

# PMO 对 GCr15 轴承钢矩形坯心部微观组织及元素分布的影响

刘海宁<sup>1</sup>, 李辉成<sup>2</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 徐旋旋<sup>2</sup>, 陈廷军<sup>2</sup>, 徐智帅<sup>1</sup>

(1. 上海大学先进凝固技术中心, 上海 200444; 2. 常州中天钢铁集团有限公司, 江苏常州 213011)

**摘要:** 为了改善 220 mm × 260 mm 矩形 GCr15 轴承钢铸坯心部组织, 提高元素分布均匀性, 以稳定轴承产品质量, 在凝固过程中利用脉冲磁致振荡 (简称 PMO) 技术对铸坯进行处理。取样检测结果表明, 相比未经过 PMO 技术处理的铸坯 (对比坯), PMO 处理坯的中心缩孔明显减小, 凝固组织的初生相占比波动显著降低, C、Cr、Mn、Si 元素含量的分布更加均匀。

**关键词:** PMO; GCr15 轴承钢; 凝固组织; 元素分布

GCr15 轴承钢是国内外运用最为广泛的轴承材料之一<sup>[1]</sup>, 以其为原材料的轴承及各种工模具产品被广泛应用于铁路运输、机械制造、国防工业等领域<sup>[2]</sup>。但由于该种含碳量高达 1% 左右, 其固液两相区的范围比中低碳钢大很多, 因此在相同连铸条件下, GCr15 轴承钢铸坯更容易形成发达的树枝晶组织, 出现中心缩孔、疏松、元素分布不均等问题, 给后续加工带来困难, 甚至遗传至最终成品<sup>[3-5]</sup>。目前, 我国针对 GCr15 轴承钢铸坯的评价体系中, 皮下质量、内部裂纹、非金属夹杂物、中心缩孔及疏松、中心偏析等成为主要衡量指标<sup>[6]</sup>, 随着凝固过程认识加深<sup>[7-8]</sup>、装备进步<sup>[9]</sup>和冶炼连铸工艺优化<sup>[10]</sup>, 铸坯皮下质量、内部裂纹及非金属夹杂等缺陷都得到了有效控制, 而铸坯中心区域产生的缺陷问题成为制约轴承钢质量及稳定性的关键问题之一。

连续铸造中改善铸坯中心区域质量的手段主要集中在两个方面; 一是对连铸机组装备及生产工艺参数进行优化, 比如调整不同二冷区段比水量、提高二冷段框架辊子的对弧精度、降低中间包过热度、控制拉坯速度等手段<sup>[11-13]</sup>; 二是运用电磁搅拌<sup>[14]</sup>, 凝固末端轻压下<sup>[15]</sup>或重压下<sup>[16]</sup>等技术影响连铸坯凝固过程, 从而达到改善连铸坯心部缺陷目的。脉冲磁致振荡 (Pulsed Magneto-Oscillation 简称 PMO) 是在揭示了脉冲电流细化金属凝固组织机制<sup>[17]</sup>的基础上提出的新型凝固均质化技术<sup>[18]</sup>, 在改善铸坯低倍组织、宏观偏析及碳化物方面取得良好效果<sup>[19-22]</sup>。PMO 产生的高频脉冲式磁场不会引起金属熔体的剧烈运动, 其电磁效应作用在金属固液界面处会导致磁致过冷效应, 从而促进形核, 并形成“结晶雨”效应, 最终起到细化金属凝固组织的作用<sup>[23]</sup>。

本文研究了 PMO 技术对 GCr15 轴承钢铸坯中心凝固组织及元素分布的影响, 重点关注铸坯中心枝晶组织形貌、初生相比例和元素的面分布情况。

## 1 试验材料与方法

中天特钢电炉厂生产 GCr15 轴承钢的冶炼工艺流程为: EAF→LF→VD→CCM, 其中在 CCM 环节使用 PMO 技术, 为了检验该技术对 GCr15 轴承钢铸坯心部组织的作用, 试验过程中关闭该铸机第 5 流 PMO 装备, 停止 PMO 对该流次的处理, 并对第 5 流次及第 1 流次相同位置的铸坯进行取样。装配有 PMO 技术装备的连铸机相关信息及 PMO 试验炉次生产的 GCr15 轴承钢平均成分见表 1 和表 2。

### 作者简介:

刘海宁 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钢铁冶金。E-mail: 13917796349@163.com

中图分类号: TG26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022) 02-0164-07

### 基金项目:

国家重点研发计划, 低缺陷低偏析铸造成形加工工艺优化 (2017YFB0701802); 国家自然科学基金青年基金 (51904182)。

### 收稿日期:

2021-05-06 收到初稿,  
2021-08-14 收到修订稿。

表1 连铸机的基本配置参数  
Table 1 Basic configuration parameters of the continuous casting machine

