

平板流铸工艺中冷却辊的温度场数值模拟

郭茜, 严密

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用有限元分析方法 (Finite Element Analysis, FEA) 对平板流铸工艺 (Planar-flow Melt Spinning, PFMS) 生产非晶带材过程中的冷却辊进行了稳态温度场数值模拟, 获得了冷却辊温度场及其热流的分布特点, 并探讨了辊外径、辊厚、辊速 3 个参数对辊表面温度的影响规律。结果表明: 增大辊外径, 减小辊厚, 降低辊速, 均有助于降低辊面温度。由正交试验结果可知, 对辊外表面温度的影响作用由大到小的顺序依次为辊厚、辊速、辊外径; 对辊内表面温度的影响作用由大到小的顺序依次为辊速、辊外径、辊厚。最后通过综合平衡分析, 得出了能将辊面温度控制在目标范围内的参数优化设计方案。此项研究为非晶带材平板流铸成形的模具设计及工艺优化实践提供了理论支持。

关键词: 有限元; 数值模拟; 温度场; 冷却辊; 参数设计

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)08-2048-05

杂乱无序的原子排布使得非晶态合金具备比传统晶态合金更为优异的物理、化学以及机械性能, 尤其是具有一般晶态合金无法比拟的优良磁性。目前非晶态合金的理论研究和应用开发已涵盖了过渡金属基软磁材料、过渡金属-稀土类金属磁光材料、稀土参杂磁致冷材料等多个领域, 在电力、航空、航天、微电子等众多行业拥有非常广阔的应用前景^[1-5]。

目前, 平板流铸工艺 (PFMS) 是最适用于工业生产非晶合金的制备方式之一。该工艺的最大特点是能以每秒数十米的速度连续生产非晶带材, 并且能按需调节带材的制备宽度^[6,7]。然而在实际生产过程中经常会出现带体非晶度下降甚至完全晶化的现象, 这是因为大量高温熔体在短时间内将其热量转移到冷却辊上, 致使冷却辊表面温度急剧上升, 降低了辊的冷却能力^[8]。由此可见, 要实现非晶带材的高成品率和高效率生产, 准确把握冷却辊温度场分布特征及其影响因素, 从而采取措施将辊温恒定到一个允许的范围是非常必要的。

由于在 PFMS 工艺过程中对温度场进行直接测量十分困难^[9], 因此目前可用的实验数据较少。庞云舟等人^[10]曾通过建立方程对冷却辊温度场进行了简单的估算, 但是该过程忽略了冷却条件。Liu Heping 等人^[11]采用控制体积法模拟分析了辊面与熔融金属的耦合温度场分布特征, 但模型没有考虑辊面沿其轴向的温度分布。针对以上不足, 本工作拟采用 ANSYS 有限元分析软件对冷却辊温度场进行较为详细的数

值模拟, 并探讨冷却辊的辊外径 (D)、辊厚 (T) 和辊速 (S) 对辊面温度的影响规律, 从而为非晶带材平板流铸成形的模具设计及工艺优化实践提供有力的理论支持。

1 模型的建立

1.1 边界条件

依据水道结构形式的不同, 一般可将现有冷却辊分为环形、打孔、铣槽、螺旋 4 种, 其中, 打孔、铣槽、螺旋 3 种结构均是在环形结构的基础上发展变化而来。为了从本质上揭示冷却辊温度场分布特点及各因素对它的影响规律, 本工作选取环形冷却辊 (几何模型为空心圆柱体) 进行数值模拟分析。

环形冷却辊工作时, 其外表面与带材接触的每一点会受到周期性的热作用, 即带材加载在辊外表面的热流密度为一周期性函数。由于该周期性函数尚无法确定, 故采用等效的平均热流密度模型^[10]。此外, 冷却辊内表面受到环形流动冷却水的冷却作用, 界面对流换热系数 h 由 Dittus-Boelter 经验公式计算求得^[12]。模拟所用参数如表 1 所示。

