



普通电渣炉的全密闭气氛改造及其对典型钢种的影响

赵子民¹, 孙欣², 侯栋^{1,3}, 周伟基², 姚玉东², 孙常亮²

(1 苏州大学钢铁学院, 苏州 215000; 2 东北特殊钢集团股份有限公司总工办, 大连 116105;

3 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要:随着电渣钢品质的不断提升,普通电渣炉亟须进行全密闭气氛保护的升级改造,从而解决电渣重熔过程元素烧损、增氧、增氢、氢气孔等问题。采用新型的电渣炉气氛改造技术,分别用 5 t 和 2 t 电渣炉对 GCr15SiMn 轴承钢和 GH2132 高温合金进行传统气氛保护电渣炉和新型电渣炉的对比试验。冶炼过程中实现了结晶器内氧分压低至 1×10^{-6} 。试验数据显示,传统气氛保护电渣炉冶炼下, GH2132 中 Ti 收得率低,仅为 88%; GCr15SiMn 轴承钢电渣重熔过程中增 $w[\text{O}]$ 量大,可达 5×10^{-6} 。而在新型气氛保护改造中, GH2132 中的 Ti 收得率高达 96%; 重熔过程轴承钢增 $w[\text{O}]$ 控制在 3×10^{-6} 以内,电渣锭中 $w[\text{O}]$ 稳定控制在 10×10^{-6} 以内,其电渣锭效果媲美气保电渣炉。以上炉内氧分压和电渣锭检测结果表明,电渣炉气氛改造后,可有效解决传统气氛保护改造技术下,往复的热浪涌出和负压吸气导致的结晶器内氩气保护不稳定,从而造成电极表面氧化、氧化皮掉入渣中引起的熔渣氧势升高和电渣锭增氧的问题;尤其对于 GH2132 高 Ti 低 Al 型高温合金,普通电渣炉加入脱氧剂 Al 条件下,无法避免 Ti 的烧损,只能导致电渣锭增 Al。

关键词:电渣重熔; 气氛保护; 钛烧损; GCr15SiMn 轴承钢; GH2132 高温合金

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00063 中图分类号:TF142

Transformation of the Completely Enclosed Atmosphere in Ordinary Electroslag Furnace and Its Influence on Typical Steel Grades

Zhao Zimin¹, Sun Xin², Hou Dong^{1,3}, Zhou Weiji², Yao Yudong², Sun Changliang²

(1 School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, China; 2 Chief Engineer Office, Dongbei Special Steel Group Co., Ltd., Dalian 116105, China; 3 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: As the quality of electroslag steel continues to be improved, the ordinary electroslag furnace requires urgent upgrading to a fully airtight atmosphere protection system, aiming to address issues such as element burning loss, oxygen and hydrogen increase, and hydrogen porosity during the electroslag remelting (ESR) process. A novel atmosphere modification technology for electroslag furnaces has been used to conduct the comparative experiments between the traditional atmosphere protection electroslag furnace and the novel electroslag furnace on GCr15SiMn bearing steel and GH2132 superalloy, using electroslag furnaces with capacities of 5 t and 2 t, respectively. In the novel electroslag furnace, it has achieved an oxygen partial pressure as low as 1×10^{-6} in the mold during the melting process. The experimental results show that under traditional atmosphere protection in electroslag furnaces, the titanium yield in GH2132 is low, only 88%; The oxygen increase in GCr15SiMn bearing steel during the ESR process, $w[\text{O}]$ can reach up to 5×10^{-6} . In the novel atmosphere protection modification, the titanium yield in GH2132 reaches as high as 96%; The oxygen $w[\text{O}]$ increase in bearing steel during the ESR process is controlled within 3×10^{-6} , and the oxygen $w[\text{O}]$ content in the electroslag ingot is stably controlled within 10×10^{-6} . The quality of the electroslag ingots matches that of atmosphere-protected electroslag furnaces. In the remelting process, bearing steel $w[\text{O}]$ is controlled within 3×10^{-6} , $w[\text{O}]$ in electric slag ingot is controlled within 10×10^{-6} , and the effect of electric slag ingot is comparable to that of gas protection slag furnace. Above detection results of oxygen partial pressure in furnace and electric slag ingot show that after electric slag furnace atmosphere modification, it can effectively solve the problems like slag oxygen potential increase and the electric slag ingot caused by the oxide skin falling into the slag, which are the traditional atmosphere protection transformation technology, the recurrent heat wave emission and negative pressure suction caused by the unstable argon protection in the mold, resulting in the electrode surface oxidation. Especially for GH2132 high Ti low Al type superalloy, under the condition of adding deoxidant Al in ordinary electric slag furnace, it can only cause Al increase in electric slag ingot.

