

拉速对紫铜水平连铸坯凝固行为及组织场影响规律研究

刘劲松^{1,2}, 张良利¹, 王松伟², 宋鸿武², 张士宏²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

(2. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 水平连铸是生产铜板带坯的常用方法, 探索工艺参数变化对铸坯质量的影响规律十分重要。采用数值模拟的方法分析了水平连铸拉速变化对结晶器内温度场、液穴深度、冷却速率等的影响规律, 并结合工艺试验揭示了拉速变化对铸坯组织的影响机理。结果表明, 随着铸坯拉速的不断提高, 结晶器内的液穴深度持续增加, 铸坯表面和芯部沿牵引方向的冷却速率均逐渐降低, 且二者的冷却速率差值逐渐减小, 当拉速为 149 mm/min 时, 二者冷却速率达到相同; 随着铸坯拉速的不断提高, 铸坯截面上晶粒生长方向与牵引方向的夹角 θ 逐渐增大, 晶粒生长距离缩短, 铸坯表面上晶粒数目增加, 平均晶粒直径从 1.96 mm 逐渐减小到 1.05 mm, 整体组织均匀性明显提高。

关键词: 水平连铸; 拉速; 液穴深度; 冷却速率; 晶粒

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3785-09

结晶器作为水平连铸生产铜铸坯的关键部件, 其主要功能是把铜液凝固释放的热量传递给冷却水, 并通过冷却水的循环流动将热量持续带走, 实现铜铸坯的连续铸造成型^[1-7]。铜连铸坯裂纹^[8-9]、缩孔^[10-11]、偏析^[12-13]等质量缺陷的发生与结晶器内传热条件及温度场分布息息相关。而实际生产过程中水平连铸工艺参数的改变往往会引起结晶器内温度场的波动, 从而导致铸坯组织的改变及铸造缺陷的产生。其中, 铸坯引拉速度(拉速)是非常重要的参数变量, 研究并掌握铜铸坯水平连铸在不同拉速条件下结晶器内凝固行为变化及铸态组织演变规律, 有助于更好的控制铸坯缺陷, 改善铸坯质量。

目前国内外许多学者通过有限元模拟的方法研究了拉速对连铸过程的影响。谢集祥等^[14]通过模拟研究了不同拉速(0.9~1.2 m/min)对结晶器内钢液流速行为的综合影响, 发现当拉速为 0.9 m/min 时, 结晶器自由液面具有较小的钢液流速和湍动能, 同时液面具有较好的温度均匀性; 王晓连等^[15]通过模拟发现随着拉速的提高, 结晶器底部的回温幅度逐渐增大, 铜板热面温度也随之升高; 曹娜等^[16]采用模拟与实验相结合的手段研究了拉速对钢/渣界面行为的影响规律, 发现提高拉速能明显加剧钢/渣界面的波动幅度, 使水口

附近的熔渣层增厚; 孟祥宁等^[17-18]建立三维有限元模型, 分析了拉速变化对铜板坯温度的影响, 研究表明, 拉速每提高 0.2 m/min, 弯月面区铜板最大温度梯度变化在 4.0~6.0 °C; 陈伟等^[19]通过模拟发现拉速每增加 0.2 m/min, 结晶器末端的坯壳厚度减薄约 0.2 mm, 凝固末端液相穴的长度增加 0.3 m; Thomas 等^[20]模拟分析了拉速对最佳锥度轮廓的影响, 研究发现, 随着拉速的增加, 结晶器锥度会相应减少。

综上所述, 目前的研究结果主要针对不同拉速对结晶器内铸坯温度及金属液-固界面波动等方面的影响, 且均是通过模拟来探索其变化规律, 而且在结晶器模型建立过程中简化了冷却水的传热行为, 未考虑到工艺参数变化对冷却水流场、温度场的影响以及铸坯凝固行为变化对冷却条件的反馈作用。在实际水平连铸过程中, 铸造温度、冷却强度、拉速三者的关系一直处于一种实时的动态平衡, 一般的模拟手段会对模型和参数进行简化和假设, 采用恒定换热系数来代替冷却水的作用效果, 而本作者首次建立了冷却水-金属液双温度场有限元模型^[21], 可准确获知工艺参数变化对冷却水流场和铜铸坯凝固行为的影响规律及二者之间的内在联系。基于此模型, 本研究用 FLUENT 软件进一步探索了水平连铸拉速变化对铸坯液穴深

收到日期: 2023-02-20

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (ZDRW-CN-2021-3); 2022 年度辽宁省教育厅基本科研项目 (LJKMZ20220591)

作者简介: 刘劲松, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159, E-mail: jslu@imr.ac.cn

度、冷却速率两方面的影响规律,并结合工艺试验分析拉速变化对铸坯组织的影响,为理解铜板带水平连铸组织演变及拉速参数调节提供借鉴。

1 模型建立

1.1 结晶器三维结构

铜板带水平连铸坯结晶器的三维结构如图 1 所示,最上方第 1 部分为钢套,第 2 部分为铜套,两者通过螺栓紧密相连组成冷却水套,水套内部嵌有 4 个独立水室,工作时内部充满冷却水,中间部分为石墨模具,整个结晶器以铸坯为对称轴,上下两部分结构完全一致。由于结晶器的上下、左右均是对称分布,故仅取整体模型的 1/2 进行模拟计算。

1.2 基本假设及传热模型

为简化结晶器的计算过程,对模型做出以下假设:

