

软包装复合膜收卷张力的优化

张志飞

(东莞奇妙包装有限公司, 广东 东莞 523798)

摘要: **目的** 为了改善软包装复合膜在生产过程中出现的复合皱折问题。**方法** 在现有薄膜收卷张力模型的基础上,对薄膜收卷的内张力进行分析,建立以卷径 $R_f=1.5R_0$ 为分界点的分段张力收卷模型。**结果** 按照该模型设置收卷张力可以很好地避免现有收卷张力模型存在的具有张力薄弱点和内部张力过大等问题,可以有效减小设备、材料等不稳定因素产生的影响,从而有效减少复合皱折问题。**结论** 利用这一优化的张力收卷模型,通过长期、大量的生产实践,统计出复合皱折损耗率从平均 5% 下降到低于 1%,复合皱折问题得到明显的改善,给公司带来超过 200 万元/年的经济效益。

关键词: 软包装复合膜; 干式复合; 锥度; 收卷张力; 内张力分布; 收卷皱折

中图分类号: TB484.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)17-0209-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.031

Optimization of Winding Tension of Flexible Packaging Composite Film

ZHANG Zhi-fei

(Dongguan Wonderful Packaging Co., Ltd., Dongguan 523798, China)

ABSTRACT: The paper aims to relieve the wrinkle issue in production of flexible packaging laminating films. Based on the existing film winding tension model, the internal tension of composite film was analyzed; and a piecewise tension winding model with winding diameter $R_f=1.5R_0$ as the cut-off point was established. Setting the winding tension according to the model can avoid the problems of the existing winding tension model, such as weak point of tension and excessive internal tension, and can effectively reduce the influence of unstable factors such as equipment and materials, to effectively reduce the wrinkling issue. By using the optimized tension winding model and through long-term and massive production practice, the loss rate of wrinkle is statistically reduced from 5% to <1%, which significantly relieves the wrinkle issue and brings the company more than 2 million yuan of annual economic benefits.

KEY WORDS: flexible packaging laminating films; dry lamination; taper; winding tension; internal tension distribution; winding wrinkle

干式复合是软包装复合膜生产的主要方式,收卷质量好坏是衡量复合膜质量的重要指标之一。在复合一些材料的过程中经常会遇到复合膜皱折问题,造成了大量的不良品,给企业带来了直接经济损失。

产生收卷皱折的根本原因,除原材料本身的质量问题外,最主要是收卷张力控制不当^[1-3]。这是因为在收卷过程中,由于外卷薄膜的挤压,卷膜内的张力

实际上并不是一直不变的,而是会随着收卷的进行不断减小^[4-5]。如果张力控制不当,很容易出现内张力小于 0 的情况,即薄膜内卷张力无法抵抗外卷的挤压,从而出现滑移或皱折^[6]。综上所述,在实际应用中,采用合适的收卷张力及张力递减来控制薄膜收卷的质量极为重要。国内外已有很多相关研究^[7-8],应用较为普遍的收卷方式是锥度张力收卷和恒力矩收

收稿日期: 2019-02-26

作者简介: 张志飞(1977—),男,工程师,主要研究方向为软包装新产品开发及生产工艺研究。

卷^[9-10]。

采用锥度张力收卷有一个特点,即在靠近卷芯的地方通常会出现一个内张力最低点,这个位置的薄膜在收卷时,一旦出现一些偶然因素,如原材料荡边、机器张力不稳定等,就可能致收卷变松,从而产生皱折。恒力矩收卷则存在初始张力过大、张力下降过快、结束张力过小等问题,会导致卷膜内部拉伸、摩擦因数上升、复合膜表面窜卷等问题,实用应用也存在一定局限性^[11]。综上所述,文中在前人研究的基础上,建立分段张力收卷模型,以期弥补上面几种收卷张力模型的不足,经过长期、多材质结构、大批量实际生产验证该分段张力收卷模型对改善复合折皱是否有较为理想的效果。

1 薄膜收卷内部张力分布研究

薄膜在收卷后实际内张力并不等于收卷时的张力值,而是随收卷进程不断减小。为了准确研究收卷张力对薄膜收卷的影响,必须对收卷后的薄膜内张力进行分析^[12]。

假设薄膜在收卷过程中都没有发生拉伸,其收卷张力不会超过薄膜弹性形变的极限。假设收卷时,卷芯的初始半径为 R_0 ,收卷完成后共收卷了 n 层薄膜,每层薄膜的平均厚度是 δ ,则收卷到第 i 层时的半径为 $R_i=R_0+i\delta$, R_n 则表示为收卷完成后的最大卷径。

