

50CrV 连铸大方坯凝固末端电磁 搅拌位置优化

高 擎¹, 杨文志¹, 杨 建¹, 陈波涛¹, 郑鑫钰², 丰 琦², 孙彦辉^{2*}

(1. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 湖南 湘潭 411101; 2. 北京科技大学, 钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083)

摘 要:为标定 240 mm×240 mm 断面 50CrV 弹簧钢方坯的凝固末端位置, 确定凝固末端电磁搅拌的合理位置, 对湘钢方坯连铸机开展射钉试验, 结果表明, 弹簧钢方坯综合凝固系数为 26.8 mm/min^{1/2}, 在 0.8 m/min 和 1.0 m/min 拉速下, 凝固终点位置分别为距弯月面 16.2 m 和 19.8 m 处, 凝固末端电磁搅拌适宜位置为距弯月面 7.18 m 和 8.84 m 处。基于射钉试验建立凝固传热模型, 利用模型研究了不同连铸工艺参数下的铸坯凝固特征, 据此可对现行连铸参数进行优化与修正, 充分发挥凝固末端电磁搅拌作用, 减轻中心偏析, 改善铸坯质量, 研究结果对现场实际具有一定指导意义。

关键词:弹簧钢; 射钉试验; 电磁搅拌; 中心偏析; 数值模拟

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)01-0133-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.01.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Optimization of the electromagnetic stirring position at solidification end of 50CrV continuous casting billet

GAO Qing¹, YANG Wenzhi¹, YANG Jian¹, CHEN Botao¹, ZHENG Xinyu², FENG Qi², SUN Yanhui^{2*}

(1. Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd. of Hunan Valin, Xiangtan 411101, Hunan, China; 2. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to calibrate the solidified end position of the 50CrV spring steel billet with 240 mm×240 mm section and determine the reasonable position of electromagnetic stirring at the solidification end, the nail shooting experiment was carried out on the Xianggang billet continuous caster. The results showed that the comprehensive solidification coefficient of the spring steel billet was 26.8 mm/min^{1/2}. When the casting speed are at 0.8 m/min and 1.0 m/min, respectively, The end positions of solidification are 16.2 m and 19.8 m from the meniscus surface, respectively, and the suitable positions of electromagnetic stirring at the end of solidification are 7.18 m and 8.84 m from the meniscus surface. Based on the verification of the nail test, the solidification heat transfer model was established, and had been used to studied the solidification characteristics of the casting billet under different continuous casting process parameters. The model predication could be used to optimize and correct the existing continuous casting parameters so that the electromagnetic stirring effect at the solidification end could be fully exerted and the central segregation should be reduced, consequently the quality of the casting billet could be improved.

Key words: spring steel, nail shooting experiment, electromagnetic stirring, central segregation, numerical simulation

收稿日期: 2023-12-07

作者简介: 高擎, 1982 年出生, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事连铸坯质量控制研究, E-mail: 212671@mail.hnxc.com.cn;

*通讯作者: 孙彦辉, 1971 年出生, 男, 博士, 教授, 主要从事品种钢开发及连铸工艺关键技术研究, E-mail: ustb420@126.com。

0 引言

50CrV 弹簧钢具有强度高、抗疲劳性和抗弹减性好等特点,常用来制造减震缓冲、储能、传动、支撑等零件,广泛用于各种机械设备^[1-2]。对于合金钢大方坯连铸机生产大断面高碳高合金钢时,存在的主要问题是铸坯更易产生中心偏析与疏松缺陷,在后继轧制过程中会严重影响钢材的性能。

大量的事实证明,凝固末端电磁搅拌技术可明显改善铸坯中心疏松,降低中心线偏析和 V 型偏析。末端电磁搅拌的作用机理是铸坯液相穴末端区域处于糊状区,由于偏析作用溶质富集,易形成较严重的中心偏析和 V 型偏析,使用大功率的末端电磁搅拌搅动糊状区,能增加中心钢水的运动,减轻元素中心偏析,凝固终点位置的准确判断与凝固末端电磁搅拌的冶金效果密切相关,所以对铸坯的凝固终点位置的研究尤为重要^[3]。秦凤婷等人^[4]采用射钉法对铸坯的凝固坯壳厚度进行了测定,并根据凝固定律计算了铸机综合凝固系数及液相穴长度,确定了最佳的末端电磁搅拌位置及合理的拉速值,工艺优化后铸坯质量得到明显改善;张攀等人^[5]以 960QT 钢为试验对象,利用射钉法对凝固坯壳厚度进行测定,并以测得的结果为边界应用 ProCAST 软件对铸坯凝固过程进行了模拟,得到了不同连铸工艺参数下铸坯的凝固终点位置;陈丰等人^[6]以 82B 连铸圆坯为研究对象,采用射钉法测得了凝固坯壳厚度,分析了拉速对铸坯凝固率的影响,建立凝固传热数学模型,基于计算结果确定了凝固末端电磁搅拌的安装位置。

