

Q345R 厚板坯连铸凝固过程数值模拟

郑鑫钰¹, 孙彦辉^{1*}, 丰琦¹, 高擎², 杨文志², 杨建²

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

摘要:为改善湘钢 Q345R 厚板坯铸坯质量, 建立了凝固传热模型, 采用射钉试验对模型进行验证和修正。通过数值模拟的方法, 对现有的生产工艺进行了评价, 并分别研究了拉速、比水量、过热度以及铸坯厚度和宽度对压下位置和压下区间的影响规律, 同时研究了其对铸坯角部温度的影响规律。对模拟结果进行分析, 理论上得到生产该钢种时合理的连铸工艺参数及铸坯规格, 其工艺参数为: 断面为 450 mm×2 270 mm, 拉速为 0.55 m/min, 过热度为 15~25 °C, 二冷比水量为 0.26 L/kg。矫直区为 Seg.8~9, 轻压下区为 Seg.13~15。

关键词:连铸; 压力容器钢; 厚板坯; 射钉试验; 数值模拟; 轻压下; 中心偏析; 边角部裂纹

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0139-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Numerical simulation of solidification process for Q345R thick slab continuous casting

Zheng Xinyu¹, Sun Yanhui^{1*}, Feng Qi¹, Gao Qing², Yang Wenzhi², Yang Jian²

(1. Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Xiangtan Iron & Steel Co., Ltd., Hunan Valin, Xiangtan411101, Hunan, China)

Abstract: In order to improve the quality of Xianggang Q345R thick slab casting billet, a solidification heat transfer model was established and was verified and corrected by nail shooting experiment. Through numerical simulation, the existing production process was evaluated, and the influence of casting speed, cooling water, superheat, thickness and width of casting billet on the pressing position and pressing interval were studied respectively, and their influence on the corner temperature of the casting billet was studied. The simulation results are analyzed, and the reasonable continuous casting process parameters and billet specifications during the production of the steel grade are obtained as follows: the cross-section is 450 mm×2 270 mm, the tensile speed is 0.55 m/min, the superheat is 15~25 °C, and the specific water volume of secondary cooling is 0.26 L/kg, the straightening zone is Seg.8~9, and the light pressure area is Seg.13~15. With these casting parameters applied, the center segregation of the slab and the crack defects in the corners can be effectively controlled.

Key words: continuous casting, pressure vessel steel, thick slabs, nail shooting experiment, numerical simulation, soft reduction, central segregation, cracks in the corners

0 引言

压力容器钢广泛应用于石油、化工等行业, 用于制作油气罐、液化气罐、气瓶等设备。钢板是制作压力容器的主要材料, 在保证性能的前提下, 板坯

厚度的增加可以生产更大厚度的钢板, 板坯的质量与板坯凝固过程息息相关, 因此有必要研究连铸工艺参数对板坯传热的影响, 从而优化连铸工艺参数, 改善铸坯质量^[1]。许多研究者做了相关工作, 蔡开科^[2]等人将数值模拟引入连铸过程, 通过数学模型

收稿日期: 2023-09-22

作者简介: 郑鑫钰, 1999 年出生, 男, 硕士研究生, 主要从事连铸坯质量控制研究, E-mail: 15135392898@163.com; * 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。

计算铸坯的温度场分布情况;李杰^[3]模拟了压力容器钢宽板坯连铸过程,对轻压下工艺理论及中心偏析进行了研究;除此之外,王璐、高向宙、王臻明等^[4-6]也做过类似研究。

湘钢在生产 Q345R 厚板坯时,存在严重的中心偏析及边角部横裂纹缺陷,板坯边角部的横裂纹在轧制后会遗传到钢板的角部形成缺陷,中心偏析也严重影响产品的质量。笔者基于该钢种的连铸工艺参数,运用 ProCAST 计算模拟软件,建立不同规格的板坯二维传热模型,对不同工艺参数下的板坯连铸凝固过程进行模拟。由于厚板坯具有断面面积大、温度分布情况复杂,且工业试验难度大等特点,模拟结果对于企业探究大断面板坯凝固末端位置以制定合理轻压下制度,具有很好的借鉴意义。

1 厚板坯凝固传热模型的建立

1.1 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板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^[7-10]: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;板坯在宽度方向上的冷却强度沿几何中心对称;板坯在内弧和外弧的冷却强度沿厚度中心对称。

试验板坯规格为:(400、450、480) mm×2 070 mm 和 450 mm×(1870、2 070、2 270) mm,基于以上假设,通过 SOLIDWORKS 软件建立了板坯 1/2 横截面的几何模型,切片的厚度为 15 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 5 mm。

1.2 边界条件及初始条件确定

1.2.1 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 (1)~(4)^[11-13] 所示。

1) 结晶器热流密度

$$q = \alpha - \beta \sqrt{\frac{l}{v}} \quad (1)$$

式中, q 为结晶器的热流密度 W/m^2 ; l 为距结晶器弯月面的距离, m; v 为拉速, m/s; α 和 β 与结晶器的冷却能力有关,根据文献 [3], $\alpha = 2.68 \times 10^6 W/m^2$ 。

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

式中, C_w 为水的比热, J/(kg·℃); Q_w 为结晶器的冷却

水流量, m^3/s ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; ΔT_w 为结晶器进出水温差, ℃; F 为结晶器有效冷却面积, m^2 。

