

侧封板振动对双辊薄带铸轧熔池内凝固的影响

李萱萱¹, 蒋恩², 刘刚², 胡贤忠¹

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 一重集团大连工程技术有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘要: 对侧封板振动条件下双辊薄带铸轧熔池内凝固特性进行了数值模拟, 分析了不同振动频率、振幅和浇铸温度对于双辊薄带铸轧熔池内钢液凝固的影响. 设计了机械振动实验对数值模型的准确性进行验证. 结果表明: 振动的加入将会加速金属熔体的凝固速度, 且随着振动频率的增大, 熔融金属的凝固速度将得到进一步加快; 侧封板处的热流密度大, 导致钢液凝固速度增加, 液相体积分数沿水平方向从侧封板到熔池中心逐渐降低; 浇铸温度升高会导致熔池内糊状区减小, Kiss点位置降低. 研究得出最优振动频率为13 Hz, 最优振幅为0.5 mm, 浇铸温度不宜高于1860 K.

关键词: 双辊薄带铸轧; 侧封板; 振动; 凝固; 数值模拟

中图分类号: TG 244

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2026)01-0123-08

Effect of Vibration of Side Dam on Solidification Inside Melt Pool of Twin-Roll Thin Strip Casting

LI Xuan-xuan¹, JIANG En², LIU Gang², HU Xian-zhong¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. CFHI Dalian Engineering & Technology Co., Ltd., Dalian 116600, China. Corresponding author: HU Xian-zhong, E-mail: huxz@smm.neu.edu.cn)

Abstract: A numerical simulation was conducted to investigate the solidification characteristics inside the melt pool during twin-roll thin strip casting under side dam vibration. The effects of vibration frequency, amplitude, and casting temperature on molten steel solidification in the melt pool were analyzed. The mechanical vibration experiment was designed to validate the accuracy of the numerical model. Results show that applying vibration accelerates molten metal solidification rate, and higher vibration frequency further enhances the solidification rate. Due to the high heat flux density at the side dam, the solidification rate of the molten steel increases, leading to a decreasing trend in liquid fraction from the side dam to the center of the melt pool along the horizontal direction. Elevated casting temperature reduces the melt pool's mushy zone size and lowers the Kiss point position. The study finds that the optimal vibration frequency is 13 Hz, the optimal amplitude is 0.5 mm, and the casting temperature should not exceed 1860 K.

Key words: twin-roll thin strip casting; side dam; vibration; solidification; numerical simulation

薄带连铸技术是一种将液态金属直接制成具有一定厚度的薄带产品的技术. 相较于传统的板坯连铸, 其具有更短的工作流程、更低的能耗、更高的生产效率和产品质量. 双辊薄带铸轧技术^[1]作为薄带连铸的一种, 在具有上述优点的同时将亚快速凝固技术融入其中, 又因其控制的简易性和操作范围的广泛性而得到了更为广泛的

关注. 但在使用这种技术时, 可能会使带坯质量不稳定. 为有效控制和预测薄带材组织性能, 机械振动^[2]、超声振动^[3]以及电磁振动^[4]等振动方法都被施加在金属熔体的凝固过程中, 且被很多学者证实可以改善带材质量.

Curry等^[5]最初提出了振动的加入可以优化金属凝固的想法, 并证实了在微观层面对凝固组

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474350).

作者简介: 李萱萱(2000—), 女, 黑龙江鹤岗人, 东北大学硕士研究生.

通信作者: 胡贤忠, E-mail: huxz@smm.neu.edu.cn.

织是有利的.后续研究进一步揭示振动促进了金属熔体中晶粒的生成,如 Yan 等^[6]和 Li 等^[7]的研究.此外, Jian 等^[8]进行了超声振动处理下共晶硅熔体凝固实验,发现经超声振动处理的共晶硅样本晶体结构呈现出玫瑰花状,可以很好地改善材料性能.

在众多振动类型中,机械振动因其简便的获取工艺和低廉的成本,成为最广泛应用的方式之一. Kudryashova 等^[9]和 Niu 等^[10]分别针对铝和钢熔体凝固进行了实验研究,确定了最优的振动频率和振幅; Wang 等^[11]采用有限元法和有限差分法模拟了 Cr17 铸铁熔体凝固过程中的温度场和流场,发现垂直于振动方向的区域受振动影响最为显著.

