

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.05.006

一种双层多节细长棒式棉纤维力学模型

郑凌晨, 陈洪立, 李晓明, 金玉珍

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要:空气-纤维两相流的研究中,由于纤维模型不能完全真实地反映棉纤维的物理特性,因此数值模拟研究存在一定的局限性。为了更准确地模拟棉纤维在气流场中运动,分析前人建立的纤维模型,采用高倍光学显微镜系统观测棉纤维的微观结构,综合考虑棉纤维拉伸、扭转、弯曲、塑性、摩擦性等力学特征,提出一种双层多节细长棒式的棉纤维结构模型。推导了相关的力学关系式,提出了该纤维结构模型中反映纤维力学性能的拉伸特性系数 K_s 、弯曲特性系数 K_c 、扭转特性系数 K_t 、摩擦特性系数 μ 、直径变化率 ε 共5个参数。该模型具有全面的纤维力学特性,完善了空气-纤维两相流问题中棉纤维模型,文中的研究提高了数值模拟的真实性和准确性。

关 键 词:棉纤维;力学模型;微观结构;拉伸特性系数

中图分类号:TS101.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)05-0025-05

A Mechanical Model of Double-Layer and Multiple-Class Cotton Fiber

ZHENG Lingchen, CHEN Hongli, LI Xiaoming, JIN Yuzhen

(School of Mechanical Engineer & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to simulate the motion of cotton fiber in the airflow accurately, the model of fibers established was expounded by domestic and overseas researchers, and adopted the system of high-power optical microscope to observe the microscopic structure of cotton fiber. Considering the mechanical characteristics of cotton fiber, such as tension, torsion, bending, plastic, a model of cotton fiber which was double-layer and multiple-class was put forward. The related mechanics equation was deduced, and it put forward five parameters which were drawing coefficient K_s , bending coefficient K_c , reversing coefficient K_t , friction coefficient μ and diameter rate ε . The model possesses comprehensive mechanical characteristics, and it improves the research efficiency in two-phase flow problem. It improves the authenticity and accuracy of numerical simulation.

Key words: cotton fiber; mechanical model; microscopic structure; drawing coefficient

在研究转杯纺、喷气纺及喷气涡流纺等纺织机械过程中,为了研究棉纤维在空气中的运动问题,许多国内外学者对棉纤维的力学模型做了研究^[1-5]。Smith和Robert^[6]假设棉纤维是由无质量的刚性杆连接的一系列球形单元组成。Yamamoto和Matsuoka同时考虑了纤维所具有的刚性和柔性两个相对的特性,建立了由 n 个半径相同的小球连接而成的圆杆^[7]。Kong和Flatfoot为了充分的体现纤维的塑性,把棉纤维看做为连接着分散节点且不计质量的柔性链式模型^[8]。国内的研究者朱泽飞等全面分析了粒子在气流场中各种

受力情况,建立了粒子纤维模型^[9]。曾泳春^[10]建立的纤维模型被看成是一根由 n 个小球和 $n-1$ 个不计质量的弹性细杆相接组成的纤维链,在一定程度上体现了纤维的弹性和塑性,但该模型忽略了纤维的摩擦性。由此可见,以上的各个纤维模型均存在一定的缺陷,不能全面体现棉纤维的各项力学特性,使得相关的研究成果具有一定的局限性。

本文应用高倍光学显微镜系统研究了棉纤维的微观结构特征,结合棉纤维的各项力学特点,提出了一种双层多节细长棒式的棉纤维结构模型,并对各项力学

收稿日期:2015-05-30;修回日期:2015-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51205363);浙江省自然科学基金项目(LY15E050027);浙江省自然科学基金项目(LZ14E050004)

作者简介:郑凌晨(1989),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要研究方向为纺织装备技术。通信作者:陈洪立,男,副教授,硕士生导师。E-mail:chenhldr@zstu.edu.cn

参数进行推导从而建立完整的纤维力学模型。所建立的纤维力学模型能够全面地反映纤维的弹性、塑性和摩擦性能,旨在为空气-纤维的两相流问题提供一定的理论参考。

1 棉纤维结构模型

使用体式光学显微镜系统 (KEYENCE VHX-2000) 对棉纤维分别放大 500 倍和 3 000 倍进行观察, 如图 1, 图 2 所示。从微观图像可以看到棉纤维主要结构特点是在未扭转处处于扁平带状, 扭转处则形成 C 形管状结构(横截面的形状像字母 C)。运用前述显微镜系统对随机获得的棉纤维进行了测量与统计, 如图 3 所示。

