



GCr15 轴承钢方坯连铸轻压下工艺优化与实践

陈 德, 张广军, 刘吉刚

(江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214429)

摘 要:为提高 GCr15 轴承钢连铸坯均质化水平,改善内部裂纹、缩孔等缺陷,通过实物计算坯壳厚度生长比例、钢种热属性测试,设计浇注过程大压下和联合轻压下试验,监控浇注过程铸坯表面温度和拉矫机工作状态等方法,优化轻压下工艺。结果表明,连铸轻压下合理的起始位置 R 为 42%~45%,为获得更优低倍质量,200 mm×200 mm、240 mm×240 mm、300 mm×340 mm 三种规格连铸轻压下起始位置较原工艺后置 1~3 m;以 200 mm×200 mm GCr15 为例,增加铸坯压下量,由 1.25 mm/m 提高到 2.5 mm/m,可减轻铸坯轻压下裂纹,显著改善铸坯 Y-Z 纵向低倍成分和组织均匀性,轧材中心碳偏指数普遍达到 0.97~1.03,实现了既不产生明显轻压下裂纹、又能改善中心偏析和 V 型偏析缺陷的目标。

关键词:GCr15 轴承钢; 铸坯低倍; 轻压下; 均质化; 凝固传热; 应变

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00025 **中图分类号:**TF777.2

Process Optimization and Practice on CC Soft Reduction in GCr15 Bearing Steel Billet

Chen De, Zhang Guangjun, Liu Jigang

(Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

Abstract: For improving the level of GCr15 bearing steel CC billet chemical homogenization and defects such as inner crack and shrinkage cavity, the soft reduction process was optimized by the physical calculation of shell thickness growth ratio, steel grade thermal property test, design casting process under large pressure and combined soft reduction test, monitor the surface temperature of the casting process and the working condition of the tension leveler. The results show that the reasonable starting position R of continuous casting SR is 42%~45%, in order to obtain better macrostructure quality, the starting position of three CC billet sizes 200 mm×200 mm, 240 mm×240 mm, 300 mm×340 mm is 1~3 m behind the original process; Taking 200 mm×200 mm GCr15 billet as an example, increasing the amount of casting reduction from 1.25 mm/m to 2.5 mm/m, which can reduce the cracks of billet, significantly improve the Y-Z longitudinal of casting billet macrostructure composition and homogenization, and the central carbon segregation index of the rolling material generally reaches 0.97~1.03, realizing the goal of not producing obvious cracks under soft reduction, and modifying the central segregation and V-segregation defects.

Key Words: GCr15 Bearing Steel; Macrostructure of CC Billet; Soft Reduction; Chemical Homogenization; Solidification and Heat Transfer; Strain

方坯连铸+热轧制是当前轴承钢坯材生产的主流工序,高碳铬轴承钢固液两相区跨度大,决定了其连铸坯中心疏松、缩孔、成分偏析缺陷显著,伴随着氧化物、硫化物和碳化物偏聚等质量缺陷,对于轴承制品的机加工、热处理及各项性能带来负面影响^[1-4];GCr15 轴承钢成分偏析在坯、材纵向通常表现为 V 型、带状、色泽差异和中心暗圈等形貌。

铸坯低倍质量主要受浇注温度、浇注速度、结晶器冷速、轻压下工艺、电磁搅拌等因素影响^[5-7]。调整二冷强度可以优化偏析程度^[8-9],但对于大规格

方坯连铸,外部冷却对铸坯内部的影响已明显减弱;电磁搅拌在液相含量高、流动性好的浇注前、中期,能够显著影响凝固组织,在凝固后期,由于坯壳厚度大、液相量少,其影响作用逐步减弱^[10-11];铸坯轻压下是改善铸坯凝固后期中心偏析、从而提高轧材均质化水平的有效手段^[12],但不科学的轻压下工艺却会加重铸坯内部裂纹、偏析、中心疏松、缩孔等缺陷。本文通过轻压下工艺试验,结合铸坯-轧材低倍评价,探索高碳铬轴承钢合理的连铸轻压下工艺,促进其内部质量提升。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3710100)

作者简介: 陈 德(1975—),男,本科,高级工程师;

