

GCr15 轴承钢大方坯凝固过程微观偏析模型及应用研究

安航航¹ 张国锋² 武佳毅³ 张 龙²

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;2 凌源钢铁股份有限公司,凌源 122500;3 内蒙古科技大学,包头 014010)

摘 要 建立了考虑 δ/γ 相变的 GCr15 轴承钢大方坯连铸凝固两相区溶质微观偏析模型,并应用于 220 mm × 260 mm 铸坯的凝固传热。结果表明:通过模型可以获得高碳钢精确的固液相线温度,以及温度与固相率的关系;GCr15 轴承钢大方坯凝固过程仅析出 γ 相,凝固末期 S、P 和 C 元素的偏析严重;固相率越大,冷却速率对偏析度的影响更明显;S 和 P 元素含量以及冷却速率对零塑性温度(ZDT)影响较大;采用基于凝固传热模型优化的连铸工艺后,铸坯中心碳偏析指数控制在 0.96 ~ 1.05,且铸坯未产生内裂纹。

关键词 GCr15 轴承钢大方坯 微观偏析模型 溶质元素分配 高温力学性能 中心碳偏析

Study and Application of a Casting Bloom Micro Segregation Model during Solidification Process of Bearing Steel GCr15

An Hanghang¹, Zhang Guofeng², Wu Jiayi³ and Zhang Long²

(1 Collaborative Innovation Center for Common Technology of Iron and Steel, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083;2 Lingyuan Iron and Steel Co Ltd, Lingyuan 122500; 3 Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract A micro segregation model of solute elements in the mushy zone in continuously cast bloom of bearing steel GCr15 is established in consideration of δ/γ phase transformation, which is applied in the solidification heat transfer of 220 mm × 260 mm continuous casting bloom. The results show that accurate solidus and liquidus temperature and relationship between temperature and solid fraction during the solidification process of high carbon steel can be acquired by the model; only γ phase precipitates out from liquid steel directly during the solidification process of bearing steel GCr15; the segregation ratio of S, P and C is bigger at the final solidification stage; as solid fraction increases, the effect of cooling rate on segregation is more remarkable; the content of S, P and cooling rate have a bigger effect on ZDT. After the continuous casting process parameters optimized based on the solidification heat transfer model, the center carbon segregation ratio is 0.96 to 1.05 and the internal cracks don't appear.

Material Index GCr15 Bearing Steel Casting Bloom, Micro Segregation Model, Solute Redistribution, High-Temperature Mechanical Properties, Center Carbon Segregation

根据中心偏析的形成机理, GCr15 轴承钢大方坯连铸固液两相区内溶质元素的偏析是形成严重宏观偏析的根源^[1]。末端电磁搅拌和轻压下技术被证明可有效地改善高碳钢大方坯的宏观偏析^[2,3]。合理的末端电磁搅拌的位置,目前应用比较多的铸坯中心固相率(f_s)为 0.1 ~ 0.2^[4];对于轻压下合适的压下位置,要保证在压下改善中心偏析的时候避免产生中间裂纹,一般在黏滞性温度(LIT)和零塑性温度(ZDT)之间(对应的 f_s 分别为 0.85 和 1)^[5]。钢种的成分和具体的工艺条件不同会有一些的变化,另外 f_s 是基于凝固传热模型计算得到的。钢凝固过程溶质元素的微观偏析与钢的热物性参数(导热系数、密度以及比热容等)以及固液两相区的高温力学性能(零强度温度 ZST、LIT 和 ZDT)密切相关^[6]。

本文结合 Clyne-Kurz 模型^[7]并考虑到柱状晶的粗化以及 δ/γ 转变,建立了描述枝晶间溶质元素分布的数学模型,并应用 Ueshima^[8]提出的横截面为正六边形的枝晶凝固模型,建立一维有限差分方程,跟踪高碳钢凝固过程两相区内液相率、 γ 相和 δ 相分率与温度的关系以及对微观溶质元素再分配的影响。将建立的偏析模型应用于轴承钢 GCr15 大方坯凝固传热模型,以优化连铸工艺改善铸坯中心偏析。

