

## 37Mn5 钢 Φ210 mm 圆坯连铸凝固影响因素的数学模拟分析

孙向东 朱立光 朱新华

(河北联合大学冶金与能源学院,河北省现代冶金技术重点实验室,唐山 063009)

**摘要** 通过 ANSYS 软件建立了 37Mn5 钢 Φ210 mm 圆坯连铸的传热模型,研究了在铸坯传热过程中铸机拉速 1.3 ~ 1.5 m/min,钢水过热度 15° ~ 60°,二冷比水量 0.58 ~ 0.78 L/kg 对铸坯表面温度、凝固坯壳厚度和凝固终点位置的影响。结果表明,控制稳定的较低拉速、低过热度、较弱二冷比水量可有效地避免 37Mn5 钢 Φ210 mm 铸坯裂纹的形成,提高铸坯的冶金质量。

**关键词** Φ210 mm 圆坯连铸 37Mn5 钢 传热模型 拉速 钢水过热度 二冷比水量 裂纹 冶金质量

## Numerical Simulation and Analysis on Influence factors of Steel 37Mn5 Φ210 mm Round Bloom Continuous-Casting Solidification

Sun Xiangdong, Zhu Liguang and Zhu Xinhua

(Hebei Key Laboratory for Advanced Metallurgy Technology, College of Metallurgy and Energy, Hebei United University, Tangshan 063009)

**Abstract** A heat transfer model for steel 37Mn5 Φ210 mm round bloom casting is established by software ANSYS to study the effect of casting speed 1.3 ~ 1.5 m/min, liquid overheating extent 15° ~ 60° and secondary cooling water rate 0.58 ~ 0.78 L/kg during casting bloom heat transfer process on casting bloom surface temperature, bloom solidified shell thickness and solidification end position. Results show that controlling stable lower casting speed, low liquid overheating extent and weaker secondary cooling water rate are available to avoid the formation of crack of steel 37Mn5 Φ210 mm bloom and improve the metallurgy quality of bloom.

**Material Index** Φ210 mm Round Bloom Casting, Steel 37Mn5, Heat Transfer Model, Casting Speed, Liquid Overheating Extent, Secondary Cooling Water Rate, Crack, Metallurgy Quality

37Mn5 钢主要用于石油化工行业。由于 37Mn5 钢在生产中极易出现裂纹,从而影响终产品的质量。为了更全面地了解铸坯凝固过程,研究建立了 Φ210 mm 断面的铸坯凝固传热模型。以期通过应用该模型,在改变工艺参数的条件下,获得铸坯表面温度,坯壳厚度,凝固终点位置随工艺参数变化的情况。

### 1 圆坯凝固传热数学模型的建立

#### 1.1 模型建立的假设条件

通过 ANSYS 建立数学模型,采用切片移动法的原理来完成模拟过程。铸坯内部热量通过薄片上的节点传递到铸坯表面,再与冷却铜壁或者二冷水接触将其热量散失,从里到外形成一定的温度梯度,实现钢液的凝固。铸坯向外传递热量多少,关系到坯壳厚度的形成。其实质则与金属本身的热物理性质和浇注时所施加的物理边界条件有关。

研究中为了明确模拟圆坯传热模型,假设:

- (1) 由于钢液在沿着拉坯方向的传热变化不大,忽略其纵向传热,将三维模型转化为二维模型;
- (2) 钢液凝固潜热按热焓方法进行处理;
- (3) 钢的热物性参数仅与温度相关,和空间位置的变化没有关

- 系;
- (4) 铸坯的物理特性为各向同性;
- (5) 在喷淋区,铸坯表面的辐射传热,与二次冷却水的换热以及与支撑辊的导热采用综合换热系数一起考虑;
- (6) 圆坯是轴对称体,采用 1/4 面作为研究对象。

建立非稳态圆坯凝固传热数学方程为:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + q_v \quad (1)$$

式中:λ- 导热系数/[W · (m · °C)<sup>-1</sup>];C<sub>p</sub>- 比热容/[J · (kg · °C)<sup>-1</sup>];ρ- 密度/(kg · m<sup>-3</sup>);T- 温度/°C;r,θ- 圆柱坐标系两个方向的坐标/m;τ- 模拟时间/s;q<sub>v</sub>- 内热源/[J · (m<sup>3</sup> · s)<sup>-1</sup>]。

#### 1.2 初始条件与边界条件

(1) 初始条件。浇注时间 τ = 0 时,浇注温度 T = T<sub>0</sub>,其中 T<sub>0</sub> 为结晶器内钢水弯月面处微元体钢水温度。

