

DOI:10.13475/j.fzxb.20190703106

基于 ANSYS CFX 的棉纤维马克隆值的建模与仿真

张梦阳¹, 陈晓川¹, 汪 军², 李 勇³

(1. 东华大学 机械工程学院, 上海 201620; 2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
3. 塔里木大学 机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300)

摘 要 为探究棉纤维马克隆值与棉纤维质量关系紊乱的原因,取棉纤维的平均直径和成熟度为自变量,推导棉纤维气流仪工作的原理方程。选择6种棉样进行实验,通过测量棉纤维在等压差、等密度情况下的入口流量和马克隆值,采用中段称重法和显微镜法分别测量棉纤维的线密度和成熟度,将该值与利用公式计算的流量值进行比较分析。结果表明,等压差下通过气流入口的流量值与棉纤维成熟度和直径乘积的平方大致成正比。仿照棉纤维的结构,根据直径和成熟度构造棉纤维透气性模型,利用 ANSYS CFX 仿真软件进行仿真。仿真结果与实验值的最大相对误差为7.92%,证明了该模型的有效性,为修正棉纤维的 Kozeny-Carman 常数,进一步提高计算准确率提供参考。

关键词 棉纤维; 马克隆值; 平均直径; 成熟度; ANSYS CFX 仿真

中图分类号: TS 117 文献标志码: A

Modeling and simulation of cotton micronaire value based on ANSYS CFX

ZHANG Mengyang¹, CHEN Xiaochuan¹, WANG Jun², LI Yong³

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

Abstract In order to explore the causes for the disorder between cotton fiber micronaire value and cotton fiber quality, the working principle equation of cotton fiber airflow meter was deduced by taking the average diameter and maturity of cotton fiber as independent variables. Firstly, the flow rate of cotton fiber sample and micronaire value was measured under the condition of equal pressure and density, followed by the measurement of the fineness and maturity of six different types of cotton fiber sample using mid-section weighing method and microscopy method respectively. The values were compared with the flow rate calculated using the equation. The results show that the flow through the air inlet is approximately proportional to the square of the product of maturity and diameter of cotton fibers under a constant pressure difference. The permeability model of cotton fibers was constructed by imitating the structure of cotton fibers. According to diameter and maturity, the simulation was carried out by using ANSYS CFX simulation software. The maximum relative error between simulated and experimental results is 7.92%, which proves the validity of the model. It lays a foundation for modifying the Kozeny-Carman constant of cotton fibers and for improving the accuracy of calculation.

Keywords cotton fiber; micronaire value; average diameter; maturity; ANSYS CFX simulation

马克隆值是一定量棉纤维在规定条件下的透气性的度量,可以反映棉纤维线密度与成熟度的综合

情况^[1],是衡量棉花质量的重要指标之一。马克隆值与棉花的价格息息相关,与棉纱外观品质、纺纱性

收稿日期:2019-07-08 修回日期:2019-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(11762020)

第一作者:张梦阳(1996—),女,硕士生。主要研究方向为流体力学应用和有限元仿真建模。

通信作者:陈晓川(1970—),男,教授,博士。主要研究方向为棉花加工的建模仿真等。E-mail:xcchen@dhu.edu.cn。

《CIMS 论文的天地》

<http://www.cimspaper.com>

能也有着密切的关系,所以它在棉花贸易和纺织工艺中有着重要的地位^[2]。

1950 年,美国农业部通过气流实验得到了浮子高度与棉纤维线密度的二次回归方程,初步确定了流量与线密度的非线性关系。随后 E.Lord 研究了棉纤维质量指标与流量的关系,认为影响马克隆值的因素不只有线密度,他选择使用苛仁纳公式作为原理方程,并提出了马克隆值与棉纤维成熟度和线密度的关系公式^[3]。此后,以该公式为基础又出现了二次、三次压差法,用来测定棉纤维的线密度和成熟度^[4]。但在 1990 年,美国农业部发现,马克隆值与标准测量方法测出的结果严重偏离;我国在 2006 年也开始发现马克隆值与棉花分级、品质、可纺性等指标之间的关系出现混乱。陈美玉等^[5]认为中段平均复圆直径对马克隆值的影响不可忽略,棉纤维气流仪原理方程的独自变量至少包括线密度和中段平均复圆外直径。国外则开始选择采用其他方法测量相关质量指标,如使用图像法测量棉纤维线密度,使用近红外光谱仪测量棉纤维马克隆值^[6],但稳定性还有待检验。乌斯特公司生产的 HVI 大容量纤维测试仪中的马克隆组件仍是采用气流法,但成熟度指数是根据马克隆值、断裂伸长率和断裂比强度计算出来的一个相对值,所以研究马克隆值与棉纤维其他质量指标的关系仍然很有必要。

