DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.027

特殊钢连铸大方坯内部质量问题研究现状

陈俊儒，张　慧，王明林，俞占扬
（钢铁研究总院 连铸技术国家工程研究中心，北京 100081）

摘　要：综述了几种典型特殊钢(轴承钢、弹簧钢等)大方坯的连铸技术，举例说明了低过热度浇注、电磁搅拌和轻压下技术的应用，对铸坯的内部质量的改善，以及铸坯内部微观偏析、宏观偏析与碳化物不均匀性的成因及改善措施，说明电磁搅拌和轻压下技术对于改善铸坯内部的偏析情况的重要意义。

关键词：大方坯；偏析；碳化物；轻压下
中图分类号：TF777　　文献标识码：A　　文章编号：1000-8365(2019)08-0874-05

Summary of Internal Quality Problems of Special Steel Continuous Casting Blooms

CHEN Junru, ZHANG Hui, WANG Minglin, YU Zhanyang
(National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The continuous casting techniques of several typical special steels (bearing steel and spring steel) slab were reviewed. The applications of low and superheat casting, electromagnetic stirring and light pressing were illustrated. The improvement of internal quality of slabs, the causes of micro segregation, macro segregation and carbide unevenness of slabs and the improvement measures indicate the important significance of electromagnetic stirring and light pressing technology in improving the internal segregation of slabs.

Key words: bloom; segregation; carbonization; soft reduction

特殊钢是指具有特殊的化学成分、采用特殊的工艺生产、具有特殊的组织和性能、能够满足特殊需要的钢种。目前，我国仍有一部分的特殊钢是采用大方坯来进行生产的，其产品主要用于轧制重轨钢、硬线钢、无缝钢管、大中型 H 钢、以及部分棒材和锻材等。由于特殊钢大方坯断面尺寸较大且富含各种合金元素，故其完全凝固所需要的时间更长，铸坯产生中心偏析、中心疏松和缩孔等缺陷的倾向就越大，从而影响产品质量。因此在连铸过程中尽可能地减少中心偏析、中心疏松的发生，对于提高特殊钢大方坯的内部质量有着重要意义。

迄今为止，在连铸过程中减少或消除中心偏析和疏松的技术主要有：低过热度浇注、结晶器电磁搅拌[1-4]、等离子加热[5]、二冷区电磁搅拌、凝固末端电磁搅拌[6]、机械应力压下和热应力压下等方式[7,8]。

收稿日期：2019-04-01

作者简介：陈俊儒(1993-)，甘肃兰州人，硕士生．研究方向：方坯连铸工艺过程．电话：13126700687，
E-mail：chenjunru0402@163.com

1　几种典型特殊钢大方坯的连铸技术

1.1　轴承钢

轴承钢作为洁净钢的代表，除需要控制氧化物、硫化物等为主的夹杂物和碳偏析以外，对磷、氮、氢、钛等残余元素的含量也有着严格的要求，其冶炼方法自 20 世纪 30 年代起传统的酸性平炉、碱性平炉、碱性电弧炉单炼，到 60 年代的钢包滴流脱气法、真空循环脱气法(RH)精炼，以及如今的综合炉外精炼工艺(LF+RH、LF+VD、SKF+MR 等)，经历了较大的改善。有效地控制微量元素(氧、硫、磷、钛、铝等)与夹杂物(全氧含量 $T[O]\leqslant 15\times10^{-6}$)的含量，降低中心偏析、中心疏松和碳化物的不均匀性，对提高轴承钢的使用寿命和产品质量有着至关重要的作用。

王忠英等[9] 通过在西宁特钢生产断面尺寸为 235×265 mm^2 的轴承钢大方坯的工业试验，发现采用高钡合金进行终脱氧和夹杂物变性处理，低过热度(10~20 ℃)浇注，弱冷却(二冷比水量 0.35~0.4 L/kg)和低拉速 (过热度为 15±3 ℃时拉速为 0.7~0.8 m/min)的工艺，可以使轴承钢的碳偏析指数小于 1.10，且其他各项检验结果符合 YJZ—84 和 YB9—68。

田新中等[10]通过研究动态轻压下技术在 285 mm×

325 mm GCr15 轴承钢大方坯生产中的应用，发现当过热度为 20~30 ℃，拉速为 0.65~0.75 m/min 时，在铸坯固相率为 40%~96%的区域，采用总压下量为 8.3~12.5 mm 的动态轻压下技术后，铸坯≤1.5 级的中心疏松和 0~1.5 级的中心缩孔比例分别由未压下的 49.45%和 63.74%增加到 85.0%和 87.5%，中心碳偏析值在 0.95~1.05 的比例由未压下的 18.75%提高到 100%。

