

# 高速方坯连铸结晶器的传热行为研究与冷却工艺优化

肖鹏程<sup>1</sup>，杨焱森<sup>1</sup>，刘增勋<sup>1</sup>，朱立光<sup>2</sup>

(1.华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210;  
2.河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

## Study on Heat Transfer Behavior and Cooling Process

## Optimization of High Speed Billet Continuous Casting Mold

### 1. 前言

有效强制水冷保证了铜壁安全工作和初生坯壳的快速和均匀生长，而合理的冷却水道设计方式为铜壁提供了基本的散热条件。优化冷却水通道设计可以促使铜壁温度合理分布，达到提高生产效率和强化铸坯质量的目的。结晶器的最佳冷却强度，是指从提高生产效率的观点出发，需要尽可能快地吸热并使钢水凝固以形成足够的坯壳。为了保证有效合理的冷却效率，在设计连铸结晶器冷却通道时，除了选择具有良好导热性的材料外，还要选择其形状，冷却水流量，水压等。这些因素的影响还应考虑传热，以便钢水可以尽快凝固成足够厚的坯壳，以提高拉速。

### 2. 模型建立

以方坯结晶器为研究对象，使用 ANSYS 模拟软件建立铸坯与铜壁的二维传热耦合模型，并使用其中的 FLOTTRAN 模块的对水缝的传热与流动状态进行分析。将两个模型进行耦合分析，对结晶器铜壁与的温度与冷却水的温度状态进行揭示。

#### 2.1. 模型的简化与假设

对铜壁冷却水的传热特性进行分析，结合前人研究经验，提出以下假设，以简化模型：

- 1) 将铸坯铜壁有限元模型中计算的热流结果提取出来。
- 2) 忽略结晶器振动与铜板的变形。
- 3) 考虑冷却水的重力作用。
- 4) 固体壁面边界条件为无滑移壁面
- 5) 冷却水应该采用下进水方式。

根据以上的假设，采用傅里叶传热定律来描述铸坯与铜壁的传热行为，以此建立结晶器二维导热微分方程，具体表达式如下：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + q_v \quad (1)$$

式中： $T$ —温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\rho$ —密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $\tau$ —时间， $\text{s}$ ； $c$ —比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； $\lambda$ —导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； $q_v$ —热流密度， $\text{W}/\text{m}^2$ 。

#### 2.2. 铸坯铜壁冷却水传热模型

方坯结晶器内的传热情况十分复杂，因为涉及到多个传热过程，并且同时存在于三个维度中<sup>[1]</sup>。为了更好地描述和理解这个过程，采用了一系列优化措施，通过简化模型建立以下两个二维纵向模型<sup>[2-4]</sup>进行计算。

本研究采用了生产中典型的管式结晶器结构参数作为实体模型的相关数据，具体包括结晶器铜壁长度 900 mm、铜壁厚度 13 mm 以及液面高度 800 mm。在网格划分方面，采用了 PLANE55 单元，并使用了 ANSYS 提供的 MAPPED 方式进行划分。