在连铸过程中,拉速、比水量以及过热度等工艺参数对凝固终点都有影响,为了研究不同工艺参数对凝固终点的影响,目前国内外通常采用现场射钉试验与数值模拟相结合的方法,采用“射钉法”测量铸坯的坯壳厚度,建立凝固传热模型模拟铸坯的凝固过程,从而为凝固末端电磁搅拌的位置选择提供依据。笔者以 240 mm×240 mm 断面 50CrV 大方坯为研究对象,采用射钉法测量了凝固坯壳厚度,建立了凝固传热模型,基于试验结果确定了凝固末端电磁搅拌的适宜安装位置,探讨不同连铸工艺参数下的铸坯凝固特征,据此可对现行连铸参数进行优化与修正,使得电磁搅拌参数与连铸工艺参数合理匹配,研究结果对现场实际具有一定指导意义。

1 连铸坯凝固终点位置测试

1.1 射钉试验原理

射钉试验是一种通过射钉设备将嵌有 FeS 的钉子射入未完全凝固的连铸坯内部,根据未熔化的钉子长度来确定射钉位置处坯壳厚度的方法。试验中根据铸坯的尺寸和射钉位置,选择射钉本体长 150 mm,射钉两侧有两道硫槽,制作钉子的钢种为 60Si2MnA,成分见表 1。

表 1 射钉化学成分

Table 1 Chemical composition of shoot nail used in this study %

钢种	C	Si	Mn	Cr	其他
60Si2MnA	0.56~0.64	1.60~2.00	0.60~0.90	≤0.35	

对射钉试样的检验,有研究提出将射钉及周边区域分为 A、B、C 三个区,如图 1 所示。A 区:射钉外形完好,硫化物未扩散,与铸坯具有不同的组织,可以观察到明显的分界线,射钉在该区域的长度可近似认为是该时刻的坯壳厚度;B 区:部分射钉熔于铸坯基体中,硫化物局部扩散,但仍可以观察到射钉外形;C 区:射钉完全熔化,硫化物充分扩散,无法观察分辨射钉与铸坯界限。在射钉进入铸坯的瞬间,会卷入大量气体占据一定空间而钢液无法及时补缩,进而在铸坯表层形成空腔区^[7]。

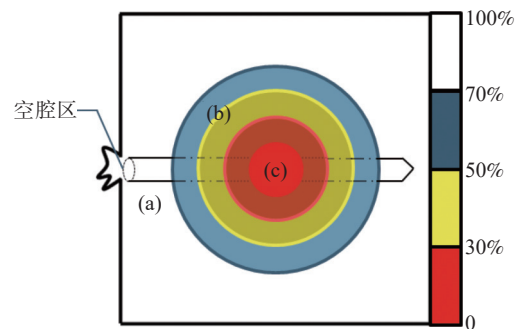


图 1 铸坯射钉示意

Fig. 1 Schematic diagram of nail shooting experiment

1.2 生产工艺参数

为了标定 240 mm×240 mm 断面 50CrV 弹簧钢方坯的凝固末端位置,确定凝固末端电磁搅拌的合理位置,在湘钢 2 号连铸机上开展射钉试验。50CrV 钢主要化学成分如表 2 所示。

表 2 50CrV 钢的主要化学成分

Table 2 The main chemical compositions of 50CrV steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	V
0.50	0.26	0.69	0.009	0.004	1.03	0.12

根据铸机的实际生产状况, 主要考虑拉速的变化, 针对 0.8 m/min 和 1.0 m/min 两个拉速, 在凝固末端电磁搅拌器后(距弯月面 12.4 m 处)进行射钉,

测量射钉点处铸坯的坯壳厚度。

射钉试验时不同拉速下的生产工艺条件如表 3 所示。

表 3 50CrV 方坯生产工艺条件
Table 3 50CrV billet production process parameters

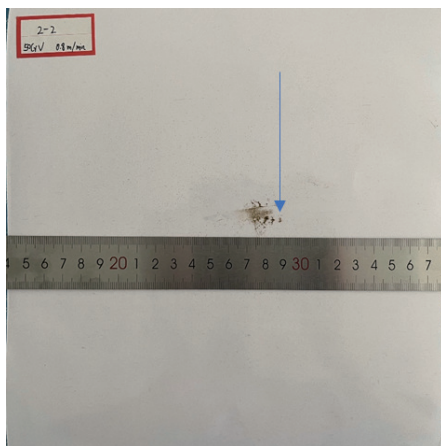
钢种	拉速/(m·min ⁻¹)	过热度/°C	结晶器水量/(m ³ ·h ⁻¹)	比水量/(L·kg ⁻¹)	冷却水量/(t·h ⁻¹)			
					足辊	I 区	II 区	III 区
50CrV	0.8	25	125	0.16	1.6	0.8	0.6	0.5
	1.0	25	125	0.19	2.0	1.2	1.0	0.8