机械振动主要施加在铸辊上,但在双辊薄带铸轧工艺中,侧封板也是极为关键的部件.侧封板不仅能确保带材几何形状的精确性,还能维持熔池内的压力平衡,控制金属液的凝固速度和铸带的冷却过程.因此,针对侧封板的研究是十分必要的. Guo 等^[12]研究了侧封板振动对双辊薄带铸轧熔池内部流动及传热的影响,但是没有对凝固过程进行研究.

为了填补侧封板振动对双辊薄带铸轧熔池内凝固特性影响的研究空白,本文通过数值模拟

系统地分析不同振动频率、振幅和浇铸温度对熔池内钢液凝固的影响,并设计实施振动凝固实验进行验证.本研究旨在全面揭示侧封板机械振动在双辊薄带铸轧工艺中对熔池内凝固过程的影响,为优化薄带铸轧过程提供理论依据和技术指导.

1 模 型

1.1 几何模型

本研究对实际工程实验中使用的双辊薄带铸轧试验样机创建了熔池物理模型.表 1 显示了熔池在不同位置的尺寸.熔池根据其 x 和 y 方向的 2 个对称轴简化为 1/4 模型.图 1 为熔池物理模型示意图.

表 1 熔池物理模型尺寸

Table 1 Physical model size of melt pool mm

物理参数	数值
结晶辊半径(R)	250
带坯厚度(δ)	4
结晶辊宽度(D_p)	600
布流器长度(L)	550
布流器出口长度(l)	50
布流器出口宽度(d)	10
布流器入口宽度(D)	54

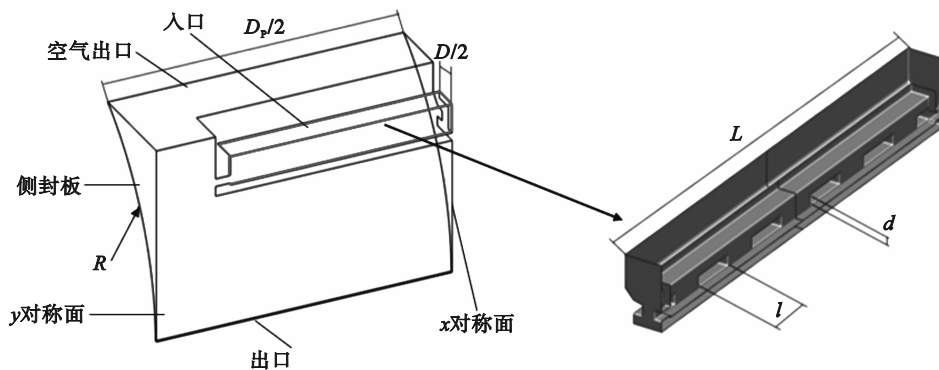


图 1 熔池物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of melt pool's physical model

1.2 控制方程

本研究对不同振动参数条件下熔池侧封板的振动仿真采用动网格技术实现.熔池内存在的多相流问题可以被简化为气液两相流问题,使用 VOF (volume of fluid) 模型进行求解.熔池流体流动的数学模型包括连续性方程、动量方程和能量方程^[13].为提高熔池中金属熔体反向压力梯度流动和高速旋转剪切流动的预测精度,本文采用低雷诺数的 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 模型进

行数值计算.

凝固模型选用的是多孔介质方法之一的 Enthalpy-Porosity 模型^[14].随着高温金属熔体的凝固,单元内的多孔率由 1 降至 0.

液体在单元内的动量方程如式(1)所示:

$$S' = S - \frac{(1-\varphi)^2}{\varphi^3} A_{\text{mush}} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p). \quad (1)$$

式中: S' 是半熔融状态下流体动量, $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; S 是液相状态下流体动量, $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; φ 是液相体积分

数; v 是液相的流动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v_p 是固相的移动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A_{mush} 是糊状区常数.

糊状区常数 A_{mush} 定义如式(2)所示:

$$A_{\text{mush}} = \frac{180\mu}{\lambda^2} = \frac{180\mu}{(C(\bar{U})^{-n})^2} \quad (2)$$

式中: λ 是二次枝晶间距, m ; C 是金属凝固常数; \bar{U} 是平均冷却速率, $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$; μ 是动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; n 是金属凝固幂次方常数, n 取 1/3.