- (1) 结晶器整体传热对称;
- (2) 结晶器各部分的模具材料各向同性,热物性参数均不随温度变化;
- (3) 介质间为稳态传热;
- (4) 结晶器内铜液为黏性不可压缩流体。

基于结晶器的传热特点,忽略沿拉坯方向的传热,将凝固传热转化为二维非稳态问题,根据傅里叶定律,建立在二维瞬态条件下结晶器传热数学模型:

(1) 传热过程的主要控制方程

$$\rho C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$C_2 = C_1 - L \left(\frac{df_s}{dT} \right) \quad (2)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为密度, kg/m^3 ; C_1 为比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; C_2 为等效比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; L 为凝固潜热, J/kg ; f_s 为固相率。

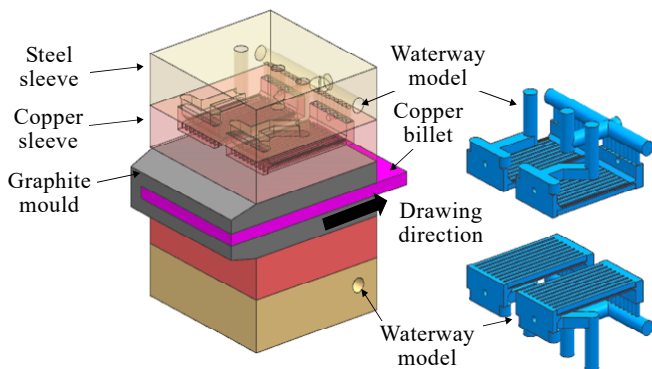


图 1 结晶器三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of the mold

(2) 铜液的热流密度

$$q = \alpha \beta \sqrt{t} \quad (3)$$

式中: q 为热流密度, kW/m^2 ; α 为常数, 其值为 2680; β 为结晶器系数; t 为经过结晶器的时间, s 。

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

式中: C_w 为冷却水比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; Q_w 为冷却水流量, m^3/s ; ΔT_w 为冷却水进出口温差, $^{\circ}\text{C}$; ρ_w 为冷却水密度, kg/m^3 ; F 为有效冷却面积, m^2 。

1.3 网格划分

网格的划分是建立有限元模型的关键环节,模拟的成败与否很大程度上取决于模型的网格划分是否合理,精密度是否足够。网格的数量、密度、质量、布局、位移协调等诸多因素直接影响计算的收敛性、计算规模和精度^[22]。由于结晶器的结构整体具有对称性,为了提高计算效率以及减少网格数量,计算区域选取了结晶器整体 1/2 体积。考虑到模型的质量、计算速度和精度,经过多次网格划分的尝试以及模拟结果的计算,最终确定了石墨板和铸坯采用六面体网格划分计算区域,其余位置均采用四面体网格划分,总共约 63 万个节点, 303 万个网格,如图 2 所示。速度和能量选择 FLUENT 软件默认的 SIMPLE 算法耦合,变量残差低于 10^{-3} 、能量残差低于 10^{-6} 视为方程收敛。

1.4 模拟参数设置

表 1 为现场水平连铸生产铸坯的基本工艺参数,根据表 1 的参数将模拟对象中计算不同拉速所用的参数进行了微量调整及补充,具体工艺参数及热物性参数均来源于文献中提供的有效数据以及企业生产经验值,具体数值如表 2、表 3 所示。

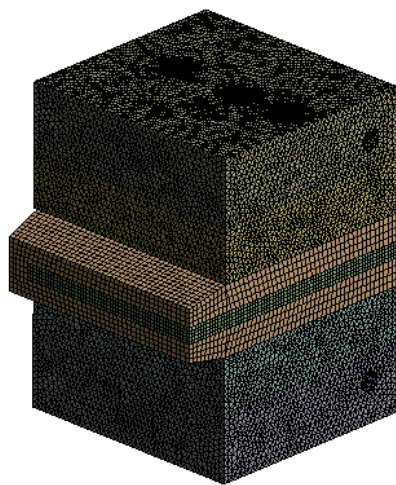


图 2 计算区域网格划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid meshing in calculation area

表 1 不同拉速的现场工艺参数

Table 1 Actual process parameters of different drawing speeds				
Programme	Inlet water pressure/MPa	Average drawing speed/mm·min ⁻¹	Casting temperature/℃	Inlet water temperature/℃
1#	0.5-0.65	110	1165-1175	28
2#	0.5-0.65	119	1170-1180	28
3#	0.55-0.65	134	1175-1185	28
4#	0.55-0.65	149	1180-1190	28

表 2 不同拉速的模拟工艺参数

Table 2 Simulated process parameters at different drawing speeds					
Programme	Inlet water pressure/MPa	Drawing speed /mm·min ⁻¹	Cooling water flow rate/m·s ⁻¹	Casting temperature/℃	Inlet water temperature/℃
1#	0.6	110	8	1175	28
2#	0.6	119	8	1175	28
3#	0.6	134	8	1175	28
4#	0.6	149	8	1175	28

表 3 热物性参数

Table 3 Thermal physical parameters		
Parameter	Value	Significance
$C_p/\text{J}(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	410 ^[23]	Specific heat capacity of copper plate
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	8940 ^[23]	Copper liquid density
$\Delta H_f/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	212500 ^[24]	Latent heat of oxygen-free copper crystallization
$T_{\text{lia}}/^\circ\text{C}$	1084 ^[25]	Liquidus temperature of oxygen-free copper
$T_{\text{sol}}/^\circ\text{C}$	1082 ^[25]	Solidus temperature of oxygen-free copper
$C_{\text{ps}}/\text{J}(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	710	Specific heat capacity of graphite plate
$\rho_s/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2250 ^[24]	Graphite plate density