1 微观偏析模型的建立

1.1 微观偏析方程

在目前建立的模型中,考虑到 Ohnaka^[9]等提出的对 β_i 的修正,以及 Voller-Beckermann 模型^[10]提出的晶粒粗化,采用文献[11]中以不同的冷却速率及 C 含量条件下实测的数据拟合回归的二次枝晶

间距计算式,另外针对铁素体(δ -Fe)/奥氏体(γ -Fe)凝固模式及冷却历程的影响,采用文献[13]中提到的,建立 GCr15 轴承钢大方坯凝固过程微观偏析模型。

1.2 模型求解

基于 Ueshima 提出的正六边形横截面的枝晶凝固模型为基础^[8],建立了考虑 δ/γ 相变的连铸凝固过程中固液两相区溶质微观偏析模型,来计算不同冷却速率下枝晶间溶质元素的分布,而连铸过程中的冷却速率是连续变化的,因此要根据实际连铸冷却过程中合理选择冷却速率。同时基于 Ueshima 等开发的基于一维有限差分方程的正六边形枝晶横截面凝固模型,在本模型中被应用到跟踪糊状区的液相率、 δ 相和 γ 相分率与与温度的关系,以及计算溶质元素的再分配,具体的求解过程参考文献[13]。根据建立的模型,采用 C++ 语言开发了连铸凝固过程两相区微观偏析模型计算程序。

2 模型验证

Yoshiyuki Ueshima 等^[8]根据建立的有限差分微观偏析模型,在一定的假设条件下,计算了 A 钢种在固液界面液相中的 C 的分布;本模型采用以上的钢种及假设条件计算固液界面液相中 C 的偏析。图 1 显示了采用本模型与 Yoshiyuki Ueshima 等建立的模型计算的固液界面液相中 C 含量随固相率的变化。由图 1 可知,本模型预测的结果与 Yoshiyuki Ueshima 等建立的微观偏析模型预测的固液界面液相 C 与固相率的关系的结果很吻合,另外图 2 所示的与 T. Matsumiya 等^[12]进行的定向凝固试验所测得固液界面液相中 Mn 元素的分布一致。

本研究以 ZST 和 ZDT 对应的 f_s 分别为 0.75 和 1 为标准。选择文献[13]中提到的不同钢种的零塑性温度和零塑性温度的实测数据,在模型计算的条件与文献中对应钢种以及冷却速率一致的条件,将建立的微观偏析模型计算的结果与其进行对比。由图 3 可知,计算结果与实测值吻合较好,文献中实测的 ZDT 的值较为离散,而 ZST 吻合度高。总体来说,固相率分别为 0.75 和 1 时模型预测的 ZST 和 ZDT 的值是可信的。

3 结果分析与讨论

GCr15 轴承钢的典型成分如表 1 所示。 f_δ 、 f_γ 和 f_s 分别被用来描述凝固过程中固液两相区内的 δ 相分率、 γ 相分率以及固相率;定义枝晶间钢液的浓度

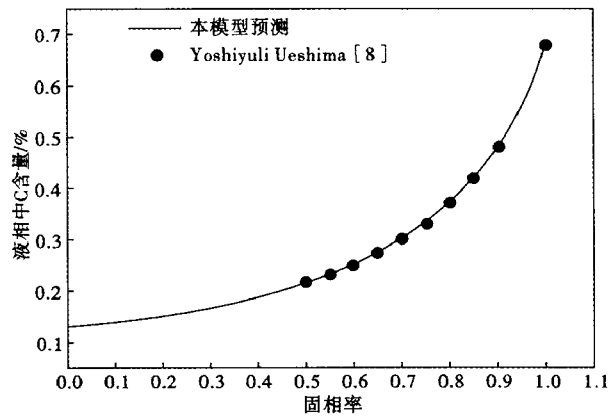


图 1 模型计算与文献模型计算的固液界面液相中溶质元素 C 与固相率关系的对比

Fig. 1 Comparison of predicted relation of solute elements C and solid fraction in liquid phase of solid-liquid interface between developed model and model in literature

