

柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述

陈建魁*, 金一威, 尹周平

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: chenjk@hust.edu.cn

2018-07-24 收稿, 2018-11-29 修回, 2018-12-04 接受, 2019-01-25 网络版发表

国家自然科学基金(51475195)资助

摘要 卷到卷制造是通过柔性基板成卷连续加工的制造技术, 充分利用了柔性电子可变形特性, 是实现柔性电子大面积、规模化制造的最有效技术途径之一。收卷单元是卷到卷连续制造系统的必要组成, 其内应力控制是影响柔性电子成品质量与生产效率的关键因素。本文详细介绍了柔性基板卷绕收卷内应力研究概况, 重点综述了基于叠加原理的弹性力学方法、开尔文模型的拉普拉斯变换方法、松弛半径概念的离散建模方法和有限元方法等建立的收卷内应力研究模型; 讨论了收卷速度造成的惯性力变化、基板厚度不均及弹性变形、环境温度与卷绕基板各层间卷入空气夹层、以及收卷单元压辊与气胀轴结构因素对收卷内应力的影响; 分析了常用锥张力、恒张力等收卷内应力控制方法, 并介绍了柔性RFID标签、燃料电池膜电极和柔性OLED等代表性柔性电子卷到卷制造系统中收卷内应力控制工程应用; 最后提出了柔性电子卷到卷制造系统中收卷内应力进一步研究的关键问题: 非均匀非等厚基板引起周向应力分布变化和层间接触不连续, 并展望了收卷内应力研究方向。

关键词 柔性电子, 卷到卷制造, 收卷内应力, 张力控制, 内应力控制

柔性电子(flexible electronics)是将有机/无机电子元件沉积在柔性基板上形成具有独立功能的器件, 相对传统硅基电子具有大面积、可弯折、轻薄、透明的优点, 在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景, 如柔性显示器^[1]、RFID标签、薄膜太阳能电池^[2]、柔性传感器^[3]、柔性电路板^[4]等(图1)。柔性电子系统已经并将继续开辟出许多创新的电子应用领域(如石墨烯电容^[5]、柔性晶体管^[6]、生物集成电子^[7]等)。据IDTechEx预测柔性电子应用的市场规模: 2020年为630亿美元, 2028年为3010亿美元; 进一步考虑柔性电子所需要的新型材料与制造装备市场, 柔性电子将很快成为一个高新技术聚集产业与平台^[8]。我国政府高度重视柔性电子领域研究, 国家自然科学基金“十二五”规划将柔性电子制造作为主要发展方向之一。

卷到卷(roll-to-roll, R2R)制造工艺, 被公认是实现柔性电子规模化制造的最有效技术途径之一, 可以充分利用柔性电子的变形特性, 实现薄膜图案化、薄膜剥离与转移、多层薄膜层合等工艺集成^[9]。典型R2R系统包括放卷模块、进给模块、收卷模块等, 根据工艺要求, 在各个模块中展开纠偏控制^[10]、张力控制^[11]、振动控制^[12]和位置控制^[13]等。常见卷到卷系统如图2所示。

料卷收卷质量是保证柔性电子半成品、成品质量的关键之一(常见收卷缺陷如图2(a)所示)。收卷内应力分布状态将直接影响柔性电子的收卷质量^[14], 内应力过大会导致卷绕物在运输存储的过程中拉伸变形甚至断裂; 内应力过小会造成层间滑移与收卷不齐^[15]; 当内应力出现负值时, 会导致局部区域出现褶皱或者锥形突出^[16]; 同时, 卷内应力不稳定还会

引用格式: 陈建魁, 金一威, 尹周平. 柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述. 科学通报, 2019, 64: 555–565

Chen J K, Jin Y W, Yin Z P. Review of wound roll stress in roll-to-roll manufacturing of flexible electronics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 555–565, doi: 10.1360/N972018-00744

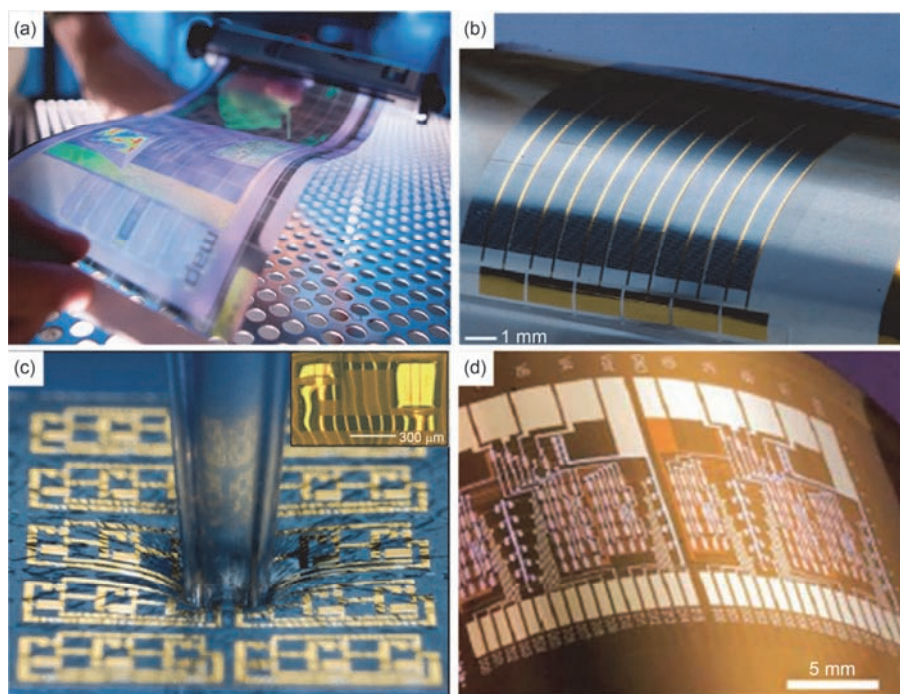


图1 (网络版彩色)典型柔性电子产品。(a) 柔性显示器^[1]; (b) 薄膜太阳能电池^[2]; (c) 柔性传感器^[3]; (d) 柔性电路板^[4]