(2) 边界条件。铸坯中心线两边为对称传热,可以视为绝热,不发生热量传递,表述为:τ ≥ 0,

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\theta=0,90} = 0; ; \text{铸坯表面发生热量传递表述}$$

为<sup>[1-3]</sup>:  $\tau \geq 0, -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r} = q_0$

其中:  $\tau$ - 浇注时间/s;  $T$ - 浇注温度/°C;  $r$ - 铸坯半径/m;  $\lambda$ - 导热系数/[W · (m · °C)<sup>-1</sup>];  $q_0$ - 表面热流/(W · m<sup>-2</sup>)。

$$\text{结晶器内: } q = a - b\sqrt{\tau} \quad (2)$$

式中:  $a, b$ - 实验常数。

$$\text{二冷区: } q = h(T_s - T_l) \quad (3)$$

式中:  $h$ - 冷却水与铸坯间换热系数/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>];  $T_s, T_l$ - 铸坯表面温度和冷却水温度/°C。

$$\text{空冷区: } q = \sigma \varepsilon [(T_s + 273)^4 - (T_k + 273)^4] \quad (4)$$

式中:  $\sigma$ - 波尔兹曼常数/[W · (m<sup>2</sup> · k<sup>4</sup>)<sup>-1</sup>];  $\varepsilon$ - 铸坯黑度;  $T_k$ - 环境温度/°C。

### 1.3 凝固潜热处理方法

凝固过程中金属的焓可定义为:

$$H = H_1 + \int_{T_1}^T C_p(T) dT + (1 - f_s) \cdot L \quad (5)$$

将上式对温度求导可以得到:

$$\frac{\partial H}{\partial T} = C_p - \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot L \quad (6)$$

将上式代入圆坯凝固传热微分方程中可以得到:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \lambda \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (7)$$

式中:  $H$ - 焓/(kJ · kg<sup>-1</sup>);  $f_s$ - 固相分率;  $T_1$ - 基准温度/°C;  $L$ - 结晶潜热/(kJ · kg<sup>-1</sup>)。

焓方法在实现两相区凝固传热计算过程中, 可以获得较合理的求解精度。

### 1.4 二冷区域喷水处理

铸机的基本工艺参数见表 1。依据喷嘴布置情

表 1 铸机基本工艺参数

Table 1 Basic technology parameters of casting machine

铸机半 径/m	断面尺 寸/m	拉坯速度/ (m · min <sup>-1</sup> )	结晶器出口 水温差/°C	二冷比水量/ (L · kg <sup>-1</sup> )	距矫直点 距离/m
10.39	0.21	1.3 ~ 1.5	6	0.68	14.1

况, 沿轴向将喷淋区内铸坯表面有无喷水考虑到传热模型中进行计算。忽略周向喷嘴布置对冷却的影响。喷嘴喷淋半径计算如式(8), 喷嘴喷淋截面图如图 1(a), 计算后轴向喷淋情况如示意图 1(b)。

$$AB = \left( h - \frac{r^2}{h} \right) \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

### 1.5 网格划分原则

本模型中网格划分后单元总数为 4500, 节点数为 4621。

## 2 模型结果及分析

### 2.1 拉速对模拟计算铸坯表面温度的影响

提高拉坯速度, 铸坯相对位置的停留时间缩短, 无论在结晶器内部还是在二冷区接受冷却的时间减少, 从而导致铸坯表面温度的升高。从图 2(a) 可以看出, 拉速每提高 0.1 m/min, 出结晶器下口的铸坯表面温度要升高 35 °C 左右, 出二冷区铸坯表面温度升高 20 ~ 30 °C, 铸坯凝固终点位置后移约 0.95 m。拉速的提高使得出结晶器下口坯壳厚度变薄, 拉速分别为 1.3, 1.4, 1.5 m/min 情况下, 对应的坯壳厚度为 14.4, 13.2, 12.3 mm。在现场生产实践中, 规定拉速范围内, 必须保证出结晶器下口坯壳具有一定厚度, 以防止坯壳过薄导致漏钢事故的发生。文献[4]指出直径为 200 mm, 支撑辊开槽夹角为 20° 的圆坯, 出结晶器下口坯壳安全厚度应为 16 mm。但实际生产中坯壳厚度往往控制在 8 ~ 15 mm<sup>[5]</sup>。

