

文章编号:0253-9721(2012)12-0085-04

## 预缩机挤压区域橡胶毯径向长度模型

周丽春<sup>1</sup>, 谢洋<sup>2</sup>, 金福江<sup>1</sup>, 汤仪平<sup>3</sup>

(1. 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建兆翔临港置业有限公司, 福建 厦门 361012;  
3. 福建凤竹纺织科技股份有限公司, 福建 晋江 362200)

**摘要** 在橡胶毯机械预缩过程中,相互作用的2个圆柱辊的特殊结构,使得挤压区域的橡胶毯在挤压时的径向长度难以确定,从而给预缩率的在线测量造成了一定困难。为解决这一问题,分析了橡胶毯受挤压的变形过程,在该过程作出一定简化的基础上,根据赫兹接触理论建立挤压区域橡胶毯受挤压时径向长度的数学模型。实测结果表明,根据模型计算的变形时径向长度与实际值相对误差均在4%以内,平均绝对百分比误差为2%左右。验证了模型的有效性,为实际生产中实现预缩率的在线测量提供了理论参考。

**关键词** 染整; 橡胶毯预缩; 赫兹接触理论; 径向长度

中图分类号:TS 195.3 文献标志码:A

## Model of radial length of rubber blanket in extrusion area for preshrinking machine

ZHOU Lichun<sup>1</sup>, XIE Yang<sup>2</sup>, JIN Fujiang<sup>1</sup>, TANG Yiping<sup>3</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;  
2. Fujian Panport Proerty Co., Xiamen, Fujian 361012, China; 3. Fujian Fynex Textile Science & Technology Co., Ltd., Jinjiang, Fujian 362200, China)

**Abstract** During preshrinking with a rubber blanket preshrinking machine, two special structured cylindrical rollers are interacted with each other so that it is difficult to determine the radial length of the rubber blanket in extrusion area, causing certain difficulties to online measurement of shrinkage. To solve this problem, the deformation process of the rubber blanket when being extruded was analyzed, some simplification of the process was made, and a mathematical model of the radial length of the rubber blanket when being extruded in extrusion area was established according to Hertz contact theory. The practical test results indicated that the relative errors of the radial length between the calculated values by the model and the practical test results are all smaller than 4%, and the mean absolute percentage error is about 2%. The validity of the model is verified. This study has provided a theoretical reference for online measurement of shrinkage in production.

**Key words** dyeing and finishing; rubber blanket preshrinking; Hertz contact theory; radial length

橡胶毯机械预缩是染整后整理工序中应用较多的一种物理预缩方法,可使预缩后的织物达到预定的收缩效果,同时使织物的手感和光泽得到一定程度的改善。在生产过程中,主要通过离线检测预缩

过程的一些重要参数,如织物预缩前定长 $L_0$ 和预缩后的长度 $L_1$ ,然后根据公式计算预缩率<sup>[1-2]</sup>。这种方法在一定程度上对生产有促进作用,但根据离线检测出的预缩率来调整生产工艺以适应质量要求显

收稿日期:2012-01-09 修回日期:2012-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(61273069);福建省产学研重大项目(2011H6019)

作者简介:周丽春(1978—),女,讲师。主要研究方向为染整生产过程建模与优化。金福江,通信作者,E-mail:jinfujiang@163.com。

得相对滞后,同时需要使用价格昂贵的高精度传感器,使得生产成本大大提高。

预缩率的在线估计,是结合预缩机的工作过程,根据各项预缩工艺参数,在一定的预缩数学模型基础上,预测预缩率的过程。预缩率的在线估计能实现根据特定生产工艺预测预缩效果,为预缩工艺的精确制定提供指导,以提高产品一次合格率,对降低生产成本,提高生产效益具有重要意义。

经过多年的研究和生产实际论证,预缩效果主要取决于承压辊直径、挤压辊直径以及橡胶毯厚度三者之间的比例关系<sup>[3]</sup>。三者之间的比例确定了橡胶毯挤压区域在变形时的径向长度,从而决定了橡胶毯预缩机的预缩效果,因此,确定橡胶毯挤压区域在变形时的径向长度,是实现预缩率在线估计的关键。

本文针对实现预缩率在线估计的关键因素,即橡胶毯挤压区域在变形时的径向长度,根据赫兹接触理论<sup>[4]</sup>,将预缩机 2 个圆柱辊挤压橡胶毯过程作为静态弹性挤压过程处理,得到确定橡胶毯挤压区域在挤压时径向长度的数学模型。

