

## Ce-Mg合金加入对GCr15轴承钢夹杂物和凝固组织的影响

邹涛,王鹏,董艳伍,姜周华  
(东北大学冶金学院,沈阳110819)

**摘要:**研究了加Ce(0~0.32%)-Mg(0~0.04%)合金对GCr15轴承钢的铸态夹杂物和凝固组织的影响。结果表明:添加Ce-Mg合金,能够促使夹杂物改性,生成大量的形状较规则,尺寸细小,分布弥散的Ce、Mg夹杂物;并且当0.016% [Ce]、0.002% [Mg]时,夹杂物更为细小弥散。在凝固组织方面,随着Ce-Mg合金的增加,钢的铸态组织碳化物分布更为均匀,网状碳化物的网状结构变得更加纤薄,当0.016% [Ce]、0.002% [Mg]时,珠光体片层更为纤薄,片层间距更小。Ce-Mg合金的添加能够显著减弱钢中C和Cr在枝晶间与枝晶干的合金元素偏析,减少枝晶间距,阻碍枝晶的粗化。

**关键词:**GCr15钢;Ce-Mg合金;夹杂物;凝固组织;珠光体片层

### Effect of Adding Ce-Mg Alloy on Inclusion and Solidification Microstructure of GCr15 Bearing Steel

Zou Tao, Wang Peng, Dong Yanwu, Jiang Zhouhua  
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819)

**Abstract:** The effects of adding Ce(0-0.32%)-Mg(0-0.04%) alloy on the as-cast inclusions and solidification organization of GCr15 bearing steel are investigated. The results show that the addition of Ce-Mg alloy can lead to the modification of inclusions and the generation of a large number of Ce-and Mg inclusions with regular shape, fine size and dispersed distribution; and the inclusions are more fine and diffuse as 0.016% [Ce] and 0.002% [Mg]. With the increase of the mass fraction of Ce-Mg alloy, the distribution of carbides in the as-cast structure of steel becomes more uniform and the reticular carbide network structure becomes thinner, and as 0.016% [Ce] and 0.002% [Mg], the pearlite lamellae is the thinner and the lamellae spacing is the minimized. The addition of Ce-Mg alloy can significantly reduce the segregation of C and Cr elements between dendrites and dendrite stem, and reduce the dendrite spacing to hinder the coarsening of dendrites.

**Key Words:** GCr15 Steel; Ce-Mg Alloy; Inclusions; Solidification Microstructure; Pearlite Lamellae

轴承钢是衡量一个国家机械工业化水平高低的一个重要标志<sup>[1-3]</sup>。目前,应用最广泛的轴承钢是GCr15轴承钢。虽然我国普通GCr15轴承钢已经达到了较高的洁净度,但由于是连铸工艺生产,其偏析问题仍然比较严重,不能用于特种轴承的使用<sup>[4-5]</sup>。如何减少偏析,细化晶粒,提高铸锭凝固组织质量是一个急需解决的问题。

大量研究表明,稀土Ce元素和镁元素都有利于改善钢材的性能和质量。Jiao等人<sup>[6]</sup>通过比较不同Ce含量的高强钢的铸态组织,发现Ce的加入使得铸锭凝固组织二次枝晶间距和共晶碳化物含量均降低,显著改善碳化物在铸锭中的宏观分布。Pan

等人<sup>[7]</sup>添加Ce到SS400钢中,发现Ce的添加会对夹杂物类型进行改性,生成尺寸细小的Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物。Jiang等人<sup>[8]</sup>研究了SKS51钢中Mg含量对洁净度和组织的影响,研究发现随着Mg含量的增加,铸态钢凝固组织二次枝晶间距明显减少,夹杂物尺寸明显减小。但目前针对稀土Ce元素与Mg元素共同添加对轴承钢夹杂物和凝固组织的研究较少。

本研究围绕GCr15轴承钢夹杂物、凝固组织、合金元素偏析和晶粒度等方面开展,分析添加Ce-Mg合金对GCr15轴承钢的影响及其作用机制,为提高GCr15轴承钢铸锭质量提供一种思路。

基金项目:国家自然科学基金(52174303),中央高校基本科研业务费(N2125026)

作者简介:邹涛(1995-),男,博士; E-mail: zout1995@163.com; 收稿日期:2022-09-05

通讯作者:董艳伍(1978-),男,教授,博士生导师; E-mail: dongyw@smm.neu.edu.cn

## 1 实验准备

### 1.1 实验材料

本实验采用东北大学特殊钢冶金研究所 25 kg 真空感应炉 (ZG-0.025) 冶炼不同 Ce-Mg 合金质量分数的 GCr15 轴承钢, 其基础成分见表 1 (所用实验钢均为原料冶炼所得)。为了尽可能降低实验钢杂质的质量分数, 本实验冶炼过程使用原料均为高纯原料, 包括工业纯铁、金属铬、石墨碳、电解锰、稀土 Ce 和含镁 20% 的镍镁合金。本实验设计三种添加不同 Ce-Mg 合金含量的用钢, 具体添加 Ce-Mg 合金成分见表 2。冶炼实验钢种成分使用 ARL4460 直读光谱仪进行检测。