E-mail:chende@citicsteel.com;

收稿日期: 2024-02-01

通信作者: 刘吉刚(1983—),男,博士,高级工程师;

E-mail:liujigang@citicsteel.com

1 试验材料及方法

方坯轴承钢生产工艺路线:公称容量 100 t EAF/BOF→LF→VD/RH→(200 mm×200 mm/240 mm×240 mm/300 mm×340 mm)CCM→热轧。连铸环节采用钢包水口下渣检测、全程保护浇注、结晶器液面自动控制、保护渣自动添加、结晶器和末端电磁搅拌、二冷汽雾冷却、铸机拉矫辊压下等设备和技

术,保障高质量铸坯生产。
在铸坯上截取横向、纵向试样进行评价,如图 1 所示,X 为与拉浇方向垂直的水平方向,Y 为与拉浇方向垂直的竖直方向,Z 为拉浇方向,按照国标 GB/T226—2015 标准热酸腐蚀法进行检测,其中,X-Y 横向样,Y-Z 纵向样,经过铸坯拉浇中心线,X-Z 纵向样在靠近内弧 1/4 厚度处。

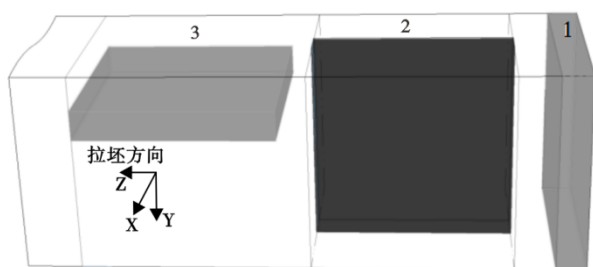


图1 铸坯低倍取样示意图:(1)X-Y 横向样,(2)Y-Z 纵向样,(3)X-Z 纵向样

Fig. 1 Schematic of macrostructure sample from billet/bloom : (1) X-Y cross-section sample, (2) Y-Z longitudinal-section sample, (3) X-Z longitudinal-section sample

铸坯成分偏析取样按图 2 所示均匀间隔,在铸坯上下表面中心线上用 $\phi 5$ mm 钻孔取屑,共取样 9 点,采用红外碳硫分析仪检测碳成分。

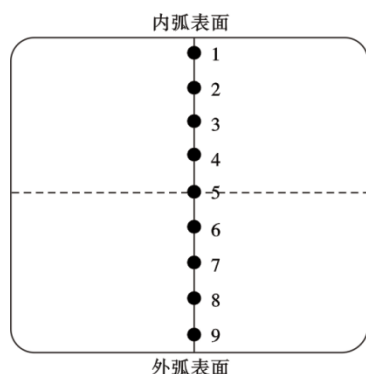


图2 碳偏析取样示意图

Fig. 2 Sample schematic drawing for carbon segregation analysis

2 试验优化改进前结果与分析

按照图 1 取样方式,进行了三种规格轴承钢铸坯低倍分析,轻压下工艺改进前低倍形貌如图 3 所示,200 mm×200 mm、240 mm×240 mm、300 mm×340 mm 规格连铸的压下量分别为 1.25、1.15、1.20 mm/m,铸坯上均可见轻压下裂纹(图 3 中黑线圈内所示)、中心疏松、中心缩孔、V 型偏析等缺陷,由于高碳钢种特性,连铸过程中上述缺陷易于出现。

由图 3 铸坯低倍形貌可知,当前轻压下工艺浇注坯料内部缺陷具备共同特征。

1)Y-Z 向低倍显示轻压下裂纹产生在铸坯 1/4 厚度附近,裂纹倾斜方向接近 V 型偏析方向,上部内弧侧比下部外弧侧明显严重,裂纹长度为 5~30 mm。

2)轻压下裂纹倾斜于 X-Y 面,所以在 X-Y 向低倍上以类似疏松黑点存在,轻压下裂纹开口度越大,疏松黑点越明显。

3)在 X-Z 向低倍上也可见轻压下裂纹,对称分布在中心两侧、宽度与 Y-Z 向相近。

生产实践发现,相比不采用轻压下工艺,方坯低倍轻压下裂纹会加剧铸坯中心疏松和中心缩孔缺陷程度,如图 3 所示。严重的轻压下裂纹和伴生的中心缩孔缺陷都会遗传至轧材,如图 4 所示,在轧材中以点状缺陷呈现(如圈中标识)。