1.2　弹簧钢

汽车制造业和铁路行业是弹簧钢的主要用户，对弹簧钢的强度、设计应力等属性有着极高地要求。随着汽车轻量化与铁路列车的高速重载化，弹簧的设计应力不断提高，相应地悬挂弹簧的件重也得到了降低[11]。

弹簧钢的质量和性能，通常取决于凝固坯的化学成分、钢液洁净度(气体、有害元素、夹杂物)、铸坯质量(偏析、宏观结构、表面状况)和轧制等四个方面[12]。

赵爱民等[13]研究了电磁搅拌对弹簧钢 $60Si_2Mn$ 凝固组织的影响，发现电磁搅拌能够消除弹簧钢的凝固组织中发达的柱状枝晶层；且随着搅拌功率的增加，其凝固组织由枝晶长度较短的一次结晶组织转变为退化的枝晶和等轴晶。即电磁搅拌改变了弹簧钢凝固时的形核和生长条件，增加了一次结晶的核心，细化了晶粒，得到了更为均匀的凝固组织。

王毅等[14]对改善弹簧钢连铸方坯的中心碳偏析情况进行了研究，结果表明采用低过热度浇注(10~20 ℃)，结晶器电磁搅拌(电流强度 40~50 A，频率 6 Hz)和凝固末端电磁搅拌(电流强度 205 A，频率 50 Hz)技术，提高了弹簧钢 55SiMnVB 连铸坯的内部质量，其碳偏析率控制在 5.0%以下，碳偏析指数控制在 1.05 以下。

蒋丽红[15]研究了真空精炼对弹簧钢 $60Si_2Mn$ 连铸坯中心偏析的影响，发现经过真空精炼后，铸坯的中心碳偏析指数从 1.72 降至 1.28，硫偏析指数从 2.68 降至 1.68。

1.3　其他钢种

陈亮等[16]针对 320×410 mm^2 重轨钢大方坯宏观偏析和中心疏松难以控制的问题，通过采用合适的二冷制度(二冷比水量控制在 0.25~0.30 L/kg)、凝固末端电磁搅拌技术、动态轻压下控制技术(总压下量 9~12 mm)、钢液过热度(20~35 ℃)及拉速(0.72 m/min)控制，使重轨钢大方坯的中心等轴晶率稳定在 40%以上，不大于 0.5 级的中心疏松控制在 91%以上，0.5 级的中心偏析控制在 87%左右，碳偏析指数控制在 0.95~1.07；生产的钢轨探伤报警率控制在 2‰以下，其各项力学性能指标满足了铁标 TB/T 2344—2012 的要求，并通过了 CRCC 认证。

蒲学坤[17]研究发现，攀钢在生产断面尺寸为 280 mm×380 mm、280 mm×325 mm 的 42CrMo 合金结构钢大方坯的过程中，通过采用结晶器电磁搅拌、连续矫直、二冷气雾冷却和轻压下等技术，控制中间包过热度为 20~30 ℃，拉速为 0.7~0.9 m/min，二冷比水量为 0.25~0.35 L/kg，最大压下量为 3.0 mm，使成品铸坯的偏析度控制在 0.96~1.03，铸坯的低倍质量在 0.5~1.0 级，获得了良好的铸坯质量。

朱荣等[18]针对邢钢 SWRH82B 大方坯在连铸生产过程中存在的中心偏析、中心疏松和缩孔等内部质量问题，研究了动态轻压下技术对于铸坯质量的改善，。其生产实践表明，采用动态轻压下技术后，SWRH82B 铸坯的中心碳偏析指数最大值由 1.309 降至 1.086，中心疏松≤1.5 级的比例由 52.78%增至 90.91%，中心缩孔≤1.5 级的比例由 66.67%增至 96.36%。

通过上述生产实践可以看出，在特殊钢大方坯的连铸生产过程中，低过热度浇注，较低的拉速与二冷区较弱的冷却强度，配以结晶器电磁搅拌和轻压下技术，对铸坯的中心偏析、中心疏松和缩孔等内部质量缺陷带来了明显的提高。