### 1.2 夹杂物检测

表 1 试验 GCr15 钢化学成分/%

C	Si	Mn	Cr
0.95	0.21	0.27	1.56

表 2 试验 GCr15 钢 Ce 和 Mg 的加入量/%

实验钢	Ce	Mg
0 <sup>#</sup>	0	0
1 <sup>#</sup>	0.016	0.002
2 <sup>#</sup>	0.320	0.004

从距离铸锭底部 150 mm 的中心截面处进行取样, 通过抛光后, 利用 ASPEX 软件对夹杂物进行自动分析统计, 为了避免偶然性对夹杂物数量的影响, 在每个试样不同区域选取三个视场统计, 并取平均值, 每个视场的统计面积为 1 mm<sup>2</sup>, 且统计尺寸大于 1 μm 的夹杂物。利用扫描电镜 (JSM-7800F) 对夹杂物的形貌进行观察, 并采用 EDS 能谱对典型夹杂物的种类和成分进行检测。

### 1.3 凝固组织检测

在不同炉次向上距离铸锭底部 150 mm 处沿横截面切割出厚度为 10 mm 的圆形薄片备用。在薄片的中心处截取 10 mm × 10 mm × 8 mm 的金相试样, 经过抛光干燥处理备用。选用 4% 的硝酸酒精溶液作为腐蚀剂, 腐蚀时间约为 15 s。腐蚀完成后, 使用 Olympus DSX510 金相显微镜观察其铸态组织。

将所截取试样先用浓盐酸腐蚀 4 ~ 5 s 进行枝晶腐蚀, 再利用场发射电子探针 (EPMA, JXA-8530F) 对枝晶干与枝晶间的 C 和 Cr 元素进行定量分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 夹杂物的影响

#### 2.1.1 类型转变

如图 1 所示为 0<sup>#</sup> 试样中典型夹杂物的形貌图。0<sup>#</sup> 试样中主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物以及大量

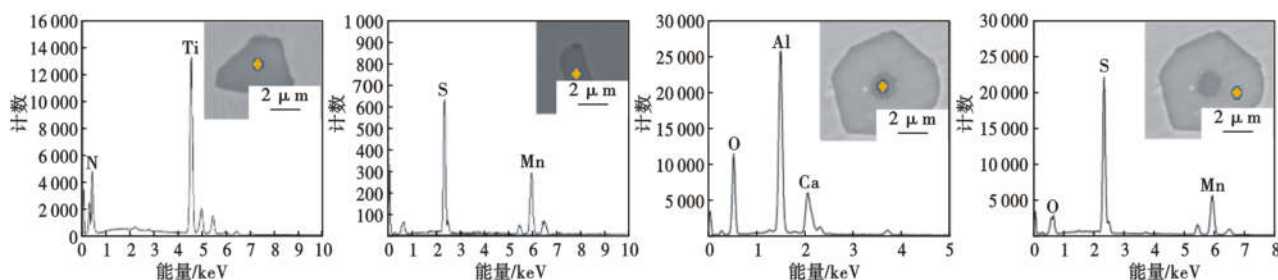


图 1 0<sup>#</sup> GCr15 钢夹杂物种类形貌 (未加 Ce, Mg)

Fig. 1 Morphology of typical inclusions in 0<sup>#</sup> GCr15 steel (non-added Ce, Mg)

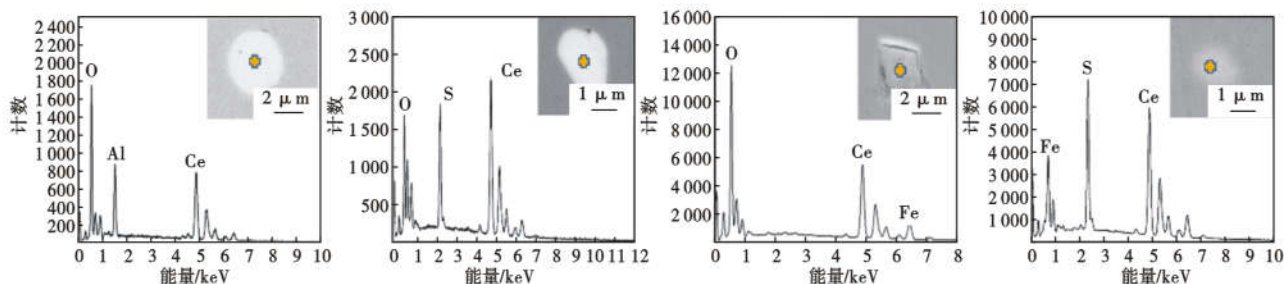


图 2 (a) 1<sup>#</sup> (0.016% Ce, 0.002% Mg) 和 (b) 2<sup>#</sup> (0.32% Ce, 0.004% Mg) GCr15 钢夹杂物种类形貌

