

## 拉速波动对 GCr15 轴承钢 250 mm × 280 mm 连铸坯内部质量的影响

李 颇 范宇静 张 程 申祖峰

(东北特钢集团 北满特殊钢有限责任公司技术中心, 齐齐哈尔 161041)

**摘 要** 试验用 GCr15 轴承钢的生产工艺为 100 t BOF-LF-RH-250 mm × 280 mm 连铸坯-Φ70 mm 轧材。用碳截面偏析检验、射钉试验及高倍检验等分析检测方法,研究了结晶器冷却水 2 530 L/min,钢水过热度 33 ~ 37 °C,二冷比水量 0.12 L/kg, M-EMS 530 A/2.5 Hz, F-EMS 400 A/3.0 Hz 参数下, GCr15 轴承钢连铸坯拉速 0.52 ~ 0.58 m/min 对连铸坯轴承钢碳偏析、坯壳厚度及末端凝固位置和 Φ70 mm 轧材带状的影响。结果表明,随着连铸拉速的提升,铸坯的宏观碳偏析先呈现下降后呈现上升趋势,凝固末端位置后移,液相穴长度变长,拉速控制在 0.55 m/min,有利于降低铸坯的宏观碳偏析和轧材球化退火后的带状组织级别。

**关键词** 拉速波动 连铸方坯 GCr15 轴承钢 内部质量

### Effect of Fluctuation of Casting Rate on Internal Quality of 250 mm × 280 mm Bloom of Bearing Steel GCr15

Li Po, Fan Yujing, Zhang Cheng and Shen Zufeng

(Technology Center, Beiman Special Steel Co Ltd, Dongbei Special Steel Group, Qiqihaer 161041)

**Abstract** The production process of tested bearing steel GCr15 is 100 t BOF-LF-RH-250 mm × 280 mm bloom casting-Φ70 mm bar rolling. The effect of bloom casting rate 0.52 ~ 0.58 m/min of bearing steel GCr15 with casting parameters of mold cooling water rate 2 530 L/min, liquid superheating extent 33 ~ 37 °C, secondary cooling water ratio 0.12 L/kg, M-EMS 530 A/2.5 Hz and F-EMS 400 A/3.0 Hz on bearing steel carbon segregation, shell thickness and end solidification position, and banded structure of Φ70 mm rolled bar has been studied by using the analysis and test methods including bloom cross section carbon segregation examination, nail shot test and optical microscope test. Results show that with increasing casting rate the macro carbon segregation of bloom first decreases then increases, the end solidification position moves forward and the length of liquid core becomes longer, to control casting rate 0.55 m/min is available to decrease the bloom macro carbon segregation and the rating of banded structure of rolled products after spheroidizing annealing.

**Material Index** Fluctuation of Casting Rate, Casting Bloom, Bearing Steel GCr15, Internal Quality

GCr15 轴承钢是一种典型的高碳铬轴承钢,碳和铬的质量分数分别在 1.0%、1.5% 左右,经过淬火加回火后具有高硬度、耐磨损等优良特性,广泛应用于滚珠、滚柱和轴套的制备。在 GCr15 轴承钢连铸生产过程中,由于选分结晶现象的存在,连铸易于形成成分偏析、疏松、缩孔等质量缺陷,从而降低了轴承钢的性能和使用寿命。国内外在 GCr15 轴承钢领域做过许多相关试验,关于不同拉速下,碳偏析与坯壳厚度、碳化物带状的研究相对较少<sup>[1]</sup>。

本试验为考察连铸方坯拉速与成品碳化物偏析、球化退火后碳化物带状情况、坯壳厚度及凝固末端位置之间的内在联系,通过匹配连铸工艺不变的情况下变化铸机拉速,研究了连铸拉速变化对 GCr15 轴承钢铸坯碳偏析、凝固位置及相关质量的影响,为高品质 GCr15 轴承钢的生产提供可靠的试验依据。

