

低频电源频率对 GCr15 电渣锭中液析碳化物的影响

苏云龙, 朱春丽, 张龙飞, 王蒙俊, 项森苗, 施晓芳*, 常立忠

(安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 为了进一步提高电渣锭的凝固质量, 设计了低频电渣重熔炉, 研究了不同频率对电渣锭中液析碳化物的影响。采用扫描电镜观察了液析碳化物的形貌、成分, 并在光学显微镜下观察了 GCr15 轴承钢电渣锭中液析碳化物的尺寸变化。研究表明, 相比于工频时, 低频可以有效降低碳化物数量, 特别是对于边部和 2/3R 处, 碳化物数量下降幅度较大, 在频率为 0.4 Hz 时下降幅度最大, 分别为 71.05% 和 48.00%。不管是边部、芯部还是 2/3R 处, 低频均能降低液析碳化物的最大尺寸。特别是对边部和 2/3R 处碳化物的影响最大, 边部最大尺寸从工频时的 11.64 μm 减小至 0.4 Hz 时的 7.39 μm , 减小了 36.51%; 2/3R 处最大尺寸从工频时的 20.58 μm 减小至 0.4 Hz 时的 12.61 μm , 减小了 38.73%。

关键词: 电渣重熔; 低频电源; 轴承钢; 液析碳化物; 凝固

中图分类号: TF142, TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)02-0179-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.02.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of low frequency power supply frequency on liquidus carbides in GCr15 electroslag ingot

Su Yunlong, Zhu Chunli, Zhang Longfei, Wang Mengjun, Xiang Miaomiao,
Shi Xiaofang*, Chang Lizhong

(School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Ma'an Shan 243002, Anhui, China)

Abstract: In order to further improve the solidification quality of electroslag ingot, a low frequency electroslag remelting furnace was designed to study the effect of different frequencies on liquid carbides in electroslag ingot. The morphology and composition of liquidated carbides were observed by scanning electron microscopy, and the size change of liquidated carbides was observed and analyzed under an optical microscope. The results show that the number of carbides can be effectively reduced at low frequency compared with that at power frequency, especially at the edge and at the edge of 2/3R where the number of carbides decreases significantly at 0.4 Hz, the maximum decrease amplitude is 71.05% and 48.00%. Whether it is in edge, heart, or 2/3R, low frequency can reduce the maximum size of liquid carbides. Especially for the edge and 2/3R carbides, the maximum size of the edge decreases from 11.64 μm at power frequency to 7.39 μm at 0.4 Hz, which is reduced by 36.51%. The maximum size at 2/3R is reduced by 38.73% from 20.58 μm at power frequency to 12.61 μm at 0.4 Hz.

Key words: electroslag remelting, low-frequency power supply, bearing steel, liquid-precipitated carbides, solidification

收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助(51974002/52074002); 安徽省自然科学基金资助(2208085J37)。

作者简介: 苏云龙, 1997 年出生, 男, 安徽合肥人, 硕士生, 研究方向: 特殊钢冶金, E-mail: 1652289825@qq.com; * 通讯作者: 施晓芳, 1978 年出生, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 特殊钢冶金, E-mail: shixiaofang602@163.com。

0 引言

近年来,我国经济的飞速发展带动了工业水平的迅猛提升,在工业生产中对作为重要材料之一的轴承钢的质量要求也越来越高^[1]。在轴承钢本身成分确定的前提下,冶金质量成为决定其性能高低的关键因素^[2]。钢锭的洁净度和凝固质量是衡量其冶金质量优劣的主要指标。随着炉外精炼技术的发展,轴承钢洁净度持续提高,我国部分钢铁企业生产的轴承钢中全氧含量(质量分数)能控制在 5×10^{-6} 左右,已经达到国际先进水平^[3]。然而,大部分轴承钢中的碳含量偏高,其凝固过程不可避免地会造成碳元素的偏析,进而产生液析碳化物,对钢的质量有非常不利的影响^[4-6]。

液析碳化物硬度高、脆性大,在受外力作用时,在液析碳化物晶界处容易产生疲劳裂纹,从而降低轴承的疲劳寿命,液析碳化物比网状碳化物和带状碳化物更难消除,后续所需热处理时间更长,降低了生产效率,尤其是对大尺寸液析碳化物的消除更难。控制好液析碳化物的数量、尺寸和形貌,可以降低液析碳化物对钢材的危害,因此如何细化轴承钢的凝固组织、减少(或避免)液析碳化物的析出成为提高轴承钢质量的关键环节之一。近年来,为消除或细化钢中液析碳化物,已有冶金工作者进行了大量的研究,如电渣重熔技术^[7-10]、高温扩散退火处理^[11-12]、在钢中添加微量镁^[13]等。