1.5 边界条件

(1) $t=0$ 时，结晶器中铜水温度等于浇铸温度，即： $T(x,y,0)=T_c=1175\text{ }^\circ\text{C}$ ，入口冷却水温度统一设为 $28\text{ }^\circ\text{C}$ ；

(2) 模拟采用速度入口压力出口边界条件，进口水压设为 0.6 MPa ；

(3) 铜液进口流速随铸坯拉速的变化而变化，表压设为零，参考压力设为 1 个标准大气压；

(4) 冷却水流速采用公式 $Q=AV$ (Q 为冷却水流量， A 为进口管道截面积， V 为水流速度) 计算得出，取整为 8 m/s ；

(5) 铸坯的传热是以中心轴对称，其中心对称轴的传热边界可视为绝热边界，即

$$K\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=D1/2,\ t\geq 0}=0$$

式中， $D1$ 为铸坯边长， m 。

2 结果与分析

2.1 拉速变化对结晶器内液穴深度的影响

图 3 所示为依据上述边界条件，输入相关参数利用有限元模拟方法得到的在不同拉速下对应铸坯液穴深度（即红色区域的长度）的变化。图 3 所示的质量分数主要分为三大部分，红色区域指铜液部分，蓝色

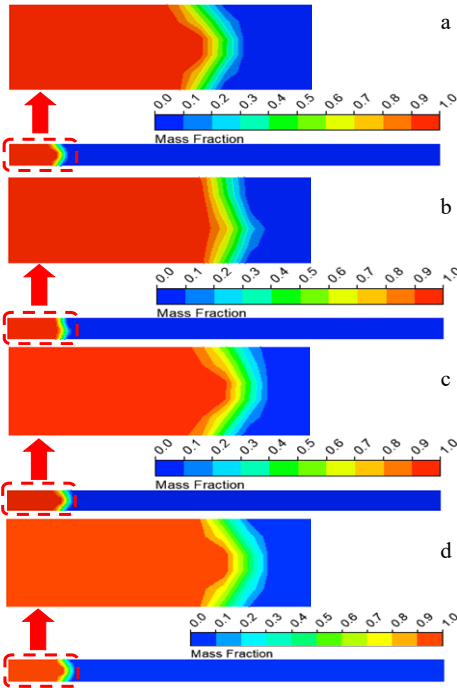


图 3 不同拉速的铸坯芯部液穴深度

Fig.3 Depth of liquid hole in the core of casting billet at different drawing speeds: (a) 110 mm/min, (b) 119 mm/min, (c) 134 mm/min, and (d) 149 mm/min

区域指铸坯凝固部分,其余区域则为液固两相区。将液穴深度随铸坯拉速的变化绘制成曲线,如图 4 所示,发现随着铸坯拉速的提高,液穴深度也在不断增加,结晶区域逐渐外移。这是因为随着铸坯拉速的提高,铸坯在结晶器内停留时间缩短,铸坯的等效冷却强度降低,铸坯凝固减慢,液-固相线位置向出口方向移动,从而导致结晶器内液态部分的面积增大,铸坯的液穴深度不断增加。而拉速为 119 mm/min 时铸坯芯部液穴为尖底形状,其他拉速时为平底形状主要是因为连铸初期(110 mm/min)结晶器内外温差较大,结晶器内铜液来不及完全冷却凝固形成坯壳,铜液不断向前流动,液穴深度增加,呈平底状;而随着拉速的缓慢提高(119 mm/min),结晶器内壁温度会逐渐降低并趋于稳定,铸坯表面已凝固形成坯壳部分会与芯部铜液发生持续稳定的热交换,加快芯部的凝固速率,液穴深度缓慢增长,呈尖底状;当铸坯拉速增长过快时(134 mm/min),液穴深度又会迅速增加,呈平底状;再次提速后(149 mm/min),此时结晶器和环境之间的传热达到稳定,冷却强度也不再发生变化,因此液穴深度也不会有太大的增长,依然呈平底状。

2.2 拉速变化对铸坯冷却速率的影响

图 5 所示为拉速 110 mm/min 时结晶器内 1/2 铸坯温度场、冷却水流场等分布情况,图 5 中铸坯中心位置处切面为对称面。在距铜液进口相同距离处,铸坯中部的温度高于边部位置,铸坯表面的等温线呈弧形排列。随着等温线的不断前移,铸坯出口温度逐渐下降,冷却水出口温度逐渐升高,经计算铸坯平均出口温度为 444.7 °C,冷却水平均出口温度为 43.9 °C。在

现场实测时铸坯出口温度用 SWK-2 型袖珍数字式温度计测量,该温度计的测量范围是 0~1000 °C,测温精度为 $\pm 1\%F.S$ (即满量程的精度误差范围是 $\pm 1\%$);冷却水出口温度用 WSS-401 双金属温度计,通过水温表的温度变化直接监测记录,该温度计的测量范围是 0~100 °C,精度等级为 1.5 级。经大量实际生产数据统计发现铸坯平均出口温度为 443.9 °C,冷却水平均出口温度为 44.1 °C,二者的模拟结果与实测结果皆吻合较好,误差相对较小,从而验证了模型建立的有效性以及模拟的准确性。

取结晶器内耦合的铜套壁面与石墨板壁面温度场,如图 6、图 7 所示,两个壁面的温度场形貌整体均呈“双涡”形,即中部区域温度最低,向外传导温度不断升高。这是因为冷却水作用位置主要集中在铜套内壁的中间区域,其余位置通过与中部发生热交换来冷却降温。

