

# GCr15 轴承钢连铸坯组织均匀性分析及改进

孟晓玲, 谢有, 屈志东, 管挺

中天钢铁集团有限公司, 江苏常州, 213011

## Analysis and improvement of macrostructure uniformity of GCr15 billet

Meng Xiaoling<sup>1</sup>

Zenith Steel Group Co., Ltd., Technical Center, Changzhou, 213011, China

### 1. 前言

连铸坯是钢铁材料长流程生产工艺下的初始产品, 其质量的好坏直接关系到后续轧制的顺行及质量的稳定, 部分缺陷甚至会遗传到轧材中, 影响产品的使用性能<sup>[1-3]</sup>。连铸坯的缺陷种类较多, 如 GB/T 1979《结构钢低倍组织缺陷评级图》中描述的一般疏松、中心疏松、锭型偏析、斑点状偏析、白亮带、中心偏析、内部气泡、晶间裂纹等缺陷。除此之外, 对于特殊用途的钢种, 如有疲劳性能要求的钢种, 要求钢铁材料具有较为均匀的组织, 以此来提高受外力过程材料的受力均匀性, 防止因局部应力集中而产生裂纹<sup>[4-6]</sup>。

GCr15 轴承钢是典型的高碳铬轴承钢产品, 自发明以来已有百年的历史, 目前仍然是轴承钢乃至特殊钢中产量最大的单一钢种。轴承产品尤其是滚珠轴承, 工作条件十分复杂, 受到工件压力、摩擦力、离心力等外力的综合作用, 且载荷集中作用在滚动体的很小面积上, 运行过程中极易产生表面疲劳剥落, 使轴承破损失效<sup>[7-10]</sup>。轴承零件的使用寿命和可靠性与轴承用钢的冶炼质量密切相关, 尤其是对于组织均匀性的控制, 如碳化物、带状组织等, 全球高端轴承制造商都对其有严苛的要求, 而作为其源头的连铸坯, 则要求其有更为均匀的组织。

本文针对中天钢铁特钢公司 220mm×260mm 断面 GCr15 轴承钢连铸坯低倍质量进行研究, 对其存在的组织结构不均匀性进行分析, 并结合模拟软件的计算结果进行工艺优化, 以提高连铸坯的低倍质量。

### 2. 钢种生产流程简介及低倍质量分析

GCr15 钢种炼钢流程如图 1 所示, 转炉进行脱碳、脱磷初炼后转运至 LF 及 RH 分别进行二次精炼、真空处理, 具备高洁净度、成分调整到位的钢液经连铸成坯。连铸坯断面 220mm×260mm, 横截面切取低倍试样, 经盐酸水溶液热酸洗后评价低倍质量。

