[文章编号] 1003－4684(2021)01-0013-05

艾条定量卷制机的预成型技术研究

张楚鹏[1]，张 杰[1]，张道德[1]，唐郁轩[1]，田魏龙[2]

(1 湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068；2 湖北工业大学工程技术学院机械工程系，湖北 武汉 430068)

[摘要] 艾条定量误差是影响卷条机的合格率和产量的关键。将减小艾条的定量误差为设计目标，首先分析椭圆辊和圆辊成型方式对艾条定量误差的影响程度，知圆辊机构能使艾条定量误差更小，因此将圆辊作为艾绒辊压成型机构；其次重点研究圆辊成型对预成型后艾条强度和艾条产量的影响参数，基于对辊数学模型分析得圆辊半径和模腔个数对强度和产量有影响；然后利用 workbench 对不同半径和模腔个数的对辊机构进行静力学分析，结合加工成本、相邻模腔的强度以及生产产量等因素，得到最佳的参数分别为圆辊半径 25.5 mm 和模腔个数 5 个；最后通过定量实验验证最佳参数的合理性，并得到预成型机构能满足艾条定量误差 5%、合格率 94%和日产量达 100 kg 以上的指标。

[关键词] 艾条卷制机；定量误差；圆辊成型

[中图分类号] TH16[文献标识码] A

艾条的成型包括脱叶、捣碎、筛选、卷制等工序，而卷制是关键加工工艺之一。干艾叶生产出艾绒的比例被称为艾绒的精度，其比例越高，精度越大。在相同的卷制情况下，艾条的重量反映了艾绒精度的大小，精度过大或过小都会影响疗效和成本[1]。卷制过程的预成型组件中艾条重量的定量误差控制存在难度，为了控制艾绒的精度，则对于艾条重量的定量控制就非常必要。考虑到成本和市场使用需求，因此将艾绒比例设定为 10∶1 并通过预成型组件使艾条的定量误差能达到 5%以内的指标。

国外对于艾条卷制的研究相对较少，而机械卷制方式在卷烟机械行业应用较为广泛。国内公开报道中用于实现艾条自动卷制功能的设备很少，目前艾条卷制机采用纯手工或半自动的加工方式为主。在艾条卷制设备研究方面，进料时仅仅在环形传送带上固定了一定体积装艾绒的模具，通过模具大小对艾条重量进行定量[2]，无法达到本文的精度指标。

艾条重量的控制影响着艾绒的定量误差。为满足定量精度的指标，通过增加预成型组件的模腔控制艾条重量，并优化模腔关键参数来减小艾条的定量误差。

1 预成型原理及方案分析

预成型机构对艾绒重量的控制效果影响着艾条的定量精度。因此，建立预成型组件中对辊机构的数学模型，分析预成型原理以及预成型方案来优化相关的参数，以提高艾条定量精度。

1.1 预成型原理

辊压成型，图 1 分为左侧挤压辊和右侧挤压辊，艾绒通过螺旋给料机均匀进入对辊间隙腔内实现预成型。艾绒在对辊的作用下经历了喂料、变型、出料这三个阶段。

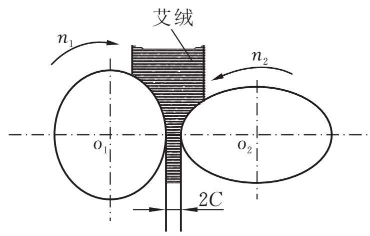

图 1 辊压艾绒示意图

喂料阶段：艾绒在合力作用下进入对辊间隙后，开始受到较小的挤压作用，各艾绒颗粒因受压而变得紧凑。

变型阶段：艾绒被挤压到两辊最小间隙 $2c$ 处时，挤压和剪切达到最大化，艾绒预成型基本完成。

出料阶段：艾绒离开最小间距 $2c$ 时，经过对辊的挤压以条状形态最终离开对辊。

其中，变型阶段因挤压和剪切达到最大化，艾绒密度受到影响最大，艾条重量发生改变较多，因而成

[收稿日期] 2020－07－08
[基金项目] 湖北工业大学中青年人才项目(Q20201404)
[第一作者] 张楚鹏(1988－)，男，湖北黄冈人，工学博士，湖北工业大学讲师，研究方向为精密仪器设计
[通信作者] 张 杰(1994－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为机械电子工程