Key Words: Electroslag Remelting; Atmosphere Protection; Titanium Burning Loss; GCr15SiMn Bearing Steel; GH2132 superalloy

基金项目: 江苏省自然科学基金 20231317; 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室开放基金 FMRUlab23-06

作者简介: 赵子民(2003—), 男, 本科; E-mail: donghou89@126.com; 收稿日期: 2024-03-17

通信作者: 侯栋(1989—), 男, 博士, 副教授; E-mail: houdongsci@163.com

电渣重熔技术在高品质特种钢材的生产中得到了广泛应用。然而,传统的重熔炉存在一些技术限制,例如,因缺乏气氛保护功能导致铸锭在生产过程中增氢^[1];金属母材在高温下与熔渣接触时,在熔渣的高温热辐射和热传导下,表面发生大量氧化^[2],导致铸锭中活泼元素的烧损,并增加氧含量。此外,传统气氛保护技术下,结晶器内的气体呈热浪形式溢出,当热浪涌出结晶器口时,炉内呈负压进行吸气,往复的热浪涌出和负压吸气导致了结晶器内氩气保护不稳定^[3],从而造成电极表面氧化,氧化皮掉入渣中引起熔渣氧势升高和电渣锭增氧问题。因此,实现电渣炉惰性气体保护,提升电渣钢质量具有重要意义。以电渣炉改造前后的 GCr15SiMn 轴承钢电渣锭和 GH2132 合金电渣锭为研究对象,分析了普通电渣炉不同改造方案对电渣锭洁净度的影响,为提升电渣锭质量提供了参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料分析

选择 GCr15SiMn 轴承钢和 GH2132 合金为试验钢种,分别在东北特钢 5 t 电渣炉和苏州双金 2 t 电渣炉进行了工业试验,其中,生产 GCr15SiMn 轴承钢所用电极坯为连铸坯, GH2132 高温合金所用电极坯为真空感应铸锭,化学成分见表 1。GCr15SiMn 轴承钢用以制造轴承的套圈、钢球、滚子等^[4-5],也可用于制造要求高硬度高耐磨性的其他机械零件。这种使用条件需要提高轴承钢的冶金质量,以满足其化学成分均匀、偏析小、超纯净内质等技术要求^[6]。GH2132 高温合金用于制造需长期在 650 °C 以下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,具有良好的可锻性能和满意的焊接性能^[7]。由于 GH2132 合金具有高 Ti 低 Al 的成分特点^[8-9],因此,在电渣重熔过程中存在 Ti 烧损量大^[10],电渣锭头尾 Al、Ti 差异大、沿锭身分布不均匀的问题。

新型气氛保护改造电渣炉结构如图 1 所示。该设备在普通电渣炉的基础上加装了全密闭的气氛保护罩,以实现冶炼过程中的惰性气氛保护。在生产过程中,只需对原有设备进行改造,无需更换气氛保护电渣炉,显著节约了生产成本。

1.2 GCr15SiMn 轴承钢工业试验

采用 5 t 电渣炉对 GCr15SiMn 轴承钢在不同条件下进行重熔,试验编号分别为 G1, G2, G3。G1 在传统气氛保护改造技术下冶炼, G2 在新型气氛保护

表 1 GCr15SiMn 和 GH2132 铸锭化学成分(质量分数)
Table 1 The chemical composition of GCr15SiMn and GH2132 ingot

钢种	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	O	Ti	Al
GCr15SiMn	0.51	1.05	1.48	0.25	0.013	0.0051	0.0007	-	-
GH2132	0.51	1.42	14.72	25.84	0.021	0.0010	-	2.26	0.27

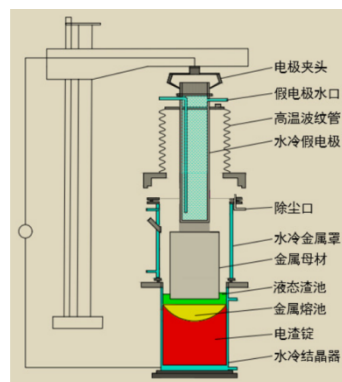


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

改造技术下冶炼, G3 在气氛保护电渣炉中冶炼。三组试验使用的电极直径为 450 mm, 结晶器直径为 600 mm。每次热处理中,电渣炉的熔化速率为 420 kg/h。电极表面的氧化皮在 ESR 试验前通过机械方法去除。