### 1 橡胶毯预缩机挤压过程分析

染整生产过程中织物受到各种作用力的作用而被拉长,在一定的温湿度条件下,根据棉及其混纺织物具有的可塑性,在高弹性橡胶毯作用下,通过机械方法,使得被拉长的织物恢复到其自然状态并稳定下来,便达到了预缩的效果,预缩效果主要通过预缩机的挤压部分实现<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。

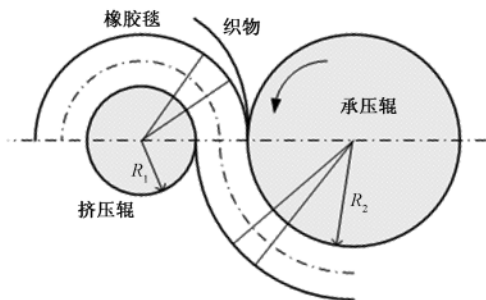


图 1 挤压部分结构示意图  
Fig. 1 Diagram of structure of extrusion area

橡胶毯预缩机的预缩挤压部分主要由挤压辊、承压辊和橡胶毯组成,当挤压辊向承压辊施加压力时,如图 2 所示,在挤压力  $F$  作用下,挤压区域承压辊与橡胶毯紧密接触,在承压辊表面形成一个沿辊轴方向的曲面  $UV$ ,  $UV$  之间产生呈抛物线分布的载

荷  $q_2$ <sup>[6-7]</sup>,同时,在橡胶毯表面沿点  $M$ 、 $N$  之间产生分布载荷  $q_1$ ,  $q_1$  的分布与  $q_2$  类似。由于承压辊为刚体,所以  $q_2$  值很小。在  $M$ 、 $U$  之间,橡胶毯受到的挤压力逐渐增大开始产生径向伸长变形,在  $U$ 、 $V$  之间,橡胶毯所受挤压力最大,在  $V$ 、 $N$  之间,橡胶毯所受挤压力逐渐减小,橡胶毯逐渐回缩恢复至原有状态。织物以自然状态进入承压辊和橡胶毯的挤压伸长区,当橡胶毯回转运动经过挤压伸长区后,发生回缩变形,此时织物随着橡胶毯的回缩产生预缩效果。

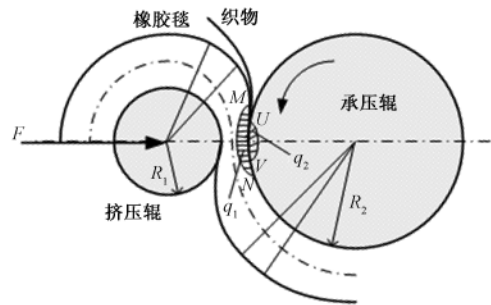


图 2 橡胶毯形变过程示意图  
Fig. 2 Diagram of deformation process of rubber blanket

### 2 赫兹接触理论

赫兹接触理论是基于非协调接触表面的几何学理论,以静态弹性接触的观点来解决 2 个弹性物体的接触问题,其假设条件如下:

- 1) 应力为零时,2 个物体相切于结合面;
- 2) 互相接触的物体在几何方面是光滑的;
- 3) 在接触区域仅有弹性变形发生。

2 个弹性圆柱之间的二维接触问题,应用赫兹接触理论可得到在接触区域内外的表达式<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned}
 w_1 + w_2 &= \delta - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) x^2 \\
 w_1 + w_2 &> \delta - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) x^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$  为 2 个接触表面由压力产生的表面法向位移;  $\delta$  为 2 个物体的接近量;  $R_1$ 、 $R_2$  为 2 个圆柱的半径。

### 3 橡胶毯预缩机挤压理论分析

在对橡胶毯挤压过程进行分析时,假设橡胶毯和 2 个辊的接触服从 Hertz 接触定律<sup>[4]</sup>。

由于承压辊是刚体,变形微小,在运用赫兹接触理论解决橡胶毯变形问题时,将承压辊看成弹性模

量很大的弹性体,接触变形过程如图 3 所示。图中  $R_1$ 、 $R_2$  分别是挤压辊半径、承压辊半径; $\delta$  为橡胶毯厚度; $h_1$  为橡胶毯最大压缩变形量; $z_1$  为挤压区域橡胶毯变形后径向长度对应弦长的一半; $z_2$  为挤压区域承压辊径向形变长度对应弦长的一半。

