

镁合金薄带双辊铸轧过程的数值模拟

黄 锋, 邱洪双

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于立式薄带双辊铸轧工艺的特点, 采用有限元法求解镁合金薄带双辊铸轧过程的三维宏观传输方程, 并应用 ANSYS 软件的智能网格划分技术, 实现了对铸轧过程中熔池内部温度场、速度场及凝固过程的耦合模拟. 分析了铸轧速度及浇注温度等主要工艺参数对熔池内流场、温度场和凝固终了点的影响规律. 研究结果表明, 随着浇注温度和铸轧速度的增加, 熔池出口处的温度升高, 凝固终了点向熔池出口处移动. 通过对模拟结果的讨论, 给出了适合镁合金薄带铸轧过程的工艺参数: 浇注温度为 640 ~ 660 °C, 铸轧速度为 20 ~ 30 m/min.

关 键 词: 双辊铸轧; 镁合金; 数值模拟; 宏观传输; 有限元法

中图分类号: TG 146.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)04-0489-05

Numerical Simulation of Twin-Roll Casting Magnesium Alloy Strip Process

HUANG Feng, QI Hong-shuang

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: HUANG Feng, E-mail: hfork@163.com)

Abstract: Based on the characteristics of vertical type twin-roll casting process, the finite element method was used to analyze the three-dimensional steady conservation equations for transport phenomena in the pool region of the twin-roll strip casting for the magnesium alloy. The smart-sizing algorithm of ANSYS software was used to divide finite element mesh, and the coupled simulations of temperature field, velocity field and the solidification process in the molten pool were performed. The effects of main control parameters, such as the casting speed, pouring temperature on the flow field, temperature field and the final point of solidification in the molten pool, were analyzed. The results showed that with the increase of the pouring temperature and the casting speed, the temperature at the exit of the molten pool increases and the final point of solidification moves toward the exit. On the basis of the simulation results, the optimized process parameters of twin-roll casting process for Mg alloy are also given as: the pouring temperature is in 640 ~ 660 °C and the casting speed is in 20 ~ 30 m/min.

Key words: twin-roll casting; magnesium alloy; numerical simulation; macroscopic transport; finite element method

出于环境保护和可持续发展的需求, 材料加工领域的轻量化正成为研究热点. 镁合金作为目前最轻的金属材料之一, 由于具有较高的比强度和比刚度、良好的阻尼减震性能和电磁屏蔽效果, 且零件尺寸稳定并易于回收, 在航空、航天、汽车和 3C 产品等领域都具有广泛的应用前景^[1-2]. 传统的镁合金板带生产, 由于加工工序长, 不仅造成生产周期长和制造成本高的问题; 由于加加工

序多, 严重的氧化还使制品的质量受到影响. 薄带双辊铸轧技术作为材料加工领域内的前沿课题之一, 以其短流程、低能耗的特点受到越来越多的重视. 因此, 将薄带双辊铸轧技术应用到镁合金板带制造中成为了近年来一个研究热点^[3-6].

双辊铸轧是一个十分复杂的工艺过程, 影响因素众多, 再加上镁合金结晶潜热小、热传导性能好、高温下极易氧化的特性, 使得镁合金薄带铸轧

工艺参数可匹配的范围很窄^[7-8]. 如果只是采用实验方法, 不仅耗时长、工作量大, 还存在一定的盲目性. 而通过计算机模拟计算可以方便地得到铸轧过程中各工艺参数对铸轧产品及铸轧工艺过程稳定性的影响规律. 本文采用三维有限元软件 ANSYS, 对 AZ31B 镁合金立式连续铸轧凝固过程进行模拟, 研究浇注温度及拉带速度等工艺参数对熔池内部金属流动及凝固特性的影响规律, 以便更好地优化工艺, 提高产品性能.

1 熔池内部传输控制方程

在双辊铸轧过程中, 由于在熔池内部同时存

在液相区、固相区和两相区, 为了简化模型, 采用广义流体概念来统一处理这 3 个不同的相区^[9]. 应用湍流模型, 熔池内部的宏观传输控制方程可以用变量 ϕ 统一表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_{\phi} \phi) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho V_k C_{\phi} \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_{\phi}. \quad (1)$$

式中: C_{ϕ} , Γ_{ϕ} , S_{ϕ} 分别为对流项系数、扩散项系数和源项.