在薄膜收卷时对其进行受力分析,先定义3个作用力。

1) 收卷到第 i 层时,作用在该层薄膜上的收卷张力 T_i 。

2) 当继续收卷到第 j 层时,这 $(j-i)$ 层薄膜对第 i 层薄膜的环向应力 $\sigma_{i,j}$ 。

3) 收卷到第 j 层时,作用在第 i 层薄膜上的内张力 $T_{i,j}$, ($i < j \leq n$), $T_{i,j} = \sigma_{i,j} \delta$ 。

薄膜收卷张力下降的主要原因是收卷的外层薄膜对内层薄膜有径向压力,径向压力会对薄膜产生一个与收卷张力方向相反的环向应力。设当前薄膜已收卷到第 j 层,收卷半径达到 R_j ,此时的径向压力 P 会对第 i 层产生环向应力,记作 $\sigma'_{i,j}$ 。可根据弹性力学^[13]通过计算得:

$$\sigma'_{i,j} = -\frac{PR_j^2}{R_j^2 + (1-2\gamma)R_0^2} \left(1 - \frac{(1-2\gamma)R_0^2}{R_i^2} \right) \quad (1)$$

式中: γ 为薄膜的泊松比, $i < j \leq n$

很明显,径向压力 P 是由收卷张力 T_j 产生的,即 $P = T_j/R_j$, 设 $\lambda = (1-2\gamma)R_0^2$, 代入式 (1) 可得:

$$\sigma'_{i,j} = -\frac{T_j R_j}{R_j^2 + \lambda} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \quad (2)$$

用式 (2) 可求出收卷第 j 层时,收卷张力 T_j 对

膜卷内部第 i 层环向应力分布的影响,因此,第 i 层薄膜上的环向应力 $\sigma_{i,n}$ 就等于收卷张力 T_i 及第 i 以上各层对其产生的应力之和,即:

$$\sigma_{i,n} = \frac{T_i}{\delta} + \sigma'_{i,j+1} + \sigma'_{i,j+2} + \dots + \sigma'_{i,n} = \frac{T_i}{\delta} + \sum_{j=i+1}^n \sigma_{i,j} \quad (3)$$

将式(2)代入可求得各层的内张力分布:

$$T_{i,n} = \delta \sigma_{i,n} = T_i + \delta \sum_{j=i+1}^n \sigma'_{i,j} = T_i - \delta \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \sum_{j=i+1}^n \frac{T_j R_j}{R_j^2 + \lambda} \quad (4)$$

考虑到薄膜厚度 δ 相对较小,可用积分代替累加,建立积分形式的内张力分布公式为:

$$T_{i,n} = T_i + \delta \sum_{j=i+1}^n \sigma'_{i,j} = T_i - \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \sum_{R_i}^{R_n} \frac{T_{R/\delta} R dR}{R^2 + \lambda} \quad (5)$$

式中: d 为锥度参数。

式 (5) 即是薄膜收卷后的内部张力分布,可根据收卷时控制的外张力 T_i , 求取收卷后的内张力分布 $T_{i,n}$, 并能以此判断卷装内部是否会发生内折皱(存在 $T_{i,n} < 0$) 及折皱的程度。内应力影响示意图 1。

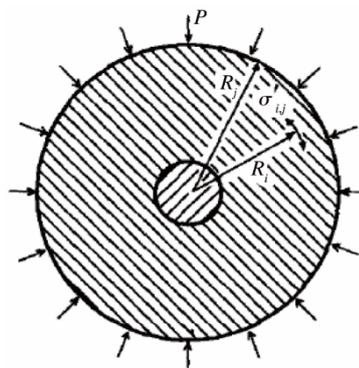


图 1 内应力影响示意
Fig.1 Diagram of internal stress effect

2 现有收卷张力模型研究及优化模型的建立

为了应对收卷时内张力下降的现象,避免皱折的产生,行业内已经很少采用恒张力的方式进行收卷了。为了达到收卷“内紧外松”的效果,收卷时的张力必须随着收卷的进行不断下降^[14-15]。使用较为普遍的有 2 种张力控制方式,一种是锥度张力收卷,另一种是恒力矩收卷。

2.1 锥度张力收卷模型 (现有模型)

