

## 70CaF<sub>2</sub>-30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系重熔参数控制对电渣锭下部表面质量的影响

柯超

(湖北新冶钢有限公司炼钢事业部,黄石 435001)

**摘要** 根据双臂电渣炉冶炼的521钢(∕%:0.37~0.45C,0.80~1.15Si,4.50~5.30Cr,1.20~1.40Mo,0.85~1.10V)和GCr15钢(∕%:0.97C,1.57Cr)电渣锭下部出现的表面缺陷,统计分析了70CaF<sub>2</sub>-30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>二元渣量、下部冶炼电压和电流以及重熔时间对2.5~5 t电渣锭表面质量的影响。结果表明,控制重熔时间(重熔速率)对电渣锭的表面质量有较大影响;5 t 521钢锭渣量200 kg,钢锭下部重熔电压55 V,电流15 500~16 800 A,总重熔时间为434~489 min时,钢锭表面光滑,总重熔时间500 min时,电渣锭下部有厚15 mm的渣疤;2.5 t GCr15钢锭渣量120 kg,下部重熔电压43~44 V,电流13 500~14 000 A,总重熔时间316~359 min,钢锭表面光滑,总重熔时间380 min,电渣锭下部有7 mm深渣沟和夹渣。

**关键词** 2.5~5 t电渣锭 521钢 GCr15钢 重熔时间 表面质量

## Effect of Remelting Parameters Control with 70CaF<sub>2</sub>-30Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Slag Series on Surface Quality of Lower Part of ESR Ingot

Ke Chao

(Steelmaking Division, Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

**Abstract** According to the surface defect occurred at lower part of ESR ingot of 521 steel (∕%: 0.37~0.45C, 0.80~1.15Si, 4.50~5.30Cr, 1.20~1.40Mo, 0.85~1.10V) and GCr15 steel (∕%: 0.97C, 1.57Cr) melted by ESR furnace with double electrode, the effect of binary slag amount, lower part remelting voltage and current as well as remelting time on surface quality of 2.5~5 t ESR ingot has been statistically analyzed. Results show that control remelting time (remelting rate) has obvious effect on surface quality of ESR ingot; for 5 t 521 steel remelting ingot, with slag amount 200 kg, voltage 55 V and current 15 500~16 800 A in melting at ingot lower part, as total remelting time is 434~489 min, the ingot surface is smooth, while the total remelting time is 500 min, there is 15 mm depth slag scar at ESR ingot lower part; for 2.5 t GCr15 steel remelting ingot, with slag amount 120 kg, voltage 43~44 V and current 13 500~14 000 A in melting at ingot lower part, as the total remelting time is 316~359 min, the surface of ingot is smooth while the total remelting time is 380 min, the ESR ingot lower part has 7 mm depth slag runner and slag inclusion.

**Material Index** 2.5~5 t ESR Ingot, 521 Steel, GCr15 Steel, Remelting Time, Surface Quality

### 1 表面缺陷锭的电渣工艺参数

湖北新冶钢有限公司电渣车间是我国最早投产的大规模工业电渣车间之一<sup>[1]</sup>,目前拥有各类电渣炉19台(14台常规电渣炉,5台气体保护电渣炉),电渣钢的生产量为4万t/a。在实际生产中,钢锭表面出现缺陷的状况时有发生,作者在工作中统计了2013年7月至9月钢锭表面缺陷的位置都在钢锭的下部,并且所用的电渣渣料都是二元渣(成分为70%CaF<sub>2</sub>加上30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)。试验方法和过程<sup>[2]</sup>见图1,试验钢种的化学成分见表1,试验设备和工艺参数见表2。

下部冶炼电压、下部冶炼电流和钢锭熔炼时间等工艺参数的选择方法是:(1)在冶炼过程中炉口电压(即冶炼电压,又称有效工作电压)是逐步升高的,第1个炉口压才是使电渣锭下部(最先冶炼部分)产生表面缺陷的电压;(2)表2钢锭下部冶炼电