项目	数值
结晶器有效长度/mm	800
铸机断面尺寸/(mm×mm)	220×260
圆弧半径/m	10
GCr15轴承钢铸速/(m·min <sup>-1</sup> )	0.82
液相线温度/℃	1453
二冷区冷却方式	气雾冷却
M-EMS电流/A	200
F-EMS电流/A	300
脉冲电流K <sub>t</sub> /A	420
脉冲频率K <sub>f</sub> /Hz	90

注：其中K<sub>t</sub>、K<sub>f</sub>为PMO设备系数。

表2 GCr15轴承钢铸钢成分  
Table 2 Chemical composition of the GCr15 steel billet

w <sub>B</sub> /%					
C	Si	Mn	Cr	P	S
0.96	0.22	0.33	1.42	0.012	0.001

PMO技术装备<sup>[24]</sup>主要是由PLC控制系统、电源控制系统、隔离变压器、整流滤波柜、储能柜和安装在连铸二冷一段的PMO感应线圈组成。远程控制系统通过PLC控制程序将指令传输给电源控制系统，而作为中枢装置的控制电源通过晶体管调节电源输出功率，并将交流电输入整流滤波柜，将其转换为直流电后输送给储能柜进行充电，通过预设的放电频率将直流电作用于PMO感应线圈，对铸坯进行脉冲磁致振荡处理，从而提高铸坯的均质化程度。PMO技术装备总成如图1所示<sup>[24]</sup>。

如图2所示，选用 $\phi 5$  mm钨合金钢钻头对GCr15轴承钢铸坯内外弧侧径向截面试样进行钻屑取样，取样位置间隔10 mm。采用钢研纳克公司生产的型号为CS-2800碳硫仪对样品进行烧灼分析，得到铸坯径向碳含量分布信息。

对试验炉次PMO处理流和对比流铸锭进行取样加工，铸坯中心区域加工出尺寸为70 mm×30 mm×5 mm枝晶组织检验试样，选用400<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1 200<sup>#</sup>、1 500<sup>#</sup>、2 000<sup>#</sup>及W3.5金刚石抛光膏对该试样进行研磨抛光，然后采用70℃的过饱和苦味酸水溶液进行金相腐蚀，并利用Axio Imager A2m蔡司正置式光学显微镜对样品进

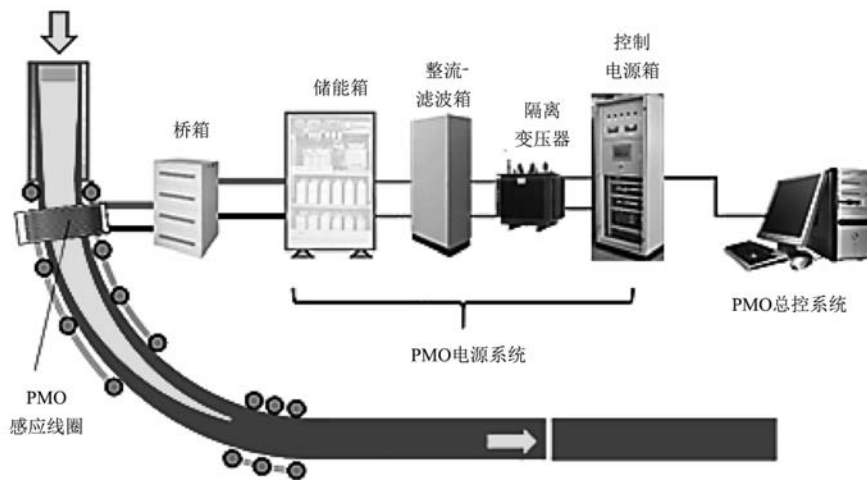


图1 PMO技术装备总成示意图

Fig. 1 Diagram of the PMO technology and equipment

行拍摄，从而获取枝晶形貌特征，拍摄区域尺寸为70 mm×10 mm。

再次将枝晶组织检验试样的表面用400<sup>#</sup>砂纸进行磨平，并确保试样表面无污渍，将装有检测试样的样品盒放入LIBSOPA-200载物台，分别对Cr、Mn、Si三种钢中元素进行元素面分布原位分析。LIBSOPA-200金属原位分析设置参数见表3，其中预剥蚀用于清除表面氧化层或残余污渍，并预热样品，剥蚀用于激发样品产生光谱，并检测元素含量。