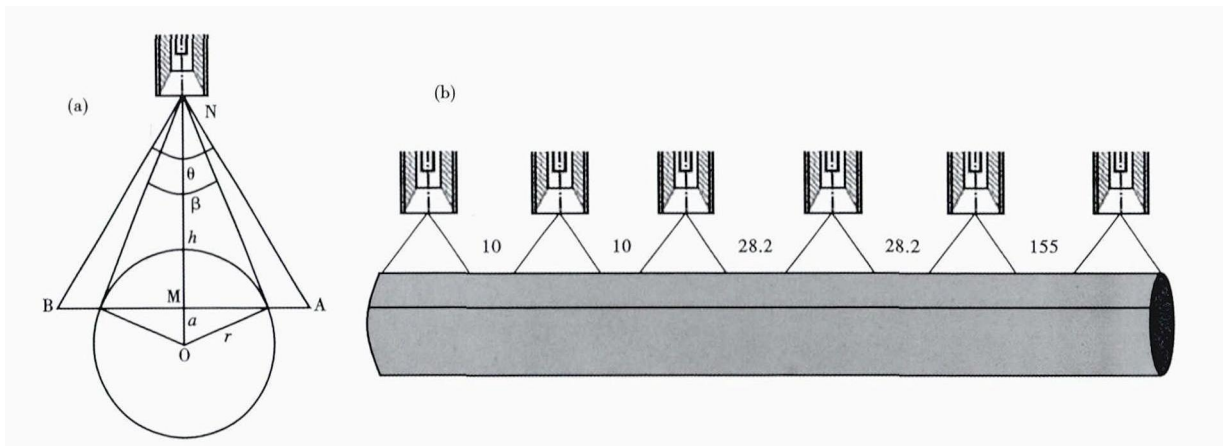


图 1 (a) 喷射直径计算简图; (b) 扇形段一段冷却喷淋情况简图

Fig. 1 (a) Schematics of calculation of nozzle jetting diameter; (b) cooling jetting condition at first section in fan-shaped section

为确保出结晶器坯壳厚度足够抵抗钢水静压力而不发生变形等,必须保证结晶器内冷却水与铸坯表面换热合适。因此,若要提高拉速,则相应的结晶器配水量也该相应增加。

拉速提高,钢液凝固过程中所受鼓肚应变  $\varepsilon_1$ <sup>[6]</sup>,辊子不对中造成的应变  $\varepsilon_2$ ,热应变  $\varepsilon_3$ ,以及矫直应变  $\varepsilon_4$  必定会发生波动,若当铸坯所能够承受的临界变形能力  $\varepsilon_l < (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$  时,铸坯内部则会产生裂纹。实际上,提高浇注速度,鼓肚应变和热应变的变化区间增大,为铸坯凝固承受的不均匀变形提供了潜在条件。

## 2.2 过热度对模拟计算铸坯表面温度的影响

在其它条件不变,过热度变化的情况下模拟得出过热度对铸坯表面温度的影响,如图 3(a),对凝固坯壳厚度的影响,如图 3(b)。

从模拟情况来看,过热度的增加,对铸坯表面温度的影响不显著,表面温度曲线偏移程度不大。过热度大,在凝固过程中要释放的热量也相应增加,从而使得钢液凝固时间延长,凝固终点位置后移,过热度每升高 15  $^{\circ}\text{C}$ ,凝固终点位置向后移约 0.22 m,出结晶器下口坯壳厚度减薄约 0.84 mm。从整体效果上来看,过热度的增加对铸坯表面温度,凝固坯壳厚度等影响不大。

过热度的提高,势必影响柱状晶与等轴晶的比例。据文献[7]分析认为,过热度高则二次枝晶臂间距大。在冷却条件一定的情况下,过热度大,由于二冷水带走的热量一定,钢液热量不能有效散失,会促进柱状晶的生成。钢液过热度越大,出结晶器下口坯壳厚度变薄,则会促使浇注中被迫降速,影响前后生产调度,并使拉速变低,铸坯在相应空间位置停留时间增长,给铸坯表面回温带来极大的便利条件,也因此可导致铸坯所承受的热变形应力增加,增加铸坯发生裂纹的可能性。因此,要结合生产实际,保证低过热度浇注可获得良好的铸坯组织。

