

轻压下改善 42CrMo 钢 300 mm × 400 mm 大方坯内部质量的工艺实践

饶金元¹ 张孟昀² 陈 君¹ 赵立华³ 包燕平²

(1 大冶特殊钢有限公司转炉厂,黄石 435001; 2 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;

3 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 以中碳钢 42CrMo 为试验钢,通过建立 300 mm × 400 mm 连铸大方坯凝固传热模型,确定合理压下区间 4[#] ~ 7[#] 辊压下量分别为“1 mm-2 mm-3 mm-1 mm”,并进行工业试验。试验结果表明,轻压下工艺对铸坯凝固各组织占比影响不大,但可明显改善中心致密性和偏析。铸坯芯部最大疏松点尺寸由 1 106 μm × 608 μm 缩小至 600 μm × 334 μm,横截面上碳偏析指数范围由 0.889 ~ 1.095 缩小至 0.962 ~ 1.064。轻压下工艺可有效改善铸坯内部质量。

关键词 42CrMo 钢 轻压下 大方坯 凝固组织 中心偏析

Process Plactice on Improvement of Internal Quality of 300 mm × 400 mm Cast Bloom of Steel 42CrMo by Soft Reduction

Rao Jinyuan¹, Zhang Mengyun², Chen Jun¹, Zhao Lihua³ and Bao Yanping²

(1 Converter Workshop, Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001;

2 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083;

3 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Taking medium carbon steel 42CrMo as test steel, through established solidification heat transfer model of 300 mm × 400 mm continuous casting bloom, in reasonable reduction zone the reduction of No. 4, 5, 6 and 7 roller being “1 mm-2 mm-3 mm-1 mm” is defined, and the industrial experiment is carried out. The experimental results show that the soft reduction process has little effect on the solidification structure of the bloom, but the central compactness and segregation can be improved obviously. The size of the largest porosity point in the core of bloom is reduced from 1 106 μm × 608 μm to 600 μm × 334 μm; the carbon segregation index range on the cross section is reduced from 0.889 ~ 1.095 to 0.962 ~ 1.064. The soft reduction process can effectively improve the internal quality of the bloom.

Material Index 42CrMo Steel, Soft Reduction, Bloom Casting, Solidification Structure, Center Segregation

大方坯由于较大的断面尺寸,凝固时加剧了元素在固、液两相的选分结晶,溶质在液相富集,凝固后期由于铸坯收缩产生负压,使高浓度钢液向中心流动,造成宏观偏析;另一方面,铸坯凝固终期形成“凝固晶桥”,阻止了钢液对铸坯凝固收缩的补充,从而造成中心疏松或缩孔^[1-3]。上述缺陷在后续加热和轧制过程中均无法有效消除,是制约高品质钢生产的瓶颈。

为改善上述铸坯缺陷,轻压下工艺被广泛应用于生产过程中^[3-4]。通过在连铸坯凝固末端附近收缩辊缝施加一定的压下量来补偿铸坯的凝固收缩量,可提高铸坯中心的致密性,同时抑制浓化钢水的流动与聚集,从而达到改善铸坯中心偏析及疏松的目的^[5-7]。

以 42CrMo 钢断面尺寸 300 mm × 400 mm 大方坯连铸生产过程为基础,建立非稳态二维凝固传热模型,并通过测温数据对模型准确性进行验证。基于凝固传热模型,结合钢种特性及实际生产条件,制

定合理的轻压下参数并进行试验,对试验前后样品进行分析,说明轻压下工艺主要影响铸坯芯部区域质量,对其他位置影响较小。

1 凝固传热模型

1.1 模型的建立及网格划分

以中碳合金钢 42CrMo 为试验钢建立模型,化学成分见表 1 所示。

根据“切片法”理论,假设切片模型由结晶器逐渐移动至连铸机空冷区。使用 Solidworks 软件进行建模,模型尺寸为 300 mm × 400 mm × 10 mm,导入到 ProCAST 软件中,每个网格长度为 5 mm,进行网格划分,如图 1 所示。