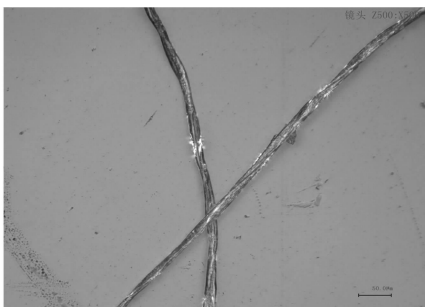


图 1 放大 500 倍

Figure 1 Magnified 500 times

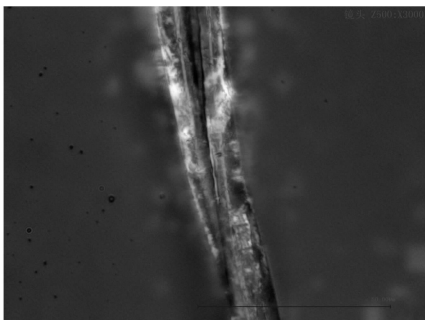


图 2 放大 3 000 倍

Figure 2 Magnified 3 000 times

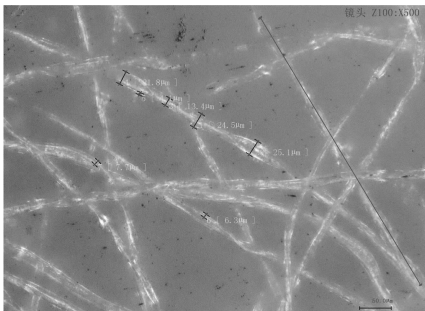


图 3 显微镜系统中棉纤维的测量

Figure 3 Measuring cotton fiber
in microscope system

根据实验观察测量所得的棉纤维微观结构特征: 在所研究的纤维总长度中, 扭转处形成 C 形管状结构约占 70%, 未扭转的扁平带状结构约占 30%。由此可以假设: 棉纤维模型是由 n 个尺寸相同的圆柱体加 $n-1$ 个不计质量的弹簧链接而成, 其中圆柱体总长度占 70%, 弹簧的总长度占 30%。为了能够更全面地反映棉纤维的拉伸、弯曲、扭转、塑性和摩擦性等力学特征, 提出了一种双层多节细长棒式的棉纤维结构模型, 如图 4 所示。圆柱体与弹簧之间是通过不计质量和尺寸的铰链相互连接的。圆柱体是具有内外双层的物理结构, 其内层与外层之间可以作相对旋转运动。

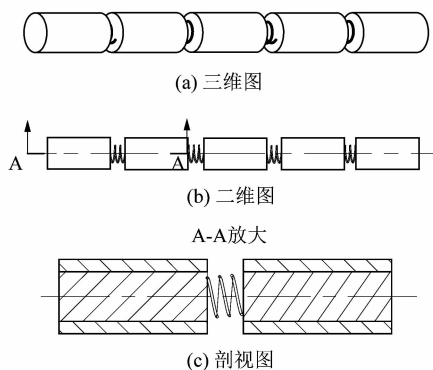


图 4 双层多节细长棒式纤维模型示意图

Figure 4 Schematic diagram of cotton fiber model

根据本文设定的棉纤维模型的结构特点, 纤维的刚性可以通过刚性圆柱体来体现; 纤维的拉伸性能可以通过纤维模型中的弹簧的拉伸来体现; 纤维的弯曲性能可以通过纤维模型中的铰链改变相邻圆柱体轴向所形成的角度来体现; 扭转性能可以通过圆柱体中内层与外层之间的相对转动形成的转动角来体现; 纤维的表面摩擦性可以通过圆柱体外层的外表面的摩擦系数来体现。

2 纤维模型特征系数

2.1 棉纤维的基本参数

由于目前纺织领域中应用最多的纤维材料是细绒棉, 因此以细绒棉为例介绍棉纤维模型的建立过程, 纤维模型的参数取值均以细绒棉的参数为依据。表 1 为细绒棉的基本数据及纤维模型的取值。

表 1 细绒棉与纤维模型基础参数

Table 1 Parameters of fine-staple cotton and fiber model

类型	手扯长度 L/mm	断裂伸长率 $\varepsilon_0/\%$	平均直径 $d_0/\mu\text{m}$	线密度 $N_{\text{tex}}/\text{tex}$	断裂长度 L_a/km
细绒棉	23 ~ 35	3 ~ 7	14 ~ 20	14.3 ~ 22.2	20 ~ 30
纤维模型	30	5	17	18.0	25

为了更直观更具体地表达纤维模型各项力学特性,在此为该棉纤维力学模型引入了5个参数:拉伸特性系数 K_s 、弯曲特性系数 K_c 、扭转特性系数 K_t 、表面摩擦特性系数 μ 及直径变化率 ε ,分别用来描述棉纤维的拉伸特性、弯曲特性、扭转特性、表面摩擦性、径向压缩塑性。

