

GH2132 合金 2 t 电渣锭重熔工艺改进

崔利民^{1,2} 王忠鑫^{1,2} 罗保帅^{1,2} 张欢欢^{1,2}

(1 中航上大高温合金材料股份有限公司技术中心, 邢台 054800; 2 河北省特种合金再生工程技术研究中心, 邢台 054800)

摘要 GH2132 合金(1.90% ~ 2.30% Ti)重熔过程中 Ti 烧损量大($\Delta[\text{Ti}]$ 0.37% ~ 0.57%),重熔中、后期钢中 Ti 含量仅为 1.83% ~ 1.89%。通过采用(%) $\text{CaF}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{CaO} : \text{TiO}_2 = 75 : 15 : 5 : 5$ 渣系替代原 $\text{CaF}_2 70\% + \text{Al}_2\text{O}_3 30\%$ 渣系,控制渣中不稳定氧化物($\text{SiO}_2 + \text{FeO}$) $\leq 0.6\%$ 、冶炼过程熔速控制从原 6.1 ~ 6.3 kg/min 降至 5.3 ~ 5.6 kg/min 等工艺措施,电渣锭各部位的 Ti 含量为 2.06% ~ 2.21%,Ti 烧损量 $\Delta[\text{Ti}]$ 降至 0.19% ~ 0.34%。电渣锭锻造开坯后取样对夹杂物进行检验,发现通过工艺调整后夹杂物也有明显改善效果,D 类细系夹杂物控制在 0.5 级以下,符合供货要求。

关键词 GH2132 合金 电渣重熔 渣系 夹杂物

Improvement of 2 t GH2132 Alloy ESR Ingot Remelting Process

CUI Li-min^{1,2}, WANG Zhong-xin^{1,2}, LUO Bao-shuai^{1,2}, ZHANG Huan-huan^{1,2}

(1 Technology Centers in AVIC Shang Da Super Alloys Co Ltd, Xingtai 054800;

2 Hebei Engineering Research Center for Special Alloy Regeneration, Xingtai 054800)

Abstract The GH2132 alloy (1.90% ~ 2.30% Ti) has the problems of large loss of Ti element ($\Delta[\text{Ti}]$ 0.37% ~ 0.57%) in ESR process, the Ti content in steel is only 1.83% ~ 1.89% in ESR middle and last period. By adopting (/ %) $\text{CaF}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{CaO} : \text{TiO}_2 = 75 : 15 : 5 : 5$ slag system to replace original $\text{CaF}_2 70\% + \text{Al}_2\text{O}_3 30\%$ slag system, the unstable oxide ($\text{SiO}_2 + \text{FeO}$) in the slag is controlled to be less than 0.6%, and the controlled melting rate of the smelting process decreases from 6.1 ~ 6.3 kg/min to 5.3 ~ 5.6 kg/min, etc technological measures, as a result, the Ti content in steel at ESR ingot each part is 2.06% ~ 2.21%, and the Ti burning loss $\Delta[\text{Ti}]$ decreases to 0.19% ~ 0.34%. ESR ingots are sampled to check the inclusions after forging, and it is found that the inclusions have also been significantly improved after the process adjustment. The class inclusions of D fine system is controlled below rating 0.5, which meets the requirements.

Material Index GH2132 Alloy, Electroslag Remelting, Slag System, Inclusions

GH2132 是 Fe-25Ni-15Cr 高温合金,加入 Mo、Ti、Al、V 及微量 B 综合强化。在 650 °C 以下具有高屈服强度和持久蠕变强度,并且具有较好的加工塑性和满意的焊接性能。适合制造在 650 °C 以下长期工作的航空发动机高温承力部件,如涡轮盘、压气机盘、转子叶片和紧固件等^[1]。该合金可以生产各种形状的产品,如盘件、锻件、板、棒、丝和环形件等,广泛用于制造航空发动机和工业燃气轮机上的零部件,如涡轮叶片、加力燃烧室、紧固件等,在汽车发动机上也有广泛应用。由于该类合金钢纯净度要求较高,通常需进行二次重熔。由于 GH2132 合金具有高 Ti 低 Al 的成分特点^[2-3],因此,在电渣重熔过程中存在 Ti 烧损量大,电渣锭头尾 Al、Ti 差异大、沿锭身分布不均匀的问题^[4]。上述问题的存在,既容易导致铸锭成分不合格以及合金组织性能不均匀^[5],同时又不利于节约资源和降低成本。本文以中航上大公司生产的 GH2132 合金为试验样品,通过优化电渣重熔渣系,改进电渣重熔脱氧制度等措施

