

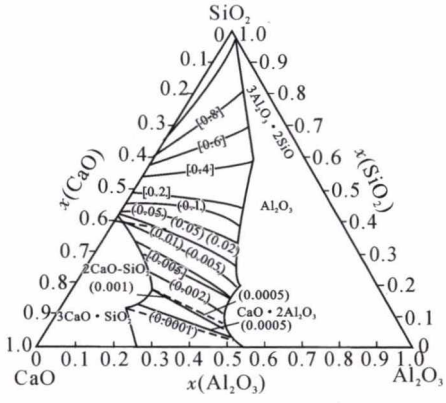


图 4 渣系组成对 $SiO_2$ 活度的影响

Fig.4 Influence of chemical composition on activity of $SiO_2$

由图 4 知，随着渣中 $SiO_2$ 含量增加及 CaO 降低(渣碱度降低)，$SiO_2$ 的活度增加。渣系 A、B 不含 $SiO_2$，碱度比渣系 C、D 大，所以重熔后 Si 烧损较大，钢锭中 Al 含量增加，渣系 C 和渣系 D 中添加了 3% 的 $SiO_2$，碱度降低，Si 略有增加，Mn 烧损较大(但仍在标准范围内)，抑制了反应(1)进行，未发生钢锭尾部增 Al 现象，产品 Al 分别达到了 0.015% 和 0.012%。张科元等人[5]在对 PH15-7Mo 不锈钢进行电渣重熔时 Al 含量减少，认为其原因是 Al 与渣中的 $SiO_2$、FeO 反应，并采用增加 Al 粉和 Al 粒的方法来稳定 Al 元素含量。在本试验过程中，在渣系 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO 的基础上增加 $SiO_2$ 含量，Al 含量并未增加，而是抑制了 Al 含量的增加。主要区别在于钢中的 Al 含量不同，在低 Al 含量情况下，预熔渣中含有一定量的 $SiO_2$，可以起到抑制 Al 含量增加的作用。

### 3.2 低铝不锈钢

从热力学角度分析钢中 Ti、Al 平衡含 Ti 钢电渣重熔过程中存在以下反应[3]。

$$2(Al_2O_3)+3[Ti]=3(TiO_2)+4[Al] \quad (3)$$

上述反应的平衡常数如下。

$$\lg K=\lg\frac{a_{Al}^4\cdot a_{TiO_2}^3}{a_{Ti}^3\cdot a_{Al_2O_3}^2}=-\frac{35\,300}{T}+9.94 \quad (4)$$

从(3)的平衡关系可以看出，含 Ti 钢电渣重熔过程会存在烧 Ti 增 Al 现象，渣中加入 $TiO_2$ 或降低渣中 $Al_2O_3$ 含量均可抑制增 Al 烧 Ti。

另一方面，渣中添加一定量的 $TiO_2$ 可抑制反应(3)向右进行。有如下关系式：

$$\lg\frac{f_{Al}^4\cdot[Al]^4}{f_{Ti}^3[Ti]^3}+\lg\frac{\gamma_{TiO_2}^3\cdot x_{TiO_2}^3}{\gamma_{Al_2O_3}^2\cdot x_{Al_2O_3}^2}=-\frac{35\,300}{T}+9.94 \quad (5)$$

$\gamma(Al_2O_3)$、$\gamma(TiO_2)$——渣中 $Al_2O_3$、$TiO_2$ 的活度系数；$x(Al_2O_3)$、$x(TiO_2)$——渣中 $Al_2O_3$、$TiO_2$ 的摩尔分数。$f(Al)$、$f(Ti)$——金属熔体中 Al、Ti 的活度系数。

由式 (5) 可知，钢中 Ti/Al 比随着渣中 $TiO_2$、$Al_2O_3$ 的摩尔分数之比增大而增大，所以渣中添加一定量的 $TiO_2$ 有利于抑制电渣冶炼过程钢液 Al 含量增加。由于渣中 $TiO_2$ 含量大于 10%时，会导致钢锭表面出现渣沟，在后步锻造成材过程会开裂，因而，需要控制渣中 $TiO_2$ 含量。在 1Cr21Ni5Ti 电渣重熔中，采用渣系 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$(51:20:20:3:6)，重熔后电渣锭表面光滑，见图 5。