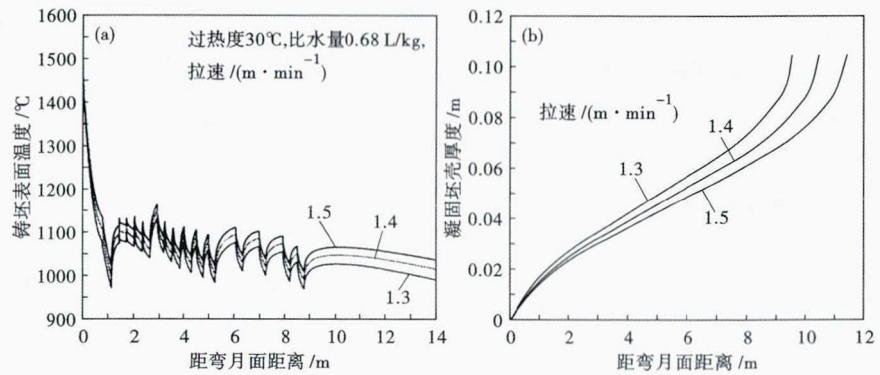


图 2 拉速对铸坯表面温度(a)和凝固坯壳厚度(b)的影响

Fig.2 Effect of casting speed on surface temperature of bloom (a) and solidified shell thickness (b)

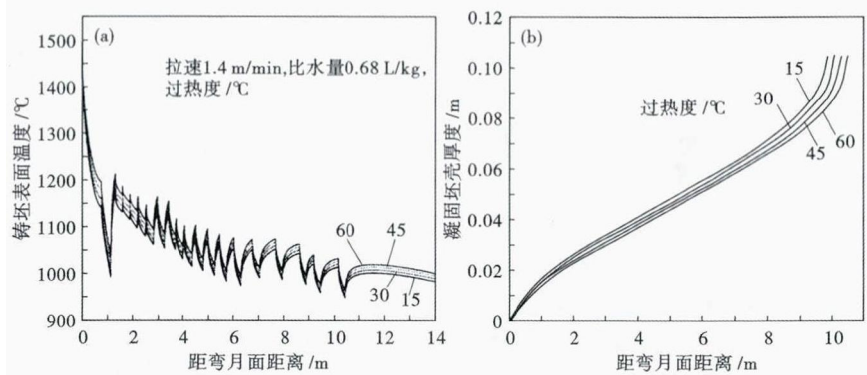


图 3 过热度对铸坯表面温度(a)和凝固坯壳厚度(b)的影响

Fig.3 Effect of liquid overheating extent on surface temperature of bloom (a) and solidified shell thickness (b)

## 2.3 冷却强度对模拟计算铸坯表面温度的影响

比水量变化,其它条件稳定的条件下得到冷却强度与铸坯表面温度的关系,如图 4(a),冷却强度与凝固坯壳厚度关系,如图 4(b)。

保证过热度 30  $^{\circ}\text{C}$ ,拉速 1.4 m/min 不变,采用变化比水量的方式来研究铸坯表面温度以及凝固坯壳厚度的变化。模拟结果发现,比水量每增加 0.1 L/kg,铸坯表面温度约下降 18  $^{\circ}\text{C}$ ,凝固终点位置前移约 0.17 m。铸坯在二冷段接受水冷到空冷的冷却过程,也经历着铸坯表面回温,降温的过程。铸坯内部的高热量与铸坯表面反复的温度波动,形成的温度梯度差也在发生变化。当比水量配给不当,将会在铸坯表面形成强烈的温度差,使得铸坯在凝固前沿承受塑性变形应力增加,而导致铸坯形成内部裂纹。

二次冷却比水量的配给根据钢种可以分为强冷性和弱冷性。经查阅文献[8]37Mn5 钢在 950 ~ 1200  $^{\circ}\text{C}$  时高温塑性最好,发生裂纹的几率最小,为

了保证铸坯表面温度在这一温度区域,要实现该钢种的弱式冷却。

### 3 控制裂纹发生措施

(1)控制稳定的拉速。铸机拉速突然上升会导致二冷水量的上升,使铸坯突然急冷产生收缩,在表面张应力和固液界面的压应力作用下,导致铸坯裂纹的生成。拉速突然下降必然会使二次冷却水量下降,铸坯表面温度回升,在热应力和机械应力作用下出现裂纹的几率会明显提高。同时,拉速变化频率增加,使凝固末端位置频繁变化,凝固末端附近“搭桥”的概率相应增加,最终诱发中心裂纹。因此,恒定的浇注速度,既可以保证生产节奏正常化,也可以减少铸坯表面裂纹扩展和内部裂纹形成。

(2)控制合适的钢水过热度。在相同拉速下,提高钢水的过热度,铸坯表面温度略微增加,其影响是使得出结晶器下口坯壳厚度变薄,使得铸坯的凝固末端位置增大。过热度的提高会使柱状晶发达,柱状晶间富集有害元素(S、P)和夹杂,当不同方位的柱状晶相遇而构成晶界时,容易形成裂纹。低过热度浇注是连铸生产扩大等轴晶区的有效手段。理想过热度应该控制在 20~30℃。