这些缺陷经 C/S 分析和原位分析都表现出明显的成分正偏析,如图 5 所示,在存在轻压下裂纹和中心孔隙缺陷的 GCr15 轴承钢 200 mm×200 mm 铸坯上,截取包含中心和内弧侧缺陷的 100 mm×100 mm 试样,原位分析结果显示,存在明显成分偏析缺陷:轻压下裂纹部位 C、Cr 正偏析度分别可达 1.256 和 1.536,中心孔隙部位 C、Cr 正偏析度分别达到 1.15 和 1.35,试样上伴生有 0.8~0.9 的负偏析区域。

300 mm×340 mm 轴承钢方坯经 800 °C 退火后加工 Y-Z 向低倍试样,发现存在明显的 V 型偏析缺陷,在低倍试样纵向明暗相间部位取样碳硫分析,碳含量偏差达 0.208%,如图 6 所示,说明 1.20 mm/m 轻压下量没有起到改善偏析的效果。

综上所述,铸坯截面偏析缺陷会降低轴承钢组织均匀性,影响轴承钢的加工性能和使用性能。为了实现轻压下技术改善中心偏析的理想作用,采用轻压下工艺既要达到一定的压下量、改善铸坯的内部 V 型和中心疏松缺陷,又要不产生严重的轻压下开口裂纹和伴生中心缩孔,因此,需要理论结合实际探索符合具体铸机的轻压下工艺和管理技术。

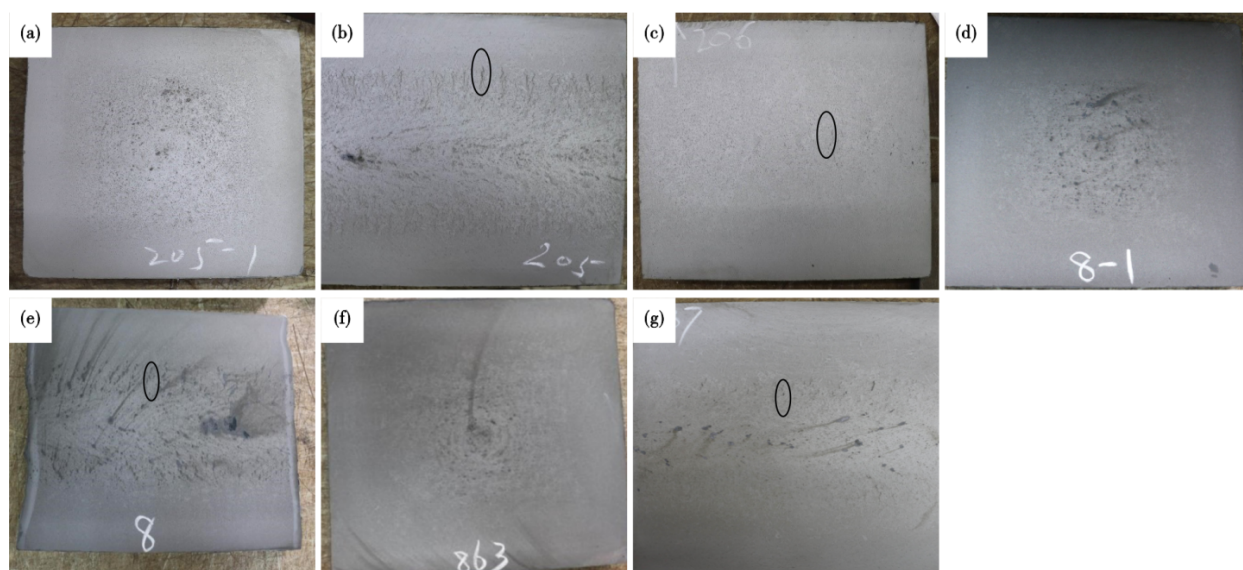


图3 三种规格连铸轻压下 GCr15 方坯低倍形貌:(a) 200 mm×200 mm X-Y 向,(b) 200 mm×200 mm Y-Z 向,(c) 200 mm×200 mm X-Z 向,(d) 240 mm×240 mm X-Y 向,(e) 240 mm×240 mm Y-Z 向,(f) 300 mm×340 mm X-Y 向,(g) 300 mm×340 mm Y-Z 向