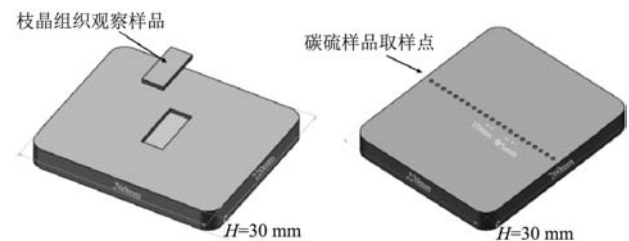


图2 枝晶组织观察取样方法和铸坯径向碳硫取样示意图

Fig. 2 Observation and sampling method of the dendrite structure and schematic diagram of radial carbon and sulfur sampling of the billets

表3 LIBSOPA-200设置参数  
Table 3 Setting parameters of the LIBSOPA-200

试样尺寸/(mm×mm×mm)	脉冲激光束直径/ $\mu\text{m}$	检测点间距/ $\mu\text{m}$	预剥蚀次数/次	剥蚀次数/次	试样表面粗糙度/ $\mu\text{m}$	扫描方式
70×30×5	300	2 000	50	20	$\leq 0.1$	逐行扫描

## 2 结果与讨论

### 2.1 PMO作用下 GCr15 轴承钢铸坯心部微观组织变化

如图3显示, GCr15轴承钢对比铸坯的心部存在明显缩孔缺陷, 缩孔面积达到 $76\text{ mm}^2$ , PMO处理铸坯中心缩孔面积为 $11\text{ mm}^2$ , 缩孔面积减小85.5%。对比铸坯的内外弧侧柱状晶生长至心部检测区域, 而PMO处理铸坯心部区域均由游离态枝晶组成。

根据“小钢锭”假说, 对比铸坯中发达的柱状晶和游离树枝晶有可能截断铸坯心部补缩通道, 导致连铸坯心部沿拉坯方向被分隔为一个个“小钢锭”, 这些小钢锭的上部因凝固收缩形成缩孔, 造成了铸坯心部不连续分布的缩孔缺陷<sup>[25-26]</sup>。PMO处理在促进形核的同时, 会在铸坯内部形成上环流区及下环流区, 增加钢液流动速率, 促进铸坯心部过热度加快散失, 因此坯壳至心部温度梯度减小<sup>[27]</sup>, 柱状晶失去生长驱动力, 柱状晶长度缩短, 铸坯提前进入CET转变, 凝固组织细化, 小钢锭形成的条件被破坏<sup>[28]</sup>。另外, 均温

的钢液造成铸坯心部的糊状凝固, 凝固收缩被分散到大量游离树枝晶之间, 形成显微孔隙, 而集中性缩孔显著减少甚至消除<sup>[29]</sup>。显微孔隙在后续轧钢中易于消除, 但大尺寸的缩孔难以通过轧钢消除, 有时甚至会遗留下来, 破坏产品完整性及性能均匀性<sup>[30]</sup>。

如图4所示, 对铸坯心部区域不同位置的初生相(即图中的树枝晶枝干, 但不包括枝晶间隙)面积进行了统计, 发现PMO处理铸坯心部初生相面积的均值为 $88\text{ mm}^2$ 、极差值为 $9\text{ mm}^2$ , 而对比铸坯的则为 $85\text{ mm}^2$ 、极差值 $14\text{ mm}^2$ 。这说明经过PMO均质化处理后, GCr15轴承钢心部区域元素富集程度减轻, 因此含碳量较低的初生相枝晶含量增加, 而且初生相在铸坯心部区域的分布也更加均匀。

PMO通过感应线圈在熔体中感生出脉冲电磁波, 这使得熔体固液界面处发生振荡效应, 当电磁搅拌力和电磁压力不断升高, 熔体内部形成Lorentz力, 这使得熔体内部液态钢液发生对流, 均匀熔体内部温度场, 心部过热迅速散失, 同时也减小了固液界面处的