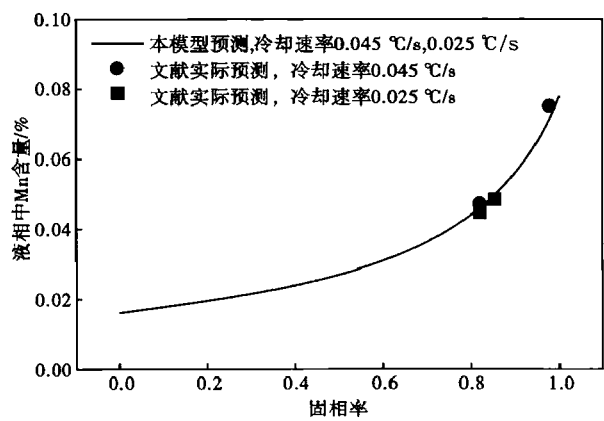


图 2 模型计算与实际测量固液界面液相中溶质元素 Mn 的分布的对比

Fig. 2 Comparison of solute elements Mn in liquid phase of solid-liquid interface between developed model calculation and measurement value

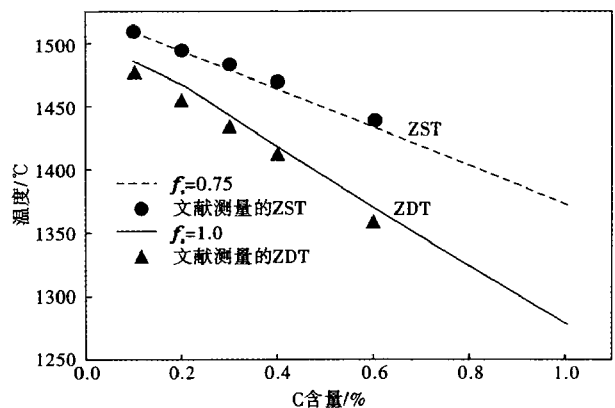


图 3 不同 C 含量的钢种一定冷却速率下模型预测的 ZST 和 ZDT 与文献实测的对比

Fig. 3 Value of ZST and ZDT from steel with different C content at specific cooling rate between developed model calculation and measurement value in literature

表 1 GCr15 轴承钢的典型成分/%

Table 1 Typical composition of bearing steel GCr15/%					
C	Si	Mn	S	P	Cr
0.98	0.22	0.38	0.005	0.010	1.45

与钢液初始浓度的比值为枝晶间溶质元素的微观偏析度。根据建立的凝固传热模型计算方坯的温度场,考虑到 GCr15 轴承钢大方坯二冷过程中采用弱冷模式,在以下偏析模型的计算过程中,冷却速率选择为 0.1 ~ 20 °C/s。

3.1 两相区内枝晶间溶质元素的微观偏析规律

3.1.1 GCr15 轴承钢凝固相变及枝晶间溶质元素微观偏析

图 4 为冷却速率为 0.1 °C/s 时,模型计算的 GCr15 轴承钢大方坯凝固过程相变与 C、S、P 各溶质元素偏析度的变化规律。由图 4 可知,当 GCr15 轴承钢液温度分别低于液相线(1 454 °C 和 1 449 °C)时,随着温度的降低,开始逐渐直接从钢液析出 γ 相,凝固过程并未析出 δ 相,直到钢液消耗完,凝固过程完成。在凝固开始时,由于 γ 相的析出,向枝晶间剩余钢液排出溶质元素 C、S、P 等,枝晶间各溶质元素的偏析度逐渐增加;因为钢中 C、S、P 等元素在 γ 相中的溶解度依次升高,S 元素的偏析度最高,依次为 P 和 C;随着凝固的进行,枝晶间各溶质元素的偏析度明显增加,上升明显,且在凝固末期加剧,偏析度依然为 S、C、P 大。由于本模型未考虑温度降低时 MnS 夹杂的析出,则枝晶间 S 元素的偏析度直到凝固结束持续增加。

从图 4 可看出,S、P 以及 C 元素的偏析最强。凝固过程的特征温度不仅包括 ZST 和 ZDT,对应的 f_s 分别为 0.75 和 1,另外也包括 LIT、LIT 对应的 f_s 为 0.85。在轻压下过程时,为了改善铸坯中心 C 偏