统一方程中各项的表达式如表 1 所示. g_x, g_y, g_z 分别为重力加速度在 3 个方向上的分量; μ_{eff} 和 K_{eff} 分别为有效黏度系数和有效导热系数.

表 1 控制方程中各项的表达式
Table 1 Components of general governing equation

方程	ϕ	C_{ϕ}	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
连续性方程	1	1	0	0
x 方向动量方程	V_x	1	μ_{eff}	$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_x}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_x}{\partial z})$
y 方向动量方程	V_y	1	μ_{eff}	$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_y}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_y}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_y}{\partial z})$
z 方向动量方程	V_z	1	μ_{eff}	$\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_z}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial V_z}{\partial z})$
能量方程	T	c_p	K_{eff}	Q_v
湍流动能方程	k		μ_t/σ_k	$\mu_t \phi - \rho \varepsilon$
湍流动能耗散方程	ε		$\mu_t/\sigma_{\varepsilon}$	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \phi - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$

2 边界条件的处理

1) 水口入口区域:

$$V_x = 0, V_y = -V_{\text{in}} \sin \alpha, V_z = V_{\text{in}} \cos \alpha, k = a V_{\text{in}}^2. \quad (2)$$

式中: V_{in} 为水口注流速度; α 为水口开口角度; k 为湍流动能; a 为水口水力学尺寸.

2) 熔池自由表面. 熔池表面在 y 方向的速度为零, 所有变量在 y 方向上的梯度为零, 同时熔池表面与熔池上方的保护气体间进行热辐射换热:

$$V_y = 0, \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0, \frac{\partial V_z}{\partial y} = 0, \frac{\partial k}{\partial y} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0, \\ -K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4). \quad (3)$$

式中: ε 为熔融金属发射率; σ 为 Stenfen - Boltzman 常数; T_a 为熔池上方保护气体的温度.

3) 中心对称面:

$$V_z = 0, \frac{\partial V_x}{\partial z} = 0, \frac{\partial V_y}{\partial z} = 0, \frac{\partial k}{\partial z} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

4) 轴向对称面:

$$V_x = 0, \frac{\partial V_y}{\partial x} = 0, \frac{\partial V_z}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

5) 熔池与侧封板的接触侧面:

$$V_z = 0, -K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_c). \quad (6)$$

侧封板作为保温材料导热性能不好, 可以认为其温度为恒定值, 由于经过预先加热, 本研究中取为 600 °C.

6) 移动边界: 认为铸辊和凝壳之间无滑动, 因此边界上节点速度即为铸辊的线速度:

$$V_x = V \sin \theta, V_y = -V \cos \theta, V_z = 0. \quad (7)$$

式中: V 为铸辊线速度; θ 为节点角度.

熔池与铸辊表面间的传热视为第三类热边界条件:

$$-K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial n} = h_r (T - T_r). \quad (8)$$

式中: h_r 为换热系数, 与铸辊冷却水的温度和强度、铸辊转速及材质等相关, 且随着接触面的位置变化; T_r 为铸辊表面温度.

7) 黏度系数的处理: 当温度为 200, 566, 590, 632, 650 和 680 °C 时, 黏度分别为 105, 105, 0.012, 0.001 27, 0.001 24 和 0.001 20 kg·m⁻¹·s⁻¹.

8) 凝固潜热的处理: 采用等价比热容方法处理凝固潜热, 假设凝固潜热在凝固区间内均匀释放, 且固相率与温度成线性关系, 则镁合金的比热可表示为

$$c_p = \begin{cases} c_l, & T > T_1; \\ c_l + L / (T_1 - T_s), & T_s \leq T \leq T_1; \\ c_s, & T < T_s. \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_s 和 c_l 分别为固相和液相的比热; T_s 和 T_1 分别为固相线和液相线温度; L 为凝固潜热.

3 模拟条件

数值模拟采用大型商业有限元软件 ANSYS 进行运算, 考虑到水口及熔池的对称性, 采用熔池的 1/4 作为模拟区域, 如图 1 所示. 由于模拟区域的上下部分尺寸差异很大, 因此采用了智能网格划分方法, 相比于均匀网格划分, 避免了熔池上

下部分网格尺寸的过大差异, 同时显著降低了单元数量, 在保证模拟结果精度的同时, 还大幅提高了计算效率.

