

流延辊螺旋结构改进对辊面温度均匀性影响分析

林旭¹, 杨煜新¹, 何强², 黄志高^{2*}

(1. 广东金明精机股份有限公司, 广东 汕头 515098;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了提高流延辊辊面温度均匀性, 本文提出一种螺旋结构改进方法, 使螺旋流道呈现入口部分大、出口部分小的形状特征, 并进一步基于双向流动螺旋流道的流延辊模型, 建立了表征温度均匀性的仿真模型。分析了不同大小的出入口部分弧度之比对辊面温度均匀性的影响。结果表明, 出入口部分弧度之比为 2:1 时, 辊面温度均匀性最好, 相比于没有改进时的螺旋结构 (弧度之比为 1:1), 辊面温度标准差从 0.487 K 降低为 0.214 K, 提升效果明显。此研究可为流延辊的结构设计提供依据。

关键词: 流延膜; 流延辊; 数值模拟; 温度场; 温度均匀性

中图分类号: TQ320.721

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)10-0065-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.10.014

流延法是一种主要的薄膜生产方法, 具有生产效率高、厚度均匀、光学性能优异等优点^[1], 工艺过程如图 1 所示。并且通过双向拉伸和多层共挤技术, 可以赋予薄膜不同的功能特性, 如高强度、阻隔性、耐热性等, 以满足各种应用需求^[2-3]。这些优势使其广泛应用于包装、农业、工业等领域, 满足了行业对高性能薄膜的需求。

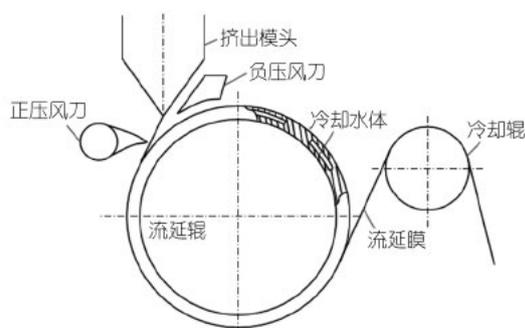


图 1 流延工艺示意图

流延辊是流延法工艺中的关键部件, 直接影响薄膜的冷却质量, 为了获得高质量的流延膜, 研究人员对流延辊与薄膜的传热机理进行了广泛研究。吴哲浩^[4-5]通过 CFD 软件模拟了流延辊上塑料薄膜的冷却过程, 分析了雷诺数、冷却水温度、流延膜厚度和流延辊转速对冷却效率的影响。李陈晨^[6]通过数值模拟对

比分析了目前主流的平行流道与螺旋流道、单向流动与双向流动冷却水组合而成的四种流延辊模型的传热效果, 结果表明, 采用冷却水双向流动的螺旋流道流延辊具有最低的平均温度和最小的温度差, 冷却效果相对更佳。陈光^[7]提出在双向进出螺旋结构流延辊的导流板上开设通孔, 使冷水通过通孔流向热水流道进行混合, 进而减少辊面温差。

基于上述工作, 可以发现双向流动的螺旋流道流延辊具有最小的温度差, 但由于辊内相邻流道间存在温差, 使得辊面出现温度不均匀, 影响了薄膜质量。本文基于双向流动螺旋流道的流延辊模型, 通过对螺旋结构的优化, 使流道呈现入口部分大、出口部分小的形状特征, 并基于该优化方法研究了不同入口部分弧度与出口部分弧度之比对辊面温度均匀性的影响, 为流延辊的结构设计提供理论依据。

1 计算模型

1.1 几何模型

作者简介: 林旭 (1988-), 男, 大专, 机械工程师, 产品规划工程师, 主要从事吹膜设备产品模块化和零部件标准化工作, 曾荣获广东省机械工业科学技术奖“风电、航空专用宽幅多层膜吹塑成套装备研究及产业化”一等奖。

流延辊，结构如图 2 所示，包括外辊筒、内辊筒、中心轴、导流板、端盖以及冷却水流道，导流板为固定厚度的钢片，通过焊接固定在内辊筒上，外辊筒通过热套紧密贴合在内辊筒上，冷却水在辊筒内的流动方式为双向流动。

