

Incoloy825 合金 280 mm × 325 mm 电渣重熔坯抽锭工业试验

陈帅超 王新鹏 宁天信 罗利阳 张春林
(洛阳双瑞特种装备有限公司, 洛阳 471000)

摘要 试验了 Incoloy825 合金电极 (/% : 0.01C, 0.21Si, 0.41Mn, 0.007S, 0.019P, 22.33Cr, 39.08Ni, 3.04Mo, 2.14Cu, 1.17Ti, 0.17Al) 由 3 t 中频炉 + 3 t AOD 冶炼, 并经抽锭电渣重熔成 280 mm × 325 mm 坯 (/% : 0.01C, 0.21 ~ 0.23Si, 0.40Mn, 0.005S, 0.023 ~ 0.024P, 22.48 ~ 22.50Cr, 39.10 ~ 39.13Ni, 3.05 ~ 3.07Mo, 2.14 ~ 2.15Cu, 1.00 ~ 1.10Ti, 0.15 ~ 0.18Al)。试验表明, Incoloy825 合金方坯抽锭电渣重熔过程中, 由于 Ti 烧损, 渣中 TiO₂ 含量不断增加, 熔渣的粘度也不断上升, 导致钢渣不易分离。通过改进抽锭电渣重熔渣系配比, 采用 (/%) 57CaF₂, 15CaO, 5MgO, 15Al₂O₃, 5SiO₂, 3TiO₂ 渣系以及控制电极熔化速度 680 kg/h, 重熔过程加 0.43 kg/t 铝粒以控制 Ti 烧损, 使 Incoloy825 合金铸坯表面质量明显改善。

关键词 耐蚀合金 Incoloy825 280 mm × 325 mm 坯 抽锭电渣重熔 表面质量

Commercial Pilot Production of Incoloy825 Alloy ESR 280 mm × 325 mm Withdrawing Bloom

Chen Shuaichao, Wang Xinpeng, Ning Tianxin, Luo Liyang and Zhang Chunlin
(Luoyang Shuangrui Special Equipment Co Ltd, Luoyang 417000)

Abstract The electrodes of tested Incoloy825 alloy (/% : 0.01C, 0.21Si, 0.41Mn, 0.007S, 0.019P, 22.33Cr, 39.08Ni, 3.04Mo, 2.14Cu, 1.17Ti, 0.17Al) are melted by 3t medium frequency induction furnace + 3 t AOD, and the 280 mm × 325 mm withdrawing blooms (/% : 0.01C, 0.21 ~ 0.23Si, 0.40Mn, 0.005S, 0.023 ~ 0.024P, 22.48 ~ 22.50Cr, 39.10 ~ 39.13Ni, 3.05 ~ 3.07Mo, 2.14 ~ 2.15Cu, 1.00 ~ 1.10Ti, 0.15 ~ 0.18Al) are remelted by ESR process. The test results show that during ESR bloom withdrawing process of Incoloy825 alloy, due to Ti burning loss the TiO₂ content in slag increases continuously and the viscosity of slag also uninterrupted increases led to difficult separation of slag and steel. By improving ingredient of slag for withdrawing bloom ESR, using (/%) 57CaF₂, 15CaO, 5MgO, 15Al₂O₃, 5SiO₂, 3TiO₂ slag series and controlling electrode melting rate 680 kg/h and adding aluminium shot 0.43 kg/t in ESR process to control Ti burning loss, the surface quality of casting bloom of Incoloy825 alloy improves obviously.

Material Index Corrosion Resistant Alloy, Incoloy825, 280 mm × 325 mm Bloom, ESR Withdrawing, Surface Quality

Incoloy825 是 INCO 公司发明的一种 Ni-Fe-Mo 固溶强化合金。该合金具有抗氯离子应力腐蚀开裂的能力、抗点蚀、缝隙腐蚀和许多腐蚀性溶液的能力^[1]。

抽锭式电渣重熔, 其显著工艺特点是熔化速度快, 生产效率高, 但相比固定式电渣重熔, 抽锭式电渣重熔要求渣系具有较好的塑性和强度, 能够在较高的抽锭速度下, 渣皮不被拉破而出现漏渣、漏钢现象。