Fig. 2 Morphology of typical inclusions in GCr15 steel: (a) 1<sup>#</sup> (0.016% Ce, 0.002% Mg) and (b) 2<sup>#</sup> (0.32% Ce, 0.004% Mg)

的TiN以及MnS夹杂;同时,MnS夹杂易以细小的 $Al_2O_3$ 夹杂物为形核核心,包裹在 $Al_2O_3$ 夹杂的周围。

加入Ce-Mg合金后,如图2所示,0#试样中出现的夹杂物发生变性现象,在1#和2#试样中发现了一定数量的铝酸稀土均质复合夹杂物,此类夹杂物为稀土Ce对钢中 $Al_2O_3$ 变性所形成的,其硬度较低、膨胀系数较大,能减轻钢中 $Al_2O_3$ 的危害,提高钢性能,这与Li等人的研究<sup>[9]</sup>结果完全一致。

随着Ce-Mg合金质量分数的增加,2#试样中稀土硫化物夹杂占比迅速升高,在扫描电镜观察中可以发现,大量小球状稀土氧化物和稀土硫化物取代了0#试样中大量出现的细长的MnS夹杂物,该类夹杂物熔点比MnS高,不易变形。

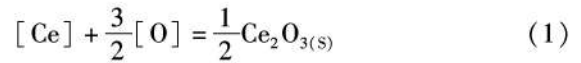
### 2.1.2 尺寸与密度

如图3所示为添加Ce-Mg合金前后钢种夹杂物尺寸与密度的对比。从图3中可知,随着Ce-Mg合金的加入,夹杂物密度出现先增加后减少的趋势;观察夹杂物的尺寸分布可以发现,尽管1#试样较0#试样夹杂物密度有所增加,但其夹杂物尺寸明显得到了细化,<5 μm的夹杂物数量占比较0#试样钢种增加了33.57%。随着Ce-Mg合金质量分数的继续增

加,2#试样较0#试样夹杂物密度降低了29.01%,<5 μm的夹杂物数量占比较0#试样钢种增加了23.79%。证明了Ce-Mg合金质量分数的增加可以减少大尺寸夹杂物数量,起到细化夹杂物的作用。

### 2.1.3 热力学计算

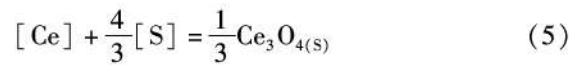
应用FactSage 8.0热力学计算软件对0#-2#试样在冷却和凝固过程中夹杂物析出的演变过程进行了理论计算,计算结果如图4所示。当GCr15轴承钢中不含Ce-Mg合金时,如图4(a)所示,其夹杂物类型主要为 $Al_2O_3$ 、MnS和TiN。当加入Ce-Mg合金后,如图4(b)(c)所示,可以发现,钢中的 $Al_2O_3$ 与MnS大尺寸夹杂物质量分数迅速减少,取而代之出现Ce与Mg的氧硫化物。其中主要发生如下热力学反应<sup>[10]</sup>:



$$\Delta G^\theta = (-71\,380 + 179.74T) \quad J \cdot mol \quad (2)$$



$$\Delta G^\theta = (-422\,100 + 120.38T) \quad J \cdot mol \quad (4)$$



$$\Delta G^\theta = (-497\,670 + 146.3T) \quad J \cdot mol \quad (6)$$



$$\Delta G^\theta = (-731\,400 + 239.68T) \quad J \cdot mol \quad (8)$$

随着Ce-Mg合金质量分数的增加,会先出现1#试样夹杂物种类增多的现象,夹杂物尺寸的下降致使夹杂物密度会有一个较为明显的提升;Ce-Mg合金质量分数继续增加时,如2#试样夹杂物种类减少