2) 二冷区换热系数

$$h = 0.581 W^{0.451} (1 - 0.0075 T_w) \cdot \eta \quad (3)$$

式中, h 为换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; W 为冷却水水流密度, $L/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_w 为冷却水温度, ℃; η 为与夹辊冷却有关的系数。

3) 空冷区

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

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

1.2.2 初始条件

初始温度为浇铸温度,表达式如式 (5) 所示:

$$T_0 = T_{tundish} \quad (5)$$

式中, T_0 为钢液初始温度, ℃; $T_{tundish}$ 为中间包钢液温度, ℃。

1.3 板坯连铸机工艺参数

该连铸机主要参数见表 1、2,拉速 0.45 m/min。

表 1 结晶器参数

Table 1 The technical parameters of mould

有效高度/mm	宽面水量/(L·min ⁻¹)	窄面水量/(L·min ⁻¹)	进出口水温差/℃
900	6 000	1 000	5

表 2 二冷区参数

Table 2 The technical parameters of secondary cooling zone

二冷分区	扇形段	区长度/mm	冷却水量/(L·min ⁻¹)	
			内外弧中部	内外弧边部
1区	足辊	267	181.6 ^①	45.0 ^②
2区	弯曲段上部	540	86.7	25.9
3区	弯曲段中部	1 548	75.5	22.6
4区	弯曲段下部	2 142	59.0	17.6
5区	弧形段1段	1902	42.9	0
6区	弧形段2段	1902	11.6	0
7区	弧形段3段	1902	10.5	0
8区	弧形段4段	1914	9.4	0
9区	弧形段5段	2027	7.0	0
10区	弧形段6段	2027	7.9	0
11区	弧形段7段	2 077	7.9	0
12区	矫直8~9段	5 461	5.1	0
13区	水平10~12段	7 190	12.9	0
14区	水平13~15段	6 550	12.9	0

注:二冷区各段冷却水进水温度为30 ℃;①为1区宽面,②为1区窄面。

1.4 Q345R 钢的高温属性

Q345R 钢的主要化学成分如表 3 所示,利用 ProCAST 软件材料数据库和 Lever 模型计算出液、固相线温度分别为 1 512、1 477 ℃。其他热物性参数如图 1 所示。

表 3 Q345R 钢的主要化学成分
Table 3 The main chemical composition of Q345R steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	Nb
0.13	0.27	1.52	0.012	0.000 2	0.21	0.16	0.025	0.12	0.016	0.037

2 模型验证及结果分析

采用射钉试验的方法对板坯凝固传热模型的准确性进行验证。

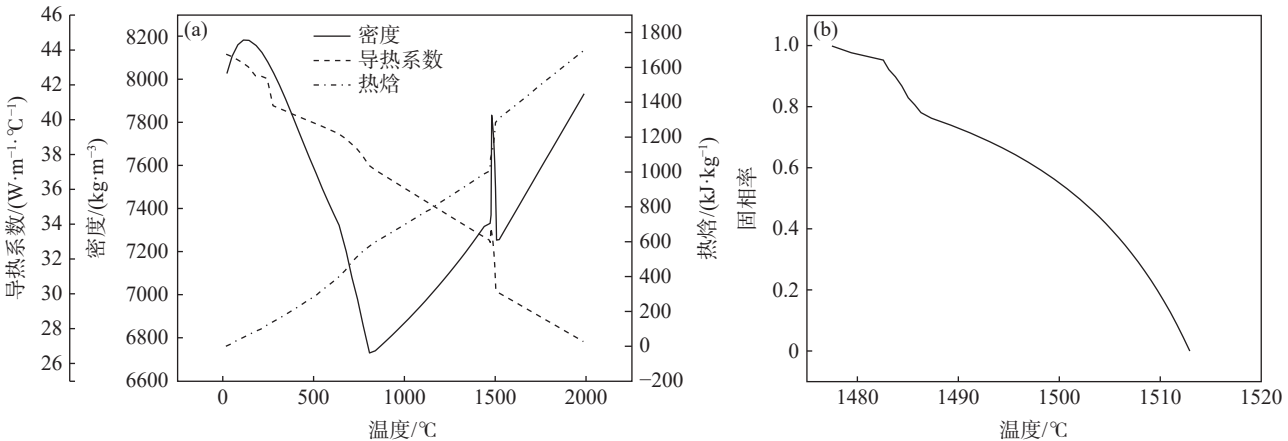
2.1 凝固坯壳厚度验证

射钉的过程是将装有示踪剂(硫化铁)的钉子射入铸坯,待铸坯冷却后,切取含有射钉的铸坯试样。对试样进行刨削处理,用刨床刨削至钉子的中心线位置,此时,射钉的轮廓将清晰显现。再用磨床对铸坯表面进行加工,保证一定的光洁度,然后进行硫印检测或低倍检测可以初步判断钉子的融化情况,进

而判断坯壳的厚度,根据凝固定律,推断凝固终点位置。

根据铸机的实际生产状况,笔者对断面为 450 mm×2 070 mm 的 Q345R 钢厚板坯,在拉速为 0.45 m/min、过热度 20 ℃、比水量 0.26 L/kg 的工况下,在 Seg.10 出口处(距弯月面距离 26.92 m)的内弧侧 1/4 宽度处进行了射钉试验,测得铸坯的坯壳厚度为 175 mm,并以试验数据为基础,计算该钢种的综合凝固系数 $k=25.70 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ 及凝固末端位置为 34.60 m 处。表 4 为 Q345R 板坯射钉试验结果。

