

· 试验研究 ·

Q460 钢3 250 mm × 150 mm 宽板坯凝固传热数值模拟研究和应用

齐新霞¹, 贾琦²

(1 北京理工大学珠海学院, 珠海 519088; 2 北京市基础设施投资有限公司, 北京 100101)

摘要 以 Q460 钢(/% : 0.17C, 0.35Si, 1.5Mn, 0.020P, 0.020S, 0.020Nb, 0.075V) 3 250 mm × 150 mm 宽板坯为研究对象, 采用 ANSYS 软件建立凝固传热模型, 研究拉坯速度、比水量、过热度等工艺参数对铸坯凝固过程的影响。模拟结果表明: 拉坯速度每增大 0.10 m/min, 矫直段铸坯表面温度升高 36.5 °C, 出坯温度升高 50 °C, 坯壳厚度减薄 2.4 mm, 液心长度增加 1.2 m; 每增加 1 °C 的过热度, 矫直点铸坯上表面中心温度增加 1.73 °C, 延长液芯长度 0.11 m; 因此, 拉坯速度是影响铸坯质量的关键。生产应用表明, 3 250 mm × 150 mm 板坯拉速 1.20 ~ 1.25 m/min, 过热度 15 ~ 20 °C 时板坯表面矫直温度大于 950 °C, 降低了铸坯中心疏松和偏析, 表面质量显著提高。

关键词 Q460 钢 超宽板坯 凝固传热 数值模拟

Research and Application on Numerical Simulation of Solidification Heat Transfer of Q460 Steel 3 250 mm × 150 mm Wide Slab

QI Xinxia¹, JIA Qi²

(1 Beijing Institute of Technology, Zhuhai college, Zhuhai 519088;
2 Beijing Infrastructure Investment Co Ltd, Beijing 100101)

Abstract Taking Q460 steel (/% : 0.17C, 0.35Si, 1.5Mn, 0.020P, 0.020S, 0.020Nb, 0.075V) 3 250 mm × 150 mm wide slab as the research object, the solidification heat transfer model is established by ANSYS software, and the effects of casting speed, specific water rate and superheat etc process parameters on the solidification process of slab are studied. The simulation results show that when the casting speed increases by 0.10 m/min, the surface temperature of slab at the straightening section increases by 36.5 °C, the slab temperature increases by 50 °C, the shell thickness decreases by 2.4 mm, and the liquid core length increases by 1.2 m; with increase of superheat of 1 °C, the center temperature of upper surface of slab at the straightening point increases by 1.73 °C and the length of the liquid core is extended by 0.11 m; therefore, the casting speed is the key to quality of slab. Production application shows that by 3 250 mm × 150 mm slab cast speed 1.20 ~ 1.25 m/min, with superheat 15 ~ 20 °C, the temperature of slab surface at straightening section is more than 950 °C, to decrease the rating of center porosity and segregation and obviously increase surface quality.

Material Index Q460 Steel, Wide Slab, Solidification and Heat Transfer, Numerical Simulation

1 铸机技术特点及有关参数

宽板坯铸机为半径 6.67 m 的直弧形, 多点弯曲多点矫直, 二冷区包括足辊和 9 个二冷段, 纵、横向分区域配水。扇形段 0 ~ 8 段。平板结晶器: 3 450 mm × 950 mm。采用保护渣、浸入水口等实现全程保护浇注。

2 固传热模型的建立

2.1 基本假设

(1) 拉坯速度稳定后, 传热条件不随时间变化。(2) 铸坯内弧和外弧传热条件相似。(3) 沿拉坯方向温度梯度引起的传热很小, 忽略不计。(4) 钢的热物性参数仅与温度相关。(5) 二冷铸坯表面的辐射传热、与支撑辊的接触传热及二冷水的冷却传热, 采用综合传热系数一并考虑。(6) 忽略振动对凝固传热的影响。根据假设条件凝固传热方程简化为二

维非稳态导热方程:

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

式中: ρ - 钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p - 比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]; k - 导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]; q_v - 内热源/($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$); T - 温度/°C; t - 时间/s。

2.2 物性参数的选择及边界条件

(1) 物性参数。根据经验公式计算液相线温度 (T_L) 和固相线温度 (T_S)。采用下式 $\lambda_0 = 69.78 - 10.12C - 16.75Mn - 33.73Si$ 计算所模拟钢的导热系数 $\lambda_0 = 31.13 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$; 400 ~ 1 200 °C 液相区采用综合导热系数 λ_{eff} 。 $T \leq T_S$ 时, $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_0$; $T \geq T_L$ 时, $\lambda_{\text{eff}} = 7 \lambda_0$; $T_S < T < T_L$ 时, $\lambda_{\text{eff}} = 5 \lambda_0$ 。模拟钢种 Q460, 成分见表 1。

两相区采用等效比热容代替钢的比热容。1 300 °C 以下钢的比热容、凝固潜热采用 1.5% Mn 钢

表 1 Q460 钢的成分 / %
Table 1 Composition of Q460 steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	V
标准	0.16 ~ 0.20	0.20 ~ 1.45	≤	≤	0.015 ~ 0.065	0.025 ~ 0.085	
实测	0.17	0.35	1.5	0.02	0.02	0.02	0.075

的相应值;根据已得到的数据进行外推或内插得到固相线和液相线温度处的比热容数据。 $C_L = 837 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})^{-1}$, $C_S = 715.83 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})^{-1}$ 。

(2)边界条件。将生产现场结晶器平均热流密度(\bar{q}_m)值代入 $q_m = (640 - \beta\sqrt{t}) \times 4.187 \times 10^3$, 得不同 β 值, 确定本模拟热流密度 q_m 表达式见表 2。式中: t - 铸坯在结晶器某位置对应的时间/s, 将结晶器瞬时热流密度加载到模型中。

二冷区传热系数采用经验公式, 并在不同冷却段加上不同修正系数, 结果见表 3。计算得空冷区传热系数为: $h = 0.31/(\text{kw} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1})$ 。

3 模拟计算结果及分析

基于内外弧传热对称的假设, 取 1/4 铸坯断面建立有限元模型, 对宽板坯凝固过程的温度场进行模拟, 并通过实际测量铸坯表面温度验证模型。

3.1 铸坯上表面中心温度分布研究

拉坯速度 1.10、1.20、1.25、1.30 m/min, 浇注温

表 2 结晶器冷却参数及热流密度表达式

Table 2 Mold cooling parameters and density of heat flow rate

参数	位置			
	右端	左端	内弧	外弧
$\bar{q}_m/(\text{MW} \cdot \text{m}^{-2})$	1.12	1.16	1.13	1.13
β	55.16	53.75	54.81	54.81
$q_m/(\text{MW} \cdot \text{m}^{-2})$	$640 - 55.16\sqrt{t}$	$640 - 53.75\sqrt{t}$	$640 - 54.81\sqrt{t}$	$640 - 54.81\sqrt{t}$

注: 拉坯速度 1.25 m/min。

表 3 二冷区传热系数 / ($\text{kw} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$)

Table 3 Heat transfer coefficient of secondary cooling zone / ($\text{kw} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$)

二冷段	经验公式	传热系数
足辊区	宽面: $h = \alpha + 0.35 \text{ W}$ 窄面: E. Bolle	宽面 $h_1 = 0.35 + 0.35$ 窄面 $h_2 = 0.36 \text{ W}_2^{0.556}$
0 段	E. Bolle 公式	边部 $h_{01} = 0.36 \text{ W}_{01}^{0.556}$ 中心 $h_{02} = 0.36 \text{ W}_{02}^{0.556}$
1 段	$h = 0.423 \text{ W}^{0.556}$	边部 $h_{11} = 0.423 \times 2.6299^{0.556}$ 中心 $h_{12} = 0.423 \times 2.6322^{0.556}$
2,3 段	E. Bolle 公式	内弧 $h_{21} = 0.36 \text{ W}_{21}^{0.556}$
4,5 段	E. Bolle 公式	内弧 $h_{41} = 0.36 \text{ W}_{41}^{0.556}$
6,7 段	E. Bolle 公式	内弧 $h_{61} = 0.36 \text{ W}_{61}^{0.556}$
8 段	$h = \alpha + 0.35 \text{ W}$	$h_8 = 0.35 + 0.35 \text{ W}_8$