Fig. 3 Macro-morphology caused by CCM soft reduction in three sizes billet of GCr15 bearing steel:(a) 200 mm×200 mm X-Y direction, (b) 200 mm×200 mm Y-Z direction, (c) 200 mm×200 mm X-Z direction, (d) 240 mm×240 mm X-Y direction, (e) 240 mm×240 mm Y-Z direction, (f) 300 mm×340 mm X-Y direction, (g) 300 mm x 340 mm Y-Z direction

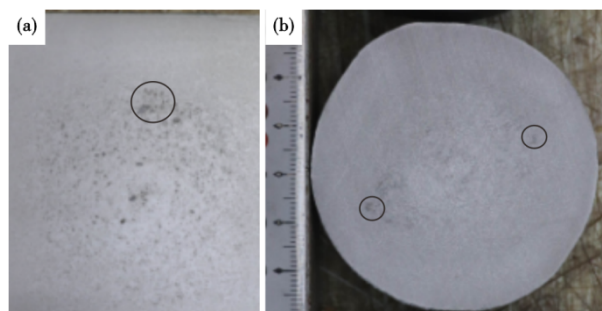


图4 GCr15 方坯(240 mm×240 mm)轻压下裂纹和轧材遗传缺陷:(a) X-Y 铸坯低倍,(b) 轧材低倍

Fig. 4 SR cracks of GCr15 billet(240 mm×240 mm) and inherited defects of rolling bar: (a) X-Y macrostructure of billet, (b) macrostructure of rolling bar

3 轻压下优化改进试验方案

3.1 轻压下开始位置确定

研究表明^[13-14],连铸轻压下裂纹是钢在脆性温度区内,压下过程拉应力应变超过钢的临界应变,即轻压下作用起始部位液相区比率 R 高造成的,裂纹由外向内发展;为了确定连铸轻压下最佳开始辊位置,测量了方坯 Y-Z 低倍上轻压下裂纹距内弧表面距离 d 以及轻压下前后半铸坯厚度 h_0 和 h ,如图7所示。

假设铸坯轻压下等比例减厚,根据公式 $R = (h-d)/h$ 计算各铸机不同规格铸坯轻压下裂纹起始

端的铸坯液相区比率 R ,图3中三类规格 GCr15 铸坯分析示例见表1。

从表1中得知,300 mm×340 mm 起始压下部位 R 为44.8%,低倍形貌良好,如图3所示。经多次试验起始压下部位向后移减少 R 值使 R 为42%~45%时,其低倍结果良好且具有再现性,说明 R 定在该区间较为合理,对比其它低倍形貌不佳工艺在 R 值、压下区间、压下量和压下点处铸坯表面温度等方面与其存在的差异,进而确定调整方向:200 mm×200 mm 和 240 mm×240 mm 铸机轴承钢轻压下开始位置后置2~3 m,300 mm×340 mm 铸机轴承钢轻压下开始位置后置1~2 m,进行生产验证。

3.2 轻压下工艺确定

为了准确确定连铸拉矫机压下量对于偏析的影响,在其他工艺同等条件下,以200 mm×200 mm 方坯铸机为例,设计1.25、1.72、2.03、2.19、2.34、2.43 mm/m 共6种压下量工艺试验,结果显示6种压下工艺有不同的V型偏析、轻压下裂纹和中心致密度低倍形貌,为准确评价各工艺对铸坯断面碳偏分布的作用大小,按图2所示对6种工艺 X-Y 低倍分析内外弧中心线碳含量,做碳偏析指数分布如图8所示。