#### 1 试验材料及方法

##### 1.1 试验材料

GCr15 轴承钢方坯生产的工艺流程为:转炉(容量 100 t)-LF 精炼-RH-连铸,现场浇铸成方坯尺寸 250 mm × 280 mm 断面的连铸坯,连铸设备为康卡斯特 4 机 4 流方坯弧形连铸机,各流配置首末端电磁搅拌装置;试验钢连铸结晶器长度 800 mm,浇注半径 10.25 m,结晶器振动频率 60 ~ 300 rpm,结晶器电磁搅拌最大电流 550 A,频率 2 ~ 10 Hz,末端电磁搅拌最大电流 400 A,搅拌频率 10 ~ 30 Hz,末端电磁搅拌电流 400 A;末端搅拌方式为正反搅拌:正 15 s、停 4 s、反 15 s。表 1 为试验用钢 GCr15 的化学成分。

##### 1.2 研究方法

试验材料选取方坯铸机 3、4 流生产的铸坯,试验铸坯取自浇次中间,铸坯规格(mm)为 250 × 280 × 3 000;在不同拉速的连铸坯上,沿拉坯方向(纵向)随机切取料段(料段长度 300 mm),按切取顺序编号,切取料段后去除多余部分后,沿横断面进行剖切;先进行铸坯横断面的低倍检验,然后对现场

表 1 GCr15 轴承钢的化学成分 / %  
Table 1 Chemical composition of bearing steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	O	Ti	Mo	As	Sn	Sb	Pb	Ca
0.95 ~ 1.05	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	≤ 0.020	≤ 0.010	1.40 ~ 1.60	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.050	≤ 0.001	≤ 0.003	≤ 0.08	≤ 0.04	≤ 0.03	≤ 0.005	≤ 0.002	≤ 0.001

选取的连铸坯钢样进行切割、抛光、清理后,从铸坯内弧到外弧侧的方向上,在连铸坯断面的中心线上,采用 Φ5 mm 钻头,每间一定间距取 30 ~ 50 g 钢削样。通过 ICP 化学分析方法,考察在连铸坯断面中心线上,不同连铸拉速条件下碳含量的变化情况,图 1 所示为宏观组织和横截面碳偏析取样位置示意图。

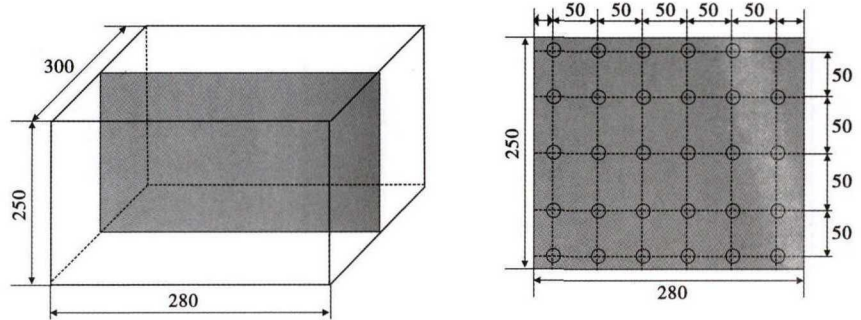


图 1 GCr15 钢 250 mm × 280 mm 铸坯取样位置

Fig. 1 Location sampling at 250 mm × 280 mm casting bloom of steel GCr15

## 2 试验结果及分析

### 2.1 拉速波动对碳偏析的影响

在电磁搅拌(首末搅)、冷却水、拉矫机压力等参数保持不变的情况下,通过改变 GCr15 连铸拉速,结合铸机性能对连铸相关参数进行匹配。表 2 为本次试验在不同拉速下的铸机连铸工艺参数变化。

图 2 为纵剖后的方坯在不同位置上的碳含量控制图。从 C 偏析的控制图可以看出,各位置 C 含量检测结果存在波动,相对来说,边缘部位检测结果波动最小,中心部位检测结果波动最大;说明中心部位

