辊式涂布两辊间隙施涂过程的数值计算分析

包能胜¹, 刘小山¹, 马婉¹, 黄学佳²

(1.汕头大学汕头 515063; 2.汕头职业技术学院, 汕头 515063)

摘要:目的 系统地计算涂层厚度与两辊间隙、涂布辊速度以及胶黏剂的流体稠度和流动指数等影响因子的关系。方法 在分析该复杂流动机理的基础上,利用 CFD 软件对具有非牛顿流体特性胶黏剂的两辊间隙施涂过程进行二维数值模拟。结果 在五辊无溶剂涂布工程中,两辊间隙增大,最终涂布厚度也明显增大;增大涂布辊转速,涂布厚度也将减小;胶黏剂的流体稠度越大,最终传递到 基材上的涂层厚度减小。结论 两辊间隙的大小对涂层厚度的影响最大,胶黏剂的流体稠度、流动 指数也对涂层厚度有较大的影响。

关键词: 五辊无溶剂涂布; 非牛顿流体; 两辊间隙; 施涂过程; 数值计算; CFD 中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)23-0006-07

Numerical Calculation and Analysis on Roll Coating Process of the Clearance between Two Rollers

BAO Neng-sheng¹, LIU Xiao-shan¹, MA Wan¹, HUANG Xue-jia² (1.Shantou University, Shantou 515063, China; 2.Shantou Polytechnic, Shantou 515063, China)

ABSTRACT: The work aims to systematically calculate the relationship between coating thickness and such influencing factors as the clearance between two rollers, speed for coating rolls, and fluid consistency and flow index of adhesive. Based on the analysis on the complicated flow mechanism, the 2D numerical simulation for the process of coating the clearance between two rollers with adhesive characterized by non-Newtonian fluid through CFD software was carried out. In the five-roller solvent-free coating project, the coating thickness finally increased notably with the increase in the clearance between two rollers. The coating thickness would decrease with the increase in the speed at which the roller was coated. With the continually increased fluid consistency of the adhesive, the thickness of the coating ultimately transmitted to the substrate would decrease. The clearance between two rollers has the largest effect on the coating thickness, and the fluid consistency and flow index of the adhesive also have a big impact on the coating thickness.

KEY WORDS: five-roller solvent-free coating; non-Newtonian fluid; the clearance between two rollers; the coating process; numerical calculation; CFD

无溶剂涂布是未来软包装复合的发展方向。在 欧美等工业发达国家,无溶剂复合技术作为复合薄 膜生产最环保的工艺之一^[1],已成为主要的复合薄

膜加工技术。在新增的复合设备中,有 90%以上的 都是无溶剂复合设备^[2]。在我国,虽然干式复合仍 然是软包装行业的主流复合工艺^[3],但因无溶剂复

收稿日期: 2016-07-31

作者简介:包能胜(1971-),男,江西南城人,博士,汕头大学教授,主要研究方向为印刷涂布设备的设计理论与方法。

基金项目:国家自然科学基金(51275281);广东省高等学校产学研基地滚动项目(2013CXZDC009);汕头大学创新强校 省级重大科研项目(2014KZDXM035);汕头市科技计划项目(2014-14);汕头职业技术学院"创新强校工程" 建设项目(STP-ZZ-013);汕头职业技术学院院级科研课题(SZK2014Y26)

合工艺具有零排放、产品无溶剂残留、无爆炸和火 灾等安全隐患且生产效率高、能耗低、综合成本低 等优点,近年来,在我国软包装行业中已呈现迅猛 的发展态势^[4]。对于无溶剂涂布技术的研究在包装 工程领域显得尤为重要。

利用 CFD 技术的强大数据处理能力,研究其 在涂布机上的适用性和模拟的精准性。随着计算方 法和计算机处理能力的提高,很多研究者开始重视 该种涂布技术。Hao^[5]等使用加勒金有限元素分析 方法来分析2个逆转辊之间的涂布流动过程,得出 了当速比超出临界值时,可以通过增大纸卷厚度或 减小主辊半径的方法来获得较薄的计量膜: Covle^[6] 等用实验方法和 Navier-Stokes 方程的有限元方法 研究逆转辊涂布器中计量间隙的流动过程,确定喷 涌是穿过润湿线浸入的;张菊先^[7]对高速薄膜涂布 过程中橘皮纹的形成进行了研究,得出了涂布工艺、 原纸和涂料特性均会影响橘皮纹;袁汝旺^[8]等对逆 转辊间隙的计算机控制系统进行了研究,采用积 分分离的 PID 控制算法,加快了系统的动作时间, 改善了系统的动作性能。对于涂布工艺,涂层厚 度的大小直接关系到涂布的质量,而对于涂层厚 度这一具体指标的研究文献较少。为了建立五辊 无溶剂涂布非牛顿胶黏剂两辊间隙施涂过程涂层 厚度与各影响因子的关系,在分析流动机理的基 础上, 文中以五辊无溶剂涂布系统中的计量辊和 计量转移辊为研究对象,利用 CFD 软件对施涂过 程进行深入的分析。

