

## 电渣重熔渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响

肖爱平<sup>1</sup>, 张 洲<sup>1</sup>, 李德胜<sup>1</sup>, 汪质刚<sup>1</sup>, 董艳伍<sup>2</sup>

(1 大冶特殊钢有限公司技术中心, 黄石 435001; 2 东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

**摘 要:**针对目前在电渣重熔(ESR)GCr15 轴承钢 D 类夹杂物超标问题,设计不同渣系,并分别借助 Factsage 软件和经验公式计算了渣系的熔化特性、黏度、电导率等物性参数,采用实验室渣金平衡实验及现场 2.5 t 电渣重熔实验分析得出:最优 ESR 渣系为 55CaF<sub>2</sub>-25Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15CaO-5MgO。使用新渣系平均全氧含量较传统渣系降低 41.98%,并且能够降低电渣锭不同位置的全氧含量;对于 1~5 μm 夹杂物个数较原始渣系下降了 31.25%。通过渣系对夹杂物调控,改善了 GCr15 轴承钢中 D 类夹杂物,评级级别可达到 0.5 级,能够更好地“净化”电渣锭。

**关键词:**轴承钢;GCr15;电渣重熔;渣系;洁净度

## Influence of ESR Slag on Cleanness of GCr15 Bearing Steel

Xiao Aiping<sup>1</sup>, Zhang Zhou<sup>1</sup>, Li Desheng<sup>1</sup>, Wang Zhigang<sup>1</sup>, DongYanwu<sup>2</sup>

(1 Technology Center, Daye Special Steel Corp., Ltd., Huangshi 435001;

2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819)

**Abstract:** In accordance with the current in electroslag remelting (ESR) GCr15 bearing steel D inclusions exceeding the standard problem, the different slag systems are designed, and respectively with the help of Factsage software and empirical formulae to calculate the melting characteristics of the slag system, viscosity, electrical conductivity and other physical parameters, using laboratory slag metal balance experiments and field 2.5 t electroslag remelting experiments, the results show that, the optimal ESR slag system is 55CaF<sub>2</sub>-25Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15CaO-5MgO. With use of the optimal slag system the average total oxygen content in steel is 41.98% lower than that with the traditional slag system, and can reduce the change in the total oxygen content of steel in different locations of electroslag ingot; as compared to the original slag system the number of 1-5 μm inclusions decreases by 31.25%. Through the slag system on inclusions control, it can improve class D inclusion in GCr15 bearing steel, rating level reaches 0.5, and can better “clean” electric slag ingot.

**Key Words:** Bearing Steel; GCr15; ESR; Slag; Cleanness

采用电渣重熔工艺生产的轴承钢具有高而均匀的硬度、耐磨性及长的疲劳寿命<sup>[1-3]</sup>。电渣重熔是在电极熔化末端熔滴形成和下落,渣池与金属熔池界面上熔渣与金属液之间发生系列物理化学反应,从而对钢的成分变化和夹杂物的组分产生一定的对应关系<sup>[4-7]</sup>。炉渣成分及物理化学性质对渣-金之间的各种物理化学反应起决定性作用。

目前电渣重熔 GCr15 轴承钢采用传统二元渣系生产,存在个别炉次 D 类夹杂物超标的问题。本研究设计了不同的渣系,并计算了渣系的物性参数(熔化特性、黏度、电导率、碱度等),采用实验室小型渣-金平衡实验和现场大型实验相结合的方式,研究了电渣重熔新渣系对 GCr15 轴承钢洁净度的影响。

### 1 渣系成分设计

针对目前电渣重熔生产 GCr15 轴承钢,出现个

别炉次 D 类夹杂物超标的问题,设计了 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣系取代传统二元渣系。借助 FactSage 和经验公式计算了渣系的物性参数,首先采用渣金平衡实验研究了不同渣系对氧含量的影响,然后通过现场实验进一步验证。

针对特钢企业生产现场采用二元渣系重熔 GCr15 轴承钢时存在的 D 类夹杂物超标问题,结合已有研究,拟采用四元渣系进行实验。为提高碱度并减少球状氧化物的形成,实验渣系增加 MgO 和 CaO 的组分。实验渣系的具体成分见表 1,实验室