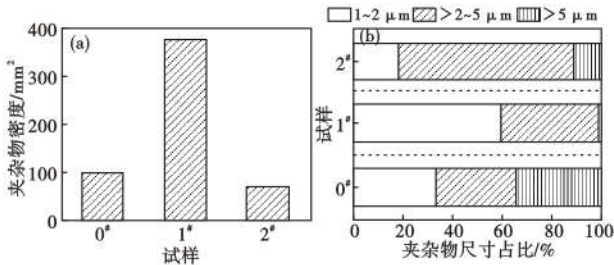


图3 试验钢夹杂物数量与尺寸分布

Fig. 3 Quantity and size distribution of inclusions in test steel

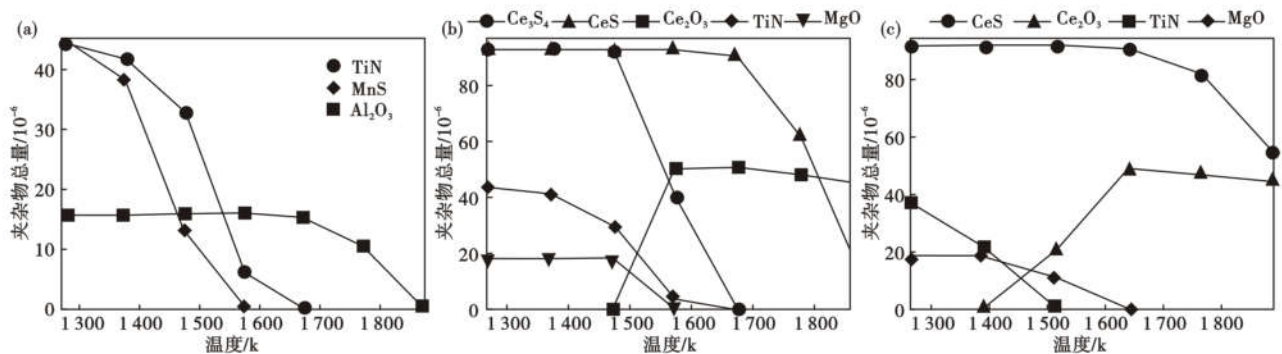


图4 FactSage计算钢中夹杂物析出结果:(a) 0#试样(未加Ce, Mg); (b) 1#试样(0.16% Ce, 0.002% Mg); (c) 2#试样(0.32% Ce, 0.004% Mg)

Fig. 4 Calculation results by FactSage for inclusion precipitation: (a) sample 0# (non-added Ce, Mg); (b) sample 1# (0.16% Ce, 0.002% Mg) and (c) sample 2# (0.32% Ce, 0.004% Mg)

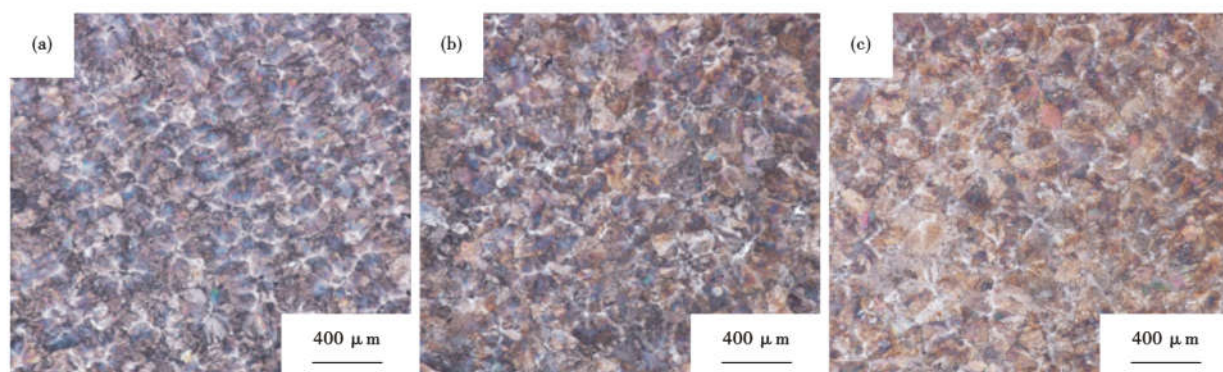


图 5 试验钢铸态组织形貌: (a) 0<sup>#</sup>试样(未加 Ce, Mg); (b) 1<sup>#</sup>试样(0.16% Ce, 0.002% Mg); (c) 2<sup>#</sup>试样(0.32% Ce, 0.004% Mg)

Fig. 5 Morphology of as-cast structure of test steels: (a) sample 0<sup>#</sup> (non-added Ce, Mg); (b) sample 1<sup>#</sup> (0.16% Ce, 0.002% Mg) and (c) sample 2<sup>#</sup> (0.32% Ce, 0.004% Mg)

至趋于稳定, 这样夹杂物密度会有所下降, 同时夹杂物得到很大程度的细化。

## 2.2 凝固组织的影响

### 2.2.1 网状碳化物

如图 5 所示为实验钢铸态组织图。从图 5 中可以发现, 0<sup>#</sup>试样图 5(a), 网状碳化物比较明显, 共晶碳化物分布密集, 数量较多, 且颗粒较大。随着 Ce-Mg 合金质量分数的增加, 1<sup>#</sup>试样开始出现网状碳化物断裂的现象, 共晶碳化物数量有所减少。随着 Ce-Mg 合金含量的继续增加, 2<sup>#</sup>试样网状碳化物破碎程度更加完全, 鱼骨状碳化物增多, 碳化物分布更为均匀, 大片存在的碳化物更少。同时, 网状碳化物的网状结构变得更加纤薄, 共晶碳化物更加稀少细小。