从图8碳偏析指数分布可以看出,压下量为1.25、2.03 mm/m 的铸坯中心碳偏指数和断面碳偏极差最大;压下量为1.72、2.34 mm/m 工艺的效果居中,

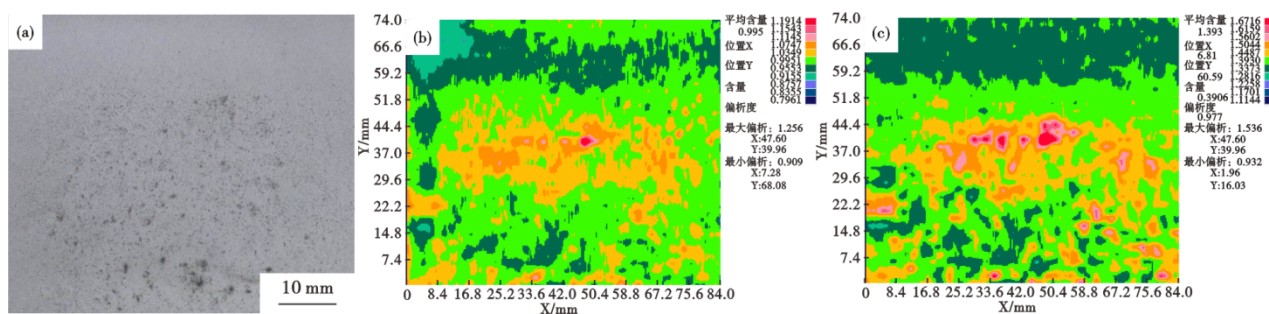


图5 200 mm×200 mm GCr15 低倍试样原位分析结果:(a)原位低倍,(b)碳偏析二维图,(c)铬偏析二维图

Fig. 5 Analyzed result of original position analysis on 200 mm×200 mm GCr15 billet sample: (a) macrostructure of original position analysis sample, (b) 2D drawing of Carbon segregation, (c) 2D drawing of chromium segregation

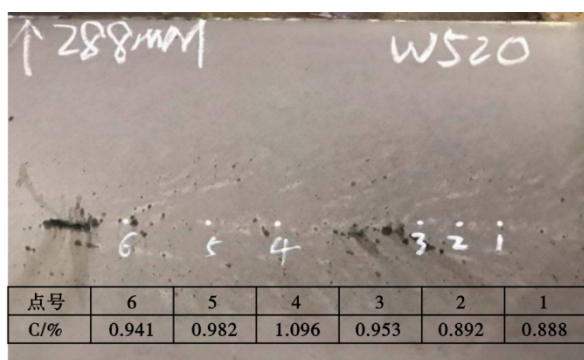
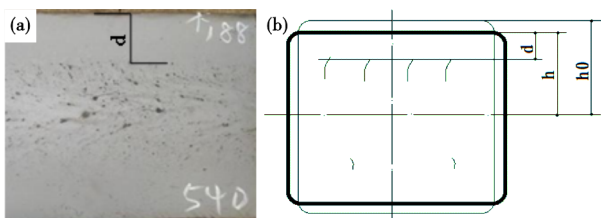


图6 300 mm×340 mm 轻压下铸坯V型偏析示意图

Fig. 6 Analysis schematic drawing of V-type segregation on 300 mm×340 mm billet applied soft reduction



注: d为轻压下裂纹距表面距离, h为1/2轻压下方坯厚度, h0为1/2方坯原始厚度

图7 轻压下裂纹测量实物图(a)及示意图(b)

Fig. 7 Analysis schematic drawing of scale measuring on SR crack: (a) Real billet, (a) Schematic of billet

表1 轻压下裂纹起始距离比例计算示例

Table 1 Examples of calculations of crack start distance under soft reduction condition