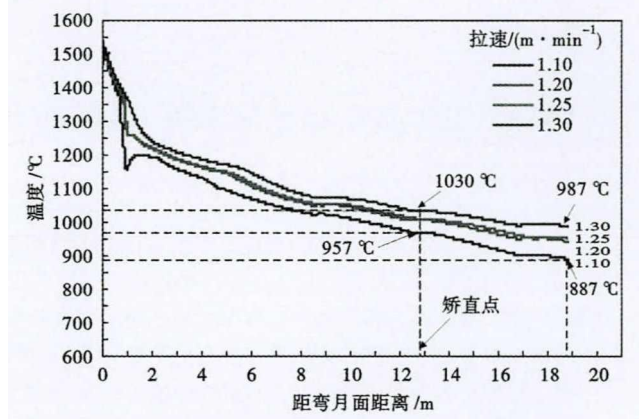


图 1 拉坯速度对板坯上表面中心温度分布的影响
Fig. 1 Effect of cast speed of slab on temperature distribution at the center of upper surface of the slab

表 4 不同拉坯速度时铸坯上表面温度分布

Table 4 Temperature distribution at upper surface of casting billet at different casting speeds

拉坯速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	矫直温度/°C		出坯温度/°C	
	模拟	实测	模拟	实测
1.10	957	942	887	-
1.20	983.4	965	931	922
1.25	1005	985	953	932
1.30	1030	1011	987	-

度 1530 °C 时, 模拟超宽板坯上表面中心温度变化曲线如图 1。模拟计算值及红外仪实际测量值见表 4。

由表 4 可知, 模拟温度与实测温度的相对误差小于 2.20%, 认为模拟结果成立。

由图 1 和表 4 可知: (1) 拉坯速度由 1.10 m/min 提高到 1.30 m/min 时, 铸坯上表面中心矫直温度由 957 °C 提高到 1030 °C, 提高 73 °C; 出坯时铸坯上表面中心的温度由 887 °C 提高到 987 °C, 提高 100 °C。即拉坯速度每增大 0.10 m/min, 矫直段铸坯表面温度升高约 36.5 °C, 出坯温度升高约 50 °C。拉坯速度对铸坯表面温度影响很大。(2) 拉坯速度大于 1.20 m/min, 才能保证矫直温度大于 960 °C, 才能降低铸坯表面横裂纹发生几率。

3.2 温度场分布模拟

(1) 结晶器出口的温度场分布。不同拉坯速度时宽板坯结晶器出口的温度分布如图 2, 模拟钢水温度 1530 °C。拉坯速度 1.10、1.20、1.30 m/min 时的温度分布, 分别对应图 2(a、b、c), 对应的坯壳厚度分别为 16.4、14.5、11.6 mm。

由图 2 可知: ①拉坯速度提高铸坯出结晶器的坯壳厚度减薄。②拉坯速度每提高 0.1 m/min, 坯壳厚度平均减薄 2.4 mm。

(2) 矫直区的温度场分布。不同拉坯速度板坯

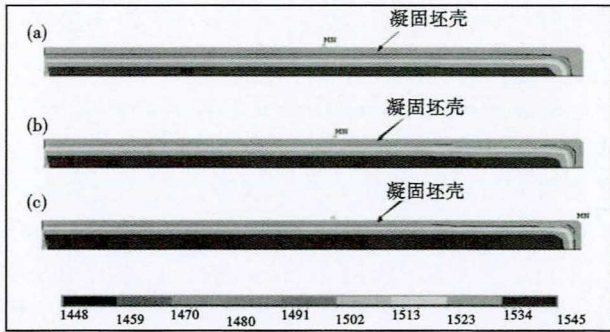


图2 结晶器出口铸坯的温度分布图,拉坯速度/(m · min⁻¹):(a)1.10;(b)1.20;(c)1.30

Fig.2 Temperature distribution diagram of cast slab at mold outlet, cast speed/(m · min⁻¹):(a)1.10;(b)1.20;(c)1.30