锥度张力收卷是以如下的张力控制方式进行收卷:

$$T_{i,n} = (1-\alpha)f_0 + \alpha \frac{f_0 R_0}{R_i} \quad (6)$$

式中： f_0 为初始内张力； α 为锥度系数。将 T_i 代入内张力分布的计算公式 (5) 中，可得到锥度张力收卷完成后卷膜的内张力分布曲线，见图 2—3，其分别对应 6 寸和 3 寸纸芯的收卷情况（1 寸 ≈ 3.33 cm）。其中，采用 6 寸纸芯收卷时， R_n 取 $4R_0$ ，采用 3 寸纸芯收卷时 R_n 取 $8R_0$ 。

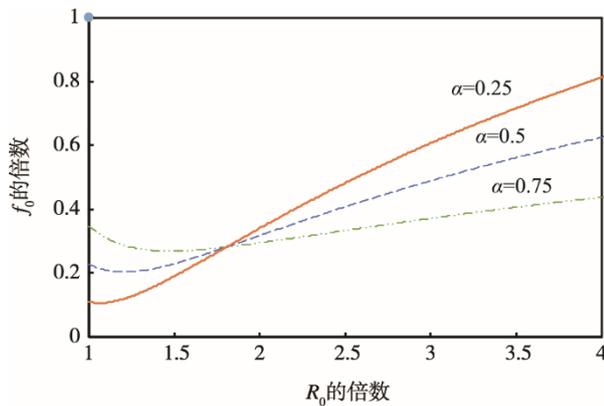


图 2 $R_n=4R_0$ 锥度张力收卷内张力分布曲线（6 寸纸芯）
Fig.2 Internal tension distribution curve of $R_n=4R_0$ taper tension rewinding (6" core)

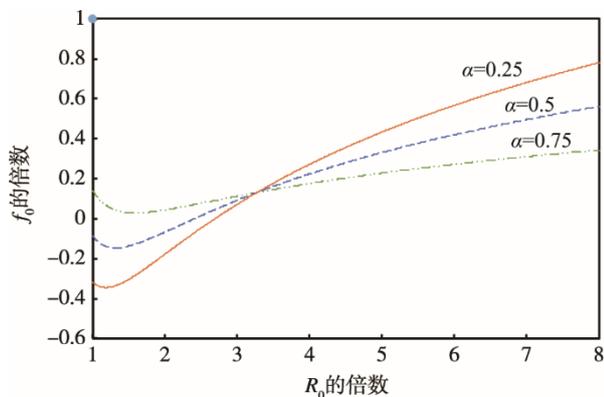


图 3 $R_n=8R_0$ 锥度张力收卷内张力分布曲线（3 寸纸芯）
Fig.3 Internal tension distribution curve of $R_n=8R_0$ taper tension rewinding (3" core)

图 2—3 中 3 条曲线分别是式 (6) 中 $\alpha=0.25$ ， $\alpha=0.5$ ， $\alpha=0.75$ 等 3 种情况得到的。锥度张力收卷形式是应用最普遍的，通过调节锥度系数 α 可以得到具有不同形状的张力曲线，从而达到各种不同的收卷效果。锥度张力收卷的方式和恒张力相比具有明显的改善作用，避免了恒张力收卷时“外紧内松”的情况，对解决收卷皱折问题具有明显效果。然而，锥度张力方式收卷总是会在靠近卷芯的位置出现一个内张力较低的点。虽然可以控制卷径等条件使得这个位置的内张力在理论上大于 0，但在实际应用中，收卷到该位置时，一旦发生设备张力波动或者原材料厚薄不均等情况，极易使得内张力小于 0，从而出现皱折。

2.2 恒力矩收卷模型（现有模型）

恒力矩收卷时 $T_i R_i$ 是一定的，都等于初始的力矩 $T_0 R_0$ ，所以收卷的张力 $T_i = (T_0 R_0) / R_i$ ，将 T_i 代入式 (5)，并假设最大的内张力分布曲线，见图 4—5。

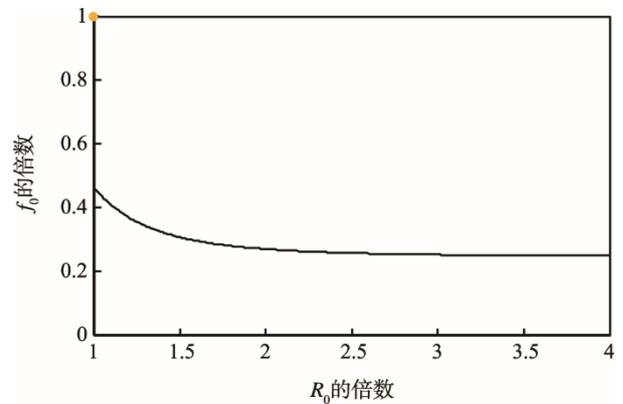


图 4 $R_n=4R_0$ 恒力矩收卷内张力分布曲线（6 寸纸芯）
Fig.4 Internal tension distribution curve of $R_n=4R_0$ constant torque rewinding (6" core)