h0/mm	H/mm	D/mm	R/%
100	93	45	51.6
120	113	49	56.6
150	145	80	44.8

对碳偏有改善作用,轻压下裂纹第3点处碳含量呈正偏析;压下量为2.19、2.43 mm/m工艺的中心碳偏指数和断面碳偏极差最小、效果最好。

综上试验结果,在应变允许条件下,轻压下作

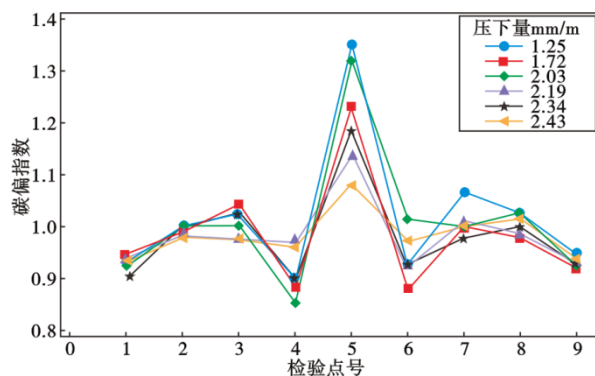


图8 6种大压下工艺200 mm×200 mm 铸坯内外弧中心线碳偏析指数分布

Fig. 8 Carbon segregation index of center line between inner and outer arcs in 200 mm×200 mm billet by 6 trials of heavy reduction process

用明显,拉矫机尽量采用较大压下量,同时对其前后拉矫机辅以一定压下量进行联合轻压下试验,达到既不产生明显轻压下裂纹、又明显改善中心偏析和V型偏析的目标为最佳轻压下工艺,这样就确定了轻压下区间和各拉矫机压下降位移量。

4 改进试验效果与分析

图8中6种工艺拉矫机间最大压下速率和变形速率分别为9 mm/min和 10^{-3} /s左右,压力辊处瞬间应变更大,远超文献介绍的裂纹临界应变值^[13, 15],但裂纹开口程度没有加重,这可能是由于变形速率增大影响了GCr15钢种的热物性参数,为此模拟轻压下的拉应力作用方向,如图9所示在铸坯X-Y向内弧侧取样加工 $\phi 10$ mm×130 mm热模拟拉伸试样。

试验1 200、1 230、1 260 °C三个温度下分别做 1×10^{-3} /s、 5×10^{-3} /s、 10×10^{-3} /s变形速率的热模拟拉伸试验,测得真应力和面缩率数据如图10所示。从图10可以看出,在1 200、1 230 °C增大变形速率条件下能够提高GCr15钢种的真应力和面缩率,减轻裂纹

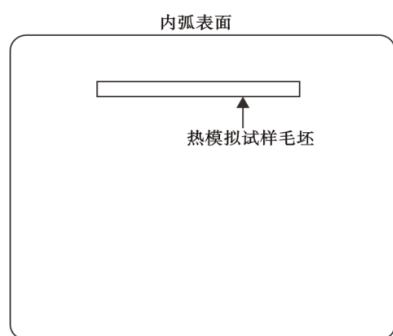


图9 热模拟取样示意图

Fig. 9 Sample schematic drawing for thermal simulation test

发生程度; 1 260 °C 不同变形速率条件下抗变形能力接近于零, 低于文献介绍的凌塑性温度(ZDT)-零强度温度(ZST)脆性温度范围, 这个关于变形速率对产生临界裂纹应变影响的问题研究报告还不多, 有待于今后进一步讨论。

根据图 11 所示凝固传热与轻压下机理, 合适的轻压下区间对应着理想的中心固相率范围, 在凝固

传热稳定条件下, 特定规格铸机方坯中心固相率对应着稳定的铸坯表面温度, 因此, 生产过程中要准确测量并储备轻压下各拉矫机辊, 尤其应关注开始拉矫机部位的铸坯表面温度, 由于天气、二次冷却等条件发生变化导致铸坯表面温度升降 10 °C 以上时, 就要改变拉矫机各辊轻压下区间或者调整拉速, 稳定压下部位铸坯温度; 同时监控好轻压下拉矫机工作状态, 出现异常时监测铸坯实际状况, 及时调控防止出现超出设计压下量偏差的异常。

经过以上综合实践探索, 轴承钢铸坯低倍形貌明显改观, 实现了既不产生明显轻压下裂纹, 又明显改善中心偏析和 V 型偏析的目标, 其中小方坯轴承钢改善最明显, 如图 12 所示, 200 mm×200 mm GCr15 铸坯压下率由 1.25 mm/m 提高到 2.5 mm/m 左右, 铸坯 Y-Z 纵向低倍轻压下裂纹、中心缺陷、V 型偏析明显改善, 轧材低倍断面色泽均匀、中心疏松和偏析轻微, 轧材中心碳偏指数普遍达到 0.97 ~ 1.03 的分布水平。