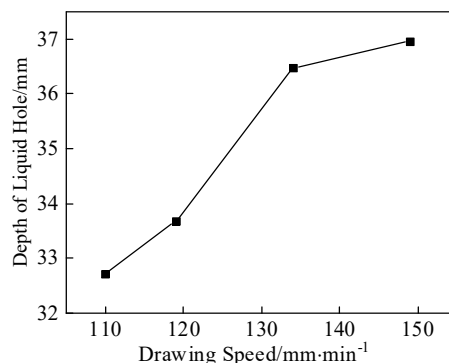


图 4 液穴深度和铸坯拉速的关系

Fig.4 Relationship between depth of liquid hole and drawing speed of casting billet

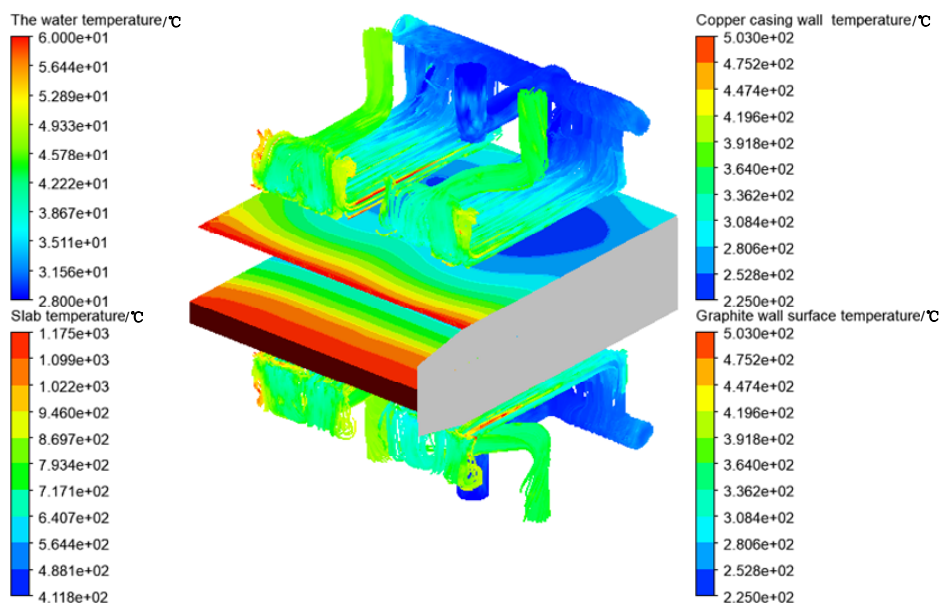


图 5 温度场及流场耦合模拟结果

Fig.5 Coupling simulation results of temperature field and flow field

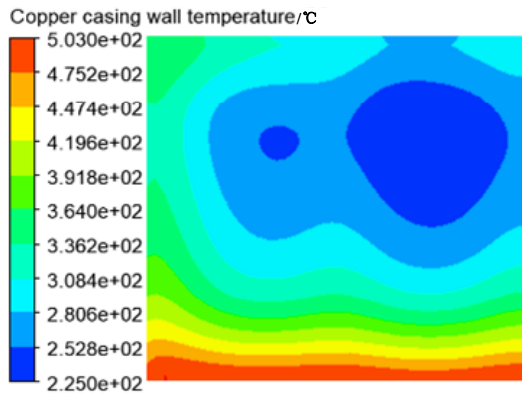


图 6 铜套壁面温度场

Fig.6 Copper casing wall temperature field

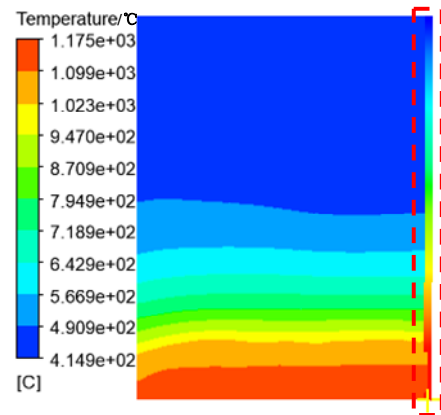


图 8 铸坯芯部取点位置

Fig.8 Taking positions of points at the cast billet core

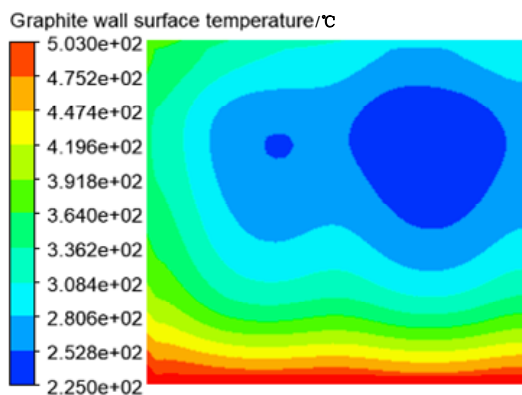


图 7 石墨板壁面温度场

Fig.7 Temperature field on the wall surface of graphite plate

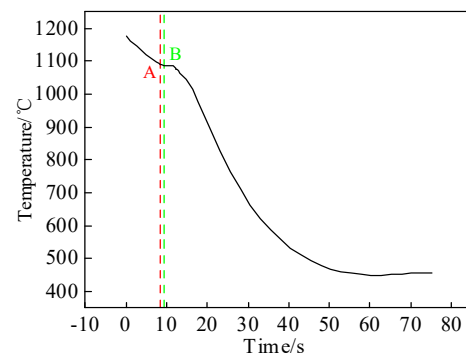


图 9 节点温度随时间变化曲线

Fig.9 Curve of node temperature change with time

取铸坯中心层温度场,如图 8 所示,定义为铸坯芯部温度分布,并在此温度场基础上取距铸坯边部 1/2 位置处一节点,绘制该点从模具进口端到出口端温度随时间变化曲线,如图 9 所示。分析曲线可知,铜液进入石墨模具后受到冷却水的强迫对流作用温度会快速降低至液相线附近,在液-固相变的转化过程中会放出大量的结晶潜热,使铸坯温度的下降变得缓慢,待凝固后铸坯温度快速下降,在接近出口位置时冷却条件又由冷却水的强迫对流变为空冷,冷却强度大幅度下降,故温度的下降趋势又变平缓。

为便于计算铸坯凝固过程的冷却速率,在芯部温度变化曲线中选取液、固相线对应的位置点 A、B,定义冷却速率 $v = \Delta T / (t_B - t_A)$,其中 ΔT 为铸坯凝固时液固相线点的温度差, t_B 为铸坯到达固相线所用的时间, t_A 为铸坯到达液相线所用的时间。图 9 中的 A、B 两点分别为无氧铜铸坯凝固过程的液、固相线点,通过模拟获得不同拉速条件下铸坯表面和铸坯芯部温度场,依次提取出 t_B 、 t_A , 计算得到相应的冷却速率结果。