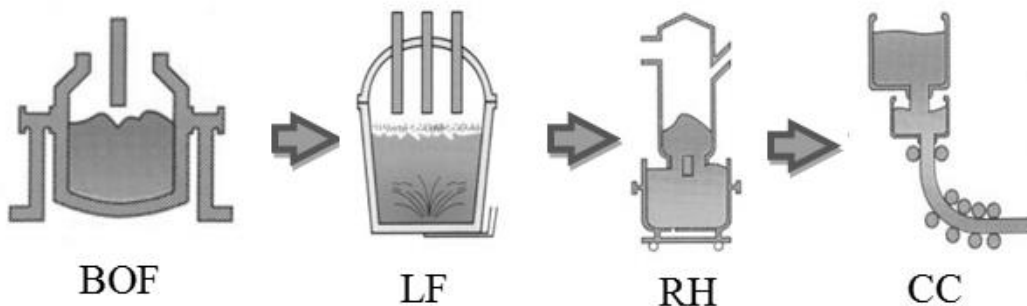


图 1 GCr15 炼钢流程

Fig. 1. Steelmaking process

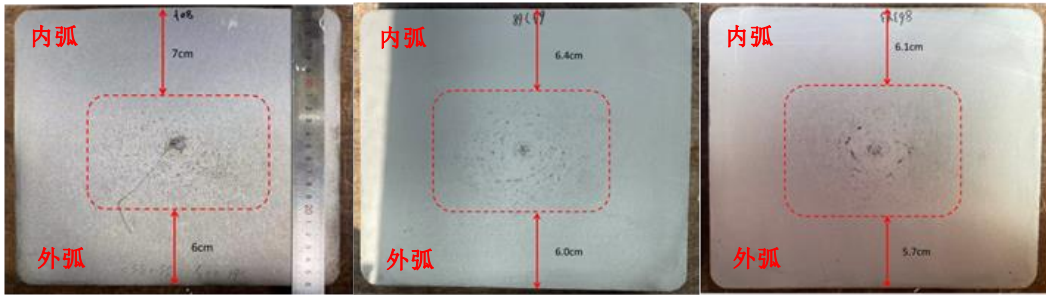


图2 改善前 GCr15 铸坯低倍样

Fig. 2. Macrostructure of GCr15 continuous casting billet before improvement

### 3. 凝固过程模拟及分析

#### 3.1. 凝固过程模拟

采用 MARC 软件分别对不同的冷却条件下铸坯的温度场和柱状晶长度进行计算。计算采用的模拟参数如表 1 所示，二冷水分三段，分别为足辊段、二冷一区、二冷二区，分配比例为 44/33/23，二冷三区目前为空冷（按照铸机设计可进行配水）。

本模型采用运动坐标系的二维切片法，沿铸坯横断面方向，截取 1/2 铸坯的二维薄片，建立非稳态模型，研究该薄片自弯月面开始，以拉坯速度向下移动过程中所经历的热过程。模型假设如下：

- (1) 浇注温度（初始温度）为中间包内钢水当前温度且保持不变；
- (2) 拉坯速度和钢水液面高度为定值；
- (3) 忽略结晶器铜管弧度，近似认为结晶器内温场具有几何上的对称性；
- (4) 保护渣能充填坯壳与铜管之间所产生的气隙，且液面保护渣能保持一定的绝热厚度；
- (5) 与拉速相比，忽略拉坯方向的纵向传热。

计算考虑均匀冷却及不均匀冷却过程。其中，均匀冷却假定内外弧冷却均匀，即内外弧及侧面的冷却系数相同，相关的计算参数如表 1 所示。不均匀冷却分两种情况，第一种为以表 1 的参数为基准，设定足辊段、二冷一区、二冷二区内弧面水量增加 50%，增加 2.5% 比水量用于二冷三区内弧面（即增加 0.00625L/kg 比水量），侧面及外弧面冷却条件不变；第二种为保持二冷三区之前内外弧均匀冷却，仅在二冷三区内弧增加不同水量，外弧保持空冷不变。

表 1 模拟参数

Table 2. Modelling parameter

| 钢种    | 拉速<br>m/min | 结晶器水流量<br>m <sup>3</sup> /h | 结晶器水温差<br>°C | 二冷比水量<br>L/kg | 二冷水分配    |
|-------|-------------|-----------------------------|--------------|---------------|----------|
| GCr15 | 1.2         | 130                         | 7.4          | 0.25          | 44/33/23 |

#### 3.2. 计算结果分析及讨论

##### 3.2.1. 均匀冷却

连铸坯温度曲线的计算结果如图 3 所示。不同位置凝固坯壳厚度如图 4 所示，图中灰色区域为固相区，蓝色为糊状区，红色为液相区。由图 4 可知，出结晶器连铸坯壳厚度为 13mm，至二冷三区坯壳厚度增长至 54mm。