三组试验中均使用 120 kg 的预熔渣,渣系为 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3=40:30:30$ 。预熔渣在电渣重熔试验前至少在 773 K 的干燥箱中烘烤 5 h,以去除渣中的水分。试验设备如图 2 所示。

1.3 GH2132 钢工业试验

采用 2 t 电渣炉对 GH2132 高温合金进行了 3 炉试验,试验编号为 T1, T2, T3。T1 在传统气氛保护改造技术下冶炼, T2 在新型气氛保护改造技术下冶炼, T3 在气氛保护电渣炉中冶炼。三组试验使用的电极直径为 200 mm, 结晶器直径为 300 mm, 电渣炉的熔化速率为 210 kg/h。T1 需加入铝粉作为脱氧剂,加入量为 1 kg/t。电极表面的氧化皮在 ESR 试验前通过机械方法去除。

三组试验中均使用 60 kg 的预熔渣,渣系为 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2:\text{MgO}=49:20:22:5:4$ 。预熔渣在电渣重熔试验前至少在 773 K 的干燥箱中烘烤 5 h,以去除渣中的水分。试验设备如图 3 所示。

2 试验结果与讨论

2.1 GCr15SiMn 轴承钢电渣重熔铸锭成分分析

GCr15SiMn 轴承钢电渣锭的化学成分见表 2。

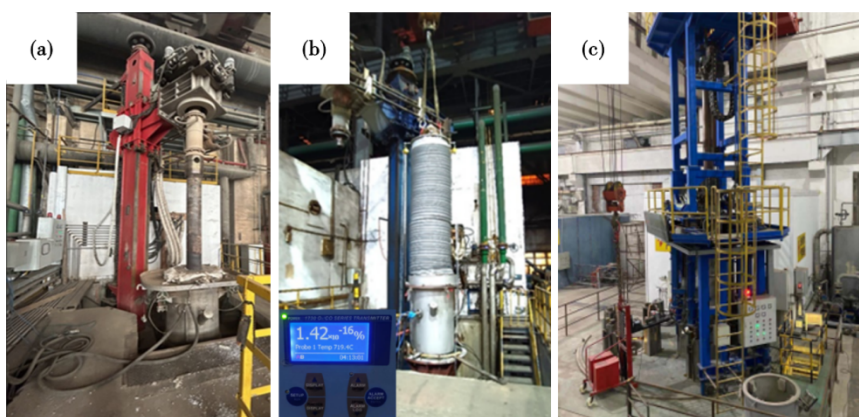


图2 试验设备 (a)传统气氛保护罩;(b)新型气氛保护罩;(c)气氛保护电渣炉

Fig. 2 Physical diagram of experimental apparatus (a) traditional atmosphere protector (b) new atmosphere protector (c) atmosphere protected electroslag furnace

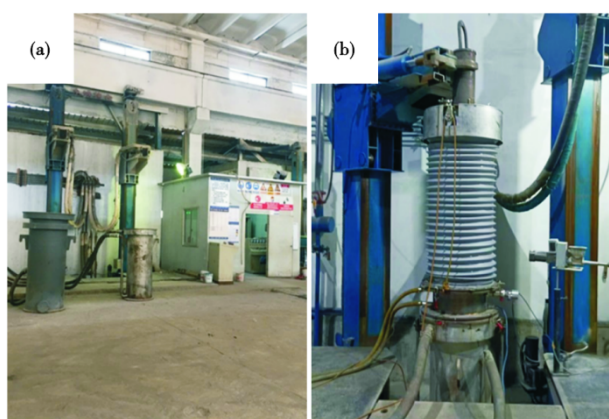


图3 试验设备 (a)未加装气氛保护罩;(b)加装气氛保护罩
Fig. 3 Physical diagram of experimental apparatus (a) without atmosphere protector (b) equipped new atmosphere protector

轴承钢生产过程中,一般要求钢中 $w[O]$ 低于 10×10^{-6} ^[11]。G1在传统气氛保护罩下,使用含 Al_2O_3 渣系进行熔炼;G2、G3分别在新型保护性气氛下和气氛保护电渣炉中,以相同的工艺参数进行熔炼。三组铸锭的氧含量如图4所示。由图4可以看出,使用新型的气氛保护罩后,防止GCr15SiMn钢铸锭增氧的效果最好,与使用气氛保护电渣炉效果相当。