电渣重熔(ESR)是目前生产高质量轴承钢的主要冶炼工艺之一^[14-15]。与传统的连铸、模铸工艺相比,电渣重熔由于冷却速度较快可抑制元素偏析,进而抑制液析碳化物的析出。然而,随着电渣锭直径的增大,其芯部冷却速度减弱,往往会发现液析碳化物的析出,因此亟需采取更有效的措施激发电渣重熔的优势。另外,传统电渣重熔使用的电源多为 50 Hz 的交流电,随着电渣锭吨位(直径)的增加,重熔过程的功率因数下降、电效率下降、能耗增加,并且还会导致电路的三相不平衡^[16-19]。冶金工作者提出了低频电渣重熔的思路,有的钢铁企业还设计并制备了低频电渣重熔炉^[20-22],对提高电效率起到了较好的效果。然而,目前关于低频电渣重熔对电渣锭凝固质量影响的研究很少。因此,笔者以 GCr15 轴承钢为研究对象,详细研究了不同电源频率,特别是低频对 GCr15 轴承钢电渣锭中液析碳化物的影响规律,以期能为提高电渣锭的质量提供一条新的思路。

1 试验

1.1 试验材料

试验采用的 GCr15 轴承钢材料制备工艺为: EAF-LF-RH-CC, 然后再将连铸坯锻造成直径 55 mm、长度 700 mm 的自耗电极供重熔用,其主要化学成分如表 1 所示。电渣重熔试验过程中使用的渣系是传统的 ANF-6 渣,即 30%Al₂O₃ 和 70%CaF₂。

表 1 GCr15 轴承钢主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of GCr15 bearing steel

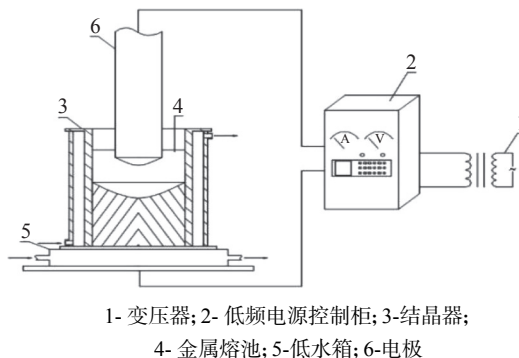
C	Mn	Si	Cr	P	Al	S	N
0.99	0.35	0.21	1.47	0.009	0.008	0.001	0.003 9

1.2 试验设备

图 1 为低频电渣重熔炉示意。低频电源的频率可通过低频电源控制柜调整,其工作范围为 0 ~ 10 Hz、50 Hz;并且可通过控制柜调整电压,从而达到精准控制变量。重熔电渣锭的直径范围可为 50 ~ 120 mm,采用直径 100 mm 的结晶器进行低频电渣重熔试验。

1.3 试验方案及试验过程

为了研究不同电源频率对 GCr15 电渣锭液析碳化物的影响,试验将在 0.1、0.4、1、2、50 Hz 频率下分别进行电渣重熔试验。具体试验方案如表 2 所示。



1- 变压器; 2- 低频电源控制柜; 3- 结晶器;
4- 金属熔池; 5- 低水箱; 6- 电极

图 1 低频电渣重熔炉示意

Fig. 1 Experimental device of low frequency power supply electroslag furnace

表 2 试验方案
Table 2 Experimental schemes

试验方案	重熔电流/A	重熔电压/V	频率/Hz	周期/s	钢种
1	1 800	32	0.1	10	GCr15
2	1 800	32	0.4	2.5	GCr15
3	1 800	32	1	1	GCr15
4	1 800	32	2	0.5	GCr15
5	1 800	32	50	0.02	GCr15

试验过程如下: ①试验前准备: 将 1 200 g 渣料配好后混匀放入石墨坩埚内, 待高温管式炉的温度达到 1 600 ~ 1 650 ℃ 时将坩埚放入其中保温, 直至渣料完全熔化; 将自耗电极表面的氧化物打磨去除; 冷却水压力调整为 0.2 ~ 0.3 MPa; 设定好低频电源频率。②试验开始: 当高温炉内的渣料完全熔化后, 将其取出快速倒入结晶器内, 电极下降, 电渣重熔试验开始。通过人工控制自耗电电极的下降速度以控制过程电流达到目标值。电渣重熔试验过程中不加入任何物料。③电渣试验结束: 当剩下 5% 的自耗电电极时, 断电, 重熔结束。待熔渣凝固后将电渣锭脱模去除, 送入退火炉退火。④试样检测。

2 结果与讨论

2.1 频率对电渣锭中液析碳化物的影响

2.1.1 不同频率下电渣锭中液析碳化物数量及尺寸的变化规律

图 2 为不同电源频率对液析碳化物数量的影响。从图 2 可以看出, 无论采用何种频率重熔, 均是芯部的液析碳化物最多, 其次为 2/3R 处, 而边部的碳化物数量最少。