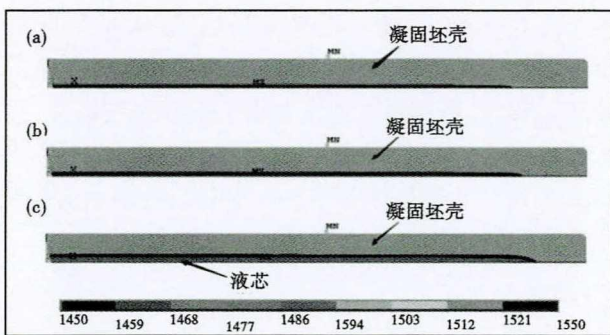


图3 铸坯矫直段的温度分布图,拉坯速度/(m · min⁻¹):(a)1.10;(b)1.20;(c)1.30

Fig.3 Temperature distribution of cast slab at straightening section, cast speed/(m · min⁻¹):(a)1.10;(b)1.20;(c)1.30

矫直段温度分布如图3,模拟钢水温度1530 °C。拉坯速度1.10、1.25、1.30 m/min时的温度分布,分别对应图3中(a、b、c)。

由图3可知:(a)拉坯速度1.10 m/min,矫直点铸坯完全凝固;(b)拉坯速度1.25 m/min,基本凝固,存在少量糊状区;(c)拉坯速度1.30 m/min,未完全凝固,少量液芯存在。