Figure 1 (Color online) Typical flexible electronics. (a) Flexible display^[1]; (b) thin-film solar cell^[2]; (c) flexible sensor^[3]; (d) flexible printed circuit^[4]

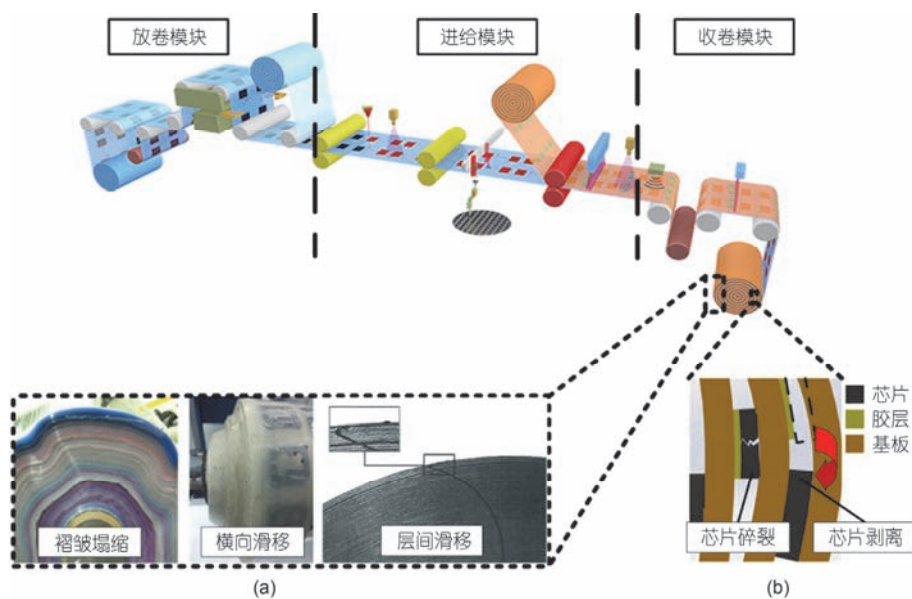


图2 (网络版彩色)卷到卷系统与收卷缺陷示意图。(a) 常见收卷缺陷; (b) 收卷过程中芯片的断裂与剥离

Figure 2 (Color online) The schematic diagram of R2R system and winding defects. (a) Common winding defects; (b) cracking and peeling of chips in winding process

使卷绕线速度变化, 进而导致柔性电子料卷内外层松紧程度不同^[17]。

若柔性基板上已贴合相应的电路与器件, 如图2(b)所示, 料卷内部局部应力聚集, 会导致电路与电

子器件破坏, 料卷内部应力不均导致的层间滑移还可能将电子元器件从柔性基板上剥离。因此, 为了高效制造高质量的柔性电子产品, 收卷内应力稳定控制尤为重要。对于柔性电子卷到卷制备系统中收卷

模块料卷内部应力的分析和研究,需要首先根据料卷物理结构从基础力学理论出发建立料卷几何、材料、力学、运动参数的模型关系,然后分析运动、材料等关键参数对内应力影响机理,进而研究合适的设计方法控制内应力分布及变化规律等. 本文将从收卷内应力基础建模、多参数影响规律与控制及工程实际应用等方面逐步展开.

1 收卷内应力建模研究

常规收卷内应力建模包含4种方法: (1) 基于叠加原理的弹性力学方法,适用于建立弹性膜二维收卷模型,即不考虑料卷内部应力沿料卷轴向的分布情况. 采用该方法,可以实现二维线性收卷模型的建立^[18,19]. 进一步考虑径向弹性模量的不均匀性,并对其模型进行完善,得到二维非线性收卷模型^[20~22]. (2) 基于开尔文(Kelvin)模型的拉普拉斯变换方法,适用于建立黏弹性薄膜的二维收卷模型^[23],即考虑柔性基板材料的黏弹性对收卷内应力的影响,可用于研究收卷过程中以及收卷后料卷内部应力随时间的变化情况^[24~26]. (3) 基于松弛半径概念的离散建模方法^[27~29],该建模方法中首次考虑了料卷内部应力沿料卷轴向的分布情况. 其基本思想是将料卷沿轴向分成有限段,并在每一段应用二维收卷模型求解料卷内部的应力分布,最终得到近似的三维收卷模型,由于该模型在建立时并没有考虑段与段之间的变形协调问题,并非严格意义上的三维模型,又称为“伪3D”模型. (4) 有限元方法,随着计算机技术的迅速发展,该方法在收卷内应力的研究中得到广泛应用^[30~32]. 基于上述4种方法建立柔性膜料卷的收卷模型,简要介绍如下.

1.1 利用基于叠加原理的弹性力学方法建立收卷模型

由弹性力学物理方程与几何方程可得料卷径向应力增量 σ_r 与周向应力增量 σ_θ 的表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \left(\frac{E_r}{1-\mu_r\mu_\theta} \right) \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \mu_\theta \frac{u_r}{r} \right) \\ \sigma_\theta &= \left(\frac{E_\theta}{1-\mu_r\mu_\theta} \right) \left(\mu_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

其中, σ_r 表示由外层基板叠加而对内部各层引起的径向应力增量, σ_θ 表示由外层基板叠加而对内部各层

引起的周向应力增量, E_r 、 E_θ 分别表示料卷径向弹性模量与周向弹性模量, u_r 表示径向位移, r 表示当前的径向位置, μ_r 与 μ_θ 分别表示切向对径向的泊松比以及径向对切向的泊松比.