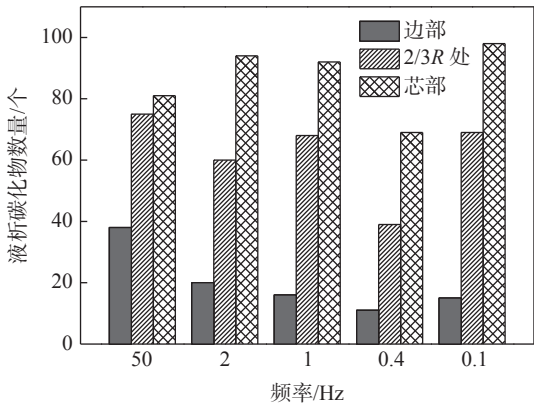


图 2 GCr15 电渣锭中液析碳化物数量的变化
Fig. 2 Variation of the number of liquid carbides in GCr15 ESR ingot

在边部位置, 随着重熔电源频率的降低, 液析碳化物的数量总体呈逐渐减少的趋势。当频率为 50 Hz 时, 边部液析碳化物的数量为 38 个, 当频率逐渐下降至 2、1 Hz 和 0.4 Hz 时, 碳化物的数量减少至 20、16 和 11 个, 当频率为 0.1 Hz 时, 碳化物数量又稍微增加至 15 个。当处于 2/3R 位置时, 碳化物的变化规律类似于边部位置。当频率为 50 Hz 时, 碳化物的数量为 75 个, 当频率为 2 Hz 和 1 Hz 时, 碳化物的数量均有所减少, 分别为 60 个和 68 个, 当频率为 0.4 Hz 时, 碳化物数量继续减少至 39 个, 而频率为 0.1 Hz 时, 又增多至 68 个; 当处于电渣锭芯部时, 频率为 0.4 Hz 时液析碳化物数量最少, 为 69 个, 相比于工频时的 81 个减少了 12 个; 而当频率为 0.1 Hz 时, 碳化物数量最多, 为 98 个, 相比于工频时增加了 29 个。

从以上试验数据可知, 合理的低频频率可以减少液析碳化物的数量, 而且对边部和 2/3R 处的影响要大于对芯部的影响。

表 3 为不同电源频率对不同位置处液析碳化物尺寸的影响。

表 3 不同频率下液析碳化物尺寸的变化
Table 3 Changes of size of liquidated carbides at different frequencies

频率/Hz	取样位置	最小尺寸/ μm	最大尺寸/ μm	平均尺寸/ μm
50	边部	4.26	11.64	7.06
	2/3R 处	4.53	20.58	9.08
	芯部	5.13	15.42	9.62
2	边部	5.12	14.01	7.00
	2/3R 处	4.91	16.29	8.34
	芯部	3.02	17.00	8.08
1	边部	3.64	10.33	5.36
	2/3R 处	4.66	18.68	8.45
	芯部	3.92	16.87	8.25
0.4	边部	5.72	9.16	7.55
	2/3R 处	4.30	12.61	7.35
	芯部	4.92	13.17	7.31
0.1	边部	3.64	7.39	4.98
	2/3R 处	4.27	22.67	7.65
	芯部	3.45	15.28	8.54