表 1 实验电渣重熔渣系成分/%

Table 1 Composition of experimental ESR slags/%

实验渣系	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	备注
S <sub>0</sub>	70	30	-	-	现场渣系
S <sub>1</sub>	65	15	15	5	新渣系
S <sub>2</sub>	55	25	15	5	新渣系

表 2 实验 GCr15 钢自耗电极化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of experimental GCr15 steel consumable electrode/%

C	Si	Mn	P	Cr	S	Al	Ca	Ti	O
1.00	0.26	0.30	0.008	1.49	0.003	0.027	0.00025	0.002 5	0.000 68

分析与现场试验用原始轴承钢的化学成分见表 2。

### 2 渣系物性参数

在电渣重熔及凝固过程中,炉渣与钢液相互接触,炉渣的物性参数<sup>[8]</sup>对非金属夹杂物的去除、渣金反应速率及分离效果、重熔过程的稳定性等至关重要,要求炉渣在高温下具有适当液相分率、黏度、电导率及碱度。为了解设计渣系的物性参数,采用 FactSage 软件分别计算了炉渣在不同温度下熔化的液相分率和黏度值,计算结果分别如图 1 和图 2 所示。按照荻野和已<sup>[9]</sup>和中村崇<sup>[5]</sup>总结的经验公式(1)和(2)计算了各渣系的电导率和光学碱度,计算结果见表 3。

$$\kappa = 100 \exp(1.911 - 1.38x_x - 5.69x_x^2) + 0.39 \quad (1)$$

$$(T - 1972)$$

式中:  $x_x = x(\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.2x(\text{CaO}) + 0.8x(\text{MgO}) + 0.75x(\text{SiO}_2) + 0.5x(\text{TiO}_2) + x(\text{ZrO}_2)$

$$x(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0 \sim 0.5, x(\text{CaO}) = 0 \sim 0.65$$

$$x(\text{MgO}) = 0 \sim 0.1, x(\text{SiO}_2) = 0 \sim 0.17$$

$$x(\text{TiO}_2) = 0 \sim 0.18, x(\text{ZrO}_2) = 0 \sim 0.15$$

$\kappa$  为熔渣的电导率,  $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $T$  为温度, K; 适用范围 1 823 ~ 2 053 K。

$$\Lambda = \sum \Lambda_i X_i \quad (2)$$

式中:  $X_i = (V_i/2) \cdot n_i \cdot N_i / \sum [(V_i/2) \cdot n_i \cdot N_i]$ ;  $V_i$  为  $i$  组元的阴离子电荷数;  $n_i$  为  $i$  组元的阴离子数;  $N_i$  为  $i$  组元的 mol 数;  $\Lambda_i$  为  $i$  组元的光学碱度值。

熔融渣池是电渣重熔工艺的核心部分,它在金属的熔化、精炼、凝固过程中起着极为重要的作用。为了满足技术经济指标的要求,对熔点、黏度、电导率、碱度等各项物理化学性质要综合考虑,才能选出合理的渣型。GCr15 轴承钢的熔点为 1 450 °C 左右,从渣金分离的角度考虑,新设计  $S_1$  与  $S_2$  渣系在 1 325 °C 下的液相分率 > 90%。熔渣在高温下需要

有适当的黏度,保证良好的对流,且黏度值随温度变化越小越好。设计渣系在温度 > 1 575 °C,黏度低于 0.025 Pa · s,黏度区域平稳,其中  $S_1$  渣系的黏度较  $S_0$  与  $S_2$  渣系更低,且黏度随温度的变化更加平稳。适宜的电导率使熔渣产生足够的热量,保证金属熔化、过热及精炼的进行,并提高电渣重熔的电效率,降低电耗。设计渣系电导率 <  $4\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,符合生产要求。