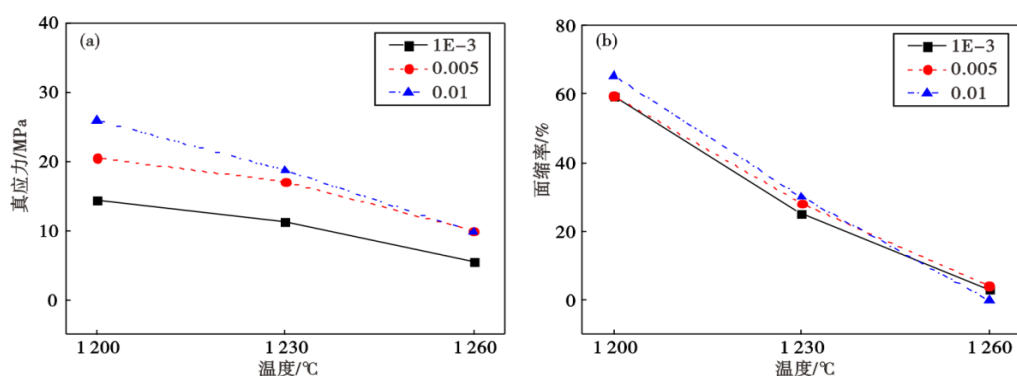


图 10 240 mm×240 mm GCr15 方坯不同温度和变形速率下热模拟拉伸测试结果: (a) 材料不同变形速率下真应力随温度变化曲线, (b) 材料不同变形速率下面缩率随温度变化曲线

Fig. 10 Thermal simulation result on 240 mm×240 mm GCr15 billet under different temperature and stretch strain : (a) The curves of steel stretch strain vs. temperature in condition of different extension rate, (b) The curves of steel area reduction ratio vs. temperature in condition of different extension rate

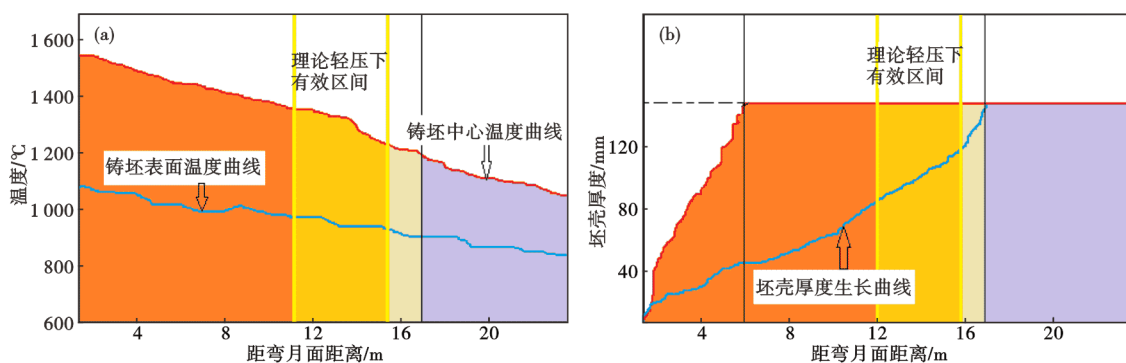


图 11 铸坯凝固传热与轻压下机理示意图

Fig. 11 Mechanism schematic drawing on heat transfer of solidification and SR process