2　大方坯内部质量问题研究现状

在连铸过程中，当钢液温度冷却至固–液两相区时，由于发生了选分结晶，会造成钢液中溶质元素的偏析。偏析分为微观偏析和宏观偏析。

2.1　微观偏析

微观偏析的严重程度直接影响凝固前沿的零强度温度(ZST)和零塑性温度(ZDT)，而铸坯的内裂纹通常形成于 ZST 和 ZDT 之间[19]，凝固前沿枝晶间的微观偏析是内裂纹形成的内在因素。

韩志强等[20]研究发现：钢中碳含量对凝固前沿枝晶间的微观偏析有重要影响，碳元素主要通过影响钢的凝固方式从而影响 P 和 S 的偏析，碳含量在 0.1%~0.2%之间时，P 的偏析增加，S 的偏析受到 Mn 的抑制而变化不大，此时晶间偏析增加导致凝固前沿零塑性温度(ZDT)降低；在硫含量不变的情况下，提高锰的含量有利于抑制 S 在晶间的偏析，使 ZDT 升高；但是钢中 P 的偏析不像 S 那样受到 Mn 的制约，初始磷含量的增加会加剧 P 在晶间的富集，从而降低 ZDT。因此若要控制铸坯的内裂纹，控制磷的含量是十分重要的。

罗森等[21]通过将模型计算结果与文献报道实测值的 ZST 和 ZDT 进行对比发现，固相率为 0.75 和 1.0 时所对应的模型计算温度与文献报道的 ZST 和 ZDT 基本吻合。ZST 和 ZDT 之间的差值大小可认为是衡量凝固前沿内裂纹倾向的一个尺度，其中也容易形成磷、硫等元素的晶间富集。

2.2 中心偏析和 V 形偏析

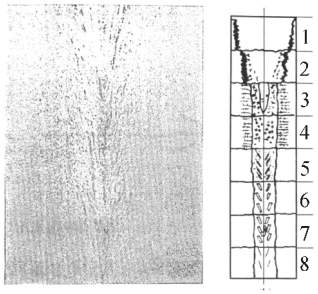
在钢液凝固的过程中，根据溶质元素的析出和富集理论，由于溶质元素的再分配现象引起固、液相中的浓度差异，在凝固末期树枝晶间富集溶质的残余母液形成流动会导致宏观偏析。宏观偏析也称作中心偏析，其特点是铸坯的中心位置处碳、硫、磷等溶质元素的含量明显高于其他位置，在铸坯上表现为沿纵剖面中心轴线上的点线状偏析和 V 形偏析。

对于碳含量较高的大方坯，由于断面大，两相区宽，凝固时间长，造成铸坯极易出现中心偏析、中心疏松和缩孔等缺陷，是影响大方坯内部质量的主要因素。且宏观偏析所引起的铸坯内部化学成分的不均匀性，难以通过轧制和热处理等手段改善或消除[22]。

图 1 所示为铸坯凝固过程中中心偏析和中心疏松的形成过程[23]。

中心线偏析通常形成于铸坯凝固的最后阶段，是由尚未凝固的钢液因受到重力的作用向下运动所造成。由于凝固冷却的作用，已凝固的坯壳外表面会向内收缩，其内表面会向外收缩，由此在凝固末期铸坯中心会形成空隙，导致富集杂质组元的钢液因受到重力作用而向中心空隙流动，从而造成了中心偏析。这一过程可简述为“凝固收缩，重力补缩”。

此外在凝固后期，铸坯内部中心钢液中形成粗大的等轴晶，沉降在液相穴的底部。钢液渗过在液相穴堆积的柱状晶而向下运动，其中富集杂质元素的钢液穿过液相穴边界时凝固留下的痕迹就是 V 形偏析。图 2 所示为大方坯横、纵截面中心位置处 V 形偏析的形貌，图 2(a)为横截面，表现为点状分布的同心圆；图 2(b)为纵截面，表现为大小相同间隔相当的“V”字形。



1- 柱状晶生长；2- 自由等轴晶生长；3- 等轴晶凝固；4- 流动的两相区
5- 在刚性的两相区内钢水渗透； 6- 形成通道
7- 通道在中性线两边形成；8- 完全凝固

图 1 连铸坯的凝固过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of solidification process of continuous casting slab

铸坯厚度越大，两相区的宽度就越大，温度梯度减小，有利于生成等轴晶使中心偏析减轻，对于大方坯来说，宽厚比取 1.2~1.4 为宜。但是铸坯越厚，矫直力增加使变形率增大，铸坯产生内裂纹的几率增大。