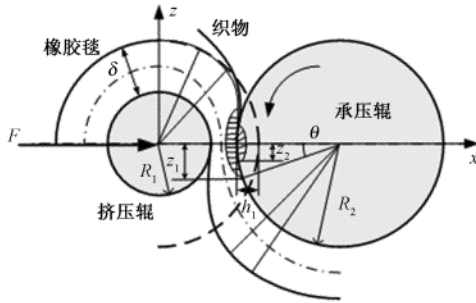


图 3 橡胶毯挤压区域示意图

Fig. 3 Diagram of extrusion area of rubber blanket

如图 3 所示建立坐标系,根据赫兹接触理论,由式(1)可知,承压辊和橡胶毯接触时,二者接触区域压缩变形量为

$$h = h_1 - \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{R_1 + \delta} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

由于橡胶毯具有高弹性,一般进口橡胶毯推荐最大挤压力为橡胶毯厚度的 25%,国产橡胶毯为 20%<sup>[8]</sup>,在其线性范围内,可由胡克定律求得橡胶毯载荷分布为

$$q_1 = \frac{h}{\delta} E = \frac{E}{\delta} \left[ h_1 - \frac{z^2}{2} \left( \frac{1}{R_1 + \delta} + \frac{1}{R_2} \right) \right] \quad (3)$$

式中  $E$  为橡胶弹性模量,对式(3)进行积分,可求得橡胶毯所受挤压力为

$$F = 2 \int_0^{z_1} q_1 L dz = \frac{2LE}{\delta} \left[ h_1 z_1 - \frac{z_1^3}{6} \left( \frac{1}{R_1 + \delta} + \frac{1}{R_2} \right) \right] \quad (4)$$

式中  $L$  为橡胶毯的宽度。由式(4)可得出  $z_1$  的一元三次方程

$$\frac{z_1^3}{6} \left( \frac{1}{R_1 + \delta} + \frac{1}{R_2} \right) - h_1 z_1 + \frac{F\delta}{2LE} = 0 \quad (5)$$

式中: $L$  为橡胶毯的宽度; $F$  为挤压辊所施挤压力,可从压力表直接读取数据; $F/L$  为线压力  $p$ ; $E$  为橡胶弹性模量。

本文采用弦截法<sup>[9]</sup>求解一元三次方程得出解  $z_1$ ,进而得到挤压时橡胶毯变形区域径向长度为

$$l = R_2 \theta = R_2 \arctan \left( \frac{z_1}{R_2} \right) \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,挤压时橡胶毯变形区域径

向长度  $l$  与挤压辊半径  $R_1$ 、承压辊半径  $R_2$ 、橡胶毯厚度  $\delta$ 、橡胶毯压缩变形量  $h_1$ 、以及线压力  $p$  有关。

## 4 实例分析

针对不同比例组合的挤压辊半径、承压辊半径和橡胶毯厚度,根据模型进行了验证计算,结果均较理想。实际生产中应用的某预缩机挤压辊半径  $R_1 = 75$  mm,承压辊半径  $R_2 = 175$  mm,在橡胶毯硬度<sup>[10]</sup>为邵尔 40°时,由式(6)计算不同厚度的橡胶毯在不同的挤压力作用下挤压区域橡胶毯的长度  $l$ ,结果见表 1。

表 1 基于模型计算出的  $l$  与实际值  $l'$  的比较

Tab. 1 Comparison between  $l$  calculated by model and actual data

橡胶毯厚度 $\delta$ / mm	最大推荐 挤压力 $h_1$ /mm	线压力 $p$ / ( $N \cdot cm^{-1}$ )	挤压时橡胶毯长度/cm		相对误差/%
			实际值 $l'$	理论值 $l$	
70	16.0	1 000	6.63	6.42	-3.185 5
68	15.0	921	6.34	6.24	-1.645 6
66	14.0	862	6.19	5.99	-3.246 3
64	13.5	804	5.81	5.98	2.942 2
62	12.5	764	5.79	5.65	-2.333 7
60	12.0	735	5.62	5.54	-1.327 6
58	11.5	700	5.40	5.45	0.921 0
56	11.0	676	5.26	5.31	0.895 0
54	10.5	657	5.17	5.15	-0.347 3
52~50	10.0	637	5.07	4.99	-1.553 9
48	9.5	627	4.84	4.85	0.152 8

用平均绝对百分比误差(MAPE)对模型的准确性进行分析,计算公式<sup>[11]</sup>为

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|F_t - A_t|}{A_t} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $F_t$  是第  $t$  个样本理论值; $A_t$  是其对应的实际值, $n$  为样本个数。平均绝对百分比误差值越小,表示模型准确性越高,根据 Lewis<sup>[11]</sup>所提出的 MAPE 等级划分,若 MAPE 值小于 10%,则模型具有较高的准确性。