析,压下区间一般选取铸坯中心的 f_s 为 0.3 ~ 0.75,一般认为在 LIT(对应 f_s 为 0.85)和 ZDT(对应 f_s 为 1)之间进行压下时更易产生中间裂纹。故研究 f_s 分别为 0.15、0.75、0.85 和 0.99 下各元素含量对枝晶间溶质元素的微观偏析。

3.1.2 S 含量的影响

根据建立的微观偏析模型,计算了冷却速率 0.1 °C/s 时,S 含量对 GCr15 轴承钢在 f_s 分别为 0.15、0.75、0.85 和 0.99 时枝晶间不同溶质元素微观偏析的影响。结果表明,相同 S 含量时,随着固相率的增加,枝晶间溶质元素的偏析度依次增加;S 含量 0.01% 时, f_s 从 0.01 增加到 0.99,S 偏析度从 1.16 增加到 18.45,P 偏析度从 1.13 增加到 5.48,C 偏析度从 1.13 增加到 5.05。相同 f_s 时,随着 S 含量的增加,枝晶间各溶质元素的偏析度增加幅度很小; f_s 为 0.75 时,S 含量从 0.005% 增加到 0.025%,S 偏析度从 5.28 增加到 5.29,P 偏析度从 3.22 增加到 3.26,C 偏析度依然为 3.21。本模型未考虑凝固过程中 MnS 夹杂的析出,则在凝固末期,S 含量的变化对 S 偏析影响很小。

3.1.3 P 含量的影响

根据模型,计算了冷却速率为 0.1 °C/s,P 含量对 GCr15 轴承钢在 f_s 分别为 0.15、0.75、0.85 和 0.99 时枝晶间不同溶质元素微观偏析的影响。P 含量对枝晶间溶质元素的微观偏析的影响与 S 含量的影响类似。结果表明,相同 P 含量时,随着固相率的增加,枝晶间溶质元素的偏析度依次增加;P 含量为 0.01%, f_s 从 0.01 增加到 0.99,P 偏析度从 1.13 增加到 5.45,S 偏析度从 1.16 增加到 18.39,C 偏析度从 1.13 增加到 5.05。相同 f_s 时,随着 P 含量的增加,枝晶间各溶质元素的偏析度增加幅度很小; f_s 为

0.75 时,P 含量从 0.005% 增加到 0.025%,S 偏析度约为 3.50,P 偏析度约为 2.52,C 偏析度约为 2.55。

3.1.4 冷却速率的影响

根据模型,计算了不同冷却速率对 GCr15 轴承钢在 f_s 分别为 0.15、0.75、0.85 和 0.99 时枝晶间不同溶质元素微观偏析的影响。

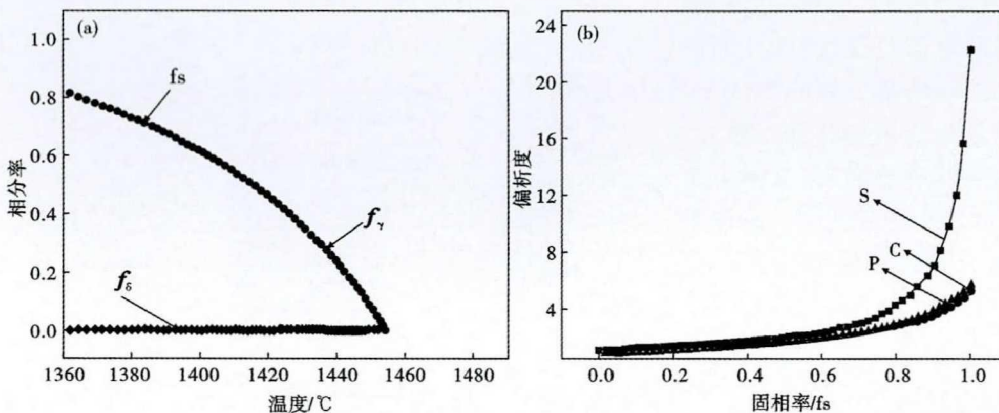


图 4 GCr15 轴承钢凝固过程(a) 凝固相变和(b) 偏析度的变化

Fig. 4 Variation of solidification phase transformation (a) and segregation (b) of bearing steel GCr15 during solidification process

