

• 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 CaF₂-Al₂O₃-CaO-SiO₂ 渣系和 CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO-TiO₂ 渣系熔炼了低 Al 焊丝钢和低 Al 不锈钢。结果表明, 经 CaF₂-Al₂O₃-CaO-SiO₂ (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 CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO-TiO₂ (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 Hongyan¹, LIU Chengzhi², 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 CaF₂-Al₂O₃-CaO-SiO₂ slag system and CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO-TiO₂ 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 CaF₂-Al₂O₃-CaO-SiO₂ (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 CaF₂-Al₂O₃-CaO-MgO-TiO₂ (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, Al₂O₃ 是渣中的重要组元, 一般渣系中都含有 20%~30% 的 Al₂O₃^[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
φ350	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。
Email: 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 ₂ O 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]:

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

其反应自由能公式如下。

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

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 Al₂O₃,且电渣冶炼的熔渣温度高达 1 800~2 000 ℃,a_{Al₂O₃} 升高、温度升高,都使反应自由能 ΔG⁰ 降低,有利于反应(1)

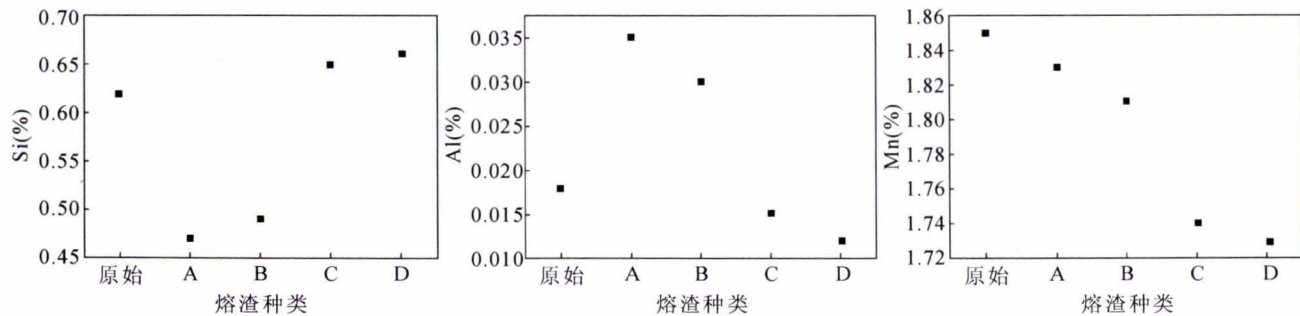


图 1 ER90S 焊丝钢使用不同预熔渣电渣重熔后的成分对比
Fig.1 Chemical composition of ER90S steel after ESR with different premelted slag

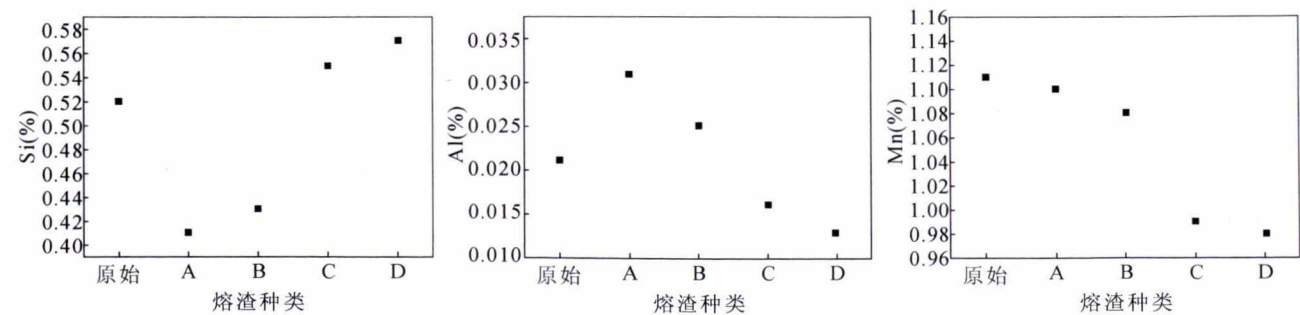


图 2 TT65-G 焊丝钢使用不同预熔渣电渣重熔后的成分对比
Fig.2 Chemical composition of TT65-G steel after ESR with different premelted slag

