

# 磁控电渣对 1 t ESR 锭 GCr15 轴承钢凝固组织及成分偏析的影响

张福利<sup>1</sup> 袁建路<sup>2</sup> 翟永臻<sup>1</sup> 张晓峰<sup>1</sup> 李博斌<sup>1</sup> 李程<sup>1</sup>

(1 河钢集团钢研总院, 石家庄 050018; 2 河北工业职业技术学院, 石家庄 050091)

**摘要** 对 GCr15 轴承钢在电渣过程中施加电磁搅拌, 分析电磁搅拌对电渣铸锭凝固组织和化学成分的影响。结果表明, 电磁搅拌可以显著改善电渣铸锭凝固过程传热条件, 减少 GCr15 电渣锭网状碳化物的形成。同时, 由于电磁搅拌的作用, 电渣锭的 C、Cr 等主要元素成分偏析指数稳定控制在 1.03 以下。当搅拌电流为 50 A 至 200 A, 频率为 6 Hz 时, 电渣锭中心无网状碳化物形成, 碳偏析指数为 1.02。

**关键词** GCr15 轴承钢 磁控电渣 凝固组织 成分偏析

## Effect of Electromagnetic Electroslag-Remelting on Solidification Structure and Steel Composition Variation of 1 t ESR Ingot of Bearing Steel GCr15

Zhang Fuli<sup>1</sup>, Yuan Jianlu<sup>2</sup>, Zhai Yongzhen<sup>1</sup>, Zhang Xiaofeng<sup>1</sup>, Li Bobin<sup>1</sup> and Li Cheng<sup>1</sup>

(1 Hebei Iron&Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050018;

2 Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091)

**Abstract** Based on electromagnetic stirring (EMS) in the electroslag process for bearing steel GCr15, the effects of EMS on the superalloy solidification structure and chemical composition are analyzed. The result is as follows: Electromagnetic electroslag can significantly improve the heat transfer condition of ingot solidification process, reduce the formation of network carbide in steel GCr15 ingot. At the same time, because of the effect of electromagnetic stirring, the segregation index of main elements such as C and Cr in the ingot is stable less than 1.03. When the stirring current is 50 A to 200 A, the frequency is 6Hz, there is no net carbide in the center of the ingot, and the carbon segregation index is 1.02.

**Material Index** Bearing Steel GCr15, Electromagnetic Electroslag, Solidified Structure, Component Segregation

GCr15 轴承钢是一种应用广泛、具有良好性能的高碳铬轴承钢。为提高 GCr15 轴承钢的力学性能, 钢中会加入适量的 C、Cr 等元素进行强化, 因此凝固过程中不可避免会产生元素偏析, 特别是 C 偏析会生成大量的网状和粒状碳化物<sup>[1-3]</sup>, 需要后续长时间的均质化处理, 但初始的碳化物还是难以去除<sup>[4]</sup>, 极大地降低了轴承钢的综合性能。C 元素偏析主要是由凝固过程中选分结晶所造成的<sup>[5]</sup>, 而电渣重熔过程中对金属熔池施加搅拌磁场能有效改善钢锭凝固结晶过程的传质传热, 避免液析产生, 为此, 本文主要研究磁控电渣对 GCr15 轴承钢凝固组织的影响, 包括对网状碳化物、成分偏析等的影响规律。

### 1 试验材料与方法

电渣电极材料为 150 mm × 150 mm × 1 800 mm GCr15 连铸坯, 其成分如表 1 所示。装置为 1 t 保护气氛电渣炉, 电渣全过程中采用氩气保护, 控制炉内气氛氧含量 ≤ 50 × 10<sup>-6</sup>, 采用

表 1 GCr15 钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of steel GCr15/%

C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	Ti	N
1.02	0.21	0.35	1.50	0.015	0.005	0.030	0.003 0	0.004 0

表 2 电渣工艺参数

Table 2 Electroslag process parameters

炉次	电磁搅拌参数	电渣锭规格/mm	电渣锭质量/kg	熔速/(kg · min <sup>-1</sup> )
1	0Hz, 0A	Φ300 × 700	350	3.5
2	6Hz, 50A	Φ300 × 700	350	3.5
3	6Hz, 100A	Φ300 × 700	350	3.5
4	6Hz, 200A	Φ300 × 700	350	3.5