进一步结合内外部边界条件,可求得薄膜料卷内部实际径向应力分布 P 与周向应力分布 T 为^[19]

$$\left. \begin{aligned} P &= \left(\frac{1+ar_{in}^{-2\gamma}}{r_{in}^b} \right) \int_{r_{in}}^{r_{out}} \left(\frac{s^b}{1+as^{-2\gamma}} \right) \left(\frac{T_w}{s} \right) ds \\ T &= T_w - \left(\frac{\alpha-a\beta r_{in}^{-2\gamma}}{r_{in}^b} \right) \int_{r_{in}}^{r_{out}} \left(\frac{s^b}{1+as^{-2\gamma}} \right) \left(\frac{T_w}{s} \right) ds \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

其中, $a=(\gamma-\mu-e_c)/(\gamma+\mu+e_c)$, $\gamma=\sqrt{\delta^2+e_r}$, $e_r=E_\theta/E_r$, $e_c=E_\theta/E_c$, $b=1-\alpha$, $\alpha=\gamma-\delta$, $\beta=\gamma+\delta$, P 表示料卷内部径向应力分布,即料卷内部的径向应力随径向位置的变化状态, T 表示料卷内部周向应力分布,即料卷内部周向应力随径向位置的变化状态, T_w 表示最外层薄膜张力, μ 表示薄膜各向同性泊松比, δ 表示薄膜各向异性泊松比, E_θ 表示料卷周向弹性模量, E_r 表示料卷径向弹性模量, E_c 表示芯筒的弹性模量, r_{in} 为料卷内径, r_{out} 为料卷外径.

1.2 利用基于开尔文模型的拉普拉斯变换方法建立收卷模型

该方法用于建立黏弹性材料的收卷模型^[24],模型的建立过程与1.1节中弹性材料的建模过程类似,先获得单层柔性膜叠加后内部各层的应力增量,再将各层应力增量叠加得到料卷内的实际应力分布.不同的是,黏弹性收卷模型是一个时变模型,需要借助拉氏变换来建立其时变控制方程.

对于黏弹性材料,通常采用Kelvin-Voigt模型来表征其黏弹性行为,该模型拉普拉斯变换下的表达式^[26]为

$$s\bar{E} = \left(\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1 + \eta_1 s} \right)^{-1}, \quad (3)$$

其中, $\bar{E}$ 为拉普拉斯变换下的弹性模量, $E_0=1/D_0$, $E_1=1/D_1$, $\eta_1=\tau_1/E_1$, s 为拉普拉斯变量, D_0 为初始蠕变柔量, D_1 为一阶蠕变柔量, τ_1 为一阶时间常数.需要注意的是,式子中 D_0 , D_1 与 τ_1 均为常数,具体值依材料而定,由实验获得^[25].

拉普拉斯变换下轴对称圆柱的周向应力与径向应力表达式^[33]为

$$\bar{\sigma}_r = \frac{A}{r^2} + 2C, \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2C, \quad (5)$$

其中, $\bar{\sigma}_r$ 表示拉氏变换下的径向应力, $\bar{\sigma}_\theta$ 表示拉氏变换下的周向应力, r 表示当前的径向位置, A 和 C 是未知的系数. 为了求解两个未知系数, 结合两个在拉普拉斯变换下的边界条件, 可求得拉普拉斯变换下 A 与 C 的表达式^[26]:

$$A = -\frac{T_w h \bar{E} r_{\text{out}}^2 (s\bar{E} - E_c)}{E_0 (s\bar{E} r_{\text{in}}^2 - E_c r_{\text{in}}^2 - s\bar{E} r_{\text{out}}^2 - E_c r_{\text{out}}^2)}, \quad (6)$$

$$C = -\frac{T_w h \bar{E}}{2E_0 r_{\text{out}}} + \frac{T_w h \bar{E} r_{\text{out}}^2 (s\bar{E} - E_c)}{2E_0 r_{\text{out}} (s\bar{E} r_{\text{in}}^2 - E_c r_{\text{in}}^2 - s\bar{E} r_{\text{out}}^2 - E_c r_{\text{out}}^2)}, \quad (7)$$

其中, T_w 表示最外层薄膜张力, h 表示薄膜厚度, $\bar{E}$ 表示拉氏变换下的弹性模量, E_c 是芯筒的弹性模量, r_{in} 表示料卷内径, r_{out} 表示料卷外径.

将解得的 A 和 C 代入式(4)与(5)后, 经拉普拉斯逆变换之后即得黏弹性收卷模型, 由该黏弹性收卷模型可得到料卷内部的应力沿着径向与周向的分布以及料卷内部应力随时间的变化情况.

1.3 利用基于松弛半径概念的离散建模方法建立收卷模型

为了探索料卷内部应力沿轴向分布规律, 考虑将整个料卷沿轴向分切为 m 段, 如果各段料卷在进给方向上的厚度保持不变, 那么收卷后将会造成各段料卷外径的巨大差异, 外径较大的位置将会引起更大的周向应力. 为了减小各段料卷半径差异, 引入松弛半径的概念^[27,29], 假如能够提取最外层卷带, 使之处于完全松弛的状态, 该无应力的松弛环的半径称为松弛半径. 通过给定一个松弛半径可以得到各层各段收卷内应力. 下文对基于松弛半径概念的离散建模方法^[29]做一简要介绍.

存在轴向厚度不均时料卷收卷状态如图3所示, 则第 i 层第 j 段的周向应力 $\sigma_{\theta i, j}$ 可以表示为

$$\sigma_{\theta i, j} = \frac{E_\theta}{1 - \mu^2} \left(\frac{r_{i, j} - R_{xi}}{R_{xi}} \right), \quad (8)$$

其中, R_{xi} 为第 i 层的松弛半径, $r_{i, j}$ 为第 i 层第 j 段料卷的内径, E_θ 为料卷周向弹性模量, μ 为薄膜各向同性泊松比.