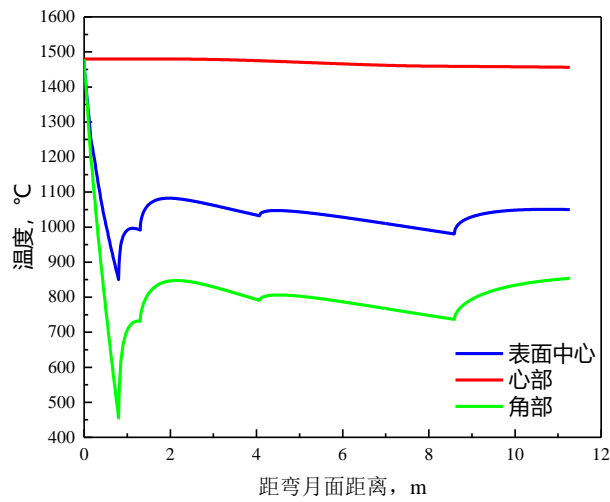


图 3 结晶器至二冷三区铸坯温度

Fig. 3. Casting billet temperature from mold to secondary cooling zone

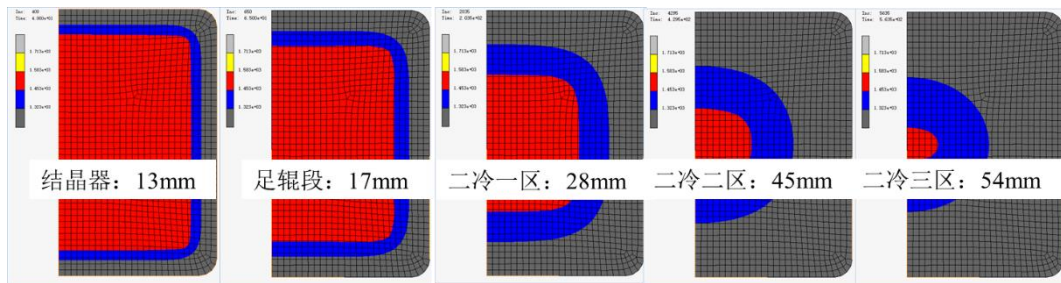


图 4 不同位置连铸坯壳厚度（内外弧相同）

Fig. 4. Billet shell thickness at different positions (same inside and outside condition)

### 3.2.2. 不均匀冷却

足辊段、二冷一区、二冷二区内弧面水量增加 50%，增加 2.5% 比水量用于二冷三区内弧面，侧面及外弧面冷却条件不变，计算结果如图 5、图 6 所示。其中图 5 为不均匀冷却的坯壳厚度变化，横坐标为各冷却区，纵坐标为坯壳厚度；图 6 为不均匀冷却的凝固前沿温度梯度变化，横坐标为各冷却区，纵坐标为凝固前沿温度梯度。根据计算结果，对比均匀冷却与不均匀冷却两种计算条件，发现外弧面凝固坯壳厚度及凝固前沿温度梯度基本不变；内弧面凝固坯壳厚度及凝固前沿温度梯度有所增大。

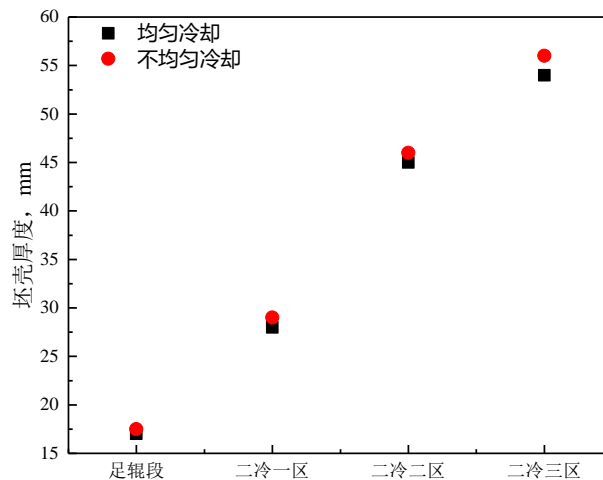


图 5 不均匀冷却的坯壳厚度变化

Fig. 5. Billet thickness with uneven cooling condition

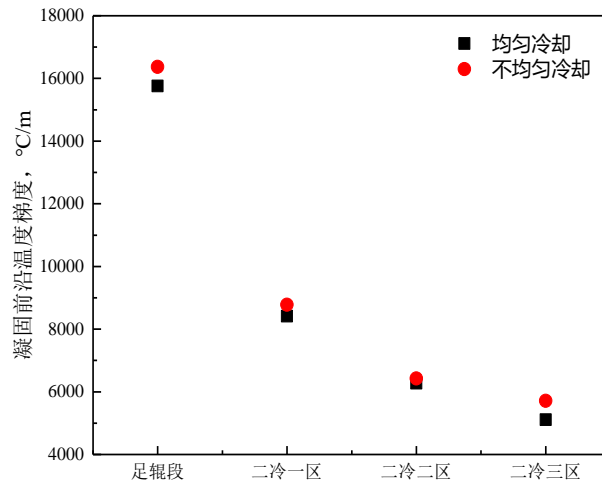


图 6 不均匀冷却的凝固前沿温度梯度变化

Fig. 6. Variation of temperature gradient on solidification front under non-uniform cooling condition