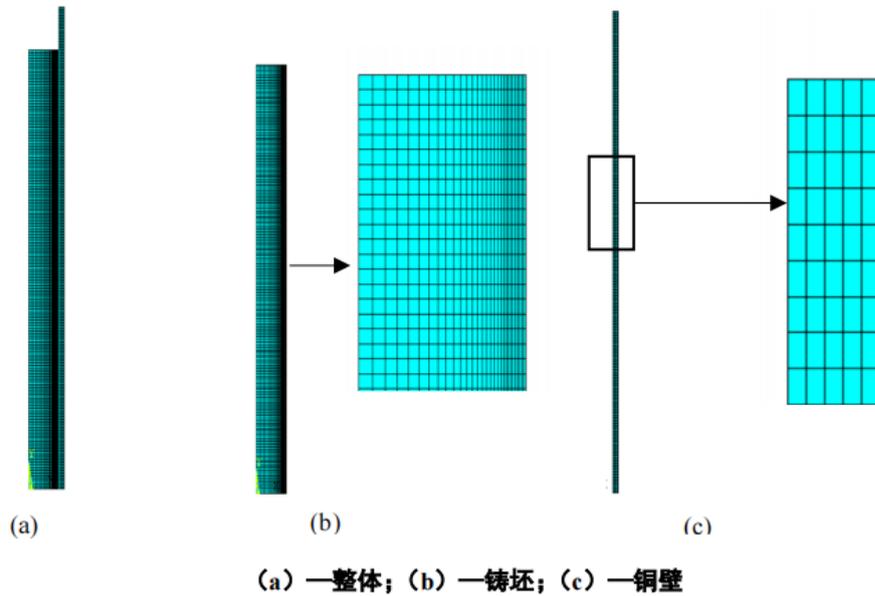


图 1 铸坯铜壁二维传热模型

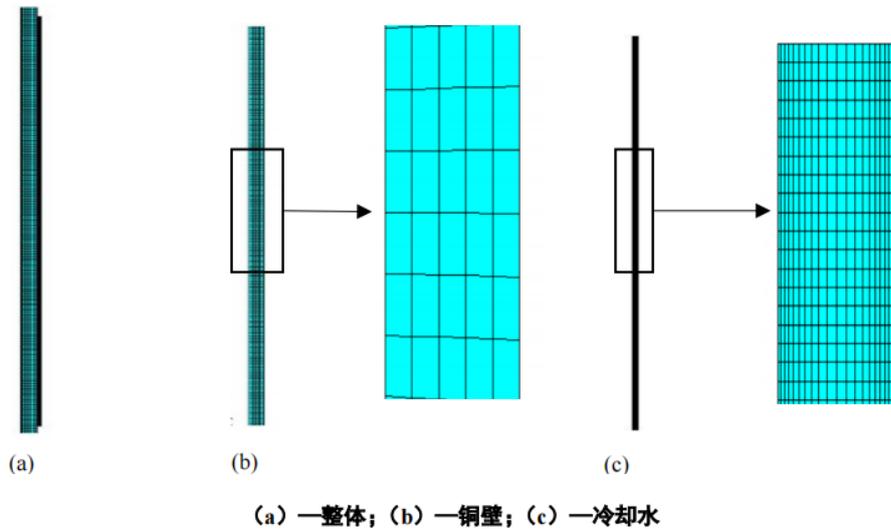


图 2 铜壁冷却水二维有限元模型

### 2.3. 初始条件和边界条件

- 1) 设置冷却水进入水缝的初始水温为 35 °C。
- 2) 冷却水缝出口处设置压力边界条件为 0.3 MPa。
- 3) 冷却水缝两侧界面的模型设置为固体壁面，流动边界条件为无滑移界面。
- 4) 结晶器的顶端与底端设置为绝热边界条件。

## 3. 相同水量条件下水缝宽度对结晶器传热的影响

基于铸坯-铜壁-冷却水模型，分析了缝宽度对结晶器铜壁和冷却水温度状态的影响。拉坯速度为 4.0 m/min，浇注温度为 1540 °C。冷却水从水缝的下口进入，水缝宽度为 3~5 mm，入口处的冷却水温度为 35 °C。

### 3.1. 水速分布

图 3 显示了不同宽度的冷却水中冷却水流速的分布。由图可以看出，在水量相同时，不同宽度的水缝中，冷却水的变化趋势相似。在进入水缝之后冷却水水速出现突然的升高，随着冷却水上升，水速开始下降，逐渐变得稳定。水缝宽度为 3 mm 时，冷却水初始水速 17.3 m/s，最高水速达到 19.5 m/s，随后的稳定水速为 18.8 m/s；水缝宽度为 4 mm 时，初始水速 13.0 m/s，冷却水最高水速达到 14.8 m/s，随后的稳定水速为 14.2 m/s；水缝宽度为 5 mm 时，初始水速 10.4 m/s，冷却水最高水速达到 11.7 m/s，随后的稳定水速为 11.4 m/s。