1 Incoloy825 电极制备

洛阳双瑞特种装备有限公司 Incoloy825 合金抽锭电渣重熔用电极采用“3 t 中频炉 + 3 t AOD”工艺

冶炼, 电极规格 (mm) 为 160 × 320 × 2 900, 每炉 2 支, 总重约 2 400 kg, 共 2 炉。

每次电渣重熔试验需 2 支电极, 试验分两次进行, 共 4 支电极, 为保证两次试验电极成分一致, 对 2 炉次的电极进行了交叉合炉, 合炉后电极化学成分如表 1 所示。

2 方坯抽锭电渣重熔试验

2.1 试验设备

Incoloy825 合金方坯截面尺寸为 280 mm × 325 mm, 单支长度约 3 200 mm, 抽锭电渣重熔试验在

表 1 Incoloy825 合金电极化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of electrode of Incoloy825 alloy / %

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Al	O	N	H
ASTM SB564	≤ 0.05	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 0.030	-	19.5 ~ 23.5	38.0 ~ 46.0	2.5 ~ 3.0	1.5 ~ 3.0	0.6 ~ 1.2	≤ 0.200	-	-	-
电极	0.01	0.21	0.41	0.007	0.019	22.33	39.08	3.04	2.14	1.17	0.173	0.006 0	0.007 2	0.000 34

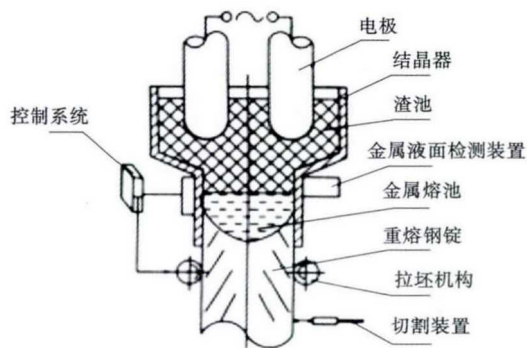


图 1 ESCC600 抽锭式电渣重熔炉示意图
Fig. 1 Schematics of ESCC600 withdrawing ESR unit

“ESCC600 抽锭式电渣炉”上进行,如图 1 所示。

2.2 抽锭电渣重熔渣系

2.2.1 抽锭电渣重熔渣系设计原则

(1)熔点。为了保证铸锭成形,渣的熔点应低于重熔金属熔点 100~200℃。另外,渣系的成分的设计应参照相图,熔渣成分力求选在低熔共晶点附近,这样可以减少渣皮凝固时的液析现象,防止渣皮成分变化及渣皮过厚^[2]。

(2)光学碱度。为了保证良好的脱硫效果,光学碱度不应低于 ANF-6 渣的光学碱度 0.665。

(3)粘度。电渣连铸渣系应具有适当低的粘度及良好的粘度稳定性,渣在一定温度范围内保持流动,可活动薄渣皮,因此可获得好的表面质量,更适合于电渣连铸生产^[3]。

(4)电导率。在保证其他物性参数的前提下,尽量采用低电导率的渣系,能降低电耗。渣系各组分中 CaF₂ 对电导率影响最大,应选择低 CaF₂ 的渣系。

(5)渣中氧化物的稳定性。许多实验证明,在不考虑渣中 CaF₂ 影响前提下,由稳定性低的氧化物组成的渣系重熔钢中氧含量高,而由稳定性高的氧化物组成的渣系重熔钢中氧含量低。

2.2.2 抽锭电渣重熔渣系选择

电渣重熔含 Ti 钢时通常需在渣中配入适量的 TiO₂ 来抑制 Ti 的烧损,同时加入少量的 MgO 能在液态渣池表面形成半凝固膜,防止渣池中的变价氧化物向金属熔池传递供氧^[4],从而减轻 Ti 元素烧损。

此外,对于抽锭电渣重熔而言,钢锭和结晶器做相互运动,渣皮在两者之间受到拉应力,如果

渣皮粘度高、塑性较差,就很容易被拉破,从而导致漏渣、漏钢,恶化钢锭表面质量。

在加入适量 Al₂O₃ 和 MgO 后,渣中存在高硬度、高熔点矿相,在高温下不变形,可在渣中起强化作用。渣中含有适量的 SiO₂,可形成低熔点的玻璃相,当熔渣凝固时抑制其它矿相的生成长大,并使固态渣的高温塑性增大^[5,6],但对于含 Ti 钢,加入 SiO₂ 会加剧 Ti 元素烧损。基于以上考虑,设计了 SiO₂ 含量不同的两种试验渣系 S1 和 S2,其熔点及光学碱度如表 2 所示,其中 ANF-6 为对比渣系。

