

● 铸造技术 ●

平面流铸制备非晶薄带熔潭三维流动 换热特性的研究

李永康¹, 杨洋²

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 北京航空航天大学 机械工程与自动化学院, 北京 100191)

摘要:为了研究平面流铸制备非晶薄带过程中熔潭特性沿宽度方向的分布,建立了熔潭形成三维计算模型,应用有限体积法求解控制方程获得熔潭三维流场、温度场以及与冷却辊的换热特性。结果表明:熔潭与非晶薄带成型过程呈明显三维分布,熔体速度与温度分布沿宽度方向不同;非晶薄带在边缘向下弯曲,产生翘曲褶皱;熔潭长度在中部大于两端,中部的合金液冷却速率明显小于两端;熔潭中部的周围气流速度大于两端,但轴向热聚焦效应大于与空气的对流换热,造成冷却辊轴向温度存在明显差异,中部高于两端。综合冷却辊沿轴向的温度非均匀分布以及熔潭长度差异,在宽型非晶薄带制备过程需加强中部的换热,防止带体晶化产生脆性缺陷。

关键词:平面流铸(PFC);非晶薄带;流动换热;数值模拟**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20200538

中图分类号:TG249.9

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2020)17-0057-05

Study on Three Dimensional Flow Heat Transfer Characteristics of Amorphous Thin Strip Molten Pool Prepared by PFC

LI Yongkang¹, YANG Yang²

(1. College of Machinery and Transportation Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, BeiHang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the distribution of molten pool characteristics along the width direction in the process of amorphous thin strip by plane flow casting (PFC), a three-dimensional calculation model of the molten pool formation was established. The three-dimensional flow field, temperature field and heat transfer characteristics with cooling roller were obtained by using finite volume method. The results show that the forming process of the molten pool and amorphous thin strip is obviously three-dimensional distributed, and the distribution of melt speed and temperature is different along the width direction; amorphous thin strip bends downward in the edge, resulting in warping fold; the length of the molten pool is larger in the middle than that in the two ends, and the cooling rate of the alloy in the middle is obviously smaller than that in the two ends; the air velocity in the middle of puddle is larger than that in the two ends, but the axial heat focusing effect is greater than the convective heat transfer with air, the axial temperature of cooling roller is significantly different, and the middle part is higher than the two ends. According to the temperature distribution along the axis of the cooling roller and the length difference of the melting pool, it is necessary to strengthen the heat exchange in the middle of the preparation process of the wide amorphous strip, so as to prevent the brittleness defects caused by the crystallization of the strip.

Key words: plane flow casting (PFC); amorphous thin strip; flow heat transfer; numerical simulation

Fe-Si-B 非晶薄带具有优异的压力敏感特性与磁导率,广泛应用于高精度传感器与变压器等领域。非晶薄带主要采用单辊法平面流铸工艺制备,平面

流铸过程中熔潭流动、换热特性决定了非晶薄带厚度、宽度等几何特性以及表面质量^[1-2]。随着非晶薄带的广泛应用,大带宽成为其发展方向^[3]。然而,随着薄带宽度的增大,合金液对冷却辊热作用增强,冷却辊轴向非均匀受热使辊面产生明显变形差,进而影响薄带的横向厚度一致性;同时,受冷却辊换热效率的制约,合金液冷却速率明显下降,非晶性不足,产生脆性缺陷,成为制约宽型非晶薄带质量的主要瓶颈。为此,急需研究平面流铸过程中熔潭的三维流

收稿日期:2020-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905370);山西省高等学校科技创新项目(2019L0244)

作者简介:李永康(1985-),男,山西定襄人,讲师,博士,主要研究方向:流动传热数值计算、机构学与机器人;电话:13403514545;