表 1 42CrMo 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of 42CrMo steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.41	0.25	0.67	0.01	0.01	1.05	0.17

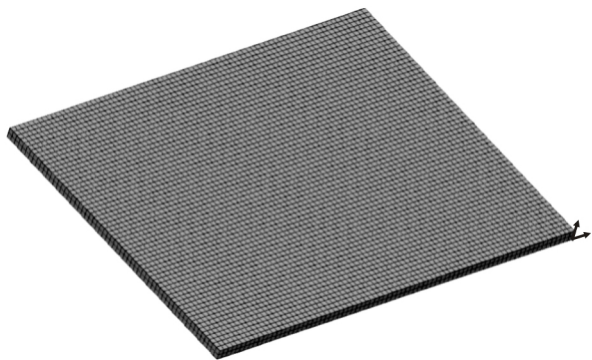


图 1 模型网格划分

Fig. 1 Mesh of model

1.2 模型假设及传热控制方程

连铸过程是钢液与外界传递热量的过程,为简化铸坯传热且不失合理性,参考文献[10-12]对模型进行假设。

简化后的含内热源二维传热控制方程见式(1)所示:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

式中: T —局部温度/ $^{\circ}\text{C}$; λ —铸坯导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$; c_p —比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$; ρ —密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$; Q —内热源/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$ 。

1.3 初始条件及边界条件确定

本模型中,钢液初始温度即为中间包测温,即 $T_{t=0} = T_{\text{中间包}}$ 。

凝固过程边界条件分为 3 个部分:结晶器区、二冷区和空冷区,其中二冷区又分为水冷区及气雾冷却区。各区热流密度/换热系数计算公式如下:

结晶器区:

$$q = 2\,680\,000 - b \sqrt{\frac{L}{\nu}} \quad (2)$$

$$b = \frac{1.5 \times (268\,000 - \bar{q})}{\sqrt{L_m/\nu}} \quad (3)$$

$$\bar{q} = \frac{\rho_w C_w Q_w \Delta T_w}{S_{\text{eff}}} \quad (4)$$

式中: q —结晶器瞬时热流密度/ $(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$; $\bar{q}$ —结晶器内平均热流密度/ $(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$; L —所求瞬时热流位置距弯月面的距离/ m ; L_m —结晶器有效长度/ m ; ν —拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ 。

二冷区:

水冷区:

$$h = 1\,000 \times 0.581 W^{0.451} (1 - 0.0075 T_w) \times \eta \quad (5)$$

气雾冷却区:

$$h = 350 W + 185 \quad (6)$$

式中: h —各区换热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$; W —冷却水水流密度/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$; T_w —冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$; η —与冷却辊有关的系数,根据实际情况调整。

空冷区:

$$q = \varepsilon \sigma [T_b + 273]^4 - (T_a + 273)^4 \quad (7)$$

式中: ε —辐射系数,取值 0.8; σ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数,其值取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_b —铸坯表面温度/ $^{\circ}\text{C}$; T_a —环境温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 物性参数的选择

模型计算中所需的物性参数通过 Jmat-Pro 软件计算得出,如图 2 所示。

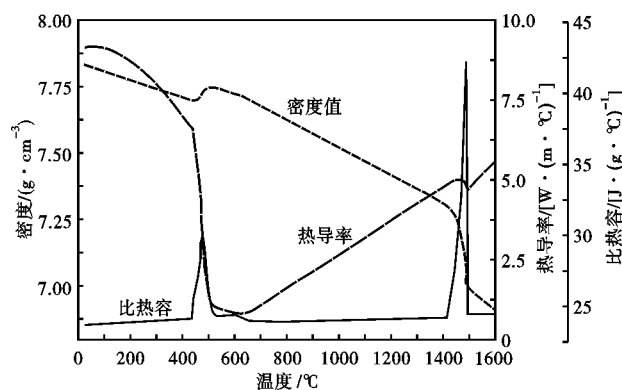


图 2 凝固模型物性参数

Fig. 2 Physical parameters of solidification model

中心固相率计算方法见式(8)所示。

$$f_s = \frac{T_L - T_i}{T_L - T_s} \quad (8)$$

式中: f_s —固相率; T_L —钢种液相线温度,取 $1\,496\,^{\circ}\text{C}$; T_s —钢种固相线温度,取 $1\,428\,^{\circ}\text{C}$; T_i —某时刻温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 模型的验证