将表 3 中数据整理作图, 分析不同频率对液析碳化物尺寸的影响, 如图 3 ~ 5 所示。

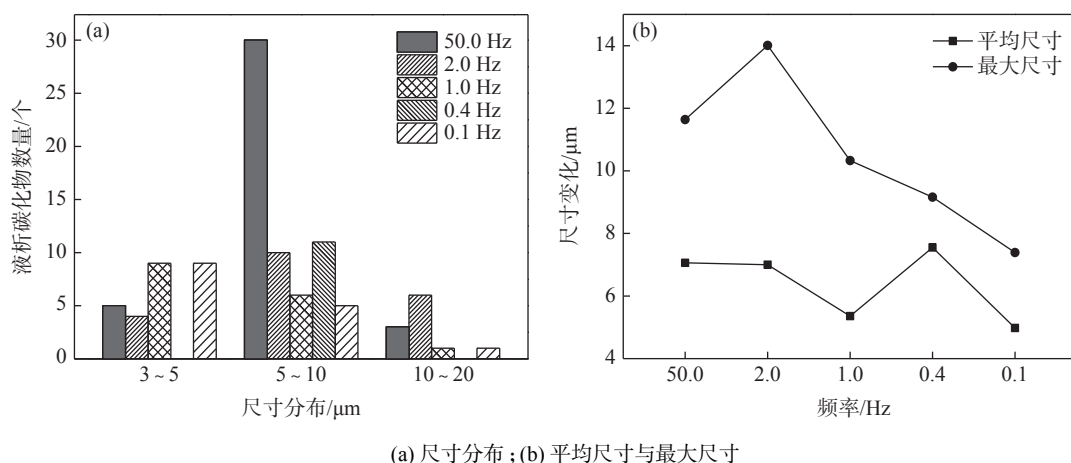


图3 频率对边部液析碳化物尺寸的影响

Fig. 3 Effect of frequency on size of edge liquid carbides

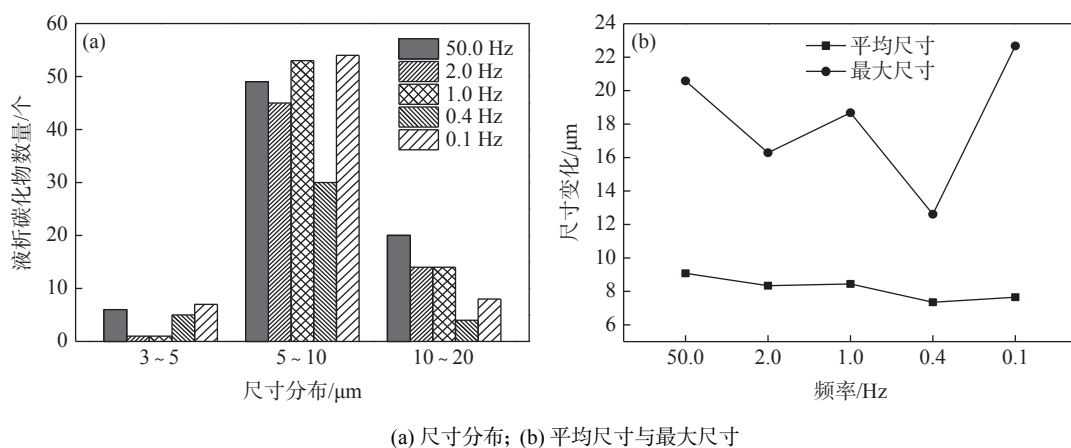


图4 频率对2/3R处液析碳化物尺寸的影响

Fig. 4 Effect of frequency on size of liquid carbides at 2/3R

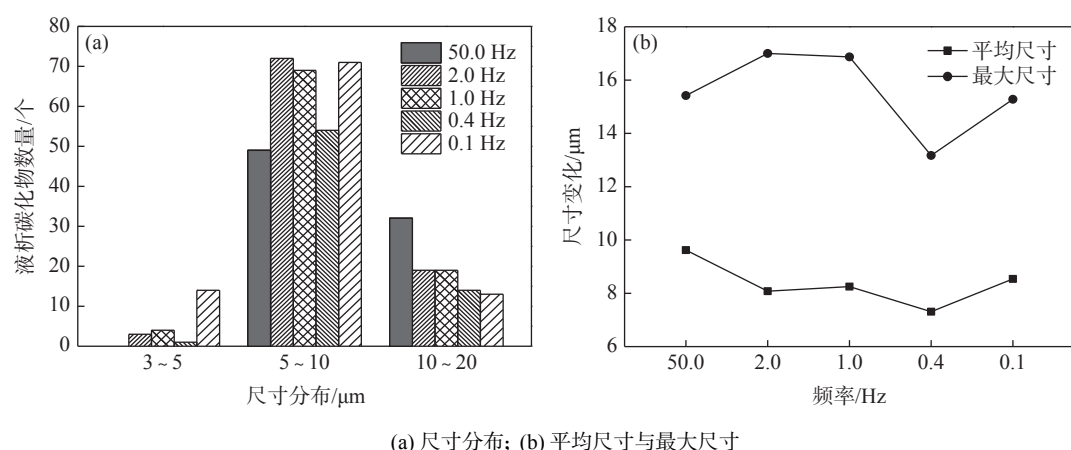


图5 频率对芯部液析碳化物尺寸的影响

Fig. 5 Effect of frequency on size of liquid carbides in heart

图3为不同频率对电渣锭边部位置处液析碳化物尺寸分布的影响。从图3可得,低频电渣重熔可以减少边部位置大尺寸碳化物的数量,并且可以有效减小碳化物的最大尺寸和平均尺寸。相较于工频

电渣重熔的电渣锭,在1、0.4 Hz和0.1 Hz时分别降低了11.25%、21.31%和36.51%,而五组试验的平均尺寸均很小,在改变频率后平均尺寸并无多大变化。

图4为不同电源频率对2/3R处液析碳化物尺寸分布的影响。从图4(a)可以看出,在2/3R位置,五组试验中液析碳化物均主要集中在5~10 μm的范围内,而随着频率的降低,从工频的49个减少至0.4 Hz时的30个,但在0.1 Hz时又有所增加,为54个;而分布在10~20 μm范围内尺寸稍大的碳化物,随着频率的降低,从工频时的20个逐渐减少至0.4 Hz时的4个,在0.1 Hz时又上升至8个。从图4(b)的变化曲线可得,液析碳化物的平均尺寸稍有降低,总体并无多大变化,其中在0.4 Hz时平均尺寸最小,为7.35 μm;而最大尺寸的变化趋势总体呈先减小后增大的趋势,当工频重熔时,最大尺寸为20.58 μm,频率降低至0.4 Hz时,碳化物最大尺寸减小至12.61 μm,降低了38.73%,但在0.1 Hz时又增大到22.67 μm,比工频时增大了10.16%。在合理的频率范围内,低频不仅可以减少碳化物大尺寸的数量,还能减小碳化物的最大尺寸。