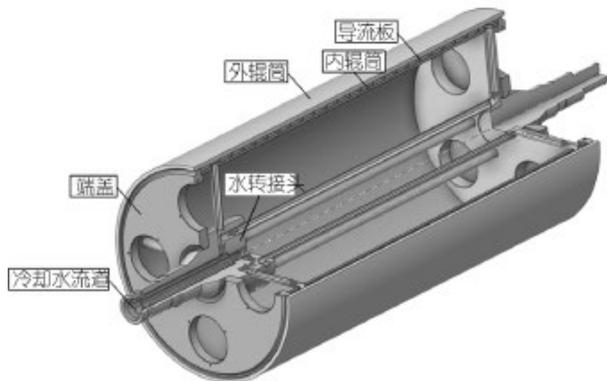


图 2 流延辊结构示意图

为了减少计算时间，去除大部分辊体外不影响传热的冷却水区域，为了避免冷却水区域在两端形成尖角导致网格畸形，保留少部分辊外的流体作为辊内流道的出入口，并且端盖不直接参与传热，因此将端盖也忽略，简化后几何模型如下图 3 所示，流道螺旋导程为 400 mm、螺旋长度为 1 800 mm。

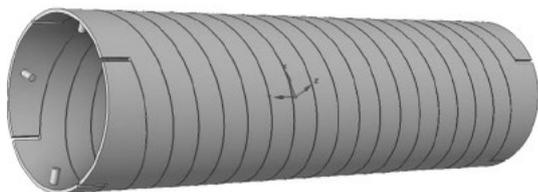


图 3 几何模型

1.2 仿真模型

流延辊的材料为钢，冷却介质为水，材料物性参数如下表 1 所示。

表 1 材料属性

材料	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容 /[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	导热系数 /[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
钢	8 030	502	16.27	
水	998	4 182	0.60	0.001 003

工厂在将加热辊正式装机应用前，会单独在辊内通入热水，并使辊与空气进行充分的对流换热，通过测量辊面的温度差来判断辊的温度均匀性是否满足生产要求。参考该方法，建立下述表征温度均匀性的仿真模型。

通过在辊面设置热通量来模拟空气与辊面的对流换热，并且为更明显地表现辊面温度均匀性，辊面设

置热通量为 $20\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；冷却水流量为 $25\text{ m}^3/\text{h}$ ，温度为 303 K ，辊转速为 23.5 rpm ，湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型。冷却水与辊体接触表面采用耦合传热。模拟类型为稳态。

该辊所冷却的薄膜幅宽为 $1\,500\text{ mm}$ ，因此取该幅宽下的辊面作为表征温度均匀性的样本，为了减少计算误差对温度均匀性结果的影响，取表征样本上温度标准差作为最终结果，温度标准差越小，辊面温度越均匀。

2 计算结果分析

2.1 实验设计

常见流延辊内的导流板螺旋导程是相等的，使得螺旋流道入口部分和出口部分是一样大的，本文提出一种螺旋结构改进方法，使相邻导流板的螺旋导程不相等，从而使螺旋流道呈现入口部分大、出口部分小的形状特征。以四流道流延辊为例，共有四条导流板，相间的导流板螺旋导程相同，因此将导流板分为 A、B 两组，如下图 4 所示，A 组导流板螺旋导程为 400 mm ，B 组导流板螺旋导程为 386 mm ，得到的流道沿冷却水流动方向横截面积逐渐减小，定义流道入口部分弧度 θ_1 与出口部分弧度 θ_2 如下图 5 所示，由此得到的流道 θ_1/θ_2 为 $2:1$ 。

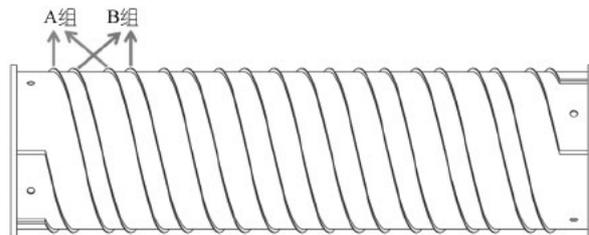


图 4 结构改进后螺旋流体几何示意图

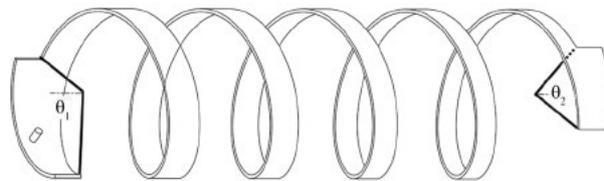


图 5 出入口部分弧度定义

通过不同螺旋导程挡板的组合可以得到不同 θ_1/θ_2 的流道形状，取 θ_1/θ_2 为变量，在其他条件不变的情况下，分别取弧度之比为 $1:1$ 、 $6:5$ 、 $4:3$ 、 $3:2$ 、 $2:1$ 和 $3:1$ ，在不同变量值下得到辊面温度标准差。