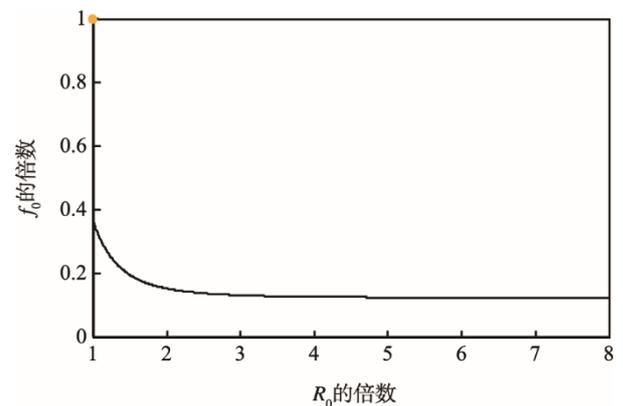


图 5 $R_n=8R_0$ 恒力矩收卷内张力分布曲线（3 寸纸芯）
Fig.5 Internal tension distribution curve of $R_n=8R_0$ constant torque rewinding (3" core)

从图 4—5 中可以看出，恒力矩收卷张力有个特点，即在理论上不会出现内张力 $T_{i,n} < 0$ 的情况，与锥度张力收卷方式相比有较好的改善。然而，在实际应用中也有不足之处，即初始内张力较大，随后约在 $R_0 \sim 2R_0$ 之间迅速下降到比较低的状态，因此，与靠近卷芯的张力相比，其卷外的张力就比较小。有时为了避免机器设备张力不稳定等偶然因素造成张力过低和卷外张力过小造成窜卷的问题，需要加大初始收卷张力。然而，这样会带来一个问题，即靠近卷芯地方会处于内张力过大的状态，在有些产品结构中，较大的张力会导致薄膜拉伸，以及摩擦因数增大^[16]。

2.3 分段锥度张力模型（优化模型）

为了解决以上收卷张力模型在实际应用中产生的问题，在此基础上结合实际应用，探索并建立了“减张力+减力矩的分段张力模型”。根据实际经验，收卷

卷径 R_i 在 $R_0 \sim 1.5R_0$ 处褶皱发生的频率最高, 以 $R_i = 1.5R_0$ 作为减张力和减力矩的分界点。假设 6 寸纸芯最大收卷半径 $R_n = 4R_0$; 3 寸纸芯最大收卷半径 $R_n = 8R_0$, 收卷时的控制张力如下所述。

6 寸纸芯:

$$R_0 < R_i \leq 1.5R_0 \quad T_i = a \frac{f_0 R_i}{R_0} + b f_0 \text{ (减张力)} \quad (7)$$

$$1.5R_0 < R_i \leq 4R_0 \quad T_i = c \left((1-d) f_0 + d \frac{f_0 R_0}{R_i} \right)$$

(减力矩, 其中 $d > 1$) (8)

3 寸纸芯:

$$R_0 < R_i \leq 1.5R_0 \quad T_i = a \frac{f_0 R_i}{R_0} + b f_0 \text{ (减张力)} \quad (9)$$

$$1.5R_0 < R_i \leq 8R_0 \quad T_i = c \left((1-d) f_0 + d \frac{f_0 R_0}{R_i} \right)$$

(减力矩, 其中 $d > 1$) (10)

先以 6 寸纸芯为例, 分别将式 (7—8) 代入内张力的计算式 (5) 中, 分段计算其内张力分布。收卷完成后, 当卷装半径为 $R_0 < R_i \leq 1.5R_0$ 时, 径向压力造成的应力由 2 部分组成, 一部分是半径 $R_0 \sim 1.5R_0$ 的减压力段造成的, 另一部分则来自于 $1.5R_0 \sim 4R_0$ 减力矩段, 后者对于任意 $R_0 < R_i \leq 1.5R_0$ 的位置, 其应力 $\sigma_{1.5R_0, 4R_0}$ 都是定值, 通过对将 $1.5R_0 \sim 4R_0$ 时式 (8) 中的应力在式 (5) 中积分可得:

$$\begin{aligned} \sigma_{1.5R_0, 4R_0} = & c \left((1-d) \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{2.25R_0^2} \right) \ln \frac{16R_0^2 + \lambda}{2.25R_0^2 + \lambda} + \right. \\ & \left. d \sqrt{\lambda} f_0 R_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2.25R_0^2} \right) \arctan \left(\sqrt{\lambda} \times \frac{(4-1.5) R_0}{\lambda + 6R_0^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