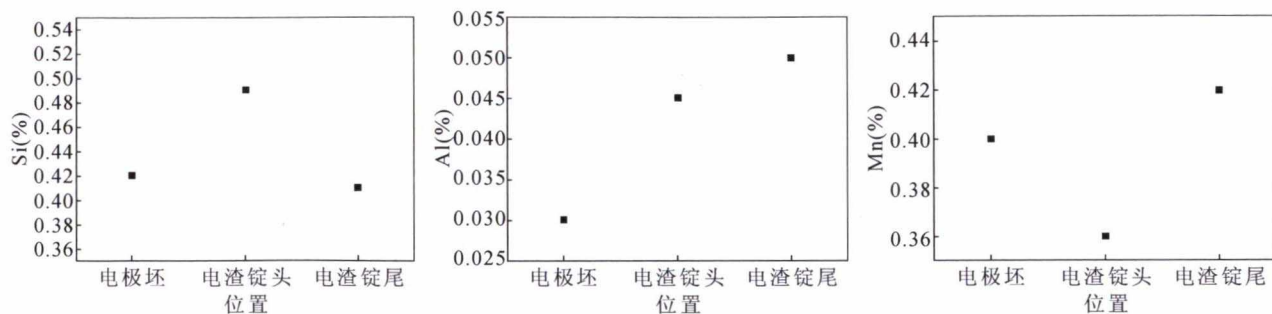
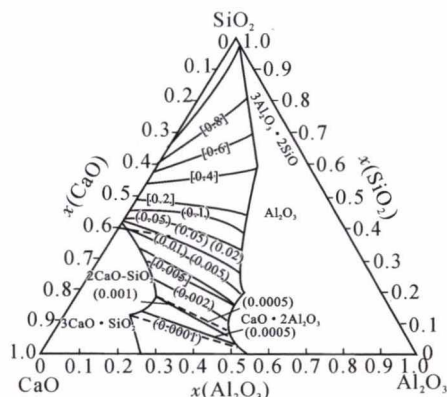


图3 1Cr21Ni5Ti 不锈钢采用渣系 A 电渣重熔钢锭不同位置的成分

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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 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]。



上述反应的平衡常数如下。

$$\lg K = \lg \frac{a_{\text{Al}} \cdot a_{\text{TiO}_2}^3}{a_{\text{Ti}} \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^3} = -\frac{35\,300}{T} + 9.94 \quad (4)$$

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:

$$\lg \frac{f_{\text{Al}}^4 \cdot [\text{Al}]^4}{f_{\text{Ti}}^3 [\text{Ti}]^3} + \lg \frac{\gamma_{\text{TiO}_2}^3 \cdot x_{\text{TiO}_2}^3}{\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = -\frac{35\,300}{T} + 9.94 \quad (5)$$

$\gamma(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $\gamma(\text{TiO}_2)$ ——渣中 Al_2O_3 、 TiO_2 的活度系数; $x(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $x(\text{TiO}_2)$ ——渣中 Al_2O_3 、 TiO_2 的摩尔分数。 $f(\text{Al})$ $f(\text{Ti})$ ——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,在后续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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ (51:20:20:3:6),重熔后电渣锭表面光滑,见图 5。

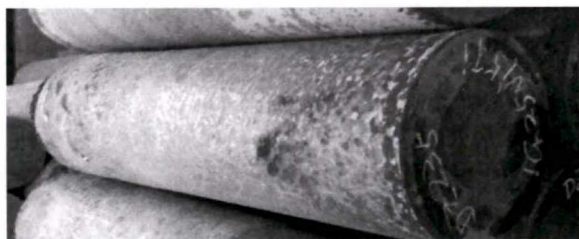


图5 1Cr21Ni5Ti 不锈钢电渣锭的光滑表面

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 $\leq 0.1\%$ 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

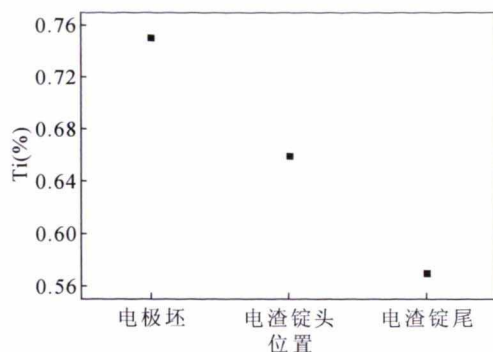


图6 1Cr21Ni5Ti 不锈钢电渣重熔后的 Ti 元素对比
Fig.6 Ti content of 1Cr21Ni5Ti steel after ESR

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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ 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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ 渣系 (40.22:27.17:27.17:3.26:2.17), 在 1700 °C 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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ 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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ (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 $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ 预熔渣相比, $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 预熔渣可以起到抑制 Al 含量增加的作用。

(2) 经 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ (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 $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-TiO}_2$ (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, 国内外公开发刊, 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、生产管理经验和铸造行业发展动态。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