Φ300 mm × 700 mm 抽锭式结晶器, 冶炼时对金属熔池施加旋转磁场, 电渣重熔过程恒熔速控制, 试验参数如表 2 所示。

对不同工艺条件电渣的铸坯截取横截面并在不同位置截取试样, 分析铸锭成分偏析和组织形貌。

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 宏观偏析

表 3 电渣锭分析项目  
Table 3 Ingot analysis scheme

序号	分析项目	检测手段	取样部位及样品尺寸
1	宏观偏析	ICP 和 C/S 仪器	电渣锭高 300 mm 处取样。在电渣锭横截面中心至边部用 3 mm 钻头钻均匀取 10 个铁屑样,用 ICP 和 C/S 仪分析化学成分。
2	微观偏析	电子探针	电渣锭高 300 mm 处取样。在电渣锭横截面中心、边部 2 个位置取规格 (mm) 为 10×10×10 样品,经抛光后进行电子探针面扫 1 mm×1 mm,分析 C、Cr 元素微观偏析。
3	网状碳化物	金相显微镜	电渣锭高 300 mm 处取样。在电渣锭横截面中心、边部 2 个位置取规格为 10×10×10 mm 样品,经抛光腐蚀后由金相显微镜分析。
4	气体	O/N 仪	电渣锭高 300 mm 处取样,样品为 Φ6×50 各 5 个。

1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣锭宏观偏析主要是 C 元素偏析,偏析指数 0.94~1.05。Mn、Si、Cr 元素成分较小,偏析指数在 0.98~1.02。其中,1<sup>#</sup>电渣锭采用传统电渣冶炼,碳偏析指数最大,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭采用磁控电渣冶炼,碳偏析指数明显小于 1<sup>#</sup>铸锭。如图 1。

1<sup>#</sup>电渣锭 C 偏析指数在 0.94~1.05;2<sup>#</sup>电渣锭在电渣过程中施加 6 Hz、50 A 旋转磁场,C 偏析指

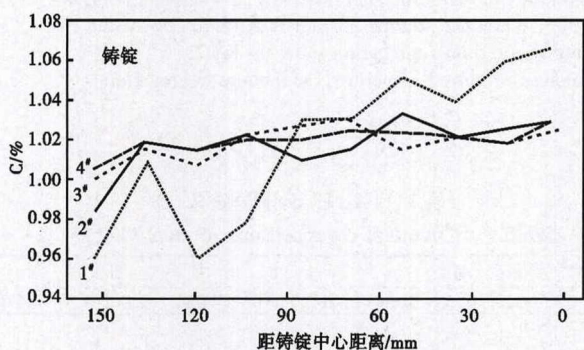


图 1 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣锭碳含量分布/%

Fig. 1 Distribution of carbon content in No1 ~ No4 ESR ingot/%

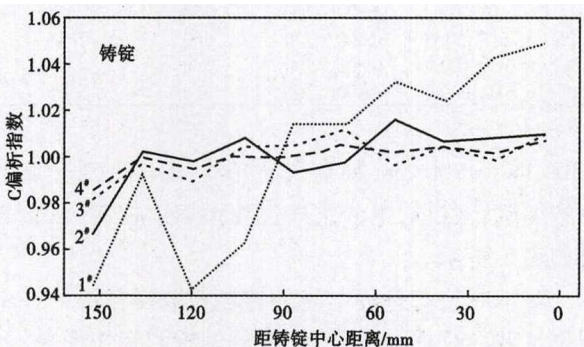


图 2 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣锭碳偏析指数([C]/[C<sub>avg</sub>])

Fig. 2 Carbon segregation index of No1 ~ No4 ESR ingots ([C]/[C<sub>avg</sub>])

数为 0.97~1.02;3<sup>#</sup>电渣锭在电渣过程施加 6 Hz、100 A 磁场,C 偏析指数为 0.98~1.01;4<sup>#</sup>电渣锭在电渣过程中施加 6 Hz、200 A 搅拌磁场,C 偏析指数为 0.98~1.01(图 2)。

电渣过程施加旋转磁场,从传质上有效改善凝固前沿液相对流运动,使母液和枝晶间的富集溶质液体互相冲刷混合,加速溶质的迁移,降低浓度梯度<sup>[2]</sup>,再加上钢液流动产生的对流传热,加速了凝固前沿温度的降低<sup>[6]</sup>,显著改善了结晶条件,减轻了元素偏析。分析实验结果得知,采用 6 Hz、50~200 A 搅拌磁场均大幅度减轻了元素偏析,有利于成分均匀。

2.2 微观偏析

电渣锭 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>进行电子探针面扫描,统计 C、Cr 元素晶界最大含量和面扫描范围内平均含量,结果如表 4:

四支电渣锭的 C、Cr 元素均在晶界有不同程度的富集,同一电渣锭中心比边部富集程度更大。电渣锭 1<sup>#</sup>中心和边部 C 元素晶间析出最多,会形成网状碳化物,Cr 元素偏析也比较严重,晶界浓度是平均浓度的 2~3 倍。2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭中心和边部 C 元素晶间析出较少,不会形成网状碳化物,而 Cr 元素有轻微的微观偏析,晶界浓度是晶内浓度的 1.5 倍左右。Mn、Si 元素在 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣锭均未出现偏析。实验证实,电磁电渣冶炼 GCr15 铸锭 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>微观偏析较 1<sup>#</sup>偏析程度有了大幅度的减少。同时,磁控电渣工艺下,搅拌参数在 6 Hz、50~200 A 对铸锭微观偏析的影响作用是基本一致的。

2.3 碳化物分析

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭进行金相分析,结果见图 3。

1<sup>#</sup>电渣锭中心在原奥氏体晶界有网状碳化物析出,2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭中心无网状碳化物析出,同时发现,1<sup>#</sup>电渣锭原奥氏体晶粒(500~600 μm)要明显

表 4 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣锭 C、Cr 微观分布

Table 4 Microscopic Distribution of C and Cr in No1 ~ No4 ESR ingots

序号	电渣锭位置	C/%		Cr/%	
		晶界含量	平均含量	晶界含量	平均含量
1 <sup>#</sup>	中心	3.06	1.05	4.82	1.60
	边部	2.21	0.96	3.65	1.32
2 <sup>#</sup>	中心	2.25	1.04	2.78	1.54
	边部	1.68	0.99	2.56	1.38
3 <sup>#</sup>	中心	2.10	1.03	2.43	1.52
	边部	1.82	1.00	2.04	1.48
4 <sup>#</sup>	中心	1.96	1.02	1.98	1.50
	边部	1.64	1.01	1.56	1.46

