

塑料薄膜与流延辊换热过程的模拟分析

李福森, 王栓虎*, 李欣兴, 杨晓青

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为实现流延辊辊面温度场的均匀性和稳定性,保证塑料薄膜的高质生产,应用 Fluent 软件对双向回流式螺旋流道的流延辊的换热过程进行了数值模拟;分析了流延膜在流延辊上冷却时的导热、对流、辐射综合的非稳态传热过程,了解了流延膜冷却过程中的传热机理,得出了流延辊内部流道结构、冷却水的流量对流延辊换热强度的影响趋势。研究结果表明,该研究可以为流延辊结构的合理设计、流道参数的优化提供指导。

关键词:流延辊;塑料薄膜;传热;数值模拟;冷却机理

中图分类号:TH122;TH123;TQ337.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)08-0056-04

Simulation and analysis of heat transfer process of casting film and chill roll

LI Fu-sen, WANG Shuan-hu, LI Xin-xing, YANG Xiao-qing

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at realizing the uniformity and stability of the surface temperature field of the casting roller, ensuring the high quality production of plastic film, the casting roller which included double inlet and outlet spiral path was given a numerical simulation of heat transfer process by Fluent software. The comprehensive non-steady state heat transfer process which including heat conduction, convection and radiation was analyzed. The process of the film cooling was researched for heat transfer mechanism. The heat transfer intensity of the casting roller which was affected by the internal flow channel structure of the casting roller and the flow of the cooling water was analyzed and researched for the influence trends. The results indicate that the analysis can provide guidance for designing casting roller reasonably and optimizing the channel parameter.

Key words: casting roller; plastic film; heat transfer; numerical simulation; cooling mechanism

0 引言

流延加工法是制造薄膜的一种高速生产方法^[1],其生产出的薄膜具有透明度好、光泽性高、平整度好、尺寸精度高等优点。同时,由于是平挤薄膜,后续工序如印刷、复合等极为方便^[2],因而广泛应用于食品、医药用品、纺织品、日用品的包装。

在流延法生产塑料薄膜的过程中,从模头挤出的熔融聚合物的冷却过程对塑料薄膜的质量起着重要的作用。树脂经过挤出机熔融塑化,从机头通过狭缝式模头挤出,流到流延辊上,急剧冷却,然后再经过测厚、多级牵引、切边、电晕处理,最后收卷以获得薄膜产品^[3-5]。流延膜的冷却成型过程主要发生在流延辊上,其冷却效果的好坏决定了薄膜物理性能的高低。在此

生产过程中,流延辊辊面温度场的稳定性和均匀性是保证薄膜质量的关键,因此,合理的布置流延辊的内部流道结构,研究流延膜的冷却机理,了解冷却过程中的传热机理,对获得高质量的薄膜和指导生产有重要意义。

本研究通过对双向回流式螺旋流道的流延辊的换热过程进行模拟分析,以获得稳定工况下流延辊换热过程中的动态走势。

1 流延辊的结构及工作过程的分析

流延辊是直径较大的钢辊,表面经特殊的钝化处理,即镀硬铬。流延辊依靠强制水循环冷却。为提高冷却效果,降低辊筒表面温差,辊筒内部设计为空心的,并设有内套;为进一步减小辊面的横向温差,采取双向进水、双向出水的螺旋结构;为便于介质回流,夹

收稿日期:2010-02-26

作者简介:李福森(1985-),男,山东潍坊人,主要从事先进制造工艺及设备、塑料机械装备方面的研究. E-mail: princefriend@163.com

通信联系人:王栓虎,男,副教授,硕士生导师. E-mail: shuanhuwang@tom.com

套之间设有螺旋夹板。如图 1 所示,冷却介质沿螺旋流道交错流动。

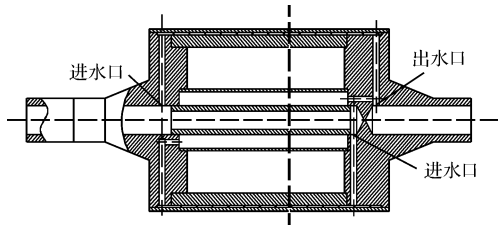


图 1 流延辊内部流道结构示意图

本研究对图 1 所示的流延辊的换热过程进行数值模拟,并分析流延辊内部流道结构、冷却水的流量和温度对其换热效果的影响,了解薄膜冷却过程中的传热机理,并通过对结果的分析来指导生产实践。