1.3 边界条件及求解方法

布流器入口温度 T_{in} 作为数值计算的初始温度.熔池上方的空气初始温度设置为 573 K,熔池中钢液的初始速度设置为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.模型的入口条件类型设置为 Velocity Inlet.入口处流体介质全部设置为液相,出口条件类型设置为充分发展条件,该位置处金属熔体应完全凝固为固相.结晶辊转速设置为实际工程中的转速,壁面速度采用移动边界条件.在实际生产过程中,结晶辊铸轧力以及钢水的静压力均由钢液接触角的大小决定,因此在数值模拟过程中结晶辊表面的换热系数也根据接触角设置.本文对辊面边界条件的获取参考了薛顺辉^[15]与郭志远^[16]提出的结晶辊换热边界条件.

布流器出口边界条件类型设置为压力出口,本文侧封板的振动由动网格技术实现,侧封板换热条件的设置参照了本课题组先前实验结果,最终得到的经验公式如式(3)所示:

$$q = \begin{cases} K_1 T + B_1, & T \leq T_r, \\ K_2 T + K_3 T^2 + K_4 T^3 + B_2, & T_r < T. \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_r 是热流转折点, K ; T 是铸件表面温度, K ; K 和 B 为回归参数.文中 T_r 为 1 310.1 K, K_1 取值为 2 820.64, B_1 为-1 306 137, K_2 为 2 324 714, K_3 为-1 554, K_4 为 0.348 5, B_2 为-1.151 $\times 10^9$.

压力-速度耦合采用压力隐式算子分割算法(PISO),压力离散方法选择 Body Force Weighted,对流项离散格式选择 QUICK(quadratic upstream interpolation for convective kinetics)格式,体积分数选择 Compressive 方法,其他计算项的离散方法均选择二阶迎风格式.能量方程的残差以 10^{-7} 为收敛标准,其他方程以 10^{-5} 为收敛标准.根据一些学者的研究^[17-18],本文使用的热物理参数可能会随温度变化而变化,但这些变化对于熔池数值模拟结果准确性的影响可以忽略不计,可以将其视为常数.

1.4 模型验证

鉴于双辊薄带连铸设备振动实验的实施难度较大,本文设计了一套以长 50 mm、半径 6 mm 的钢棒为实验对象,集成了熔炼(感应炉)、定向凝固(水冷套管)、快速淬火(淬火水槽)全过程的振动凝固实验装置.利用定向凝固快淬技术,可以清晰观察到钢液凝固后固液相分界面变化情况,并通过计算在相同凝固时间内固相区域的等效长度来反映钢液的凝固速度.本文以此验证所建立的数学模型的准确性.实验系统如图 2 所示.