为影响艾条定量误差的关键阶段。

1.2 预成型方案分析

挤压成型机构主要是圆辊和椭圆辊机构。在变型阶段产生的剪切力大小对艾绒致密度有着很大影响，因此要对预成型方案进行分析得到合理的预成型组件。通过有限元法对艾绒颗粒单元体进行受力分析。为了分析艾绒受到的剪切作用的大小，忽略艾绒在两辊间的滑移量，辊间啮合受力如图 2 所示。

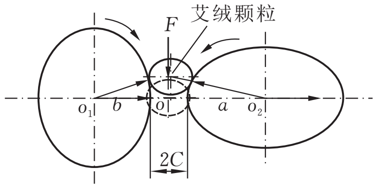

图 2 对辊受力

基于椭圆定义可简化长短轴与剪切力的大小有如下关系：

$$a = b + kF \tag{1}$$

式中：a 为椭圆辊长轴；b 为椭圆辊短轴；k 为剪切力的影响因素；F 为艾绒所受剪切力。在艾绒颗粒单元体处于两辊之间时，参数 k 应该受到长短轴、艾绒剪切形变、对辊间隙的影响。其中剪切形变与长短轴以及对辊间隙之间有如下几何关系：

$$\tan\theta = \frac{\Delta l}{a + c} \tag{2}$$

式中：Δl 为艾绒的剪切形变；θ 为艾绒颗粒开始接触辊到离开辊转过的角度；c 为两辊最小间隙的一半。艾绒在对辊间受到剪切作用下破碎，根据材料力学[3]的剪切公式可知：

$$\Delta l = \frac{F}{EA} \tag{3}$$

式中：A 为单颗粒艾绒的横截面积；E 为艾绒的杨氏模量。当对辊的转速为 n 时，转过的角度与时间之间有如下关系：

$$t = \frac{\theta}{2n\pi} \tag{4}$$

两椭圆辊的最大线速度差为 $2n\pi(a - b)$。考虑到力是变化的，根据微分思想可知单颗粒艾绒的剪切形变为在时间 t 内最大线速度差的积累。

$$2n\pi(a - b)t = \Delta l \tag{5}$$

因此可得

$$k = EA\arctan(\Delta l/(a + c)) \tag{6}$$

剪切力越大，对艾绒的破碎作用最大，容易导致艾绒的密度不断变化，加大了控制艾绒定量精度的难度。当选择椭圆辊时，由于 $a \geqslant b$，破碎力增大，但 $a = b$（即对辊轴为圆辊）时，剪切力 F 最小，对艾条控制定量误差影响最小，因此将圆辊机构作为预成型组件。

3 模腔关键影响参数分析

对于圆辊成型，大多数研究仅局限于对辊受力分析，对辊中产品的定量却研究甚少。为了满足合格率和生产产量要求，预成型机构中可增加相应的圆形模腔来控制艾条的重量，以提高艾条的定量精度。对于模腔，一般是研究模腔产品的产量和强度[5]，因此重点分析圆辊成型对预成型后艾条产量和强度的影响规律。

3.1 艾条产量的影响参数分析

预成型模腔由模腔和间隔腔组成，间隔腔是在模腔与模腔之间的区域（图 3）。圆柱模腔的艾条产量由艾绒的密度和预成型模腔的体积决定，因此艾条的产量

$$Q = (2V_m + V_\delta)\rho \times 10^{-9} \tag{7}$$

式中：V_m 为模腔的总体积；V_δ 为间隔腔的总体积。

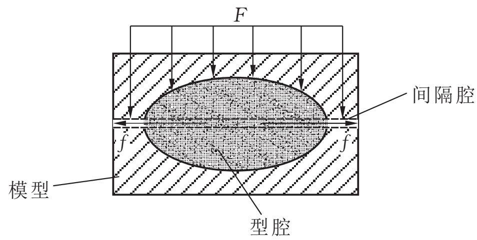

图 3 型腔模型艾绒

预成型条是在模腔中被压制而成，模腔的总体积

$$V_m = NV_x \tag{8}$$

式中：N 为模腔的数量；V_x 为每个模腔的内陷体积，mm^3。

圆柱辊旋转一周，间隔腔形成的体积

$$V_\delta = 2RLe\pi \tag{9}$$

式中：R 为圆柱辊半径，mm；L 为成型辊有效工作辊长，mm；e 为两成型辊间隙，mm。结合上式分析知，当艾条长度确定时，影响艾条产量的主要参数是模腔个数 N 和半径 R。