熔融聚合物从模头挤出后,经过空气对流和热辐射换热后,流到流延辊上。塑料薄膜在流延辊上的冷却过程是导热、对流、辐射综合的非稳态传热过程。在换热过程中,流延辊的冷却效果和表面温度场的均匀性与流延辊的构造、辊筒直径、塑料薄膜与辊筒的包角、热交换效率、冷却介质的传热系数、流延膜的厚度和温度等因素有关^[6],工作过程如图 2 所示。

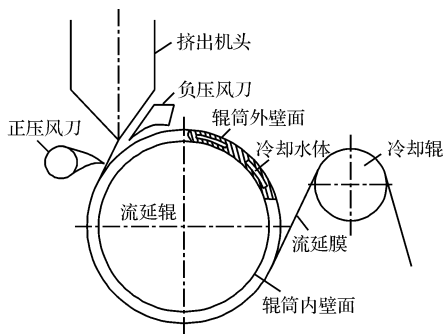


图 2 流延辊工作过程简图

1.1 换热机理

塑料薄膜在流延辊上冷却时,由粘流态凝固成高弹态。冷却过程中,其下表面与流延辊相接触,靠热传导冷却。Billon^[7]等人对这一换热过程进行了热分析,提出了聚合物薄膜在稳定状态下流到流延辊筒中的能量平衡模型,在这一热传导过程中,薄膜下表面的温度作为界面温度如下:

$$T_x = \frac{b_{\text{roll}} \cdot T_{\text{roll}} + b_{\text{pol}} (T_{\text{pol}}) \cdot T_{\text{pol}}}{b_{\text{roll}} + b_{\text{pol}} (T_{\text{pol}})} \quad (1)$$

式中 T_x —与流延辊筒相接触的薄膜表面的温度; $b_{\text{pol}} (T_{\text{pol}})$ —聚合物的散热率; b_{roll} —辊筒金属的散热率; T_{pol} —聚合物的定性温度; T_{roll} —辊筒的温度。

在流延辊筒上,薄膜的上表面与空气进行对流换热和热辐射,热量交换方程如下^[8]:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial y} = h(T_{sa} - T_a) + \sigma(\varepsilon_{\text{pol}} T_{sa}^4 - \varepsilon_a T_b^4) \quad (2)$$

式中 T_{sa} —与空气相接触的薄膜表面的温度; T_a —靠近薄膜的空气温度; T_b —远离薄膜的空气温度; ε_{pol} 和 ε_a —薄膜和空气的热辐射系数; k —薄膜的热导率; σ —Stefan-Boltzmann 常数; h —对流热导率。

冷却水在螺旋管道内交错流动,在冷却水表面处,冷却水与流延辊发生对流换热,其换热方程如下^[9]:

$$q_1 = h_1(t_w - t_f) \quad (3)$$

式中 q_1 —流延辊螺旋流道表面传给冷却水的热量; h_1 —螺旋流道表面与冷却水的对流换热系数; t_w 和 t_f —流道表面的温度和冷却水的温度。

流延辊内部中空,其内壁面与空气之间的换热方式包括对流和热辐射。由于内部温度低,相对于对流换热而言,由热辐射引起的换热量可忽略不计,故有:

$$q_2 = h_2(t_a - t_b) \quad (4)$$

式中 q_2 —流延辊内壁面与空气进行自然对流所得的换热量; h_2 —空气自然对流换热系数; t_a 和 t_b —流延辊内壁面的温度和辊内空气的温度。

1.2 传热模型

塑料薄膜生产过程中,伴有导热、对流和热辐射,Fluent 软件通过求解下面能量方程来计算此传热问题^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \{\vec{\tau}(\rho E + p)\} =$$

$$\nabla \cdot \{k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j \vec{h}_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})\} + S_h \quad (5)$$

