

氩气保护对电渣重熔气阀钢 NCF3015 铝钛烧损的影响

丁磊¹ 贾景岩²

(1 合智熔炼装备(上海)有限公司,上海 201203;2 江苏申源集团有限公司,泰州 225722)

摘要 气阀钢 NCF3015 $\Phi 280$ mm \times 1 700 mm 电极(/%: 0.03 ~ 0.08C, 13.5 ~ 15.5Cr, 30 ~ 33.5Ni, 1.7 ~ 2.1Al, 2.4 ~ 2.9Ti, 0.65 ~ 0.80Mo, 0.65 ~ 0.80Nb, 0.002 ~ 0.006B)经全同轴式惰性气体保护电渣重熔成 $\Phi 340$ mm 0.80 t 电渣锭。在使用三元预熔渣 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO 以熔速为 4 kg/min 的全氩气保护条件下,试验了气阀钢 NCF3015 电渣过程中 Al、Ti 烧损的烧损量及 Si 的变化情况和脱 S 率,并阐述了机理。结果表明,Al 相对 Ti 是主要的烧损元素,Al 的平均烧损量为 -0.071%,Ti 的平均烧损量为 -0.035%。从底部至顶部 Al、Ti 的烧损都逐渐减小,与常规电渣重熔烧损率相比,氩气保护对减小 Al、Ti 的烧损作用显著。Al、Ti 的烧损导致重熔初期 Si 含量略增。该渣系有一定的脱硫效果,平均脱 S 率 36.7%。

关键词 电渣重熔 氩气保护 气阀钢 NCF3015 钛烧损 铝烧损 硅烧损

Effect of Argon Gas Shielded on Burning Loss of Electroslag Remelting Valve Steel NCF3015 Aluminum and Titanium

Ding lei¹ and Jia Jingyan²

(1 Herz special metallurgy plant (Shanghai) Co Ltd, Shanghai 201203;2 Jiangsu Shenyuan Group Co Ltd, Taizhou 225722)

Abstract Valve steel NCF3015 $\Phi 280$ mm \times 1 700 mm electrode (/%: 0.03 ~ 0.08C, 13.5 ~ 15.5Cr, 30 ~ 33.5Ni, 1.7 ~ 2.1Al, 2.4 ~ 2.9Ti, 0.65 ~ 0.80Mo, 0.65 ~ 0.80Nb, 0.002 ~ 0.006B) is remelted into $\Phi 340$ mm 0.80 t electroslag ingot with full coaxial inert gas shielding. Under the conditions of full argon protection with ternary pre-melted slag 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO and a melting rate 4 kg/min, the amount of burning loss of Al and Ti and the change of Si and S removal rate in the process of gas valve steel NCF3015 electroslag remelting are tested, and the mechanism is explained. The results show that Al is the main burning element relative to Ti, the average burning loss of Al is -0.071%, and the average burning loss of Ti is -0.035%; and the burning loss of Al and Ti gradually decreases from the bottom to the top of electroslag remelted ingot. Compared with the burning loss rate of conventional electroslag remelting, argon protection has a significant effect on reducing the burning loss of Al and Ti. The burning loss of Al and Ti causes a slight increase in Si content at the initial stage of remelting. The slag system has a certain desulfurization effect, with an average desulfurization rate of 36.7%.

Material Index ESR, Argon Protection, Valve Steel NCF3015, Ti Loss, Al Loss, Si Loss

气阀钢是制造汽油发动机和柴油发动机进、排气阀的必用材料,是整个发动机制造中的关键材料。我国气阀钢的发展经历了从碳钢、低合金钢、硅铬型马氏体耐热不锈钢、奥氏体耐热钢到耐热合金的发展。随着经济发展和对环境的要求越来越高,发动机排放要求更严格,对气阀也提出了更高的要求。气阀工作环境恶劣,NCF3015 钢目前是国际上比较认可的耐热合金,属于铁镍基时效硬化合金,含有较多的 Al、Ti 元素,是强化相 γ' 形成的核心元素^[1]。该合金的生产方法一般采用真空感应+电渣重熔的方式生产,由于高 Al、Ti 钢种在传统大气下电渣重熔过程中烧损严重,特别锭头尾部成分难以控制,本文试验主要研究氩气保护对电渣重熔 NCF3015 钢中铝钛烧损的影响。