C 含量分布均匀性较差,边缘部位 C 含量分布均匀性较好,半径 1/2 部位 C 含量较稳定且接近平均值。

图 2(a,b) 中 C 元素均在平均成分的上下波动,均未超出上下限,说明当拉速为 0.52 m/min 和 0.55 m/min 时,方坯截面碳含量控制在合理范围内;图 2(b) 和图 2(a) 相比,C 偏析的波动区间较小,证明拉速为 0.55 m/min 时,铸坯 C 偏析得到了有效控制;图 2(c) 中,连铸拉速为 0.58 m/min 时,中心部位 C 含量超出上下限,偏析较大。说明拉速过大,使得连铸坯在结晶过程中,激冷层等轴晶较薄,柱状晶相对

表 2 GCr15 钢连铸试验工艺参数  
Table 2 Parameters of tested casting process of steel GCr15

拉速/ (m · min <sup>-1</sup> )	结晶器冷却水/ (L · min <sup>-1</sup> )	吊包钢水温度/ ℃	过热度/ ℃	比水量/ (L · kg <sup>-1</sup> )	M-EMS		F-EMS	
					电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz
0.52		1 518	37					
0.55	2 530	1 520	35	0.12	530	2.5	400	3.0
0.58		1 516	33					

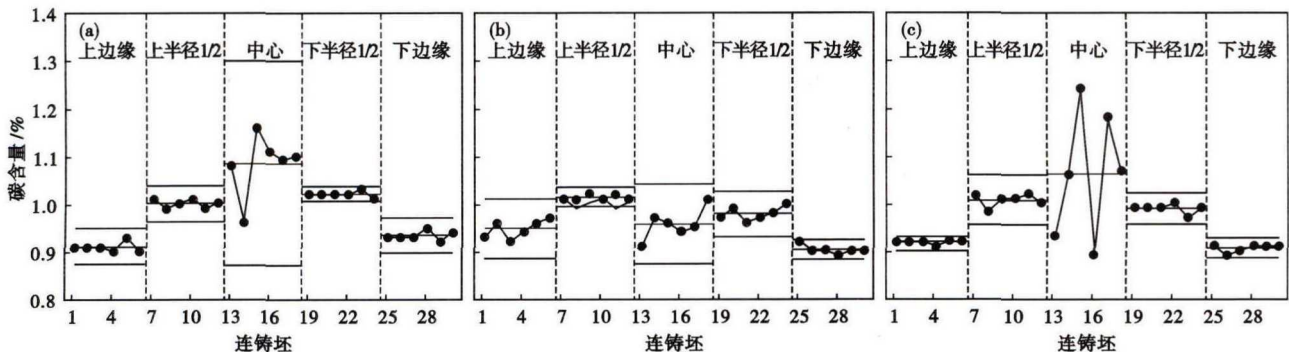


图 2 拉速 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) 和 0.58 m/min (c) 对 GCr15 钢 250 mm × 280 mm 铸坯断面碳含量分布的影响

Fig. 2 Effect of casting rate 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) and 0.58 m/min (c) on distribution of carbon content at cross section of 250 mm × 280 mm casting bloom of steel GCr15