式中 k_{eff} —有效导热率; \vec{J}_j —组分 j 的扩散通量;等式右边的前三项分别表示由于导热、组分扩散和粘性耗散所产生的能量传递; S_h —包括化学反应放热和体积热源产生的热量。

对流换热边界和辐射换热边界为:

$$q' = h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_w) \quad (6)$$

$$q'' = \varepsilon_{\text{ext}} \sigma (T_{\infty}^4 - T_w^4) \quad (7)$$

式中 h_{ext} —对流换热系数; ε_{ext} —介质的热辐射系数; q' —由于热对流而产生的换热量; q'' —由于热辐射而产生的换热量; σ —Stefan-Boltzmann 常数。

2 流延辊换热过程中的仿真计算

2.1 建模分析

塑料薄膜在流延辊上行进的过程中,几何形状只存在轻微的变化,故在此过程中只考虑冷却,忽略因牵

引力而引起的薄膜在拉伸方向上的形变;流延膜在宽度方向上的温度变化很小,可以认为宽度方向上温度分布一致;流延辊内部流道结构复杂,忽略导流通路对辊体的影响,只考虑螺旋循环水通路,建立流延辊模型如图 3 所示。

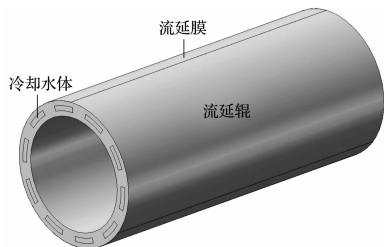


图 3 流延辊简化模型图

根据生产实际情况,取塑料薄膜材料为聚丙烯,流延辊的长度 $L = 4\ 500\ \text{mm}$,仿真计算时取一个导程, $S = 900\ \text{mm}$,辊筒半径 $r = 360\ \text{mm}$,聚丙烯薄膜的厚度 $\delta = 0.05\ \text{mm}$,薄膜的生产速率 $v = 400\ \text{m/min}$,冷却水的温度 $T = 20\ ^\circ\text{C}$,初设冷却水的速度为 $2\ \text{m/s}$ 。

2.2 仿真结果分析

根据所建模型和分析计算得到流延膜与空气换热的温度变化图(如图 4 所示),及其流延膜与流延辊换热的温度变化图(如图 5 所示)。

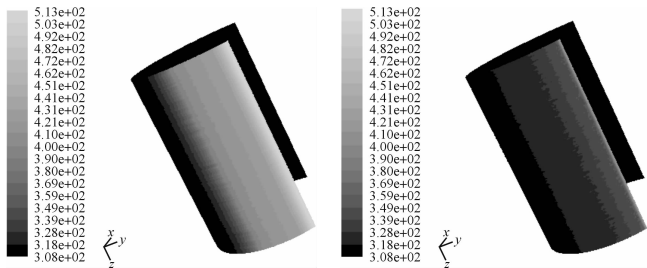


图 4 流延膜与空气换热的温度变化图

图 5 流延膜与流延辊换热的温度变化图

对比两图可以看出,流延膜与流延辊换热的热交换面比流延膜与空气换热的热交换面先达到塑料薄膜的结晶点,而且流延膜与流延辊换热的热交换面的温度下降比流延膜与空气换热的热交换面的温度下降的快,且幅度大。由于塑料薄膜两个换热表面的冷却速度不同,因此在生产厚度较大的薄膜时,将会出现较大的晶态差异,导致薄膜内部结构和性能的不均匀。基于上述情况,可以通过调节塑料薄膜与流延辊之间的换热强度来使塑料薄膜两个表面的冷却速度趋于一致。而影响塑料薄膜与流延辊换热强度的主要因素是流延辊冷却水流道结构和冷却水的流量和温度,因此可以通过使用不同规格类型的流延辊或改变冷却水的流量、温度,使塑料薄膜的两个表面具有比较接近的冷