### 3 实验内容

#### 3.1 实验室渣金平衡实验及分析

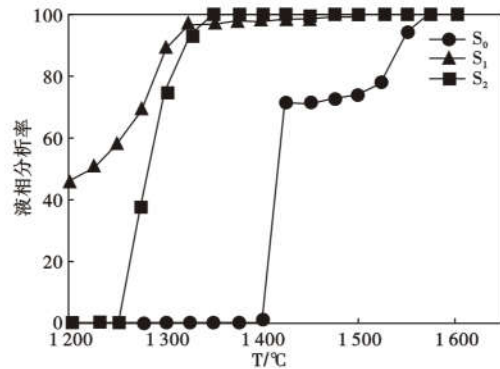


图 1 ESR 渣系熔化过程的液相分率

Fig. 1 Liquid phase fraction of ESR slags during melting

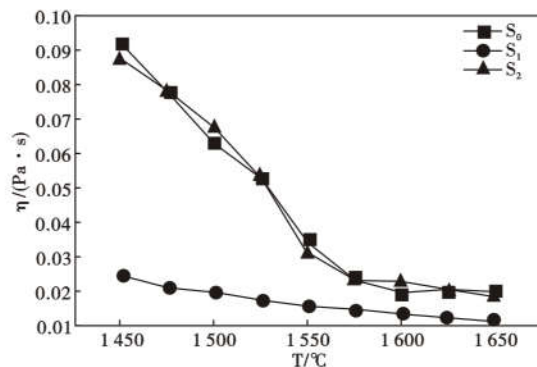


图 2 ESR 渣系的黏度与温度关系

Fig. 2 Relationship between viscosity and temperature of ESR slags

表 3 电渣重熔渣系的电导率及光学碱度  
Table 3 Conductivity and optical basicity of ESR slags

实验渣系	电导率/( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )	光学碱度( $\Lambda$ )
$S_0$	3.01	0.66
$S_1$	3.84	0.74
$S_2$	2.07	0.73

渣金平衡实验是以 GCr15 轴承钢自耗电极为原料(具体成分见表 2)来研究不同渣系对 GCr15 轴承钢全氧含量的影响。渣金平衡实验在二硅化钼炉中进行,实验装置如图 3 所示。反应温度恒定在

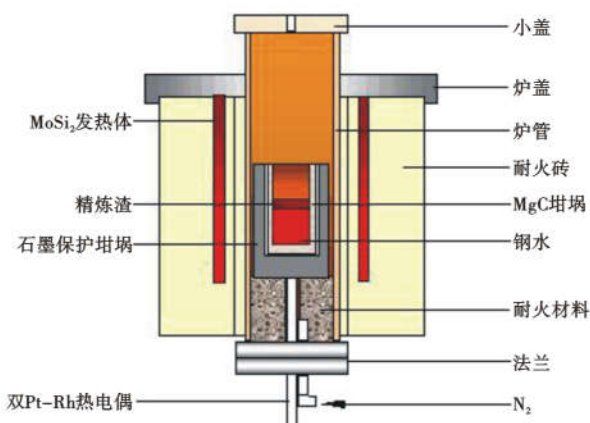


图 3 渣金平衡实验装置 (MoSi<sub>2</sub> 炉) 图

Fig. 3 Experimental device ( MoSi<sub>2</sub> furnace ) diagram for slag-steel balance

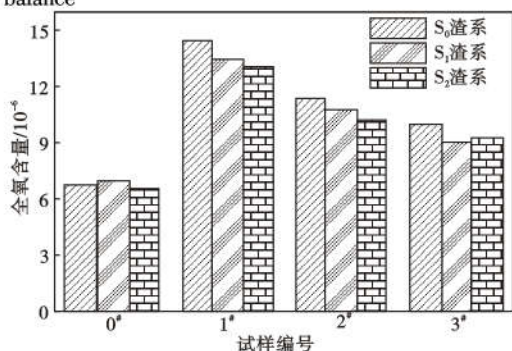


图 4 渣金平衡过程中所取钢样的全氧含量

Fig. 4 Total oxygen content of steel samples taken during slag-steel balance process

1 550 ℃, 反应时间 45 min, 全程在氩气保护气氛中进行。实验用钢料 500 g, 渣料 50 g, 渣金比为 1:10。

当反应温度升高到 1 550 ℃时,用石英管从钢液中取出 0#钢样,随即将渣料加入,待渣料熔清后记为渣金反应开始时间,分别在反应开始 15 min、30 min、45 min 用石英管从钢液中取出 1#、2#、3#钢样,反应结束后开始降温,当温度冷却至室温时从炉中取出凝固的钢锭记为 4#钢样。取出的 0#、1#、2#、3#钢样制作成 Φ4 mm × 8 mm 的氧棒,砂纸打磨光亮后用 TC-500 氮氧联合分析仪测定试样的全氧含量,结果如图 4 所示。