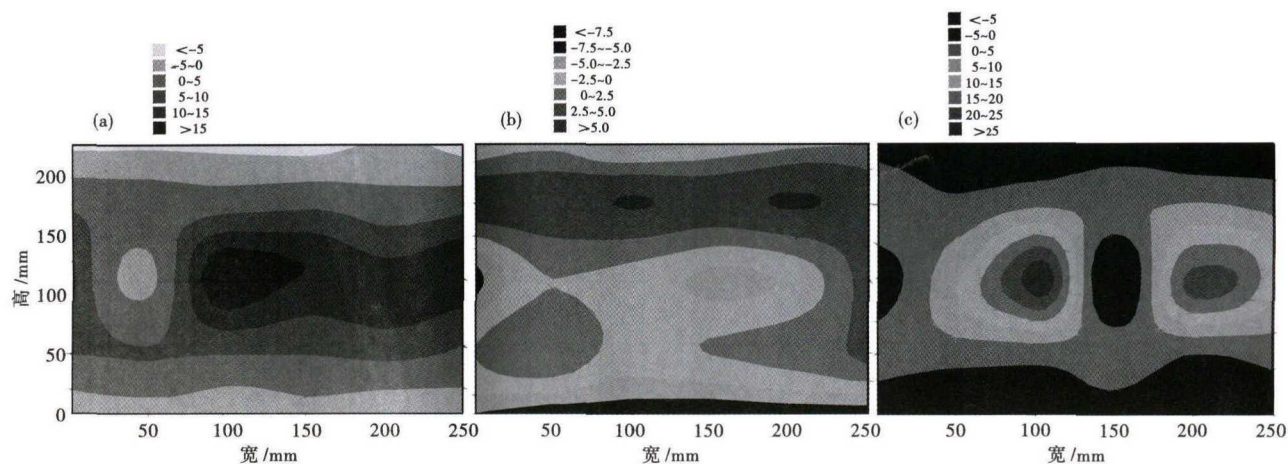


图 3 拉速 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) 和 0.58 m/min (c) GCr15 钢 250 mm × 280 mm 铸坯断面碳偏析等值图  
 Fig. 3 Equivalence diagram of carbon segregation at cross section of 250 mm × 280 mm casting bloom of steel GCr15 with casting rate 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) and 0.58 m/min (c)

减小,中心等轴晶相对增大,造成碳成分偏析较大。因此,在铸坯边缘与圆心存在碳成分偏低,而在等轴晶与柱状晶交界处接近1/2R处存在增碳偏析,从而影响铸坯内部成分的均匀性。

随后,将低倍试片上钻沫取得的多组化学成分检验结果所得数值代入公式:

$$\frac{(X_i - X_n)}{X_n} \times 100$$

计算碳元素的偏析指数,绘制出不同拉速下的碳成分偏析等值图 3。

式中  $X_i$  为取样位置处的化学成分数值;  $X_n$  代表各位置化学元素平均值。

从图 3 中可以看出,不同拉速条件下,铸坯均呈现不同程度的偏析:在拉速为 0.52 m/min 时,铸坯的 C 均呈正偏析最高为 15,负偏析最低为 5,心部偏析较边部重;拉速为 0.55 m/min 时,铸坯的 C 偏析程度有所改善,心部偏析程度减轻,出现少许轻微负偏析,正负偏析都降到 7 以下,其余点呈现正偏析;当拉速为 0.58 m/min 时,铸坯心部偏析较重,达到 20 以上,边部方向偏析相对较轻,为 6 左右;拉速为 0.52 m/min 和 0.58 m/min 时,铸坯心部呈现正偏析,C 成分在心部含量最高,边部方向呈现负偏析趋势;而拉速为 0.55 m/min 铸坯,心部偏析度降低,成

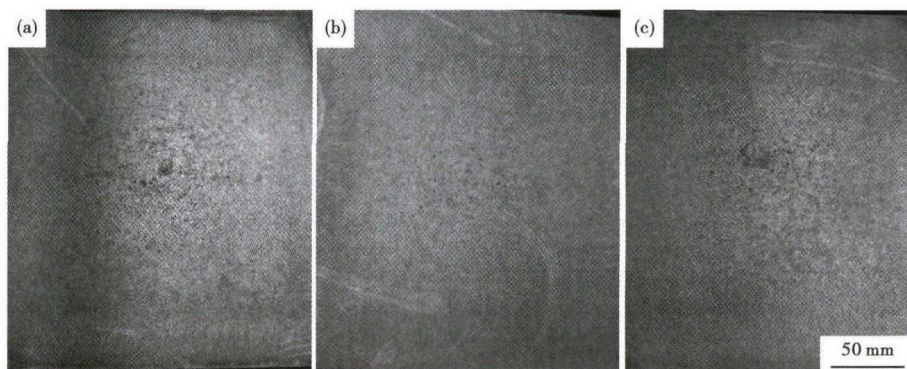


图 4 拉速 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) 和 0.58 m/min (c) 对 GCr15 钢铸坯低倍组织(中心偏析)的影响  
 Fig. 4 Effect of casting rate 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) and 0.58 m/min (c) on macrostructure (center segregation) of casting bloom of steel GCr15