使得电渣重熔过程 Ti 得到稳定控制,电渣锭内部纯净度得到了明显改善,产品供货符合用户要求。

1 GH2132 合金主要技术要求及工艺流程

中航上大公司生产 GH2132 合金的工艺流程为:20 t 电弧炉→20 t VOD→20 t LF 精炼→浇注 $\Phi 340$ mm 电极棒→电渣重熔 $\Phi 480$ mm(2 t)电渣锭→电渣锭取样、修磨→锻造 $\Phi 160$ mm 棒材→超声波探伤→车加工至 $\Phi 150$ mm→取样检验。GH2132 合金成品化学成分要求如表 1 所示。

2 实际生产存在的问题及原因分析

2.1 存在问题

实际生产采用中航上大 2.0 t 单相、单支臂、结晶器固定式电渣炉设备,水冷结晶器平均直径 $\Phi 480$ mm,电极棒直径为 $\Phi 340$ mm,填充比 0.71。电渣重熔渣系为(/ %) $\text{CaF}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 70 : 30$,控制渣料中(SiO_2) $\leq 1.0\%$,总渣量 75 kg。冶炼电压(65 ± 2) V,冶炼电流($9\,000 \pm 500$) A,冶炼过程中每支电极

表 1 GH2132 合金化学成分/%
Table 1 Chemical composition of GH2132 alloy / %

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Al	Ti	B	Mo	V
0.03 ~ 0.08	1.00 ~ 2.00	≤1.00	≤0.015	≤0.025	24.00 ~ 27.00	13.50 ~ 16.00	≤0.35	1.90 ~ 2.30	0.001 ~ 0.010	1.00 ~ 1.50	0.10 ~ 0.50

均匀加 Al 粉 450 g 脱氧。采用上述工艺进行电渣重熔的 GH2132 合金,后期检验中发现存在以下问题:

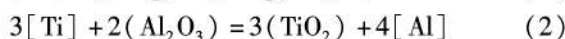
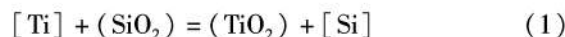
(1)电渣锭头、尾取样 Ti 含量差异较大,尤其是电渣锭头部 Ti 烧损严重。为了研究 Ti 含量变化规律,在头、尾取样点之间再均匀取 3 点试样,从尾部到头部分别标记为样 1 至样 5,发现从样 3 开始即出现 Ti 含量低于标准不合问题,具体结果如表 2 所示。

(2)锻后检验棒材,按 GB/T10561-2005 中 A 法检验头、尾夹杂物,发现存在 B 类和 D 类夹杂物超标问题,具体结果如表 3 所示。

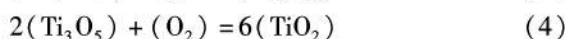
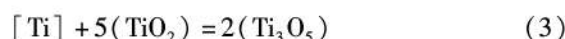
2.2 电渣重熔 Ti 烧损原因分析

从表 2 中实际检验结果可以看出,电极坯母材经电渣重熔后 Ti 烧损较多。GH2132 合金电渣重熔时 Ti 烧损主要通过以下两种途径进行^[6-8]:

(1)与渣中的不稳定氧化物进行反应:



(2)通过渣中变价氧化物的传氧作用与大气中的氧发生反应:



电渣重熔过程中,由于渣中 SiO_2 、 FeO 等不稳定氧化物的存在以及渣组元中有较高含量的 Al_2O_3 ,因此,电渣重熔前期 Ti 烧损主要以第 1 种途径中的反应式(1)、(2)为主。这一点从电渣锭尾部取样可以看出:Ti 烧损的同时,Al、Si 含量均有不同程度的增加。与此同时,由于重熔初期结晶器内渣液面的位置较低,并且挥发的炉气不断逸出,因此在一定程度上减弱了大气向炉渣液面供氧,使第 2 种烧损途径受到抑制。

重熔一段时间后,随着冶炼的进行,渣中 SiO_2 、 FeO 等不稳定氧化物逐渐被还原进入钢中,渣中 TiO_2 含量不断增加,使反应式(1)、(2)受到抑制。Ti 烧损则开始以第二种途径进行。此时炉渣温度不断上升,熔渣液面不断提高,这些因素均促进了大气中的氧向钢中转移,此时如果冶炼过程中均匀补加脱氧剂时则会在重熔后期脱氧能力不足,从表 2 检测结果来看,即表现为从尾部至头部重熔 Ti 含量逐渐降低。