2.2 拉伸特性系数 K_s

在纺织材料学和材料力学的理论中,棉纤维具有一定的抗拉伸特性,在纺织过程中会受到拉伸力作用。有

$$N_{\text{tex}} = (m/L) \times 1\,000。 \quad (1)$$

式中: N_{tex} 为纤维的线密度/tex; L 为纤维手扯长度/m; m 为纤维的质量/g。

$$\varepsilon_0 = (L_a - L)/L \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: ε_0 为纤维的断裂伸长率/%; L_a 为棉纤维断裂长度/m。

在材料力学理论中,有

$$\varepsilon = (L' - L)/L, \quad (3)$$

$$\delta = E \times \varepsilon。 \quad (4)$$

式中: ε 为应变; δ 为应力; L' 为材料拉伸后的长度; E 为材料的弹性模量。

根据棉纤维断裂长度的物理意义:假设棉纤维头尾衔接悬吊而起,直到它因为自身的重力而发生断裂时的纤维长度。因此,在该情况下棉纤维的正应力的数值大小等于其自身的重力值。

假设本文中的纤维模型的圆柱体个数 $n = 1\,000$,由表1可知单根棉纤维模型的手扯长度 $L = 30\text{ mm}$,则棉纤维模型中每个圆柱体的长度 $L_t = L/n \times 70\% = 21\text{ }\mu\text{m}$ 。再假设相邻的2个圆柱体质心之间的距离 r_0 ($r_0 = 30\text{ }\mu\text{m}$)为拉伸平衡位置。当一对相邻圆柱体由平衡时的 r_0 被拉伸到 r ($r > r_0$),同时引入拉伸特性系数 K_s ,则作用在这两个圆柱体上的拉伸回复力为

$$F_s = K_s(r - r_0)。 \quad (5)$$

根据胡克定律, $F_s = E \times (r - r_0)$,并联立式(1)~(4),可求得拉伸特性系数: $F_s = N_{\text{tex}} \times L \times g \times 10^{-3}/\varepsilon$ 。

2.3 弯曲特性系数 K_c

在纺织加工生产的过程中,纤维往往要受到较大的弯曲力矩作用而发生弯曲变形。外侧因为受到拉伸,外侧长度 $L_{\text{外}}$ 变长;内侧因为受到受压,内侧长度 $L_{\text{内}}$ 变短。当弯曲变形加剧,超过一定的程度时便会发生弯曲破坏,如图5所示。

纤维抵抗弯曲变形的能力通常使用抗弯刚度 R_t 来表示

$$R_t = EI。 \quad (6)$$

式中: I 为截面惯性矩。

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI}。 \quad (7)$$

式中: R 为曲率半径; M 为外力矩。

公式(6)~(7)表明在相同的外力矩 M 作用下,当纤维材料的弯曲刚度 R_t 越大时,其曲率半径 R 就越大,意味着变化的角度 β 越小。

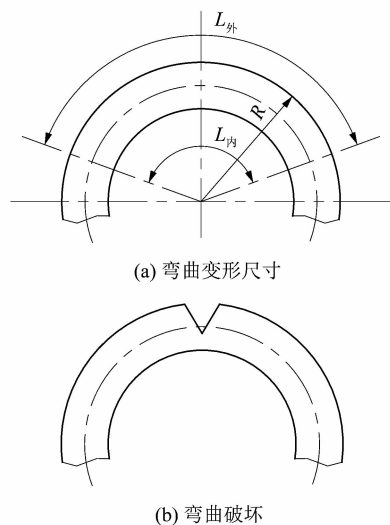


图5 棉纤维弯曲的变形与破坏
Figure 5 Bending deformation and destruction of cotton fiber

本文中棉纤维模型的弯曲特性是通过铰链改变相邻圆柱体轴向所形成的角度来体现。假设棉纤维模型中相邻的2个圆柱体轴向所形成的角度 $\beta_0 = 0^\circ$ (即相邻2个圆柱体同轴)时作为平衡位置,当一对相邻圆柱体的连接角度由平衡时的 β_0 变为 β ($\beta > \beta_0 = 0$)。同时引入弯曲特性系数 K_c ,则作用在每个圆柱体上的弯曲力矩为:

$$T_c = K_c(\beta - \beta_0)。 \quad (8)$$

当纤维模型受到的外力矩 M 等于弯曲力矩 T_c 时,联立式(6)~(8)可求得弯曲特性系数: $K_c = R_t/(\beta \times R)$ 。

2.4 扭转特性系数 K_t

在纺织加工生产的过程中,棉纤维往往要受到较大的扭转力矩,从而发生扭转变形,如图6所示。在本文的纤维模型中,当圆柱体在扭矩 M_t 作用下,其上端对下端产生扭转变形,扭转角 θ 可以表示为:

$$\theta = \frac{M \times L_t}{E_t \times I_p}。 \quad (9)$$

式中: M_t 为扭转力矩; E_t 为剪切弹性模量; I_p 为截面极

惯性矩; L_t 为扭转长度。

通常纤维抵抗扭转变形的能力是用抗扭刚度 R_t 来表示:

$$R_t = E_t \times I_p \quad (10)$$

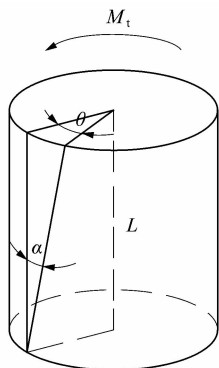


图6 棉纤维扭转变形示意图

Figure 6 Torsional deformation of cotton fiber

本文中纤维模型的扭转特性体现在圆柱体的内层与外层之间发生相对转动时所形成的转动角度。作圆柱体的截面示意图,如图7所示。假设圆柱体截面坐标系中的圆柱体内层上的一个点A与外层上的一个点B都处在X轴上时为扭转平衡位置,此时 $\angle AOB = \gamma_0 = 0$ 。当内外层之间发生相对转动,外层上的B点转到B'点时,扭转角度由平衡时的 γ_0 变为 γ ($\gamma > \gamma_0 = 0$),同时引入扭转特性系数 K_t ,则作用在每个圆柱体上的扭转力矩为:

$$M_t = K_t (\gamma - \gamma_0) \quad (11)$$

联立公式(9)~(11)可得扭转特性系数:

$$K_t \approx E_t \times I_p / L_t = R_t / L_t$$

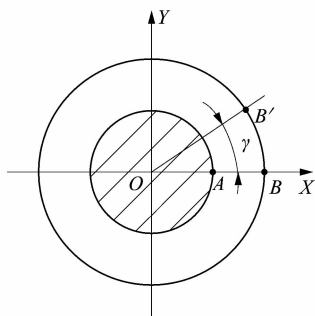


图7 内外双层圆柱体的截面图

Figure 7 Section diagram of double-layer cylinder

2.5 摩擦特性系数 μ

因为纤维具有柔软且表面粗糙的特点,在纺织加工生产过程中,必然会受到一定程度的摩擦阻力。棉纤维所受到的总摩擦阻力可以表示为:

$$F_{\text{总}} = F_1 + fN_{\text{正}} \quad (12)$$

式中: F_1 为纤维之间的切向阻力,即抱合力; f 为正摩擦因数; $N_{\text{正}}$ 为纤维所受的正压力。

在实际纺织生产过程中,抱合力即纤维之间的吸引力,与纤维的长度、卷曲度、线密度和摩擦特性等纤维性能有关。它对纤维受到的总摩擦阻力影响较大,不可忽略其带来的影响。本文中棉纤维的表面摩擦性是体现在该模型圆柱体的外层外表面上。引入摩擦特性系数 μ 作为纤维模型的外表面的摩擦因数,那么式(12)可转化为:

$$F_{\text{总}} = \mu N_{\text{正}} = F_1 + fN_{\text{正}}$$

进一步可得摩擦特性系数

$$\mu = F_1 / N_{\text{正}} + f$$

2.6 直径变化率 δ

在纺织过程中,纤维与纤维之间或纤维与纺织机构之间会因为相互作用,而产生纤维的径向受压现象。根据本文对棉纤维进行显微观察研究,结果发现径向受压主要表现为棉纤维的横截面C形管状结构的开口大小发生了变化,从而发生径向塑性变形。在该纤维模型中可以体现为圆柱体在径向的受压方向被压扁,在垂直于受力方向则变宽。径向压缩塑性变形可用该模型的直径变化率 δ 来表示:

$$\delta = (d_0 - d) / d_0 \times 100\% \quad (13)$$

式中: d_0 为纤维的初始直径; d 为纤维受压后的直径。

3 结论

本文结合实验观察与测量的结果,通过材料力学和纺织材料学的理论推导,建立了5个纤维力学的特性系数。为研究纤维在空气流场中的运动问题,提出了一个具有刚性、弹性、塑性、摩擦性、弯曲及扭转特性等物理特征的纤维模型。从理论分析上看,相对于先前研究者们所建立的纤维模型,该纤维模型具有更好的普遍性与全面性,更适于空气-纤维两相流问题的数值模拟研究。从实际应用的情况上看,该纤维模型具有全面的纤维力学特性,大大增加了数值模拟的准确性与真实性。但是在数值模拟过程中增大研究的复杂性,增加了计算机的运算时间。另外,仅根据细绒棉的基本参数为纤维模型进行取值,暂不适用于其他类型棉纤维的数值模拟研究。如果能够针对性地搭建一个实验平台对该纤维模型进行实验验证,那么该研究就更具有科学性与创新性。

参考文献:

- [1] 张文康. 纺织气流问题[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1989: 26 - 44.

(下转第33页)