将计算获得的不同拉速条件下对应的铸坯表面、芯部冷却速率绘制成曲线,如图 10 所示,结果表明随着铸坯拉速的不断提高,铸坯表面和芯部的冷却速率均呈逐渐减小的趋势,且从铸坯表面到芯部,沿着牵引方向二者的冷却速率差值持续减小。主要是在相同的冷却工艺条件下,随着铸坯拉速的不断提高,铸坯在结晶器内停留时间会逐渐缩短,冷却时间减少,即间接影响了在铜液凝固成型期间冷却水吸收热量的能力,从而导致在相同位置铸坯的表面温度也随之增大,但由于铸坯的液、固相线温度不会发生变化,只会使铜液到达固相线温度所需的时间延长,故铸坯表面和芯部的冷却速率均会逐渐减小。此外,铸坯表面的冷却速率大于芯部冷却速率,主要是因为铸坯表面与芯部在凝固过程中存在温度差和时间差,铸坯芯部凝固的动力来源主要是靠铸坯表面已凝固部分铸坯的冷却作用,当铸坯表面开始凝固形成坯壳时,芯部仍以铜液的形式存在,此时铸坯组织从表面开始形核并逐渐向芯部生长,生长方向逆着热流方向,而铸坯表

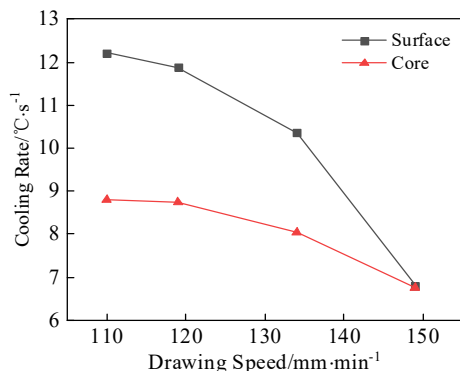


图 10 冷却速率和铸坯拉速的关系

Fig.10 Relationship between cooling rate and billet drawing speed

面与芯部的冷却速率差值使得铸坯表面结晶总是先于芯部。随着拉速提高,铸坯表面和芯部沿着牵引方向的冷却速率差值逐渐减小,则是由于在铜液凝固过程中,铜套内冷却水通过石墨模具优先作用于铸坯表面,冷却过程从铸坯表面传往芯部,冷却能力沿牵引方向和铸坯厚度方向均逐渐下降。当拉速较慢时铸坯表面与石墨模具接触时间较长,单位时间内沿牵引方向引起的温降要大于铸坯厚度方向,即铸坯表面的冷却速率大于芯部冷却速率;当拉速提高后,铜液与石墨模具接触面积增加,结晶位置进入铜套正下方,且铸坯在结晶器中停留时间缩短,沿牵引方向冷却来不及传递,冷却强度主方向由牵引方向转为沿铸坯厚度方向,从而使拉坯表面与芯部沿牵引方向的冷却速率差值会逐渐减小。当拉速为 149 mm/min 时,表面和芯部冷却速率基本一致,这说明此时沿牵引方向铸坯表面和芯部冷却实现同步。

3 不同拉速的铸坯组织分析

3.1 拉速对截面组织的影响

取不同拉速条件下对应铸坯样品,沿铸坯牵引方向切开,观察截面组织,如图 11 所示。结果可见铸坯均以柱状晶为主,晶粒从上下表面形核,逆热流方向沿铸坯芯部生长并交汇。定义晶粒生长方向与牵引方向的夹角 θ 为晶粒生长倾角,拉速较低时 (110 mm/min), 夹角 θ 为 28.3° ,柱状晶粒生长距离较远,开口呈现“人”字形;随着拉速提高,铸坯晶粒生长倾角变大,拉速为 149 mm/min 时,夹角 θ 为 68.8° ,晶粒生长距离减小。此外可见随着拉速提高,铸坯下部晶粒显著粗化,铸坯上部和下部呈现严重不对称现象。