1 试验设备

试验设备采用全同轴式惰性气体保护电渣炉,该设备具有保护气氛,高速倒流水冷结晶器,自动恒熔速+电压摆幅控制等功能(如图 1)。

惰性气氛保护电渣炉变压器功率为 860 kVA,70 V 有载无级磁性调压。炉口电压 30 ~ 50 V,最大电流 120 00A。炉体结构采取悬臂旋转式结构、单炉头双工位形式。封闭式全同轴导电方式,高速倒流水冷结晶器。电极升降采用伺服马达控制滚珠丝杆传动,速度 0 ~ 760 mm/min,结晶器平均尺寸为 $\Phi 340$ mm,长度 1 600 mm。电渣炉的冶炼控制采用两级计算机自动化控制(PLC+工控机)并备有先进的计算机控制程序,全程冶炼过程无人参与。采用恒熔速精确控制熔速,电压摆幅精确控制浸入深

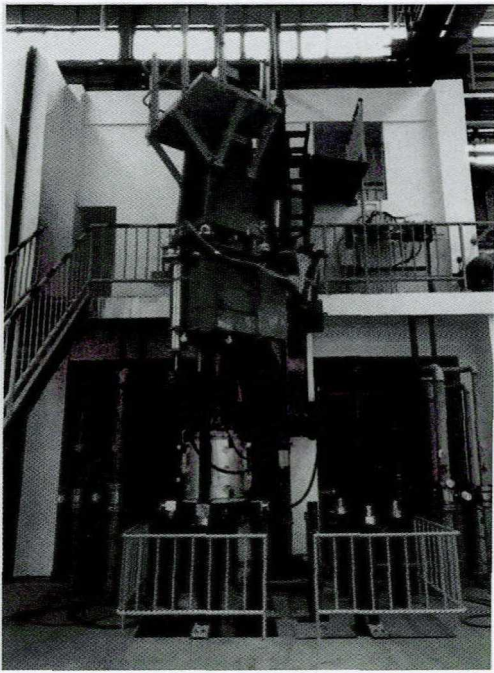


图 1 惰性气体保护电渣炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of inert gas shielding electroslag remelting furnace

度,过程 PID 及独特的算法,确保重熔期间稳定的凝固质量。

2 试验方案及过程

试验研究在氩气保护下电渣重熔对 NCF3015 钢种的 Al、Ti、Si 元素烧损的影响,试验方案如下:

(1) 全流程生产工艺:1.0 t 真空感应炉→浇 $\Phi 280$ mm 电极铸棒 1 支→锯切→气体保护电渣重熔 1.0 t 锭型 $\Phi 340$ mm→空冷→锻造开坯→轧制成 $\Phi 12$ mm 棒材。

(2) 电极坯料: $\Phi 280$ mm \times 1 700 mm,单支锭重约 810 kg。真空感应冶炼用原材料为同一批次号。试验炉数:10 炉。10 支电极母材化学成分如表 1 所示。

(3) 重熔渣料均采用渣系组分为 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO 的三元预熔渣。渣料实际分析成分如表 2 所示,渣量为每炉 32 kg。使用前对预熔渣进行烘烤,烘烤温度 650 ℃,烘烤时间为 4 h。采取固渣起弧方式。

表 1 气阀钢 NCF3015 的标准和电极化学成分(部分) / %

Table 1 Chemical composition of standard and electrode of valve steel NCF3015 (part) / %