分析原因, 在 GCr15 轴承钢中添加适量的 Ce-Mg 合金后, 对于碳化物的形态、分布、种类等方面有着明显的影响。而稀土元素能够改变共晶碳化物形态、分布、种类的主要原因是在钢液凝固过程中, 稀土元素能富集在高熔点碳化物的周围, 阻止碳化物沿晶界长大, 使碳化物细化<sup>[11]</sup>。另一方面, 由于稀

土元素在晶界处富集, 降低了晶界能, 使碳化物难以在晶界上形核从而阻止了碳化物沿晶界的析出和长大, 因此, 改善了碳化物的形态, 使其变为不连续分布的碳化物。此外, Ce 在钢液中具有减轻碳元素活度的作用, 即活度  $e_C^{Ce} < 0$ , 由于碳元素的活度降低, 将使得由于 C 元素等合金元素偏析达到共晶成分而发生的共晶反应要在较高的固相分数下才能发生, 因此, 钢中共晶碳化物的量大幅减少<sup>[12]</sup>。

镁元素能够改变共晶碳化物形态、分布和种类的主要原因是镁的原子半径比铁的原子半径要大, 当镁原子进入铁基体时会引起较大的晶格畸变, 随之产生的畸变能使系统的自由能升高, 大半径的镁原子为了保持最低的系统自由能则在晶界偏聚<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2.2 珠光体片层

片层状珠光体的片层间距是衡量铸锭凝固组织优异性的一种有效方式<sup>[15]</sup>。为了判断铸锭中添加不同含量的稀土镁对珠光体片层间距有无影响, 用场发射扫描电镜 (Quanta250FEG) 放大 20000 倍观

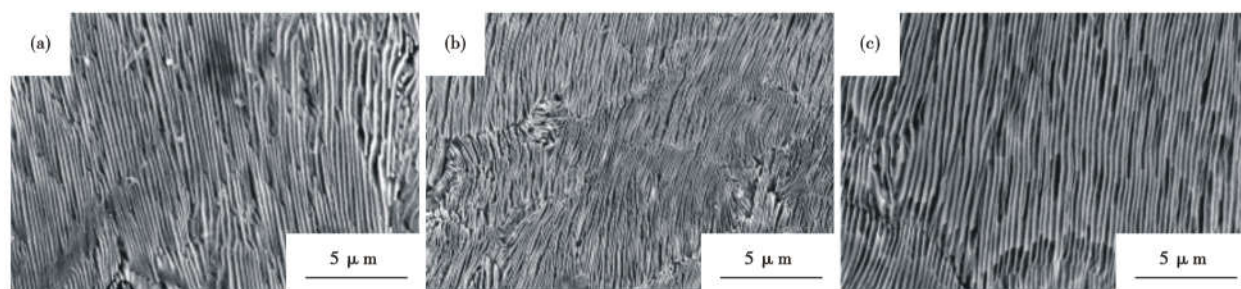


图 6 试验钢铸态组织片层形貌: (a) 0<sup>#</sup>试样(未加 Ce, Mg); (b) 1<sup>#</sup>试样(0.16% Ce, 0.002% Mg); (c) 2<sup>#</sup>试样(0.32% Ce, 0.004% Mg)

Fig. 6 Lamellar morphology of as-cast microstructure of test steels: (a) sample 0<sup>#</sup> (non-added Ce, Mg); (b) sample 1<sup>#</sup> (0.16% Ce, 0.002% Mg) and (c) sample 2<sup>#</sup> (0.32% Ce, 0.004% Mg)

测珠光体形貌,利用IPP 6.0软件对珠光体片层间距进行测量。不同Ce-Mg合金质量分数试验钢的珠光体组织如图6所示。

根据如图7所示的测量结果可以发现,随着Ce-Mg合金质量分数的增加,珠光体片层间距先减小后增加。在1#试样珠光体片层间距达到了最细,为0.142 μm,当Ce-Mg质量分数继续增加,Ce-Mg不再起到细化作用,珠光体片层间距反而会变大。

分析原因,GCr15属于过共析钢,其显微组织主要为珠光体和先共析渗碳体。对于珠光体片层间距起决定作用的因素为珠光体的形成温度,连续冷却条件下,冷却速度越快,GCr15轴承钢内珠光体形成温度越低,其过冷度越大,珠光体片层间距越小。碳钢中片层间距与过冷度的关系满足下列经验公式<sup>[16]</sup>:

$$S = \frac{8.02}{\Delta T} \times 10^{-3} \quad (9)$$

式中:S表示珠光体片层间距,μm;ΔT为过冷度,K。

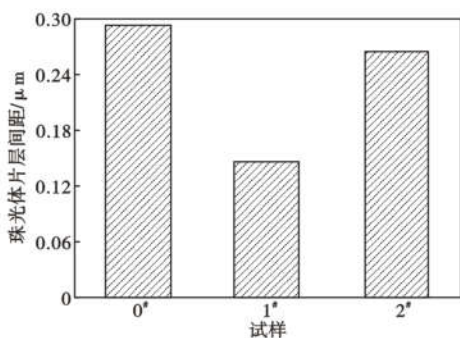


图7 0#~2#试样珠光体片层间距

Fig.7 Schematic diagram of pearlite layer spacing of sample 0#~2#

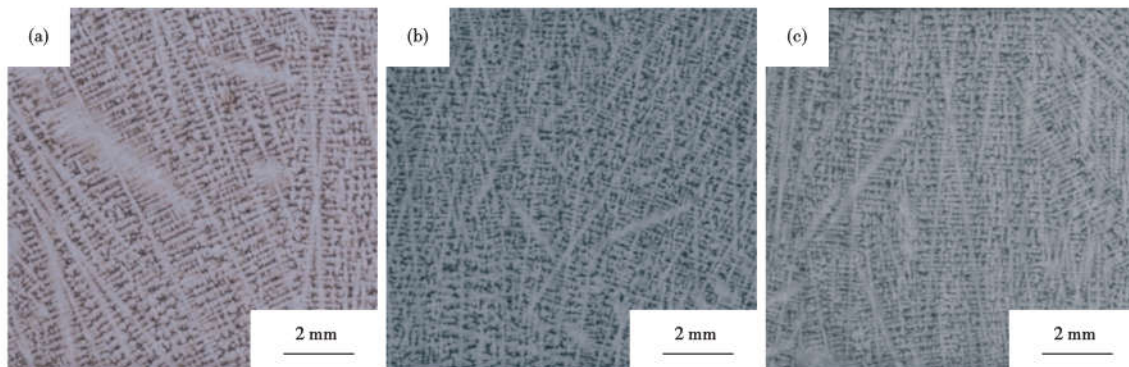


图8 试验钢铸态组织枝晶形貌:(a) 0#试样(未加Ce,Mg);(b) 1#试样(0.16% Ce,0.002% Mg);(c) 2#试样(0.32% Ce,0.004% Mg)

Fig.8 Dendrite morphology of as-cast microstructure of test steel:(a) sample 0#(non-added Ce,Mg);(b) sample 1#(0.16% Ce,0.002% Mg) and (c) sample 2#(0.32% Ce,0.004% Mg)

有研究指出,稀土原子与碳原子相差较大的电负性让稀土原子与碳原子之间有强的吸引力,而稀土易在奥氏体晶界上偏聚,故延缓了碳原子的扩散速度,进而延缓了渗碳体的生长,从而导致珠光体的孕育期变长,进而增大了珠光体形成的过冷度,导致片层间距减小<sup>[17]</sup>。而当GCr15轴承钢中稀土质量分数较高时,稀土元素Ce在奥氏体晶粒内固溶的区域易产生大量的碳元素的偏聚,从而导致了需要碳元素扩散生长的渗碳体无法正常长大,反而导致了珠光体片层间距的变大。也有学者指出<sup>[18]</sup>,奥氏体晶界处偏聚的稀土元素导致珠光体转变的位向关系产生破坏,易致使珠光体组织的无序生长,从而致使珠光体片层间距的扩大。

### 2.2.3 枝晶间距

不同Ce-Mg合金含量的铸锭枝晶形貌如图8所示。从图8中可以明显观察到加入Ce-Mg合金后,铸锭的枝晶间距出现明显的下降。

图9为铸锭枝晶间距的统计结果图。从图9统计结果可知,Ce-Mg合金的加入会使GCr15轴承钢的枝晶间距减小,添加微量Ce-Mg合金后,1#试样相比0#试样枝晶间距减小25.7%,2#试样相比1#试样枝晶间距减小9.9%,随着Ce-Mg合金质量分数的增加,枝晶间距持续降低。

文献<sup>[19]</sup>认为,稀土对枝晶间距的减小作用主要是成分过冷造成的。成分过冷越大,一次枝晶的固液界面愈不稳定,愈容易萌发出二次枝晶。另外,研究发现,凝固早期形成的二次枝晶在凝固后期容易发生粗化,凝固粗化的过程需要进行溶质扩散,而稀土元素容易在固液界面富集,从而增大了与其它元素的交互扩散系数,延缓了溶质扩散,从而阻碍了

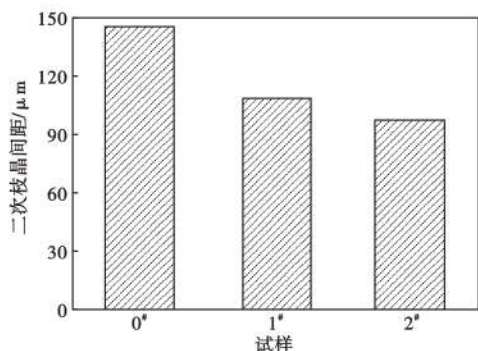


图9 加 Ce-Mg 对试验 GCr15 钢二次枝晶间距的影响  
Fig.9 Effect of adding Ce-Mg on secondary dendrite spacing of test GCr15 steel