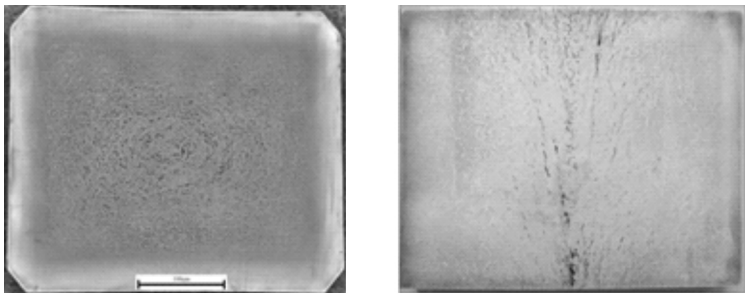
2.3 碳化物的不均匀性

碳化物不均匀性主要是由钢中的偏析现象（尤其是枝晶偏析和区域偏析)所造成的，一般表现为带状碳化物、网状碳化物和液析碳化物。

2.3.1 带状碳化物

带状碳化物是指钢液在凝固过程中因晶间偏析而造成碳浓度不同的偏析带，在轧制冷却过程中从高浓度区域析出大量过剩的二次碳化物，从而形成黑白(高低碳)相间的碳化物条带状组织。

翟蛟龙等[24]在过热度为 25~45 ℃的条件下，对 GCr15 轴承钢铸坯的生产工艺进行优化：采用轻压下技术后，在轧钢过程中进行 10 h 的高温扩散，再配合轧后快冷技术，最终使 GCr15 热轧棒材的带状碳化物评级由 3.5 降至 2.5。



(a)铸坯横截面示意图　　(b)铸坯纵截面示意图

图 2 大方坯 V 形偏析的形貌

Fig.2 Schematic diagram of v-shaped segregation of slab

2.3.2　网状碳化物

网状碳化物指过共析钢中沿奥氏体晶粒边界析出且呈网络状分布的过剩二次碳化物,它与钢的化学成分和偏析程度有关。网状碳化物是在铸坯轧后冷却的过程中产生,需要在一定的温度内冷却一定时间才会产生,即随着温度的降低碳在奥氏体中的溶解度不断降低,在冷却的过程中过剩的碳逐渐沿着奥氏体晶界不断析出,形成了二次碳化物。

可以通过降低终轧温度,提高轧后冷却速度等方式并辅以球化退火处理,来控制网状碳化物的级别。

杨洪波等[25]研究了终轧温度(750~900 ℃)和成品规格(ϕ12 mm 和 ϕ5.5 mm)对于 GCr15 轴承钢网状碳化物析出的影响,发现当轧制规格为 ϕ12 mm、终轧温度从 900 ℃降至 800 ℃的过程中,网状碳化物级别降低,在 800 ℃时达到最低,为 1.5 级;而当终轧温度降为 750 ℃时,网状碳化物级别反而升高为 2.0 级。当轧制规格为 ϕ5.5 mm、终轧温度从 900 ℃降至 850 ℃的过程中,网状碳化物级别降低,在 850 ℃时达到最低,为 1.5 级;当终轧温度继续降至 800 ℃时,网状碳化物级别又升高为 2.5 级。因此对于小规格轧材来说,终轧温度过低反而不利于抑制网状碳化物的析出,最佳的终轧温度与轧制规格有关。

2.3.3　液析碳化物

液析碳化物是指液相中的碳与合金元素富集而产生的亚稳共晶莱氏体,在热加工过程中破碎为不规则的块状碳化物,并沿轧制方向呈条状或链状分布。液析碳化物是由不合理浇注、冷却条件异常等引起的较为严重的枝晶偏析,以及铬元素降低碳在奥氏体中最大固溶度综合作用的结果。

在实际生产中,主要对铸坯进行高温扩散退火来减轻或消除液析碳化物。由于液析碳化物的理论溶解温度大约为 1 180 ℃左右,故需要在低于此温度下进行长时间保温,才有利于将之消除。因此,需要对加热炉的加热速率、保温时间、保温温度等参数进行综合考量,才能够减轻甚至消除液析碳化物对钢材的不利影响[26,27]。

3　改善大方坯内部质量的措施

在实际生产过程中,改善铸坯宏观偏析的技术手段主要有两种:一是给液相穴提供等轴晶的形成条件(低过热度浇注和电磁搅拌技术);二是补偿铸坯凝固末端的收缩量 (凝固末端轻压下及重压下技术)。

3.1　低过热度浇注

通常采用低过热度浇注和电磁搅拌技术来扩大中心等轴晶区,以此来降低铸坯中心偏析的程度。

当过热度小于 10 ℃时,中心等轴晶率明显增加且中心碳偏析指数明显降低,但是过热度太低不利于夹杂物的上浮,保护渣的润滑性差,同时也容易堵塞水口,对生产工序要求太高以致难以进行长时间操作。