钢中的总氧含量是评估轴承钢洁净度的一个重要指标。氧化物夹杂会对轴承钢疲劳性能产生不利影响。降低钢中的氧含量是提高轴承钢质量的关键^[12-13]。

G1炉次电渣重熔在传统保护条件下进行,由表4可得到,电渣锭中 $w[O]=0.0012\%$,较连铸锭中 $w[O]=0.0007\%$,氧质量分数升高。这是由于传统气氛保护改造技术下,结晶器内的热浪和负压吸

表2 GCr15SiMn钢电渣重熔铸锭化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical components of the electroslag ingot of GCr15SiMn steel

电渣锭	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	P	S	O
G1	顶部	0.96	0.39	0.94	1.50	0.14	0.03	0.014	0.0012
	底部	0.96	0.40	0.94	1.50	0.14	0.03	0.014	0.0020
G2	顶部	0.96	0.44	0.98	1.51	0.22	0.03	0.013	0.0027
	底部	0.97	0.45	0.96	1.51	0.22	0.03	0.013	0.0027
G3	顶部	0.96	0.44	0.97	1.49	0.17	0.02	0.013	0.0021
	底部	0.96	0.44	0.98	1.48	0.16	0.02	0.012	0.0023

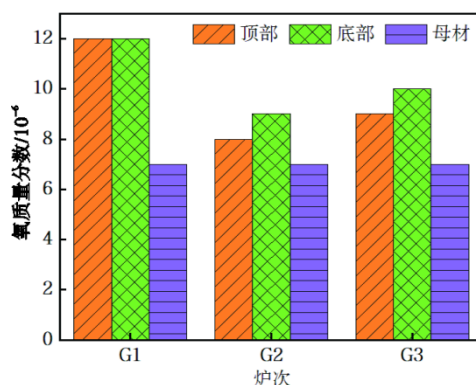


图4 不同条件下电渣重熔对GCr15SiMn轴承钢中氧质量分数的影响

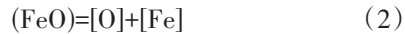
Fig. 4 Effect of electroslag remelting on oxygen mass fraction in GCr15SiMn bearing steel under different conditions

气,导致在假电极和水冷金属罩上沿的地方大量空气吸入炉内,炉内的氧气会在电极表面的电极-大气界面反应,根据方程式(1)^[14]在电极表面形成不稳定氧化物FeO,从而增加氧势。



在电极表面形成的氧化亚铁和电极表面原有的氧化皮会进入到渣池中,随后通过以下反应将氧

气传输到液态金属池,从而增加氧势。



G2 炉次在新型保护性气氛条件下进行,由表 4 可得到,电渣锭中 $w[\text{O}]=0.0009\%$ 左右,与连铸锭相比,氧质量分数基本保持不变。这说明在保护性气氛条件下进行电渣重熔,氧气通过直接或间接方式从大气中传输到液态钢中将被阻止,从而在重熔过程中可以保持低的氧势,显著地减少电渣锭中的增氧。但钢中氧的质量分数亦与 Al-O 平衡有关^[15],由于熔渣中 Al_2O_3 的存在,在电渣重熔过程中发生反应(3),增加了电渣锭中 $[\text{O}]$ 含量。



G3 炉次在气氛保护电渣炉中进行,由表 4 可得到,电渣锭中 $w[\text{O}]=0.0009\%$ 左右,与新型气氛保护改造技术效果接近,氧质量分数基本保持不变。这说明新型气氛改造技术效果显著,与气氛保护电渣炉的冶炼效果相当,可以达到冶炼低氧含量 GCr15SiMn 轴承钢的目的。

2.2 GH2132 钢电渣重熔铸锭成分分析

GH2132 钢电渣重熔铸锭的化学成分见表 3。三组铸锭的 Ti 含量如图 5 所示。

表 3 GH2132 钢电渣重熔铸锭化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical components of the electroslag ingot of GH2132 steel

序号	部位	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	Al
T1	大头	0.55	1.56	0.020	0.001	1.25	2.09	0.27
	小头	0.54	1.58	0.021	0.001	1.27	2.01	0.20
T2	大头	0.54	1.41	0.024	0.001	1.28	2.25	0.25
	小头	0.52	1.41	0.022	0.001	1.29	2.27	0.22
T3	大头	0.52	1.40	0.023	0.001	1.27	2.26	0.24
	小头	0.50	1.41	0.022	0.001	1.28	2.25	0.23