3 工艺改进

3.1 电渣重熔渣系改进

3.1.1 渣中不稳定氧化物含量

采用铁铝电极对 CaF_2 渣料进行提纯,控制 CaF_2 中 $(\text{SiO}_2 + \text{FeO}) \leq 0.6\%$,实际经铁铝电极提纯后 CaF_2 中 $(\text{SiO}_2 + \text{FeO})$ 在 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。

3.1.2 降低渣中 Al_2O_3 组元活度及含量

由于 Al_2O_3 组元电导率低,因此,渣中 Al_2O_3 比例较高时会导致渣温过高、熔速加快,在一定程度上增加了熔池深度,加剧了渣-金间氧化反应,同时 Al_2O_3 活度较高时会促进反应式(2)进行,不利于 Ti 含量控制。有学者研究发现^[9-10]:当渣中 CaF_2 含量增加时,合金中的平衡 Al 含量随之减少,平衡 Ti 含量随之逐渐增加,这是由于随着渣中 CaF_2 含量的增

表 2 工艺改进前 GH2132 合金电渣锭主要成分及气体含量

Table 2 Analysis of main elements and gas content in GH2132 alloy ESR ingot before process optimization

炉号	取样部位	化学成分 / %						[O] / 10^{-6}
		C	Si	Mn	Al	Ti	ΔTi	
1D70083	尾 1	0.043	0.55	1.50	0.25	2.01	0.39	21
	2	0.042	0.56	1.50	0.26	1.91	0.49	-
	3	0.041	0.52	1.50	0.21	1.86	0.54	-
	4	0.041	0.50	1.50	0.19	1.86	0.54	-
	头 5	0.041	0.50	1.50	0.17	1.83	0.57	33
1D70084	尾 1	0.042	0.56	1.50	0.24	2.03	0.37	19
	2	0.042	0.56	1.50	0.24	1.95	0.45	-
	3	0.041	0.51	1.50	0.21	1.89	0.51	-
	4	0.041	0.51	1.50	0.18	1.86	0.54	-
	头 5	0.040	0.51	1.50	0.18	1.87	0.53	31
电极坯母材		0.041	0.51	1.50	0.22	2.40	-	12

注: $\Delta[\text{Ti}] / \% = [\text{Ti}]_{\text{重熔前}} - [\text{Ti}]_{\text{重熔后}}$

表 3 工艺改进前 GH2132 合金夹杂物评级结果/级

Table 3 Examination results of inclusions in GH2132 alloy before process optimization / rating

炉号	取样部位	A 类		B 类		C 类		D 类	
		细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
1D70083	尾部	0.0	0.0	1.0	0.5	0.0	0.0	1.0	0.5
	头部	0.0	0.0	1.5	0.5	0.0	0.0	1.5	0.5
1D70084	尾部	0.0	0.0	1.0	0.5	0.0	0.0	1.5	0.5
	头部	0.0	0.0	1.5	0.5	0.0	0.0	2.0	0.5
GB/T10561-2005		≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0

加,会降低渣中 Al_2O_3 活度,从而出现烧 Al 增 Ti 的现象。并且渣碱度对重熔钢 Ti 烧损率也有影响:电渣重熔随着渣碱度的增加钢中氧含量明显降低,钢锭中氧含量降低则元素烧损减少,因此,渣中加入一定量的 CaO 组元,提高渣系碱度,可在一定程度上控制 Ti 烧损。

因此,通过上述分析,将现有 70% CaF_2 30% Al_2O_3 电渣渣系改进为:(%) CaF_2 : Al_2O_3 : CaO: TiO_2 = 75: 15: 5: 5,控制渣料中 $(SiO_2 + FeO) \leq 0.6\%$,总渣量 75 kg。