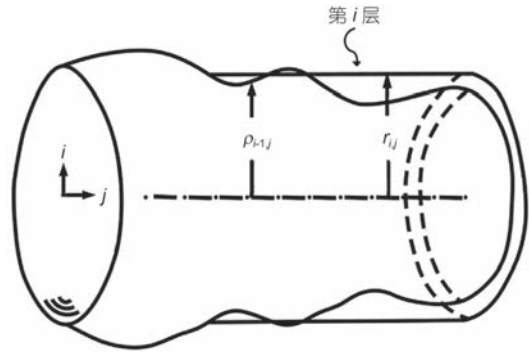


图3 轴向厚度变化时收卷模型

Figure 3 Exaggerated view of a wound roll with thickness variation

为了求解公式(8)中松弛半径 R_{xi} , 取第 i 层沿轴向的各段总张力 $T_{\theta i}$ 等于第 i 层实际收卷张力 T_{ai} , 可得:

$$T_{ai} = T_{\theta i} = \frac{E_\theta}{1 - \mu^2} \sum_{j=1}^m \left(\frac{r_{i, j} - R_{xi}}{R_{xi}} w_j h_{i, j} \right), \quad (9)$$

其中, w_j 为第 j 段薄膜的宽度, $h_{i, j}$ 为第 i 层第 j 段薄膜的厚度, 第 i 层第 j 段料卷的外径 $\rho_{i, j}$ 表示为

$$\rho_{i, j} = r_{i, j} + h_{i, j}. \quad (10)$$

第 i 层第 j 段的料卷的内径 $r_{i, j}$ 表示为

$$r_{i, j} = \max \{ R_{xi}, \rho_{i-1, j} \}. \quad (11)$$

结合公式(8)~(11)就可以获得沿径向与周向分布料卷内部应力.

通过该模型可获得料卷各层的周向应力分布与各层松弛半径, 进而可以将一个料卷分为有限独立的段. 各段的内部应力分布则可以通过任意现有的二维模型求解得到. 由于模型在建立时是通过分段的方式近似求解应力沿轴向分布, 并不是真正意义上的三维模型, 故又称为“伪3D”模型.

该“伪3D”模型作为一种分析绕卷内部三维应力分布的方法得到了广泛应用. 应用该“伪3D”模型基础上, 通过考虑材料的黏弹性课进一步研究粘弹性绕卷内部的三维应力分布^[25]. 在利用有限元方法研究薄膜横向与径向厚度分布不均匀时, 为了避免外层厚度的巨大差异, 也可采用该“伪3D”模型^[34].

1.4 利用有限元法建立收卷模型

有限元法通过离散的有限单元集合体来代替真实的结构^[35], 通过有限元模型的建立, 可以探究芯筒几何不均匀^[30]、薄膜几何厚度分布^[36,37]以及料卷内部的层间滑移^[38]对收卷内应力的影响. 并且利用有

限元模型求解收卷内应力的可行性已经通过实验得到了有效的验证^[34]。

比较而言,基于叠加原理的弹性力学方法适用于求解等厚弹性膜的收卷内应力;基于开尔文模型的拉普拉斯变换方法适用于求解黏弹性膜的收卷内应力;基于松弛半径概念的离散建模方法是一种利用二维模型求解料卷内部三维应力分布的通用近似方法,需要结合1.1或1.2节所述模型才能得到料卷内部应力;有限元方法建立了真正意义上的三维模型,但是相对于其他方法,其缺点是建模工作量大,求解费时。

2 收卷中不同参数对内应力的影响研究

收卷张力是影响料卷内部应力分布的主要因素之一,在实际收卷过程中,运动参数(如收卷速度)、物理参数(如薄膜弹性模量与几何不均匀)、环境参数(如空气与环境温度)、输送结构(如收卷形式与气胀轴结构)等因素都会在一定程度上影响收卷内应力。各个参数对收卷内应力的具体影响情况,概述如下。

2.1 膜运动速度对内应力的影响

收卷速度的改变会影响收卷内应力变化规律,当料卷以一定速度收卷时,料卷会具有一定惯性力,收卷速度的变化会影响该惯性力的大小。结果表明:相同条件下,考虑收卷速度时,外层基板引起的径向压力要小一些,造成收卷完成之后,径向应力分布要比不考虑收卷速度时小;相反的,周向应力却要比不考虑收卷速度时更大,且随着收卷速度的不断增大^[39,40]。

2.2 膜物理参数对内应力的影响

对于柔性基板沿轴向厚度分布不均匀的情形,可分别采用“伪3D”模型^[27]和基于最小能量原理的有限元方法^[34,37]进行建模,两者结果较为一致,表明在厚度较大的位置,其径向应力与周向应力相对更大。对于弹性模量较小的材料可视为大变形性材料,小变形理论不再适用,需要针对大变形材料建立了大变形模型^[41,42],结果表明大变形模型下的结果更接近于实验结果。

2.3 环境参数对内应力的影响

收卷过程中空气的存在与环境温度的变化均会

影响收卷内应力。为了研究温度对收卷完成后料卷内应力的影响^[43],建立了热弹性模型,考虑了温度影响的收卷内应力模型为

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r}{dr} - (g^2 - 1) \sigma_r + E_\theta (\alpha_\theta - \alpha_r) \Delta T = 0, \quad (12)$$

其中, σ_r 为径向应力增量, $g^2 = E_\theta / E_r$, E_θ 为料卷周向弹性模量, E_r 为料卷径向弹性模量, r 为料卷内的径向位置, α_θ 表示周向热膨胀系数, α_r 表示径向热膨胀系数, ΔT 表示温度的变化量。结合一定边界条件^[21]即可求得温度影响下料卷内部应力变化。结果表明,对于负温度系数的芯筒,温度升高会使靠近芯筒附近的径向压力明显下降,而对靠近料卷外围部分的应力几乎没有影响。

空气夹层的存在同样会对料卷内部应力的分布造成影响^[44~47]。收卷过程中层与层之间卷入空气时,会在层间行成一层空气层,由于空气层的存在,料卷实际径向弹性模量会因为空气层的引入而变小,进而影响料卷内部径向应力的分布状态。在考虑空气层情况下,基本模型与非线性模型^[22]相同,不同之处在于径向弹性模量的选取上,考虑空气夹带情况下的等效径向弹性模量 E_{req} 的计算方法为^[46]

$$E_{\text{req}} = \frac{h + h_0}{h/E_{\text{rf}} + h_0/E_{\text{rair}}}, \quad (13)$$