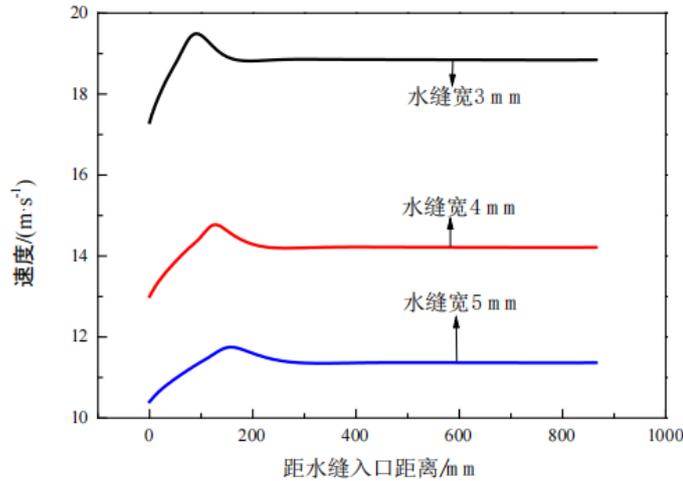


图 3 不同宽度水缝冷却水流速变化

### 3.2. 铜壁温度分布

不同宽度水缝对结晶器铜壁温度变化的影响如图 4 所示。由图可知，不同水缝宽度下，铜壁的温度变化趋势一致。但是水缝宽度由 3 mm 加宽到 5 mm 之后，铜壁两侧的温度都有升高。在水缝宽度分别为 3 mm、4 mm 时、5 mm 时，弯月面下 50 mm 处铜壁热面的温度最高，分别为 147.3 °C、155.2 °C、162.9 °C；冷面最高温度分别为 71.8 °C、80.4 °C、88.7 °C。沿铜壁往下，铜壁热面温度分别下降到 120.1 °C、126.3 °C、130.6 °C；铜壁冷面温度分别下降到 54.0 °C、63.1 °C、65.5 °C。

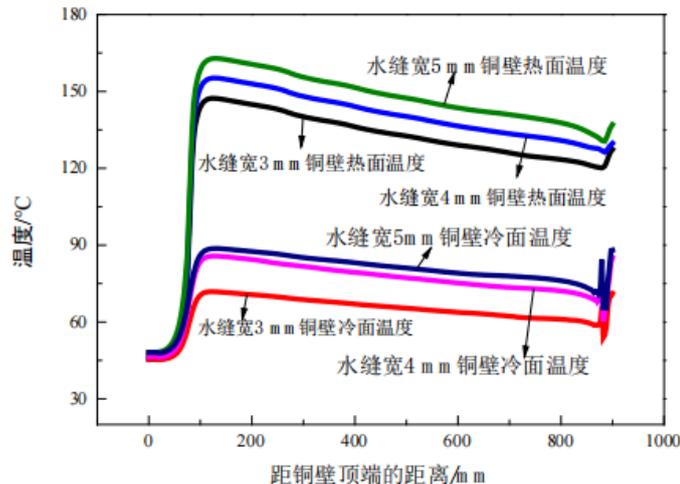


图 4 不同宽度水缝结晶器铜壁温度变化

### 3.3. 冷却水温度分布

图 5 为不同水缝宽度下，水缝中在纵向上温度的变化情况。由图可知，三种水缝宽度下，水温的变化趋势一致。随着水缝宽度的增加，在水缝热面温度升高明显，水缝冷面温度略微降低。在水缝宽度分别为 3 mm、4 mm、5 mm 时，冷却水进入水缝后，温度急速分别升高至 62.5 °C、67.2 °C、70.8 °C，随后沿着水缝向上，水温又缓慢升高，在弯月面下 50 mm 处达到最高，分别为 71.8 °C、80.4 °C、88.7 °C；随后迅速降低。在水缝宽度为 3 mm、4 mm、5 mm 时，水缝冷面最高温度分别为 41.5 °C、40.9 °C、40.1 °C。