3.2 艾条强度的影响参数分析

由圆辊成型原理分析可知，艾绒在封闭空间内被挤压成型，预成型后艾条的强度关乎进一步的成型组件里面的艾条紧密程度，影响了艾条重量的定量精度。基于对辊理论[5]提出两相邻模腔 1、2 的数学模型：假设艾绒与辊面之间没有相对滑动，相邻 2 个模腔艾绒质量守恒，因此可将相邻模腔体积变化来体现艾条密度变化，密度越大强度越大（图 4）。

定义 n_v 的物理意义是模腔 2 比模腔 1 体积增加的比例，即艾条密度

$$n_v = \frac{\Delta V}{V_2} \tag{10}$$

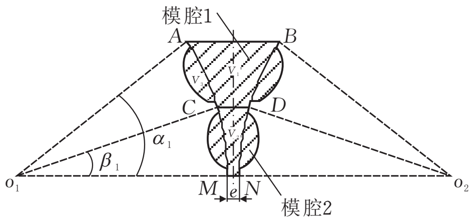

图 4　模腔数学模型

式中:V_1 为模腔 1 的体积;V_2 为模腔 2 的体积;ΔV 为两模腔体积差。

根据质量守恒定律,得

$$\rho_2 = \rho_1 + \rho_1 n_v \tag{11}$$

其中:ρ_1 为艾绒在模腔 1 中的密度,g/cm^3,ρ_2 为艾绒在模腔 2 中的密度,g/cm^3。

由图 4 可得,

$$S_{ABO_1O_2} = \frac{[(2R+e)+(2R+e-2R\cos\alpha_1)]R\sin\alpha_1}{2} \tag{12}$$

$$S_{CDO_1O_2} = \frac{[(2R+e)+(2R+e-2R\cos\beta_1)]R\sin\beta_1}{2} \tag{13}$$

由于模腔均匀,则 $\alpha_1 = 2\beta_1$,于是有:

$$S_{AO_1C} = \frac{1}{2}R^2\beta_1 \tag{14}$$

$$S_{CMO_1} = \frac{1}{2}R^2\beta_1 \tag{15}$$

式中 $S_{ABO_1O_2}$、$S_{CDO_1O_2}$、S_{AO_1C}、S_{CMO_1} 为假设截面积。

又因为 β_1 较整辊而言较小,设模腔有效长为 L,将式(12)—(15)进行简化,并代入体积公式:

$$V_2 = R\beta_1 e + 2V_x \tag{16}$$

$$\Delta V = 4R^2\beta_1^3 L, \tag{17}$$

n_v 越大表示产品密度越大,即预成型后艾条强度越大。由上式分析可知,当模腔半径 R 确定时,β_1 以及 V_x 均可确定,相较于半径,对辊间距的影响不大。因此,影响预成型后艾条强度的主要参数是对辊半径 R。

由上分析可知,影响艾条产量和强度的主要参数为 R 和 N。通过对不同的对辊半径以及模腔个数进行静力学分析,得到优化后参数 R 和 N 的最佳值。

3.3　参数 R 和 N 的优化

在模腔其他因素一定时,R 值越大,n_v 值越大,预成型艾条强度越大。当 R 值越大时,轴的形变越小,并且产量越高。但 R 值越大,圆辊的重量增加,加工成本也会提高。借鉴刘音[6]研究,以无模腔时 42 mm 对辊直径为优化基础,结合艾条半径 9 mm 和轻量化、强度以及成本考虑,当增加模腔时,可将相应的圆辊直径初步设定为 33、42、51、60、69 mm 等 5 种,然后利用 workbench 对不同轴径的圆辊进行静力学[7]分析。辊轮采用密度为 7850 kg/m^3 的钢材制作,弹性模量为 2×10^{11} Pa,泊松比为 0.3,辊轮的有限元模型如图 6 所示。

综合形变、轴径与轴重的影响,在位移形变与轴重变化曲线图中重量和位移形变的两条曲线会相交,相交点即为对辊最合适的轴径(图 5)。

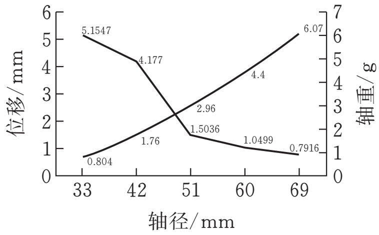

图 5　位移形变与轴重变化曲线

通过图 5 可知,考虑到实际模腔半径的影响,选择交点右侧轴径为 51 mm 处为最合适的轴径,分析结果如图 6 所示,可见最大形变为 1.503×10^{-6} mm,自重为 2.96 kg。