其中, E_{rf} 表示薄膜弹性模量, h 表示薄膜厚度, h_0 表示空气层厚度, E_{rair} 表示空气层弹性模量。

研究结果表明,在考虑空气夹层时,绕卷内部径向应力分布要显著小于不考虑空气夹带的情况,且空气层的存在使得绕卷内部更加容易发生塌缩。

2.4 卷绕结构对内应力的影响

柔性膜收卷单元卷绕结构也会对收卷内应力产生影响^[48,49],常规卷绕没有压辊对料卷施加压力,因此只能在芯筒上施加旋转力矩。料卷配置压辊时,分为表面收卷与差动收卷两种方式。采用表面收卷时,只有压辊为主动辊。差动收卷的布局与表面收卷相同,不同之处在于芯筒与压辊均为主动辊。采用压辊不仅可以排除层间空气,还可以增大料卷内部周向张力,进而提高绕卷整体结构的稳定性。

研究结果表明^[50],配置了压辊的等厚薄膜的卷绕收卷,在恒压力压辊模式下,在料卷内层区域的滚压作用对防止料卷内部形成曲皱现象是有利的。但对料卷外层区域,压辊力会对料卷薄膜层产生较大

的径向应力. 当收卷完成撤去压辊时, 受压薄膜恢复原状, 使得刚卷绕的外层薄膜的周长加大, 产生附加张力, 对应的周向应力也相对于不带压辊的情况更大. 气胀轴支撑板数量会影响料卷芯筒的几何形状^[51], 从而影响料卷内部应力分布状态, 且较少的支撑板数量更容易引起料卷内部应力分布的不均匀.

3 收卷内应力控制方法研究

由于外层基板在收卷过程中持续对料卷内部形成径向压力, 使得绕卷内部各层基板的最终张力并不会等于初始张力, 而是随着料卷半径的增大而不断减小. 实现卷绕过程中收卷内应力控制, 最重要的是获得一定应力模型下的张力控制规律.

为了得到高质量的收卷, 通过进一步研究锥张力控制与料卷内部应力分布的关系, 得到了一种锥张力控制方法, 并给出了一种避免出现绕卷质量不合格的锥度张力求解方法. 通过研究线性与双曲线锥张力分布对薄膜输送过程中偏移以及收卷内应力分布的影响, 发现双曲线锥张力分布更加有利于绕卷径向应力均匀分布; 而线性锥张力虽然会引起更大的径向应力分布不均匀, 但是能更加有效地抑制周向滑移. 进而提出了一种混合锥度张力控制, 相比于之前单一的锥度控制方式, 径向应力分布的均匀性与轴向滑移均得到一定改善^[52].

绕卷内部出现塌缩是由于绕卷内部出现负的周向应力所引起的, 常规抑制塌缩是采用了张力随卷径增大而减小的经验式锥张力控制, 为了找到了“最”合适的锥度收卷曲线, 建立收卷张力与收卷内应力的关系, 反求最优收卷应力分布下的锥度收卷张力^[53], 可有效避免了塌缩与层间滑移现象的发生. 也有学者讨论了恒张力与锥度张力收卷下的绕卷内部张力分布, 给出了芯轴处不起褶皱的必要条件和理想均匀应力分布下的绕卷张力^[54].

大卷装带材收卷过程中收卷内应力分布不均匀的问题更为突出^[55], 可采用优化设计方法, 利用单纯形法将内张力分布反求最优收卷张力的问题转化为 n 维矢量的寻优问题, 进而获得最优收卷张力.

4 工程应用

R2R制造工艺极为适合柔性电子的批量化制造, 对应RFID标签、有机发光二极管、薄膜太阳能、印刷电子等的制备技术与装备已经得到深入研究. 由

于单层或多层结构柔性电子基板的几何不均匀性, 为了保证柔性电子产品每件质量与整个料卷质量, 需要严格控制料卷内部应力, 除收卷张力、收卷速度外, 基板侧向偏移也会对收卷内应力造成较大影响, 均需有效控制.

由于柔性RFID标签所需芯片微小超薄的特点, 通常采用倒装芯片(flip-chip)技术实现芯片与天线的物理封装. 图4所示作者团队研发完成的RFID标签倒装键合装备, 包括基板输送、点胶、贴装、热压、检测和收卷模块, 利用R2R技术将各工艺模块有效互联共同实现高精高效的芯片与天线自动贴装, 通过严格控制收卷过程张力来控制料卷内部应力^[56-58], 以防止料卷内部过大的应力压裂了芯片或者使芯片从基板上剥离, 通过在收卷区域安装纠偏控制器, 避免了收料卷边缘不齐对内部应力造成不可控的影响^[59].

燃料电池膜电极(membrane-electrode-assembly, MEA)是燃料电池核心单元, R2R工艺可以实现燃料电池膜电极组件的高效、低成本的连续化生产. 图5为作者团队研发完成的质子交换膜燃料电池膜电极密封膜连续叠层装备^[60], 主要包括: 剥离模块、初次层合模块、对位层合模块、模切模块以及收放卷模块. 在收卷过程中, 为了保证7层结构变截面膜成品质量, 且便于下一道工序的延续加工, 通过张力检测、闭环控制和锥张力控制结合方案实现了收卷内应力均匀控制.