图 2 为射钉试验与模拟结果的对比,图 2(a)中含射钉的试样大小为 300 mm×200 mm×40 mm,对应模拟结果如图 2(b)中虚线框的位置。从图 2 可以看到模拟计算的坯壳厚度值与实际测量结果吻合,说明建立的板坯凝固传热模型是可靠的。

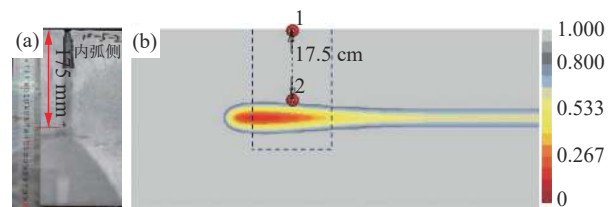


(a)导热系数;(b)密度;(c)热焓;(d)固相率

图 1 Q345 R 钢的热物性参数
Fig. 1 Thermal properties of Q345 R steel

表 4 Q345R 板坯射钉试验结果
Table 4 The nail shooting experiment results of Q345R slab

钢种	拉速/(m·min ⁻¹)	射钉位置/m	坯壳厚度/mm	综合凝固系数 $k/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2})$	凝固末端位置/m
Q345 R	0.45	26.92	175	25.70	34.60



(a)含射钉铸坯试样的低倍检测;(b)坯壳厚度模拟结果

图 2 射钉试验及坯壳厚度模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of nail shooting experiment and simulation results

2.2 模拟结果与分析

以 450 mm×2 070 mm 断面板坯为例,模拟计算

了 Q345R 钢厚板坯的凝固传热过程,具体工艺参数为:拉速 0.45 m/min,过热度 20 ℃,比水量 0.26 L/kg。铸坯 1/2、1/4、1/8 宽度中心点、表面温度及角部温度曲线如图 3 所示。图中①~⑥区分别表示连铸机的不同位置,为弯曲段上中下部、弧形段 1~4 段、弧形段 5~7 段、矫直 8~9 段、水平 10~12 段、水平 13~15 段。

由图 3 可知,在①区之前,即结晶器、足辊区冷却区内,铸坯在结晶器中的冷却速度较大,铸坯的表面温度和角部温度迅速下降。铸坯 1/2、1/4、1/8 宽度位置表面温度曲线是基本重合的,因为在该冷却区内,铸坯宽度方向上的冷却比较均匀。由于角部受到二维传热的影响,温度下降幅度最大,降至 400 ℃左右,到足辊段温度有一定回升。在进入①区后,由于铸坯在宽度方向上的冷却水量分布发生变化,内外弧中部的水量较大,边部的水量较小,1/8 宽度位

置的表面温度下降幅度较1/4、1/2宽度位置的要小;1/4与1/2宽度位置的冷却条件相近,表面温度差值较小。进入②区后,内外弧边部水量下降为0,1/8宽度位置及角部发生回温,表面温度升高,之后温降也明显低于1/4、1/2宽度位置;且1/4宽度位置表面温度较1/2宽度位置高,温差有变大的趋势。在③~⑥区内,喷淋水量沿宽度方向上的分布未发生变化,1/8宽度位置及角部表面温度延续之前下降规律,1/4、1/8宽度位置的表面温度下降规律相同,温差相对稳定。⑥区之后为空冷区,1/8宽度位置的表面温度与1/4、1/2宽度位置的差值逐渐减小,最终趋于一致。

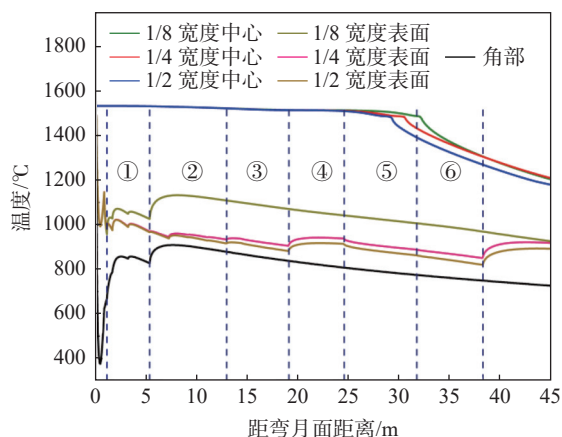


图3 板坯典型位置的中心和表面温度变化趋势

Fig. 3 The center and surface temperature curves of typical slab locations

在铸坯厚度中心温度变化的整个过程中,铸坯的中心温度在凝固之前变化不大,直至铸坯完全凝固时,才迅速下降。在⑤区之前,由于凝固进程还未触及铸坯厚度中心,三个典型位置的中心温度曲线是基本重合的。随着凝固过程的持续进行,当铸坯进入⑤区之后,1/2宽度位置的中心温度最先出现大幅度的温降,这是因为1/2宽度位置的凝固潜热最早释放完毕。铸坯表面的非均匀冷却最终会影响到不同位置厚度中心点的凝固进程,在冷却强度较大的位置,铸坯完全凝固相对早一些。