1.3 试验结果及分析

对所得到的射钉试样进行机加工, 先后进行硫印试验和酸浸处理, 综合硫印试验和酸浸处理后钉子形貌变化, 确定不同射钉方案下的铸坯坯壳厚度。

片和酸浸低倍组织照片。从射钉试验结果来看, 当拉速为 0.8 m/min 时, 距铸坯表面 92 mm 处射钉开始变形, 硫印明显扩散, 因此可认定射钉点处坯壳厚度为 92 mm; 当拉速由 0.8 m/min 提高到 1.0 m/min 时, 坯壳厚度由 92 mm 降低到 75 mm, 表明拉速对凝固进程的影响很大。

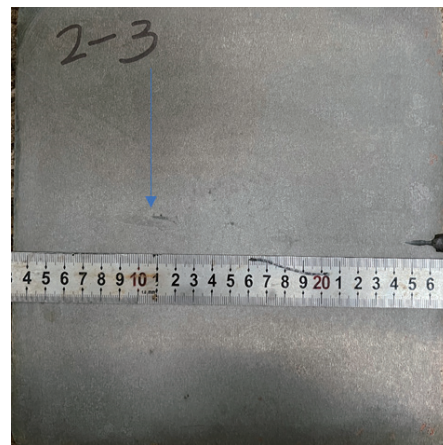
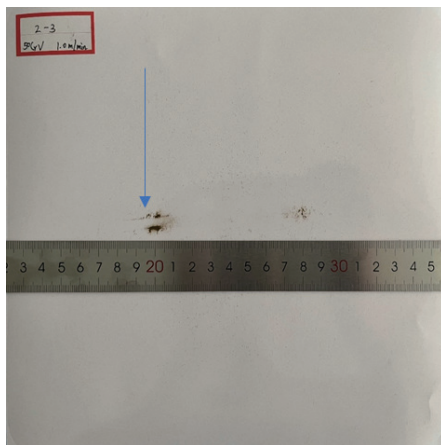
图 2、3 为 50CrV 连铸方坯的射钉试样硫印照



(a) 硫印照片; (b) 酸浸低倍组织照片

图 2 射钉试验结果照片(v=0.8 m/min)

Fig. 2 The results of the nail shooting experiment



(a) 硫印照片; (b) 酸浸低倍组织照片

图 3 射钉试验结果照片(v=1.0 m/min)

Fig. 3 The results of the nail shooting experiment

连铸过程中,铸坯厚度与综合凝固系数、凝固时间的关系见式(1)^[8]:

$$\frac{D}{2} = K \sqrt{t} = K \sqrt{\frac{L}{v}} \quad (1)$$

式中, D 为连铸坯厚度, mm; K 为综合凝固系数, $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$; t 为凝固时间, min; L 为液相穴长度, m; v 为拉速, m/min 。

液相穴长度与射钉点处坯壳厚度、射钉点位置的关系为:

$$\frac{d}{l} = \frac{D}{2L} \quad (2)$$

式中, d 为射钉点处连铸坯坯壳厚度, mm; l 为射钉点处距弯月面距离, m; D 为连铸坯厚度, mm; L 为液相

穴长度, m。

根据射钉试验结果,通过公式(2)算得液相穴长度,将算得的液相穴长度代入公式(1),算得铸机综合凝固系数,以此得到的 K 值更接近真实值。不同拉速下的射钉试验结果及综合凝固系数、凝固终点位置计算结果见表4,由表4可知,50CrV方坯(240 mm×240 mm)的平均综合凝固系数为 $26.8 \text{ mm}/\text{min}^{1/2}$,在 $0.8 \text{ m}/\text{min}$ 和 $1.0 \text{ m}/\text{min}$ 拉速下,凝固终点位置分别为距弯月面 16.2 m 和 19.8 m 处,拉速提高 $0.2 \text{ m}/\text{min}$,凝固终点位置后移 3.6 m ,若不调整其他连铸工艺,则无法充分发挥凝固末端电磁搅拌冶金作用。

表4 50CrV钢射钉试验结果
Table 4 The nail shooting experiment results of 50CrV billet

射钉序号	拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	射钉位置/m	坯壳厚度/mm		平均坯壳厚度/mm	综合凝固系数 $K/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2})$	凝固终点位置/m
			酸洗	硫印			
2-2	0.8	12.4	92	92	92.0	26.7	16.2
2-3	1.0	12.4	75	75	75.0	26.9	19.8

2 末端电磁搅拌与连铸工艺参数合理匹配

目前湘钢炼钢厂2#连铸机240 mm×240 mm断面铸坯的末端电磁搅拌位置在距弯月面9.93 m,根据射钉试验的结果进行评估预测,可对末端电磁搅拌位置提出合理建议。凝固末端电磁搅拌处断面的液相面积占比的大小决定了电磁搅拌性能发挥的好坏,依据研究经验,铸坯横断面液相面积占比为8.7%时,使用大功率的末端电磁搅拌搅动糊状区,增加中心钢水的运动,能很好地减轻元素的中心偏析。