图 5 1Cr21Ni5Ti 不锈钢电渣锭的光滑表面

Fig.5 Smooth surface of stainless steel 1Cr21Ni5Ti ESR ingots

图 6 是重熔前后钢锭头尾 Ti 含量对比，可知，采用 $TiO_2$ 配比为 6%的五元含 Ti 渣系冶炼，平均 Ti 回收率达到了 82%。结合图 3 可知，电渣钢锭头尾 Al 都达到了≤0.1%的内控要求。对于钢中 Ti/Al 比高达 12.7 的含 Ti 钢种来说，抑制 Ti 烧损和控制 Al 增加达到了较好效果。电渣锭头尾 Ti 偏差较小，只

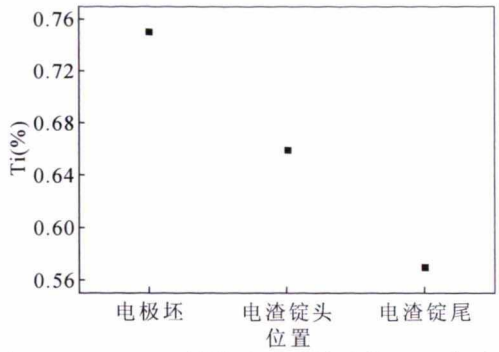


图 6 1Cr21Ni5Ti 不锈钢电渣重熔后的 Ti 元素对比
Fig.6 Ti content of 1Cr12Ni5Ti steel after ESR

有 0.09%,满足了 Ti 的窄范围内控要求。

结合图 3 和图 6 的结果,采用 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$ 渣系,1Cr21Ni5Ti 不锈钢电渣重熔后,Al 含量增加均在 0.02%以内,Ti 含量降低在 0.2%以内。Duan 等人[6]在对 718 镍基合金进行电渣重熔时,采用 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$ 渣系 (40.22:27.17:27.17:3.26:2.17),在 1 700 ℃时,Al 含量的增加达到 0.25%。在采用另外两种 $TiO_2$ 含量高的渣系时,Al 增加量的减少。侯栋[7]在对 1Cr21Ni5Ti 不锈钢进行电渣重熔时,采用 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$ 渣系时,调整 CaO 含量,认为低 CaO 渣系能减少电渣锭头尾的成分差异。因而,为控制 Al 含量的增加,采用 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$(51:20:20:3:6)渣系可以控制 Al 含量的增加,同时确保了电渣锭表面质量。

## 4 结论

(1)在低 Al 含量情况下,与 $CaF_2$-CaO-$Al_2O_3$ 预熔渣相比,$CaF_2$-CaO-$Al_2O_3$-$SiO_2$ 预熔渣可以起到抑制 Al 含量增加的作用。

(2)经 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-$SiO_2$(57:20:20:3)渣系冶炼的高 Si、高 Mn、低 Al 焊丝钢 ER90S 的钢锭 Al 含量均小于 0.015%。

(3)经 $CaF_2$-$Al_2O_3$-CaO-MgO-$TiO_2$(51:20:20:3:6)渣系冶炼的高 Ti、低 Al 不锈钢 1Cr21Ni5Ti 的钢锭头尾 Al 含量增加均小于 0.02%。

**参考文献:**

[1] 崔昆. 钢的成分、组织与性能[M]. 北京: 科学出版社,2013.
[2] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2010.
[3] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社,2002.
[4] 德国钢铁协会. 渣图集[M]. 北京: 冶金工业出版社,1987.
[5] 张科元,刘志坚,陈远星,等. 沉淀硬化 PH15-7Mo 不锈钢采用电渣重熔工艺时 Al 含量的控制研究 [J]. 南方金属,2009 (2): 10-13.
[6] DUAN S, XIAO S, MAO M, et al. Investigation of the Oxidation Behaviour of Ti and Al in Inconel 718 Superalloy During Electroslag Remelting[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-14.
[7] 侯栋. 电渣重熔含铝钛不锈钢的冶金反应和成分控制研究[D]. 沈阳:东北大学, 2017.

**2022年《铸造技术》杂志征订启事**

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，被20余家数据库收录。中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司
账　号：3700 0235 0920 0091 309
开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼三层
联系人：李巧凤　　电话/传真：13991824906
网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail: zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道