图4为板坯1/2、1/4、1/8宽度位置的中心固相率曲线。一般以连铸坯中心固相率作为轻压下工艺的压下区间及压下位置的指导参数,可以看到不同宽度位置的中心固相率并不相同,1/2宽度处最早完全凝固,1/4、1/8宽度处完全凝固时间靠后。当前工艺下,现场在⑤区(Seg.10~12)实施轻压下不够合理,压下后期1/2、1/4宽度位置处已完全凝固。实施轻压下工艺时需要考虑宽度方向上凝固进程不同步的问题,应该兼顾最先和最晚凝固的位置均能得到有效的压下补偿,压下区间越集中,效果也越好。因此,笔者以板坯1/4宽度位置的中心固相率作为轻压下工艺压下区间的指导参数。

图5为角部及距角部50、100 mm处表面温度变化曲线。由图5可知,三个位置温度变化规律相同,但角部温度最低。在弯曲区内,角部及距角部50、100 mm处温度范围分别为667~857、885~975、954~1056 °C;在矫直区内,温度范围分别为807~838、879~916、937~978 °C。由文献[14]可知,Q345 R钢的第Ⅲ脆性区温度范围大致为720~850 °C,模拟结果可以看出,在弯曲区及矫直区内,铸坯角部温度在第三脆性区范围内,距角部50、100 mm处表面温度均高出第三脆性区范围,因此可以判断,在铸坯角部及附近50 mm区域内,有存在表面横向裂纹缺陷的可能。

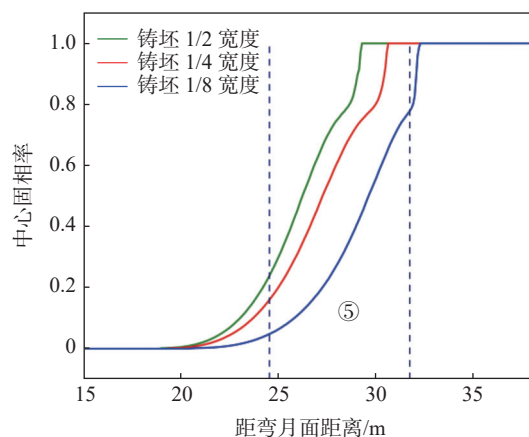


图4 板坯典型位置中心固相率变化曲线

Fig. 4 The center fraction curves of typical slab locations

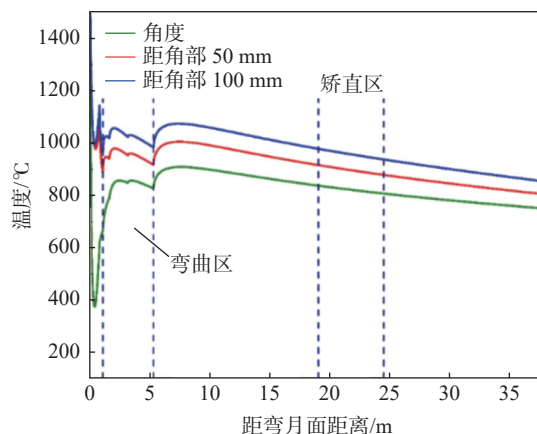


图5 板坯角部及角部附近温度变化曲线

Fig. 5 The temperature curves of corners and near corners on slab

3 连铸工艺参数对铸坯质量的影响

固定钢种铸坯的凝固终点位置决定于拉速、冷却水量、过热度、铸坯断面等,而轻压下的压下位置决定于铸坯的凝固率。在设计工艺时,不仅需要考虑压下区间的位置是否合适,还应该考虑在该工艺条件下,板坯不同宽度位置的表面温度是否合理,避免在矫直区温度落于第三脆性区之间,从而产生裂

纹,影响铸坯质量。Q345R 钢的第Ⅲ脆性区温度范围为 720~850 ℃,为保证该系列钢种铸坯表面质量,减少表面横裂纹缺陷,其弯曲区及矫直区铸坯表面温度应大于 850 ℃^[15]。

3.1 拉速的影响

模拟了连铸过程中不同拉速下(拉速分别为 0.35、0.45、0.55 m/min) Q345R 厚板坯凝固过程,钢水过热度 20 ℃,比水量为 0.26 L/kg,连铸坯规格为 450 mm×2 070 mm。

图 6 为不同拉速下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线,由图 6 可知,随着拉速的增加,中心固相率曲线向远离弯月面的方向移动,凝固终点靠后,两相区变长。这是由于在冷却总水量不变的情况下,随着拉速的提高,相应各段比水量降低,最终导致凝固终点靠后,且连铸机后部冷却区域实际冷却强度减小,因此,单位长度上的固相率变化也减小,两相区变长。当拉速为 0.35 m/min 时,适宜压下位置为 Seg.7~8,压下区间为 $f_s^c=0.06 \sim 0.77$;当拉速为 0.45 m/min 时,适宜压下位置为 Seg.10~11,压下区间为 $f_s^c=0.18 \sim 0.76$;当拉速为 0.55 m/min 时,适宜压下位置为 Seg.13~14,压下区间为 $f_s^c=0.22 \sim 0.71$ 。拉速对压下位置有重大的影响,拉速每增加 0.10 m/min,压下合理位置应向后移动 3 个扇形段。