E-mail:buaalyk@qq.com

动、热传递特性以及对合金液冷却速率的影响,为宽型非晶薄带制备提供参考。

平面流铸过程中合金液的冷却速率为 10^6 K/s, 成型时间短, 很难通过实验方法来研究熔潭形成过程的流动与传热特性, 数值模拟成为分析熔潭特性的主要方法。Liu 采用数值模拟方法建立熔潭区内自由表面形成的熔体流动和相变传热的二维数值模型, 全面地分析了熔潭成型过程中的流动、换热特性^[4]。Su 等采用流体动力学法在二维简化平面内对平面流铸工艺中的熔潭形成过程进行了分析, 模拟结果表明工艺参数对熔潭形成及相应的流动与传热行为有着重要影响^[5-6]。近年来, 计算机技术的发展, 使熔潭成型的三维数值计算成为可能。仇灏等基于三大控制方程与多相流模型, 研究熔潭周围的气流边界层对熔潭的流动、传热和凝固行为的影响^[7]。

综上所述, 现有针对熔潭流动特性及与冷却辊换热问题的研究主要集中在简化二维平面。然而, 熔潭的形成、熔体的流动和传热都呈三维分布, 为深入了解熔潭形成过程中液固旋转界面的热量传递、合金液与冷却辊换热沿宽度方向的分布, 应用多相流模型模拟熔潭的凝固模型, 研究非晶薄带成型中熔潭与冷却辊的热量传递, 冷却辊温度以及合金液冷却速率沿宽度方向的分布, 为优化宽型非晶薄带制备工艺提供依据。

1 数值计算模型

1.1 平面流铸物理模型

非晶薄带制备装置主要包括冷却辊、坩埚、吹气装置和间距调节装置等, 如图 1 所示。坩埚中的高温合金液在气体压力和自身重力作用下从坩埚底部狭缝喷射到冷却辊外壁, 在喷嘴和冷却辊之间形成熔潭, 随着冷却辊高速旋转, 合金液被拖出熔潭, 经与

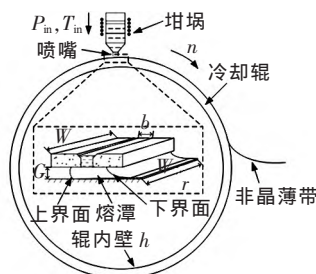


图 1 平面流铸制备非晶薄带示意图
Fig.1 Schematic diagram of amorphous strip prepared by PFC

冷却辊、周围空气对流换热, 极速冷却形成非晶态薄带, 由卷取装置进行卷取^[3]。

影响非晶薄带制备的主要参数为合金液入口压力 P_{in} 、喷嘴与冷却辊间隙 G 、冷却辊转速 n 、喷嘴狭缝 b 和喷嘴狭缝宽度 W , 具体参数如表 1 所示。

表 1 平面流铸工艺参数
Tab.1 Process parameters of PFC

名称	数值
冷却辊直径 D/mm	1600
喷嘴狭缝宽 b/mm	0.6
喷嘴宽 W/mm	20
冷却辊转速 $n/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	30
喷嘴-冷却辊间距 G/mm	0.4
喷射压力 P_{in}/kPa	20

1.2 基本假设

根据上述参数发现熔潭、冷却辊与薄带存在较大的尺寸差异, 冷却辊直径与熔潭的尺寸相差四个数量级, 相对于熔潭尺寸, 冷却辊直径为相对无穷大。为了提高求解效率, 将冷却辊外壁简化为一个平面, 将冷却辊的旋转运动视为平面平移。其他必要的假设如下^[8]:

(1) 由于喷嘴-冷却辊间距很小, 便于求解 N-S 方程, 假定熔体和空气流动为层流, 且没有压缩。

(2) 各接触区接触良好, 熔体、冷却辊与喷嘴壁接触表面均无相对滑移。

(3) 合金液的物理性质除运动粘度外均与温度无关, 粘度 μ -温度 T 关系为:

$$\mu=0.1 \times \exp[-3.6528+734.1/(T-674)] \quad (1)$$

(4) 为描述熔潭上、下自由面的形成过程, 采用 VOF 多相流模型来模拟合金液冷却过程中的相变。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中: F 是计算网格中控制单元的相位标量函数, 不同值的含义为: 当 $F=0$ 时, 混合域为全空气; 当 $0 < F < 1$ 时, 混合域为空气与合金液体的混合; 当 $F=1$ 时, 混合域为全液体相; u_i 为流动过程速度分量。