考虑到几何模型及其热边界条件具有高度对称性, 本文最终选取环形冷却辊小段弧度且沿其轴向宽度的一半作为模拟的计算区域, 如图 1 所示。

1.2 基本假设

为突出主要影响因素同时简化计算过程, 现对模型提出如下合理假设: (1) 非晶带材释放的热量全部

收稿日期: 2014-08-28

作者简介: 郭茜, 女, 1988 年生, 硕士生, 浙江大学材料科学与工程学系, 浙江省新型信息材料技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310027, 电话: 0571-87952730, E-mail: guo_xi_0605@163.com

传给冷却辊，忽略带材自身的辐射散热和与周围空气间的对流换热；(2) 非晶带材与冷却辊接触良好；(3) 除了与带材接触的外表面和与冷却水接触的内表面，冷却辊其他表面由于界面换热系数很小而设定为绝热边界条件；(4) 冷却辊材料的热物性参数为各向同性，且不随温度变化而变化。

2 结果与讨论

2.1 冷却辊稳态温度场特征分析

由于平板流铸成形工艺开始后整个系统会迅速达到一个准稳态，此时冷却辊的温度基本保持不变，本工作重点关注的即是进入准稳态后的冷却辊温度场分布特征。图 2a、2b 分别显示了辊外径 $D=1000$ mm，辊厚 $T=10$ mm，辊速 $S=30$ m/s 的冷却辊在稳定状态下的温度分布和热流分布。

从图 2 可以看出，辊外表面与带材中心接触处(A 点) 出现了整个温度场的最大值，也即辊外表面最高温度。辊内表面温度最高点(B 点) 位置与辊外表面最高温度点(A 点) 垂直相对应。此外，热流分布最大值出现在辊外表面对应带材边界处(C 点)。冷却辊自 A 点向 C 点扩展的大部分区域内，热流是沿辊径向的一维流，而 C 点附近较窄范围内的热流呈现二维分布。由此可知，当带材宽度明显小于冷却辊轴向宽度时，不能将传热过程简化为只沿辊径方向的一维热传

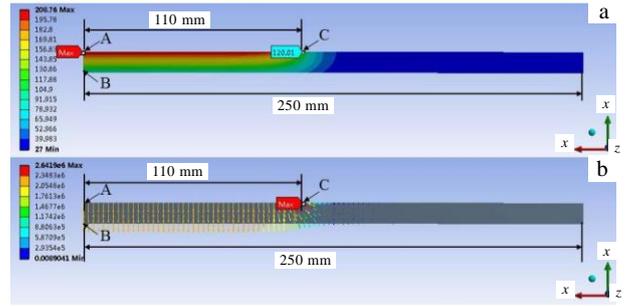


图 2 冷却辊的温度和热流分布示意图

Fig.2 Temperature (a) and total heat flux (b) of the roll ($D=1000$ mm, $T=10$ mm, $S=30$ m/s)

导^[10]，还需考虑带材边界区域内出现的沿辊轴方向上的传热。且由于热流分布存在的此项差异，使得与带材中心区域接触的辊面温度明显高于与带材边界区域接触的辊面温度，这将对带材的凝固过程产生反作用，造成带材中心区域的冷却速率慢于边界区域的冷却速率，甚至中心区域因冷却不足而产生组织晶化^[8]。

2.2 单因素试验分析

为研究辊外径 D 对辊面温度的影响规律，分别在 $D=800, 1000, 1200, 1400, 1600$ mm 的条件下对冷却辊进行稳态温度场模拟（注：辊厚保持不变，辊内径为辊外径与辊厚之差）。图 3 为冷却辊外表面和内表面的最高温度随 D 的变化曲线。图 3 显示，辊外表面最高温度随 D 的增大而下降，下降幅度逐渐减小，且应存在一个极值，当 D 大于该值后，辊外表面温度不再出现明显改变。另一方面，随着 D 的增大，辊内表面最高温度呈现稳定的小幅度的下降。