对水平连铸坯独特的组织形貌及随着拉速提高铸坯组织的演变规律进行了分析。如图 12 所示,当拉速较低时,液穴较短,石墨模具内部结晶位置靠近铜液入口端,远离冷却水道对应的位置,导致沿铸坯厚度方向冷却速率较小,而沿牵引方向冷却速率较大,铸坯晶粒形核后沿箭头指示方向生长,晶粒倾角较小;随着拉速提高,液穴深度增加,石墨模具内部铜液结晶位置向出口方向移动,逐渐靠近冷却水道位置,沿铸坯厚度方向冷却强度逐渐提高,沿牵引方向冷却强度减弱,从而导致晶粒在表面形核后沿铸坯厚度方向快速长大,晶粒倾角逐渐增大。

此外,在实际生产过程中,虽然结晶器上下内部结构一样,但在工作时下部结晶器内的水路结构是下进下出(即水路进出口均朝下)模式,内部冷却水受热容易产生气泡、气膜等,并上浮附着在铜套内壁附近难以排出。这些气泡、气膜的来源可能为液体中残留的气体、液体中油污等物质受热分解以及冷却水与高温铜套内壁接触汽化产生的少量水蒸气所致,气

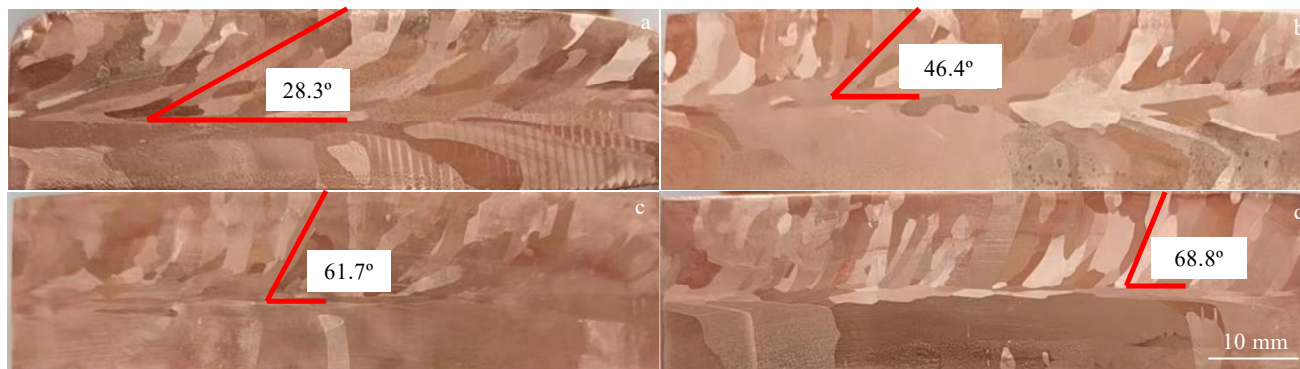


图 11 不同拉速生产的铸坯截面组织

Fig.11 Section structure of cast billet produced at different drawing speeds: (a) 110 mm/min, (b) 119 mm/min, (c) 134 mm/min, and (d) 149 mm/min

泡、气膜的存在使下部结晶器内的冷却水一直无法彻底充满整个水路,形成的隔热层阻碍了水与铜套内壁之间的直接接触,如图 12 所示,造成液固界面热阻增大,换热系数降低,使下部结晶器的冷却强度减弱,因此下部的晶粒较粗大。上部结晶器内的水路结构是上进上出(即水路进出口均朝上)模式,内部产生的气泡、气膜容易被循环流动的冷却水冲走,不影响水与铜套内壁之间的换热,上部结晶器内的冷却水一直处于完全充满的状态,冷却效果较好,因此上部的晶粒较细小。

3.2 拉速对上表面组织的影响

图 13 所示为在不同拉速下稳定生产的铸坯上表面

面的宏观组织,从图中可以看出铸坯表面几乎均为等轴晶组织,但晶粒度在宏观上存在明显的不同。选取相同位置(红色虚线框处),分析在标尺为 30~40 mm 位置处的晶粒变化。通过测量软件统计发现拉速为 110 mm/min 时铸坯此位置的晶粒数目约为 76 个,平均晶粒直径约为 1.96 mm;拉速为 119 mm/min 时铸坯此位置的晶粒数目约为 92 个,平均晶粒直径约为 1.85 mm;拉速为 134 mm/min 时铸坯此位置的晶粒数目约为 130 个,平均晶粒直径约为 1.48 mm;拉速为 149 mm/min 时铸坯此位置的晶粒数目约为 185 个,平均晶粒直径约为 1.05 mm。将这些数据绘制成曲线如图 14 所示,发现铸坯表面上晶粒数目随拉速的提高逐渐增加,