图 2(a)给出了两种试验渣系的电导率,可以看出,S2 渣系的电导率要比 S1 要低,有利于降低电耗,但渣池发热量大,不利于轴向结晶,同时也会加剧 Ti 元素烧损。

图 2(b)给出了不同温度下两种试验渣系的粘度测量数据,可以看出,S2 渣系的粘度比 S1 渣系要低,而且随温度变化要比 S1 渣系平缓,属于比较理想的酸性渣,渣皮塑性好,抽锭过程中渣皮不易被拉破,有利于形成薄且均匀的渣皮,改善钢锭表面质量。

2.3 方坯抽锭电渣重熔试验过程

2.3.1 试验前准备

试验前,将渣料在 800℃ 下烘烤 8 h,之后在化渣炉内化渣,化渣完毕加入 1 kg 铝粒进行预脱氧,然后通过专门的加料斗倒入结晶器内,开始电渣。

表 2 试验渣系成分,熔点和碱度

Table 2 Ingredient, melting point and basicity of tested slag series

渣系	渣系成分 / %						熔点 / °C	光学碱度
	CaF ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂		
S1	51	20	3	20	3	3	1 290	0.729
S2	57	15	5	15	5	3	1 260	0.709
ANF-6	70	0	0	30	0	0	1 403	0.665

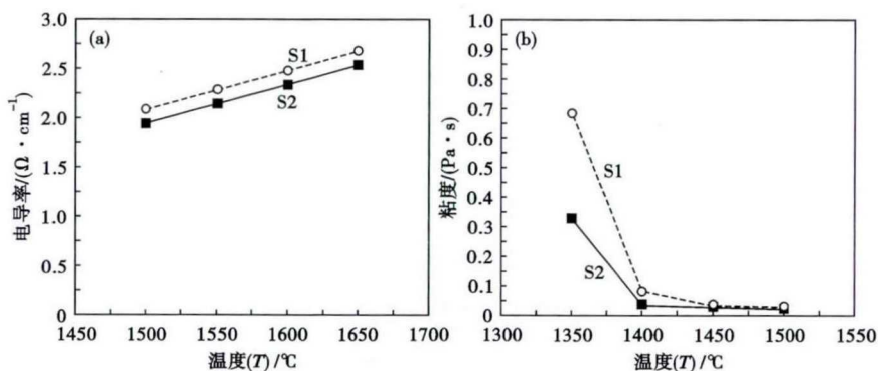


图 2 温度对 S1 和 S2 试验渣系的电导率(a)和粘度(b)的影响

Fig. 2 Effect of temperature on conductivity (a) and viscosity (b) of tested slag series S1 and S2

2.3.2 电极熔化速度

抽锭式电渣重熔由于采用 T 型结晶器设计,利用大电极生产小钢锭,因而熔速比固定式电渣重熔要高,结晶器等效直径 $D_{\text{结}} = 340 \text{ mm}$,熔速 $V_{\text{熔}}$ 可达 $2 \sim 3 D_{\text{结}}$,而固定式电渣重熔速 $V_{\text{熔}}$ 通常不超过 $D_{\text{结}}$,本试验设定二次电压 $85 \sim 87 \text{ V}$,二次电流 $8 \sim 9 \text{ kA}$ 。

对于抽锭式电渣重熔而言,渣皮较薄且厚度比较均匀的情况下,有利于形成良好的表面质量。熔速越高,渣皮越薄,而对于渣系本身而言,渣皮厚度主要与熔渣过热度(渣池温度与熔渣熔点之差)有关,熔渣过热度越大,渣皮越薄。

考虑到 S2 渣系熔点比 S1 渣系低,同时 S2 渣系 SiO_2 含量较高,会加剧 Ti 元素烧损,因此采用 S2 渣系进行电渣重熔时的熔速比 S1 渣系适当降低,这有利于提高钢锭表面质量并减少 Ti 元素烧损,两次试验的电极熔化速度如下表 3 所示。

表 3 采用 S1 和 S2 渣系时 Incoloy825 合金电极熔化速度
Table 3 Melting rate of electrode of Incoloy825 alloy with using S1 and S2 slag series

试验渣系	$V_{\text{熔}}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	$V_{\text{熔}}/D_{\text{结}}$
S1	750	2.2
S2	680	2.0

表 4 Incoloy825 合金 ESR 方坯化学成分 / %
Table 4 Chemical composition of ESR bloom of Incoloy825 alloy / %