为研究辊厚 T 对辊面温度场的影响规律，分别在 $T=5, 10, 15, 20, 25$ mm 的条件下对冷却辊进行稳

表 1 模拟计算参数

Table 1 Parameters for simulation

Item	Value
Temperature gradient of alloy/ $^{\circ}\text{C}$	1000
Density of alloy/ kg m^{-3}	7200
Specific heat of alloy/ $\text{kJ (kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}^{-1}$	0.5633
Latent heat of fusion of alloy/ kJ kg^{-1}	494
Width of ribbon/m	0.22
Thickness of ribbon/m	0.00003
Thermal conductivity of cooling roll/ $\text{W (m} \cdot ^{\circ}\text{C)}^{-1}$	180
Width of cooling roll/m	0.5
Convection coefficient/ $\text{W (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}^{-1}$	$2.5 \times 10^4 \sim 4.4 \times 10^4$

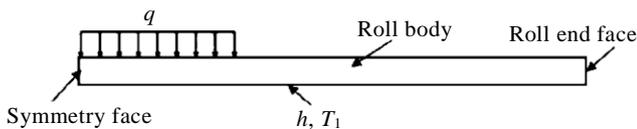


图1 给定换热边界条件下的几何模型

Fig.1 Model with specified boundary conditions (q -heat flux, h -convection coefficient, T_1 -ambient temperature)

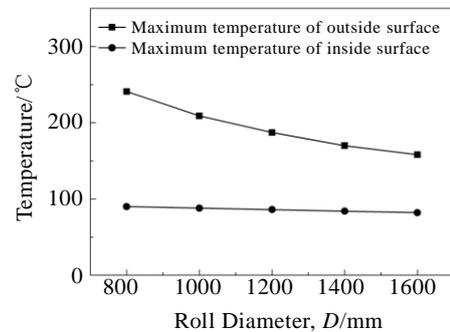


图 3 冷却辊外表面和内表面的最高温度随辊外径的变化曲线

Fig.3 Maximum temperature of roll's surfaces under different roll diameters D

态温度场模拟（注：辊外径保持不变，辊内径为辊外径与辊厚之差）。图 4 为冷却辊外表面和内表面的最高温度随 T 的变化曲线。图 4 显示，随着 T 的增加，辊外表面最高温度呈明显的线性增大，而辊内表面最高温度基本保持不变。

为研究辊速 S 对辊面温度场的影响规律，分别在 $S=20, 25, 30, 35, 40$ m/s 的条件下对冷却辊进行稳态温度场模拟。图 5 为冷却辊外表面和内表面的最高温度随 S 的变化曲线。图 5 显示，辊外表面最高温度和辊内表面最高温度均随着 S 的增大而呈现明显的线性增长。

比较图 3、图 4、图 5 的结果分析可知，辊外径 D 、辊厚 T 、辊速 S 对辊表面温度有着不同的影响规律，这是因为各因素的作用方式不同。增大 D 即增大了冷却辊的外表面积，因此与带材接触的每一点所受平均热流密度就会减小^[10]，从而有助于降低辊面温度。另一方面， D 的增大会使辊内表面与冷却水的界面换热系数 h 发生较为明显的下降，因而削弱了散热，最终导致辊内表面温度变化不明显。 T 主要影响传热热阻^[11]，

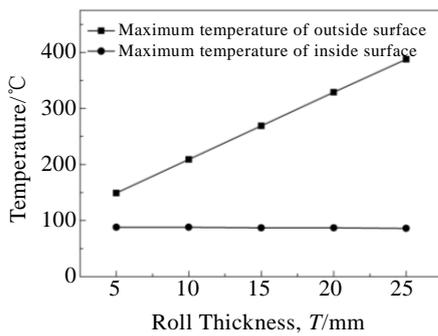


图 4 冷却辊外表面和内表面的最高温度随辊厚的变化曲线
Fig.4 Maximum temperature of roll's surfaces under different roll thickness T

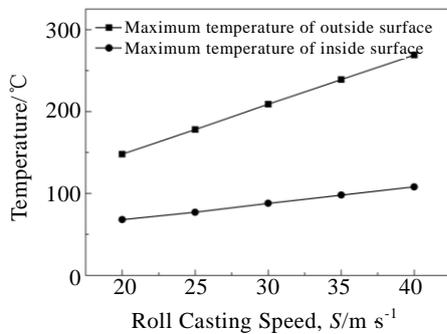


图 5 冷却辊外表面和内表面的最高温度随辊速的变化曲线
Fig.5 Maximum temperature of roll's surfaces under different roll casting speeds S