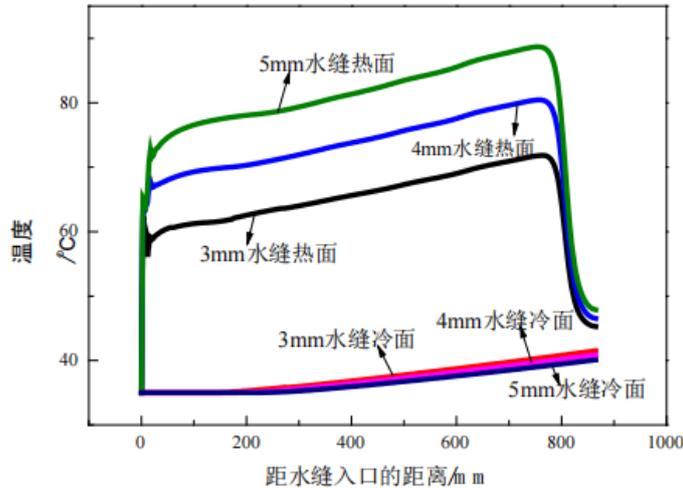


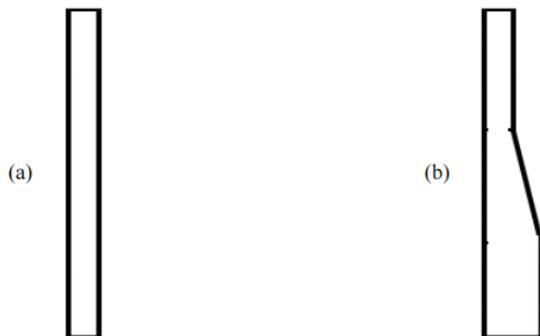
图 5 不同宽度水缝水温变化

同一水量下，水缝宽度的改变，不仅改变了水的流速，而且铜壁与冷却水的温度也会改变。增大宽度，流速下降，铜壁与冷却水的温度上升。

## 4. 基于变速供水的结晶器冷却工艺优化

由前面结果可知，在原有的水量下，水缝宽度由 4 mm 加宽至 5 mm，铜壁温度上升 4.3 °C，对铜壁危害很小。水缝宽度为 5 mm 时，尽管流速下降，但是仍然满足铜壁冷却要求。在同一流速下，加大水缝宽度对铜壁温度影响微弱，采用 3 mm 即可满足铜壁冷却要求。

据此，创新设计新的变速冷却结晶器，水缝上部 300 mm 区域宽度变窄，设置为 3 mm，下部 300 mm 区域水缝变宽，设置为 5 mm，中间部分为梯形过度部分，如图 6 (b) 所示。在与常规水缝相同水量下，下部冷却变缓，冷却水阻力减小；上部流速加大，可以对铜壁实现强冷，使得铜壁上部温度下降，铜壁整体温度更加均匀。



(a) 一常规结晶器冷却水缝；(b) 一变速冷却结晶器水缝

图 6 变速冷却结晶器水缝

#### 4.1. 变速冷却结晶器水速分析

图 7 为常规水缝与变速冷却水缝中水速的变化规律。由图可知，在相同的水量之下，变速冷却水缝在下部 300 mm 处与常规水缝水速变化趋势一致，由入口的 10.3 m/s 增长至 11.6 m/s。在距离水缝入口 300 mm 的位置，水缝开始变窄，水速也从此处开始急剧上升，冷却水上升至距入水口 600 mm 位置处，冷却水水速达到 18.6 m/s；继续向上流动，水速继续升高，但是趋势变得平缓，直到水缝出口水速达到最大，为 18.8 m/s。