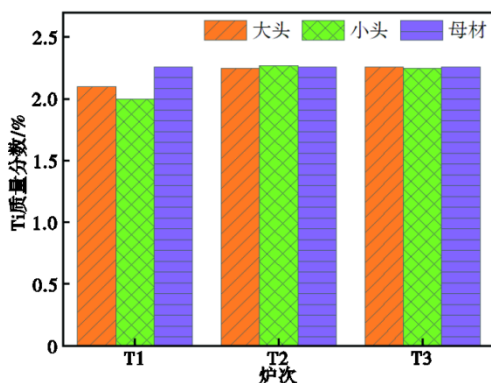


图 5 不同条件下电渣重熔对 GH2132 钢中 Ti 质量分数的影响

Fig. 5 The effect of electroslag remelting on Ti mass fraction in GH2132 steel under different conditions

T1 炉次电渣重熔在传统气氛保护改造技术下进行,钢中 Ti 的烧损达到了 10% 左右。在电渣重熔高温下,金属电极表面被氧气氧化,氧化层掉入渣中,渣中不稳定氧化物(FeO 、 Al_2O_3 等)氧化钛,从而引起钛的烧损^[16]。T1 炉次在添加铝粉的情况下,由于反应 $3[\text{Ti}]+2\text{Al}_2\text{O}_3=4[\text{Al}]+3\text{TiO}_2$ 并没有达到热力学平衡,熔渣中 TiO_2 不充足的条件下,添加铝粉的条件只能使得电渣锭增 Al,而无法抑制钛的烧损。根据文献的热力学平衡计算结果表明^[17-18],当钢中 $w[\text{Ti}]$ 为 1%、 $w[\text{Al}]$ 为 0.5% 时,对应的熔渣成分为 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{TiO}_2=52:20:22:3:3$;当钢中 $w[\text{Ti}]$ 为 2%、 $w[\text{Al}]$ 为 0.3% 时,根据反应 $3[\text{Ti}]+2\text{Al}_2\text{O}_3=4[\text{Al}]+3\text{TiO}_2$ 热力学平衡原理得到熔渣成分为 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}:\text{TiO}_2=52:20:22:3:X$ 条件下,所需的 TiO_2 含量达到了 $X=9\%$ 以上,但添加 9% 的 TiO_2 又会恶化熔化性能,引起电渣锭表面质量变差。

T2 炉次在新型气氛保护改造技术下进行,Ti 的收得率达到 97% 以上,较 T1 炉次大气下、加铝粉的电渣重熔烧损明显减少。这是由于在保护性气氛下,大气中的传氧受到抑制,渣中不稳定氧化物 FeO 质量分数减少。即使熔渣中 TiO_2 不充足的条件下,由于电渣重熔过程渣-金并没有达到热力学平衡(其动力学条件不能够使得渣-金界面反应达到热力学平衡态),因此,电渣锭 Ti、Al 成分变化不大。

T3 炉次在气氛保护电渣炉中进行,Ti 的收得率达到 97%,与在新型气氛保护改造技术下冶炼效果接近。

综上所述,电渣重熔 GH2132 高温合金时,传统气氛保护改造电渣炉很难兼顾铝钛成分和表面质量的双重问题,通过电渣炉的新型气氛保护改造技术,实现了优质 GH2132 高温合金电渣锭的熔炼。

2.3 工艺效果

电渣重熔 GCr15SiMn 轴承钢试验表明,采用传统气氛改造技术时,在氩气流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,氧分压测量仪显示炉内氧分压达到了 3%,电渣锭中 O 升高,主要由于结晶器内热浪和负压吸气使得大气进入到炉内,造成金属电极表面的氧化,进而引起熔渣氧势升高和电渣锭增氧;采用新型电渣炉气氛改造技术,实现了全密闭氩气保护,在氩气流量为 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,炉内氧分压降低至 1.42×10^{-16} 。电渣重熔后的电渣锭 $w[\text{O}]$ 稳定控制在 10×10^{-6} 内,冶炼出的电渣锭质量达到了气保电渣炉水平,相比传统

气氛保护罩方案冶炼出 $w[\text{O}]$ 为 12×10^{-6} ,指标有了明显提升。

电渣重熔GH2132钢的电渣重熔试验中,通过对比不同条件下的重熔工艺参数和化学成分分析结果,深入探讨了电渣重熔对钢中Ti的影响。在T1试验中,即在未采用新型保护性气氛电渣重熔的条件下,使用渣系 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2:\text{MgO}=49:20:22:5:4$ 并加入铝粉,易导致[Ti]烧损,无法保证Ti的收得率。当采用新型气氛保护改造技术后,可以实现[Ti]的收得率大于97%,与使用气氛保护电渣炉效果相当,实现了优质GH2132的熔炼。