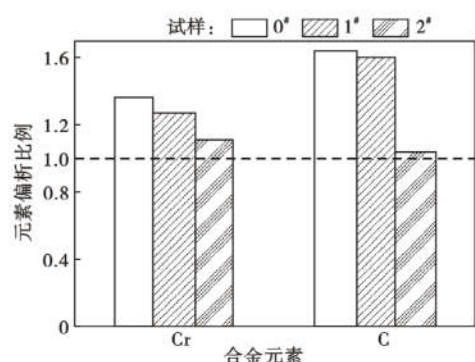


图10 加 Ce-Mg 对试验 GCr15 钢 Cr 和 C 偏析率的影响  
Fig.10 Effect of adding Ce-Mg on segregation of Cr and C in test GCr15 steel

二次枝晶的粗化行为,继而减小了二次枝晶间距<sup>[20-21]</sup>。

#### 2.2.4 凝固偏析

枝晶偏析严重的轴承钢在经过锻造和轧制后容易形成带状组织,造成轴承钢材料组织的不均匀性与材料的各向异性,还会在组织间形成组织应力或导致微裂纹产生<sup>[22]</sup>。不同试验钢的各元素偏析比情况如图 10 所示,可以看出,随着 Ce-Mg 合金质量分数的增加,Cr 元素以及 C 元素的偏析比有明显下降趋势,Cr 元素的偏析比从 0# 试样的 1.36 下降到 2# 的 1.12;0# 试样中 C 元素的偏析比为 1.64,而 2# 试样 C 元素的偏析下降到了 1.04,有较为明显的降低。

分析原因,合金元素偏析的减轻与二次枝晶间距的细化有明显的关系,合金元素易富集在二次枝晶间距之中,在初次枝晶组织中,二次枝晶相当于一个个晶粒,而枝晶间相当于它的晶粒边界,二次枝晶

间距的减小,枝晶臂的细化相当于增大了晶粒界面面积,从而减弱了合金元素的微观偏析。另外,文献[19-23]研究指出,稀土元素在钢中除了与夹杂物反应生成稀土夹杂物,还有一部分稀土元素会溶解于钢液并在凝固过程中在固液界面上进行溶质的平衡分布,一部分稀土原子固溶在固相,另一部分富集在固液界面前沿,造成合金元素在钢液中分配系数 K 的改变,在一定凝固方式下,合金元素在枝晶干的浓度满足下式:

$$C_s = C_0 K_0 (1 - \alpha) \quad (10)$$

式中: $C_0$  为合金的原始浓度, $\alpha$  与扩散系数有关,在一定的凝固条件下可视为常数。

从式(10)可知,在一定的凝固条件下,合金元素枝晶偏析减小的原因是稀土增大了合金元素的值。在本实验中由于 GCr15 轴承钢中 C 和 Cr 合金元素的质量分数较高,偏析较严重,故加入 Ce-Mg 对其枝晶间质量分数的降低作用较为显著。

### 3 结论

(1) GCr15 轴承钢中添加 Ce-Mg 合金,能使夹杂物改性,使轴承钢内生成大量的形状较规则,尺寸细小,分布弥散的稀土夹杂物。当  $[Ce] = 0.016\%$ ,  $[Mg] = 0.002\%$  时,夹杂物更为细小弥散。

(2) GCr15 轴承钢的铸态组织主要为珠光体和一些网状碳化物,随着 Ce-Mg 合金质量分数的增加,网状碳化物破碎明显,鱼骨状碳化物增多,碳化物分布更为均匀,大片存在的碳化物更少,且网状碳化物的网状结构变得更加纤薄。

(3) 随着 Ce-Mg 合金质量分数增加,GCr15 轴承钢内珠光体片层间距呈先减小后增加的趋势,当  $[Ce] = 0.016\%$ ,  $[Mg] = 0.002\%$  时,珠光体片层更为纤薄,片层间距更小。

(4) 随着 Ce-Mg 合金质量分数增加,GCr15 轴承钢的枝晶间距呈逐渐下降的趋势,稀土能阻碍枝晶粗化,稀土镁质量分数越高,枝晶间距越小。

(5) 添加 Ce-Mg 合金能显著减小 GCr15 轴承钢的微观偏析,随着 Ce-Mg 合金质量分数上升,GCr15 轴承钢内元素 C 和 Cr 偏析比下降明显,Ce-Mg 合金的添加能显著的减弱 GCr15 轴承钢中 C 和 Cr 元素在枝晶间与枝晶干的合金元素偏析。

#### 参考文献

[1] Cheng G, L. Zhang, Y. Ren. Characterization and evolution of non-metallic inclusions in GCr15 bearing steels during cooling and solidi-

fication. Ironmak. Steelmak. 2020; 47(10): 1217-1225.