3.3 拉坯速度1.20 m/min时温度分布模拟

拉坯速度1.20 m/min,浇注温度1530 °C时,宽板坯上表面中心温度、心部温度分布如图4。

由图4可知:拉坯速度1.20 m/min时,矫直点处宽板坯上表面中心温度983.40 °C,心部温度1446 °C,出坯温度931 °C。

3.4 不同拉坯速度铸坯中心温度分布模拟

拉坯速度1.10、1.20、1.25、1.30 m/min,浇注温度1530 °C时,宽板坯中心部位温度分布曲线如图5。

由图5可知:①拉坯速度1.10 m/min和1.20 m/min时,凝固终点均小于12.8 m,全凝固矫

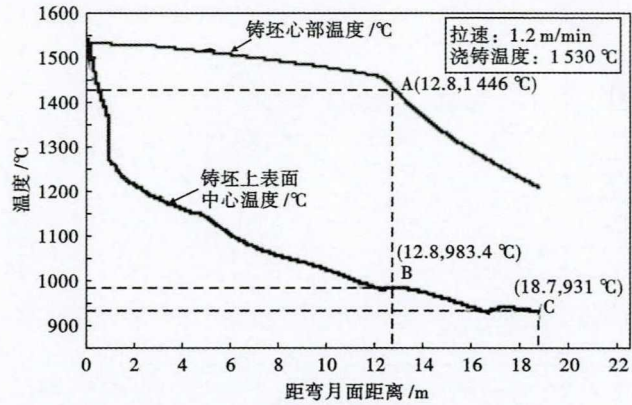


图4 拉坯速度1.20 m/min时板坯温度分布

Fig.4 Temperature distribution of slab with casting speed 1.20 m/min

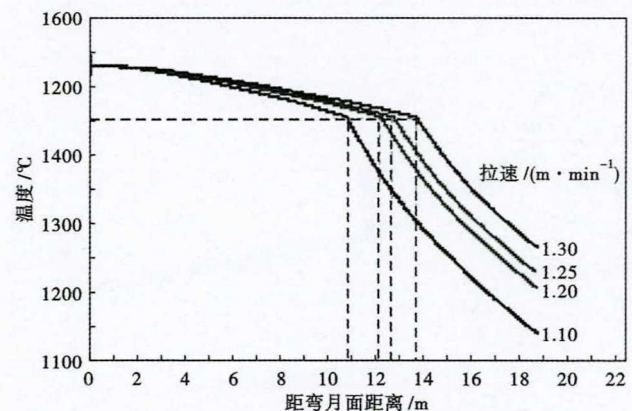


图5 拉坯速度对板坯中心温度分布的影响

Fig.5 Effect of cast speed on slab center temperature distribution

直,可以较好避免铸坯产生中间裂纹;拉坯速度1.25 m/min时,凝固终点大于12.8 m,带液芯矫直。②随拉坯速度增大凝固末端向后移动,宽板坯由全凝固矫直转变为带液芯矫直,增大中间裂纹产生几率,加重中心偏析程度。

3.5 坯壳厚度分布模拟

拉坯速度1.20、1.30 m/min,浇注温度1530 °C时,坯壳厚度变化曲线如图6。

由图6可知:拉坯速度由1.20 m/min增大到1.30 m/min时,液芯长度由12.6 m增加到13.8 m,出结晶器的坯壳厚度由14.5 mm减少到11.6 mm。即拉坯速度每增大0.1 m/min时,液心长度增加1.2 m,出结晶器的坯壳厚度减薄2.9 mm。

3.6 不同过热度模拟计算结果

拉坯速度1.20 m/min、钢水过热度10、15、20、25 °C时,宽板坯上表面中心温度变化曲线如图7。铸坯中心温度变化曲线如图8所示。

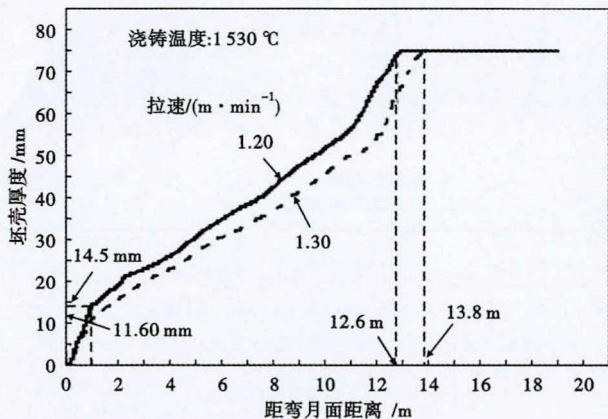


图 6 拉坯速度对坯壳厚度分布的影响

Fig.6 Effect of cast speed on shell thickness distribution of slab

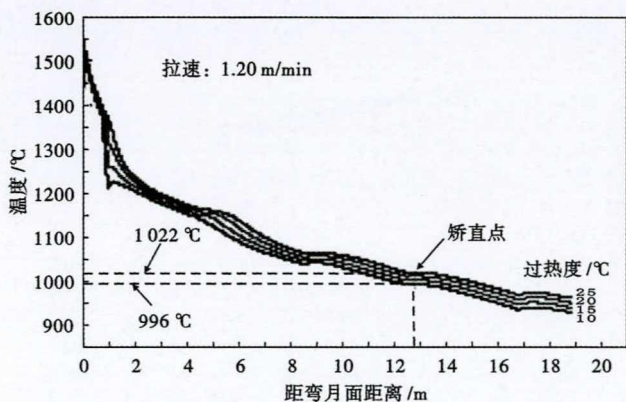


图 7 过热度对板坯上表面中心温度分布的影响

Fig.7 Effect of degree of superheat on distribution of upper surface center temperature of slab