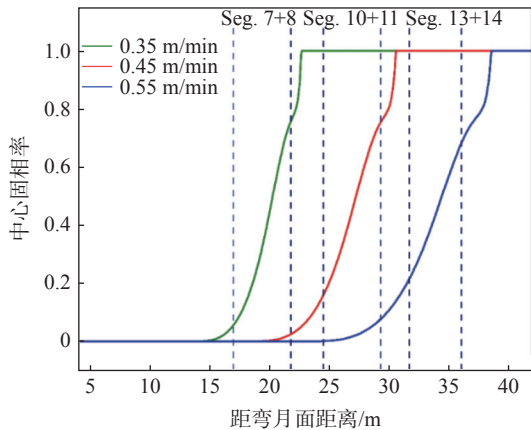


图 6 不同拉速下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线

Fig. 6 The center solid fraction curves of slab 1/4 width locations under different casting speeds

图 7 为不同拉速下板坯角部温度变化曲线,由图 7 可知,拉速越大,连铸坯角部温度越高。当拉速为 0.35、0.45 m/min 和 0.55 m/min 时,在弯曲区内,铸坯的角部温度范围分别为 500~781、667~857、655~884 ℃;在矫直区内,铸坯的角部温度范围分别为 768~798、807~838、835~865 ℃。随着拉速的增加,铸坯角部区域温度在弯曲区和矫直区均升高,拉速每增加 0.10 m/min,铸坯温度在弯曲区增加约 50 ℃,在矫直区增加约 35 ℃。为避开 Q345R 钢第Ⅲ脆性区,减轻边角部横向裂纹缺陷,铸坯在弯曲

区和矫直区的角部温度应大于 850 ℃,因此理论上应将拉速提升至 0.55 m/min 以上。

3.2 比水量的影响

模拟了连铸过程中不同比水量下(比水量分别为 0.21、0.26、0.31 L/kg) Q345R 厚板坯凝固过程,拉速为 0.45 m/min,钢水过热度 20 ℃,连铸坯规格为 450 mm×2 070 mm。

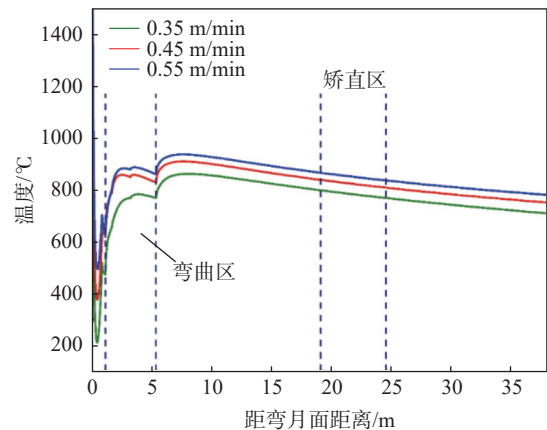


图 7 不同拉速下板坯角部温度变化曲线

Fig. 7 The temperature curves of slab corners under different casting speeds

图 8 为不同比水量下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线,由图 8 可知,随着比水量的增加,中心固相率曲线逐渐向弯月面的方向移动,凝固终点靠前,铸坯液芯长度减小,两相区变短,这是由于二冷比水量的增加加快了连铸坯的凝固速率。三种不同比水量下的压下位置均为 Seg.10~11,压下区间分别为 $f_s^c=0.13 \sim 0.71$ 、 $f_s^c=0.16 \sim 0.75$ 、 $f_s^c=0.20 \sim 0.79$ 。二冷比水量对压下位置的影响不大,但随着比水量的增加,压下区间逐渐向高固相率区间移动。

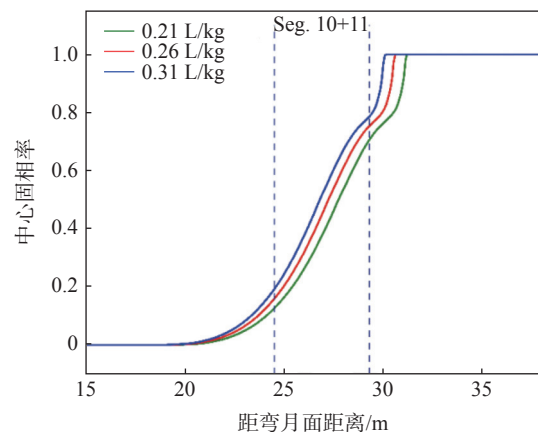


图 8 不同比水量下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线

Fig. 8 The center solid fraction curves of slab 1/4 width locations under different specific cooling water

图 9 为不同比水量下板坯角部温度变化曲线,由图 9 可知,连铸坯角部温度随二冷比水量的增加而降低。当比水量为 0.21、0.26 L/kg 和 0.31 L/kg

时,在弯曲区内,铸坯的角部温度范围分别为 570~848、667~857、536~826℃;在矫直区内,铸坯的角部温度范围分别为 806~836、807~838、804~834℃。随着比水量的增加,铸坯角部区域温度在弯曲区变化比较明显,在矫直区温度变化不明显。

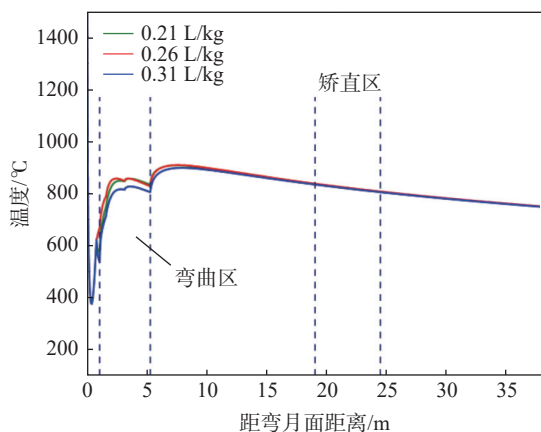


图9 不同比水量下板坯角部温度变化曲线

Fig. 9 The temperature curves of slab corners under different specific cooling water