[2] 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.
- [3] Wang Y, Yang Z, Zhang F, et al. Microstructures and properties of a novel carburizing nanobainitic bearing steel. *Mater. Sci. Eng. : A.* 2020; 777:139086.
- [4] Qian D, Wang H, Pan L, et al. Obtaining ultrafine spheroidized carbides by combining warm deformation with divorced eutectoid transformation in GCr15 bearing steel. *Mater. Res. Express.* 2020; 7(4):046505.
- [5] 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.
- [6] Jiao W, Li H, Feng H, et al. Evolutions of Micro- and Macrostructure by Cerium Treatment in As-Cast AISI M42 High-Speed Steel. *Metall. Mater. Tran. B.* 2020; 51(5): 2240-2251.
- [7] Pan F, Chen H, Su Y, et al. Inclusions properties at 1673 K and room temperature with Ce addition in SS400 steel. *Sci. Rep.* 2017; 7(1): 2564.
- [8] Jiang Z, Xu G, Li Y, et al. Effect of Ultra-high Magnesium on SKS51 Liquid Steel Cleanliness and Microstructure. *ISIJ Int.* 2019; 59(7): 1234-1241.
- [9] Li H, Yu Y, Ren X, et al. Evolution of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions by cerium treatment in low carbon high manganese steel. *J. Iron Steel Res. Int.* 2017; 24(9): 925-934.
- [10] Li X, Jiang Z, Geng X, et al. Evolution Mechanism of Inclusions in H13 Steel with Rare Earth Magnesium Alloy Addition. *ISIJ Int.* 2019; 59(9): 1552-1561.
- [11] Duan J, Jiang Z, Fu H. Effect of RE-Mg Complex Modifier on Structure and Performance of High Speed Steel Roll. *J. Rare Earths.* 2007; 25: 259-263.
- [12] Hufenbach J, Helth A, Lee M, et al. *Mater. Sci. Eng. : A,* 2016; 674: 366-374.
- [13] Zheng S, Gong Y, Zhao D, et al. Action of Magnesium on Carbide Spheroidization in Annealed Bearing Steel. *Adv. Mater. Res.* 2012; 476-478; 129-133.
- [14] Dadkhah H. Microstructure of Cast Ultrahigh Carbon Steel (UHCS) Modified via Fe-Si-Mg-Ca-RE. *Trans. Indian Inst. Met.* 2014; 67(6): 1001-1004.
- [15] Korda A, Mutoh Y, Miyashita Y, et al. Effects of pearlite morphology and specimen thickness on fatigue crack growth resistance in ferritic-pearlitic steels. *Mater. Sci. Eng. A,* 2006, 428(1-2): 262-269.
- [16] Saito Y. Modelling of microstructural evolution in thermomechanical processing of structural steels. *Mater. Sci. Eng. A.* 1997, 223(1-2): 134-145.
- [17] Hsu T. Effects of Rare Earth Element on Isothermal and Martensitic Transformations in Low Carbon Steels. *ISIJ Int.* 1998, 38(11): 1153-1164.
- [18] Lewandowski J, Thompson, A. Effects of the prior austenite grain size on the ductility of fully pearlitic eutectoid steel. *Metall. Trans. A.* 1986, 17(3): 461-472.
- [19] Nuri Y, Ohashi T, Hiromoto T, et al. Solidification Microstructure of Ingots and Continuously Cast Slabs Treated with Rare Earth Metal. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.* 1980; 66(6): 618-627. 20.
- [20] Hong Z, Li S, Lin L, et al. Secondary dendrite arm coarsening and peritectic reaction in NdFeB alloys. *J. Cryst. Growth.* 2009; 311(2): 420-424.
- [21] Qu M, Wang Z; Li H, et al., Effects of mischmetal addition on phase transformation and as-cast microstructure characteristics of M2 high-speed steel. *J. Rare Earths.* 2013; 31(6): 628-633.
- [22] Elwazri A, Wanjara P, Yue S, The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid steel. *Mater. Sci. Eng. A.* 2005; 404(1-2): 91-98.
- [23] Song S, Xu Y, Chen X, et al. Effect of rare earth cerium and impurity tin on the hot ductility of a Cr-Mo low alloy steel. *J. Rare Earths.* 2016, 34(10): 1062-1068.

### 关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》杂志由中信泰富特钢集团旗下大冶特殊钢有限公司主管和主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》杂志于1980年创刊发行,国际标准刊号为ISSN1003-8620,国内统一刊号为CN42-1243/TF。

近期,编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》杂志的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的权益,本社郑重声明如下:

(一)www.specialsteeljournal.com为《特殊钢》杂志的唯一网址,备案号为鄂ICP备2022000839号,请广大作者、读者使用《特殊钢》网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。

(二)除维普、万方、知网为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本社授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济 and 法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三)未经授权网站请于2022年3月31日前自行将与《特殊钢》杂志相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部