为验证模型计算的准确性,对连铸过程不同位置处的铸坯宽窄面中心位置进行测温,通过将计算温度场与实测温度场数值进行对比,最大误差小于 3%,说明该数学模型计算结果较为准确,可用于模拟铸坯的凝固过程。

图 3、表 2 所示为拉速 $0.58\, \text{m}/\text{min}$ 时,温度场对比结果。

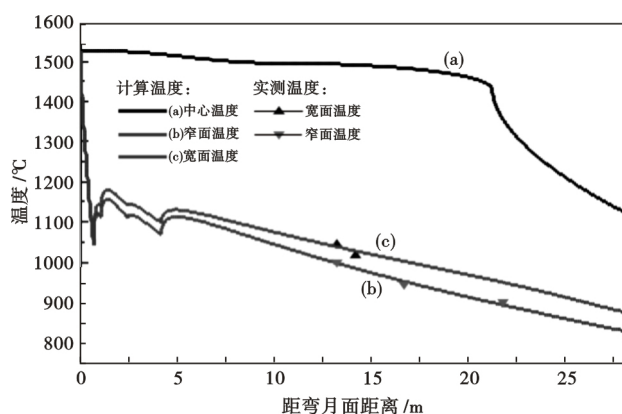


图 3 铸坯实测温度与计算温度对比图

Fig. 3 Comparison between measured temperature and calculated temperature of cast bloom

表 2 铸坯实测温度与计算温度汇总

Table 2 Summary of measured temperature and calculated temperature of cast bloom

铸坯	测温位置/ m	实测值/ °C	计算值/ °C	差值/ °C	误差/ %
宽面中心	13.2	1 045	1 037	8	0.77
	14.1	1 017	1 028	11	1.07
窄面中心	13.2	1 001	996	5	0.50
	16.6	952	945	7	0.74
	21.7	893	902	9	0.99

2 试验方案的制定

轻压下工艺的实施可有效防止连铸坯芯部浓质钢液的聚集,同时提高芯部组织致密性,改善连铸坯中心偏析及疏松。但上述效果的实现需配合合理的压下区间并设定有效的压下量,不然会出现压下无效果或压下裂纹的情况,反而恶化铸坯内部质量^[3-4]。

2.1 压下区间确定

压下区间的选择与铸坯中心固相率相关,本文选取中心固相率 $F_s = 0.3 \sim 0.9$ 对应位置为合理压下区间。通过上述凝固传热模型的计算,得出此连铸工艺条件下不同位置铸坯中心固相率的分布曲线,见图 4 所示。

由凝固模型计算可得,当拉速为 0.58 m/min 时,铸坯凝固终点位置距弯月面约 20.38 m,合理压下区间为距弯月面 17.26 ~ 20.33 m,考虑生产时拉速的正常波动范围,最终确定压下辊为 4# ~ 7# 辊。

2.2 压下量的确定

结合钢种特性及实际生产条件,确定总压下量为 7 mm。单辊压下量的确定主要与中心固相率的分布^[5]有关。通常来说,各辊压下量的分配遵循抛物线形式,即随着中心固相率的增加,单辊压下量先

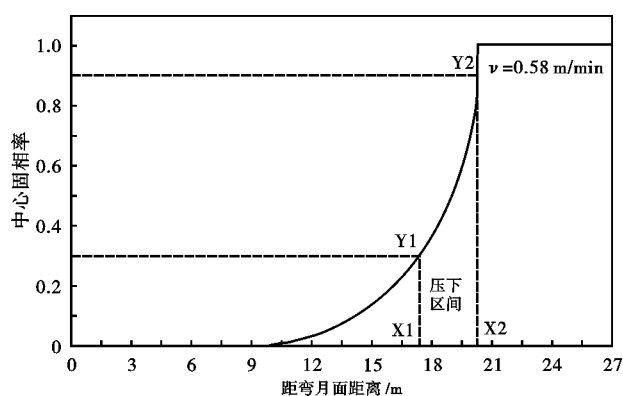


图 4 铸坯中心固相率分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of solid fraction in center of cast bloom