1 CFD 模型建立

对非牛顿流体辊涂两辊间隙施涂过程的数值研究, 一般来说,首先要确定计算域,然后建立计算域的几 何模型。对于几何模型的建立,CFD可以通过 CAD 固 体模型转化为流体域,也可通过计算流体力学软件 CFD 直接创建。该例直接建立了涂布辊间隙间无溶剂 胶黏剂流动的具有非牛顿流体特性的层流模型(流体 为甘油,其运动流体稠度系数为1.19×10⁻³ m²/s; 雷诺 数≤2000),并使用 CFD 软件对该模型进行求解,结合 实验数据和工程数据,研究涂布辊间隙的无溶剂胶黏 剂的流动、流变与不稳定问题,得出涂层质量与各影 响因素之间的关系方程,为无溶剂辊隙的优化设计与 精确控制提供理论基础^[9-10]。

1.1 几何模型

根据工程实际情况,设定二维模型中两辊直径 均为184 mm。工程模型见图1,可以看出,该CFD 几何模型着重探究两辊间的施涂过程,因此在辊间 隙处加大了网格的复杂度。



图 1 工程模型 Fig.1 Engineering model

两辊间隙大小范围为 50,60,70,80,90, 100 μm 等 6 种工况。涂布辊速度为 5,20 m/min 这 2 种工况。胶黏剂的流体稠度为 0.5 ~ 30 Pa·s, 每 0.5 个单位为 1 梯度,共有 6 组梯度,即 0.5, 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 Pa·s。另外还有流动指数, 其范围为 0.7 ~ 1.2,共分为 6 组,即 0.7,0.8,0.9, 1.0,1.1,1.2。上述的每个数字都是 1 种工况,共 有 72 种工况。为了探究两辊间隙与涂层厚度的关 系,在原有工况的基础上又增加了 6 种针对不同间 隙的工况。在使用 CFD 软件对上述工况进行计算 后,再对计算结果进行必要的数值分析。

1.2 基本假设

基本假设为以下 4 种情况:运行一段时间后, 流场内的流动情况不随时间变化而变化,即为定常 流动;该涂布工作过程的热影响可以忽略不计;该 流体为不可压缩流体;该模型中辊的工作面光滑。

1.3 网格划分

网格划分与 CFD 计算结果的精度和计算规 模息息相关,结构化的六面体网格计算精度高于四 面体网格。随着网格数量的增加,计算精度会有所 提高,但同时计算规模也会直线上升,需要耗费大 量的计算资源。采用分区域网格生成方法,区域间 采用交界面进行连接。为减少交界面间数据插值的 误差,进行了2个方面的处理:网格生成时需要保 证区域两侧的网格分布过渡一致,尽可能保证交界 面两侧的网格节点数相同或相近;尽量减少交界面 的数目。基于上述思想,对辊模型进行了区域的计 算和网格的划分,网格模型见图2,其中图2b为 文中的主要计算区域,为辊间隙部分。



图 2 网络模型 Fig.2 Grid model

根据辊间涂布液的流动特性以及系统结构的 复杂性,结合上述分析,该例采用非结构化网格和 结构化网格 2 种方式对两辊模型进行网格划分。由 于涂布辊 CFD 数值模拟需要模拟计算大量的工况, 计算非常耗时,所以需要严格控制网格数量,以节 约计算时间。综合考虑,采用四面体网格,个别位 置采用楔形体网格和椎体网格进行混合网格划分。 涂布辊的计算区域造型比较复杂,四面体网格能够 对结构复杂的几何模型进行快速高效的网格划分, 楔形和椎体网格能够对近壁面的边界层网格进行 局部细化,在边界层处提供更好的计算网格。为保 证计算精度,在辊间隙部分,首先为了保证区域两 侧的网格分布过渡一致,将间隙部分分为4个部分, 然后对每一部分采用四面体网格进行加密和均匀 的网格划分。最终得出的两辊网格模型如图2,共 划分网格单元12525173个。