1.3 计算模型与边界条件

根据计算参数建立了平面流铸三维几何模型, 如图 2(a) 所示。在喷嘴区添加压力入口边界条件, 代表冷却辊的固体域添加速度边界; 坩埚壁为固体固定边界条件, 其下部为混合区, 用于求解熔潭形成与凝固过程中的多相流求解域。为了提高计算精度, 对关键区域的网格进行局部细化, 特别是在混合区

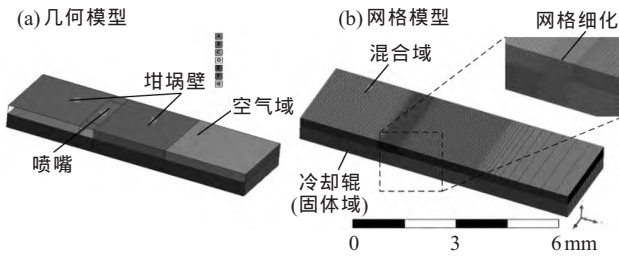


图2 几何模型与网格模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of geometric model and grid model

和熔体入口,网格模型如图2(b)所示。

模型的具体边界条件如下:

(1) 喷嘴即熔体入口:压力入口边界条件,入口温度 $T_{in}=1533\text{K}$, 初始入口压力 $P_{in}=20\text{kPa}$ 。

(2) 坩埚壁:坩埚壁不发生热交换,在坩埚内壁设置绝热边界条件。

(3) 冷却辊内壁:冷却辊内壁与冷却水之间存在热对流,因此在辊内壁设置传热系数 h_{in} ,该系数随冷却水通道高度的变化而变化,并引入雷诺数,在目前工作参数下, $h_{in}=23000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 。

(4) 进排气口:设定压力边界条件,相对压力为0。

(5) 冷却辊:根据冷却辊转速和辊径,计算辊面速度 $n=30\text{m/s}^{[9]}$ 。

1.4 数值计算方法

根据边界条件,采用控制体积法求解平面流铸过程的数值模型。应用移动坐标系考虑冷却辊旋转,用VOF多相流方法描述熔体凝固过程中的相变,用显式方程求解体积分方程。考虑合金液冷却时间极短,初始迭代步长为 10^{-8}s ,当合金与冷却辊接触后,调整步长为 10^{-6}s 。

2 结果与讨论

2.1 熔潭瞬态形成过程

熔潭三维形状随时间的演变如图3所示。

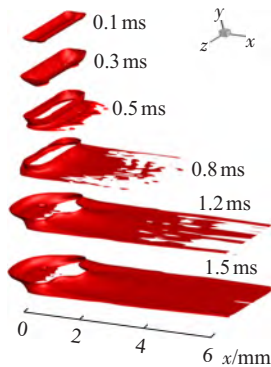


图3 熔潭瞬态成型过程

Fig.3 Transient molding process of the pool

当熔体在初始喷射时 $t=0.1\text{ms}$,合金液形状主要受喷嘴狭缝形状、液体张力和惯性力的影响,熔池呈弧形,底部向内凹陷;当熔体开始与冷却辊外壁接触时 $t=0.3\text{ms}$,熔体明显向内收缩,张力作用大于喷嘴内壁对合金液的边界效应,熔体横向边缘部位先与冷却辊外壁接触;当熔体与冷却辊外壁完全接触 $t=0.5\text{ms}$ 时,熔体上下自由面开始出现,熔体几何尺寸进一步扩大,由于冷却辊的旋转,大量熔体沿辊旋转方向被拖出;在 $t=0.8\text{ms}$ 时,冷却辊外壁积聚的熔体受周围空气换热与冷却辊旋转影响,熔潭横向两侧的自由表面开始形成。受入口压力与周围空气换热对粘度的影响,合金液中部流速大于两端,熔潭横向中部长明显大于两端;当薄带 $t=1.2\text{ms}$ 时,冷却辊的冷却作用使合金液凝固,在薄带形成初始时刻,合金液流动不连续,使薄带产生中心气孔,是导致薄带状物在初始阶段出现不连续的原因。当熔潭达到稳定状态 $t=1.5\text{ms}$,断带现象消失,熔潭形状和速度的分布不再随时间改变。