炉号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al	Ti	Mo
1#	0.057	0.08	0.07	0.007	0.013	14.67	31.86	2.03	2.64	0.67
2#	0.052	0.08	0.06	0.008	0.011	14.58	31.70	2.02	2.68	0.69
3#	0.045	0.07	0.07	0.009	0.013	14.41	31.35	2.03	2.63	0.66
4#	0.054	0.064	0.059	0.008	0.012	14.56	31.28	1.97	2.67	0.70
5#	0.051	0.090	0.060	0.009	0.012	14.22	31.35	2.05	2.76	0.71
6#	0.057	0.083	0.050	0.008	0.012	14.70	31.65	2.04	2.68	0.71
7#	0.050	0.072	0.057	0.008	0.012	14.69	31.93	2.01	2.68	0.7
8#	0.055	0.080	0.050	0.008	0.012	14.47	31.59	1.98	2.61	0.66
9#	0.049	0.074	0.062	0.007	0.011	14.25	30.93	2.00	2.68	0.67
10#	0.055	0.095	0.056	0.007	0.011	14.75	31.94	1.96	2.63	0.70
标准	0.030~0.080	≤0.50	≤0.50	≤0.010	≤0.015	14.00~15.50	30.00~33.50	1.70~2.10	2.40~2.90	0.65~0.80

表 2 预熔渣实际成分 / %

Table 2 Actual composition of premelted slag / %

CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂
67	15	16.5	0.5

(4) 渣冶炼送电前,向保护气罩内充惰性气体(氩气),待氧分析仪显示数据稳定 $\leq 0.01\%$ 后,开始熔炼。熔炼过程调整流量保证全程氩气保护、罩内微正压。

(5) 稳定期间设定熔速为 4 kg/min,稳定期熔炼熔速波动 ≤ 0.3 kg/min。电压摆幅设定为 1.5 V。

3 试验结果分析

3.1 试验结果

取样采用 Thermo Fisher 公司的 ARL3460 光电直读光谱仪分析。在相当于电渣锭距离底部(100 mm处)、顶部(30 mm处)和锭中部的材上取样,分析 Al、Ti, Δ 表示取样处的成分和电极成分的差值,结果如表 3 所示。

3.2 试验结果分析

(1) 铝的烧损。电渣重熔过程中,从底部至顶部 Al 烧损程度不同:底部 Al 平均烧损量在 -0.086% ,波动值为 $-0.11\% \sim -0.06\%$ 。中部 Al 平均烧损量在 -0.068% ,波动值为 $-0.12\% \sim +0.01\%$ 。顶部 Al 平均烧损量在 -0.058% ,波动值为 $-0.09\% \sim -0.01\%$ 。随着重熔反应的进行,Al 的烧损逐渐减小。

表 3 气阀钢 NCF3015 成品化学成分 / %
Table 3 Chemical composition of finished product of valve steel NCF3015 / %