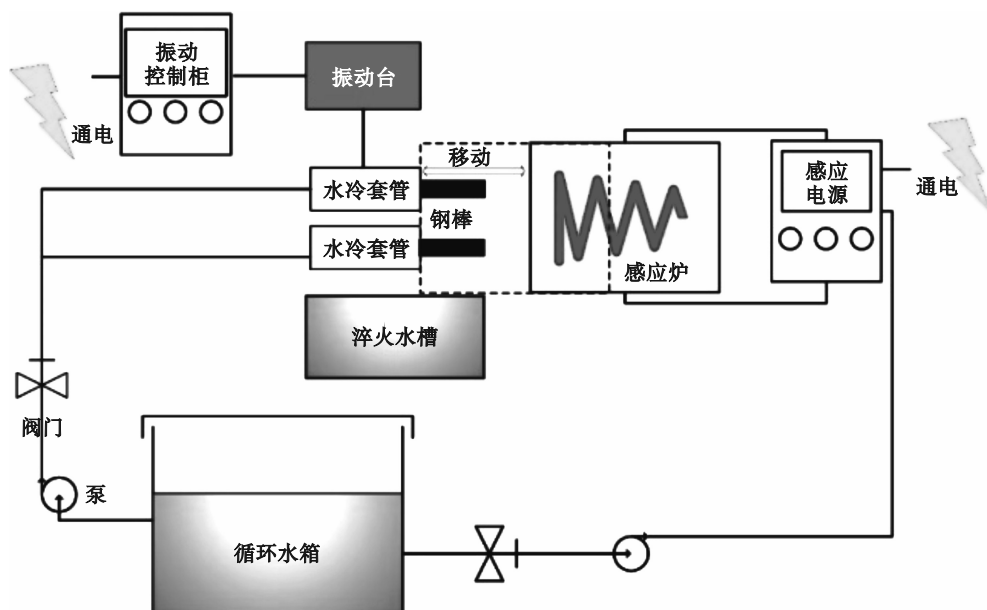


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

根据实际工程中双辊薄带轧机运行工况确定实验工况:振幅 $A=0.20\sim 0.25$ mm,频率 $f=0, 7, 25, 50$ Hz.为了对比相同条件下有无振动时金属熔体的凝固效果,振动与非振动实验同时进行.实验开始时,将2根钢棒尾部接至水冷套管,用振动台控制其中1根钢棒振动,另1根保持静止;通过控制感应炉移动实现对钢棒的熔炼,熔炼时2根钢棒对称分布在感应炉内,冶炼15 min后通过水冷套管进行5 min的保温及定向凝固;最后将金属棒材伸入淬火水槽进行淬火处理,此时得到1组实验条件下的实验样品.对所得的样品进行处理,打磨、抛光后进行酸蚀,得到金属熔体凝固过程中的固液相分界面,将测量振动样品和非振动样品凝固等效长度的差值进行比较,最终得到实验结果.

为了利用本实验验证模型准确性,需对实验所用Q235钢棒进行数值模拟.几何模型与网格划分如图3所示,网格尺寸为0.5 mm.

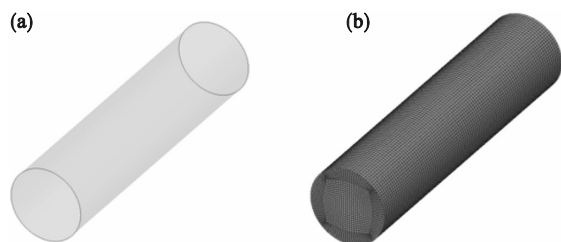


图3 几何模型及网格划分
Fig. 3 Geometric model and grid division
(a)—几何模型; (b)—网格划分.

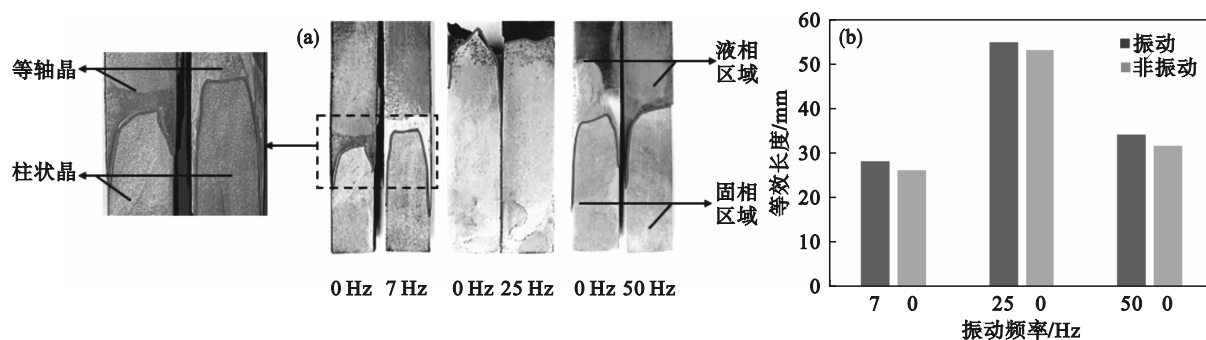


图4 不同振动频率下实验结果
Fig. 4 Experimental results at different vibration frequencies
(a)—实验样品; (b)—等效长度.

对比图5的实验与模拟的结果可以看出,随着振动频率的提高,振动样品和非振动样品的等效长度差增大,金属熔体的凝固速度加快,其原因是振动有助于金属熔体凝固过程中细小晶核的形成.

本文采用正六面体结构网格来模拟熔池区

流体区域的边界条件均设为 wall,左端端面作为换热面,参照实验中实际的水冷条件进行设置,其余面按照钢液在炉膛中凝固时的保温条件设为恒温1 800 K.初始时刻认为钢液充满流体域,初始时刻钢液温度设置为1 840 K.其余边界条件及求解方法按1.3节设置.此处本文使用Aboutalebi等^[19]的结果,认为实际Kiss点(糊状区和固相区接触最低点)液相体积分数取值为0.3,液相体积分数为0~0.3时熔池内的钢液已完全凝固成为钢坯,0.3~0.6为熔池中的半熔融区域,而0.6~1.0为液态区域.