表5为根据射钉结果计算得出的现场凝固末端电磁搅拌器中心(距弯月面9.93 m)处铸坯液芯厚度及理想液芯厚度。在 $0.8 \text{ m}/\text{min}$ 拉速下,末搅中心处液芯厚度为 52 mm ,拉速提高到 $1.0 \text{ m}/\text{min}$,液芯厚度增加到 70 mm ,而液相面积占比为8.7%时的理想液芯厚度为 80 mm ,可知,现行工艺下凝固末端电磁搅拌不能充分发挥其冶金作用,在不改变现有工艺参数的情况下,可以通过移动末端电磁搅拌装置来与连铸工艺匹配。

表6为末搅中心处不同液芯厚度下凝固末端电磁搅拌中心的适宜位置。由表6可知,对于

50CrV钢,当拉速为 $0.8 \text{ m}/\text{min}$ 时,在液芯厚度为 $80 \sim 60 \text{ mm}$ 时进行电磁搅拌,末端电磁搅拌装置的适宜位置为距弯月面 $7.18 \sim 9.09 \text{ m}$ 处;当拉速为 $1.0 \text{ m}/\text{min}$ 时,在液芯厚度为 $80 \sim 60 \text{ mm}$ 时进行电磁搅拌,末端电磁搅拌装置的适宜位置为距弯月面 $8.84 \sim 11.19 \text{ m}$ 处。现场末端电磁搅拌在距弯月面 9.93 m 处,位置靠后而无法充分发挥其冶金作用,理论适宜位置为距弯月面 7.18 m 和 8.84 m 处。

表5 现场末端电磁搅拌中心处液芯厚度及理想厚度
Table 5 measured and ideal thickness of liquid core at the center of the electromagnetic stirring

钢种	末搅位置/m	拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	末搅中心处液芯厚度/mm	
			计算值	理想值
50CrV	9.93	0.8	52	80
		1.0	70	

在不改变现场凝固末端电磁搅拌器位置的情况下,可通过改变拉速以及二冷冷却水量的工艺措施,考虑到目前的二冷工艺,为充分发挥凝固末端电磁搅拌的作用,可通过改变钢种的拉速来发挥电磁搅拌器的冶金作用。

表7为现场凝固末端电磁搅拌位置末搅中心处不同液芯厚度下适宜的拉速。由表7可知,在液芯厚度为 $80 \sim 60 \text{ mm}$ 时进行电磁搅拌,对应的适宜拉

速为 1.11 ~ 0.88 m/min。在不改变现场凝固末端电磁搅拌位置的情况下, 理论适宜拉速为 1.11 m/min。

表 6 不同液芯厚度下凝固末端电磁搅拌中心适宜位置
Table 6 The appropriate position of the solidification end electromagnetic stirring center under different core thicknesses

拉速 (m·min ⁻¹)	比水量 (L·kg ⁻¹)	末搅中心距弯月面距离/m		
		液芯厚度 80 mm	液芯厚度 70 mm	液芯厚度 60 mm
0.8	0.16	7.18	8.11	9.09
1.0	0.19	8.84	9.98	11.19

表 7 适宜现场(距弯月面 9.93 m)处电搅发挥作用的拉速
Table 7 Casting speed suitable for electromagnetic stirring at the location 9.93 m below the meniscus
m/min

钢种	液芯厚度 80 mm	液芯厚度 70 mm	液芯厚度 60 mm
50CrV	1.11	0.99	0.88

3 铸坯凝固传热模型

以断面为 240 mm×240 mm 的 50CrV 弹簧钢大方坯为研究对象, 建立铸坯凝固传热模型, 通过射钉试验结果对模型进行校正, 在获得准确凝固模型的基础上, 研究不同连铸参数(拉速、比水量、过热度)下的铸坯凝固特征, 据此可对现行连铸参数进行优化与修正, 充分发挥凝固末端电磁搅拌作用, 减轻中心偏析, 改善铸坯质量。

3.1 模型的假设及建立

ProCAST 凝固传热模型采用切片移动法来模拟铸坯二维凝固传热过程, 为简化方程及边界条件, 在建立模型时做出如下假设^[9-12]: 忽略结晶器的振动、锥度及其对传热的影响; 忽略钢液流动对凝固传热的影响; 忽略拉坯方向的传热; 连铸二冷区同一冷却段均匀冷却; 方坯在宽度方向上的冷却强度沿几何中心对称; 方坯在内弧和外弧的冷却强度沿厚度中心对称。

基于以上假设, 通过 SOLIDWORKS 软件建立薄片模型, 模型尺寸为 240 mm×240 mm×4 mm。使用 ProCAST 软件对几何模型进行网格划分, 网格的形状为正六面体, 单位边长为 2 mm。