计算结果表明,相同冷却速率下,随着 f_s 的增加,枝晶间溶质元素的偏析度依次增加。冷却速率为 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, f_s 从 0.15 增加到 0.99, S 的偏析度从 1.16 增加到 19.67, P 偏析度从 1.13 增加到 6.06, C 偏析度从 1.13 增加到 5.06。相同固相率时,随着冷却速率的增加,枝晶间各溶质元素的偏析度都增加;当 f_s 为 0.75 时,冷却速率从 $0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 增加到 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, S 偏析度从 3.50 增加到 3.56, P 偏析度从 2.52 增加到 2.62, C 偏析度从 2.54 增加到 2.55。固相率越大,冷却速率的影响更明显,在凝固末端的影响最大。

3.2 溶质元素微观偏析对钢凝固特征温度的影响

根据模型,计算了冷却速率为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 时, S、P 等元素含量对 GCr15 轴承钢高温力学性能的影响。结果表明, S 含量从 0.005% 增加 0.025%, ZST 从 $1376\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1373.2\text{ }^\circ\text{C}$, LIT 从 $1351.5\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1347.1\text{ }^\circ\text{C}$, ZDT 从 $1287\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1255\text{ }^\circ\text{C}$; P 含量从 0.005% 增加 0.025%, ZST 从 $1376.6\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1374.4\text{ }^\circ\text{C}$, LIT 从 $1352.3\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1349.2\text{ }^\circ\text{C}$, ZDT 从 $1290.6\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1279.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。随着 S 和 P 含量的增加,凝固末端溶质元素的偏析增加, ZST、LIT 和 ZDT 都降低,凝固末端溶质元素的偏析增加,另外在外应力(机械应力)的作用下更易产生裂纹。另外 P 和 S 含量的变化对 ZST 和 LIT 的影响较小,而对 ZDT 的影响较大; S 和 P 的变化对 ZDT 依次影响变大,主要由于凝固末端 S 和 P 严重的偏析使凝固终点温度大幅下降。

根据模型计算了冷却速率对 GCr15 轴承钢凝固特征温度的影响。结果表明,冷却速率从 $0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 增加到 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, ZST 由 $1376\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1374.7\text{ }^\circ\text{C}$, LIT 从 $1351.5\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1349.1\text{ }^\circ\text{C}$, ZDT 从 $1287.9\text{ }^\circ\text{C}$ 降低到 $1277.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。冷却速率的增加对 ZST 和 LIT 的影响很小,而对 ZDT 影响则较大。主要由于在凝固末期冷却速率影响 S 偏析。随着冷却速率的增加, S 偏析加重。由于模型未考虑形核动力学条件,而仅考虑了钢液凝固的热力学条件,故不同冷却速率下计算得到的液相线温度基本相同。

3.3 模型的应用

将建立的微观偏析模型应用于 GCr15 轴承钢 $220\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ 断面大方坯的凝固传热模型,铸机的主要设备参数及工艺参数分别如表 2 和表 3 所示。采用凝固传热模型计算了拉速为 $0.9\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时沿拉坯方向铸坯的中心固相率,如

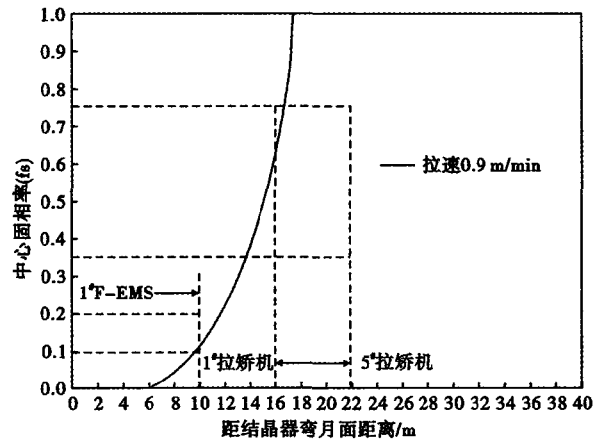


图5 模型计算的拉速 $0.9\text{ m}/\text{min}$ 时沿拉坯方向铸坯的中心固相率

Fig.5 Strand centerline solid fraction along casting direction with casting speed of $0.9\text{ m}/\text{min}$ by developed model