2 结果及分析

2.1 实验结果及验证

将样品打磨、抛光后进行酸蚀,其典型显微组织如图4a所示.固相区域主要由沿热流方向生长的柱状晶组成,晶粒尺寸较小且排列取向较为一致;液相区域则以等轴晶为主,晶粒相对粗大,取向随机.由于晶粒取向差异导致光的反射方向不同,液相区在光学显微镜下呈现出相对较低的反射亮度.两区之间的过渡带为糊状区,其结构由部分熔化的枝晶与残余液相共同组成,界限由图中黑色实线所标示.图4a对比了振动(7, 25, 50 Hz)与非振动(0 Hz)条件下形成的显微组织.通过将固相区域面积与底部直径相除得到样品固相区域的等效长度,结果记录在图4b中.

域,如图6a所示.本文以带坯的平均出口温度为指标,验证了网格的无关性.如图6b所示,当网格尺寸达到0.312 mm时,带坯的平均出口温度变化很小,此时网格数量对模拟结果的影响开始消失.该网格尺寸对应的网格数为372 728.

数值模拟所得云图如图7所示.模拟测算出

的数据点相连后得出的拟合曲线与实验数据在图 5 中进行对比,结果表明在不同的振动频率下两者变化趋势相似,差值小于 1 mm,因此本文中所使用的数值模拟方法具有准确性和可靠性.

2.2 振动频率对熔池内凝固的影响

本节分别选取了 Face1~Face6 共 6 个平面和 Line1~Line7 共 7 条线来对熔池内的凝固情况进行分析.图 8 表示了 Face1~Face6 和 Line1~Line7 在 1/4 熔池物理模型中的位置选取示意图.

图 9a 是 Face2 上的液相体积分数分布情况,显示该平面上不同振动频率下熔池内液相体积分数的分布情况总体上是相似的.由于布流器横向水口持续喷出高温钢液,该平面上部区域为液相区域.由于结晶辊和侧封板对熔池内钢液的冷却作用,该面下半部开始凝固.振动的加入使熔

池内半熔融的糊状区面积增大,Kiss 点位置逐渐升高,这有利于形成质量更佳的薄带材,同时可以看出这种趋势在振动频率达到 13 Hz 后变化很小.

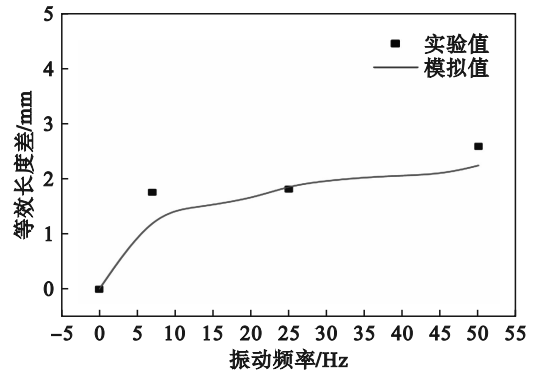


图 5 不同振动频率下实验与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of experiment and simulation results under different vibration frequencies

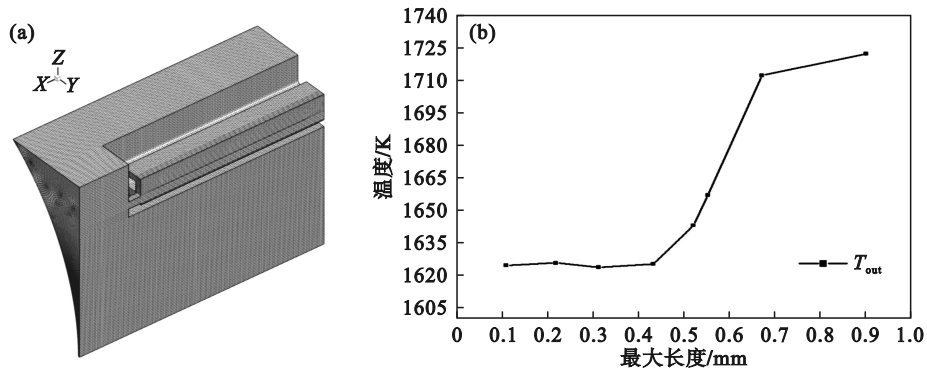


图 6 网格划分及无关性验证

Fig. 6 Grid division and independence verification

(a)—网格划分;(b)—网格无关性验证.