2.2 熔潭稳态三维分布

为了进一步分析熔潭稳定后的形态,分别研究熔潭沿薄带运动方向即冷却辊周向 x 和薄带横向即冷却辊轴向 z 的分布。

(1) 沿周向 x 的熔潭分布

当熔潭达到稳定后,沿周向 x 分别取不同横截面如图4所示。

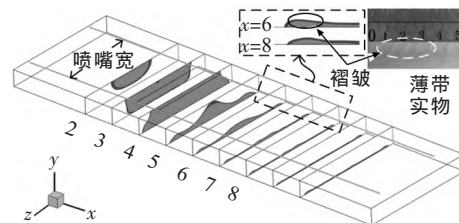


图4 熔潭沿 x 方向分布(mm)

Fig.4 Distribution of the molten pool in x direction (mm)

由于内部液体张力的作用,熔潭上游底部呈弧形分布,没有与冷却辊接触;在熔潭及下游位置,熔潭在宽度方向两端突出,导致熔潭宽度沿周向先增大后减小,最终宽度大于喷嘴宽,进而使得薄带宽度稍大于喷嘴宽度。

此外,在熔潭下游位置,中部的熔潭高度大于两端,随着冷却辊的旋转,下自由面高度和波动沿周向逐渐减小并趋于统一。从不同周向截面 $x=6、8\text{mm}$ 处的熔潭分布看到,薄带在边缘位置向下弯曲,这是由于两端的周围空气温度低于其它位置,从而导致

薄带在宽度边缘的紧密收缩,从而使薄带两端形成褶皱,这一情况与薄带的实际情况吻合较好。

(2) 沿轴向 z 的熔潭分布

熔潭沿冷却辊轴向 z 的分布如图 5 所示。从图中发现熔潭形状沿中心平面 $z=0$ 对称分布,且沿宽度方向存在明显差异,越靠近边缘,熔潭长度越小。熔潭下边界长度在中心位置远大于两端,上边界也有相同的分布,这样导致熔潭中部长于两端。

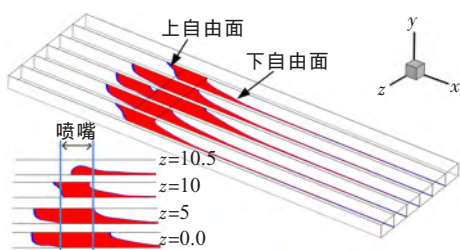


图 5 熔潭沿 z 向分布(mm)
Fig.5 Distribution of molten pool in z direction (mm)

熔潭长度对合金液冷却速率的影响具体表现在对合金液冷却时间的影响。合金液的冷却时间 Δt 可描述为:

$$\Delta t = \frac{L}{V_r} \quad (3)$$

则合金液的冷却速率 K 为:

$$K = \frac{T_{in} - T_g}{\Delta t} \quad (4)$$

综合(3)、(4)式,得到合金液的冷却速率 K 的表达式为:

$$K = (T_{in} - T_g) \frac{V_r}{L} \quad (5)$$

式中: L 为熔潭长度; V_r 为冷却辊辊速; T_{in} 为合金液的初始温度; T_g 为合金液的玻璃化温度。

由上所述,熔潭宽度中部的冷却速率低于两端,随着薄带宽度的增大,对中部的冷却速率更为不利,需加强中部换热。

2.3 混合域速度与温度的分布

速度的分布会影响温度的分布。本节研究熔潭内部与周围气流的流速分布、熔潭温度以及与冷却辊间的热量传递。

(1) 混合域速度分布

图 6 为熔潭达到稳定后,轴向宽度方向不同截面气流与熔潭速度矢量与流线分布。从图中看出,受合金液粘性的影响,熔潭流速随距冷却辊外壁距离的增加而减小。横向不同截面的速度分布不同,中