(3)控制合适的二次冷却强度。二次冷却水对铸坯质量的影响较严重,冷却强度弱可导致柱状晶过分发展,使钢的高温强度降低;铸坯冷却强度不够,凝固坯壳厚度薄不足以抵抗钢水静压力和外界机械应力而导致鼓肚的发生。铸坯在冷却凝固过程中,由于铸坯在圆周方向上冷却强度及散热量不同,引起铸坯在圆周方向上温度不一致,则会产生局部热应力,从而造成铸坯的质量缺陷。沿拉坯方向冷却水量分布不当会导致铸坯温度降低或回升过于频繁,造成铸坯冷却不同而出现钢的收缩量各异,产生热应力和相变应力,在凝固坯壳强度不足以抵抗外界合力时,形成裂纹。因此,对于不同钢种,不同直径的圆坯应采取合适的冷却制度,保证铸坯均匀冷却,稳定生长。

### 4 结论

(1)建立圆坯凝固传热模型,模型结果与铸坯实际生产相符,能够反映铸坯生产现状。

(2)拉速提高,铸坯的表面温度增加,液芯长度

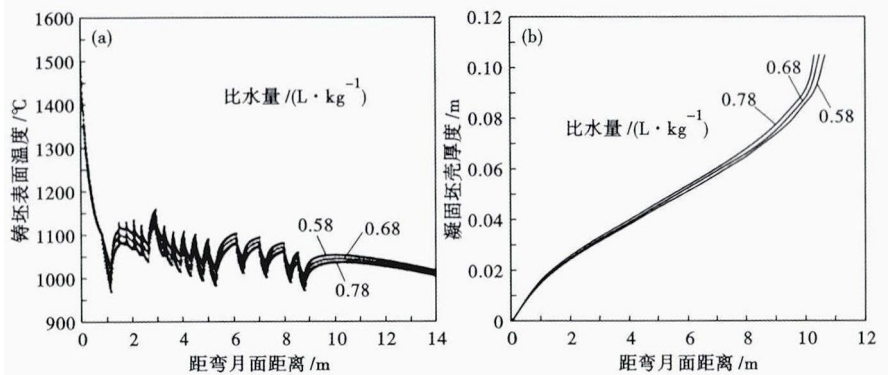


图 4 比水量对铸坯表面温度(a)和凝固坯壳厚度(b)的影响

Fig. 4 Effect of secondary cooling water rate on surface temperature of bloom (a) and solidified shell thickness (b)

增加,出结晶器下口坯壳厚度变薄,因此,要在铸机规定的拉速范围内,稳定拉速,保证铸坯质量稳定性。

(3)过热度对铸坯表面温度的影响不大,但是过热度是铸坯凝固组织形成的一个重要因素,要获得等轴晶则应采用低过热度浇注,理想过热度控制在 20~30℃。

(4)比水量以及各区域水量分配的合理性,可以有效避免因冷却不均,温度梯度造成的热应力集中导致裂纹的形成,对于不同钢种,不同直径的圆坯采取合适的冷却制度,保证铸坯均匀冷却,稳定生长。

### 参考文献

- [1] 丁勇,仇圣桃,萧泽强.连续铸钢过程数学物理模拟[M].北京:冶金工业出版社,2001:106-111.
- [2] Choudhary S K, Mazumdar D, Ghost A. Mathematical Modelling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel[J]. ISIJ International, 1993, 33(7): 764-767.
- [3] 朱立光,周建宏,王硕明,等.基于目标温度的方坯连铸二冷配水方案优化[J].炼钢,2006,22(2):34-38.
- [4] 孙立根,张家泉.圆坯大方坯连铸技术论文集[C].辽宁:[出版者不详],2009:73-79.
- [5] 张志祥,闵义,姜茂发.37Mn5连铸圆坯凝固过程数学模拟[J].东北大学学报,2010,31(7):966-969.
- [6] 蔡开科,秦哲,孙彦辉.2008年连铸设备技术交流会论文集[C].湖南:[出版者不详],2008:1-25.
- [7] 隋晓红,孙群,于守巍,等.连铸参数对低碳钢圆坯凝固组织形态的影响[J].炼钢,2009,25(5):16-18.
- [8] 刘宇雁,包喜荣,陈林,等.37Mn5连铸坯高温热塑性的研究[J].热加工工艺,2008,37(1):22-24.

孙向东(1982-),男,硕士生,连铸与凝固理论研究。

E-mail: sxdxgy@163.com

收稿日期:2013-07-29