图5为不同电源频率对芯部液析碳化物尺寸分布的影响。从图5(a)可以看出,芯部的尺寸分布类似于2/3R处的尺寸分布,碳化物主要集中在5~10 μm

内,相比于工频,低频时的数量都有所上升,而随着频率的降低,10~20 μm内的碳化物数量在不断地减少。从图5(b)可得,芯部碳化物平均尺寸和2/3R处平均尺寸的变化曲线也基本一致,随着频率的降低,平均尺寸从工频时的9.62 μm减小至0.4 Hz时的7.31 μm,降低了24.01%;而最大尺寸呈先增大后减小,然后再增大的趋势,从工频时的15.42 μm增加至2 Hz和1 Hz时的17.00 μm和16.87 μm,后减小至0.4 Hz时的13.17 μm,降低了14.60%,然后又增大至0.1 Hz时的15.28 μm,虽然最大尺寸在0.1 Hz时又有所增加,但还是比工频时要小。

从图3~5可以看出,低频电渣重熔可以减小大尺寸碳化物的数量和最大尺寸,而平均尺寸基本无多大变化,均在小范围内波动,而且低频对边部和2/3R处碳化物尺寸的影响要大于对芯部的影响。

2.1.2 电源频率对液析碳化物形貌的影响

图6为不同频率下电渣锭不同位置液析碳化物的典型形貌。

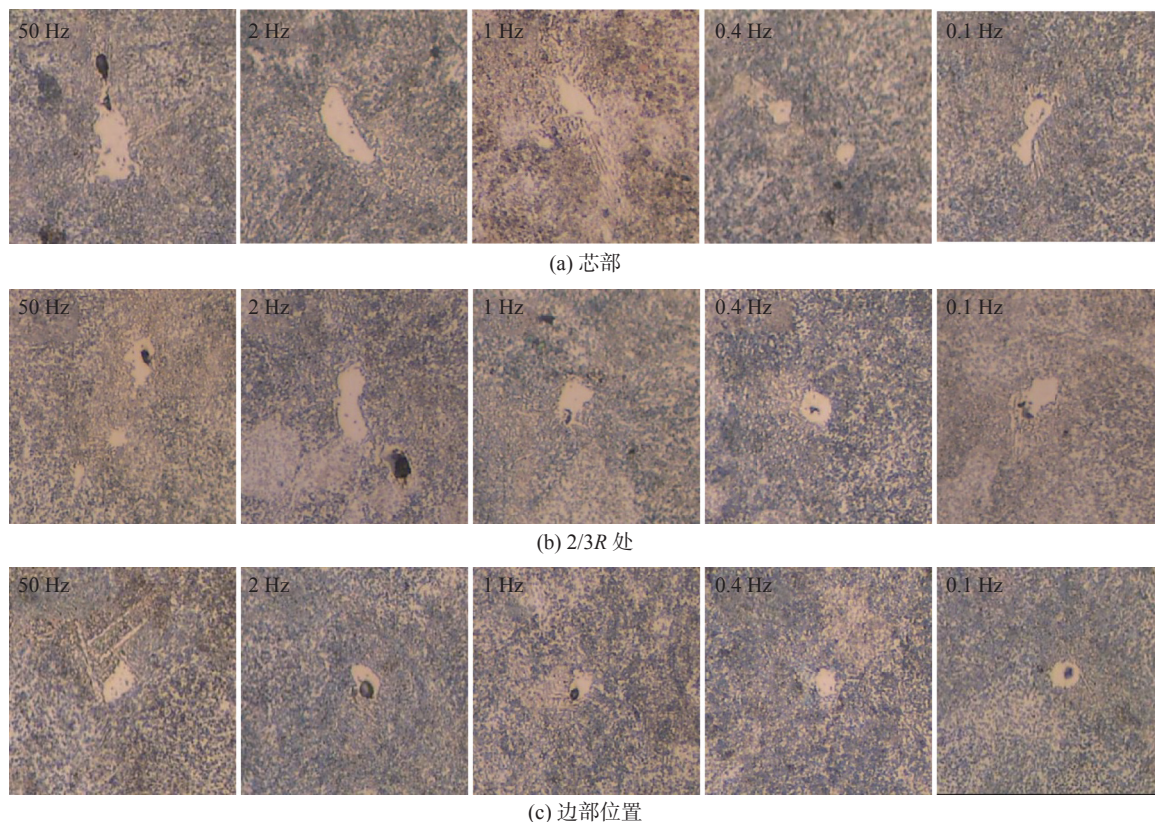


图6 不同频率下电渣锭中液析碳化物的形貌(×500)

Fig. 6 Morphology of liquid carbides at different frequencies (×500)

从图 6 可以得出, 频率变化对液析碳化物的形貌影响较小, 主要是以球形、条形为主, 在此基础上不规则变化。相对于工频, 总体上低频重熔电渣锭中碳化物的形状更为规则, 颗粒圆度更高, 但频率并