图6为柔性OLED卷到卷制造流程与装备, 柔性基板经过蒸镀、干燥、冷却等工艺将空穴注入层、发光层、绝缘层、阴极层等镀于基板之上, 完成各功能层的镀膜之后进行收卷. 在收卷过程中, 需要合理控制料卷内部应力, 保证料卷内部应力不能超过柔性



图4 (网络版彩色) 柔性RFID标签卷到卷倒装键合装备
Figure 4 (Color online) R2R flip chip equipment for flexible RFID tags manufacturing



图5 (网络版彩色)燃料电池膜电极密封膜卷到卷叠层装备

Figure 5 (Color online) R2R seal lamination equipment for fuel cell MEA manufacturing

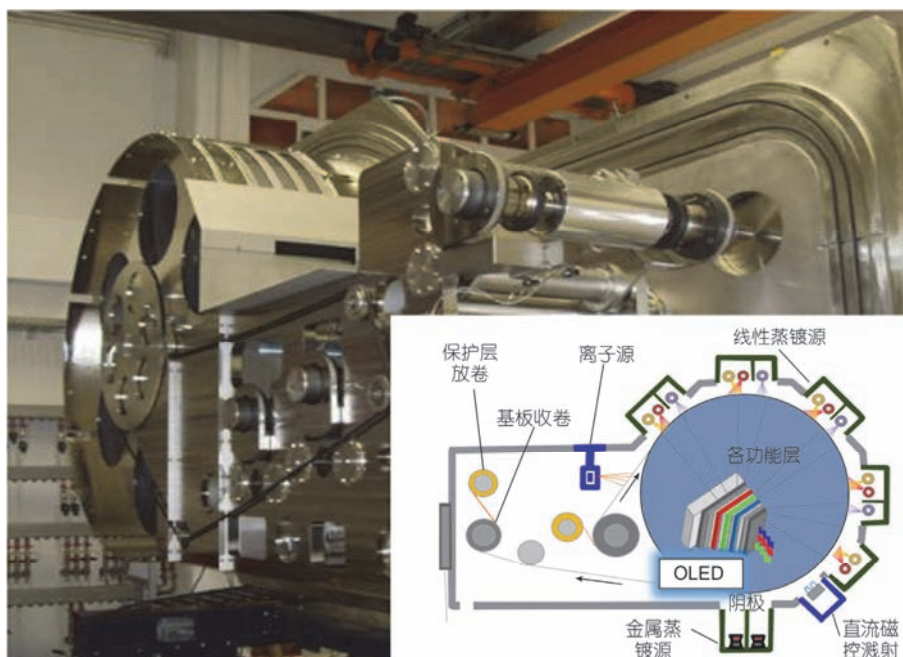


图6 (网络版彩色)柔性OLED卷到卷制造流程与装备

Figure 6 (Color online) R2R process and equipment for flexible OLED manufacturing

OLED器件的应力极限^[61].

5 总结

在柔性电子R2R批量化制造中,收卷内应力建模与控制已成为柔性电子产品质量控制关键技术之一.本文重点介绍了二维弹性收卷模型、二维黏弹性收卷模型、以及三维模型的建立方法;分析了运动参数、物理参数、环境参数以及收卷结构参数对收卷内应力的影响;介绍了收卷内应力的控制方法以及工程应用的若干研究进展.为了使柔性电子收卷质量

得到更加精确、稳定的控制,收卷内应力研究还可以进一步深入探究:

(1) 现有二维模型中设定薄膜沿着进给方向是等厚的,实际柔性电子产品较多存在沿进给方向上严重非均匀,比如柔性RFID标签中,金属天线层与芯片沿着进给方向上按一定间距规律分布且厚度相对于薄膜基板不可忽略,且芯片所在位置的应力是影响标签成品率的重要因素,因此考虑绕卷进给方向不均匀的周向应力分布仍有较大实际研究意义.

(2) 二维模型的推导均是将绕卷当成轴对称结

构,而实际的收卷过程是一个螺旋缠绕过程,实际螺旋收卷下的应力分布状态仍有待研究.在利用有限元方法建立三维收卷模型时,未考虑厚度不均匀基板各层间不接触区域存在大量不接触的情况,考虑层间接触状态的有限元模型也有待研究.

对于卷到卷收卷内应力的研究,经历了从弹性力学、拉普拉斯变换、离散建模和有限元方法等建立基础理论的过程,完成了2D到3D研究的转变,并已

有部分模型和控制方法应用于实际工程.未来该领域的研究,一方面可以将原有研究点进一步深入,比如将早期被简化研究条件细化或引入其他领域理论计算模型,另一方面随着新品类柔性电子的进一步发展,新的应用需求和新的产品制造工艺仍会将卷到卷制备作为批量生产的首选,根据新的工程边界条件需对收卷内应力建模、控制及测量技术展开更加深入、细致的研究.