分偏析朝外侧偏移。

根据理论分析,浇铸钢水凝固过程中,由外向内逐层凝固,低熔点和夹杂物等溶质元素趋向于心部移动,当拉速偏慢或过快时,最后凝固的低熔点溶质元素易于在心部凝结,造成偏析,恰当的拉速使得心部偏析程度降低<sup>[2]</sup>。

图 4 (a, b, c) 分别为拉速 0.52, 0.55, 0.58 m/min 下的方坯低倍宏观形貌图,从图 4 中可以看出,当拉速较低时(0.52 m/min),方坯出现一定程度的疏松和缩孔等质量缺陷,由于铸坯温度相对降低,等轴晶易于形成,组织致密,液相中溶质元素来不及析出就已经凝固,铸坯坯壳较厚,方坯体积凝固收缩后得不到补充;随着拉速的提升(0.55 m/min),溶质元素的溶解与坯壳厚度的形成在某种程度上获得了平衡,心部偏析程度下降,低熔点碳化

物等溶质元素不易在铸坯心部富集,疏松和缩孔程度相对较轻;当拉速再次提升时(0.58 m/min),铸坯温度相对较高,等轴晶不易形成,溶质元素在中心部位富集,中心疏松程度较重,出现一定缩孔<sup>[2-5]</sup>。

## 2.2 拉速波动对铸坯凝固位置及坯壳厚度的影响

选用特殊型 ZG219 连铸坯凝固壳厚度检测仪,射钉为 60Si2Mn 合金。射钉时,连铸坯凝固壳厚度检测仪垂直于铸坯表面,对不同拉速下的 GCr15 方坯坯壳厚度进行测量,得到距离弯月面不同距离上的铸坯坯壳厚度。由液芯长度经验公式(1)计算相应液穴长度:

$$\frac{D}{2} = K \sqrt{\frac{L}{V}} \quad L = \frac{D^2 V}{4K^2} \quad (1)$$

式中: $K$ -综合凝固系数/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-2}$ ); $L$ -铸坯的液相穴长度/m; $D$ -铸坯坯壳厚度/m; $V$ -拉坯速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )。

根据铸机性能经验参数,取方坯的综合凝固系数 28 ~ 30,根据上述公式,计算得到的不同拉速下的液穴长度为 9.34, 10.46, 11.52 m,图 5 为铸坯坯壳厚度分布图;至弯月面下 10.46 m,铸坯 280 mm 方向上凝固坯壳厚度达到 0.14 m,此为铸坯截面长度(280 mm)的一半,铸坯此时完全凝固,得到液相穴长度为 10.46 m,此处为凝固末端位置。

从图 5 可以看出,随着拉速的增大,出结晶器的坯壳厚度逐渐变薄。这是由于随着拉速的提升,铸坯内部钢水温度逐渐变高,当方坯进入二冷段后,在二冷段停留的方坯冷却时间越来越短,二冷水带走的热量较少,不利于等轴晶的形成,相同位置处形成的坯壳较薄。

图 6 为经试验和公式验证后的凝固末端的位置随拉速的变化关系,分析可知,随着铸坯拉坯速度的增加,相同位置处凝固坯壳厚度降低,凝固末端位置后移,液芯区域变宽。

拉速的递增,使得结晶器坯壳薄且不均匀,铸坯在结晶器内停留时间变短,使钢液凝固速度降低,其结果是铸坯液相穴加深,变长变尖,这不但推迟了等轴晶的形核和长大,扩大了柱状晶区,且发生铸坯鼓肚的危险也随之增加,同时易形成搭桥,钢水补缩不好,导致铸坯中心组织变坏,易造成中心疏松、缩孔和偏析。