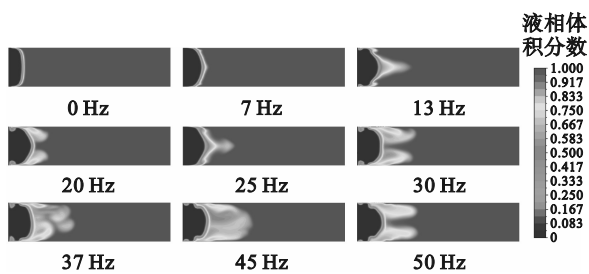


图 7 钢棒数值模拟云图

Fig. 7 Numerical simulation nephogram of steel bars

图 10a 是 Face6 上的液相体积分数分布图.图 11a 是 Line6 上的液相体积分数分布情况.从 2 幅图中可以看出,近侧封板下的半熔融区域更大,Kiss 点从侧封板到熔池中心缓慢降低.侧封板附近的液相体积分数较低,主要是因为该区域的热流密度较大,较大的热流密度导致侧封板附近热量传递增强,其下方的凝固速度加快.

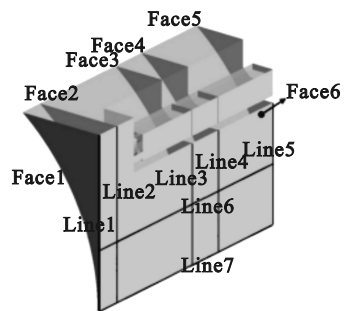


图 8 熔池物理模型不同位置选取示意图

Fig. 8 Schematic diagram of position selection on melt pool's physical model

图 12a 是 Line2 上的液相体积分数分布情况,左端位于出口位置,此处钢液已在结晶辊作用下冷凝并轧制发生塑性变形,液相体积分数接近于 0;右端为布流器出口附近,液相体积分数较高,接近于 1.0.可以看出 Kiss 点位于熔池出口上方

0.25~0.30 m处,在加入振动后,其位置显著上移.这表明熔池中高温熔融钢的凝固速度加快.熔融钢的加速固化将有助于形成更高质量的薄带产品.

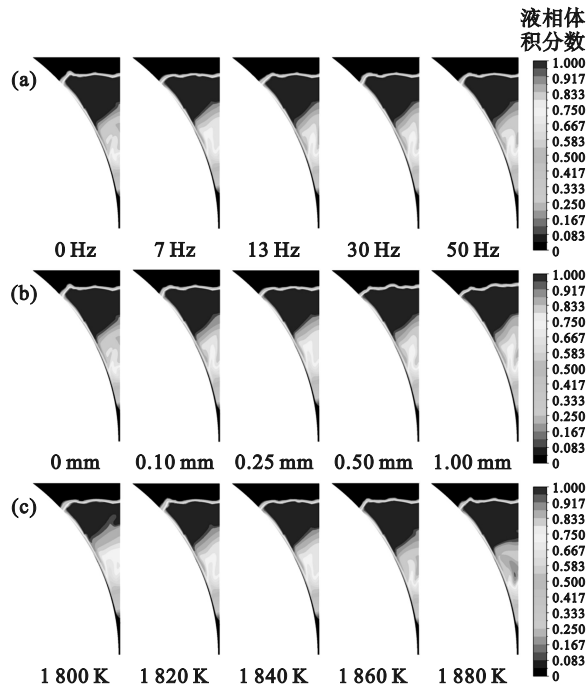


图9 熔池内近侧封板面上的液相体积分数分布

Fig. 9 Liquid volume fraction distribution near side dam in melt pool

(a)—不同振动频率; (b)—不同振幅;
(c)—不同浇铸温度.

2.3 振动幅度对熔池内凝固的影响

图9b展示了不同振幅下的液相体积分数分布.与第2.2节的现象相比,不同之处在于随着振幅的增加,糊状区的面积持续增大,Kiss点的位置

置在振幅0.25 mm前升高后降低.因此,振幅超过0.25 mm是不可取的.与第2.2节类似,由于侧封板处的热流密度大,图10b中Kiss点的高度从左至右缓慢降低,且侧封板上的Kiss点位置更高.通过图11b可以发现,当振幅增加到1.00 mm时,与无振动情况相比,熔池中Kiss点的位置明显降低.这表明振动对熔池中轧制过程的改善作用已经消失,甚至破坏了轧制过程.与第2.2节的结果类似,图12b显示从侧封板到熔池中心的液相体积分数分布呈上升趋势.振幅增至0.10 mm时,液相体积分数明显降低,提高了侧封板和钢液之间的传热效率.