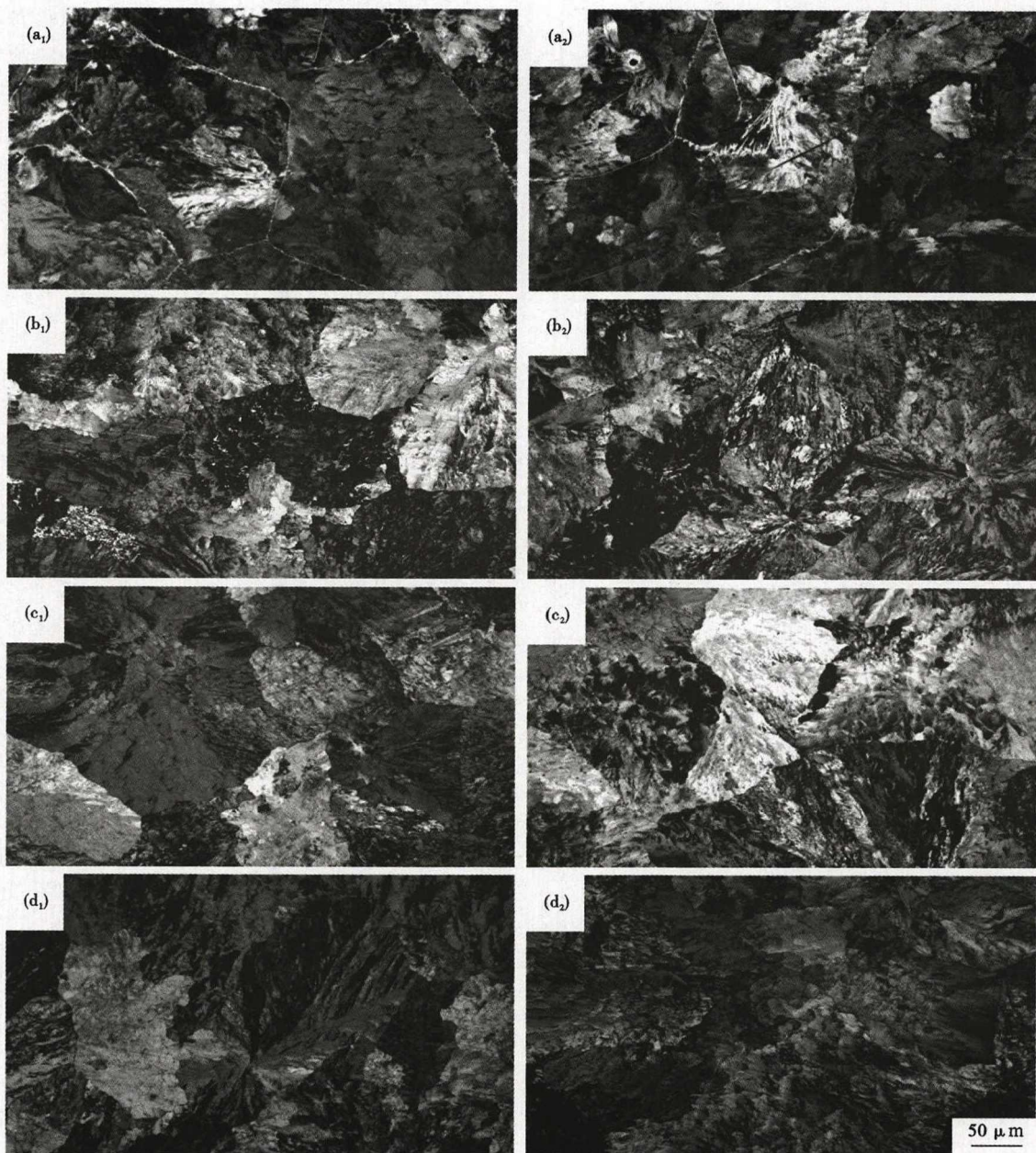


图3 1<sup>#</sup>(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), 2<sup>#</sup>(b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>), 3<sup>#</sup>(c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)和4<sup>#</sup>(d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>)电渣锭的组织形貌;(a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>), (c<sub>1</sub>), (d<sub>1</sub>)中心;(a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>), (c<sub>2</sub>), (d<sub>2</sub>)边部

Fig.3 Morphology of structure of No1 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), No 2 (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>), No 3 (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>) and No 4 (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>) ESR ingot:(a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>), (c<sub>1</sub>), and (d<sub>1</sub>) centre;(a<sub>2</sub>), (b<sub>2</sub>), (c<sub>2</sub>) and (d<sub>2</sub>) edge

大于2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭(300~400 μm), 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣锭原奥氏体晶粒基本相当,说明凝固结晶过程中,搅拌参数在6Hz、50~200A对铸锭形貌的影响基本是一致的。电磁搅拌作用下,金属熔池会发生相应的变化<sup>[2]</sup>,中心钢液在电磁力作用下会向四周移动,使中心钢液深度降低,边部钢液与结晶器接触面积增加,有效改善传热条件,同时钢液旋转对结晶器的相对运动增加了对流传热速率<sup>[8]</sup>,而无电磁搅拌时钢液是静止的,仅依靠传导传输出热量。电磁搅拌条件下改善传热有利于降低原奥氏体向珠光体转

变的过冷度<sup>[9]</sup>,使钢水尽快处于固液两相区,极大地提高了凝固结晶速率,减少了元素的局部凝固时间,从而减轻了碳化物的析出。

#### 2.4 气体含量分析

1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>电渣铸锭氧、氮含量分布见图4和图5。

1<sup>#</sup>电渣铸锭氧含量为 $6 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ ,氮含量 $38 \times 10^{-6} \sim 45 \times 10^{-6}$ , 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>电渣铸锭氧含量为 $5 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ ,氮含量 $35 \times 10^{-6} \sim 41 \times 10^{-6}$ ,氧氮含量均小于1<sup>#</sup>铸锭。