以复合 PET12/PE50 结构为例 (γ 取 PET 的泊松比为 0.39, 则 $\lambda = 0.22R_0^2$), 其中给定 $1.5R_0$ 时的收卷张力为 $\frac{7}{12} f_0$, 代入式 (7—8) 中计算可得 $a = -5/6$, $b = 11/6$ 。同时, 取 $d = 12/11$, 可算出 $c = 11/12$ 。代入式 (7—8) 中可得收卷张力的分段函数 T_i , 见式 (12—13)。

$$R_0 < R_i \leq 1.5R_0 \quad T_i = -\frac{5f_0 R_i}{6R_0} + \frac{11f_0}{6} \quad (12)$$

$$1.5R_0 < R_i \leq 4R_0 \quad T_i = \frac{f_0}{20} + \frac{4f_0 R_0}{5R_i} \quad (13)$$

由此, 收卷张力曲线见图 6。

分别将式 (12—13) 代入式 (5) 中, 可得到内张力分布。

当 $R_0 < R_i \leq 1.5R_0$ 时:

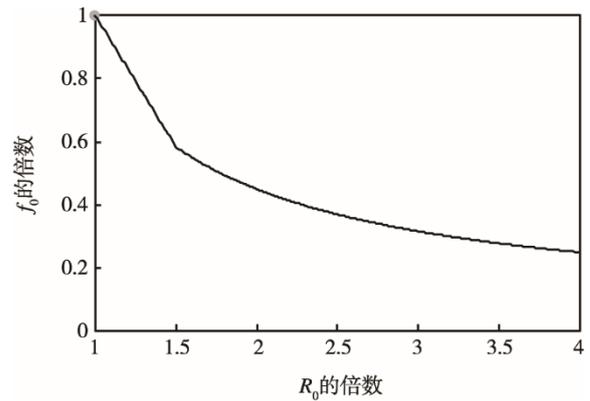


图 6 收卷张力分段曲线 (6 寸纸芯)
Fig.6 Curve of sectional winding tension (6" core)

$$\begin{aligned} T_{i,n} = & -\frac{5}{6} \left(\frac{f_0 R_i}{R_0} - \frac{f_0}{R_0} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \right) \\ & \left(1.5R_0 - R_i - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \arctan \left(\sqrt{\lambda} \times \frac{1.5R_0 - R_i}{\lambda + 1.5R_0 R_i} \right) \right) + \\ & \frac{11}{6} \left(f_0 - \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \ln \frac{2.25R_0^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \right) - \sigma_{1.5R_0, 4R_0} = \\ & -\frac{5}{6} \left(\frac{f_0 R_i}{R_0} - \frac{f_0}{R_0} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \right) \\ & \left(1.5R_0 - R_i - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \arctan \left(\sqrt{\lambda} \times \frac{1.5R_0 - R_i}{\lambda + 1.5R_0 R_i} \right) \right) + \\ & \frac{11}{6} \left(f_0 - \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \ln \frac{2.25R_0^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \right) - \\ & \frac{1}{40} f_0 \left(1 - \frac{\lambda}{2.25R_0^2} \right) \ln \frac{16R_0^2 + \lambda}{2.25R_0^2 + \lambda} - \\ & \frac{4}{5} \sqrt{\lambda} f_0 R_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2.25R_0^2} \right) \arctan \left(\sqrt{\lambda} \times \frac{(4-1.5) R_0}{\lambda + 4 \times 1.5R_0^2} \right) \end{aligned}$$

当 $1.5R_0 < R_i \leq 4R_0$ 时:

$$\begin{aligned} T_{i,n} = & \frac{4}{5} \left(\frac{f_0 R_i}{R_0} - \frac{f_0}{R_0} \sqrt{\lambda} f_0 R_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{R_i^2} \right) \arctan \left(\sqrt{\lambda} \times \frac{4R_0 - R_i}{\lambda + 4R_0 R_i} \right) \right) + \\ & \frac{1}{20} \left(f_0 - \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \ln \frac{16R_0^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \right) \end{aligned}$$

将得到的内张力函数绘入图中, 便可得到卷装半径为 $3R_0$ 时的内张力分布曲线, 见图 7。

3 寸纸芯收卷情况也类似, 设定 $1.5R_0$ 时收卷的控制张力为 $\frac{7}{12} f_0$, 计算可得 $a = -5/6$, $b = 11/6$ 。同时,