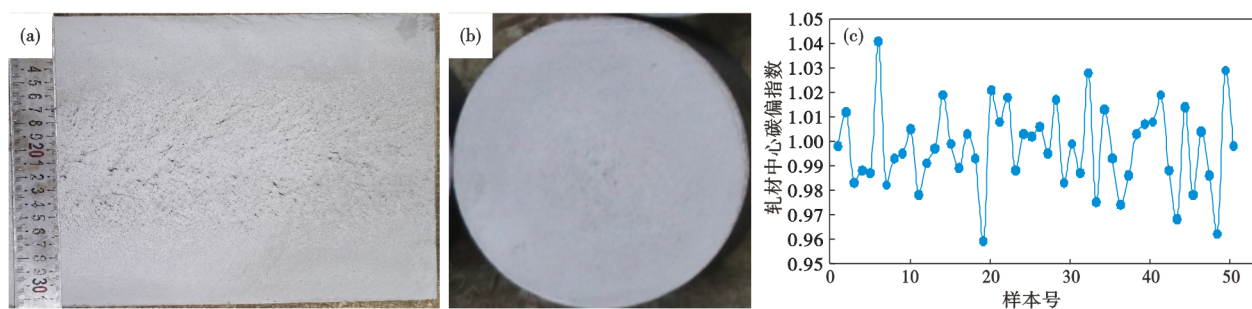


图12 理想轻压下GCr15坯材偏析示意图:(a)200 mm×200 mm GCr15铸坯Y-Z低倍形貌,(b)φ50 GCr15轧材X-Y低倍,(c)轧材中心碳偏指数分布

Fig. 12 Segregation schematic drawing by appropriate SR in 200 mm×200 mm GCr15 billet and its rolling bar: (a) Y-Z macro-morphology formed by appropriate SR process in 200 mm×200 mm GCr15 billet, (b) φ50 rolling bar X-Y macro-morphology of 200 mm×200 mm GCr15 billet, (c) central carbon segregation index distribution of the rolling bar

5 结论

(1)应用坯壳生长厚度预测方法,参照300 mm×340 mm铸坯轻压下裂纹起始距离比例,确定了连铸轻压下合理的起始位置R为42%~45%,为获得更优低倍质量,200 mm×200 mm、240 mm×240 mm、300 mm×340 mm三种规格连铸轻压下起始位置应较原工艺后置1~3 m。

(2)采用1.25、1.72、2.03、2.19、2.34、2.43 mm/m等6种压下工艺试验,确定了最佳轻压下工艺。200 mm×200 mm GCr15铸坯压下量由1.25 mm/m提高到2.5 mm/m,使铸坯Y-Z纵向低倍轻压下裂纹、中心偏析、V型偏析明显改善,轧材中心碳偏指数普遍达到了0.97~1.03的分布水平。实现了既不产生明显轻压下裂纹、又明显改善中心偏析和V型偏析缺陷的目标。

参考文献

- [1] 刘永铨. 钢的热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981: 138.
- [2] 陈德和. 钢的缺陷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1977: 18.
- [3] 俞 峰, 陈兴品, 杜松林, 等. 圆坯连铸GCr15SiMn的成分偏析和接触疲劳寿命研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 13-20.
- [4] 邹 涛, 王 鹏, 董艳伍, 等. Ce-Mg合金加入对GCr15轴承钢夹杂物和凝固组织的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 1-7.
- [5] 韩 静. 连铸工艺参数对高碳钢小方坯中心碳偏析和凝固组织的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
- [6] 陈 峰. 结晶器电磁搅拌对中碳钢连铸大方坯中间碳偏析的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
- [7] 安航航, 张国锋, 武佳毅, 等. GCr15轴承钢大方坯凝固过程微观偏析模型及应用研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 16-20.
- [8] 陈 永, 杨素渡, 黎建全, 等. 太钢大方坯连铸二冷技术研究[J]. 炼钢, 2007, 23(11): 4-8.
- [9] 左 欢, 杨祝英, 安航航. 凝固组织对GCr15轴承钢220 mm×260 mm连铸坯中心偏析的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 50-56.
- [10] 李建超, 崔建忠, 王宝峰, 等. 大方坯连铸凝固末端电磁搅拌的数值模拟和试验分析[J]. 金属热处理, 2007, 32(8): 69-71.
- [11] 杨吉春, 王 磊, 蔡开科, 等. 用M-IEMS改善重轨钢大方坯中心碳偏析和组织[J]. 包头钢铁学院学报, 2001, 20(2): 125-129.
- [12] 刘 伟, 吴 巍, 刘 浏, 等. 静态轻压下技术在GCr15轴承钢连铸生产中的应用[J]. 特殊钢, 2009, 30(1): 44-45.
- [13] 王一成, 胡 鹏. 连铸方坯轻压下内裂纹形成研究[J]. 炼钢, 2015, 31(2): 49-53.
- [14] 沈建国, 王迎春. 大方坯连铸内部缺陷与轻压下工艺研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(3): 335-338.
- [15] 汪 峰. 连铸坯中心裂纹的形成机理及抑制的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2003.