2.2 模拟结果及分析

下表 2 为不同 θ_1/θ_2 时辊面表征样本上温度标准差

的模拟结果，从模拟结果可以看出，随出入口部分弧度之比的增大，辊面温度标准差先减小后增大，在弧度之比为 2:1 时，辊面温度均匀性最好。

表 2 模拟结果

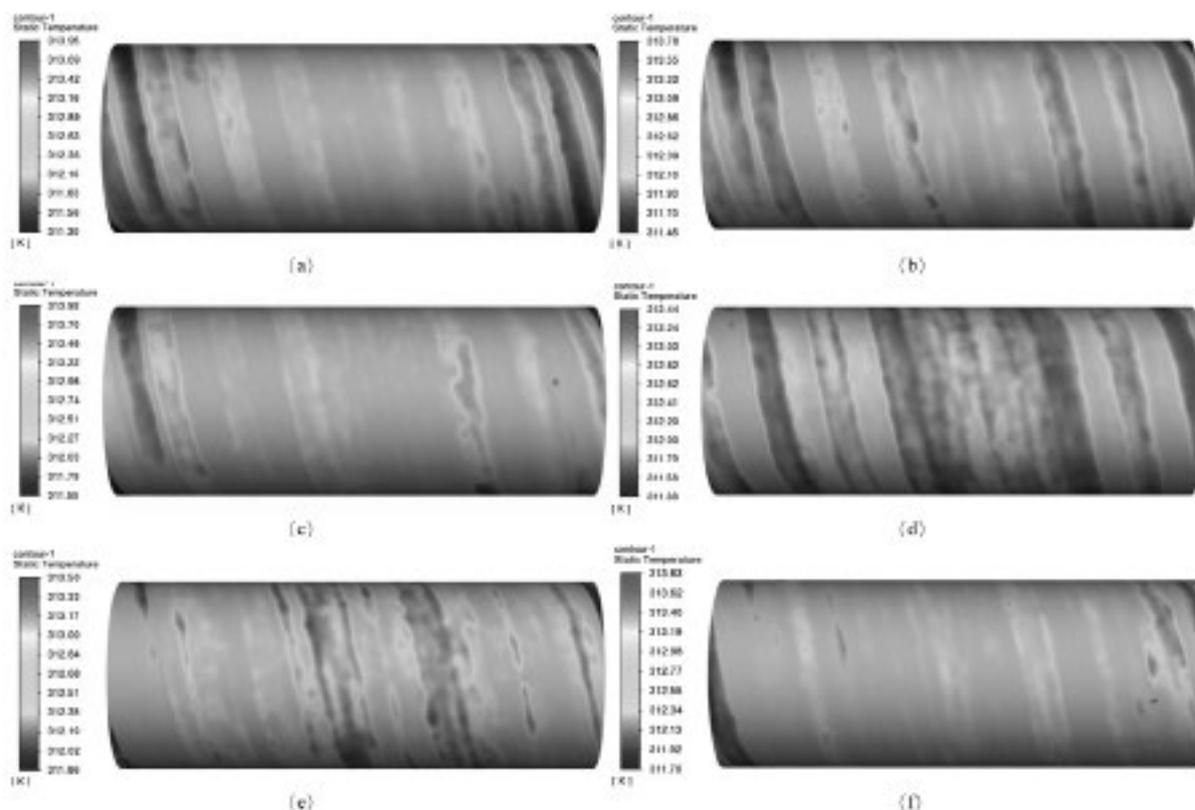
出入口部分弧度之比	辊面温度标准差 /K
1:1	0.487
6:5	0.387
4:3	0.331
3:2	0.274
2:1	0.214
3:1	0.278

图 6 为不同弧度之比时辊面表征样本上的温度云图，从云图中可以看出，随出入口部分弧度之比的增大，表征样本上的低温区逐渐由入口部分对应的辊面转移至出口部分对应的辊面，其上的高温区逐渐从出口对应的辊面转移至中间并最终转移至入口对应的辊面，这种温度的变化使辊面温度均匀性先提高后降低。该现象出现是因为螺旋结构的改进使每一个流道沿冷却水流动方向的流道截面逐渐变小，流道截面的减小会提高冷却水的速度，从而提高冷却水与辊体的对流