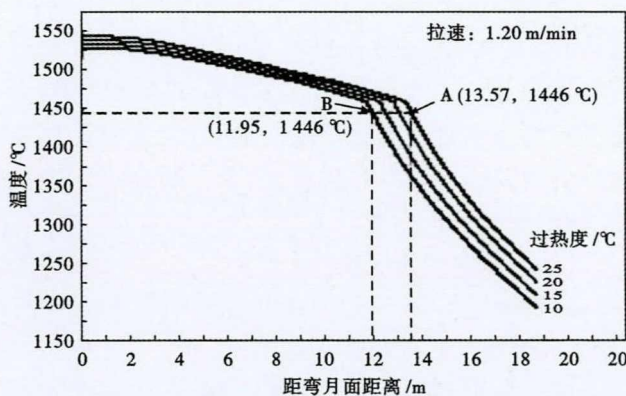


图 8 过热度对板坯中心温度分布的影响

Fig.8 Effect of degree of superheat on distribution of central temperature of slab

由图 7 可知:拉坯速度不变,过热度由 10 °C 增加到 25 °C 时,矫直点铸坯上表面中心的温度由 996 °C 增加到 1 022 °C,即每增加 1 °C 的过热度,矫直点铸坯上表面中心的温度增加 1.73 °C。可见过

热度变化对铸坯表面温度的影响远小于拉坯速度对其产生的影响。

由图 8 可知:(1)拉坯速度 1.20 m/min,钢水过热度由 10 °C 增加到 25 °C 时,液芯长度由 11.95 m 增大到 13.57 m,铸坯由全凝固矫直转变为带液芯矫直,每增加 1 °C 的过热度相当于延长液芯长度 0.11 m。(2)拉坯速度 1.20 m/min,过热度 20 °C 时,液芯长度大于 12.8 m,带液芯矫直;过热度 15 °C 时,全凝固矫直。(3)随着过热度增大,凝固末端向后移动,铸坯中心疏松和中心偏析加重。

4 生产实践

采用优化工艺控制铸坯表面质量和内部质量,生产铸坯拉速 1.20 ~ 1.25 m/min,钢水过热度 ≤ 20 °C,板坯表面矫直温度大于 950 °C,铸坯几乎不带液芯矫直,板坯中心偏析和中心疏松级别较轻,并大幅降低板坯表面横向裂纹缺陷。通过 10 个月优化工艺生产 Q460 钢连铸板坯质量进行统计,宽板铸坯合格率提高 2 个百分点。

5 结语

3 250 mm × 150 mm 连铸拉坯速度控制在 1.20 ~ 1.25 m/min,过热度在 15 ~ 20 °C;宽板坯表面矫直温度大于 950 °C,降低了铸坯中心疏松和中心偏析,铸坯表面质量显著提高。

参考文献

- [1] 谢集祥,罗 钢,刘 浏,等. Q235B 钢板坯连铸凝固传热行为的数值模拟计算[J]. 特殊钢,2020,41(2):10-14.
- [2] 王德炯同,焦 帅,殷 皓,等. GCr15 钢大方坯传热凝固数值模拟[J]. 炼钢,2018,34(1):30-35.
- [3] 仲红刚,吴聪森,倪 杰,等. 节铬型铁素体不锈钢连铸板坯凝固过程热模拟[J]. 钢铁研究学报,2015(5):30-34.
- [4] 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] 申燕强,白明华,高朋垒,等. 不同角部形状特厚矩形坯凝固传热及应变数值模拟[J]. 钢铁,2016(4):38-43.
- [6] 钱宏智,杜辰伟,胡丕俊,等. 板坯连铸凝固过程中的自由热收缩行为[J]. 钢铁研究学报,2016(8):27-32.
- [7] 蔡来强,王旭东,姚 曼,等. 连铸圆坯非均匀传热/凝固行为的无网格计算方法[J]. 金属学报,2020,56(8):1165-1174.
- [8] 果晶晶,陈 健. 板坯连铸过程的凝固传热分析[J]. 山西冶金,2021,44(3):54-57.

齐新霞(1964-),女,教授,博士(2008年北京科技大学),连铸工艺和连铸凝固传热研究. E-mail:1410134965@qq.com

收稿日期:2021-11-11