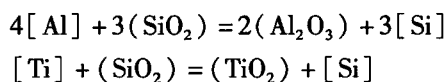
编号	取样部位	C	P	Si	S	Al	Ti	ΔAl	ΔTi	ΔSi
1#	母材	0.057	0.013	0.08	0.007	2.03	2.64			
	底部	0.06	0.013	0.09	0.005	1.92	2.62	-0.11	-0.02	0.01
	中部	0.057	0.013	0.075	0.005	1.95	2.66	-0.08	0.02	-0.005
	顶部	0.059	0.013	0.074	0.005	1.97	2.70	-0.06	0.06	-0.006
2#	母材	0.052	0.011	0.08	0.008	2.02	2.68			
	底部	0.056	0.011	0.12	0.005	1.96	2.67	-0.06	-0.01	0.04
	中部	0.054	0.011	0.088	0.005	1.93	2.68	-0.09	0	0.008
	顶部	0.054	0.011	0.082	0.005	1.93	2.69	-0.09	0.01	0.002
3#	母材	0.045	0.013	0.07	0.009	2.03	2.63			
	底部	0.057	0.013	0.10	0.005	1.94	2.61	-0.09	-0.02	0.03
	中部	0.054	0.012	0.089	0.005	2.03	2.61	0	-0.02	0.019
	顶部	0.052	0.012	0.083	0.005	2.02	2.63	-0.01	0	0.013
4#	母材	0.054	0.012	0.064	0.008	1.97	2.67			
	底部	0.052	0.012	0.10	0.005	1.87	2.59	-0.1	-0.08	0.036
	中部	0.053	0.012	0.074	0.005	1.85	2.6	-0.12	-0.07	0.01
	顶部	0.053	0.012	0.073	0.005	1.89	2.62	-0.08	-0.05	0.009
5#	母材	0.051	0.012	0.09	0.009	2.05	2.76			
	底部	0.055	0.014	0.10	0.005	1.94	2.68	-0.11	-0.08	0.01
	中部	0.051	0.013	0.079	0.005	1.94	2.70	-0.11	-0.06	-0.011
	顶部	0.052	0.014	0.067	0.005	1.98	2.72	-0.07	-0.04	-0.023
6#	母材	0.057	0.012	0.083	0.008	2.04	2.68			
	底部	0.046	0.012	0.10	0.005	1.97	2.64	-0.07	-0.04	0.017
	中部	0.043	0.012	0.079	0.005	1.98	2.61	-0.06	-0.07	-0.004
	顶部	0.042	0.012	0.077	0.005	1.98	2.63	-0.06	-0.05	-0.006
7#	母材	0.05	0.012	0.072	0.008	2.01	2.68			
	底部	0.046	0.012	0.12	0.005	1.93	2.64	-0.08	-0.04	0.048
	中部	0.049	0.011	0.072	0.005	1.91	2.63	-0.1	-0.05	0
	顶部	0.05	0.011	0.068	0.005	1.98	2.68	-0.03	0	-0.004
8#	母材	0.055	0.012	0.08	0.008	1.98	2.61			
	底部	0.051	0.011	0.10	0.005	1.91	2.56	-0.07	-0.05	0.02
	中部	0.049	0.011	0.08	0.005	1.88	2.58	-0.1	-0.03	0
	顶部	0.049	0.011	0.08	0.005	1.9	2.59	-0.08	-0.02	0
9#	母材	0.049	0.011	0.074	0.007	2	2.68			
	底部	0.05	0.012	0.10	0.005	1.89	2.6	-0.11	-0.08	0.026
	中部	0.049	0.012	0.08	0.005	1.97	2.65	-0.03	-0.03	0.006
	顶部	0.052	0.011	0.074	0.005	1.95	2.7	-0.05	0.02	0
10#	母材	0.055	0.011	0.095	0.007	1.96	2.63			
	底部	0.053	0.011	0.11	0.005	1.9	2.57	-0.06	-0.06	0.015
	中部	0.054	0.011	0.097	0.005	1.97	2.62	0.01	-0.01	0.002
	顶部	0.056	0.011	0.094	0.005	1.91	2.56	-0.05	-0.07	-0.001
	标准	0.03 ~ 0.08	≤0.015	≤0.50	≤0.010	1.7 ~ 2.1	2.4 ~ 2.9			

(2) 钛的烧损。Ti 在重熔过程中烧损及波动较小:底部 Ti 平均烧损量在 -0.048%, 波动值为 -0.08% ~ -0.01%。中部 Ti 平均烧损量在 -0.032%, 波动值为 -0.07% ~ 0.02%。顶部 Ti 平均烧损量在 -0.014%, 波动值为 -0.07% ~ +0.06%。

(3) Si 的烧损。Si 在重熔过程中烧损程度较小。从底部至顶部, 底部 Si 平均烧损量在 +0.025%, 波动值为 +0.01% ~ +0.048%。中部 Si 平均烧损量在 +0.0025%, 波动值为 -0.011% ~ 0.019%。顶部 Si 平均烧损量在 -0.0016%, 波动值为 -0.023% ~ +0.013%。

4 结果讨论

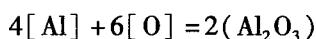
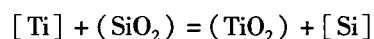
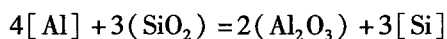
采用三元预熔渣 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO, 在氩气保护气氛下冶炼高 Al 高 Ti 气阀钢 NCF3015, 在电渣重熔初期, 钢中 Al、Ti 主要与渣中不稳定氧化物 SiO₂ 的反应。反应如下:



反应导致 Si 的含量在重熔前期较电极含量有所略增, 随着重熔的进行, Si 将不再发生烧损。中后期 Si 的含量基本保持不变。

由于全程保护气氛冶炼, 基本杜绝了大气下变

价氧化物对渣池的供氧^[2]。Al、Ti 的烧损不仅和渣中 SiO₂ 等有关,还和电极中的游离氧有关,因此 Al、Ti 的烧损主要是:



随着电渣重熔反应的进行,Al 和 Ti 的烧损将逐步减小。电渣锭顶部几乎没有烧损。统计表 3 中 10 支电渣锭底、中、顶的部分的烧损,Al 的平均烧损量为 -0.071%,Ti 的平均烧损量为 -0.035%。Al 的平均烧损量是 Ti 的两倍,由氧化物标准生产自由能数据知^[3],Al 的活泼性略大于 Ti,且 NCF3015 钢中 Al 和 Ti 的含量相当,因此 Al 是首先烧损的。金属钛氧化后生成的二氧化钛,随着在渣系中产物逐渐增多,当达到反应平衡时将不再烧损。

陆锡才研究表明^[4],在常规大气下使用 75CaF₂-15Al₂O₃-10CaO 三元渣电渣重熔冶炼 H130 合金(1.4%~2.2% Al,2.4%~3.2% Ti),Al 的烧损量为 0.27%~0.54%,Ti 的烧损量为 0.19%~0.37%。陈希春等人研究表明^[5],通过真空感应熔炼+惰性气体保护电渣重熔 FGH95 母合金(3.3%~3.7% Al,2.3%~2.7% Ti),Al 的烧损量为 0.11%~0.13%,Ti 的烧损量为 0.14%~0.16%。本试验 10 炉统计数据中 Al 的烧损为 0~0.13%,平均烧损量为 -0.071%;Ti 的烧损为 0~0.15%,平均烧损量为 -0.035%,与常规电渣重熔烧损率相比,氩气保护对减小 Al、Ti 的烧损作用显著。

在全氩气保护下使用三元预熔渣 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO 重熔 NCF3015 气阀钢,有一定的去 S 效果,电极平均 S 含量 79×10⁻⁶,平均脱 S 为 29×

10⁻⁶,平均脱 S 率为 36.7%。

5 结论

(1) 通过使用 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO 三元预熔渣,在全氩气保护电渣重熔 NCF3015 钢,Al 的平均烧损量为 -0.071%,Ti 的平均烧损量为 -0.035%。从电渣锭底部至顶部,Al 和 Ti 烧损逐渐减小。惰性气体对 Al、Ti 烧损的保护作用显著。

(2) 三元预熔渣 70CaF₂-15Al₂O₃-15CaO 冶炼 NCF3015 气阀钢,有一定的去 S 效果,平均脱 S 可达 29×10⁻⁶,脱 S 效率可达 37% 左右。

(3) Al、Ti 的烧损会引起电渣锭底部 Si 含量的增加,随着重熔反应进行,Si 将不再烧损。

(4) 后续工作将尽可能减少渣中不稳定氧化物含量、电极棒氧含量,并控制好气氛,惰性气体保护气氛电渣炉可以做到 Al、Ti 易烧损元素烧损微量、底部与顶部元素差距极微量,有效提高 NCF3015 气阀钢产品性能的均一性。

参考文献

- [1] 胡日. NCF3015 气阀合金长期时效组织演变规律研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2019.
- [2] 周立新,丁磊,苏春阳,等. 惰性气体保护 5t 电渣炉重熔铁路用 G20CrNi2MoA 渗碳轴承钢[J]. 特殊钢,2012,33(5):25-28.
- [3] 黄希祐. 钢铁冶金原理(第3版)[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:436-439.
- [4] 陆锡才. 恒渣阻恒熔速重熔高铝钛合金研究[J]. 工业加热,2003(2):50-51.
- [5] 陈希春,冯漆,杨雪峰. 惰性气体保护电渣重熔制备高纯净 FGH95 母合金的研究[C]. 中国特殊钢年会 2005 论文集,北京,2005.

丁磊(1982-),男,硕士(2010年东北大学),技术总监,工程师,特种冶金技术和产品开发。

E-mail:andysmith@126.com

收稿日期:2020-12-25

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告**