换热强度，这种换热强度的提高能够补偿由冷却水温度提高导致的对流换热强度的下降，从而提高辊面温度均匀性，但是当这种补偿过度时也会降低辊面温度均匀性。

3 结论

本文针对由于流延辊内相邻流道间存在温差导致辊面温度不均匀的现象，提出一种螺旋结构的改进方法，使相邻导流板的螺旋导程不相等，从而使螺旋流道呈现入口部分大、出口部分小的形状特征，这种改进能使冷却水沿螺旋流道流动时速度逐渐增加，提高冷却水与辊体的对流换热强度，以补偿由冷却水温度提高导致的对流换热强度的下降，从而提高辊面温度均匀性。在本文中， θ_1/θ_2 为 2:1 时，辊面温度均匀性最好，相比于没有改进时的螺旋结构 (θ_1/θ_2 为 1:1)，辊面温度标准差从 0.487 K 降低为 0.214 K，提升效果明显。



(a) 1:1 ; (b) 6:5 ; (c) 4:3 ; (d) 3:2 ; (e) 2:1 ; (f) 3:1

图 6 辊面表征样本上的温度云图

参考文献：

- [1] 刘振龙, 张丽晔, 赵著禄, 等. 聚丙烯流延膜市场及专用料的生产 [J]. 塑料工业, 2006(S1):302-303.
- [2] 卢洪超, 徐萌, 权慧, 等. 聚丙烯 / 聚乙烯醇熔融共挤出流延及其双向拉伸研究 [J]. 塑料工业, 2025,53(1):152-159.
- [3] 谈述战, 杨有财, 刘毅, 等. 双向拉伸聚酯薄膜的高性能化研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2013,41(6):112-116.
- [4] 吴哲浩, 麻向军. 基于 CFD 的流延膜冷却效率研究 [J]. 工程塑料应用, 2015,43(1):64-68.
- [5] 吴哲浩, 麻向军. 基于 CFD 的塑料薄膜冷却性能分析 [J]. 塑料工业, 2014,42(11):39-42, 62.
- [6] 李陈晨. 锂电池薄膜流延辊的数值模拟及结构优化设计 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [7] 陈光, 张彦超, 陈宝新, 等. 一种大直径流延辊混流换热装置: 中国, CN115157513A[P].2022-10-11.

Analysis of the impact of improved spiral structure of the casting roll on the uniformity of roll surface temperature

Lin Xu¹, Yang Yuxin¹, He Qiang², Huang Zhigao^{2*}

(1. Guangdong Jinming Precision Machinery Co. LTD., Shantou 515098, Guangdong, China;

2. National key laboratory of materials forming and mold technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: To enhance the uniformity of the temperature on the surface of the casting roll, this paper proposes a method for optimizing the spiral structure, which results in a spiral flow channel with a larger entrance and a smaller exit. Based on this, a casting roll model with a bidirectional flow spiral channel is established, and a simulation model for characterizing temperature uniformity is further constructed. The influence of different ratios of entrance and exit arc degrees on the temperature uniformity of the roll surface is analyzed. The research results show that when the ratio of entrance and exit arc degrees is 2:1, the temperature uniformity of the roll surface reaches its best, and compared to the unimproved spiral structure (ratio of 1:1), the standard deviation of the roll surface temperature decreases from 0.487 K to 0.214 K, with significant improvement. This study provides an important reference for the structural design of casting rolls.

Key words: cast film; casting roll; numerical simulation; temperature field; temperature uniformity

(R-03)

阿斯顿·马丁将搭载倍耐力 CYBER 轮胎技术

Aston Martin will be equipped with Pirelli CYBER tire technology

米兰, 2025 年 9 月 11 日 —— 倍耐力与阿斯顿·马丁达成合作, 将把倍耐力独家 Cyber 轮胎技术搭载于英国超豪华高性能汽车品牌未来的车型中。Cyber 轮胎技术是全球首个能通过轮胎内置传感器采集数据信息, 经由倍耐力专用软件算法处理, 并实时与车辆的电子系统通信, 通过与车辆驾驶及控制系统集成, 从而创造全新功能的系统。依托与博世工程技术的协作, Cyber 轮胎将完全集成于车辆的电子架构中, 旨在更好的掌控阿斯顿·马丁未来车型的动态性能。

倍耐力 Cyber 轮胎技术通过轮胎内置传感器, 使车辆能获取轮胎的关键信息。这些信息经倍耐力独家算法处理后传输至电子控制单元, 从而优化车辆动态性能。借此, 包括 ESP (电子稳定系统)、ABS (防抱死系统) 及牵引力控制系统在内的主要电子动态驾驶系统, 均可获得前所未有的全方位轮胎数据支持, 从而提升系统性能。阿斯顿·马丁与倍耐力始终致力于打造卓越的超豪华性能跑车, 倍耐力 Cyber 轮胎技术的加入, 将通过技术革新进一步巩固阿斯顿·马丁在同级别性能车型中的领先地位。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)