相关理论表明<sup>[2,6-9]</sup>,随拉速提高,中心疏松、中心缩孔加重;拉速过慢会使铸坯表面冷却强度过大,造成温度梯度增加,热应力增大。恒速浇注既保证

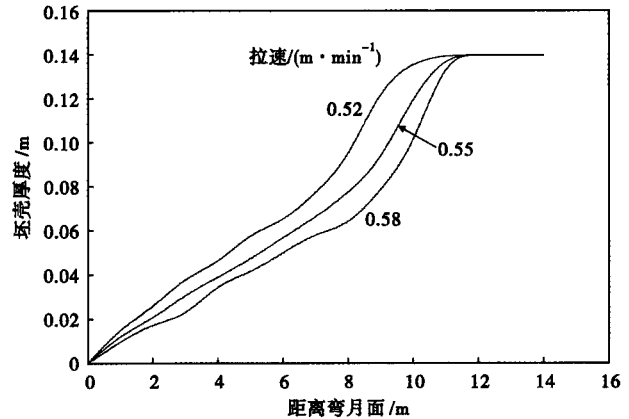


图 5 拉速对 GCr15 钢铸坯壳厚度的影响

Fig. 5 Effect of casting rate on shell thickness of casting bloom of steel GCr15

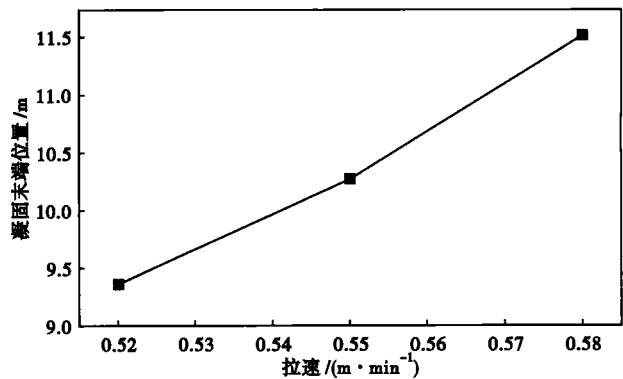


图 6 拉速对 GCr15 钢铸坯凝固末端位置的影响

Fig. 6 Effect of casting rate on end solidification position of casting bloom of steel GCr15

了生产组织和工艺的的稳定,又保证了二冷水量变化不会太大,液相穴也不会发生太大变化,有利于减少铸坯内部缺陷。

## 2.3 拉速波动对球化退火后带状偏析的影响

图 7 为不同拉速条件下不完全退火后的碳化物带状照片。轧材规格为  $\Phi 70$  mm,图 7(a, b, c)的拉速分别对应为 0.52, 0.55, 0.58 m/min,方坯下线缓冷后,选取不同拉速条件下的轧后棒材样进行不完全退火,其热处理制度为 800 °C 保温 2 h 炉冷,然后进行淬火 + 回火处理[(850 ± 10) °C 保温 30 min 油冷 + (170 ± 10) °C 保温 1 h 空冷]。热处理后样品进行切割、研磨和抛光后,用 4% 的硝酸酒精腐蚀,观察 GCr15 轴承钢棒材碳化物带状的形貌,并按 GB/T18254-2002 标准对棒材碳化物不均匀性进行评价,碳化物的形貌如图 7。

从图 7 碳化物带状照片可以看出, GCr15 轴承钢轧材采用扩散退火后,钢中液析碳化物带状出现细微变化,图 7(a, b, c)对应带状碳化物级别分别为

7.4、7.3 和 7.5 级,拉速为 0.55 m/min 的带状较轻,有利于后续产品带状碳化物的控制,拉速为 0.52 m/min 带状较重,拉速为 0.58 m/min 带状严重。