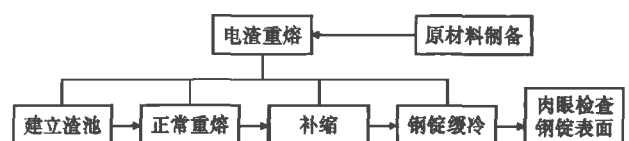


图1 521钢和GCr15钢电渣重熔过程简图

Fig. 1 Schematic drawing of electroslag remelting (ESR) process for 521 steel and GCr15 steel

压是新冶钢工艺规程中的第1个炉口压;从冶炼原始记录分析,冶炼电流是不断下降的,下部冶炼电流最大,因此看下部冶炼电流是否规范,是和工艺规程中的最大电流的规定范围比较;(3)同一批电渣钢锭(同炉台生产、同钢种、同锭型),并且母材长度相同,自耗电电极的余长相差无几(母材长2 000~3 000 mm,余长50~60 mm),在工艺上用熔炼时间来代替熔速是合理的。

### 2 电渣锭表面缺陷形成原因分析

#### 2.1 电渣重熔工艺特点

电渣使用的预熔渣的熔点一般为1 250 ℃左右,电极接触预熔渣并通电加热之后,电极主要是由碳质材料制作而成,熔点达3 800 ℃,因此预熔渣最先熔化成液态渣池。高温高碱度的熔渣盛放在铜制水冷结晶器里面,

表1 试验电渣钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test ESR steels /%

钢种	类别	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	V	Al
521	电炉模铸母材	0.38	1.06	0.37	5.02	1.28	0.016	0.005	0.97	0.041
	电渣锭	0.37 ~ 0.45	0.80 ~ 1.15	0.15 ~ 0.50	4.50 ~ 5.30	1.20 ~ 1.40	≤ 0.020	≤ 0.010	0.85 ~ 1.10	-
GCr15	电炉模铸母材	1.00	0.26	0.36	1.52	0.01	0.008	0.005	0.01	0.033
	电渣锭	0.97	0.23	0.32	1.57	0.01	0.008	0.005	0.01	0.022

表2 电渣炉设备、工艺参数和电渣锭缺陷形式

Table 2 Equipment and process parameters of ESR furnace and ESR ingot defect type

钢种	设备	充填比	渣量/kg		下部冶炼电压/V		下部冶炼电流/A		钢锭熔炼时间/min		缺陷形式
			规定范围	实际使用量	规定范围	实际使用值	规定范围	实际使用值	规定范围	实际值	
521	5 t 双臂电渣炉	0.5	180 ~ 220	200	50 ~ 55	55	15 500 ~ 17 000	16 000	380 ~ 510	500	大头有渣疤,厚 15 mm
GCr15	5 t 双臂电渣炉	0.53	120 ~ 140	120	40 ~ 45	44	13 000 ~ 14 500	14 000	300 ~ 375	380	大头有渣沟,渣沟上粘附夹渣 7 mm

注:70% CaF<sub>2</sub>-30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 渣系

渣池化好后把电极更换为自耗电电极,自耗电电极的熔点一般高于预熔渣的熔点 100 ~ 200 ℃,将其一端插入熔渣,开始接触渣池的这一端最终熔铸成钢锭的下部。

在金属熔滴穿越渣池的同时,最靠近水冷结晶器壁的液态渣池迅速地被通水的铜制水冷结晶器所冷却,很快地变成一层渣壳。渣壳的成分主要为 CaF<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等,热导率<sup>[3]</sup>比底水箱材质低,仿佛是保温隔热层。金属熔池的热量大部分是自上往下从底水箱传导,最靠近底水箱的液态金属最先凝固,然后上层的金属接着凝固<sup>[4]</sup>。并且在凝固过程中,金属熔池呈“球冠状”。渣壳还能使经过电渣重熔的铸锭表面变得平滑和光洁。

选用的二元渣成分为 70% CaF<sub>2</sub> 和 30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。与三元渣相比,CaF<sub>2</sub> 所占百分比小,所以渣系的粘度要高一些,导热系数也更小,不利于渣金之间换热。

金属熔池的上部分是圆柱状。当金属熔池向上移动时,过热的金属熔池的圆柱状部分熔化紧贴着渣壳,密度比金属熔池小的液态渣壳被挤入上层的液态渣池。包裹钢锭的渣壳的厚度变得很薄,钢锭表面因此变得光滑。