由表 1 数据可知,在不同的橡胶毯厚度下,模型计算的橡胶毯挤压区域在挤压时的径向长度与实际值的相对误差在 4% 以内,通过式(7)计算平均绝对百分比误差 MAPE 值为 2.054 6%,因此,模型是有效的。但仍存在一定的误差,主要是因为:

1) 对橡胶毯变形过程进行分析时,假设变形是在静态条件下产生的,忽略了橡胶毯回转运动对橡胶毯变形过程的影响。

2)在实际预缩生产时,橡胶毯的挤压变形量一般很小,本文假设橡胶毯的变形规律服从胡克定律。

在考虑以上 2 个因素的情况下,模型在一定误差范围内是准确有效的。

### 5 结 论

通过对橡胶毯机械预缩的挤压过程进行分析,在赫兹接触理论的基础上,确定了挤压区域橡胶毯在挤压时径向长度与挤压辊半径、承压辊半径和橡胶毯厚度之间的数学关系模型,经实例验证,模型是有效的,该模型主要针对开幅橡胶毯预缩机对于棉及其混纺织物的预缩过程进行研究,为实现预缩率的在线预测提供了理论依据。在线预测预缩率可根据数学预测模型,结合预缩质量指标,制定最优预缩工艺,节约生产成本,提高生产质量。

本文的结论是在一定的假设条件下得出的,即假设橡胶毯和 2 个辊的接触服从 Hertz 接触定律,对实际问题进行了简化,在对预缩率在线预测进行深入研究时,还应考虑橡胶毯的回转运动、速差等因素的影响,以使问题研究更加完善。

**FZXB**

#### 参考文献:

[ 1 ] 王强华. 在线监控用于预缩机的探讨与实践[J]. 染整技术, 2005, 27(6): 34 - 38.  
WANG Qianghua. On-line monitoring of preshrinking machine [ J ]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2005, 27(6): 34 - 38.

[ 2 ] 杨永才, 张文健, 秦积荣. 纺织品预缩率光电在线测定仪[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(2): 154 - 156.  
YANG Yongcai, ZHANG Wenjian, QIN Jirong. Photoelectric instrument of on-line measurement for textile preshrunk ratio[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(2): 154 - 156.

[ 3 ] 桑德森的预缩技术及针织开幅预缩机[J]. 纺织服装周刊, 2007, 48: 74.  
Preshrinking technology and knitting preshrinking machine of Santex[J]. TA Weekly, 2007, 48: 74.

[ 4 ] GLADWELL G M L. 经典弹性理论中的接触问题[M]. 范天佑, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 1991: 81 - 85.  
GLADWELL G M L. Contact Problems in the Classical Theory of Elasticity [ M ]. FAN Tianyou, Translating. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991: 81 - 85.

[ 5 ] 傅旦, 陈春堂. 橡胶毯式防缩机的预缩机理及缩率控制的探讨[J]. 纺织学报, 1989, 10(7): 309 - 312.  
FU Dan, CHEN Chuntang. Research of preshrinking mechanism and shrinkage control of rubber blanket preshrinking machine [ J ]. Journal of Textile Research, 1989, 10(7): 309 - 312.

[ 6 ] GENT A N. 橡胶块的压缩[J]. 刘玉凤, 译. 橡胶参考资料, 1997, 27(3): 48 - 53.  
GENT A N. Compression of rubber block [ J ]. LIU Yufeng, Translating. References of Rubber, 1997, 27(3): 48 - 53.

[ 7 ] ARIF A F M, OVAISULLAH Khan, SHEIKH A K. Roll deformation and stress distribution under thermo-mechanical loading in cold rolling [ J ]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147: 255 - 267.

[ 8 ] 王强华. 预缩原理及要素分析[J]. 染整技术, 2003, 25(1): 40 - 42.  
WANG Qianghua. Mechanism of preshrinking and analysis of key elements [ J ]. Textile Dyeing and Finishing Journal, 2003, 25(1): 40 - 42.

[ 9 ] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 265 - 270.  
CHEN Baolin. The Theory and Algorithms of Optimization [ M ]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 265 - 270.

[ 10 ] 曹丽, 路加, 刘杰, 等. 基于振动敲击的软质物体硬度检测[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(21): 74 - 76.  
CAO Li, LU Jia, LIU Jie, et al. Measurement of soft material stiffness based on vibration sensor system [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(21): 74 - 76.

[ 11 ] LEWIS C D. Industrial and Business Forecasting Method [ M ]. London: Butterworths, 1982: 38 - 41.