在 Fluent 中选择间隙为 80μm, 速度为 5 m/min, 流体稠度为 2.0Pa·s, 流动指数为 0.7 的辊涂 系统网格进行全面检查, 检查中最大网格体积为 1.539 254×10⁻⁷ m³, 最小网格体积为 6.399 826×10⁻¹¹ m³, 没有出现负体积, 确保在 Fluent 求解器中可以 顺利进行计算。其余工况以此类推,不再说明。

1.4 边界条件

将 Fluent 的操作环境设为 1 个标准大气压,温 度为 20 ℃。存胶辊、计量辊均设为壁面边界,为 便于计算收敛,计算域外边界也设为壁面边界。存 胶辊与外边界均静止,计量辊逆时针转动,转速取 5,20 m/min。由于在该流场中,涂液流动必然会 引起周围的空气流动,故为气液两相流问题,选用 VOF 多相流模型。空气和甘油的密度分别为 1.225 和 1259.9 kg/m²,流体稠度分别为 1.8×10⁻⁵,0.15 Pa·s,甘油的表面张力为 0.056 mN/m。由于流速较 慢,故涂液的流动采用层流模型,采用 SIMPLE 算 法和二阶迎风格式进行计算^[11-13]。

2 涂层厚度的形成

Fluent 迭代计算完成后,可以得到气液分布、 胶黏剂轨迹和涂层厚度检测曲线等^[14-16]。为了分 析结果的一致,现选定同一工况进行分析,以下分 析均在间隙为 80 μm、速度为 20 m/min、流体稠度 为 1.0 Pa·s、流动指数为 1.1 的工况下进行。

2.1 气液两相轨迹

气液分布云图见图 3, 流线型线条代表无溶剂涂 布液, 弧形线条为空气。当计量辊转动时, 流体粘 滞力迫使胶黏剂附着在计量辊上, 最终形成均匀的 涂层厚度。涂层厚度形成的过程见图 4, 在交接处空 气逐渐形成漩涡, 使得胶黏剂形成弯月面, 并在 0.075 s 处漩涡达到了稳定值, 从而形成了涂层厚度。

2.2 涂层厚度监测曲线

为了监测胶黏剂的流动情况以及计算最终的



图 3 气液分布云图 Fig.3 Nephogram of gas-liquid distribution

涂层厚度,在计量辊上距离两辊圆心连接点中点横 向坐标为 30 mm,纵向坐标为 60 mm 处设置一条 监测线。

涂层厚度监测曲线见图 5,在监测点处约 0.014 s 时涂布液流过此处,此后涂布液经过一段时间的 震荡后,最终在约 0.075 s 处达到稳定的流量值, 形成了均匀的涂层厚度。

综合以上 2 种分析,能够看出在间隙、辊速、 流体稠度和流动指数一定的工况下涂层厚度的形 成过程,即涂布液经过一定的流动时间,涂层厚度 也从震荡趋于稳定。



图 4 气液两相轨迹变化 Fig.4 Variation diagram of gas-liquid's locus





3 结果与分析

文中综合考虑了非牛顿流体下施涂辊与胶黏 剂内部间的相互作用,在辊间隙为 80 μm 的条件下, 首先对辊涂模型整体流场进行模拟研究,并对数值 模拟的结果进行详细分析,揭示辊涂两辊之间流体 在多种工况下的复杂流动情况^[17—18]。

涂层厚度的大小关系着产品质量的好坏,对涂 层厚度的影响因子进行研究具有重要意义。文中取 CFD计算结果共72种工况的最终涂层厚度绘制了特 性曲线,主要包括涂层厚度-流体稠度关系曲线、涂 层厚度-两辊间隙关系曲线、涂层厚度-辊速关系曲线 和涂层厚度-流动指数关系曲线。另外,文中还将多 种影响因子综合在同一坐标系下共同分析不同影响 因子之间与影响因子与涂层厚度之间的关系。

3.1 两辊间隙

在影响涂层厚度的各个因子中,为了探究两辊间隙与涂层厚度的关系。取两辊间隙为变量,其他 为定值,得到的结果见表1。对表1计算结果进行 数据处理,其涂层厚度随两辊间隙的变化见图6。

ance of two rollers						
Tab.1 The result of CFD numerical modeling and clear						
表 1	CFD 数值模拟结果与两辊间	ョ隙				