### 3 结论

(1) 在钢水过热度 and 连铸参数一定的条件下,拉速的变化使得 GCr15 连铸坯偏析程度得到了一定程度的改善,拉速变化到 0.58 m/min 时,中心碳偏析较大,结合连铸拉速过热度匹配情况,合理的连铸拉速对于控制铸坯的宏观碳偏析

有利,拉速控制在 0.55 m/min 最佳。

(2) 随着连铸拉速的提升,铸坯凝固坯壳厚度变薄,凝固端位置后移,液相穴长度变长,拉速的变化有利于铸坯坯壳厚度和生产节奏的控制。

(3) 二冷水量不变及中间包钢水过热度一定时,合理的拉速变化,有利于 GCr15 连铸方坯的中心偏析及后续轧材退火后带状的控制。

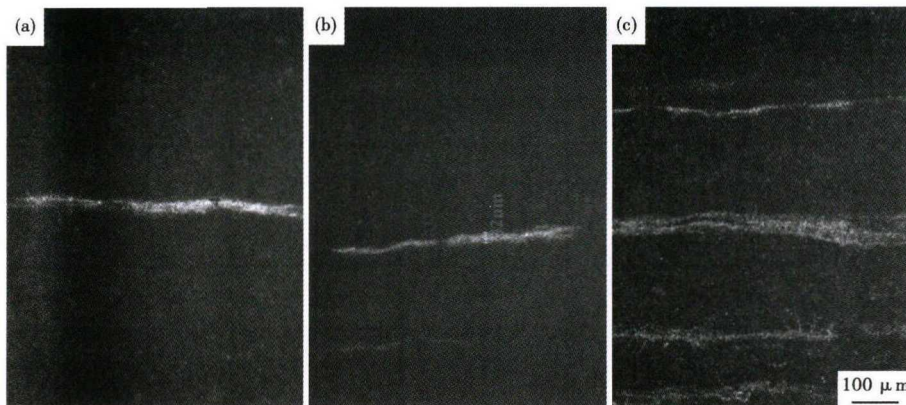


图 7 GCr15 钢铸坯拉速 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) 和 0.58 m/min (c)  $\Phi$ 70 mm 轧材碳化物带状形貌

Fig. 7 Morphology of carbide banded structure in  $\Phi$ 70 mm rolled products of steel GCr15 with bloom casting rate 0.52 m/min (a), 0.55 m/min (b) and 0.58 m/min (c)

### 参考文献

[1] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.

[2] 何庆文, 王宝, 王福明, 等. 大方坯轴承钢中心偏析的成因及预防措施[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 39-41.

[3] 许洪波. 改善轴承钢碳化物不均匀性的工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[4] Singh A K. Numerical Study of Effect of Cooling Rate on Double Diffusive Convection and Macro-Segregation in Iron Carbon System [J]. ISIJ International, 2001, 41(12): 1481-1487.

[5] 靳同红, 孙红英, 张瑞军, 等. GCr15 轴承钢连铸坯宏观碳偏析的基本规律[J]. 中国冶金, 2008, 18(7): 19-24.

[6] 田陆. 凝固组织对连铸板坯中心偏析的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 164-167.

[7] Choudhary S K, Ganguly S. Morphology and Segregation in Continuously Cast High Carbon Steel Billets[J]. ISIJ International, 2007, 47(12): 1759-1766.

[8] Seppo Louhenkilpi, Jyrki Miettinen, Lauri Holappa, et al. Simulation of Microstructure of As-cast Steels in Continuous Casting[J]. ISIJ International, 2006, 46(6): 914-920.

[9] 任晷, 张炯明, 张开钧, 等. 连铸过程溶质元素宏观偏析的数值模拟[J]. 连铸, 2009, 4(2): 31-34.

李 颇 (1974-), 男, 硕士研究生 (东北大学), 高级工程师, 1997 年内蒙古科技大学 (本科) 毕业, 钢铁冶金和方坯连铸研究. E-mail: heikecailiao@163.com

收稿日期: 2017-04-26

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
和技术、产品研发宣传广告**