表 3 压下区间内拉矫辊对应固相率及压下分配量

Table 3 Solid fraction and reduction distribution in reduction zone of tension roller

辊号	距弯月面距离/m	中心固相率	压下量/mm
4#	17.30	0.29	1
5#	18.56	0.43	2
6#	19.81	0.66	3
7#	21.06	1.00	1

增加后减小。表 3 为压下区间内各拉矫辊对应的中心固相率及压下分配量。

3 分析与讨论

通过上述计算结果指导工业试验,试验后取样品进行对比分析,以明确压下工艺对铸坯内部质量的影响。沿铸坯拉坯方向取厚度为 20 mm 的低倍样品,横截面上宽度及厚度方向分别间隔 40 mm、30 mm 取样进行碳含量分析。取样位置见图 5 所示。

3.1 压下工艺对凝固组织的影响

用容积比 1:1 的盐酸 + 水溶液,加热至 70 ~ 90 °C 对试验前后样品浸蚀 40 min 得到低倍组织形貌。为明确各部分所占比例,使用 Image-Pro 软件对试验前后凝固组织各区域比例进行计算。组织形貌对比

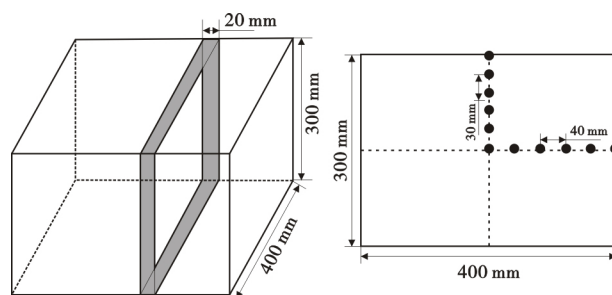


图 5 铸坯取样示意图

Fig. 5 Sampling schematic of cast bloom

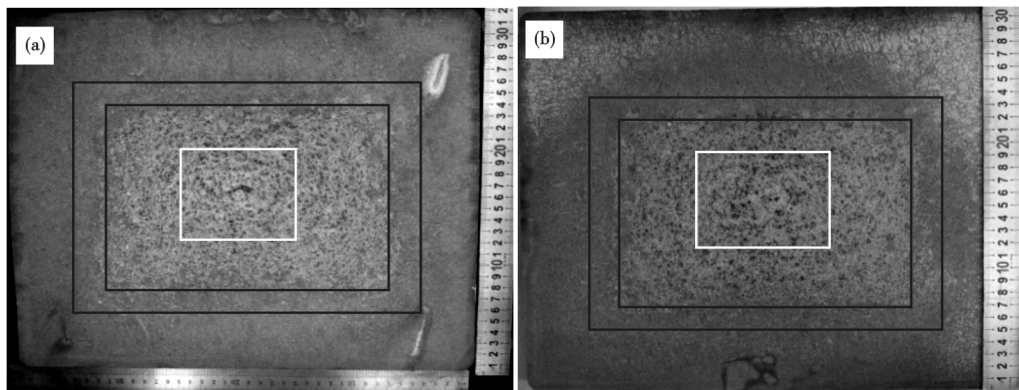


图 6 未轻压下 (a) 和轻压下 (b) 铸坯低倍组织形貌对比

Fig. 6 Comparison of macrostructure morphology of cast bloom without (a) and with (b) soft reduction

表 4 未轻压下 (a) 和轻压下 (b) 铸坯各区域比例对比

Table 4 Comparison of proportion of each zone in cast bloom (a) without and (b) with soft reduction