逯志方等[28]对比研究了低过热度(17±2) ℃浇注和常规过热度(30±5) ℃浇注对轴承钢内部组织的影响,发现低过热度浇注所得中心等轴晶区的比例相较于常规工艺提高约 5.02%;低过热度工艺所得铸坯的中心偏析有一定的改善,但在铸坯内弧侧 1/4 处存在压下裂纹,且对于盘条的酸洗低倍组织和碳化物不均匀性改善不明显。

3.2　电磁搅拌技术

电磁搅拌技术通过对钢液施加电磁力,促进钢液的强制流动,并能够打碎树枝晶作为等轴晶形核的核心,从而提高铸坯内的等轴晶率。根据作用位置的不同,可分为结晶器电磁搅拌(M-EMS),二冷区电磁搅拌(S-EMS)和凝固末期电磁搅拌(F-EMS)。

张健等[29]通过优化二次冷却比水量和结晶器电磁搅拌参数,有效降低了 70 # 钢的缩孔缺陷等级,当二冷比水量调整为 0.83 L/kg 时,缩孔缺陷等级由原来的 1.28 降至 1.00;再结合搅拌强度 200 A、频率 4 Hz 的结晶器电磁搅拌参数,铸坯的缩孔缺陷等级已控制在 1.00 以下。图 3 所示为三种电磁搅拌技术的作用位置。

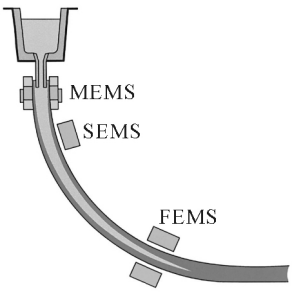


图 3　三种电磁搅拌技术的作用位置

Fig.3　Action positions of three electromagnetic stirring technologies

王彪等[30]通过数学模型初步计算凝固末端的坯壳厚度,利用射钉实验结果对数学模型进行修正,找出了液芯为 ϕ35~ϕ55 mm 的位置,确定将末端电磁搅拌器安装在距弯月面 8 m 处;并利用特斯拉计现场测试电磁搅拌器的磁感应强度确定电流为 550 A,频率为 13 Hz 的最佳搅拌参数。

3.3 轻压下技术

通过轻压下技术(SR)来补偿大方坯凝固末期钢液的收缩量，以此来阻碍富集溶质元素的钢液流动，从而降低凝固桥之间疏松和缩孔的体积，使最终得到的凝固组织结构更为均匀，达到改善中心偏析和 V 形偏析的目的。凝固末端轻压下技术适用于板坯和大方坯连铸，而液芯压下技术(LCR)则主要用于薄板坯的连铸连轧。

安航航等[31]通过研究凝固末端电磁搅拌和轻压下复合技术发现：大方坯的中心固相率对凝固末端电磁搅拌的位置和轻压下的压下区间具有决定作用，而拉速是影响中心固相率的主要因素，当拉速从 0.43 m/min 提高到 0.52 m/min 后，铸坯横截面的中心偏析指数从 1.09 降至 0.96，纵截面的中心线偏析指数从 0.83~1.17 变为 0.96~1.06，可完全消除 V 形偏析和中心缩孔；而大方坯生产 BU 同时采用凝固末端电磁搅拌和轻压下时，轻压下的最优压下区间所对应的铸坯固相率为 0.30~0.75。

4 结语

以上生产实践表明，连铸过程中的电磁搅拌和轻压下技术对于改善特殊钢大方坯内部的偏析情况均有着重要作用。其中，结晶器电磁搅拌(M-EMS)和二冷区电磁搅拌(S-EMS)技术的重点是确定适宜的搅拌参数(电流强度与频率)；凝固末端电磁搅拌(F-EMS)和轻压下技术的重点则是寻找铸坯的凝固终点，因此对于不同钢种需根据其固相率选取适宜的压下区间。

参考文献：

[1] 胡坤太，仇圣桃，张慧，等. 重钢小方坯连铸机内置式结晶器电磁搅拌器的研制[J]. 钢铁，2003，38(5): 22-24.

[2] Kunstreich S, Dauby P H. Effect of liquid steel flow pattern on slab quality and the need for dynamic electromagnetic control in the mould [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2005, 32(1): 80-86.