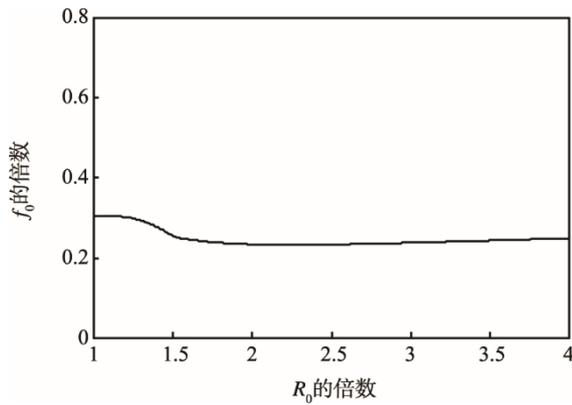


图 7 内张力分段曲线 (6 寸纸芯)
Fig.7 Internal tension distribution curve (6" core)

取 \$d=12/11\$，可算出 \$c=11/12\$。代入式 (9—10) 中可得：

$$R_0 < R_i \leq 1.5R_0 \quad T_i = -\frac{5f_0R_i}{6R_0} + \frac{11f_0}{6} \quad (14)$$

$$1.5R_0 < R_i \leq 8R_0 \quad T_i = \frac{f_0}{52} + \frac{11f_0R_0}{13R_i} \quad (15)$$

收卷张力曲线见图 8。

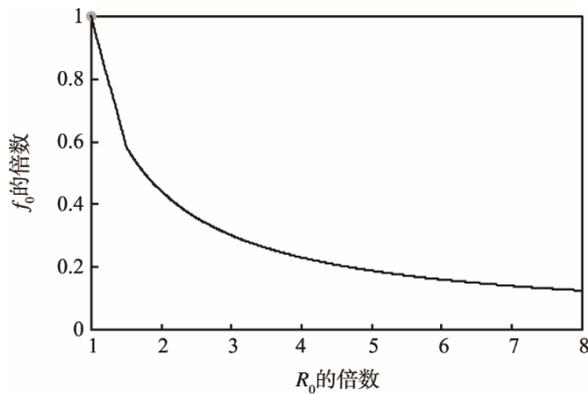


图 8 收卷分段张力曲线 (3 寸纸芯)
Fig.8 Curve of sectional winding tension (3" core)

分别将式 (13—14) 代入式 (5) 中，可得到内张力分布。

当 \$R_0 < R_i \leq 1.5R_0\$ 时：

$$T_{i,n} = -\frac{5}{6} \left(\frac{f_0R_i}{R_0} - \frac{f_0}{R_0} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \right) + \left(1.5R_0 - R_i - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \arctan(\sqrt{\lambda} \times \frac{1.5R_0 - R_i}{\lambda + 1.5R_0R_i}) \right) + \frac{11}{6} \left(f_0 - \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \ln \frac{2.25R_0^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \right) - \frac{1}{104} f_0 \left(1 - \frac{\lambda}{2.25R_0^2} \right) \ln \frac{64R_0^2 + \lambda}{2.25R_0^2 + \lambda}$$

$$\frac{11}{13} \sqrt{\lambda} f_0 R_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2.25R_0^2} \right) \arctan(\sqrt{\lambda} \times \frac{(8-1.5)R_0}{\lambda + 8 \times 1.5R_0^2})$$

当 \$1.5R_0 < R_i \leq 8R_0\$ 时：

$$T_{i,n} = \frac{11}{13} \left(\frac{f_0R_i}{R_0} - \frac{f_0}{R_0} \sqrt{\lambda} f_0 R_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{R_i^2} \right) \cdot \arctan(\sqrt{\lambda} \times \frac{8R_0 - R_i}{\lambda + 8R_0R_i}) \right) + \frac{1}{52} \left(f_0 - \frac{f_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right) \ln \frac{64R_0^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \right)$$

得到的内张力函数见图 9。

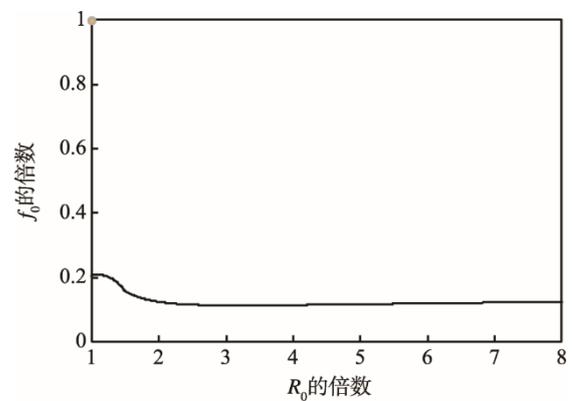


图 9 内张力分段曲线 (3 寸纸芯)
Fig.9 Internal tension distribution curve (3" core)