渣系	抽出长度/mm	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	O	N	H
S1	300	-	0.37	-	-	-	-	-	-	-	0.16	0.80	-	-	-
	1 500	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.92	-	-	-
	3 000	<0.01	0.21	0.40	<0.005	0.024	22.50	39.13	3.05	2.14	0.18	1.10	0.004 2	0.008 3	0.000 56
S2	300	-	0.42	-	-	-	-	-	-	-	0.13	0.74	-	-	-
	1 500	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	0.15	0.96	-	-	-
	3 000	<0.01	0.23	0.40	<0.005	0.023	22.48	39.10	3.07	2.15	0.15	1.00	0.004 7	0.007 8	0.000 45

可以看出,方坯表面质量整体较差,而且随着电渣重熔进行,表面质量不断恶化,电渣后期方坯表面挂渣严重,这说明一方面 S1 渣系粘度不断增大,钢渣不易分离,另一方面渣皮的塑性变差,抽锭过程中渣皮很容易被拉破。

采用 S2 渣系电渣重熔后,Incoloy825 合金方坯的表面质量情况如图 3(a_2, b_2, c_2) 所示。

由图 3(a_2, b_2, c_2) 可以看出,电渣前期和中期方面表面质量较好,方坯表面无挂渣现象,但是电渣后期方坯表面质量开始变差,可解释为重熔前期渣系的熔点、粘度较低,而到重熔后期渣的成分发生了变

2.3.3 脱氧剂加入量及加入方式

电渣重熔过程中为抑制 Ti 元素的烧损,通过加料斗向渣池表面不断加铝粒,对熔渣进行扩散脱氧,能起到烧铝保钛作用。采用 S1 渣系时,在电渣过程中按照 $8 \text{ g}/3 \text{ min}$ 的速度添加铝粒,共加铝粒约 560 g ,折合 $0.24 \text{ kg}/\text{t}$ 。采用 S2 渣系时, SiO_2 含量增加会加剧 Ti 元素烧损,因而在电渣时增加了铝粒的加入量,电渣过程中用加料机按照 $8 \text{ g}/3 \text{ min}$ 加入铝粒,并每隔 10 min 人工补加 30 g 铝粒,共加铝粒约 1 kg ,折合 $0.43 \text{ kg}/\text{t}$ 。

3 试验结果分析

3.1 方坯化学成分

抽锭电渣重熔试验结束后,按照从方坯底部的抽出长度,在 Incoloy825 合金方坯的顶部(冒口端)、中部和底部(冷铁端)分别取样进行化学分析,分析结果见下表 4。可以看出,采用 S1 和 S2 渣系分别进行电渣重熔,Ti 元素含量均在合格范围。

3.2 方坯表面质量

采用 S1 渣系进行抽锭电渣重熔试验后,Incoloy825 合金方坯的表面质量情况见如图 3(a_1, b_1, c_1) 所示。

化,渣中 SiO_2 与钢中的 Al、Ti 发生反应,导致渣中 SiO_2 不断减少,由酸性渣变为碱性渣,同时 TiO_2 不断增加,渣的粘度上升,钢渣不易分离,所以出现了粘渣现象。为了避免后期表面质量恶化,可在电渣重熔过程中补加一定含量的 SiO_2 。

3.3 方坯内部结晶组织

电渣重熔凝固方式为自下而上的定向结晶,电极熔化速度越慢,金属熔池深度越浅,晶体生长方向与轴向的夹角越小,结晶越趋于轴向,枝晶间偏析现象就越小,有利于提高电渣锭的热加工性能。