3.2 边界条件及初始条件确定

3.2.1 边界条件

铸坯拉坯方向传热为 0, 通过计算结晶器热流

密度、二冷区换热系数、空冷区换热系数来设置其余面传热边界条件。各阶段计算公式如式(3)~(6)所示^[13-15]。

1) 结晶器热流密度

$$q = \alpha - \beta \sqrt{\frac{l}{v}} \quad (3)$$

式中: q 为结晶器的热流密度, $W \cdot m^{-2}$; l 为距结晶器弯月面距离, m ; v 为拉速, $m \cdot s^{-1}$; α 和 β 与结晶器冷却能力有关, 由文献 [13-15] 知, $\alpha = 2.68 \times 10^6 W \cdot m^{-2}$ 。

$$\beta = \frac{3}{2\sqrt{t}} \left(\alpha - \frac{C_w \cdot Q_w \cdot \Delta T_w \cdot \rho_w}{F} \right) \quad (4)$$

式中: C_w 为水的比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; Q_w 为结晶器的冷却水流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; ρ_w 为水的密度, $kg \cdot m^{-3}$; ΔT_w 为结晶器进出水温差, $^\circ C$; F 为结晶器有效冷却面积, m^2 。

2) 二冷区换热系数

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

式中: h 为换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$; W 为冷却水水流密度, $L \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$; T_w 为冷却水温度, $^\circ C$; η 为与夹棍冷却有关的系数。

3) 空冷区

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon [(t_s + 273)^4 - (t_e + 273)^4] \quad (6)$$

式中, q_{rad} 为连铸坯表面换热的热流密度, $W \cdot m^{-2}$; ε 为辐射系数, 其取值为 0.8; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-4}$; t_s 为铸坯表面温度, $^\circ C$; t_e 为环境温度, $^\circ C$ 。

3.2.2 初始条件

初始温度为浇铸温度, 浇铸温度使用中间包的实测钢液温度, 表达式如式(7)所示。

$$T_0 = T_{undish} \quad (7)$$

式中 T_0 为钢液初始温度, $^\circ C$; T_{undish} 为中间包钢液温度, $^\circ C$ 。

3.3 连铸工艺参数对凝固过程的影响

应用凝固传热模型, 模拟不同连铸工艺参数下铸坯的凝固过程, 笔者从改变拉速、过热度、比水量三个方面, 分析工艺参数对铸坯温度、中心固相率及坯壳厚度等凝固特征参数的影响, 为制定合理的连铸工艺参数提供依据^[16-18]。

3.3.1 拉速的影响

模拟了连铸过程中不同拉速下 (0.8、0.9、1.0 m/min) 50CrV 大方坯凝固过程, 钢水过热度 25 $^\circ C$, 比水量为 0.16 L/kg, 模拟结果如图 4 所示。由图 4 可知, 拉速对铸坯内外温度和中心固相率影响较大。在距弯月面 12.3 m 之前拉速对中心温度的影响较小, 在此位置后芯部温度随着拉速的提高而

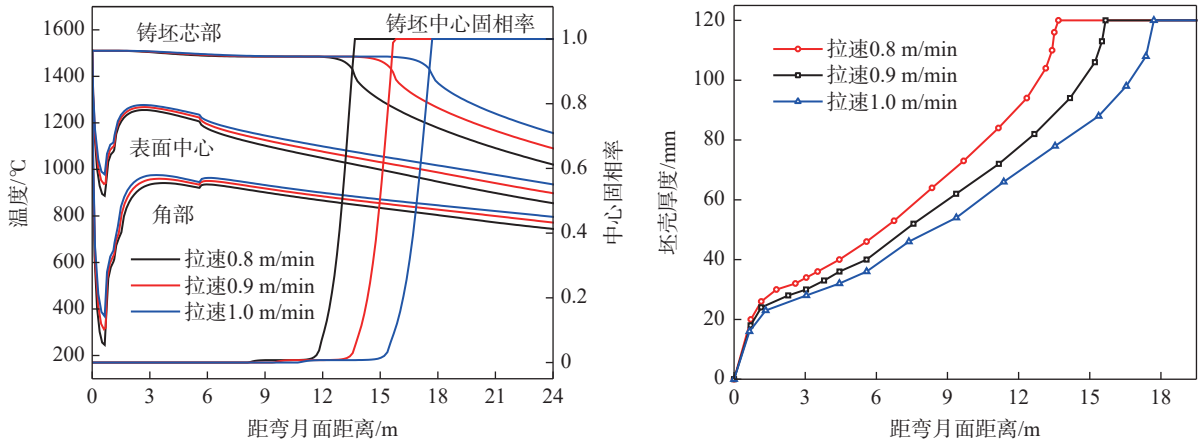
增大;拉速与铸坯表面温度呈正相关关系,拉速越高,出结晶器铸坯表面温度越高,二冷段的温度越高。这主要是由于拉速提高时,铸坯在结晶器和二冷区的对流换热时间短,换热量小,冷却效果变差。同一位置处,中心固相率随着拉速的提高而减小,拉速越大,坯壳厚度越薄,这与射钉试验结果相符。