表2 铸机主要设备参数

Table 2 Main technical parameters of caster

项目	参数
断面/(mm × mm)	220 × 260
弧半径/m	12
结晶器铜管有效长度/m	0.85
二冷三区长度/m	0.33, 1.75, 2.8
凝固末端电磁搅拌安装位置/m	9.8
轻压下各拉矫机	M1 ~ M5
拉矫辊安装位置/m	16.15, 17.65, 19.15, 20.65, 22.15

表3 轴承钢 GCr15 $220\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ 铸坯的优化工艺参数

Table 3 The optimized process parameters for $220\text{ mm} \times 260\text{ mm}$ casting bloom of bearing steel GCr15

项目	参数
拉速/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.9
过热度/ $^\circ\text{C}$	25 ~ 35
二冷比水量/($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.25
二冷区水量分配比/%	44-33-23
结晶器电磁搅拌电流和频率/A/Hz	300/2.5
凝固末端电磁搅拌电流和频率/A/Hz	380/6
轻压下总压下量/mm	10

图5所示,由图5可知,凝固末端电磁搅拌安装位置处铸坯中心固相率为 0.11, 1#拉矫机和 2#拉矫机处铸坯中心固相率分别为 0.65 和 0.95,均在凝固末端电磁搅拌及轻压下的合理的位置。采用如表 3 的工艺,其铸坯低倍如图 6 所示,铸坯中心碳偏析指数控制在 0.96 ~ 1.05 且不存在内裂纹。

4 结论

(1) 建立的凝固过程两相区微观偏析模型预测的结果与文献中的结果可以很好的吻合。

(2) GCr15 轴承钢大方坯凝固初期, f_s 为 0.15 时,各溶质元素的偏析度都较小, C 的偏析度大于 P

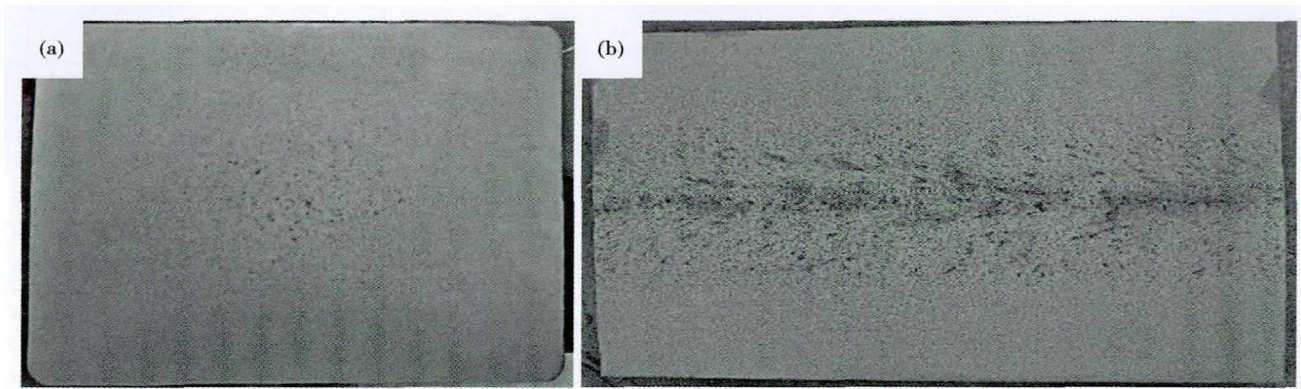


图 6 优化工艺的轴承钢 GCr15 220 mm × 260 mm 铸坯横截面(a)和纵截面(b)低倍

Fig. 6 Cross-(a) and longitudinal-section macro structure of 220 mm × 260 mm casting bloom of bearing steel GCr15 by optimized process