分段张力与恒力矩内张力曲线对比见图 10—11。从图 10—11 可以看出，对于分段张力控制来说，卷径从 \$R_0\$ 增加到 \$1.5R_0\$ 时，薄膜内张力均保持较为平稳的水平，和恒力矩相比并没有发生剧烈下降；当收卷半径达到 \$1.5R_0\$ 后，薄膜的内张力开始下降，实现所谓“内紧外松”的收卷效果。此时，由于收卷后的薄膜靠近卷芯的地方具有较大内张力，可以最大限度地减

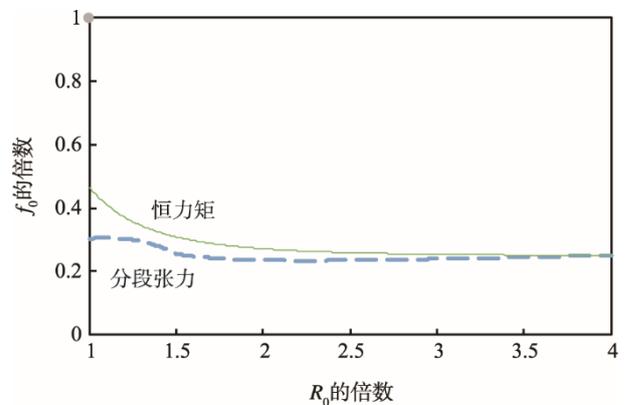


图 10 分段张力与恒力矩内张力曲线对比 (6 寸纸芯)
Fig.10 Comparison of tension curve between sectional tension rewinding and constant torque rewinding (6" core)

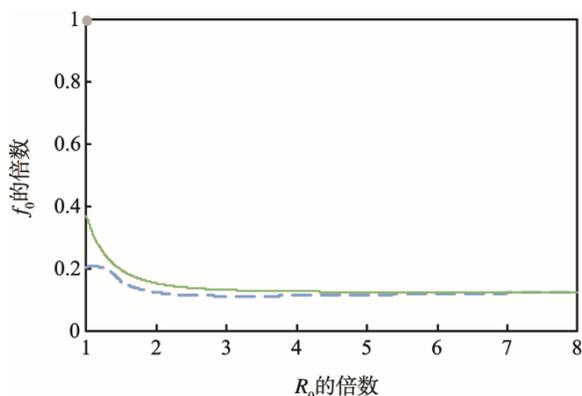


图 11 (3 寸纸芯) 分段张力与恒力矩内张力曲线对比
Fig.11 Comparison of tension curve between sectional tension rewinding and constant torque rewinding (3" core)

小因设备稳定性及原材料厚薄不均等偶然因素对收卷造成的影响。同时,在为了保证收卷质量而提高初始收卷张力的情况下,较为平稳的内部张力避免了恒力矩收卷时内部张力过大而造成的薄膜拉伸及摩擦因数上升问题,同时也不会出现因为结束张力过小而导致膜面窜卷的现象。

将“减张力+减力矩的分段张力模型”应用到 Bemis 东莞工厂的 2 类干式复合机上(机器厂商:台湾三夏、陕西北人),生产平时容易出现皱褶的几类产品(结构为 PET/PE, PET/VMPET/PE, MATOPP/AL/PET/PE)时,发现该收卷张力模型在实际应用中可以明显地改善复合皱折问题,具有良好的经济效益,其皱褶改善情况及效益见表 1。

表 1 皱褶改善情况及效益
Tab.1 Improvement of wrinkles and benefits

材料结构	复合膜年生产长度/(km·a ⁻¹)	改善前皱褶率/%	改善后皱褶率/%	产生经济效益/万元
PET/PE	6000	6	<1	60
PET/VMPET/PE	6500	6	<1	97
MATOPP/AL/PET/PE	5000	5	<1	80

3 结语

文中针对软包装行业常见的收卷皱折问题,从收卷张力入手进行研究。利用薄膜收卷时的内张力函数,建立了分段张力收卷模型。通过对该模型内张力的分析,发现该模型可以很好地避免现有收卷张力模型存在的具有张力薄弱点和初始内张力过大等问题。经过长期生产实践,用分段张力收卷模型收卷可以弥补现有收卷张力模型存在的不足,明显改善了复合皱折问题,给企业创造了良好的经济效益。

参考文献:

[1] 储松潮. BOPP 薄膜分切收卷内部皱折原因分析[J]. 塑料, 2000, 29(3): 8—10.
CHU Song-chao. Analysis on the Reasons of the Wrinkles on Split and Wound BOPP Film[J]. Plastics, 2000, 29(3): 8—10.