如果金属熔池的上部没有圆柱状,由于水冷结晶器的强制水冷,会导致金属熔池靠近水冷结晶器内壁的部分已经凝固。那么金属熔池在上升的过程中,所能熔化的渣壳的厚度有限,导致紧贴着结晶器壁的渣壳的厚度比有圆柱状的情况厚很多。重熔过

程中,输入金属熔池的功率使金属熔池发出热量,会重新将紧靠金属熔池的部分渣壳熔化。由于渣系选用的是二元渣,具有更高的粘度,当预熔渣熔化为液态时,在金属熔池的侧压力的作用下,会粘住靠近水冷结晶器的固态渣壳,同时渣系的导热系数更小,不利于渣金之间的换热,会保持较浅的熔池圆柱段。没有圆柱状的金属熔池冷凝成固态钢锭之后,表面会出现表面缺陷。

电渣重熔的钢锭的形状实际上是下大上小型的。越处在结晶器的上部,圆柱状金属熔池越大;而越处在结晶器的下部,圆柱状金属熔池越小。如果钢锭的高度( $H$ ) ≤ 临界高度( $H_c$ ),则钢锭表面会出现表面缺陷,如果  $H > H_c$ ,则钢锭表面不会出现表面缺陷<sup>[5]</sup>。同时,熔化速度过快,金属熔池深度也会过深。而金属熔池形状对表面缺陷的形成具有密切的影响。

根据表2数据可得:(1)521 钢锭重熔过程中,下部冶炼电压的实际使用值达到了规定的最大值;冶炼时间的实际值,接近于规定的最大值。(2)GCr15 钢锭在重熔过程中,渣量的实际用量达到了规定的最小量;下部冶炼电压的实际值,接近规定的最大值;冶炼时间的实际值,超过了规定的最大值。

## 2.2 工艺参数的控制对下部表面缺陷的影响

由表3分析可知,521 钢同一批全部电渣锭的工艺参数方面,二元渣渣量和电渣锭下部冶炼电压完全相同(都在规定范围之内,规定二元渣渣量为

表 3 521 钢 5 t 电渣重熔的工艺参数对电渣锭表面质量的影响

Table 3 Effect of remelting parameters on surface quality of 5 t ESR ingot of 521 steel

电渣锭子炉号	下部冶炼		表面质量	熔炼时间/min
	电压/V	电流/A		
38-0391	55	16 500	平滑光洁	458
38-0392	55	16 500 ~ 16 800	平滑光洁	488
38-0393	55	16 000 ~ 16 500	平滑光洁	485
38-0394	55	16 500	平滑光洁	475
38-0395	55	16 300	平滑光洁	434
38-0396	55	15 500 ~ 16 500	平滑光洁	443
38-0397	55	15 500 ~ 16 500	大头有渣疤,厚 15 mm	500
38-0398	55	16 000 ~ 16 500	平滑光洁	489

注:重熔充填比 0.5;二元渣(70% CaF<sub>2</sub>-30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)量 200 kg。下部冶炼电压值(冶炼初期炉口电压值)对应于下部表面缺陷的炉口电压值。

表 4 GCr15 钢 2.5 t 电渣重熔的工艺参数对电渣锭表面质量的影响

Table 4 Effect of remelting parameters on surface quality of 2.5 t ESR ingot of GCr15 steel

电渣锭子炉号	下部冶炼		表面质量	熔炼时间/min
	电压/V	电流/A		
38-0455	44	14 000	平滑光洁	346
38-0456	43 ~ 44	13 500 ~ 14 000	大头有渣沟,渣沟上粘附夹渣,厚 7 mm	380
38-0457	44	13 700 ~ 14 000	平滑光洁	333
38-0458	44	14 000	平滑光洁	338
38-0459	43 ~ 44	13 500 ~ 14 000	平滑光洁	359
38-0460	44	13 700 ~ 14 000	平滑光洁	328
38-0461	44	14 000	平滑光洁	326
38-0462	44	14 000	平滑光洁	316
38-0463	44	14 000	平滑光洁	326