3.2 供电制度改进

电渣重熔过程中电流、电压等功率参数的选择对电渣冶金质量至关重要,不仅影响了金属熔池深度和冶炼速度,而且对夹杂物去除及烧损元素控制也有直接关系。当冶炼过程中提高电压时,会使电极在渣池中埋入深度变浅、渣温升高,此时电渣表面氧化加重使电渣锭氧含量升高、洁净度变差;当电流过高时,电极熔速加快,电极尖端金属液滴形成的时间变短,导致钢渣去夹杂及有害元素的作用减弱,并且在电极尖端形成的金属液滴更大、更多,液滴和渣之间接触相对不充分,不利于夹杂物和有害元素的去除^[11-12]。工艺改进前设定工作电压为 $(65 \pm 2) V$,冶炼电流为 $(9\ 000 \pm 500) A$,经计算电渣锭的平均熔速为 $(6.1 \sim 6.3) kg/min$,虽然平均熔速满足 $V_{结} = (0.65 \sim 0.8) D_{结}$,但是冶炼过程由于使用电流电压控制,因此冶炼前期熔速较慢,相同功率下随着电极逐渐变短、渣温升高导致冶炼后期熔速较高,未能做到恒熔速控制,造成头尾成分差异大、头部夹杂物超标。因此,对供电制度进行优化,采用恒熔速、功率递减冶炼,前1/2电极电压按 $(66 \sim 67) V$ 、电流按 $(8\ 900 \sim 9\ 300) A$ 进行控制,后1/2电极时电压降为 $(63 \sim 64) V$ 、电流降为 $(8\ 300 \sim 8\ 500) A$ 。

4 工艺改进后效果验证

通过对电渣过程 Ti 烧损、夹杂物去除机理分析后,选择与工艺改进前同一电弧炉炉号剩余的 2 支电极坯料进行电渣重熔,电渣重熔工艺改进如下:重熔渣系改为 (%) CaF_2 : Al_2O_3 : CaO: TiO_2 = 75: 15: 5: 5,控制渣料中 $(SiO_2 + FeO) \leq 0.6\%$,总渣量 75 kg。冶炼过程采用功率递减控制:前1/2电极电压按 $(66 \sim 67) V$ 、电流按 $(8\ 900 \sim 9\ 300) A$ 进行控制,后1/2电极时电压降为 $(63 \sim 64) V$ 、电流降为 $(8\ 300 \sim 8\ 500) A$,通过改进供电制度功率递减冶炼后,实际熔速达到由改进前的 $6.1 \sim 6.3 kg/min$ 下降为改进后的 $5.3 \sim 5.6 kg/min$,采用氩气保护冶炼,流量 40

L/min。冶炼过程 Al 粉脱氧剂逐级递增,脱氧剂加入量及渣系对比如表 4 所示。

随后对工艺改进后生产的两支电渣锭锭身 5 点取样,检测 C、Si、Mn、Al、Ti 化学元素含量,从尾部到头部分别将试样标记为样 1(尾)至样 5(头),并在头、尾取样检测氧含量,检测结果如表 5 所示。

从表 5 取样检测结果可以看出,优化电渣工艺后电渣锭取样 Ti 烧损明显减少,头、尾 Ti 含量可控制 2.05% 以上,氧含量控制在 20×10^{-6} 以下。图 1 对比了工艺优化前后 $\Delta[Ti]$ 变化趋势。

从图 1 对比结果可以看出,工艺优化后 Ti 烧损

表 4 工艺优化前后脱氧剂加入量及渣系对比
Table 4 Comparison of amount of deoxidizer and slag system between before and after process optimization

工艺	加脱氧剂 Al 粉量/g			渣中各组元占比/%			
	前 1/3 电极	中部 1/3 电极	后 1/3 电极	CaF_2	Al_2O_3	CaO	TiO_2
优化前	150	150	150	70	30	-	-
优化后	150	250	350	75	15	5	5

表 5 工艺改进后 GH2132 合金电渣锭主要成分和气体含量
Table 5 Analysis of main elements and gas content in GH2132 alloy ERS ingot after process improvement

炉号	取样部位	化学成分 /%					$[O]$ / 10^{-6}	
		C	Si	Mn	Al	Ti	ΔTi	
电极坯母材		0.041	0.51	1.50	0.22	2.40	-	12
1D70108	尾 1	0.042	0.52	1.50	0.25	2.18	0.22	14
	2	0.042	0.51	1.50	0.23	2.12	0.28	-
	3	0.041	0.51	1.50	0.22	2.09	0.31	-
	4	0.041	0.51	1.50	0.20	2.08	0.32	-
	头 5	0.041	0.51	1.50	0.19	2.21	0.19	17
1D70109	尾 1	0.044	0.51	1.50	0.24	2.06	0.34	16
	2	0.042	0.51	1.50	0.24	2.15	0.25	-
	3	0.041	0.51	1.50	0.21	2.11	0.29	-
	4	0.041	0.51	1.50	0.19	2.12	0.28	-
	头 5	0.041	0.51	1.50	0.17	2.09	0.31	19