参考文献

- Geller T. The promise of flexible displays. *Association for Computing Machinery*, 2011, 54: 16–18
- Yoon J, Baca A J, Park S I, et al. Ultrathin silicon solar microcells for semitransparent, mechanically flexible and microconcentrator module designs. *Nat Mater*, 2008, 7: 907–915
- Rogers J A, Someya T, Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics. *Science*, 2010, 327: 1603–1607
- Park S, Vosguerichian M, Bao Z. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics. *Nanoscale*, 2013, 5: 1727
- El-Kady M F, Strong V, Dubin S, et al. Laser scribing of high-performance and flexible graphene-based electrochemical capacitors. *Science*, 2012, 335: 1326–1330
- Nomura K, Ohta H, Takagi A, et al. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 2004, 432: 488–492
- Kim D, Lu N. Epidermal electronics. *Science*, 2011, 333: 838–843
- Nathan A, Ahnood A, Hiralal P, et al. Flexible electronics: The next ubiquitous platform. *Proc IEEE*, 2012, 100: 1486–1517
- Allen K J. Reel to real: Prospects for flexible displays. *Proc IEEE*, 2005, 93: 1394–1399
- Huang M. Design and research on control system of lateral position of moving membrane web (in Chinese). Master Thesis. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013 [黄蒙. 薄膜卷材纠偏控制系统设计与研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2013]
- Raul P R, Pagilla P R. Design and implementation of adaptive PI Control schemes for web tension control in roll-to-roll (R2R) manufacturing. *ISA Trans*, 2015, 56: 276–287
- Ma L, Chen J K, Tang W, et al. Vibration-based estimation of tension for an axially travelling web in roll-to-roll manufacturing. *Meas Sci Technol*, 2017, 133: 752–758
- Ye X B. Mechanism analysis and modeling of laminated position error for multi-layer flexible film (in Chinese). Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 [叶晓滨. 多层柔性膜复合对位误差机理分析与建模. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2016]
- Song X F. The research of tension control for high-accuracy winding vacuum film coating machine (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Shanghai University, 2007 [宋晓峰. 高精度卷绕真空镀膜设备张力控制技术研究. 博士学位论文. 上海: 上海大学, 2007]
- Lin J H. Research on the rules of changing inner tension and the inertia force based on variable system (in Chinese). Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang SCI-TECH University, 2013 [林佳辉. 基于变质量系统的卷绕内张力变化规律研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江理工大学, 2013]
- Yang Y J, Chen D C. The tension and its control upon rolling-up (in Chinese). *Chin J Sci Instrum*, 2004, 25: 691–693 [杨娅君, 陈德传. 收卷中的张力及其控制. 仪器仪表学报, 2004, 25: 691–693]
- Li D. Research on tension control for winding system (in Chinese). Master Thesis. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2007 [李迪. 卷绕系统中的张力控制研究. 硕士学位论文. 西安: 西安科技大学, 2007]
- Catlow M G, Walls G W. A study of stress distribution in pirns. *J Tex Inst Proc*, 1962, 53: 410–429
- Altmann H C. Formulas for computing the stresses in center-wound rolls. *Tappi J*, 1968, 51: 176–179
- Pfeiffer J D. Internal pressures in a wound roll of paper. *Tappi J*, 1966, 49: 342–347
- Burns S J, Meehan R R, Lambropoulos J C. Strain-based formulas for stresses in profiled center-wound rolls. *Tappi J*, 1999, 82: 159–167
- Hakiel Z. Nonlinear model for wound roll stress, *Tappi J*, 1987, 70: 113–117

- 23 Qualls W R, Good J K. An orthotropic viscoelastic winding model including a nonlinear radial stiffness. *J Appl Mech*, 1997, 64: 201–208
- 24 Kokan D, Gramoll K. Development of a viscoelastic filament-winding process model. In: *Structure, Structural Dynamics & Materials Conference*, 1996. 1781–1787
- 25 Yu H W. Three-dimensional viscoelastic winding models for the analysis of baggy lanes formation. Doctor Dissertation. Oklahoma: Oklahoma State University, 2007
- 26 Acton K, Weick B. Viscoelastic behavior of polymer tape in a wound roll. *Mech Adv Mater Struct*, 2014, 21: 53–66
- 27 Cole A K, Hakiel Z. A nonlinear wound roll stress model accounting for widthwise web thickness nonuniformities. *ASME*, 1992, 149: 13–14
- 28 Kedl D M. Using a two-dimensional winding model to predict wound roll stresses that occur due to circumferential steps in core diameter or to cross web caliper variation. In: *Proceedings of the 2nd international Conference on Web Handling*, 1991. 99–112
- 29 Hakiel Z. On the effect of width direction thickness variations in wound rolls. In: *Proceedings of the 2nd international Conference on Web Handling*, 1991. 79–98
- 30 Lee Y M, Wickert J A. Stress field in finite width axisymmetric wound rolls. *J Appl Mech*, 2002, 69: 130–138
- 31 Murtaza K I. Verification of circumferential and axial strains in axisymmetric wound roll models. Doctor Dissertation. Oklahoma: Oklahoma State University, 2009
- 32 Arola K, Herten R V. Two dimensional axisymmetric winding model for finite deformation. *Comput Mech*, 2007, 40: 933–947
- 33 Timoshenko S P, Goodier J N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1970
- 34 Good J K, Mollamahmutoglu C, Markum R, et al. Residual winding stresses due to spatial web thickness variation. *J Manuf Sci Eng*, 2017, 139: 031003
- 35 Sun H T. On survey of finite element method and analysis of its basic concepts (in Chinese). *Shanxi Arch*, 2012, 38: 37–39 [孙洪铁. 有限单元法概述及其基本概念的分析. *山西建筑*, 2012, 38: 37–39]
- 36 Hoffecker P. The analysis of a nip impinged three dimensional wound roll. Doctor Dissertation. Oklahoma: Oklahoma State University, 2006
- 37 Mollamahmutoglu C, Good J K. Modeling the influence of web thickness and length imperfections resulting from manufacturing processes on wound roll stresses. *CIRP Ann-Manuf Technol*, 2015, 8: 22–33
- 38 Yanabe S, Takahashi K, Yamashita T. Web winding simulation and wound roll stresses. *J Adv Mech Des Syst Manuf*, 2010, 4: 281–289
- 39 Olsen J E. On the effect of centrifugal force on winding. *Tappi J*, 1995, 78: 191–195
- 40 Yagoda H P. Centrifugally induced stresses within center wound rolls-part II. *Mechanics Res Commun*, 1980, 7: 181–193
- 41 Benson R C. A nonlinear wound roll model allowing for large deformation. *J Appl Mech*, 1995, 62: 853–859
- 42 Mollamahmutoglu C, Good J K. Analysis of large deformation wound roll models. *J Appl Mech*, 2013, 80: 1016
- 43 Qualls W R, Good J K. Thermal analysis of a round roll. *J Appl Mech*, 1997, 64: 871–876
- 44 Good J K, Holmberg M W. The effect of air entrainment in center wound rolls. In: *Proceedings of the 2nd international Conference on Web Handling*, 1993. 246–263
- 45 Tanimoto K, Kohno K, Takahashi S, et al. Wound stress of permeable papers with air-entrainment. *Arch Appl Mech*, 2003, 73: 160–170
- 46 Good J K, Covell S M. Air entrainment and residual stresses in rolls wound with a rider roll. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Web Handling*, 1995. 95–112
- 47 Tanimoto K, Kohno K, Takahashi S. Numerical stress analysis of wound roll with air entrainment. *Trans Jpn Soc Mech Eng Part A*, 2002, 68: 161–168
- 48 Mollamahmutoglu C. 2D axis-symmetric wound roll model including nip effects. Doctor Dissertation. Oklahoma: Oklahoma State University, 2009
- 49 Good J K, Wu Z. The mechanism of nip induced tension in wound rolls. *J Appl Mech*, 1993, 60: 942–947
- 50 Deng N T, Zhang J Y, Xu J D. Analysis of web winding theory (in Chinese). *Insul Mater*, 1986: 8–13 [邓乃绥, 章兼源, 徐景端. 薄膜卷绕理论分析. *绝缘材料*, 1986: 8–13]
- 51 Rajannan D. The effect of web non homogeneity and core effects on wound roll stress. Doctor Dissertation. Oklahoma: Oklahoma State University, 2011
- 52 Lee C W, Kang H, Shin K. Advanced taper tension method for the performance improvement of a roll-to-roll printing production line with a winding process. *Int J Mech Sci*, 2012, 59: 61–72
- 53 Hashimoto H. Optimization of wind-up tension of webs preventing wrinkles and slippage. *J Manuf Sci Eng*, 2009, 131: 054501
- 54 Yang Y J, Guo Y M. The stress distribution after the textile band rolled (in Chinese). *J Tex Res*, 2003, 24: 56–58 [杨娅君, 郭乙木. 纺织物带材收卷后的应力分布. *纺织学报*, 2003, 24: 56–58]
- 55 Zhang H R, Wu D H, Nie J, et al. Optimal design of control tension in winding process for large wound roll (in Chinese). *Meas Control Technol*, 2011, 30: 38–42 [张海荣, 吴德会, 聂均, 等. 一种大卷装带材收卷过程中张力控制的优化设计方法. *测控技术*, 2011, 30: 38–42]