拉速为 0.8、0.9、1.0 m/min 时,矫直点(13.4 m)表面中心温度分别为 1 025.4、1 054.8、1 079.5 °C,依次提高 29.4、24.7 °C;角部温度分别为 850.9、869.9、886.3 °C,依次提高 19.0、16.4 °C;液芯长度分别为 11.7、13.6、15.3 m,依次增加 1.9、1.7 m;凝固终点位置分别为 13.7、15.7、17.7 m,依次增加

2.0 m。提高拉速有利于提高铸坯的热行温度,空冷段的铸坯表面温度提高可以有效解决矫直裂纹的产生,但必须控制在合理范围内,拉速提升后,凝固终点位置后移距离超过电磁搅拌器有效范围,对末端电磁搅拌位置提出了新的要求,如果想要提高生产效率及铸坯质量,就要从工艺上采取措施或改变末端电磁搅拌位置,来充分发挥末端电磁搅拌的冶金作用。

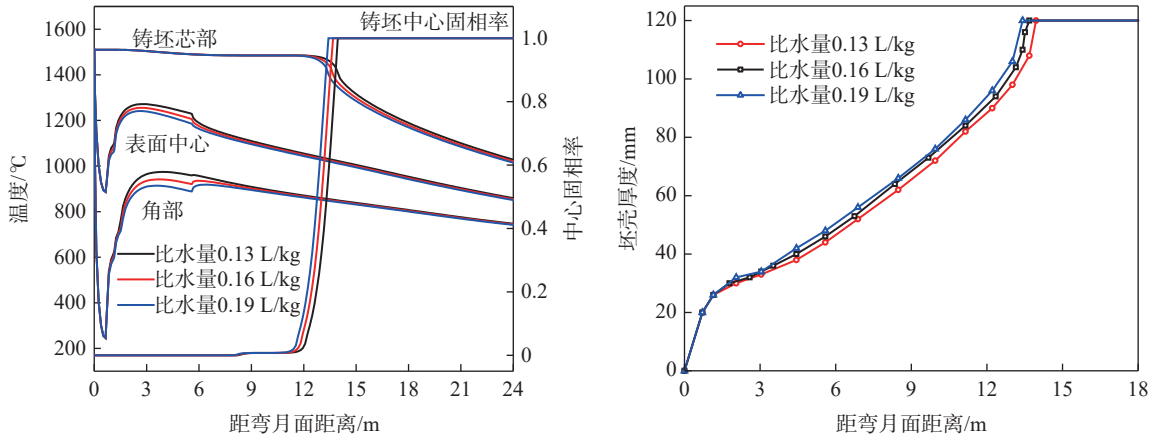
3.3.2 比水量的影响

模拟了连铸过程中不同比水量下(0.13、0.16、0.19 L/kg)50CrV 大方坯凝固过程,钢水过热度 25 °C,拉速为 0.8 m/min,模拟结果如图 5 所示。



(a)铸坯温度及中心固相率;(b)铸坯坯壳厚度

图 4 拉速对凝固过程的影响
Fig. 4 Effect of casting speed on the solidification process



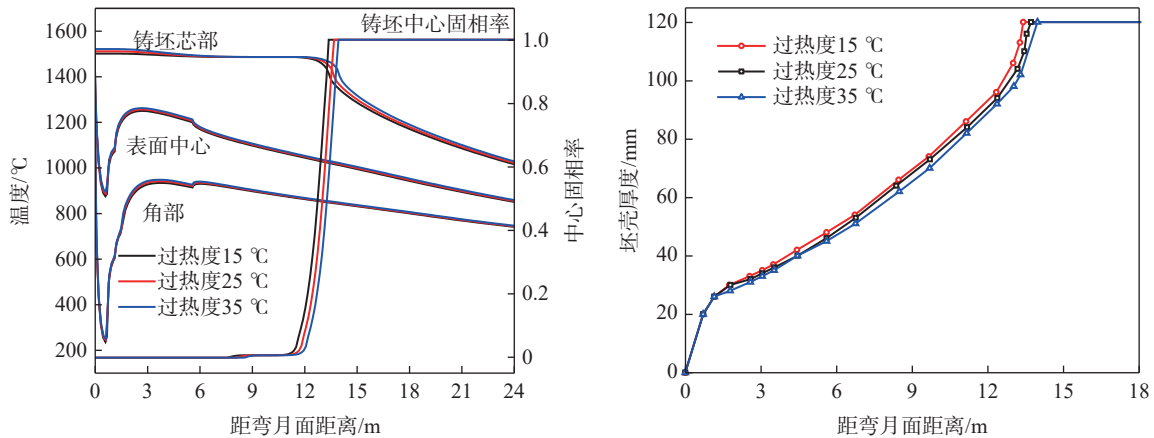
(a)铸坯温度及中心固相率;(b)铸坯坯壳厚度

图 5 比水量对凝固过程的影响
Fig. 5 Effect of the specific water flow rate on the solidification process