却速度,从而保证薄膜产品在厚度方向上具有一致的晶态结构。

图中显示流延膜的温度从接触流延辊时的 $513\ \text{K}$ 降到脱离流延辊时的 $308\ \text{K}$,冷却过程和相变过程主要发生在流延膜与流延辊开始接触的前 $1/3$ 圆周内,在后面接触的时间内,温度变化幅度小,此时薄膜已成高弹态。仿真计算过程中得到流延膜与流延辊之间的换热量为 $208.39\ \text{kJ}$,与空气的换热量为 $584.86\ \text{J}$ 。从换热得到的数据可以看出,流延膜由粘流态结晶成高弹态所散发的热量绝大部分被流延辊中的冷却水带走,而与空气对流、辐射交换的热量相对较少,由此可见流延辊在流延膜冷却成型过程中起着重要作用。

在流延辊内部流道结构相同的情况下,改变冷却水的流速,可得到不同情况下冷却水与流延辊流道表面单位时间内的换热量(如表 1 所示),在流道结构尺寸不同的情况下流延辊与冷却水的换热量如表 2 所示。

表 1 冷却水流速不同的情况下流延辊与冷却水的换热量

$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.5	1	1.5	2	2.5
Q/J	138 913.19	155 263.08	174 641.8	190 104	201 214.56

表 2 流道尺寸不同的情况下流延辊与冷却水的换热量

流道尺寸/ (mm × mm)	40 × 28	45 × 25	50 × 23	55 × 20	60 × 18
Q/J	152 052.53	160 686.09	165 384.39	174 641.8	177 702.13

将换热得到的数据拟合成曲线,如图 6、图 7 所示。

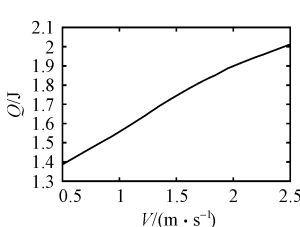


图 6 流延辊与冷却水的换热量随冷却水流速的变化图

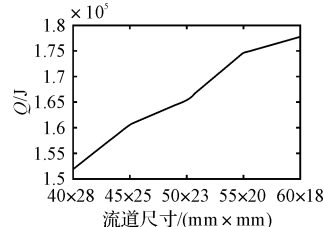


图 7 流延辊与冷却水的换热量随流道尺寸的变化图

塑料薄膜从接触流延辊开始,通过热传导方式把绝大部分热量传给流延辊,可见通过流延辊的换热量直接影响着塑料薄膜的结晶程度。从图 6 中可以看出,随着冷却水水流速度的增大,其换热量逐渐增大。冷却水在流道内交错循环流动,流速的改变影响着冷却水的雷诺数、湍动能和比耗散率,因此,根据流延辊的规格适当的调节冷却水的水流速度,控制流延辊进出口的水流温差,可以增强塑料薄膜与流延辊的换热强度。图 7 显示了随着流道截面尺寸高度的变小、宽度的增大,换热量也随之增大。这是因为塑料薄膜在向流延辊传热时,大部分热量沿辊筒径向传递,再经由

冷却水带走,因此合理的布置流道结构,设置高度和宽度的比例,可以增强换热强度。不管是通过调节冷却水的水流速度还是通过改变流延辊的规格来增大流延辊与冷却水的换热量,其目的均是为了维持流延辊外壁面温度的稳定和均匀。因为在塑料薄膜与流延辊换热的过程中,塑料薄膜直接与流延辊的外壁面接触传热,流延辊的外壁面温度直接影响着塑料薄膜的冷却速度和薄膜的结晶状态。

3 结束语

本研究通过应用 Fluent 软件对流延膜在流延辊上冷却过程的仿真分析,得出了流延膜的冷却速率主要取决于流延膜的厚度和流延辊外壁面的温度。研究结果表明,决定流延辊外壁面温度的主要因素有:流道的结构尺寸、冷却水的流量和温度。在实际生产中,辊面温度越低,冷却速率越快,薄膜的结晶度越好,但在生产厚度较大的薄膜产品时,辊面温度的波动容易使得薄膜有较大的晶态差异,从而影响薄膜的质量和性能。因此,除了通过增大冷却水的流量、选用不同规格类型的流延辊的方法来增强流延膜与流延辊之间的换热强度外,还需要设计先进的冷却水温度控制系统,来实现流延辊表面温度的精确控制。