注: $\Delta[Ti] / \% = [Ti]_{重熔前} - [Ti]_{重熔后}$

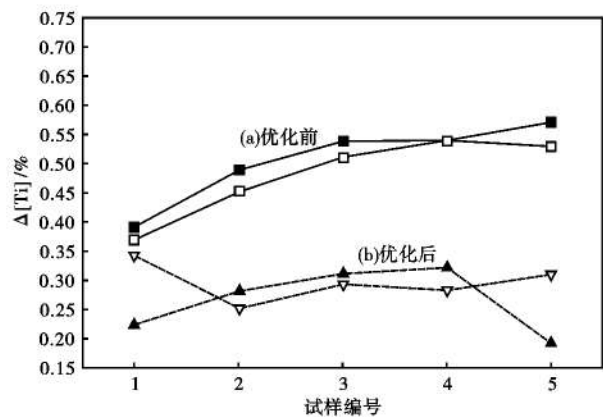


图 1 工艺优化前(a)后(b)钛烧损量 $\Delta[Ti]$ 对比
Fig. 1 Comparison of titanium burning loss $\Delta[Ti]$ between before (a) and after (b) process optimization

表 6 工艺改进后 GH2132 合金夹杂物评级结果/级
 Table 6 Examination results of inclusions in GH2132 alloy after process optimization /rating

炉号	取样部位	A 类		B 类		C 类		D 类	
		细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
1D70108	尾部	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0
	头部	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0
1D70109	尾部	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0
	头部	0	0	0.5	0.5	0	0	0.5	0

量明显减少,最低可控制在 0.2% 以下。后续对工艺优化后的电渣锭进行了锻造,锻后头、尾取样检验夹杂物,检测结果如表 6 所示。

5 结论

(1)通过控制 CaF₂ 渣料中不稳定氧化物含量,

使(SiO₂ + FeO) ≤ 0.6%,选择(%) CaF₂: Al₂O₃: CaO: TiO₂ = 75: 15: 5: 5 渣系,Ti 烧损得到明显控制,电渣锭 5 点取样 Ti 含量均控制在 2.05% 以上,电渣锭氧含量控制在 20 × 10⁻⁶ 以下。

(2)电渣重熔过程中,通过采用氩气保护及脱氧剂递增等措施使电渣锭 Ti 含量头、尾差异明显改善,头、尾 Ti 含量差由工艺优化前的 0.16% ~ 0.18% 缩小到优化后的 0.03% 以内。

(3)通过优化电渣渣系及供电制度使 GH2132 合金夹杂物等级明显改善,D 类细系可控制在 0.5 级,符合协议供货要求。

参考文献

[1] 胡隆巍,叶文君. 紧固件材料手册[M]. 北京:中国宇航出版社, 2014:195-207.

[2] 粟 硕. R26 合金电渣重熔 Ti 含量控制研究[J]. 钢铁研究学报,2011,23(增刊 2):282-285.

[3] 斐丙红. GH901 合金采用电渣重熔工艺时 Ti 含量的控制研究[J]. 特钢技术,2007,13(4):26-29.

[4] 李 星,耿 鑫,姜周华,等. 电渣重熔高温合金渣系对冶金质量的影响[J]. 钢铁,2015,50(9):41-46.

[5] 黄乾尧,李汉康. 高温合金[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:4.

[6] 侯 栋. 电渣重熔含铝钛不锈钢的冶金反应及成分控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2017.

[7] 周茂华. 浅析 GH2132 合金电渣重熔 Φ550mm 锭型中渣系对钛烧损影响[J]. 特钢技术,2007(2):38-40.

[8] 斐丙红,刘勤学,何云华. GH2132 合金电渣重熔渣系的研究[J]. 四川冶金,2003(6):7-9.

[9] 尹 彬. Inconel718 高温合金电渣重熔过程中铝、钛元素的烧损控制[D]. 沈阳:东北大学,2019.

[10] 赵鸿燕. 渣成分对高温合金 0Cr15Ni25Ti2MoAlVB 电渣重熔 Ti 烧损率和钢锭表面质量的影响[J]. 特殊钢,2006,27(2):61-63.

[11] 李正邦,周文辉,李谊大. 电渣重熔去除夹杂物的机理[J]. 钢铁,1980,15(1):20-26.

[12] 王林珠,李 翔,刘录凯,等. 镍基高温合金中非金属夹杂物成分和特征控制[J]. 中国冶金,2021,31(5):32-35.

崔利民(1990-),男,硕士(2016 年华北理工大学),工程师,冶金工艺研究。E-mail:cuiliminde@126.com

收稿日期:2021-09-10

“讲文明树新风”公益广告

绿色 环保
 人人 有责