由于二冷三区最容易产生积水现象，因此，保持三区之前内外弧均匀冷却，仅在二冷三区内弧增加不同水量，外弧不变，计算结果如图 7~10 所示。

图 7 为二冷三区坯壳厚度变化，其中 Case0 表示内外弧均匀冷却，Case1~Case5 分别表示内弧侧增加 0.1%~20% 的比水量。由图 7 可知，内弧侧增加水量并未影响外弧侧坯壳厚度；当内弧侧增加 0.1% 水量时，内弧侧坯壳厚度基本不变；当内弧侧水量增加 1.0%~10%，内弧坯壳厚度增加至 55.0mm~57.5mm；当水量增加至 20%，坯壳厚度不再继续增加。

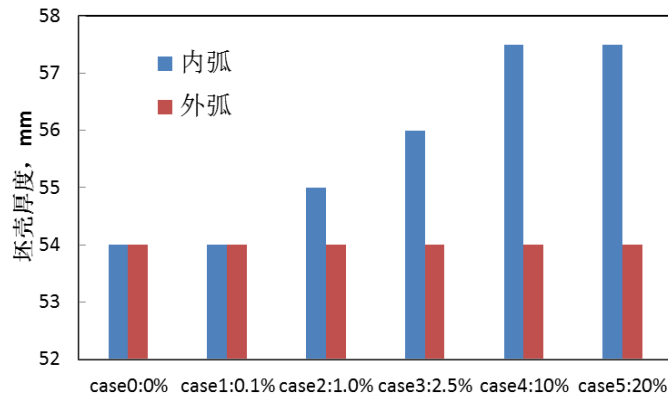


图 7 二冷三区坯壳厚度变化

Fig. 7. Thickness change of billet shell in secondary cooling zone 3

不同冷却条件下凝固前沿的温度梯度的计算结果如图 8 所示。由图 8 可知，同一冷却条件下，随着凝固的进行，凝固前沿温度梯度逐渐降低，如 Case1，当坯壳厚度为 60mm 时，对应的温度梯度为 4858.43°C/m，当坯壳厚度增加至 65mm 时，对应的温度梯度为 4566.83°C/m；同一坯壳厚度下，冷却水量越大，凝固前沿温度梯度越大，当坯壳厚度为 60mm 时，冷却水量由 0.1% 增大至 20%，温度梯度可由 4858.43°C/m 提高至 6310.24°C/m。

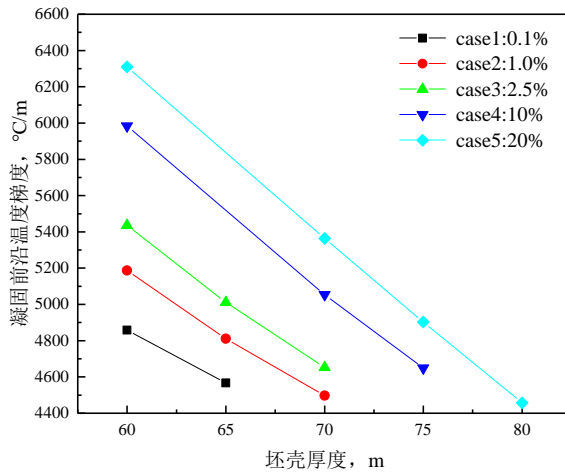


图 8 不同冷却条件下凝固前沿温度梯度

Fig. 8. Temperature gradient of solidification front under different cooling conditions