的偏析度;当固相率大于0.75时而 P 偏析度大于 C 偏析度;相同的 f_s 下,随着 S、P 含量的增加,枝晶间各溶质元素的偏析度很小幅度地增加。

(3) GCr15 轴承钢大方坯,凝固过程中直接从钢液析出 γ 相,并未析出 δ 相。凝固末期形成严重的 S、P 和 C 偏析。相同冷却速率下,随着 f_s 的增加,枝晶间溶质 S、P、C 偏析度依次增加且幅度较大; f_s 为 0.15 时,C 偏析度大于 P 偏析度,当 f_s 大于 0.75 时,P 偏析度大于 C 偏析度;相同的 f_s 下,枝晶间各溶质元素的偏析度随冷却速率的增加而增加,S 的偏析度增加尤为明显,其次是 P、C 等元素, f_s 越大,冷却速率的影响更明显,在凝固末端的影响最

大。

(4) P 和 S 含量的变化对 ZST 和 LIT 的影响较小,对 ZDT 的影响较大,其中 S 含量的变化对 ZDT 的影响更明显,其次为 P;冷却速率的变化对 ZST 和 LIT 影响很小,对 ZDT 有一定的影响。

(5) 建立的微观偏析模型应用于 GCr15 轴承钢 220 mm × 260 mm 大方坯的凝固传热模型,优化了凝固末端电磁搅拌及轻压下压下位置,铸坯中心碳偏析指数控制在 0.96 ~ 1.05 且不存在内裂纹。

中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-TP-20-029A1)

参考文献

- [1] 张福利,袁建路,翟永臻,等. 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[J]. 特殊钢,2019,40(4):55-58.
- [2] 田新中,朱 荣,祭 程,等. GCr15 轴承钢大方坯连铸生产中动态轻压下工艺的应用[J]. 特殊钢,2010,31(6):26-27.
- [3] Kohichi I. The Realities of V Segregation and the Formation Mechanism of Segregation of Continuously Cast Blooms[J]. ISIJ,2008,21:102-105.
- [4] 安航航,包燕平,王 敏,等. 凝固末端电磁搅拌和轻压下复合技术对大方坯高碳钢偏析和中心缩孔的影响[J]. 工程科学学报,2017,39(7):996-1007.
- [5] 李 颇,范宇静,张 程,等. 拉速波动对 GCr15 轴承钢 250 mm × 280 mm 连铸坯内部质量的影响[J]. 特殊钢,2017,38(5):22-26.
- [6] 王晓英,颜慧成,仇圣桃. 基于微观偏析模型的 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性带宽[J]. 钢铁,2016,51(10):54-61.
- [7] Clyne T W, Kurz W. Solute Redistribution During Solidification With Rapid Solid-State Diffusion[J]. Metall. Trans. A,1981,12A:965-71.
- [8] Ueshima Y, Mizoguchi S, Matsumiya T, et al. Analysis of Solute Distribution in Dendrites of Carbon Steel With δ/γ Transformation During Solidification[J]. Metall. C Trans. B,1986,17B:845-859.
- [9] Ohnaka I. Mathematical Analysis of Solute Redistribution During Solidification With Diffusion in Solid Phase[J]. Trans. Iron Steel Inst. Jpn,1986,26,1045-1051.
- [10] Won Y M, Kim K H, Yeo T J, et al. Effect of Cooling Rate on ZST, LIT and ZDT of Carbon Steels Near Melting Point[J]. ISIJ Int,1998,38(10):1093-1099.
- [11] Lait J E, Brimacombe J K, Weinberg F. Mathematical Modeling of Heat Flow in the Continuous Casting of Steel. Ironmaking and Steelmaking[J],1974,1(2):90-98.
- [12] Matsumiya T, Kajiok H, Mizoguchi S, et al. Mathematical Analysis of Segregations in Continuously-Cast Slabs[J]. Iron Steel Inst. Jpn,1984,24:873-882.
- [13] Won Y M, Thomas B G. Simple Model of Micro Segregation During Solidification of Steels[J]. Metall Mater Trans A,2001,32A:1755.

安航航(1984-),男,博士,(2018年北京科技大学),助理研究员,高效连铸新技术。E-mail:anhang333@163.com

收稿日期 2020-11-01