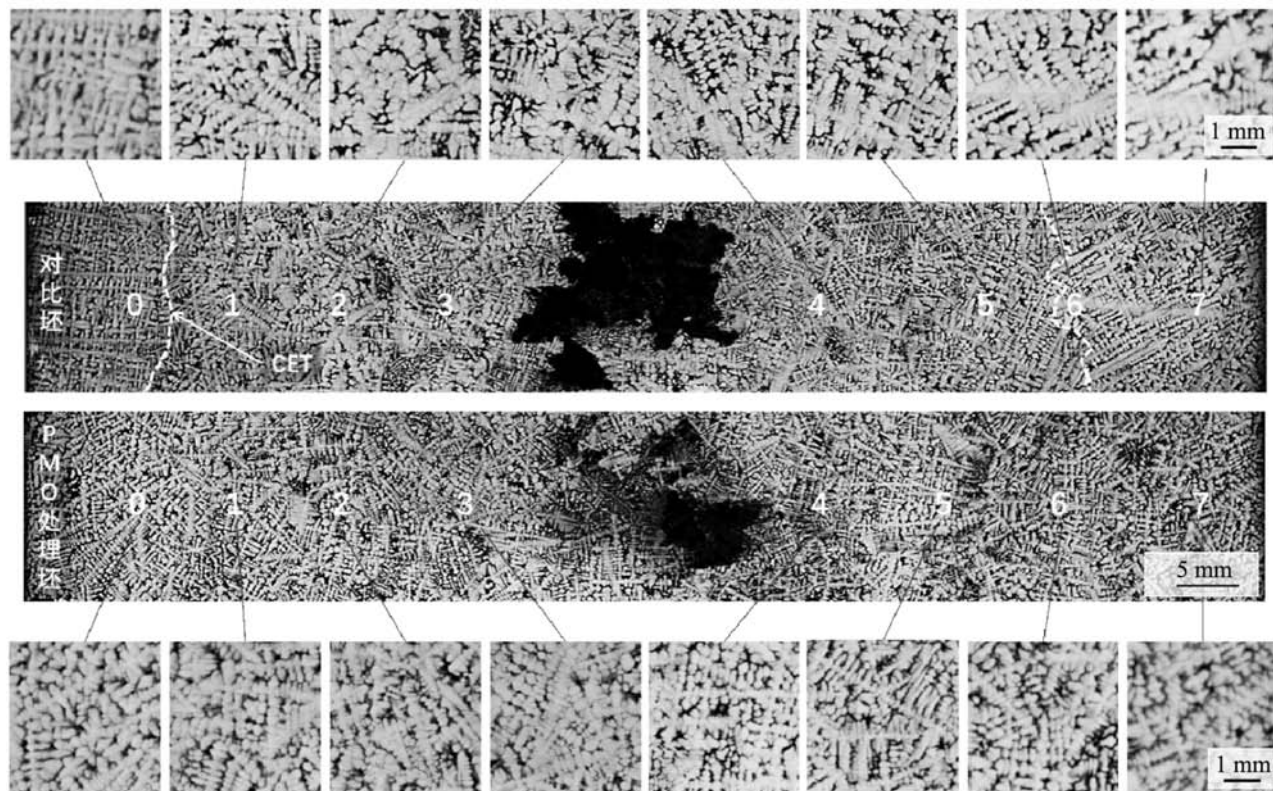


图3 铸坯心部不同位置的凝固组织

Fig. 3 The solidification microstructures in the cores of the GCr15 billets

温度梯度,抑制柱状晶的生长<sup>[23]</sup>。

$$f = J \times B \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{\mu} \left[ (B \nabla) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right] \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{\mu} (B \nabla) B \quad (3)$$

$$f_n = \frac{1}{2\mu} \nabla B^2 \quad (4)$$

式中:  $f$ 为洛伦兹力,  $f_c$ 为电磁搅拌力,  $f_n$ 为电磁压力,  $J$ 为感应电流,  $B$ 为脉冲磁场,  $\mu$ 为磁导率<sup>[23]</sup>。

一般变化的电场和磁场相互激发,脉冲磁致振荡就是使铸坯在快速变化的磁场作用下,可以将此过程看成是电磁场对铸坯的作用,铸坯作为导体,内部存在有电子,在电磁波的作用下,电流的焦耳热效应使得电磁波的能量不断出现衰减,故电磁波只能透入铸坯坯壳厚度,即PMO电磁力主要作用在铸坯固液界面处,这种现象称为趋肤效应<sup>[27]</sup>。

$$\frac{f_n}{f_c} = \frac{L}{S} \quad (5)$$

式中:  $L$ 为特征长度,  $S$ 为趋肤深度。由于趋肤效应的存在, GCr15轴承钢铸坯固液界面处产生了大量晶核并脱落,向铸坯内部游离;同时,由于脉冲电磁力的增大增加了铸坯内部钢液的对流,减小了沿铸坯轴向的温度梯度,均匀了铸坯内部温度场,减缓了沿热流相反方向生长的柱状晶的生长速度,最终增殖的等轴晶在铸坯中心区域堆积<sup>[27]</sup>。

在较高拉速和较高中间包过热度的条件下, PMO可以有效均匀铸坯内部温度场,使得铸坯内部过热快速散失,减小铸坯表面到心部的温度梯度。另外,脉冲磁致振荡将固液界面的晶核振落、或者通过焦耳热将枝晶熔断,通过PMO产生铸坯内的流动将晶核扩散到整个铸坯内部,实现铸坯中心等轴晶的增殖,这就是翟启杰等人提出的“结晶雨”机制<sup>[35]</sup>。