计	参数组合							
算		注見相かま	浍汯汯休锢	演动	OFD /d H			
方	北川川県	「 丁 重 報 ち 求 歩 「 「 重 報 ち 求 歩 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」	(D α α)	化幼	CFD 结朱			
案	/µm	/(m·min)	度/(Pa·s)	1日 安义	/µm			
1	50	20	2.5	1.1	30.8075			
2	60	20	2.5	1.1	36.9733			
3	70	20	2.5	1.1	43.1548			
4	80	20	2.5	1.1	49.3193			
5	90	20	2.5	1.1	55.4737			
6	100	20	2.5	1.1	61.7114			



图 6 涂层厚度与两辊间隙的关系 Fig.6 The relations of coating thickness and clearance of two rollers

通过图 6 中的曲线变化趋势可以看出, 辊间间 隙在 50~100 μm 的工况下, 保持其他影响因子不 变, 计算得出的涂层厚度与两辊间隙几乎成直线关 系, 并得到的线性方程约为 y=0.6173x-0.0647。由 此可见两辊间隙的大小直接影响涂层厚度, 且较为 明显。在实际情况中, 通过改变两辊间隙可以有效 得到理想的涂层厚度。

3.2 流体稠度与流动指数

取全部数组中的 CFD 数值模拟结果,全部数 组中只有流体稠度和流动指数变化,影响涂层厚度 的其他因子不变,其涂层厚度随施涂辊转速的变化 见图 7。从图 7 中曲线的变化情况可知,在影响涂层 厚度的施涂辊转速及辊间间隙不变的情况下,涂层 厚度随着流体稠度的增大而减小,随着流动指数的 增大而减小,呈现反比的趋势。当流体稠度为 0.5 Pars, 流动指数为 0.7 时涂层厚度达到一个峰值,随后便随 着流体稠度和流动指数的增大而快速下降到普通厚 度。在实际生产中,工厂可以通过调节涂布液的流 体稠度及流动指数得到理想的涂层厚度。



图 7 涂层厚度与流体稠度、流动指数的关系 Fig.7 The relations of coating thickness, fluid consistency and flow index

3.3 辊速

取流体稠度数组中流动指数为 0.9 时所对应的 全部 CFD 数值模拟结果,全部数组中只有流体稠 度和辊速变化,影响涂层厚度的其他因子不变。其 涂层厚度随施涂辊转速的变化见图 8。从图 8 中曲 线的变化情况可知,在影响涂层厚度的其他因素不 变的情况下,涂层厚度随着流体稠度的增大而减小, 随着辊速的增大而减小,呈现反比的趋势。当流体 稠度在 0.5~1.0 Pa·s 时,速度相对平稳,其涂层厚 度变化较小。相较而言,辊速的变化对涂层厚度的 影响较大。在实际生产中,工厂可以参照分析结果, 通过调节涂布液的辊速数值得到理想的涂层厚度。



图 8 涂层厚度与辊速的关系 Fig.8 The relations of coating thickness and roller speed

从上述分析可知,在五辊无溶剂涂布工程中, 两辊间隙增大,流入系统的总流量增大,最终涂布 厚度也明显增大。增大涂布辊转速,系统内传递的 胶黏剂流量减小,涂布厚度也将减小。胶黏剂的流 体稠度越大,能通过两辊间隙的流量减小,最终传 递到基材上的涂层厚度减小。两辊间隙的大小对涂 层厚度的影响最大,胶黏剂的物性参数也对涂层厚 度有较大的影响。通过调节间隙可以相对较快地改 变涂层厚度,得到较为理想的涂层厚度。

4 结语

文中对非牛顿流体下施涂两辊间隙作业过程 进行了数值分析,建立了两辊涂布的仿真模型,并 通过 CFD 数值模拟技术,得到了无溶剂涂层厚度 与可控影响因子之间的关系,其中包括间隙、辊速、 流体稠度及流动指数等,得到了涂层厚度分别随着 两辊间隙的增大而增大,随着辊速、流体稠度及流 动指数的增大而减小的结果,且两辊间隙的大小对 涂层厚度的影响最大。在工程实际中,对五辊无溶 剂涂布机的工程设计与自动控制具有重要的参考 价值:工程中想要减小涂层厚度可以尝试减小辊间 间隙、增大计量辊转速或者增加涂液流体稠度和流 动指数;在生产实际中,涂液流体稠度难以测量, 要精确地控制流体稠度必然会造成生产成本的大 幅提升,且生产周期也随之加长,改变计量辊转速 将造成多辊速度变化,为了保障生产效率,这种方 法也不可取,但通过改变辊间间隙就可以简单高效 地调节涂层厚度;辊隙是影响涂层厚度的最重要的 因素,在任何情况下,涂层油膜厚度都随其增加而 增大,辊间间隙越大越容易得到稳定均匀的油膜涂 层。