通过渣金平衡的全氧含量可知,整体上随着反应时间的延长,全氧含量呈先增加后下降的趋势,在 15 min 左右达到最高。添加 S<sub>2</sub> 渣系时,最大全氧含量增加量最低(6.73 × 10<sup>-6</sup>),较 S<sub>0</sub> 渣系全氧含量增加量(7.70 × 10<sup>-6</sup>)减少 12.60%。新渣系能够显著降低全氧含量。

### 3.2 现场实验结果及分析

通过 70 t 电弧炉冶炼→精炼→RH 真空脱气处理→连铸获得直径为 Φ390 mm 的 GCr15 钢自耗电极。将设计渣系 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 应用于现场试验,在 2.5 t 常压电渣炉中重熔成电渣钢锭(2.5 t 钢锭尺寸:上口 510 mm × 下口 550 mm × 高 1 700 mm),渣量控制为 120 kg。各过程工序时间、工艺满足要求,工艺参数见表 4。

重熔后的 GCr15 电渣锭冷却 60 min 后脱模,缓慢冷却 36 h。钢锭初轧开中间坯 240 mm × 240 mm,检测 9 个实验电渣锭起弧端和补缩端的各类夹杂物

表 4 GCr15 钢电渣重熔 (ESR) 过程工艺参数

Table 4 Technical parameters of electroslag remelting (ESR) process for GCr15 steel

锭号	渣系	炉口电压/V	重熔时间/min	补缩时间/min	总时间/min	锭重/kg	熔速/(kg · min <sup>-1</sup> )
A1	S <sub>0</sub>	50-48	301	54	355	2 790	7.859
A2	S <sub>0</sub>	50-48	311	43	354	2 795	7.895
A3	S <sub>0</sub>	50-48	294	55	349	2 780	7.966
A4	S <sub>1</sub>	50-48	247	49	296	2 800	9.459
A5	S <sub>1</sub>	48-46	245	55	300	2 800	9.333
A6	S <sub>1</sub>	48-46	273	44	317	2 805	8.849
A7	S <sub>2</sub>	46-44	303	40	343	2 805	8.178
A8	S <sub>2</sub>	45-43	304	51	355	2 800	7.887
A9	S <sub>2</sub>	45-43	315	55	370	2 800	7.568

级别和全氧含量,检测结果见表 5 和表 6。S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣系起弧端、补缩端全氧含量整体比 S<sub>0</sub> 要低,且 S<sub>2</sub> 降氧效果最强。对 S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣系试样进行夹杂物 ASP-EX 扫描,为了避免偶然性对夹杂物数量的影响,每个试样在不同区域统计三个视场取平均值,每个视场的统计面积为 1 mm<sup>2</sup>,被统计夹杂物的尺寸大于 1 μm,夹杂物个数及尺寸分布见表 7。研究表

明:三种渣系的夹杂物主要集中在 1 ~ 5 μm (> 90%),在此尺寸区间 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣系的夹杂物数量比 S<sub>0</sub> 渣系略高,但在 5 ~ 10 μm、10 ~ 15 μm 的夹杂物尺寸区间数量明显降低,从而有助于改善 D 类夹杂的评级。

从表 5 夹杂物评级结果看,S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣改善夹杂物评级的效果要好于 S<sub>0</sub> 渣,B 细、D 细、DS 夹杂物要

表5 ESR 渣系对 GCr15 钢夹杂物级别的影响/级  
Table 5 Effect of ESR slag systems on rating of inclusions in GCr15 steel/rating

渣系	锭号	起弧端							补缩端						
		A <sub>细</sub>	A <sub>粗</sub>	B <sub>细</sub>	B <sub>粗</sub>	D <sub>细</sub>	D <sub>粗</sub>	DS	A <sub>细</sub>	A <sub>粗</sub>	B <sub>细</sub>	B <sub>粗</sub>	D <sub>细</sub>	D <sub>粗</sub>	DS
S <sub>0</sub>	A1	0.5	0	1.0	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	1.5	0	0.5	0.5	0.0
	A2	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0	1.0	0.5	0.5
	A3	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	1.0	0	0.5	0.5	0.5
S <sub>1</sub>	A4	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.5
	A5	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.0	0	0.5	0.5	0.0
	A6	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0
S <sub>2</sub>	A7	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	1.0	0	0.5	0.5	0.0
	A8	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0
	A9	0.5	0	0.5	0	0.5	0.5	0.0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0

表6 不同位置电渣锭全氧含量/10<sup>-6</sup>

Table 6 Oxygen content of electroslag ingots in different positions/10<sup>-6</sup>