- 56 Shao L. Study and application on tension control for flexible substrate transportation systems (in Chinese). Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 [邵琳. 柔性薄膜卷绕输送系统中张力控制研究与应用. 武汉: 华中科技大学, 2012]
- 57 Zhou C L. Modeling, simulation and experiment of tension control in flexible film discontinuous unwinding system (in Chinese). Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013 [周春雷. 柔性膜非连续放卷系统张力控制建模、仿真及实验. 武汉: 华中科技大学, 2013]
- 58 Chen J K, Ying Z P, Xiong Y L. A conveyance method for discontinuous winding processes based on synchronous position control (in Chinese). China Mech Eng, 2010, 14: 1639–1642 [陈建魁, 尹周平, 熊有伦. 一种基于位置同步的非连续卷绕进给方法. 中国机械工程, 2010, 14: 1639–1642]
- 59 Zhang R. Study of lateral displacement control for flexible substrate (in Chinese). Master Thesis. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 [张锐. 柔性基板横向偏移量控制方法研究. 武汉: 华中科技大学, 2012]
- 60 Chen J K, Liu M H, Huang Y A, et al. High-rate roll-to-roll stack and lamination of multilayer structured membrane electrode assembly. J Manuf Process, 2016, 23: 175–182
- 61 Mogck S, Wanski T, Lehmann C, et al. Present status of roll-to-roll OLED fabrication and encapsulation. J Jpn Soc Clr Mater, 2013, 86: 461–465

Summary for “柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述”

Review of wound roll stress in roll-to-roll manufacturing of flexible electronics

Jiankui Chen^{*}, Yiwei Jin & Zhouping Yin

State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

^{*} Corresponding author, E-mail: chenjk@hust.edu.cn

Flexible electronics has been widely used in many main-stream applications like flexible display, thin-film solar cell, RFID tags, flexible sensors, and so on. Roll-to-roll (R2R) is a kind of method by which flexible substrate can be processed in a continuous way. This kind of method saves time, cost, reduces delay time and increases efficiency, throughput, performance, etc. The typical R2R system mainly consists of unwinding unit, feeding unit and winding unit, where deviation rectification control, tension control, vibration control and position control are needed. By taking full advantages of the deformation characteristics of flexible electronics, the R2R process has become one of the most effective ways in manufacturing flexible electronics. The winding unit is an essential part in the R2R system and the control of the wound roll stress in winding process is one of the main factors affecting the quality and productivity of flexible electronics. A tiny wound roll stress will cause difficulties in storage and transportation. The substrates or the electronic circuits mounted on it may be broken when the wound roll stress is too large. This paper begins with the discussion of common issues and the influence of wound roll stress in winding process. Currently, the web tension and its lateral position are two factors that mainly affect the wound roll stress. The wound roll stress will increase with the augment of the web tension. While a variation of lateral position can cause non-uniform wound roll stress in cross machine direction. Subsequently, the modelling methods and solution methods based on elastic mechanics, Laplace transformation, discrete modelling and finite element method are generalized. The four models are called elastic winding model, viscoelastic winding model, pseudo winding model and FEM winding model respectively. The elastic model is derived to predict wound roll stress of the elastic web. The viscoelastic model is developed to study how the wound roll stress changes with time after winding. In the pseudo model and the FEM model, the effect of thickness variation along the width direction is considered. Then this review analyses the effects of winding speed-induced inertia force, web deformation and its inhomogeneous thickness, temperature, air entrainment, structure of the nip roller and the core shaft on the wound roll stress. The taper tension control and constant tension control methods for wound roll stress and engineering applications in RFID tag packaging, seal lamination and flexible OLED manufacturing are also presented. Finally, this paper forecasts the key problems need to be further studied for the wound roll stress in winding process. The study of wound roll stress may focusing on the following aspects: (1) Conducting wound roll stress studies that considering the effect of thickness variation in machine direction; (2) usually we consider the wound roll as an axisymmetric cylinder, so it is necessary to develop a winding model to deal with the helical structure of the wound roll; (3) when deriving winding models, it's necessary to consider the discontinuous contact between layers.

flexible electronics, roll-to-roll manufacturing, wound roll stress, tension control, wound roll stress control

doi: 10.1360/N972018-00744