图 4 给出了两次试验 Incoloy825 方坯内部结晶

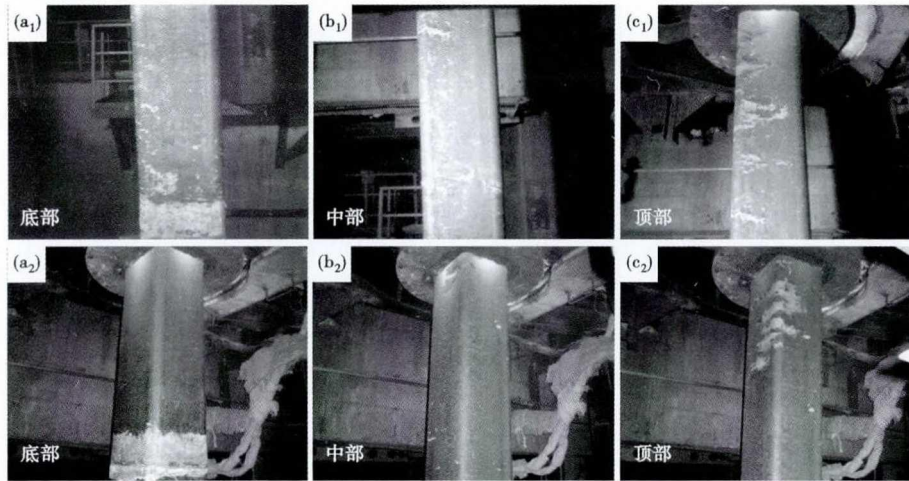


图 3 采用 S1 渣系(a₁)(b₁)(c₁)和 S2 渣系(a₂)(b₂)(c₂)电渣重熔时 Incoloy825 合金方坯抽锭表面质量:重熔坯底部(a₁)(a₂),中部(b₁)(b₂),顶部(c₁)(c₂)

Fig.3 Surface quality of ESR withdrawing bloom of Incoloy825 alloy by using S1 slag series (a₁)(b₁) and (c₁) and S2 slag series (a₂)(b₂) and (c₂): ESR bloom bottom (a₁) and (a₂); middle (b₁) and (b₂), and top (c₁) and (c₂)

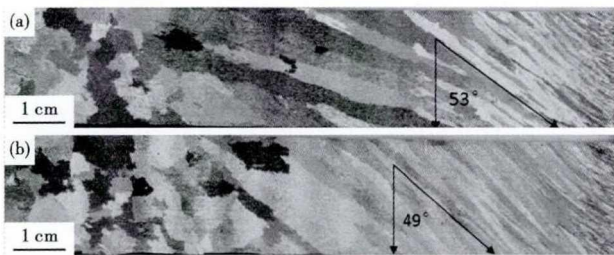


图 4 S1 渣系(a)和 S2 渣系(b) ESR 抽锭方坯结晶组织形貌
Fig.4 Morphology of crystal structure of ESR withdrawing bloom by using S1 slag series (a) and S2 slag series (b)

组织的照片,从图 4 可以看出,方坯外侧为柱状晶区,中心部位为等轴晶区,采用 S1 渣系试验时,柱状晶与轴向夹角为 53°,采用 S2 渣系试验时,柱状晶与轴向夹角为 49°,这与熔速越低、轴向夹角越小的规律一致。

4 结论

(1) Incoloy825 方坯抽锭电渣重熔采用渣系 S2 (57% CaF₂-15% CaO-5% MgO-15% Al₂O₃-5% SiO₂-3% TiO₂),能够有效抑制 Ti 元素烧损,并且方坯

表面质量良好。

(2) S2 渣系具有适宜的熔点(1260 °C)和粘度(T=1500 °C时粘度 0.036 Pa·s),能够提高渣皮塑性,通过采用适宜熔速(650~700 kg/h),抽锭方坯表面质量良好。

(3) 随着电渣重熔进行,渣中的 SiO₂ 含量不断减少,渣皮塑性降低,在电渣后期又会导致方坯表面质量恶化,考虑可在电渣重熔后期补加一定含量的 SiO₂。

(4) 渣中 SiO₂ 含量越高,Ti 元素的烧损就越剧烈,为了抑制 Ti 元素烧损,

需加大电渣重熔过程中脱氧剂铝的加入量。

河南省科技创新项目资助(MK111001)

参考文献

[1] HS-1086 FEB93. Metals and Alloys in the Unified Nubering System [S]. 1993.
 [2] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:121.
 [3] 刘福斌,臧喜民,姜周华,等. 电渣连铸锭表明质量的影响因素. 特殊钢[J]. 2009,30(3):22-24.
 [4] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:127.
 [5] 梁连科. 冶金热力学及动力学[M]. 沈阳:东北工学院出版社, 1990:176-182.
 [6] 于仁波,张祖贤,毛裕文. CaF₂-CaO-MgO- Al₂O₃-SiO₂ 电渣渣系高温力学性能的研究[J]. 钢铁研究学报,1991,3(1):17-23.

陈帅超(1986-),男,硕士(2012年东北大学),工程师,2010年太原科技大学(本科)毕业,特种钢品种开发。
E-mail:cschen1986@163.com

收稿日期:2017-06-19