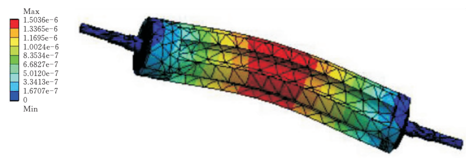

图 6　轴径为 51mm 形变图

由式(8)可知,对辊半径 R 一定时,N 值越大,产量越高;但是 N 越大,两辊相邻模腔的应力会变大,模腔磨损变大会导致定量误差变大。因此,模腔个数的选择与应力磨损之间的关系需要讨论。

出于相邻模腔强度、艾条产量以及合格率的考虑,将圆辊的模腔个数初步定为 2、3、4、5、6、7 这几种,然后利用 workbench 静力学分析不同个数的模腔圆辊相邻模腔间的应力大小。辊轮采用密度为 7850 kg/m^3 的钢材制作,弹性模量为 2×10^{11} Pa,泊松比为 0.3。随着模腔个数的增加,由于相邻模腔之间的间距变小,应力也会相应增加,但是预成型单支艾条卷制时间则会相应减小。

在图 7 中,单支加工时间和相邻模腔之间应力的两条曲线会相交,相交点即为对辊模腔最合适的加工个数。

因单支艾条卷制时间和产量的影响并且模腔个数为整数,本应该选 4 个,但考虑到后面工序的协调性,故辊模腔个数为 5 相对合理。其相邻模腔间的应力大小分析结果如图 8 所示,最大应力为 0.007094 MPa。

艾绒在进料仓中被下料,经螺旋进料器[8]的传送,落至预成型机构,由圆辊实现辊压预成型工序。

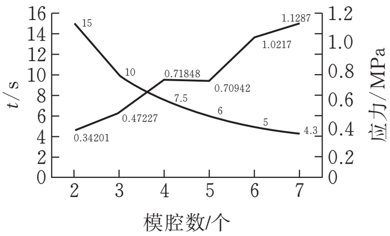

图 7　加工时间和应力变化曲线

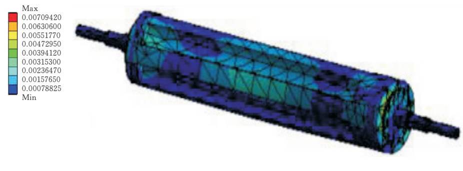

图 8　模腔个数为 5 的应力图

在确定最优的 R 和 N 后，对预成型机构进行设计。根据研究目标和卷条机的工作原理，卷条机按照模块化设计的思路分为预成型机构、成型组件、推送组件、卷制组件、供纸组件以及基台组件[7]，艾绒卷条机的整体立面图如图 9 所示。