根据柱状晶和等轴晶转换模型（CET），当  $\frac{G_n}{V} > C_n = a(8.6\Delta T_0 \frac{N_0^{1/3}}{n+1})^n$  时，形成柱状晶组织。式中  $G_n$  表示温度梯度， $V$  表示晶粒生长速率。因此，当内弧冷却强度加大时，凝固前沿温度梯度变大，将使  $G_n/V$  更容易大于形成柱状晶区的临界值。在晶粒生长速率  $V$  不变的情况下，临界温度梯度为定值，当凝固前沿温度梯度大于该临界值时，则形成柱状晶。

结合实际生产的连铸坯低倍组织，外弧面柱状晶长度约 5.7~6.0cm，由此可计算出凝固前沿的温度梯度为 5004~4680°C/m。据此推测本模型计算条件下铸坯临界温度梯度为 5004~4680°C/m。据此计算不同冷却条件下内弧侧柱状晶长度以及内外弧柱状晶长度偏差，计算结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 为不同冷却条件下内弧侧柱状晶长度，以临界温度梯度 4680°C/m 计算，当内弧侧冷却水由 0.1% 增加至 20%，内弧侧柱状晶长度由 63.1mm 增长至 77.5mm；以临界温度梯度 5004°C/m 计算，当内弧侧冷却水由 0.1% 增加至 20%，内弧侧柱状晶长度由 57.9mm 增长至 73.9mm。

图 10 为不同冷却条件下内外弧柱状晶长度偏差，以临界温度梯度 4680°C/m 和 5004°C/m 计算，得到的内外弧柱状晶长度偏差值总体相差不大，偏差值分布在 0.2~1.4mm。随着比水量的增加，内外弧柱状晶长度偏差变大；以 0.1% 比水量计算得出的内外弧柱状晶长度的差值平均约 3mm，以 20% 比水量计算得出的内外弧柱状晶长度的差值平均约 18mm。结合实际连铸坯低倍组织，内外弧柱状晶区长度偏差约 3~10mm，推算二冷三区积水量约 0.1%~2.5%。

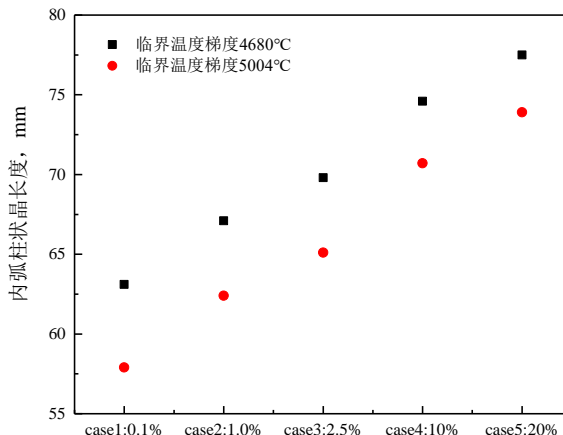


图 9 不同冷却条件下内弧侧柱状晶长度

Fig. 9. Columnar length of inner face under different cooling conditions

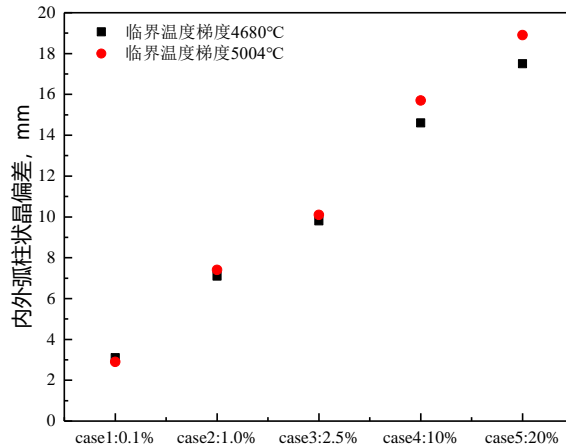


图 10 不同冷却条件内外弧柱状晶长度偏差

Fig. 10. The length deviates of columnar crystal under different cooling conditions

### 3.3. 工艺优化及改善结果

结合结算结果，对连铸坯二冷三区外弧侧增加一定比水量，以改善二冷三区内外弧冷却不均匀的情况并跟踪低倍改善情况。如图所示，工艺优化后，GCr15 连铸坯的低倍质量均匀性明显得到改善。