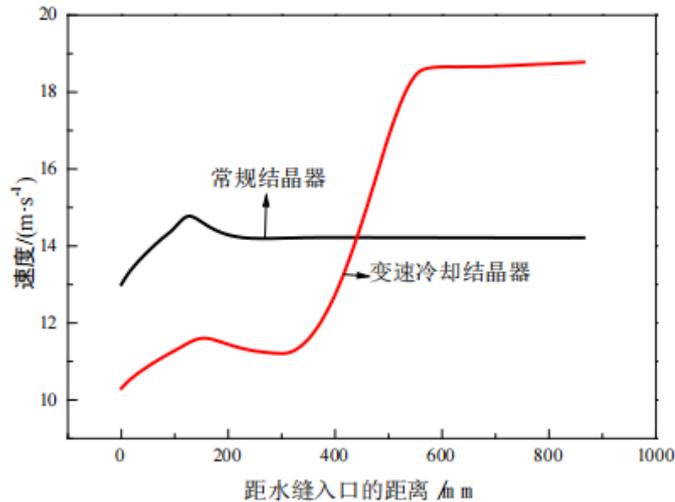


图 7 两种水缝中间的水速对比

#### 4.2. 变速冷却结晶器铜壁温度分析

变速冷却结晶器的结晶器铜壁不同纵向位置温度变化结果如图 8 所示。由图可知在弯月面下 50 mm 处，常规水缝铜壁热面最高温度为 155.1 °C，同位置铜壁冷面最高为 85.7 °C；变速冷却水缝最高温度为 146.7 °C，铜壁冷面温度为 71.7 °C。变速冷却水缝使得弯月面处铜壁热面温度降低了 8.4 °C，冷面降低了 14.0 °C。

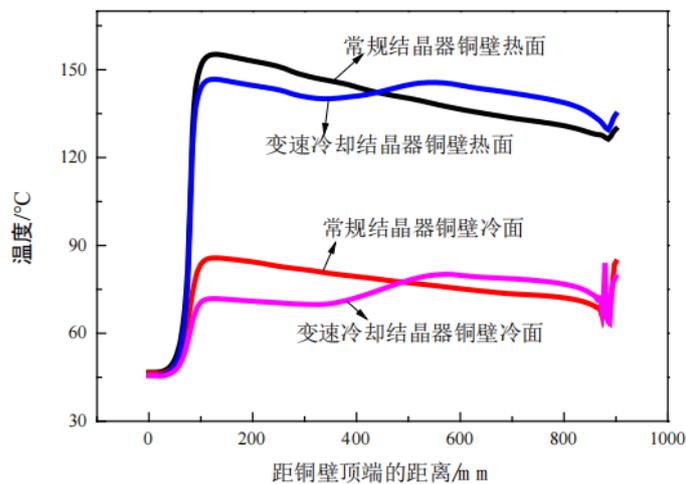


图 8 两种结晶器铜壁温度对比

在改变水缝宽度之后铜壁上部分热面与冷面温度明显降低，下部温度仍在安全范围之内。相较于常规结晶器，变速冷却结晶器从结晶器上部到下部整体上温度变化更加平稳。

## 5. 结论

使用 ANSYS-FLOTTRAN 模块进行模拟分析，研究了水缝的宽度对结晶器与冷却水传热及水速的影响。设计了新的水缝形状，对比分析了新的水缝形状对结晶器传热的影响。

1) 在距离弯月面下 50 mm 处，铜壁两侧的温度均在此位置最高同水量下水缝宽度由 3 mm 加宽至 5 mm 后，水速降低。铜壁热面在弯月面下 50 mm 处的温度由 147.3 °C 升高至 162.9 °C，升高了 15.6 °C，冷面的温度由 71.8 °C 升高至 88.7 °C，升高了 16.9 °C。

2) 通过改变水缝上下宽度，上部分水缝宽度 3 mm，下部分宽度 5 mm，设计了新的变速冷却水缝。在水缝中上部，水缝变窄，水速急剧升高，最终在出口升高至 18.8 m/s。

3) 变速冷却水缝对铜壁的冷却效果明显。由于水速的上升，相较于常规水缝，变速冷却水缝使得弯月面处铜壁热面温度降低了 8.4 °C，铜壁冷面降低了 14.0 °C。变速水缝铜壁的温度明显降低，使得铜壁的温度分布更加均匀。

## 参考文献

- [1] 孙开明, 付继成, 李京社, 等. 圆坯连铸凝固传热数学模型及应用[J]. 钢管, 2009, (3): 5.
- [2] JING-XIN, SONG, ZHAO-ZHEN, et al. Heat Transfer and Deformation Behavior of Shell Solidification in Wide and Thick Billet Continuous Casting Mold [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(S1).
- [3] WANG, W L, ZHANG H H, et al. Mold Simulator Study on the Initial Solidification of Molten Steel Near the Corner of Continuous Casting Mold [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2017, 48(1).
- [4] ZHANG C J, BAO Y P, WANG M, et al. Study of Effective Transient Thermal Resistances of Different Heat Transfer Sections during Solidification of Steel Ingot [J]. steel research international, 2017, 48(1).