[3] 陈建国，江国利，庞永刚. 结晶器电磁搅拌在小方坯连铸上的应用[J]. 北京科技大学学报，2007，29(1): 142-145.

[4] Nosochenko O V, Isaev O B, Lepikhov L S, et al. Reducing axial segregation in a continuous-cast semifinished product by micro-alloying [J]. Metallurgist, 2003, 47(5-6): 244-247.

[5] 王念春. 连铸中间包等离子体加热装置控制系统 [J]. 电子技术应用, 2001, 9: 31-33.

[6] 王晓东，李廷举，金俊泽.电磁场对连铸末端凝固过程的影响[J]. 金属学报，2001，37(9): 971-974.

[7] Peter G，Rosemarie S V. Modern casters and future trends in casting technology [J]. Metallurgical Plant and Technology International, 2000, 23(4): 94-96.

[8] Byrne C, Tercelli C. Mechanical soft reduction in billet casting [J]. Steel Times International, 2002, 26(9): 33-35.

[9] 王忠英，张兴中，干勇，等. 轴承钢大方坯连铸工艺研究 [J]. 钢铁研究学报，2002(5): 16-20.

[10] 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.

[11] 徐德祥，尹钟大. 高强度弹簧钢的发展现状和趋势 [J]. 钢铁，2004(1): 67-71.

[12] 申勇，申斌，吴静，等. 弹簧钢的技术发展及生产工艺现状[J]. 金属制品，2009，35(3): 22-25.

[13] 赵爱民，毛卫民，崔成林，等. 电磁搅拌对弹簧钢 60Si2Mn 凝固组织的影响[J]. 北京科技大学学报，2000(2): 134-137.

[14] 王毅，范正，许诚信，等. 改善弹簧钢连铸方坯中心碳偏析的试验[J]. 钢铁研究，1993(2): 31-34.

[15] 蒋丽红，田乃媛. 弹簧钢连铸坯中心偏析的研究 [J]. 钢铁，2010，45(1): 43-45.

[16] 陈亮，宋波，陈天明，等. 320 mm×410 mm 大方坯连铸重轨钢质量改进与应用[J]. 钢铁，2017，52(4): 31-37.

[17] 蒲学坤. 42CrMo 合金结构钢大方坯连铸工艺研究与应用[J]. 中国冶金，2007(9): 11-13.

[18] 朱荣，田新中，祭程，等. 动态轻压下技术在 SWRH82B 大方坯连铸中的应用[J]. 计算机与应用化学，2010，27(12): 1707-1710.

[19] 韩志强，袁伟霞，蔡开科，等. 连铸坯内裂纹的开线与防止[J] .连铸，1990(6)：10-15，18.

[20] 韩志强. 连铸坯中微观偏析的模型研究 [J]. 金属学报，2000(8): 869-873.

[21] 罗森，朱苗勇，祭程，蔡兆镇. 钢连铸过程的溶质微观偏析模型[J]. 钢铁，2010，45(6): 31-36.

[22] Y Zhai, Y Chen, Y Zhang, et al. Computational Prediction Model of Macrosegregation in Continuously Casting Steel Blooms [C] // Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2011: 316-319.

[23] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 293.

[24] 翟蛟龙，陈敏，陶佳伟. 改善 GCr15 轴承钢碳化物带状组织的研究[J]. 特钢技术，2016，22(2): 50-51，56.

[25] 杨洪波，朱伏先，马宝国，等. 终轧温度对 GCr15 轴承钢网状碳化物析出的影响[J]. 特殊钢，2010，31(1): 55-56.

[26] C M Lin, H H Lai, J C Kuo, et al. Effects of carbon content on solidification behaviors and morphological charactteristics of the constituent phases in Cr-Fe-C alloys. [J] Materials Characterization, 2011, 62(12): 1124-1133.

[27] S B Hosseini, R Dahlgren, K Ryttberg, et al. Dissolution of Iron-chromium carbides during white layer formation induced by hard turning of AISI 52100 steel [J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 107-112.

[28] 逯志方，张治广，赵铮铮，等. 过热度对轴承钢内部组织的影响[J]. 工程科学学报，2016，38(S1): 45-49.

[29] 张健，陈登福，温良英，等. 二次冷却和结晶器电磁搅拌对高碳钢中心缩孔的影响[J]. 过程工程学报，2008(S1): 210-213.

[30] 王彪，谢植，贾光霖，等. 凝固末端电磁搅拌参数确定及其对中心偏析的影响[J]. 钢铁，2007(3): 18-21.

[31] 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.