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 10、20、30℃)Q345R 厚板坯凝固过程,拉速为 0.45 m/min,比水量为 0.21 L/kg,连铸坯规格为 450 mm×2 070 mm。

图 10 为不同过热度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线,由图 10 可知,随着过热度的增加,中心固相率曲线向远离弯月面的方向移动,凝固终点靠后,液相穴长度变长,但两相区变短,这主要由于钢液的过热度较高时,钢液开始凝固的时间增加的幅度变大,过冷度增加,钢液凝固的速率很大,钢液迅速凝固,固液相的间距减小。三种不同过热度下的压下位置均为 Seg.10~11,压下区间分别为 $f_s^c=0.24 \sim 0.84$ 、 $f_s^c=0.16 \sim 0.76$ 、 $f_s^c=0.12 \sim 0.71$ 。过热度对压下位置的影响不大,但随着过热度的增加,压下区间逐渐向低固相率范围移动。

图 11 为不同过热度下板坯角部温度变化曲线,由图 11 可知,当过热度为 10、20℃和 30℃时,在弯曲区内,铸坯的角部温度范围分别为 660~851、667~857、672~861℃;在矫直区内,铸坯的角部温度范围分别为 805~834、807~838、809~839℃。连铸坯角部温度随过热度的增加而增加,但变化的幅度不明显。

3.4 厚度的影响

模拟了连铸过程中不同厚度下(厚度分别为 400、450、480 mm)Q345R 厚板坯凝固过程,拉速为 0.45 m/min,比水量为 0.21 L/kg,过热度为 20℃,连铸坯宽度为 2 070 mm。

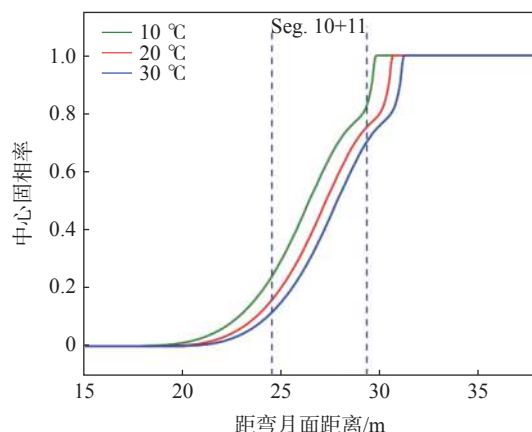


图10 不同过热度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线

Fig. 10 The center solid fraction curves of slab 1/4 width locations under different superheat

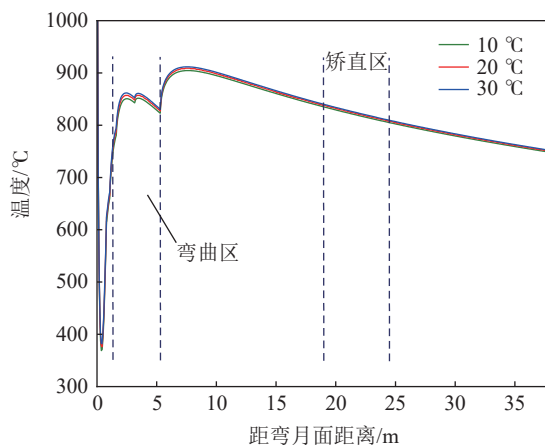


图11 不同过热度下板坯角部温度变化曲线

Fig. 11 The temperature curves of slab corners under different superheat

图 12 为不同厚度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线,由图 12 可知,随着铸坯厚度的增加,中心固相率曲线向远离弯月面的方向移动,凝固终点靠后,两相区变长。当厚度为 400 mm 时,适宜压下位置为 Seg.8~9,压下区间为 $f_s^c=0.13 \sim 1.0$;当厚度为 450 mm 时,适宜压下位置为 Seg.10~11,压下区间为 $f_s^c=0.18 \sim 0.76$;当厚度为 480 mm 时,适宜压下位置为 Seg.11~13,压下区间为 $f_s^c=0.10 \sim 0.79$ 。随着铸坯厚度的增加,铸坯两相区的长度增加,压下位置由两个扇形段增加到三个扇形段,可见铸坯厚度对压下位置和压下区间有着重要的影响。

图 13 为不同厚度下板坯角部温度变化曲线,由图 13 可知,当厚度为 400、450 mm 和 480 mm 时,在弯曲区内,铸坯的角部温度范围分别为 658~854、667~857、668~858℃;在矫直区内,铸坯的角部温度范围分别为 802~836、807~838、809~839℃。连铸坯角部温度随厚度的增加而增加,但变化的幅度不明显。

3.5 宽度的影响

模拟了连铸过程中不同宽度下(宽度分别为1870、2070、2270 mm)Q345R 厚板坯凝固过程, 拉速为0.45 m/min, 比水量为0.21 L/kg, 过热度为20 °C, 连铸坯厚度为450 mm。