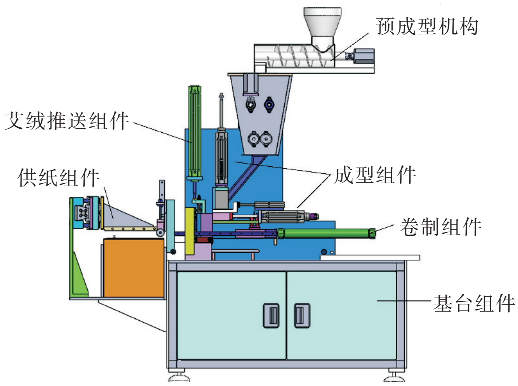

图 9　艾绒卷条机立面图

在设计艾绒卷条机的时候，依据艾条的用途和市场需求拟定基本参数，用以作为后期检测合格率以及产品的设计指标（表 1）。

表 1　参数指标表格

序号	项目	参数要求
1	生产产量	＞100 kg/d
2	定量误差	24g×(1±5%)
3	合格率	＞90%
4	长度	200 mm
5	直径	18 mm

为满足卷条机各个工序之间的协调、定量精度以及生产产量指标，艾条卷制大约用时为 6 s/条，按三班制。带入式(7)可计算得每天产量可达到 115 kg 以上。

4　实验验证与分析

按照之前提出的设计指标，利用卷条机进行定量实验。为了验证所得的优化对辊半径和模腔个数的合理性，卷条机实物图如图 10 所示。

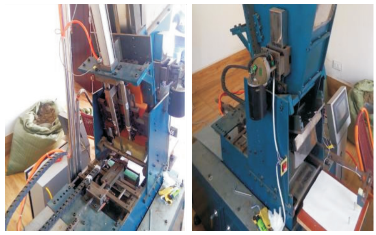

图 10　艾绒卷条机实物图

为尽可能保证实验的准确性，将艾绒按照质量等分成 5 组，进行多组定量实验，其中实验第 1 组部分数据见图 11。

(a)单支　　　(b)10支

图 11　第 1 组单支重量及整组重量

根据成型后艾条能满足定量精度 5% 的条数来计算合格率，以艾条质量来衡量艾条定量误差，通过电子秤对成型后艾条进行测量，记录 5 组数据如表 2 所示。

表 2　实验数据

组别	每个艾条质量/($m\cdot g^{-1}$)					合格率/%	定量误差/%
1	22.23	22.53	23.87	23.76	23.45	80	2.35
	23.89	24.27	24.35	24.39	24.37		
2	25.31	23.76	23.89	23.88	24.02	90	1.53
	24.12	24.05	24.39	24.51	24.83		
3	23.56	23.59	23.71	23.84	23.95	100	0.96
	24.01	24.03	24.13	24.46	24.33		
4	24.12	23.57	24.26	24.08	24.02	100	0.88
	23.95	24.14	23.61	24.05	24.56		
5	24.24	24.55	23.45	23.96	24.11	100	0.93
	24.04	23.75	23.81	24.12	24.13		

分析表 2 数据可知，该样机定量精度 5% 的艾条条数合格率达 94% 左右，日产 115 kg 以上，定量误差平均值为 1.33%。

5　结论

本文以满足艾条定量精度指标为优化目标，通过建立对辊数学模型，采用圆辊增加模腔的方法，对模腔关键影响参数进行数学分析，得到了影响定量误差的参数 R 和 N；然后对不同 R 和 N 进行有限元模拟计算，获得了参数 R 和 N 的最佳值分别为

25.5 mm 和 5 个。经定量实验验证，优化后的预成型机构能满足定量精度 5%的艾条条数合格率达 94%的指标，解决了模腔关键影响参数与提高定量精度之间的匹配问题。

[参 考 文 献]

[1] 纪凯. 教您选好"艾"[J]. 中医健康养生，2017(12)：17-19.

[2] 乔海平，沈继涛，叶有强，一种自动卷艾条机[EB/OL]. 2015-09-09[2020-07-08]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show? paperid=c8e0670139628df83cf3f05605bca690.

[3] 周金枝，姜久红. 材料力学[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2013.

[4] 付敏，韩立志，张水，等. 对辊式生物质压块机的设计与试验[J]. 可再生能源，2017，35(5)：645-652.

[5] 张波，荆森，张宁，等. 辊压机煤粉成型力学分析[J]. 机械设计与研究，2019，182(04)：195-200.

[6] 刘音. 全自动艾条卷条机的系统设计与研究[D].武汉：湖北工业大学，2018.

[7] 艾佳，周凯华. 基于 ANSYS 的辊压机辊轴有限元分析[J]. 机械研究与应用，2012，(2)：63-64.

[8] 李洁云，樊利民. 粉体自动加料系统的结构设计[J]. 科技传播，2010(16)：112-113.

Research on Preforming Technology of MOXA Rolling Machine

ZHANG Chupeng[1], ZHANG Jie[1], ZHANG Daode[1], TANG Yuxuan[1], TIAN Weilong[2]

(1 *School of Mechanical Engineering*, *Hubei Univ. of Tech.*, *Wuhan* 430068, *China*;
2 *Department of Mechanical Engineering*, *College of Engineering Technology*, *Hubei Univ. of Tech.*, *Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: The quantitative error of moxa stick is the key to affect the passing rate and production capacity of the winder. Reducing the quantitative error of moxa sticks is a design goal. Firstly, this essay analyzed how the elliptical roller and round roll forming methods influence on the quantitative error of moxa sticks. The round roller mechanism could make the quantitative error of moxa sticks smaller. Therefore, the round roller was used as moxa Pile roller forming machine; Secondly this essay focused on the influence factors that affect the strength of the moxa sticks and the output of moxa sticks after preforming. Based on the analysis of the mathematical model of the counter roll, it was obtained that the radius and number of cavities of the round roll had an influence on the strength and output; Then using workbench to carry out static analysis of the roller mechanism with different shaft diameters R and the number of mold cavities N, combined with the consideration of processing cost, the strength of the adjacent mold cavities and production capacity and other factors, obtained the best factors of R and N were 25.5mm and 5 respectively. Finally, the rationality of the best factor was verified by quantitative experiments, and knowing the preforming mechanism could also meet the requirements of moxa quantitative error of 5%, passing rate of 94%, and production capacity of 100kg or more per day.

Keywords: Moxa rolling machine; quantitative error; round roll forming

[责任编校：张　众]