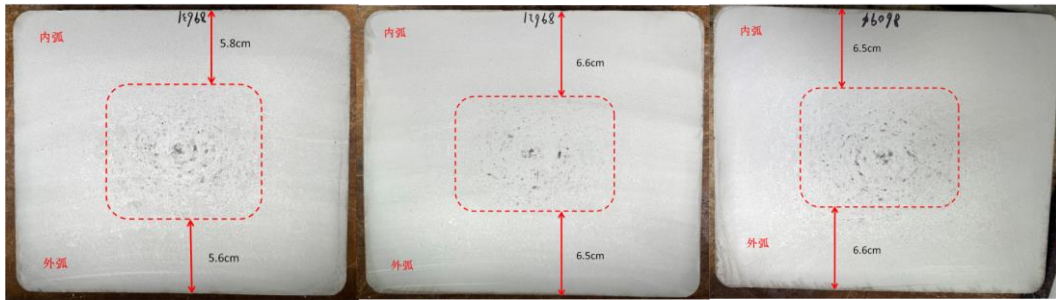


图 10 改善后 GCr15 铸坯低倍样

Fig. 10. Macrostructure of GCr15 continuous casting billet after improvement

## 4. 结论

(1) GCr15 轴承钢实际连铸坯存在内外弧组织不均匀现象，其中内弧面柱状晶区长度为 61~70mm，外弧面柱状晶区长度为 57~60mm，内外弧柱状晶区长度偏差约 3~10mm。

(2) 经 MARC 软件模拟计算，内外弧组织不均匀与内弧面积水有关。在内外弧均匀冷却条件下，出结晶器连铸坯壳厚度为 13mm，至二冷三区坯壳厚度增长至 54mm；内外弧不均匀冷却条件下，外弧面凝固坯壳厚度及凝固前沿温度梯度基本不变，内弧面凝固坯壳厚度及凝固前沿温度梯度均有所增加。

(3) 假设三区之前内外弧均匀冷却，二冷三区内弧存在积水，根据柱状晶向等轴晶转变的临界温度梯度和实际连铸坯低倍组织，推算二冷三区积水量约 0.1%~2.5%。工艺改进后，GCr15 连铸坯的低倍质量均匀性明显得到改善。

## 参考文献

- [1]纪元. 连铸坯偏析及其铸轧遗传性研究[D].北京科技大学, 2018.
- [2]黄贞益, 陈光, 牛亚然, 王光朋, 黄一新, 刘文学. 连铸坯凝固偏析和高强热轧盘条的组织遗传性[J].钢铁研究学报, 2007(01):44-47. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.2007.01.010.
- [3]高秋艳, 李勇, 刘国林, 刘亚平. 20号钢连铸矩形坯宏观组织缺陷及其遗传性[J].连铸, 2002(02):29-30. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.2002.02.012.
- [4]王永恒. BG801 轴承齿轮钢组织特征与拉压疲劳性能的研究 [D]. 昆明理工大学, 2022.DOI:10.27200/d.cnki.gkmlu.2022.000968.
- [5]崔毅, 张彩东, 俞峰等.大颗粒碳化物对GCr4Mo4V钢旋转弯曲疲劳的影响[J].金属热处理, 2023, 48(02):50-55.DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2023.02.008.
- [6]尹德福, 汪开忠, 丁雷等.球化退火工艺对GCr15轴承钢组织和疲劳性能的影响[J].热处理, 2023, 38(01):37-39.
- [7]俞峰, 陈兴品, 徐海峰, 董瀚, 翁宇庆, 曹文全.滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向[J].金属学报, 2020, 56(04):513-522.
- [8]曹文全, 俞峰, 王存宇, 徐海峰, 许达, 刘正东.高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J].特殊钢, 2021, 42(01):1-10.
- [9]王小康. 高温轴承钢材料滚动接触疲劳损伤扩展机理研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.002444.
- [10]王东跃. GCr15轴承钢的滚动接触疲劳及磨损特性研究[D].济南大学, 2022.DOI:10.27166/d.cnki.gsdcc.2022.000302.