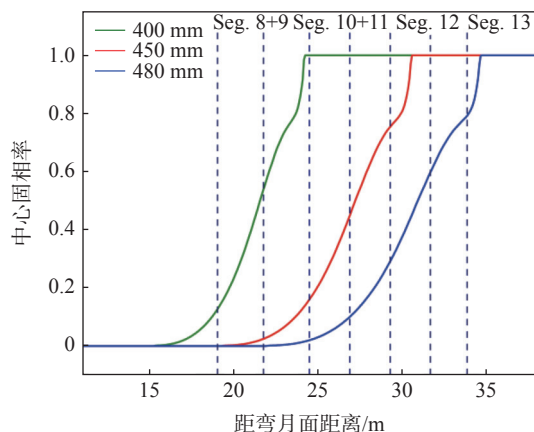


图 12 不同厚度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线

Fig. 12 The center solid fraction curves of slab 1/4 width locations under different thickness slabs

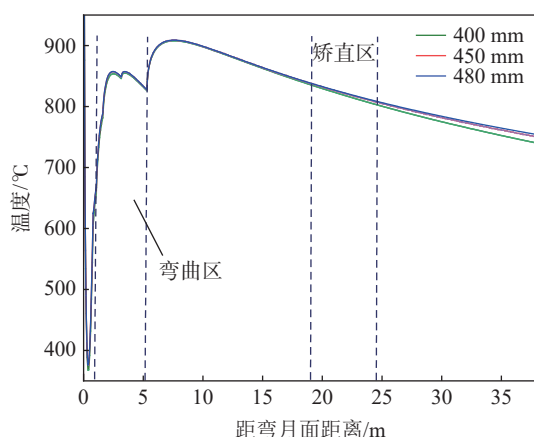


图 13 不同厚度下板坯角部温度变化曲线

Fig. 13 The temperature curves of slab corners under different thickness slabs

图 14 为不同宽度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线, 由图 14 可知, 1870 mm 和 2070 mm 两种宽度规格的铸坯 1/4 宽度中心固相率曲线变化较小, 而 2270 mm 宽度规格的铸坯 1/4 宽度中心固相率曲线变化较大, 向远离弯月面的方向移动。这主要是因为随着铸坯宽度的增加, 边部的冷却强度减小。当宽度为 1870 mm 时, 适宜压下位置为 Seg.10 ~ 11, 压下区间为 $f_s^c=0.19 \sim 0.80$; 当宽度为 2070 mm 时, 适宜压下位置为 Seg.10 ~ 11, 压下区间为 $f_s^c=0.18 \sim 0.76$; 当宽度为 2270 mm 时, 适宜压下位置为 Seg.11 ~ 12, 压下区间为 $f_s^c=0.25 \sim 0.80$ 。随着铸坯宽度的增加, 铸坯的两相区的长度增加, 压下位置向后移动一个扇形段, 可见铸坯宽度对压下位置和压下区间的影响也较为重要。

图 15 为不同宽度下板坯角部温度变化曲线, 由图 15 可知, 当宽度分别为 1870、2070 mm 和 2270 mm 时, 在弯曲区内, 铸坯的角部温度变化范围分别为 661 ~ 807、667 ~ 857、818 ~ 943 °C; 在矫直区内, 铸坯的角部温度变化范围分别为 805 ~ 836、807 ~ 838、815 ~ 848 °C。连铸坯角部温度随宽度的增加而增加, 在弯曲区变化幅度较大, 但在矫直区变化的幅度不明显。

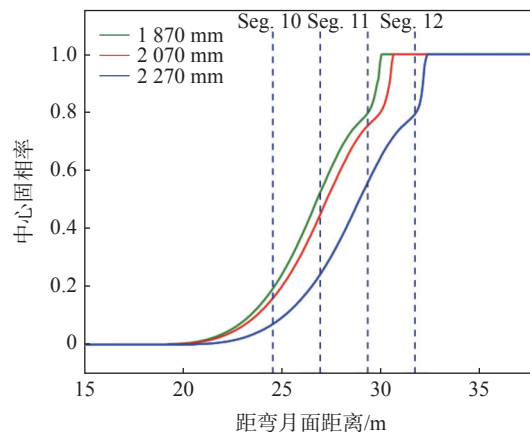


图 14 不同宽度下板坯 1/4 宽度位置中心固相率曲线

Fig. 14 The center solid fraction curves of slab 1/4 width locations under different width slabs

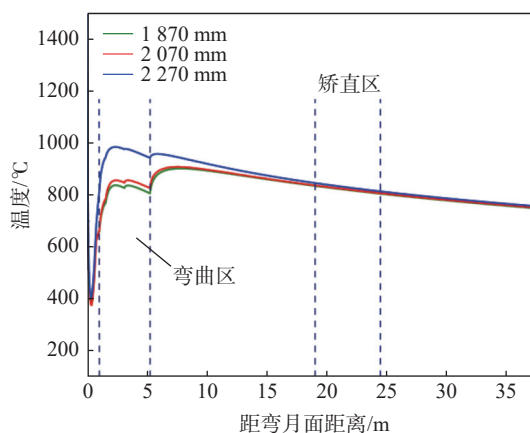


图 15 不同宽度下板坯角部温度变化曲线

Fig. 15 The temperature curves of slab corners under different width slabs

从数值模拟结果来看, 拉速及铸坯规格对轻压下位置和区间、铸坯角部区域温度的影响最大。同时, 主要工艺参数的变化对处于弯曲区的铸坯角部区域温度的影响大于矫直区, 在同一工艺条件下, 弯曲区的铸坯角部区域温度低于矫直区。