不是越低越好, 在 0.1 Hz 时, 不管是在芯部还是 2/3R 处, 液析碳化物的尺寸又变的粗大且不规则。

图 7 为 GCr15 轴承钢电渣锭中液析碳化物的元素分布。

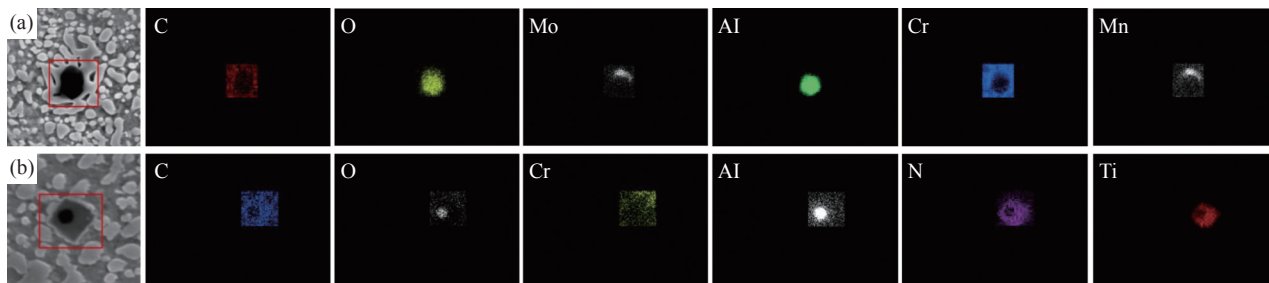


图 7 典型液析碳化物的元素分布

Fig. 7 Element distribution of representative liquid carbides

从图 7 可以看出, 不管是工频还是低频下重熔, 液析碳化物并不是独立存在的, 大多依附在 Al_2O_3 上析出, 少数依附在 TiN 或 Al_2O_3 -TiN 复合夹杂上析出, 且碳化物的成分并无多大变化。因此, 减少轴承钢中的夹杂物对于抑制液析碳化物的析出具有积极意义。

2.2 分析讨论

在凝固过程中, 由于 C、Cr 元素的富集, 导致液析碳化物的产生。而采用不同的电源频率电渣重熔时, 虽然不能改变液析碳化物的组成, 但能使多棱角的碳化物变得圆润, 而且在合理的频率范围内, 低频能减少碳化物的数量及尺寸大小。而液析碳化物的形成与凝固过程息息相关^[23-24], 因此低频操作必然是影响了电渣锭的凝固, 进而影响了碳化物的析出。

在电渣重熔时, 当电流从电极经过熔渣和金属熔池流向钢锭时, 在结晶器内部的重熔体系中会产生一个对应的磁场, 电场和磁场相互作用会产生相应的电磁力。此电磁力会对重熔体系有一个搅拌作用。电磁力越大, 搅拌作用越强。而电源频率越低, 热源渗透性越好, 由于渣池内熔渣的电阻率远远大于钢液, 通电后, 渣池内的电磁力也远远大于金属熔池, 频率越低, 渣池内的电磁力就越强, 电磁搅拌所形成的强制对流也越剧烈, 因而会带动金属熔池的运动, 使得熔池内部会有一个搅拌的趋势, 促进了熔池内部的热交换, 使熔池温度场进一步均匀, 熔池深度变浅^[25-27]。由于渣池及金属熔池温度的均匀, 也使得渣皮变薄, 从而提升了结晶器的冷却效果, 提高了凝固速率, 如图 8 所示。

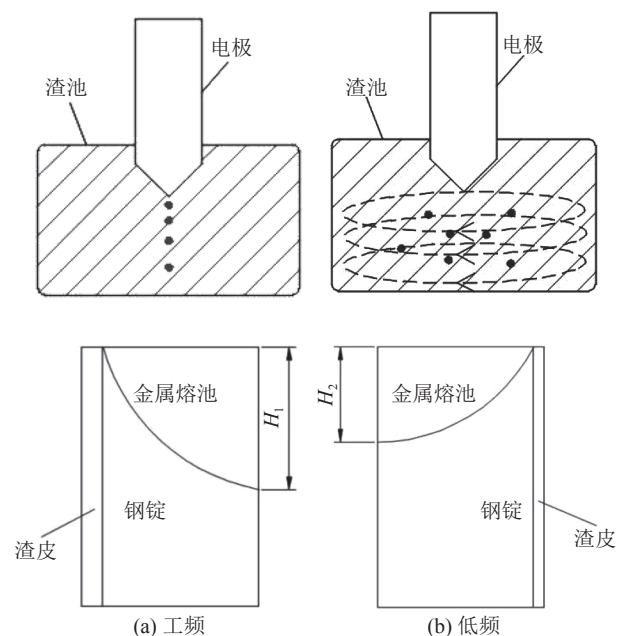


图 8 不同电源频率电渣重熔过程示意

Fig. 8 Schematic diagram of electroslag remelting process at different power frequencies