2.4 浇铸温度对熔池内凝固的影响

图9c展示了不同浇铸温度下的液相体积分数分布,与图9a,9b类似,不同的是随着浇铸温度的升高,熔池中糊状区的面积减小.当浇铸温度达到1880 K时,由于辊间高温熔融钢的回流,熔池内开始有糊状区转化为液相部分.这导致熔池内的Kiss点位置降低,轧制区间大幅缩短,对薄带材的成型不利.

图10c表明在不同浇铸温度条件下侧封板附近熔池的凝固分布情况相似.这说明浇铸温度对于侧封板上的凝固影响并不大.比较不同浇铸温度下液相体积分数的分布可以观察到,随着浇铸温度的升高,熔池中糊状区的面积减小.在浇铸温度为1860 K时,布流器水口附近的糊状区开始消失,被钢液所取代.当浇铸温度达到1880 K时,这种现象进一步加强.同时,随着浇铸温度的升高,熔池中Kiss点的高度逐渐降低,这不利于带材的形成.

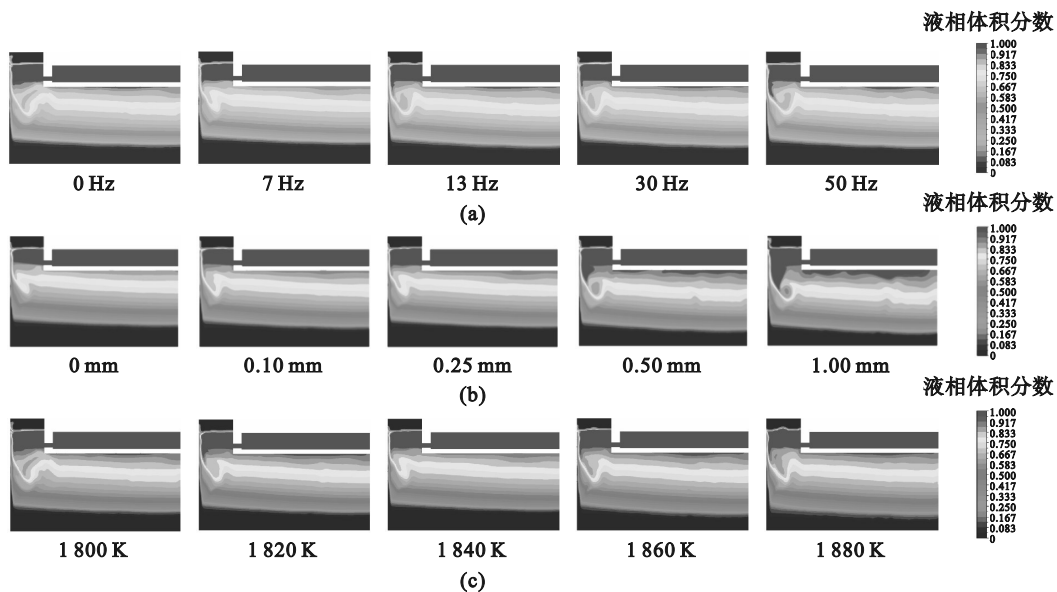


图10 y对称面上的液相体积分数分布

Fig. 10 Liquid volume fraction distribution on y-symmetry plane

(a)—不同振动频率; (b)—不同振幅; (c)—不同浇铸温度.

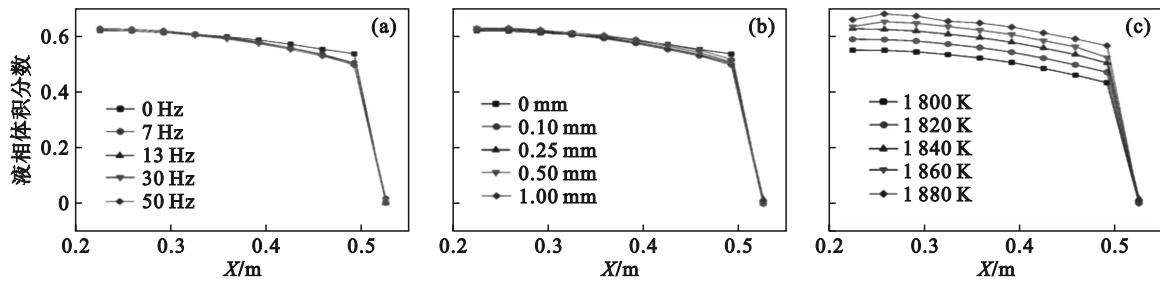


图 11 熔池横向中心处的液相体积分数分布

Fig. 11 Liquid volume fraction distribution at horizontal center of melt pool

(a)—不同振动频率; (b)—不同振幅; (c)—不同浇铸温度.