T 越小，则热阻越小，越有助于热量从辊的上表面传至下表面。提高 S 会缩短熔融金属总的浇注时间，则辊外表面与带材接触的每一点在单位时间内接触的熔融金属流就会增多，从而间接增大了辊面受到的平均热流密度（假设带材厚度保持不变），最终导致辊面温度升高^[13]。

2.3 多因素正交试验分析

同时选取辊外径 D 、辊厚 T 、辊速 S 为影响因素，各因素的取值如表 2 所示，采用正交试验法对冷却辊进行了稳态温度场数值模拟。

图 6a、6b 分别为 $D=800$ mm 时冷却辊在不同 T - S 配合下的外表面和内表面最高温度示意图。图 7a、7b 分别为 $D=1000$ mm 时冷却辊在不同 T - S 配合下的外表面和内表面最高温度示意图。图 8a、8b 分别为 $D=1200$ mm 时冷却辊在不同 T - S 配合下的外表面和内表面最高温

表 2 因素水平表

Table 2 Factors levels			
Factors lever	Roll diameter, D /mm	Roll thickness, T /mm	Roll casting speed, S /m s ⁻¹
1	800	5	25
2	1000	10	30
3	1200	15	35
4	1400	20	40

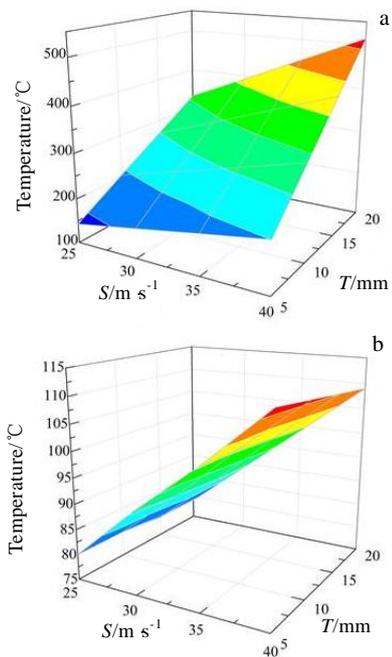


图 6 辊外径 800 mm 的冷却辊在不同辊厚-辊速配合下的外表面最高温度和内表面最高温度
Fig.6 Outside surface's maximum temperature (a) and the inside surface's maximum temperature (b) of the roll with different thickness T and casting speed S ($D=800$ mm)

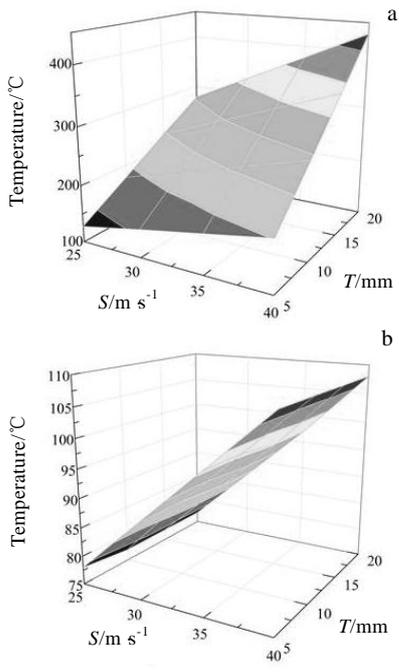


图 7 辊外径 1000 mm 的冷却辊在不同辊厚-辊速配合下的外表面最高温度和内表面最高温度

Fig.7 Outside surface's maximum temperature (a) and the inside surface's maximum temperature (b) of the roll with different thickness T and casting speed S ($D=1000$ mm)