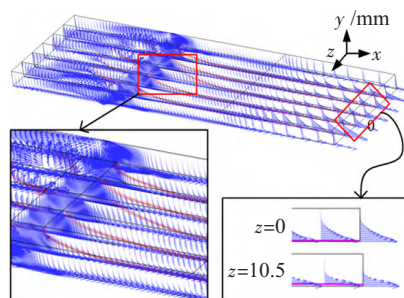


图 6 熔潭区的速度矢量图
Fig.6 Velocity vector in molten pool area

部的速度大于两端,这是由于熔潭表面张力与合金液粘度随温度变化共同作用的结果。熔潭周围气流在中部的速度也明显大于两端。同时发现,受冷却辊旋转,熔潭上游的气体向熔潭聚焦,呈紊乱形态,而熔潭下游的气体远离熔潭,流动较为稳定。

(2) 混合域温度分布

混合域内熔潭边界的温度分布如图 7(a)所示。受气流和液体张力的影响,熔潭边界在上下自由面附近的气流呈弧形分布,与熔潭轮廓类似。熔潭上自由面温度保持初始温度 1553 K,受熔潭与冷却辊热对流作用,熔潭下自由面温度逐渐降低并凝固,最终降至 400 K 左右。由于熔潭与周围空气之间存在热对流,熔潭周围空气的温度急剧升高,离熔潭越近,温度升高越明显。同时发现熔潭上游的气流高温区范围明显大于下游,这是由于受冷却辊旋转,熔潭上游气流向熔潭聚焦,温度升高明显;而熔潭下游的气流远离熔潭,换热明显,其高温区小于上游。

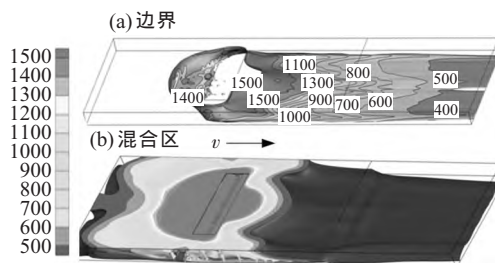


图 7 混合区温度分布(K)
Fig.7 Temperature distribution of the mixture zone (K)

与熔潭接触的冷却辊辊面温度分布如图 8(a)所示。当熔潭与冷却辊外壁接触时,辊面温度迅速升高,受冷却辊的热传导与空气散热的共同影响,辊面温度先急剧下降然后变缓。冷却辊不同宽度位置温度分布不同,宽度中部的温度在喷嘴域内存在较小温差,在超过喷嘴域(10mm)后,在 $z=12.5$ mm 位置,受辊内导热的热扩散影响,温差明显增大。