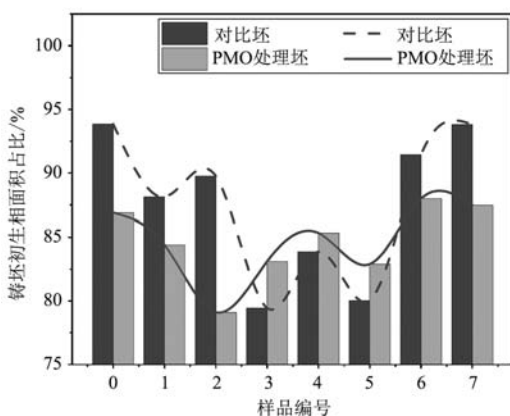


图4 铸坯心部各样品的初生相占比统计

Fig. 4 Proportions of the primary phases in the cores of the GCr15 billets

## 2.2 PMO对铸坯心部元素分布的影响

如图5所示,通过碳硫分析仪对GCr15轴承钢铸坯径向宏观碳偏析检测发现,PMO处理坯中心碳含量由对比坯的1.23%降为1.06%,铸坯心部C元素富集程度得到有效控制。另外,铸坯心部区域C元素的负偏析是影响铸坯整体C元素分布均匀性的重要指标,对比坯中心区域碳含量最小值为0.91%,铸坯整体C元素极差值达到0.32%,经过PMO均质化处理后,铸坯心部C元素负偏析程度减小,C元素最小值升至0.94%,C元素极差值控制在0.12%左右。

在GCr15轴承钢中,Cr的作用主要是提高轴承钢淬透性和耐磨性,Mn作为脱氧元素能够显著提高钢的淬透性,Si的加入可提高轴承钢疲劳寿命,并且可以改善轴承钢在淬回火状态下的韧性。但是,GCr15轴承钢中Cr和Mn元素都是碳化物形成元素,其含量越高,越容易形成粗大碳化物,而降低疲劳性能<sup>[31]</sup>,Si在高碳钢铸坯中的聚集容易导致碳化物形态发生变化,不利于碳化物在热处理时去除<sup>[32]</sup>。

对GCr15轴承钢铸坯心部区域进行原位分析(表4和图6)发现,PMO处理铸坯凝固中心Cr、Mn、Si元素偏析程度减小,元素含量最大值分别由对比坯的1.882%、0.398%、0.580%降为1.705%、0.389%以及0.300%,铸坯心部区域元素分布的标准偏差分别由0.157、0.026、0.09降为0.101、0.02、0.018。LIBSOPA-200光斑尺度为300 μm,在逐点扫描过程中,检测到碳化物等析出物或者溶质富集区的概率较高,因此,元素检测波动范围大于常规钻屑取样。

GCr15轴承钢工作环境较为复杂,承载着不同交变应力,因此需要具有足够强度、硬度、韧性、耐磨性等综合力学性能,这取决于化学成分、洁净度、组织形貌等因素<sup>[2]</sup>。由于钢液在凝固过程中受到选分结晶的影响,溶质元素容易在枝晶间富集,加之正温度梯度的存在,冷却过程中枝晶不断向铸坯心部生长,将富集溶质的金属液挤向铸坯心部区域,这就是铸坯凝固