度示意图。图 9a、9b 分别为 $D=1400$ mm 时冷却辊在不同 T - S 配合下的外表面和内表面最高温度示意图。

通过对正交试验模拟结果分析可知,能将辊面温度控制在目标范围内(辊外表面温度 <200 °C,辊内表面温度 <100 °C)的 D - T - S 参数配合有 800 mm-5 mm-25 m/s、1000 mm-10 mm-25 m/s、1200 mm-10 mm-30 m/s、1400 mm-10 mm-35 m/s 等 19 种方案。但是,在实际生产过程中还需考虑这些因素对其他性能指标的影响。如辊外径越大虽有助于降低辊面受到的平均热流密度,但会相应提高控制工艺稳定性的难度;减小辊厚虽可降低辊面温度,但同时也会降低冷却辊的机械强度,使得冷却辊因不能有效抵抗熔融金属的高压冲刷而产生变形等问题;增大辊速虽然不可避免地会导致辊面温度升高,却有助于提高带材的表面质量^[14]。因此,通过综合平衡分析各项指标,本工作最终选取 1200 mm-10 mm-30 m/s 为最优的 D - T - S 参数配合方案。

此外,通过对正交试验结果进行极差分析还可得到各因素对冷却辊温度场影响作用大小的规律:对辊外表面温度影响作用由大到小的顺序依次为辊厚、辊速、辊外径;对辊内表面温度的影响作用由

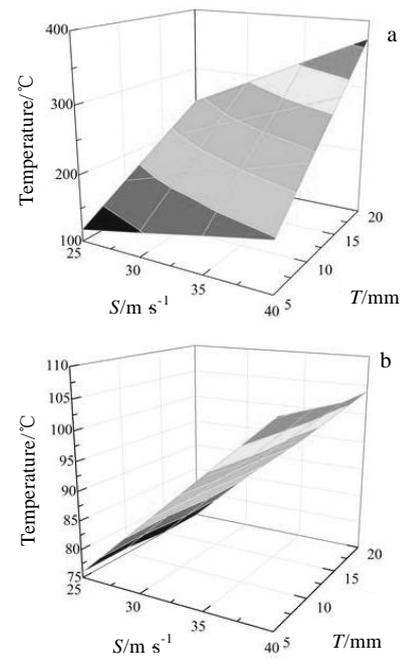


图 8 辊外径 1200 mm 的冷却辊在不同辊厚-辊速配合下的外表面最高温度和内表面最高温度

Fig.8 Outside surface's maximum temperature (a) and the inside surface's maximum temperature (b) of the roll with different thickness T and casting speed S ($D=1200$ mm)

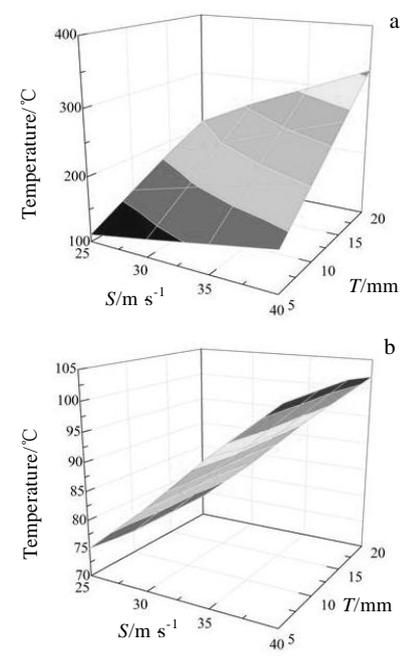


图 9 辊外径 1400 mm 的冷却辊在不同辊厚-辊速配合下的外表面最高温度和内表面最高温度

Fig.9 Outside surface's maximum temperature (a) and the inside surface's maximum temperature (b) of the roll with different thickness T and casting speed S ($D=1400$ mm)

大到小的顺序依次为辊速、辊外径、辊厚。

3 结 论

1) 通过有限元数值分析可知, 在平板流铸工艺制备非晶带材过程中, 当带材宽度明显小于冷却辊轴向宽度时, 冷却辊中心区域为沿辊径方向的一维热传导, 边界区域为沿辊径和辊轴方向的二维热传导。