实验渣系	编号	起弧端	补缩端
S <sub>0</sub>	A1	11.8	15.7
	A2	11.1	16.8
	A3	19.0	19.5
	平均	13.97	17.33
S <sub>1</sub>	A4	6.4	9.4
	A5	7.2	10.2
	A6	10.5	14.7
	平均	8.03	11.43
S <sub>2</sub>	A7	8.8	8.9
	A8	8.1	8.6
	A9	9.5	10.6
	平均	8.80	9.37

表7 ASPEX 扫描夹杂物尺寸范围及每 mm<sup>2</sup> 个数

Table 7 Size rang and number of inclusion per mm<sup>2</sup> by ASPEX scanning

实验渣系	炉数	汇总/个	不同尺寸夹杂物个数/个		
			1~5 μm	>5~10 μm	>10~15 μm
S <sub>0</sub>	3	457	416	38	3
S <sub>1</sub>	3	521	490	30	1
S <sub>2</sub>	3	571	545	25	1

好于二元渣系。S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣能够降低氧含量,通过细化夹杂物,降低大尺寸夹杂物数量(见表7),提高了D类夹杂物的合格率。其中使用S<sub>2</sub> 渣系时,起弧端和补缩端平均全氧含量变化量最低(0.57 × 10<sup>-6</sup>),

较S<sub>0</sub> 渣系变化量(3.36 × 10<sup>-6</sup>)减少87.79%,平均全氧含量较S<sub>0</sub> 渣系降低41.98%;同时S<sub>2</sub> 渣系1~5 μm 夹杂物个数较S<sub>0</sub> 渣系降低31.25%。S<sub>2</sub> 渣系在冶炼过程中能够最大程度“净化”电渣锭,钢材的D类夹杂物评级均可达到0.5级。

#### 4 结论

(1)新渣系S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 较现有S<sub>0</sub> 渣系熔点更低,更接近重熔GCr15 轴承钢的要求。S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 渣系的黏度低且随时间变化更加平稳,有利于渣金分离同时电渣锭获得更好的表面质量。通过现场实验,新渣系具有良好的炉况匹配能力。

(2)对三种渣系进行渣金平衡实验,从全氧含量来看,随着渣金反应时间的延长出现先增加后减小的趋势,其中S<sub>2</sub> 渣系的最大全氧含量较S<sub>0</sub> 减少12.60%,降低全氧含量效果更为明显。

(3)现场实验的三种渣系的夹杂物尺寸主要集中在1~5 μm。其中S<sub>2</sub> 渣系电渣锭不同位置全氧含量变化最小,平均全氧含量较S<sub>0</sub> 渣系降低41.98%;1~5 μm 夹杂物个数较S<sub>0</sub> 渣系降低31.25%,S<sub>2</sub> 渣系能够更好的“净化”电渣锭。通过渣系对夹杂物调控,GCr15 轴承钢钢材中D类夹杂物评级级别达到0.5级。

#### 参考文献

- [1]钟顺思,王昌生. 轴承钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:194-195.
- [2]虞明全. 轴承钢钢种系列的发展状况[J]. 上海金属,2008,30(3):49-54
- [3]姜周华,董艳伍. 电渣冶金学[M]. 北京:科学出版社,2015:388-389.
- [4]李阳,姜周华,李花兵,等. 炼钢过程中的夹杂物[M]. 北京:科学出版社,2017:218.
- [5]Zong N, Huang J, Liu Y, et al. Controlling centre segregation and shrinkage cavities without internal crack in as-cast bloom of steel GCr15 induced by soft reduction technologies. Ironmak. Steelmak. 2020; 48(8): 944-952.
- [6]Huo X, Ning Y, Li L, et al. Research and control of network carbide in GCr15 bearing steel. Mater. Res. Express. 2020; 7(1): 016559.
- [7]赵海波,陈列. 电渣重熔对GCr15 轴承钢化学成分和夹杂物特性的影响[J]. 特殊钢,2016.37(4):44-48.
- [8]董艳伍,姜周华,李花兵,等. 电渣冶金用含氟渣系电导率计算方法研究[J],材料与冶金学报,2012,11(4):279-282.
- [9]梁连科,杨怀. 电渣重熔用渣的物理化学及其应用译文集[M],沈阳:东北大学出版社,1989:84-88.