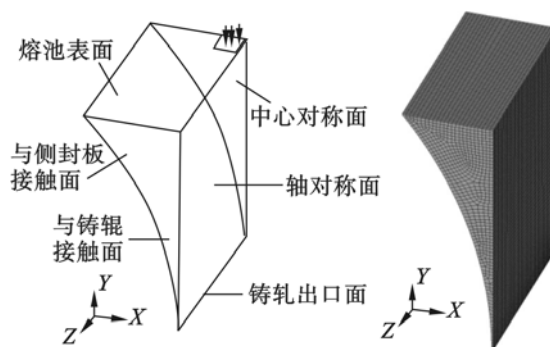


图 1 计算区域的网格划分
Fig. 1 Mesh of computing region

模拟的具体条件: 铸辊直径为 500 mm, 辊身为 250 mm, 铸带厚度为 2 mm, 熔池液面高度控制在 160 mm; 浇注温度分别为 640, 650, 660 和 670 °C, 铸轧速度分别为 15, 20, 25 和 30 m/min. 铸轧材料为镁合金 AZ31B, 具体物性参数如表 2 所示.

表 2 AZ31B 镁合金的热物性值
Table 2 Thermophysical properties of AZ31B magnesium alloy

密度 kg·m ⁻³	液相线温度 °C	固相线温度 °C	液相比热 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	固相比热 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	潜热 kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	热导率 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
1 630	632	566	1 322	1 360	339	150

4 模拟结果及讨论

4.1 浇注温度对熔池内部温度分布的影响

在铸辊的转速为 25 m/min, 浇注温度分别为 640, 650, 660 和 670 °C 时, 熔池中心对称面的温度场如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 在其他工艺条件不变的情况下, 随着浇注温度的增加, 即过热度的增大, 熔池内部两相区的区域扩大, 凝固终了点的位置向出口方向移动. 当浇注温度提升到 670 °C 时, 在出口处铸带芯部温度已经高于固相线, 此时铸带容易拉断, 造成漏液事故. 过高的浇注温度也会造成铸带及熔池表面的氧化, 所以在此条件下合适的浇注温度应控制在 660 °C 以下.

4.2 铸轧速度对熔池内流场和温度场的影响

在浇注温度为 650 °C, 铸轧速度分别为 15, 20, 25 和 30 m/min 时, 熔池中心对称面的温度场如图 3 所示. 可以看到在此条件下, 熔池内部的

温度分布对铸速非常敏感, 随着铸轧速度的提高, 凝固终了点大幅向出口方向移动.

在铸速为 15 m/min 时, 由于凝固终了点位置靠上, 凝固壳过厚, 导致铸轧力过大, 不仅容易出现裂纹等缺陷, 还容易造成轧卡事故. 当铸速达到 30 m/min 时, 凝固终了点已经接近到了熔池的出口处, 此时铸带中心容易出现液芯, 造成断带事故. 在此浇注温度下, 适宜的铸速应控制在 20 ~ 30 m/min 之间.

浇注温度为 650 °C 时, 不同铸轧速度下熔池轴对称面的流场分布如图 4 所示. 由于浇口采用侧面开口的方式, 镁合金熔液以一定的角度和速度流向侧封板, 然后再回流到熔池中心部分. 由图 4 可以看出, 随着铸速的提高, 从侧封板回流的趋势加强, 在熔池的上下部分形成的漩涡也愈加明显, 热量随着流动传输, 不仅造成了熔池内部温度的提升, 同时也能有效减小熔池边部与熔池中心的温度差.