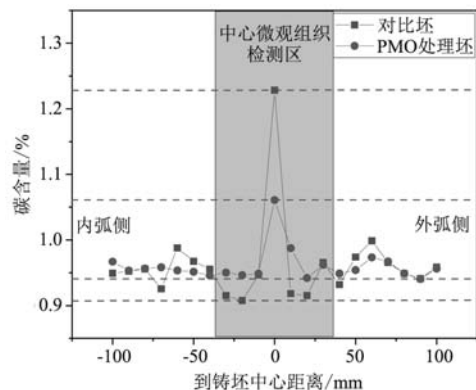
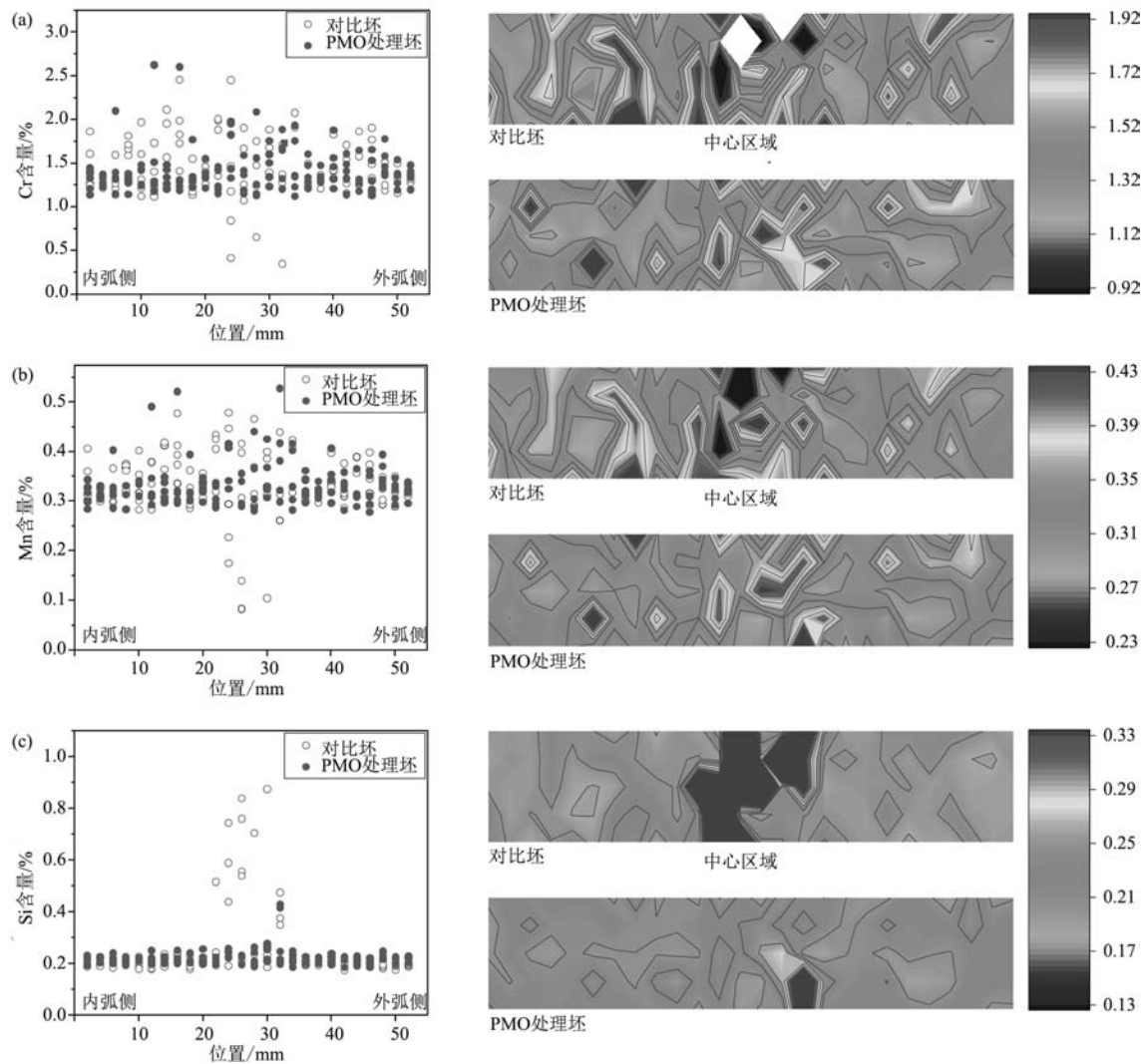


图5 GCr15铸坯径向C元素分布

Fig. 5 Radial distribution of the C element in the GCr15 billets

表4 GCr15轴承钢铸坯中心区域Cr、Mn、Si元素的含量  
Table 4 The contents of the Cr, Mn and Si elements in core zone of the GCr15 billets

参数	Cr		Mn		Si	
	对比坯	PMO处理坯	对比坯	PMO处理坯	对比坯	PMO处理坯
平均值/%	1.432	1.413	0.333	0.333	0.243	0.220
最大值/%	1.882	1.705	0.398	0.389	0.580	0.300
最小值/%	1.212	1.284	0.269	0.310	0.190	0.205
极差/%	0.670	0.420	0.130	0.079	0.390	0.095
标准偏差	0.157	0.101	0.026	0.020	0.090	0.018



(a) Cr元素径向分布; (b) Mn元素径向分布; (c) Si元素径向分布

图6 GCr15轴承钢铸坯心部Cr、Mn、Si元素分布

Fig. 6 Distributions of the Cr, Mn and Si elements in the cores of the GCr15 billets

中心区域溶质含量高于原始溶质含量的主要原因<sup>[33-34]</sup>。通过PMO的“结晶雨”效应，大量新晶核的游离和沉积促使铸坯心部得到有效补缩，促使溶质元素分布均匀性提高，这是轴承钢铸坯中心偏析得到改善的主要原因<sup>[35]</sup>。随着脉冲峰值电流的增加，在熔体内部感生