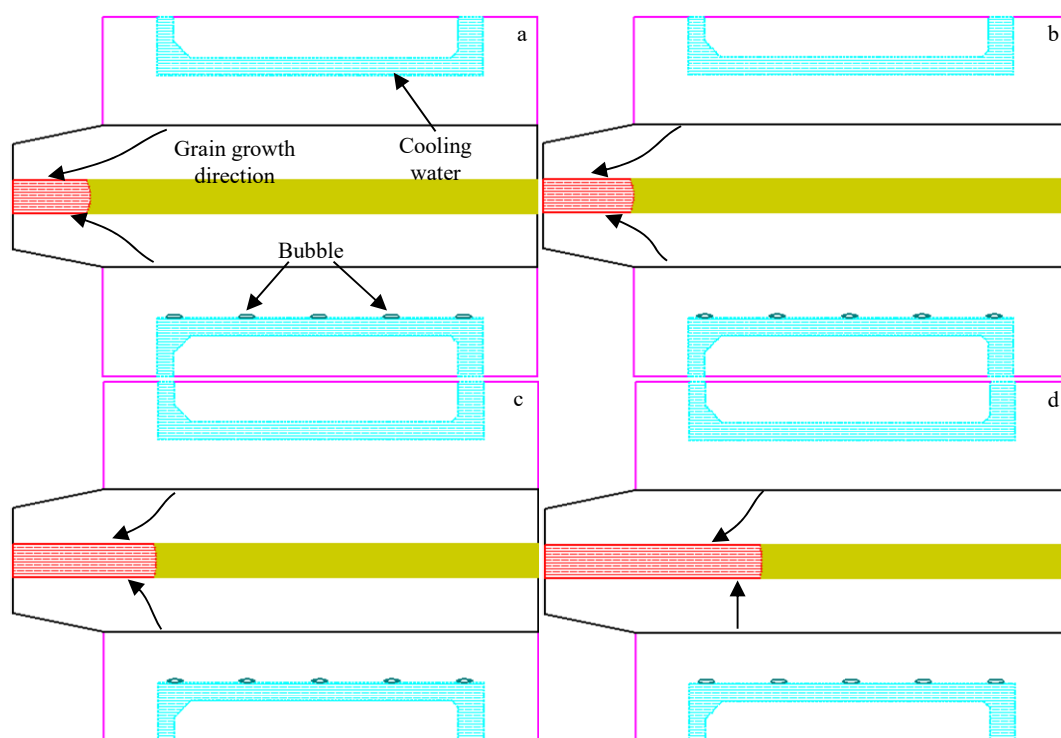


图 12 不同拉速的冷却水作用简图

Fig.12 Diagram of cooling water action at different drawing speeds: (a) 110 mm/min, (b) 119 mm/min, (c) 134 mm/min, and (d) 149 mm/min

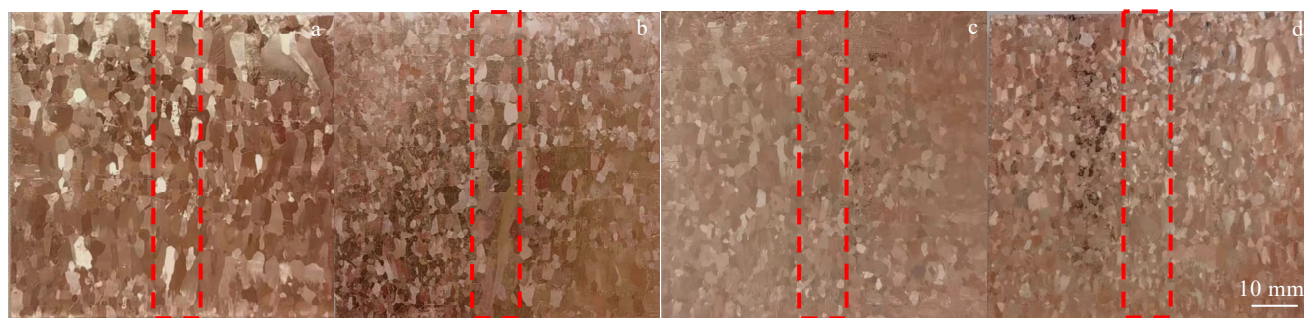


图 13 不同拉速生产的铸坯上表面

Fig.13 Upper surface of casting billet produced at different drawing speeds: (a) 110 mm/min, (b) 119 mm/min, and (c) 134 mm/min, and (d) 149 mm/min

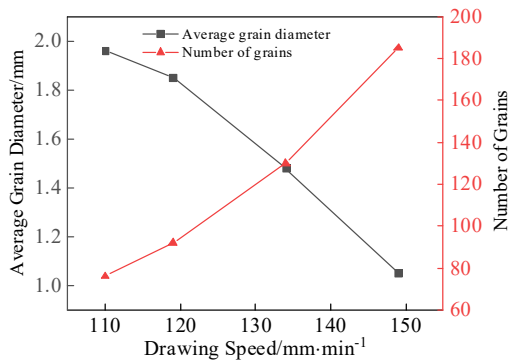


图 14 平均晶粒直径与晶粒数目和铸坯拉速的关系

Fig.14 Relationship of average grain diameter and grain number with drawing speed

平均晶粒直径随拉速的提高逐渐减小,铸坯整体的组织均匀性明显提高。原因主要在于随着铸坯拉速的提高,结晶位置不断向出口方向移动,铜液区域逐渐进入到冷却铜套的正下方,与石墨模具接触面积也随之增加,接触的冷却区域面积增大,即铸坯单位时间内通过结晶器带走的热量增加,铸坯凝固速度增大,过冷度也随之增大,从而导致铸坯凝固时的形核率变高,且高的形核率有利于细化晶粒,抑制柱状晶的生长,提高等轴晶率,即在单位面积上晶粒数目增多,晶粒尺寸减小。

4 结 论

1) 在紫铜板带坯水平连铸过程中,随着铸坯拉速的不断提高,结晶器内液穴深度持续增加,结晶位置向铸坯出口端移动,铸坯表面和芯部沿牵引方向的冷却速率均逐渐降低,且二者沿牵引方向的冷却速率差值逐渐减小,当拉速为 149 mm/min 时,二者冷却速率基本一致。