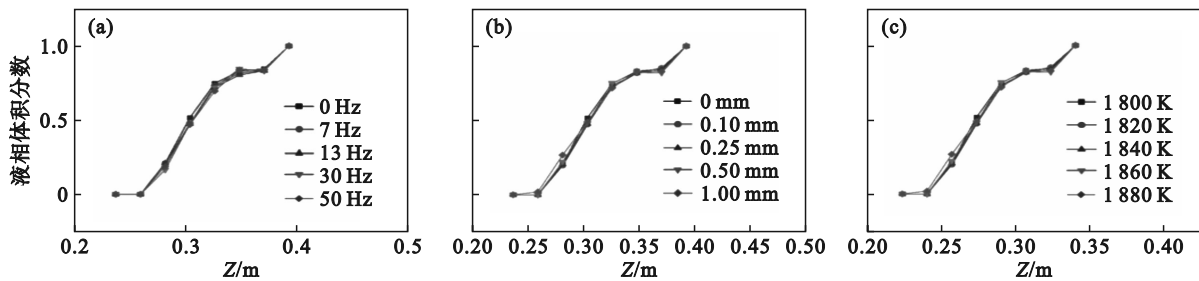


图 12 熔池近侧封板处中心线液相体积分数分布

Fig. 12 Liquid volume fraction distribution on centerline near side dam of melt pool

(a)—不同振动频率; (b)—不同振幅; (c)—不同浇铸温度.

图 12c 显示,液相体积分数从左至右逐渐增大. Kiss 点的位置仍然距离熔池底部出口 0.25~0.30 m. 浇铸温度的升高明显导致熔池中 Kiss 点位置的下降. 图 11c 显示,液相体积分数从左至右呈下降趋势,下降速率先慢后快,这是由于近侧封板处的换热更强,且可以明显看出浇铸温度相较于振动频率和振幅,对于熔池横向中心处的液相体积分数影响是更加显著的.

3 结 论

1) 实验结果表明,随着振动频率的增加,振动样品和非振动样品之间的等效长度差也随之增加. 机械振动的加入会加速金属熔体的凝固速度,其原因是振动有助于金属熔体凝固过程中细小晶核的形成. 同时,随着振动频率的增加,熔融金属的凝固速度进一步加快.

2) 随着振动频率和振幅的提高,熔池内半熔融的糊状区面积逐渐增大. 由于侧封板附近的热流密度高、换热能力强,其下方的凝固速度加快,导致侧封板处液相体积分数减小, Kiss 点从侧封板到熔池中心皆呈现缓慢下降趋势.

3) 振动频率达到 13 Hz 后,振动对熔池内凝固的影响程度没有明显变化.

4) 随着振幅的增加,熔池内 Kiss 点的位置逐

渐升高,但当振幅增至 0.25 mm 后, Kiss 点的位置开始降低. 因此,振幅超过 0.25 mm 是不可取的. 当振幅提高到 1.00 mm 后,熔池内的 Kiss 点位置已明显低于非振动情况下的位置,这时振动对于熔池内轧制过程的改善作用已经消失,甚至会对轧制过程产生破坏.

5) 当浇铸温度达到 1880 K 时,由于辊间高温熔融钢的回流,熔池内开始有糊状区转化为液相部分,使得轧制区间大幅缩短,不利于薄带材的生产.

参考文献:

- [1] Zapuskalov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology [J]. *ISIJ International*, 2003, 43 (8): 1115-1127.
- [2] Omura N, Murakami Y, Li M J, et al. Effects of mechanical vibration on cooling rate and DAS of AC4C aluminum alloy gravity die castings [J]. *Materials Transactions*, 2009, 50(11): 2604-2608.
- [3] Li A, Wang Z M, Sun Z P. Effect of ultrasonic vibration on microstructure and fluidity of aluminum alloy [J]. *Materials*, 2023, 16(11): 4110-4125.
- [4] Wang X, Guan R G, Guo N, et al. Metal solidification-nucleation-rate model under coupling effects of shearing flow and vibration [J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(2): 154-163.
- [5] Currey D A, Pickles C A. Electromagnetic stirring of aluminium-silicon alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 1988, 23(10): 3756-3763.
- [6] Yan H, Rao Y S, He R. Morphological evolution of semi-solid Mg₂Si/AM60 magnesium matrix composite produced