由图 5 可知,随着比水量的变化,二冷区内铸坯表面温度变化幅度较大,出二冷区后的温度变化幅度较小。比水量为 0.13、0.16、0.19 L/kg,出二冷区时(5.6 m)表面中心温度分别为 1 228.5、1 205.5、1 185.4

°C,依次降低 23.0、20.1 °C;角部温度分别为 959.1、921.2、888.8 °C,依次降低 37.9、32.4 °C;液芯长度分别为 12.0、11.7、11.5 m,依次减少 0.3、0.2 m;凝固终点位置分别为 13.9、13.7、13.4 m,依次减少 0.2、

0.3 m, 比水量的变化对凝固终点位置的影响较小。由此, 二冷配水工艺适用于二冷区内铸坯表面温度的调整, 即按钢种特性确定好连铸的目标温度曲线, 通过数值模拟可得到相对合理的二冷配水工艺。



(a) 铸坯温度及中心固相率; (b) 铸坯坯壳厚度

(a) Billet temperature and solid phase ratio at the center of billet; (b) thickness of casting shell

图 6 过热度对凝固过程的影响

Fig. 6 Effect of superheat on the solidification process

由图 6 可知, 过热度的变化对铸坯的表面温度影响较小, 对芯部温度及中心固相率的影响随着距弯月面距离的增大而增大。过热度为 15、25、35 °C 时, 液芯长度分别为 11.4、11.7、12.0 m, 依次提高 0.3、0.3 m; 凝固终点位置分别为 13.4、13.7、13.9 m, 依次提高 0.3、0.2 m, 过热度对凝固终点位置的影响较小, 但过热度过高, 将改变凝固末端电磁搅拌的适宜位置, 如果凝固末端电磁搅拌位置不能做出合理的调整, 会影响铸坯质量。结合过热度对中心偏析、疏松、缩孔的影响, 在生产过程中过热度不能过高, 因此控制 25 °C 过热度是该厂保证 50CrV 大方坯顺利生产的较优选择。

4 结论

1) 通过对 50CrV 方坯 (240 mm×240 mm) 进行射钉试验, 测得铸机综合凝固系数为 $26.8 \text{ mm/min}^{1/2}$, 在 0.8 m/min 和 1.0 m/min 拉速下, 凝固终点位置分别为距弯月面 16.2 m 和 19.8 m 处。

2) 现场末端电磁搅拌在距弯月面 9.93 m 处, 位

3.3.3 过热度的影响

模拟了连铸过程中不同过热度下(过热度分别为 15、25、35 °C) 50CrV 大方坯凝固过程, 拉速为 0.8 m/min, 比水量为 0.16 L/kg, 模拟结果如图 6 所示。

置靠后而无法充分发挥其冶金作用, 在不改变现有工艺参数的情况下, 可以通过移动末端电磁搅拌装置来与连铸工艺匹配, 在 0.8 m/min 和 1.0 m/min 拉速下, 理论适宜位置为距弯月面 7.18 m 和 8.84 m 处; 在不改变现场凝固末端电磁搅拌器位置的情况下, 可通过改变钢种的拉速来发挥电磁搅拌器的冶金作用, 理论适宜拉速为 1.11 m/min。

3) 建立 50CrV 铸坯凝固传热模型并进行校正, 研究了不同连铸参数(拉速、比水量、过热度)下的铸坯凝固特征。模拟结果表明, 拉速对铸坯凝固终点位置的影响最大, 拉速每提高 0.1 m/min, 凝固终点位置后移 2.0 m, 拉速改变时必须考虑对末端电磁搅拌的影响; 比水量对二冷区内的铸坯温度影响较大, 每增加 0.03 L/kg, 出二冷区时表面中心温度依次降低 23.0、20.1 °C, 角部温度依次降低 37.9、32.4 °C; 过热度对凝固终点位置的影响较小, 但还未达到可以完全忽略的程度, 因此控制 25 °C 过热度是该厂保证 50CrV 大方坯顺利生产的较优选择。

参考文献

- [1] WANG W B, HU S S, ZHANG M, *et al.* Effect of heat treatment process on surface condition and fatigue properties of 50CrVA spring steel[J]. Metal World, 2023(5): 80-82.
(王文博, 胡生双, 张锰, 等. 热处理工艺对 50CrVA 弹簧钢表面状态和疲劳性能的影响[J]. 金属世界, 2023(5): 80-82.)
- [2] FAN Z W, ZHOU Z R, ZHANG Q, *et al.* Effect of precipitates in 50CrVA of automobile spring flat steel on its properties[J].