[2] 郝永红. BOPP 薄膜收卷中产生皱折的原因分析[J]. 塑料, 1996(4): 42—43.
HAO Yong-hong. Reasons of the Wrinkles Induced in BOPP Film Winding[J]. Plastics, 1996(4): 42—43.

[3] 李庆, 扈明明, 宋国琦. BOPP 收卷接触卷曲影响因素分析[J]. 中国化工贸易, 2014(16): 297.
LI Qing, HU Ming-ming, SONG Guo-qi. Analysis of Influencing Factors of BOPP Rewinding Contact Curling[J]. China Chemical Trade, 2014(16): 297.

[4] BECKER B. Selecting the Right Tensioning System[J]. Power Transmission Design, 1997, 2: 19—22.

[5] GEDDES J E, POSTLETHWAITE M. Improvements in Product Quality in Tandem Cold Rolling Using Robust Multivariable Control[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1998, 6: 257—267.

[6] 陈华泉, 郝喜海. 水溶性薄膜收卷过程中的张力控制[J]. 包装工程, 2002, 23(S1): 15—58.
CHEN Hua-quan, HAO Xi-hai. Tensile Force Control of the Water Solvable Films in Its Films Rolling Process[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(S1): 15—58.

[7] HASHIMOTO H, KIRIBE S. Optimization of Winding Tension for Preventing Wrinkle and Slippage in Wound Roll of Films[J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2007, 52(7): 533—545.

[8] HASHIMOTO H. Intelligent Winding Machine of Plastic Films for Preventing both Wrinkles and Slippages[J]. Modern Mechanical Engineering, 2016, 6(1): 20—31.

[9] 盛卫锋, 周一届, 姜旻. 印刷机械中的张力控制[J]. 包装工程, 2001, 22(2): 4—7.
SHENG Wei-feng, ZHOU Yi-jie, JIANG Min. Tension Control in Printing Machinery[J]. Packaging Engineering, 2001, 22(2): 4—7.

[10] 吴德会, 谭珍祥, 杨华群. 玻璃布包装中锥度收卷的内张力分布及其参数确定[J]. 包装工程, 2005, 26(6): 8—11.
WU De-hui, TAN Zhen-xiang, YANG Hua-qun. Taper Rolling-up and Parameter Determination in Glass Fabric Packaging[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(6): 8—11.

[11] 杨喜武. 提高 BOPA 薄膜收卷质量的探讨[J]. 科技创新导报, 2007(36): 48.

- YANG Xi-wu. Discussion on Improving the Rewinding Quality of BOPA Film[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007(36): 48.
- [12] 吴德会, 王晓红. 玻璃布浸渍加工锥度收卷中的内张力分布及其参数确定[J]. 产业用纺织品, 2006, 24(10): 18—22.
WU De-hui, WANG Xiao-hong. Inner Tension Distribution of Taper Rolling-up and Parameter Determination in Glass Cloth Dipping Process[J]. Technical Textiles, 2006, 24(10): 18—22.
- [13] 徐秉业, 刘信生. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
XU Bing-ye, LIU Xin-sheng. Applied Elastoplastic Mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1995.
- [14] 邸长明, 张科. BOPP 薄膜分切收卷里紧外松现象的解决办法[J]. 塑料包装, 1999(3): 15—17.
DI Chang-ming, ZHANG Ke. Solution to the Phenomenon of Internal Tightness and External Looseness in Slitting and Winding of BOPP Film[J]. Plastic Packaging, 1999(3): 15—17.
- [15] 李中国. PET 薄膜分切机收卷张力和压力的控制[J]. 聚酯工业, 2012, 25(5): 37—39.
LI Zhong-guo. Control of Tension and Pressure of Slitting Machine for BOPET Film[J]. Polyester Industry, 2012, 25(5): 37—39.
- [16] 李子平. 浅谈薄膜收卷过程中的张力自动控制[J]. 塑料包装, 2005, 15(6): 29—30.
LI Zi-ping. Discussion about Automatic Tension Control in Film Rewinding Process[J]. Plastic Packaging, 2005, 15(6): 29—30.