熔潭与冷却辊形成的液固耦合界面温度分布如

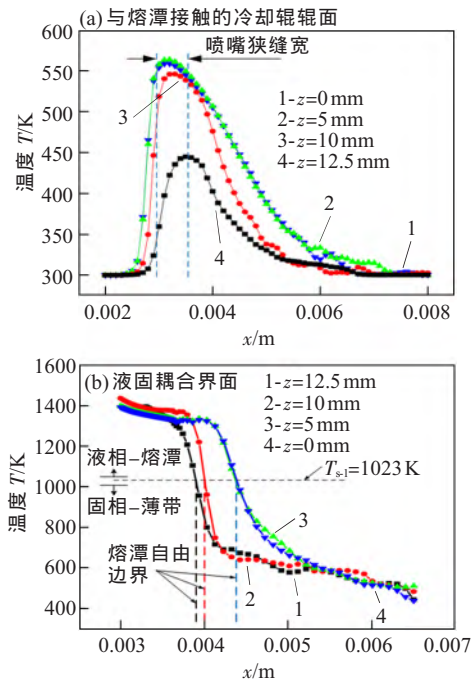


图8 液固耦合界面温度分布
Fig.8 Temperature distribution of liquid-solid coupling interface

图8(b)所示。在熔潭接触区,受冷却辊换热影响,温度沿冷却辊旋转方向先缓慢下降然后加剧,这是由于熔潭的形成使其长度内温度保持一定高温,当超过熔潭下游界面时,受冷却辊热传导,温度急剧下降,当低于固相温度1023 K后,合金液凝固成固相的薄带;在固相区域,受热扩散效应的影响,温度先快速下降然后变缓。轴向不同位置熔潭自由边界位置不同,中部位置的边界长度大于两端。

同时,不同宽度位置接触区温度存在明显差异,主要体现在沿宽度方向的温度下降率即合金液的冷却速率不同。以合金液相变温度为1023 K为例,在宽度的中部,合金液的冷却速率明显小于两端,出现这种情况的原因有两种:①受热聚焦效应影响,冷却辊宽度中部的温度高,换热效果差;②虽然熔潭周围宽度中部的空气流速快,但空气温度远高于两端,高温合金液热聚焦效应大于空气的流动效应,从而使中部的换热变差。在这两种因素综合作用下,合金液宽度中部的冷却速率下降。在设计冷却辊时,要加强中部的换热,特别是宽型非晶薄带的制备,如不加强

冷却辊宽度方向中部的换热,合金液的冷却速率下降会使带体部分晶化,产生脆性缺陷,严重影响非晶薄带的质量。

3 结论

(1) 熔潭与非晶薄带的形成过程中的温度与流动特性呈三维分布,熔潭上游的气流速度大于下游,是影响熔潭稳定性与薄带表面质量的关键。

(2) 由于液体表面张力和熔体凝固收缩,非晶薄带在边缘处向下弯曲,产生带体翘曲褶皱;熔潭长度在宽度中部大于两端,而合金液冷却速率中部小于两端。

(3) 熔潭宽度中部的气流速度大于两端,但轴向热聚焦效应大于与空气的对流换热,冷却辊轴向温度存在明显差异,中部温度远大于两端。

参考文献:

- [1] 翟薇,常健,耿德路,等. 金属材料凝固过程研究现状与未来展望[J]. 中国有色金属学报,2019(9):1953-2008.
- [2] 蒋达国,付远,朱正吼,等. FeSiB 非晶薄带的磁感应效应[J]. 热加工工艺,2010,39(10):44-46.
- [3] 鲍丙豪,蒋峰,孙超. 低频脉冲电流退火对 CoFeSiB 非晶薄带巨磁阻抗效应的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(8):1346-1349.
- [4] Liu H, Chen W, Liu G. Parametric investigation of interfacial heat transfer and behavior of the melt puddle in planar flow casting process by numerical simulation [J]. ISIJ International, 2009,49(12):1895-1901.
- [5] Su Y G, Chen F, Wu C Y, et al. Simulation for the effect of wetting conditions of melt puddle on the Fe-Si-B ribbon alloy in the planar-flow melt-spinning process[J]. ISIJ International, 2017,57(1):100-106.
- [6] 孙海波,李烈军. 平流铸造 Fe78Si9B13 非晶合金薄带流动与传热的数值模拟 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015,43(11):67-74.
- [7] 仇灏,刘雨,刘和平. 平面流铸造制备非晶带材过程中气流边界层影响熔潭行为的数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2018,47(5):88-92.
- [8] 李永康,杨洋,宋言明. 非晶制带冷却辊热流与温度场数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(4):53-58.
- [9] 向青春,李荣德,周彼德,等. 平面流铸造技术熔潭的特性[J]. 沈阳工业大学学报,2000,22(4):273-276.