- Hot Working Technology, 2022, 51(21): 98-101.
(范众维, 周梓荣, 章庆, 等. 汽车弹簧扁钢 50CrVA 中析出物对其性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(21): 98-101.)
- [3] LI J. Study on soft reduction process theory and central segregation of pressure vessel steel wide slab[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
(李杰. 压力容器钢宽板坯轻压下工艺理论及中心偏析研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.)
- [4] QIN F T, LIU Z H, DONG Z L, *et al.* Measurement of solidified shell of 240 mm × 240 mm casting bloom by nail-shooting technique and process optimization[J]. Special Steel, 2020, 41(1): 51-54.
(秦凤婷, 刘宗辉, 董战利. 利用射钉法测量 240 mm×240 mm 铸坯凝固坯壳厚度及工艺优化[J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 51-54.)
- [5] ZHANG P, SHI P Z, XIE S Z, *et al.* Solidification process simulation and process optimization of high strength steel slab[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(2): 132-140.
(张攀, 时朋召, 谢世正, 等. 高强钢板坯凝固过程模拟与工艺优化[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(2): 132-140.)
- [6] CHEN F, XU X J, YANG Z J, *et al.* Optimization of final electromagnetic stirring in continuous casting and quality of high-carbon steel billets[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(7): 750-753.
(陈丰, 许秀杰, 杨子江, 等. 连铸末端电磁搅拌工艺的优化与高碳钢铸坯质量[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(7): 750-753.)
- [7] LIU T, LI Y G, SUN Y H, *et al.* Development and application of prediction model for solidification structure and segregation of 82B billet[J]. Continuous Casting, 2022(6): 8-15.
(刘添, 李曜光, 孙彦辉, 等. 82B 小方坯凝固组织和偏析预测模型开发及应用[J]. 连铸, 2022(6): 8-15.)
- [8] WANG L, SUN Y H, NIU A P, *et al.* Numerical simulation of heat transfer and solidification in X80 slab continuous casting[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(6): 143-149.
(王璐, 孙彦辉, 牛阿朋, 等. X80 板坯传热凝固数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(6): 143-149.)
- [9] ZHOU X L, LENG X G, PENG S H, *et al.* Application research on thickness measurement of solidified slab shell by pin-shotting[J]. Continuous Casting, 2015, 40(6): 25-29.
(周秀丽, 冷祥贵, 彭世恒, 等. 基于“射钉法”的凝固坯壳厚度测定的应用研究[J]. 连铸, 2015, 40(6): 25-29.)
- [10] PAN P, HOU D, GE W Y, *et al.* Position of electromagnetic stirring at solidification end of continuous casting billet and optimization of continuous casting process[J]. Continuous Casting, 2022(2): 66-76+88.
(潘鹏, 侯栋, 戈文英, 等. 连铸坯凝固末端电磁搅拌位置及连铸工艺优化[J]. 连铸, 2022(2): 66-76+88.)
- [11] LI Y G. Simulation study of macroscopic transmission phenomenon and central segregation in continuous casting process[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
(李曜光. 连铸过程宏观传输现象及中心偏析的模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.)
- [12] ZHOU G T, CHEN J, HUANG B C, *et al.* Numerical simulation of solidification and heat transfer of Q355B slab during continuous casting[J]. Continuous Casting, 2023(02): 43-51.
(周国涛, 陈金, 黄标彩, 等. Q355B 板坯连铸凝固传热行为数值模拟[J]. 连铸, 2023(02): 43-51.)
- [13] LALLY B, BIEGLER L, HENEIN H. Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting[J]. Metallurgical Transactions B, 1990, 21(4): 761-770.
- [14] TIEU A K, KIM I S. Simulation of the continuous casting process by a mathematical model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 39(2): 185-192.
- [15] SHENG Y P, KONG X D, YANG Y L. Study on thermal boundary conditions in the mold for continuous casting[J]. China Mechanical Engineering, 2007(13): 1615-1618.
(盛义平, 孔祥东, 杨永利. 连铸结晶器传热边界条件研究[J]. 中国机械工程, 2007(13): 1615-1618.)
- [16] JING C, WANG X, JIANG M. Study on solidification structure of wheel steel round billet using FE-CA coupling modle[J]. Steel Research International, 2011, 82(10): 1173-1179.
- [17] CAI D W, LU J Z, DOU K, *et al.* Numerical modelling on solidification and heat transfer process of micro-alloyed steel bloom[J]. Continuous Casting, 2023(5): 51-56.
(蔡大为, 陆靖洲, 窦坤, 等. 微合金钢连铸方坯凝固传热过程数值模拟[J]. 连铸, 2023(5): 51-56.)
- [18] ZHANG X W, BAI X L, SHI L, *et al.* Numerical simulation of solidification temperature field of SWRH72B-S wire steel continuous casting billet[J]. Continuous Casting, 2023(1): 18-23.
(张小伟, 白晓路, 石磊, 等. SWRH72B-S 绞线钢连铸小方坯凝固温度场数值模拟[J]. 连铸, 2023(1): 18-23.)