参考文献:

- 李纯. 无溶剂涂布复合机涂布量及涂布辊精度分析
 [J]. 北京印刷学院学报, 2007, 15(4): 46—49.
 LI Chun. Analysis on Coating Weight and Precision of Coating Rollers for Solventless Laminator[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2007, 15(4): 46—49.
- [2] 吕玲. 无溶剂复合涂布系统的特性研究与优化设计
 [D].北京:北京印刷学院, 2010.
 LYU Ling. Characteristics Research and Optimization
 Design about Coating System of Solventless Laminator[D]. Beijing: Journal of Beijing Institute of Graphic
 Communication, 2010.
- [3] 左光申. 无溶剂复合工艺与干式复合工艺应用差异 谈[J]. 印刷技术, 2011(24): 18—19.
 ZUO Guang-shen. Application Difference between Solvent-free Composite Technology and Dry Complex Process[J]. Printing Technology, 2011(24): 18—19.
- [4] 於亚丰. 无溶剂复合的成本优势[J]. 印刷技术, 2012(24): 33—34.
 YU Ya-feng. Solvent-free Compound Cost Advantages[J]. Printing Technology, 2012(24): 33—34.
- [5] HAO Y, HABER S. Reverse Roll Coating Flow[J]. International Journal for Numerical in Fluids, 1999, 30(6): 635-652.
- [6] COYLE D J. The Fluid Dynamics of Reverse Roll Coating[J]. AIChE Journal, 1990, 36(2): 161–174.
- [7] 张菊先. 高速薄膜徒涂布过程中橘皮纹形成的研究
 [J]. 国际造纸, 2005, 24(6): 11—15.
 ZHANG Ju-xian. Studies of Orange Peel Formation in High-speed Film Coating[J]. World Pulp and Paper, 2005, 24(6): 11—15.
- [8] 袁汝旺. 逆转辊涂布间隙的计算机控制系统研究[J].
 天津工业大学学报, 2006, 25(5): 75—78.
 YUAN Ru-wang. Study of Computer Control System

of Reverse Roll Coating Clearance[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2006, 25(5): 75–78.

[9] 张仲实. 无溶剂复合设备及工艺[J]. 国外塑料, 2009, 27(10): 42—45.

ZHANG Zhong-shi. Solvent Free Lamination Application and Products[J]. World Plastics, 2009, 27(10): 42-45.

- [10] 姜楠楠. 无溶剂复合的优势及应用分析[J]. 塑料包装, 2011, 21(1): 35—37.
 JIANG Nan-nan. Advantage and Application Analysis of Solvent-free Compound[J]. Plastics Packaging, 2011, 21(1): 35—37.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用
 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
 WANG Fu-jun. Computational Fluid Dynamics Analysis: CFD Software Principles and Applications[M].
 Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [12] 左光申. 无溶剂复合问与答[J]. 印刷技术, 2012(11): 38—43.
 ZUO Guang-shen. Solvent-free Compound Q&A[J]. Printing Technology, 2012(11): 38—43.
- [13] 李路海. 复合涂布技术[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011.

LI Lu-hai. Composite Coating Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2011.

[14] 刘琦. 基于 CFD 的离心泵整机流场数值模拟[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.

LIU Qi. The Flow Numerical Simulation in the Cen-

trifugal Pump Based on CFD[D]. Jilin: Jilin University, 2008.

- [15] 唐亦农,陈耀松,陈文芳.非牛顿流体中气泡过程的数值模拟[J].中国科学, 1993, 23(7): 744—745.
 TANG Yi-nong, CHEN Yao-song, CHEN Wen-fang. Bubble Process Numerical Simulation under Non-Newtonian Fluid[J]. Science China, 1993, 23(7): 744—745.
- [16] 田济扬. 基于 Fluent 软件的滴灌双向流流道灌水器 水力性能数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014(20): 65—69.

TIAN Ji-yang. Numerical Simulation of Hydraulic Performance on Bidirectional Flow Channel of Drip Irrigation Emitter Using Fluent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014(20): 65—69.

- [17] 陈永亮. 五辊式无溶剂涂布系统交叉耦合建模与设计方法[J]. 工程设计学报, 2014, 21(1): 39—42.
 CHEN Yong-liang. Mechatronic Cross-coupling Modeling and Design Method for Five-rollers Solventless Coating System[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(1): 39—42.
- [18] 柯星昌. 无溶剂涂布复合机的设计与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
 KE Xing-chang. Design and Research on Solvent-free Coating and Compound Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.