4 结论

建立 Q345R 厚板坯连铸凝固传热模型, 通过射钉试验对模型进行验证修正, 研究了不同工艺参数和铸坯规格对压下位置和压下区间的影响规律, 以及铸坯角部温度的变化规律。得出以下结论:

1)通过对规格为 450 mm×2 070 mm 的 Q345R 厚板坯进行射钉试验,测得在拉速为 0.45 m/min,过热度 20 ℃,比水量 0.26 L/kg 的工况下,铸坯凝固坯壳厚度为 175 mm,综合凝固系数值为 25.70 mm/min^{1/2},凝固末端位置在 34.60 m 处。

2)建立 Q345R 厚板坯凝固传热模型并进行验证修正,模拟了与射钉试验相同工况下的板坯凝固情况,模拟结果表明,1/2 宽度处最早完全凝固,1/4、1/8 宽度处完全凝固时间靠后。生产现场在 Seg. 10~12 实施轻压下不合理,压下后期 1/2、1/4 宽度位置处已完全凝固,压下位置靠后。在弯曲区及矫直区内,铸坯角部温度在第Ⅲ脆性区内,在铸坯角部及附近 50 mm 区域内,有产生表面横向裂纹缺陷的可能。

3)研究了不同工艺参数和不同规格下板坯的凝固传热过程。模拟结果表明,拉速及铸坯规格对压

下位置的影响较大,拉速每增加 0.10 m/min,压下位置向后移动 3 个扇形段;铸坯厚度由 450 mm 增大到 480 mm,压下位置由两个扇形段增加到三个扇形段;铸坯宽度每增加 200 mm,压下位置向后移动一个扇形段。拉速对弯曲区及矫直区铸坯角部温度的影响较大,拉速每增加 0.10 m/min,在弯曲区增加约 50 ℃,在矫直区增加约 35 ℃;宽度由 2 070 mm 增加到 2 270 mm,铸坯在弯曲区的角部温度增加约 150 ℃;过热度、二冷比水量对压下位置及矫直区铸坯角部温度变化影响不大,但对压下区间内的中心固相率有影响。

4)基于工艺参数和铸坯规格对压下位置及角部温度的影响,理论上得到最优生产规格及工艺参数:铸坯规格为 450 mm×2 270 mm,拉速为 0.55 m/min,过热度为 15~25 ℃,二冷比水量为 0.26 L/kg。矫直区为 Seg.8~9,轻压下区为 Seg.13~15。

参考文献

- [1] Zhao Lei. Research and analysis on properties of Q345R vessel steel [J]. Physics Examination and Testing, 2012, 30(1): 5-7,16. (赵蕾, Q345R 压力容器板性能分析与研究 [J]. 物理测试, 2012, 30(1): 5-7,16.)
- [2] Cai Kaike, Wu Yuanzeng. Mathematical model of solidified heat transfer of continuous ingot slab[J]. Journal of Beijing University of Iron and Steel Technology, 1982(3): 1-11. (蔡开科, 吴元增. 连续铸锭板坯凝固传热数学模型 [J]. 北京钢铁学院学报, 1982(3): 1-11.)
- [3] Li Jie. 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] Wang Lu, Sun Yanhui, Niu Apeng, 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.)
- [5] Gao Xiangzhou, Yang Shufeng, Li Jingshe, et al. Numerical simulation of solidification process for wide and thick slab[J]. Foundry Technology, 2015, 36(3): 678-683. (高向宙, 杨树峰, 李京社, 等. 宽厚板坯连铸凝固过程数值模拟 [J]. 铸造技术, 2015, 36(3): 678-683.)
- [6] Wang Zhenming, Zhao Jing, Wang Yulong, et al. Research on central segregation control of 400 mm ultra-thick slab[J]. Continuous Casting, 2019, 44(6): 47-50. (王臻明, 赵晶, 王玉龙, 等. 400 mm 特厚板坯中心偏析控制的研究 [J]. 连铸, 2019, 44(6): 47-50.)
- [7] Li Yaoguang. 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.)
- [8] Zhou Guotao, Chen Jin, Huang Biaocai, et al. Numerical simulation of solidification and heat transfer of Q355B slab during continuous casting[J]. Continuous Casting, 2023(2): 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(2): 43-51.)
- [9] Lally B, Biegler L, Henein H. Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting[J]. Metallurgical Transactions B, 1990, 21(4): 761-770.
- [10] 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.
- [11] Sheng Yiping, Kong Xiangdong, Yang Yongli. 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.)
- [12] Jing C, Wang X, Jiang M. Study on solidification structure of wheel steel round billet using FE-CA coupling model[J]. Steel Research International, 2011, 82(10): 1173-1179.
- [13] Wang Xinhua. Ferrous metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007. (王新华. 钢铁冶金—炼钢学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.)
- [14] Su Cheng, Dong Fang. High temperature plasticity of micro-alloyed Q345B in slab continuous casting process[J]. Iron & Steel, 2012, 47(08): 65-69, 80. (宿成, 董方. 合金 Q345B 板坯连铸的高温塑性 [J]. 钢铁, 2012, 47(8): 65-69, 80.)
- [15] Cheng Xuhui. The optimization of cooling process of slab continuous casting in straightening zone[D]. Dalian: Northeastern University, 2018. (程旭辉. 板坯连铸矫直区冷却工艺优化 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.)