注:重熔充填比 0.53,二元渣(70% CaF<sub>2</sub>-30% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)量 120 kg。

180 ~ 220 kg,规定下部冶炼电压为 50 ~ 55 V),不同的工艺参数就是电渣锭下部冶炼电流(规定为 15 500 ~ 17 000 A)和熔炼时间(规定为 380 ~ 510 min)。出现表面缺陷的电渣锭的下部冶炼电流为 15 500 ~ 16 500 A,熔炼时间在这批电渣锭中最长,为 500 min。而另外一支钢锭,下部冶炼电流也为 15 500 ~ 16 500 A,其他符合规定,表面质量平滑光洁。可见,如果电渣锭下部冶炼电流为 15 500 ~ 16 500 A 的同时熔炼时间达到 500 min,电渣锭的下部会出现表面渣疤,渣疤厚 15 mm。所以对 521 电渣锭表面缺陷有影响的不是下部冶炼电流,而是电渣锭熔炼时间。

由表 4 可知,GCr15 同一批全部电渣锭的工艺参数方面,渣量完全相同(规定渣量为 120 ~ 140 kg),下部冶炼电流(13 000 A 左右和 14 000 A 左右)与表面良好和表面缺陷没有对应关系,工艺参数的差别主要是在下部冶炼电压(规定 40 ~ 45 V)和熔炼时间(规定为 300 ~ 375 min)上。当电渣锭

下部冶炼电压达到 43 ~ 44 V(符合规定),并且熔炼时间很长(达到 380 min,超过规定值)时,电渣锭的大头会出现渣沟,夹渣上粘附夹渣,厚 7 mm。假如下部冶炼电压稍小,但是熔炼时间不是很长,电渣锭表面不会出现渣疤,例如电渣锭子炉号为 38-0459。通过以上分析可知,对 GCr15 电渣锭表面缺陷有影响的不是下部冶炼电压,而是电渣锭熔炼时间超过规定值。

根据以上的生产统计表明,工艺改进的冶金效果为:(1)5 t 锭型、0.50 充填比的 521 钢种,电渣锭子炉号为 38-0391 ~ 0396 和 38-0398 的电渣钢锭若使用改进工艺:下部冶炼电压选择 55 V、下部冶炼电流选择 16 000 ~ 16 500 A、熔炼时间选择 434 ~ 489 min,将获得平滑光洁的表面质量;(2)2.5 t 锭型、0.53 充填比的 GCr15 钢种,电渣锭子炉号为 38-0455 和 38-0457 ~ 0463 的电渣钢锭若使用改进工艺:下部冶炼电压选择 44 V、下部冶炼电流选择 13 500 ~ 14 000 A、熔炼时间选择 316 ~ 359 min,将获得平滑光洁的表面质量。

### 3 结论

(1)对于 5 t 锭型的 521 钢种,冶炼充填比为 0.50 时,若熔炼时间达到 500 min(规定范围是 380 ~ 510 min),电渣锭的下部会出现表面缺陷。

(2)对于 2.5 t 的 GCr15 钢种,冶炼充填比为 0.53 时,只有电渣锭熔炼速度很慢(熔炼时间达 380 min)时,电渣锭的下部才会出现表面缺陷。在实际生产中,应严格遵守操作工艺的要求,保证渣量、下部冶炼电压、下部冶炼电流、电渣锭熔炼时间均在工艺要求之内,确保 GCr15 电渣锭拥有平滑光洁的表面质量。

### 参考文献

- [1] 李正邦. 电渣冶金在中国的发展[A]. 青岛:中国金属学会第二届全国会议文集[C]. 1963:116-118.
- [2] 武汉科技大学. 合金钢冶炼[M]. 武汉:武汉科技大学出版社, 2006:37.
- [3] 宋小龙,安继儒. 新编中外金属材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2007:19.
- [4] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:17,79.
- [5] 姜周华. 电渣重熔理论与应用[A]. 北京:钢铁冶金研究所, 2006:75-77.

柯超(1985-),男,硕士(武汉科技大学),2008年武汉科技大学(本科)毕业,特种钢熔炼技术研究。

E-mail:kechaos1985@126.com