3 结论

(1) 采用5 t电渣炉并使用 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3=40:30:30$ 渣系重熔GCr15SiMn轴承钢过程中,新型气

氛保护改造技术能够有效地防止大气中的氧气进入结晶器内,在氩气流量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下,炉内氧分压降低至 1.42×10^{-16} 。熔炼后的轴承钢 $w[\text{O}]$ 控制在 10×10^{-6} 内,有效防止电渣重熔过程增氧,提高钢材的质量和洁净度。

(2) 电渣重熔GH2132高温合金时,在2 t电渣炉中使用 $\text{CaF}_2:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{TiO}_2:\text{MgO}=49:20:22:5:4$ 渣系,对比传统的添加铝粉的方法,新型气氛保护改造技术能从根源上降低渣中不稳定氧化物含量和抑制氧传递过程,从而有效减少Ti等有益元素的烧损,获得了优质高温合金电渣锭。

(3) 通过对普通电渣炉的新型气氛改造,其效果媲美了气保电渣炉,有效防止了熔炼过程增氧增氢、夏季潮湿引起的气孔问题,电渣重熔过程铸锭始终处于稳定的环境中,常年生产的电渣锭稳定可靠。

参考文献

- [1] 崔利民, 李青, 胡英超, 等. 核电用超纯奥氏体不锈钢316H电渣重熔氢含量控制[J]. 南方金属, 2023, (3): 1-3.
- [2] 李建军, 张锦文. 非保护气氛电渣重熔降低30CrNiMo8氧含量措施[J]. 山西冶金, 2019, 42(2): 52-53+61.
- [3] 姜周华. 高品质特殊钢电渣重熔技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- [4] Yan W, Zhang Y, Chen W Q, et al. Characteristics and Formation Tendency of Freckle Segregation in Electroslag Remelted Bearing Steel[J]. Metals, 2020, 10(2): 246.
- [5] Xiang D H, Li B H, Zhao C Y, et al. Mechanism and experimental evaluation on surface morphology of GCr15SiMn with ultrasonic vibration grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(5): 2377-2387.
- [6] 梁贤淑, 郭亚非, 晋帅勇. GCr15SiMn超高纯净轴承钢冶炼工艺优化[J]. 大型铸锻件, 2021, (2): 13-15.
- [7] 崔利民, 王忠鑫, 罗保帅, 等. GH2132合金2 t电渣重熔工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 43-46.
- [8] 裴丙红. 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.
- [9] 栗硕. R-26合金电渣重熔Ti含量控制研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 282-285.
- [10] 丁磊, 贾景岩. 氩气保护对电渣重熔气阀钢NCF3015铝钛烧损的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 52-55.
- [11] 晋晨阳. 轴承钢氧含量降低及稳定性控制研究[J]. 山西冶金, 2022, 45(9): 14-16.
- [12] Shi C B, Chen X C, Guo H J, et al. Assessment of Oxygen Control and Its Effect on Inclusion Characteristics during Electroslag Remelting of Die Steel[J]. Steel Research International, 2012, 83(5): 472-486.
- [13] Shi C B. Deoxidation of Electroslag Remelting (ESR) - A Review[J]. Isij International, 2020, 60(6): 1083-1096.
- [14] Shi C B, Chen X C, Guo H J, et al. Oxygen control and its effect on steel cleanliness during electroslag remelting of NAK80 die steel[C]. AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings[C]. Atlanta, GA: Iron and Steel Society, 2012: 947-957.
- [15] 李作伟, 耿鑫, 姜周华, 等. 电渣重熔304NG不锈钢脱氧热力学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(11): 4273-4282.
- [16] 邓鹏辉, 周立新, 潘明旭, 等. 氩气保护气氛对电渣重熔过程1Cr18Ni9Ti钢钛烧损的影响[J]. 特殊钢, 2015, 36(1): 38-40.
- [17] Hou D, Wang D. Y., Zhou X. Z., et al. Study on physical and chemical properties of slag used for electroslag remelting of superalloy containing titanium and aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(5): 2972-2990.
- [18] Hou D, Jiang Z. H., Dong Y. W., et al. Effect of slag composition on the oxidation kinetics[J]. ISIJ International, 2017, 57(8): 1410-1419.