工艺	各区域占比/%		
	柱状晶区	柱等交界区	等轴晶区
未轻压下 (a)	46.2	17.3	33.6
轻压下 (b)	49.8	16.8	30.5

见图 6 所示,各凝固区域占比见表 4 所示。

由图 6、表 4 对比结果可知,轻压下前后铸坯低倍组织各区域占比相差不大。取铸坯芯部 20 mm × 20 mm 样品进行表面磨抛处理,以观测其偏析及疏松变化。由图 7 可知,未采用轻压下工艺的铸坯芯部存在一定的疏松缺陷,最大疏松点长宽分别为 1 106 μm × 608 μm,同时伴有明显的碳元素聚集 (见图 5 中灰色框区域);采用轻压下工艺后,由于芯部被挤压,该位置处的疏松程度有明显改善,最大疏松点长宽减小至 600 μm × 334 μm,同时降低了碳元素的聚集倾向,改善了中心位置的偏析缺陷。

3.2 压下工艺对元素偏析的影响

为系统研究轻压下工艺对铸坯碳元素偏析的影

响,使用 Φ4 mm 钻头在低倍横截面宽度和厚度方向上钻取金属屑,使用 HORIBA EMIA-920V2 碳硫分析仪对样品进行碳含量分析。碳偏析指数定义为各点碳含量与所有点平均碳含量的比值,用此来对元素偏析程度进行定量描述,即:

$$K_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (9)$$

$$C_0 = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (10)$$

式中: K_i —碳偏析指数; C_i —取样点碳含量; C_0 —平均碳含量; n —取样点个数。

图 8 为铸坯横截面上碳偏析曲线分布图。由图 8 可知,铸坯采用轻压下工艺后芯部位置碳偏析指数明显降低。与传统工艺相比,轻压下工艺使横截面上碳偏析指数范围由 0.889 ~ 1.095 缩小至 0.962 ~ 1.064,且主要影响铸坯芯部区域,即厚度方向距铸坯中心约 60 mm 范围,宽度方向距铸坯中心约 78 mm 范围内的芯部区域,而对其他位置的元素

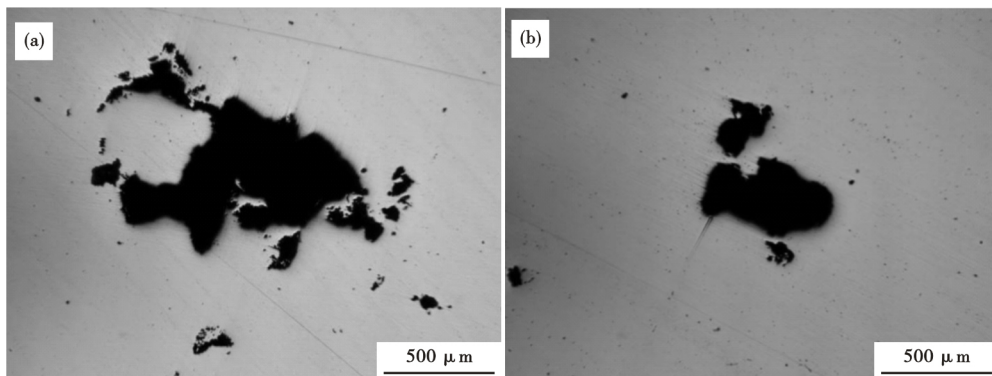


图 7 未轻压下 (a) 和轻压下 (b) 铸坯中心疏松点形貌

Fig. 7 Morphology of central porosity of cast bloom without (a) and with (b) soft reduction

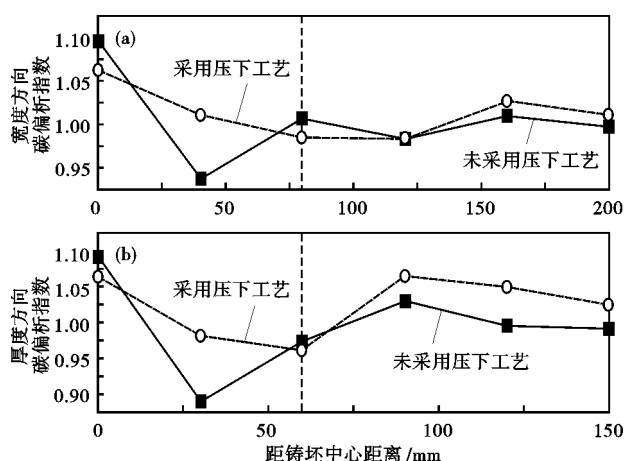


图8 铸坯横截面宽度(a)和厚度(b)方向碳偏析指数

Fig. 8 Carbon segregation index in width (a) and thickness (b) direction of bloom cross section