2) 通过单因素及多因素正交模拟试验可知, 增大辊外径, 减小辊厚, 降低辊速, 均有助于降低辊面温度。其中, 对辊外表面温度的影响作用由大到小的顺序依次为辊厚、辊速、辊外径; 对辊内表面温度的影响作用由大到小的顺序依次为辊速、辊外径、辊厚。

3) 通过综合平衡各项指标分析得出, 针对 220 mm 宽非晶带材生产, 可将辊面温度控制在目标范围(外表面 $<200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 内表面 $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$)的最优辊外径-辊厚-辊速参数配合方案为: 1200 mm-10 mm-30 m/s。

参考文献 References

- [1] He Shengjing(何圣静), Gao Liru(高莉如). *Amorphous Material and Application*(非晶态材料及其应用)[M]. Beijing: China Machine Press, 1987
- [2] Hasegawa Ryusuke. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 375-377: 90
- [3] Herzer Giselher. *Acta Materialia*[J], 2013, 61: 718
- [4] Tang Pengfei(唐鹏飞). *Preparation, Magnetic Properties and Magnetocaloric Effect of Gd-based Solid Solution and Rare Earth-transition Metal Amorphous Ribbons*(Gd 基固溶体与稀土一过渡金属非晶条带的制备、磁性及磁热效应)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011
- [5] Peng Hao(彭浩), Zhao Ping(赵平), Li Shuangshou(李双寿) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 365
- [6] Mao Zhonghan(毛忠汉), Chu Jieying(褚洁英), Fan Hongtao(范洪涛) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1980(1): 10
- [7] Wang Bingxia(王冰霞), Wang Xin(王鑫). *Journal of Tianshui Normal University*(天水师范学院学报)[J], 2007, 27(2): 68
- [8] Du Yuxi(杜毓铤), Zhang Chuanli(张传历), Ma Hongliang(马鸿良) et al. *Iron and Steel*(钢铁)[J], 1982, 17(7): 39
- [9] Liu Feng(刘峰), Zhang Jinyuan(张晋渊), Zhang Ke(张珂) et al. *Journal of Xi'an Technological University*(西安工业大学学报)[J], 2010, 30(1): 34
- [10] Pang Yunzhou(庞云舟), Shen Chuying(沈楚英), Pan Tingjian(潘庭俭). *Journal of Shanghai Iron and Steel Research*(上海钢研)[J], 1982, 3: 42
- [11] Liu Heping, Chen Wenzhi, Qiu Shengtao et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2009, 40B: 411
- [12] Zhang Na(张娜). *Experimental Study on Forced Convection Heat Transfer in Concentric Annular Channels*(同心环形通道内强制对流换热的实验研究)[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010
- [13] Park C M, Kim W S, Park G J. *Mechanics Research Communications*[J], 2003, 30: 297
- [14] Wang Shaodong(王哨东), Mi Jinlong(宓金龙). *Journal of Shanghai Iron and Steel Research*(上海钢研)[J], 1991, 4: 137

Thermal Analysis for Cooling Rolls in Planar-flow Melt Spinning

Guo Xi, Yan Mi

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A steady-state thermal analysis for cooling rolls in planar-flow melt spinning (PFMS) was carried out using finite element analysis. The effects of the roll diameter, the roll thickness and the roll casting speed on the temperature of cooling roll were investigated. Results show that the temperature of the cooling roll can be decreased by increasing the roll diameter, decreasing the roll thickness and reducing the roll casting speed. Based on the orthogonal process analysis, the roll thickness is the main influence factor of outside surface temperature of the roll, followed by the casting speed and the roll diameter. The roll casting speed has the most obvious influence on inside surface temperature of the roll while the effects of the roll diameter and the roll thickness are less remarkable. Finally by considering various important indexes including mechanical strength, control stability as well as thermal requirements, the parameter optimization design to keep the surface temperature of the cooling roll in the specific range was obtained.

Key words: finite element analysis; numerical simulation; temperature field; cooling roll; parameters design

Corresponding author: Yan Mi, Professor, State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China, Tel: 0086-571-87952730, E-mail: mse_yanmi@zju.edu.cn