出的电磁力也随之增加，增大了熔体在凝固过程中的过冷度，提高了形核率；同时，在电磁力的作用下产生较为强烈的对流，使得型壁上的晶粒游离到铸坯心部，阻止了柱状晶生长的同时，也防止易偏析元素向心部的富集<sup>[27]</sup>。

从金属原位分析仪的检测结果来看,溶质元素在对比坯心部的含量远远大于铸坯平均成分,这一方面是因为对比铸坯心部溶质富集严重,另一方面,LIBSOPA-200金属原位分析的激光光斑直径仅300  $\mu\text{m}$ ,而铸坯心部枝晶间距通常在200  $\mu\text{m}$ 以上,若检测点处于枝晶间隙或包含析出相,其溶质含量就会远高于钢的平均成分。张等<sup>[36]</sup>发现PMO促进了枝晶间元素扩散速率,导致被处理区域的连铸坯枝晶间碳元素富集程度减轻。本次金属原位分析仪的检测结果也表明了PMO不仅能够有效改善铸坯心部的宏观偏析,也有利于减轻心部枝晶间溶质的富集,尽管该区域凝固时并没有PMO的直接作用。

### 3 结论

利用PMO技术对220 mm  $\times$  260 mm矩形GCr15轴承钢铸坯凝固过程进行均质化处理,并对比分析了同炉次对比铸坯的中心区域凝固组织及元素分布,得到以

下主要结论。

(1) PMO处理铸坯的中心缩孔面积大幅度减小,心部全部为等轴树枝晶,初生相含量高于对比坯,且分布更加均匀。这是由于PMO促使熔体内部形成Lorentz力,这使得熔体内部液态钢液发生对流,均匀熔体内部的温度场,心部过热迅速散失,同时也减小了固液界面处的温度梯度,抑制柱状晶的生长。

(2) PMO处理铸坯的C元素分布均匀性提高,心部正、负偏析程度改善明显。在PMO电磁力的作用下产生“结晶雨”效应,使得型壁上的晶粒游离到铸坯心部,阻止了柱状晶生长的同时,也防止易偏析元素向心部的富集。

(3) Cr、Mn、Si元素在PMO处理铸坯心部区域的分布离散程度明显减小,元素含量最大值分别由对比坯的1.882%、0.398%、0.580%降为1.705%、0.389%以及0.300%,铸坯心部区域元素分布的标准偏差分别由0.157、0.026、0.09降为0.101、0.02、0.018。

#### 参考文献:

- [1] 李明,赵永桥,何星,等.带状碳化物对GCr15轴承钢耐磨性能的影响[J].上海金属,2017,39(1):49-53.
- [2] 李昭昆,雷建中,徐海峰,等.国内外轴承钢的现状与发展趋势[J].钢铁研究学报,2016,28(3):1-12.
- [3] 卢彩玲.高品质GCr15轴承钢冶炼与连铸工艺研究[D].洛阳:河南科技大学,2017.
- [4] 王雷,麻哈.凝固组织遗传性及其在缺陷分析中的应用[J].金属热处理,2015,40(6):183-185.
- [5] 胡文豪,朱施利.连铸工艺参数对GCr15钢碳偏析的影响[J].钢铁,2010,45(11):48-52.
- [6] 王升干.GCr15轴承钢低倍检验孔洞的形成机理及控制研究[D].北京:北京科技大学,2016.
- [7] BAI L, WANG B, ZHONG H, et al. Experimental and numerical simulations of the solidification process in continuous casting of slab [J]. Metals, 2016, 6(3): 53.
- [8] ZHONG H, CHEN X, HAN Q, et al. A Thermal simulation method for solidification process of steel slab in continuous casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(5): 2963-2970.
- [9] CHO S, THOMAS B G. Electromagnetic forces in continuous casting of steel slabs [J]. METALS, 2019, 9(4714).
- [10] THOMAS B G. Review on modeling and simulation of continuous casting [J]. Steel Research International, 2018, 89(1): 1700312.
- [11] 周凤艳.连铸生产运行过程拉速优化方法研究[D].沈阳:东北大学,2012.
- [12] 王现辉.轴承钢连铸钢水凝固与二冷配水优化的研究[D].唐山:河北理工大学,2005.
- [13] 贾锋.保证连铸机对弧精度的技术[J].河北冶金,2004(4):44-45.
- [14] 赵宇光,梁云虹,秦庆东,等.外场在材料制备和加工过程中的应用[J].铸造,2004(4):257-261.
- [15] 林启勇,朱苗勇.连铸板坯轻压下过程压下率理论模型及其分析[J].金属学报,2007(8):847-850.
- [16] 祭程,关锐,朱苗勇,等.重载铁路钢轨钢连铸重压下工艺研发及应用[J].钢铁研究学报,2019,31(2):125-131.
- [17] LIAO X, ZHAI Q, LUO J, et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum [J]. ACTA MATERIALIA, 2007, 55(9): 3103-3109.
- [18] GONG Y, LUO J, JING J, et al. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation [J]. Materials Science and Engineering A.2008, 497(1-2): 147-152.
- [19] 刘海宁,王郢,李仁兴,等.PMO凝固均质化技术在20CrMnTi齿轮钢上的应用[J].钢铁,2019,54(6):65-74.
- [20] 任振海,朱富强,陈占领,等.拉速和脉冲磁致振荡对GCr15轴承钢铸坯质量的影响[J].上海金属,2020,42(1):91-94.
- [21] 王海洋,滕力宏,赵阳,等.PMO作用对连铸轴承钢凝固组织及碳化物的影响[J].连铸,2019,43(6):32-35,41.
- [22] 朱富强,任振海,陈占领,等.采用脉冲磁致振荡技术提高矩形AM2锚链钢连铸坯的均匀性[J].上海金属,2019,41(3):96-100.
- [23] 龚永勇,程书敏,钟玉义,等.脉冲磁致振荡凝固技术[J].金属学报,2018,54(5):757-765.
- [24] 仲红刚,刘海宁,徐智帅,等.脉冲磁致振荡凝固均质化技术及装备[J].钢铁,2019,54(8):174-180.