2) 随着铸坯拉速的不断提高,铸坯截面上晶粒生长方向与牵引方向的夹角 θ 逐渐增大;铸坯表面上晶粒数目逐渐增加,平均晶粒直径从 1.96 mm 逐渐减小到 1.05 mm,整体组织均匀性明显提高。

参考文献 References

- [1] Yang Changlin(杨昌霖), Gao Qi(高琦), Yao Chenggong(姚成功) et al. *China Metallurgy*(中国冶金)[J], 2021, 31(3): 101
- [2] Yang Gang(杨刚), Li Baokuan(李宝宽), Yu Yang(于洋) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2007, 43(3): 332
- [3] Liu Xin(刘新), Zhao Liangang(赵连刚), Zhang Fuqiang(张

富强). *Heavy Machinery*(重型机械)[J], 2000(6): 13

- [4] Wang Wei(王伟), Zhu Liguang(朱立光), Zhang Caijun(张彩军) et al. *China Metallurgy*(中国冶金)[J], 2020, 30(2): 46
- [5] Liang Yan(梁燕), Wang Xianhui(王献辉), Li Hangyu(李航宇) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(7): 2607
- [6] Xiao Han(肖寒), DuanZhike(段志科), Li Naiyong(李乃拥) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(2): 531
- [7] Xiao Yao, Han Yi, Huang Ming et al. *Journal of Pressure Vessel Technology*[J], 2022, 144(2): 021 502
- [8] Zhao Xinyu, Liu Yang, Hu Xiantang et al. *Iop Conference*[J], 2018, 199(3): 032 003
- [9] Li Yiming(李一鸣), Ji Yunping(计云萍), Kang Xueliang(康学良) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(9): 3510
- [10] Liu Zengxun(刘增勋), Chai Qingfeng(柴清风), Xu Wang(徐旺) et al. *China Metallurgy*(中国冶金)[J], 2020, 30(2): 63
- [11] Chen Yi, Ji Cheng, Zhu Miaoyong. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2022, 49(1): 1
- [12] Jiang Dongbin, Zhu Miaoyong. *Metallurgical and Materials Transactions*[J], 2017, 48(1): 444
- [13] He Wei(何卫), Ma Heng(马恒), Shi Zehao(石泽灏) et al. *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2022, 30(2): 68
- [14] Xie Jixiang(谢集祥), Luo Gang(罗钢), Liu Liu(刘浏) et al. *China Metallurgy*(中国冶金)[J], 2020, 30(2): 54
- [15] Wang Xiaolian(王晓连), Wang Xinhua(王新华), Li Linping(李林平) et al. *Steelmaking*(炼钢)[J], 2014, 30(3): 54
- [16] Cao Na(曹娜), Zhu Miaoyong(朱苗勇). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2007, 43(8): 834
- [17] Meng Xiangning(孟祥宁), Zhu Miaoyong (朱苗勇). *Proceedings of the 7th China Steel Annual Conference 2009* (第七届(2009)中国钢铁年会论文集)[C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009:1597
- [18] Meng Xiangning, Zhu Miaoyong. *ISIJ International*[J], 2009, 49(9): 1356
- [19] Chen Wei(陈伟), Chang Xinnian(常新年), Yang Gaiyan(杨改彦) et al. *Steelmaking*(炼钢)[J], 2022, 38(1): 56
- [20] Thomas B G, OjedaC. *ISS TECH International Technology Conference Proceedings*[J], 2003, 1: 295
- [21] Liu Jinsong(刘劲松), Zhang Liangli(张良利), Wang Songwei(王松伟) et al. *Foundry Technology*(铸造技术)[J],

- 2022, 43(7): 511
- [22] Yuwen Xuanxuan, Chen Ling, Han Yijie. *Energy Procedia*[J], 2012, 17: 1864
- [23] Wang Zhicheng(王志成), Wang Weiling(王卫领), Luo Sen(罗森) *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(1): 115
- [24] Shi Yunxu(石运序), Sun Shuai(孙帅), Guo Ming'en(郭明恩) *et al. Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2017, 38(4): 867
- [25] Shi Yunxu(石运序), Zhang Jianxu(张建旭), Sun Shuai(孙帅) *et al. Foundry*(铸造)[J], 2017, 66(5): 486

Simulation and Experimental Study on Solidification Behavior of Red Copper Horizontal-Continuous-Casting Slab at Different Drawing Speeds

Liu Jinsong^{1,2}, Zhang Liangli¹, Wang Songwei², Song Hongwu², Zhang Shihong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

(2. Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Horizontal continuous casting is a common method to produce copper strip. It is very important to explore the influence of process parameters on the quality of the billet. The influence of drawing speed on temperature field, liquid hole depth and cooling rate in mold was analyzed by numerical simulation, and the influence mechanism of drawing speed on the structure of billet was revealed by process test. The results show that with the continuous increase in the billet drawing speed, the depth of the liquid hole in the mold continues to increase, the cooling rates of the surface and core of billet along the traction direction gradually decrease, and the difference between the two cooling rates gradually decreases. When the drawing speed is 149 mm/min, the cooling rates of the two parts are similar. With the continuous increase in the billet drawing speed, the angle θ between the grain growth direction and the traction direction on the section of the billet increases gradually, the grain growth distance is shortened, the number of grains on the surface of the billet increases, the average grain diameter decreases from 1.96 mm to 1.05 mm, and the overall microstructure uniformity is obviously improved.

Key words: horizontal continuous casting; drawing speed; depth of liquid hole; cooling rate; grain

Corresponding author: Wang Songwei, Ph. D., Assistant Research Fellow, Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, E-mail: swwang16b@imr.ac.cn