当采用工频电渣重熔时, 金属熔池较深, 熔池中心区域温度较高, 金属熔池传热能力差, 这相当于延长了选分结晶的时间, 导致形成发达的柱状晶组织, 树枝晶之间的间距也会增大, 再加上 Cr 元素的扩散系数较小, 使得 C、Cr 元素不断在树枝晶间聚集, 最终使得大尺寸的碳化物在树枝晶内形成并析出; 同时, 在工频电渣重熔时, 渣皮较厚且不均匀, 使得凝固过程中的冷却速率变慢, 这进一步导致 C、Cr 合金元素有更多时间在树枝晶内析出和富集, 进而有更多时间形成碳化物并长大、变粗。

当采用低频重熔后, 电磁力的搅拌作用使得金

属熔池深度变浅,熔池内的温度分布也较均匀,轴向传热能力加强,凝固速度加快,使得结晶过程能在较短时间内完成,进而减小了树枝晶之间的间距,使得 C、Cr 合金元素在树枝晶内的富集程度减小,碳化物在树枝晶内的生长空间和时间都不够,因而碳化物数量变少,尺寸也变小;同时由于渣皮厚度减小,且均匀性提高,凝固过程的冷却速度提高,使得固相和液相中的充分扩散受到抑制,减少了夹杂物进入枝晶内的数量,从而减少了形核率,碳化物的数量也随之减少。

3 结论

主要研究电源频率变化对电渣重熔 GCr15 轴承钢中的液析碳化物数量、尺寸以及形貌的影响,得出如下结论:

1)与工频电渣重熔相比,低频电渣重熔可以有

效降低 GCr15 轴承钢中液析碳化物的数量,特别是对于边部和 2/3R 处,碳化物数量下降幅度较大,在 0.4 Hz 时分别下降 71.05% 和 48.00%。芯部液析碳化物的数量总体稍有增加,在 0.1 Hz 时最大增幅为 21.00%;

2)不管是边部、芯部还是 2/3R 处,低频均能降低液析碳化物的最大尺寸,特别是对边部和 2/3R 处碳化物的影响最大,边部最大尺寸从工频时的 11.64 μm 减小至 0.1 Hz 时的 7.39 μm ,减小了 36.51%; 2/3R 处最大尺寸从工频时的 20.58 μm 减小至 0.4 Hz 时的 12.61 μm ,减小了 38.73%;频率的变化对液析碳化物的平均尺寸影响较小。

3)相对于工频,总体上低频重熔电渣锭中碳化物的形貌更为规则,颗粒圆度更高,但频率并不是越低越好,在 0.1 Hz 时,不管是在芯部还是 2/3R 处,液析碳化物的尺寸又变得粗大且不规则。

参考文献

- [1] Du Gang. Study on carbide control in GCr15 bearing steel based on electroslag remelting[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018.
(杜刚. 基于电渣重熔 GCr15 轴承钢中碳化物控制的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [2] Xue Zhengliang, Zhu Hangyu, Chang Lizhong. Special smelting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 80.
(薛正良, 朱航宇, 常立忠. 特种熔炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018: 80.)
- [3] Li Zhengbang. Theory and practice of electroslag metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
(李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.)
- [4] Li Hong, Yang Yiming, Lv Peng. Development and application of 120 t low frequency electroslag furnace power supply system[J]. Metallurgical Industry Automation, 2017, 41(2): 40-44, 65.
(李宏, 杨毅明, 吕鹏. 120 t 低频电渣炉电源系统研制及应用[J]. 冶金自动化, 2017, 41(2): 40-44, 65.)
- [5] Li Zhengbang. Development history, current situation and trend of electroslag metallurgy[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2011, 10(S1): 1-7.
(李正邦. 电渣冶金的发展历程、现状及趋势[J]. *材料与冶金学报*, 2011, 10(S1): 1-7.)
- [6] Yu Kun. Study on the characteristics of low frequency electroslag remelting [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
(余坤. 低频电渣重熔特性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.)
- [7] Du G, Li J, Wang Z B. Control of carbide precipitation during electroslag remelting-continuous rapid solidification of GCr15 steel[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2017, 48(6): 2873-2890.
- [8] Qi Y F, Li J, Shi C B, *et al.* Effect of directional solidification of electroslag remelting on the microstructure and primary carbides in an austenitic hot-work die steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249(11): 32-38.
- [9] He Bao, Li Jing, Shi Chengbin, *et al.* Effect of cooling intensity on carbides in H13 steel containing magnesium during electroslag remelting[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(12): 1720-1727.
(贺宝, 李晶, 史成斌, 等. 电渣重熔过程冷却强度对含镁 H13 钢中碳化物的影响[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(12): 1720-1727.)
- [10] Chang Kaihua, Xu Tao, Zhu Chunli, *et al.* Effect of electroslag remelting on oxygen content and inclusions in GCr15 bearing steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(4): 175-181.
(常凯华, 徐涛, 朱春丽, 等. 电渣重熔对 GCr15 轴承钢中氧含量及夹杂物的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(4): 175-181.)
- [11] Chen Kun. Study on forging deformation process for controlling the quality of Cr5 steel cold roll blank [D]. Shanghai:

- Shanghai University, 2011: 29-32.
(陈锟. 控制Cr5钢冷轧辊坯质量的锻造变形工艺研究[D]. 上海: 上海大学, 2011: 29-32.)
- [12] Yu Ruizhi, Liu Hongbo. Effect of heating temperature and time on dissolution and diffusion of liquid precipitation carbides in MC5 roll steel[J]. *Special Steel Technology*, 2013, 19(2): 31-34,51.
(于瑞芝, 刘洪波. 加热温度与时间对MC5 轧辊钢液析碳化物溶解扩散的影响[J]. *特钢技术*, 2013, 19(2): 31-34,51.)
- [13] Chang Lizhong, Gao Gang, Shi Xiaofang, *et al.* Effect of magnesium on liquidus carbide in GCr15 bearing steel[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2019, 19(2): 362-369.
(常立忠, 高岗, 施晓芳, 等. 镁对GCr15轴承钢中液析碳化物的影响[J]. *过程工程学报*, 2019, 19(2): 362-369.)
- [14] Sui Tielu. Overview of electroslag remelting abroad and development direction of electroslag remelting in China[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2011, 10(S1): 21-28.
(隋铁流. 国外电渣重熔概况及我国电渣重熔的发展方向[J]. *材料与冶金学报*, 2011, 10(S1): 21-28.)
- [15] Zhang B, Chen K, Wang R, *et al.* Physical modelling of splashing triggered by the gas jet of an oxygen lance in a converter[J]. *Metals*, 2019, 9(4): 409.
- [16] Yang Xiaowei. Research and development criteria of bearing steel from the chemical composition design of GCr15 steel[J]. *Bearing*, 2022(12): 28-31.
(杨晓蔚. 由GCr15钢的化学成分设计看轴承钢的研发准则[J]. *轴承*, 2022(12): 28-31.)
- [17] Yin Fuxing, Su Ming, Ji Fa, *et al.* Effect of melting rate on microsegregation and primary MC carbides in M2 high-speed steel during electroslag remelting[J]. *China Foundry*, 2021, 18(3): 163-169.
- [18] Li Xing, Jiang Zhouhua, Geng Xin, *et al.* Numerical simulation of a new electroslag remelting technology with current conductive stationary mold[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 736-746.
- [19] Chang Lizhong, Li Zhengbang. Control method of metal solidification in electroslag remelting process[J]. *Steelmaking*, 2007, (4): 56-58,62.
(常立忠, 李正邦. 电渣重熔过程中金属凝固的控制方法[J]. *炼钢*, 2007, (4): 56-58,62.)
- [20] Li Hong. On the development of high-power low-frequency power supply in China[J]. *Journal of Power Supply*, 2020, 18(4): 200-205.
(李宏. 谈我国大功率低频电源的发展[J]. *电源学报*, 2020, 18(4): 200-205.)
- [21] Sun Ya. Research on control strategy and verification of high power factor low frequency power supply for single-phase electroslag furnace[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018.
(孙亚. 单相电渣炉用高功率因数低频电源控制策略及验证研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.)
- [22] Lv Peng. Research on key technologies of low frequency power supply for large tonnage electroslag furnace[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
(吕鹏. 大吨位电渣炉低频供电关键技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.)
- [23] Liang Wei, Li Jing, Shi Chengbin, *et al.* Study on carbide control of high speed steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41(4): 130-138.
(梁伟, 李晶, 史成斌, 等. 高速钢的碳化物控制研究[J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41(4): 130-138.)
- [24] Lin Faju. Effect of heat treatment process on liquidus carbide of mc5d cold roll blank[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(5): 162-168.
(林发驹. 热处理工艺对MC5D冷轧辊坯液析碳化物的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(5): 162-168.)
- [25] Lin Jianfeng. Microstructure and properties of Al Li alloy cast by low frequency electromagnetic casting [D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
(林建峰. 低频电磁铸造铝锂合金的组织与性能[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.)
- [26] He Yuxiao, Zhang Zhiqiang, Bao Lei, *et al.* Low frequency electromagnetic semi continuous casting of AC52 ingot[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2013, 33(4): 357-360.
(和玉晓, 张志强, 宝磊, 等. 低频电磁半连续铸造AC52锭坯[J]. *特种铸造及有色合金*, 2013, 33(4): 357-360.)
- [27] Zuo Yubo, Zhao Zhihao, Zhu Qingfeng, *et al.* Mechanism of refining microstructure of aluminum alloy by low frequency electromagnetic casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(1): 51-55.
(左玉波, 赵志浩, 朱庆丰, 等. 低频电磁铸造细化铝合金组织的机理[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(1): 51-55.)