- [25] CHOUDHARY S K, GANGULY S, SENGUPTA A, et al. Solidification morphology and segregation in continuously cast steel slab [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 312-321.
- [26] CHOUDHARY S K, GANGULY S. Morphology and segregation in continuously cast high carbon steel billets [J]. ISIJ International, 2007, 47 (12): 1759-1766.
- [27] 郝军利, 赵静, 仲红刚, 等. PMO作用下连铸二冷区电磁场-流场-温度场的数值模拟 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24 (3): 412-421.
- [28] 李殿中, 张毅, 王君卿. 等轴晶凝固过程的数学模型 [J]. 铸造, 1994 (10): 12-17.
- [29] 刘芳, 张璐云. 脉冲磁致振荡下纯铝凝固磁场与流场分布的数值模拟 [J]. 铸造, 2012 (3): 285-290.
- [30] 李晨希, 郭天明, 李荣德, 等. 二次枝晶臂间距的研究 [J]. 铸造, 2004 (12): 1011-1014.
- [31] 赵宇, 陈莉, 艾亮. GCr15钢碳化物细化处理工艺及其性能的影响 [J]. 轴承, 2006 (2): 24-27.
- [32] 王维青, 潘复生, 吴立志, 等. 硅对热处理态M2高速钢中共晶碳化物的影响 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34 (11): 44-49.
- [33] M C F. Our understanding of macrosegregation.past and present [J]. ISIJ International, 2000.
- [34] S O, M Y, Y Y. Influence of roll bending on center segregation in continuously cast slabs [J]. ISIJ International, 1991.
- [35] 张云虎, 仲红刚, 翟启杰. 脉冲电磁场凝固组织细化和均质化技术研究与应用进展 [J]. 钢铁研究学报.2017, 29 (4): 249-260.
- [36] 张伶俐, 石昊, 徐衡, 等. PMO对连铸GCr15轴承钢枝晶生长的影响 [J]. 上海金属, 2019, 41 (5): 73-80.

---

## Effect of PMO on the Microstructure and Element Distribution in the Core of GCr15 Bearing Steel Rectangular Billet

LIU Hai-ning<sup>1</sup>, LI Hui-cheng<sup>2</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, XU Xuan-xuan<sup>2</sup>, CHEN Ting-jun<sup>2</sup>, XU Zhi-shuai<sup>1</sup>

(1. Center for Advanced Solidification Technology, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Zenith Steel Group Company Limited, Changzhou 213011, Jiangsu, China)

### Abstract:

In order to improve the core microstructure quality of the 220 mm×260 mm GCr15 bearing steel rectangular cast billet, improve the uniformity of the element distribution, and stabilize the quality of the bearing product, the cast billet was processed by pulse magneto-oscillation (PMO) technology during the solidification process. Sampling test results showed that compared to the cast billet (comparative billet) that has not been processed by the PMO technology, the central shrinkage of the PMO-treated billet was significantly reduced, and the fluctuation of the proportion of the primary phase of the solidification microstructure was significantly reduced, and the two-dimensional distributions of C, Cr, Mn and Si elements were more uniform.

### Key words:

PMO; GCr15 bearing steel; solidification microstructure; element distribution