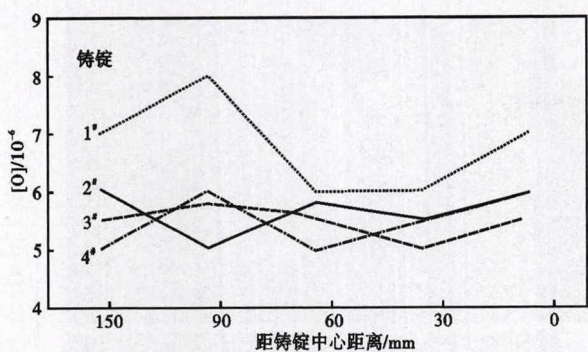


图 4 1\* ~ 4\* 电渣铸锭氧含量分布

Fig. 4 Distribution of oxygen content in No1 ~ No4 ERS ingots

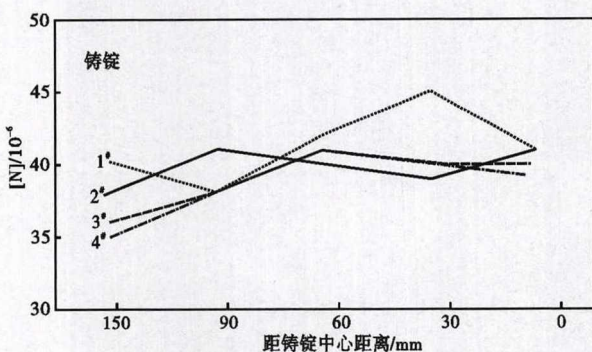


图 5 1\* ~ 4\* 电渣铸锭氮含量分布

Fig. 5 Distribution of nitrogen content in No1 ~ No4 ERS ingots

电渣铸锭氧含量是钢的洁净度的外在表现,电渣重熔过程会吸附钢液夹杂,提高钢的洁净度。重熔过程施加搅拌磁场后,渣池会在钢液旋转下被带动旋转,这就加强了渣对电极的冲刷作用,使金属熔滴不能自然长大,会在较小质量时脱离电极,这非常利于电渣冶金。首先金属熔滴长大过程是夹杂物去

除的主要过程,静止的渣池吸收夹杂物能力要弱于流动的渣池,因为,渣池流动下夹杂物在渣池中浓度梯度会增大,使得熔滴附近夹杂物浓度迅速减小,促进了溶液对夹杂物的吸收速率;其次是熔滴在冲刷作用下质量减少,比表面积增大,渣金反应增强,钢液提纯作用增强,再配合熔滴滴落过程中的搅拌作用,钢液洁净度会有质的提高。这也是 2\*、3\*、4\* 电渣铸锭氧含量小于 1\* 电渣铸锭的原因。

传统电渣熔炼过程脱氮作用较小,但在电渣过程中施加搅拌磁场,脱氮作用有一定的提高,2\*、3\*、4\* 电渣铸锭平均氮含量比 1\* 电渣铸锭分别减少了  $1.5 \times 10^{-6}$ 、 $2.5 \times 10^{-6}$  和  $2 \times 10^{-6}$ 。

### 3 结论

(1) 电渣重熔过程施加搅拌磁场,可有效减轻 GCr15 铸锭的元素宏观偏析。当搅拌电流为 50 A 至 200 A,频率为 6 Hz 时,电渣铸锭碳偏析指数为 0.98 ~ 1.02。

(2) 传统 GCr15 电渣铸锭会产生不同程度的 C、Cr 等元素微观偏析,当搅拌电流为 50 A 至 200 A,频率为 6 Hz 时,可明显减轻 C、Cr 等元素的微观偏析。

(3) 电磁电渣 GCr15 可以消除网状碳化物析出,当搅拌电流为 50 A 至 200 A,频率为 6 Hz 时,电渣铸锭无网状碳化物析出。

(4) 电渣过程中施加搅拌磁场能改善熔炼脱氧条件,当电流为 50 A 至 200 A,频率为 6 Hz 时,电渣铸锭氧含量  $\leq 6 \times 10^{-6}$ 。

### 参考文献

- [1] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [2] 蔡开科. 连铸坯质量控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [3] 姜周华. 电渣重熔的物理化学及传输现象 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 172-223.
- [4] 沈万林, 张志成, 罗小燕. 60 t + LF 精炼终点 GCr15 轴承钢中氧化物夹杂特性的研究 [J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 18-23.
- [5] 周德光, 傅杰, 王平, 等. 轴承钢连铸坯碳偏析的形成机理及影响因素 [J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(2): 131-138.
- [6] 李甫, 钟云波, 龙琼, 等. 旋转磁场对高硅铝合金凝固过程中相组织演变的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1175-1185.
- [7] 纪振双, 姚留枋, 唐仲和, 等. 连铸过程采用电磁搅拌时的负偏析带的形成机理 [J]. 钢铁研究学报, 1993, 5(2): 9-16.
- [8] Hunt J D. Steady State Columnar Equipped Growth of Dendrites and Eutectic [J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65 (1): 75-83.
- [9] 郑金星, 许秀杰, 王恩刚, 等. 旋转电磁搅拌时机对 GCr15 轴承钢凝固组织的影响 [J]. 东北大学学报, 2013, 34(9): 1257-1260.

张福利 (1984-), 男, 硕士 (2010 年北京科技大学), 高级工程师, 2006 年内蒙古大学 (本科) 毕业, 冶炼技术研究。  
E-mail: 274922041@qq.com  
袁建路 (1967-), 男, 教授, 河北工业职业技术学院。  
E-mail: 461334469@qq.com

收稿时间: 2019-02-28