偏析影响较小,分析其主要原因为当轻压下开始时,铸坯外部区域已完全凝固,固相组织内各元素分布已稳定,压下时固相区只起到传递压下辊下压力的

作用,对铸坯芯部两相区内的元素偏析有明显的改善效果。综上所述,大方坯选择合理的压下区间及压下量会对铸坯芯部质量有明显改善。

4 结论

(1) 建立二维非稳态凝固传热模型,并通过测温试验验证该模型的可靠性;通过模型计算,合理压下区间对应铸机4#~7#压下辊,各辊压下量分别设定为“1 mm-2 mm-3 mm-1 mm”,压下总量7 mm。

(2) 轻压下工艺对铸坯低倍凝固组织影响较小,试验前后低倍样品各区域所占比例相差不大,但对铸坯芯部疏松缺陷改善明显,最大疏松点尺寸由1 106 μm × 608 μm 缩小至600 μm × 334 μm 。

(3) 轻压下工艺对铸坯芯部元素偏析有明显改善,横截面上碳偏析指数由0.889~1.095 缩小至0.962~1.064,且主要影响铸坯芯部区域,对其他位置的偏析影响较小。

参考文献

- [1] 王向红,张建斌,屠兴扩,等.轻压下对220mm × 260mm 轴承钢大方坯内部质量的改善[J].炼钢,2018,34(6):34-39.
- [2] 周伟基,沙玉峰,路辉,等.GCr15 连铸大方坯凝固终点及末端的轻压下区间[J].钢铁,2018,53(1):41-45,71.
- [3] 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.
- [4] 田新中,朱荣.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.
- [5] 钟晓丹,刘军,邹宗树.改善350mm × 470mm 矩形坯宏观偏析研究与实践[J].连铸,2016,41(2):62-65.
- [6] 曾杰,陈伟庆,曹长法,等.轻压下对82B 钢矩形坯内部质量的影响[J].炼钢,2015,31(4):63-67.
- [7] 祁猛,李亮,铁占鹏,等.轻压下对GCr15 轴承钢大方坯内部质量的影响[J].中国冶金,2020,30(9):67-74.
- [8] 李茂印,杨树峰,李京社,等.轻压下调整对模具钢宽厚板坯中心质量的优化[J].钢铁,2017,52(12):36-41.
- [9] 江中块,蔡兆镇,牛振宇,等.1650 板坯压下过程热/力学行为及压下工艺优化[J].中国冶金,2017,27(7):22-28.
- [10] 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.

- [1] 张贯旭,杨树峰,李京社,等.方坯轴承钢连铸过程中凝固行为[J].中国冶金,2018,28(1):17-21.
- [2] 王睿,包燕平,彭尊,等.圆坯连铸过程中坯壳生长规律[J].工程科学学报,2015,37(3):301-306.
- [3] 王博,张炯明,肖超,等.连铸板坯轻压下过程中间裂纹产生机理[J].工程科学学报,2016,38(3):351-356.
- [4] 许志刚,王新华,黄福祥,等.管线钢连铸板坯的半宏观偏析和凝固组织[J].工程科学学报,2014,36(6):751-756.
- [5] Zeng Jie, Chen Weiqing and Wang Guangshun, et al. Development and Application of an Off-Line Soft Reduction Model during Continuous Casting of High-Carbon Rectangular Billet[J]. Metall. Res. & Technol, 2015, 403(112):1-9.

饶金元(1983-),男,硕士(2010年昆明理工大学),工程师,特殊钢冶炼及连铸技术研究。E-mail: raojinyuan@163.com

收稿日期:2021-05-26