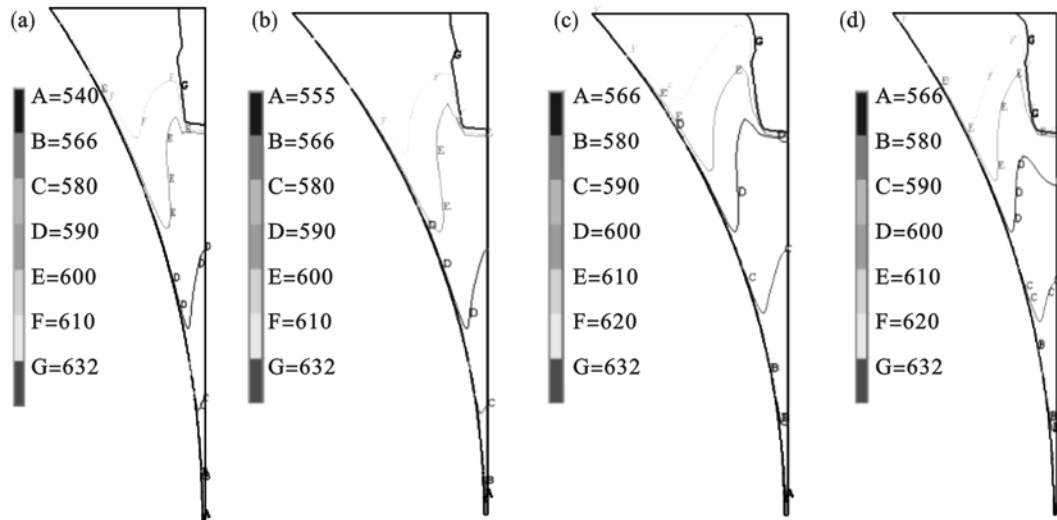


图 2 不同浇注温度下中心对称面的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of centrosymmetric area under different pouring temperature

(a)—640 °C; (b)—650 °C; (c)—660 °C; (d)—670 °C.

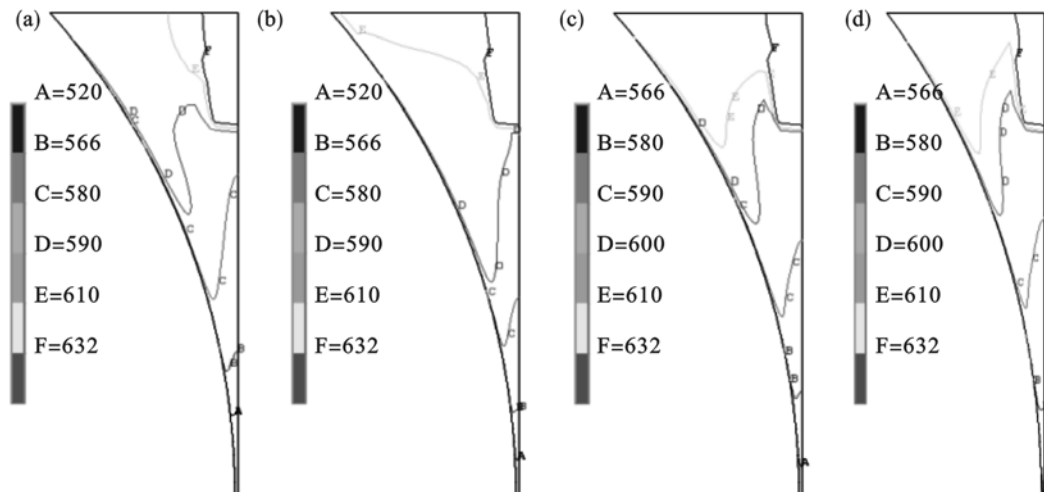


图 3 不同铸轧速度下中心对称面的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of centrosymmetric area under different casting speed

(a)—15 m/min; (b)—20 m/min; (c)—25 m/min; (d)—30 m/min.

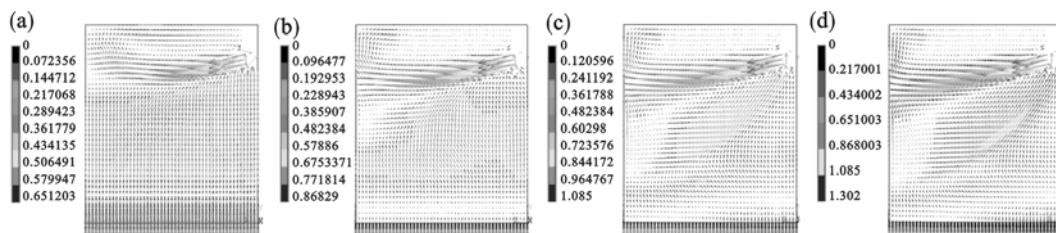


图 4 不同铸轧速度下轴对称面的流场分布

Fig. 4 Flow field of axisymmetric area under different casting speed

(a)—15 m/min; (b)—20 m/min; (c)—25 m/min; (d)—30 m/min.

5 结 论

1) 应用广义流体的思想,建立了适用于立式双辊铸轧过程熔池内部的宏观传输统一控制方程,并采用智能网格划分技术,应用有限元方法,成功实现了对镁合金铸轧过程熔池内部的热-流

耦合模拟。

2) 随着浇注温度的增加,凝固终了点位置向熔池出口处移动。

3) 铸轧速度对熔池内温度分布影响显著,凝固终了点位置随铸速的提高明显向铸带出口移动。

(下转第 497 页)