实际应用结果表明,该研究能为流延辊结构的合理设计及流道参数的优化提供帮助,在工程生产应用中具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] SILAGY D, DEMAY G, AGASSANT J F. Stationary and stability analysis of the film casting process[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1998, 79 (23): 563 - 568.
- [2] 于庆顺,杨伟,李忠明,等. 聚丙烯流延膜的加工与应用[J]. *工程塑料应用*, 2002, 30(11): 25 - 26.
- [3] LAMBERTI G, TITOMANLIO G, BRUCATO V. Measurement and modeling of the film casting process[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(20): 5749 - 5750.
- [4] 李晓伟,孟继安,徐凤英,等. 流延法生产塑料薄膜传热过程数值模拟[J]. *塑料科技*, 2007(2): 60 - 61.
- [5] 李钢,孙宇,董野. 基于 Fluent 仿真的流延辊流道设计研究[J]. *塑料*, 2008, 37(6): 35 - 37.
- [6] 姚祝平. 塑料挤出成型工艺与制品缺陷处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] TOSHITAKA K, CAMPBELL G A. 塑料薄膜加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [8] 杨世铭,陶文栓. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 刘春泽. 热工学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 温正,石良辰,任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. [编辑: 柴福莉]

流线型彩钢机身 朗科移动硬盘新品 K202

移动硬盘机身采用金属外壳很常见,虽然坚固耐用抗压性强,但一直以来都给人冷冰冰和生硬的感觉。最近,全球移动存储领导厂商朗科科技一改传统金属机身呆板的感觉,结合最先进的制造工艺,将流线造型和绚烂的色彩首次融入移动硬盘当中,推出了 2.5 英寸移动硬盘新品 K202,给业界和消费者带来耳目一新的感觉。

全金属流线造型机身,绽放时尚幻彩

朗科 K202 移动硬盘的外观简约时尚,机身采用流线造型设计,这在全金属机身的移动硬盘当中实属罕见。外壳表面带有磨砂质感,确保了良好散热性的同时还尽显尊贵时尚。K202 的内部同样采用了合金材料(内胆),配合硬盘双导轨悬浮防震技术,使得产品具备良好的抗摔性能,即使意外掉到地上,硬盘也能得到较好的保护。市场上大多数移动硬盘产品都只有一种颜色选择,而朗科 K202 则提供了炫红、魅紫、酷蓝三种幻彩颜色给消费者选择,让每个人都能找到符合自己个性的时尚色彩。朗科 K202 采用 2.5 英寸轻薄设计,整机重量仅有 189 g,让您可轻松放进口袋,便携性极佳。

独有超快捷功能,操作更轻松

除了样子冷艳出众,内在方面,朗科 K202 也是身怀绝技。K202 移动硬盘最大的特点在于应用了朗科独有的支持超快捷功能。K202 针对用户日常对移动硬盘的操作,独创超快捷功能,只需 1 步,即可完成传统移动硬盘需要两步甚至四、五步的操作,化繁为简,大大节约了用户的时间。结合朗科专用的超快捷程序,K202 可以将用户对移动硬盘的所有操作集成在鼠标的右键菜单中。超快捷功能包括“向超快捷盘中复制文件、自动浏览超快捷盘中的文件、从超快捷盘中导出文件、将文件压缩到超快捷盘以及安全退出”等五大功能,大大简化了移动硬盘的操作步骤,使操作更加轻松便捷。

小结:作为 2.5 英寸移动硬盘中的佼佼者,朗科 K202 造型时尚,颜色鲜艳夺目,能充分彰显您的个性品味。而朗科独有的超快捷功能又能让您的日常操作变得更加轻松,因此朗科 K202 非常适合学生一族、白领和商务人士等人群使用,目前具有 160G 到 640G 等多种容量可供选择,感兴趣的朋友赶快到市场上去购买吧!

各位朋友如果想了解更多有关朗科移动存储产品的信息,可浏览朗科科技官方网站:<http://www.netac.com.cn/>