有关马克隆值的研究报道很多,但由棉纤维气流仪测出的数值与棉纤维其他指标的关系还不是十分明确。为此,本文首先探究影响马克隆值的因素,分别测量和计算 6 个棉样的平均直径和成熟度,并将其反映至三维模型中,然后利用 ANSYS CFX 仿真软件进行仿真,得到通过 6 个棉花模型的流量值,最后将其与实验流量值进行比较,证明模型的有效性。棉纤维透气性模型的建立为进一步提高马克隆值与棉纤维其他质量指标关系的准确度提供了一种新的方法。

1 棉纤维气流仪原理方程的推导

1.1 导流基础方程的选择

棉纤维气流仪可以测量马克隆值,其测试的原理是在等压差或者等流量的情况下,在容器内塞满相同质量的棉纤维,让气流通过容器,测量其对应的流量或者压差,最后用这个值来推导纤维的马克隆值^[7]。本文选择 Y145C 型棉纤维气流仪(常州市第一纺织设备有限公司)的工作条件和等压差测流量的工作原理进行研究。

苛仁纳(Kozeny)公式可以用来定义多孔介质《CIMS 论文的天地》

的渗透率,如地下渗流,而棉纤维气流仪工作原理的本质也是研究多孔介质的透气性,故本文可采用该公式作为基础方程^[3],苛仁纳公式为

$$\Delta P = \frac{KQ\mu LS_0^2}{A} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (1)$$

式中: ΔP 为容器两端压差,Pa; K 为形状系数; Q 为通过棉纤维的质量流量,g/s; μ 为流体黏滞系数,Pa·s; L 为容器管道长度,cm; S_0 为棉纤维比表面积,cm⁻²; ε 为孔隙率; A 为容器管道截面积,cm²。

1.2 公式关键参数计算

1.2.1 棉纤维密度的计算

已知复圆后棉纤维截面近似圆环状,本文成熟度定义为纤维壁面积与包括空腔在内的外圆面积之比,则棉纤维成熟度为

$$K_m = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (2)$$

式中: K_m 为棉纤维成熟度; D 为棉纤维壁外径,cm; d 为棉纤维壁内径,cm。从而可以得到包括空腔在内的纤维密度:

$$\rho_1 = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \rho_0 = K_m \rho_0 \quad (3)$$

式中: ρ_0 为棉纤维壁密度,g/cm³; ρ_1 为包括棉纤维空腔的纤维密度,g/cm³。

1.2.2 棉纤维表面积和比表面积的计算

一定体积棉纤维的表面积为

$$S_1 = \frac{V_2 \pi D}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4mD}{(D^2 - d^2)\rho_0} = \frac{4m}{\rho_0 K_m D} \quad (4)$$

式中: S_1 为一定体积棉纤维的表面积,cm²; V_2 为包括空腔的纤维体积,cm³; m 为棉纤维总质量,g。比表面积在本文中定义为单位容器体积中棉纤维的表面积,可得

$$S_0 = \frac{4m}{\rho_0 V_1 K_m D} \quad (5)$$

式中, V_1 为容器体积,cm³。将式(5)代入式(1)中,可得

$$\Delta P = \frac{KQ\mu L}{A} \cdot \frac{16m^2}{V_1^2 \rho_0^2 K_m^2 D^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (6)$$

1.2.3 流体体积和空隙率的计算

棉纤维所占体积为

$$V_2 = \frac{m}{\rho_1} = \frac{mD^2}{(D^2 - d^2)\rho_0}$$

可计算流体体积

$$V_3 = V_1 - V_2 = V_1 - \frac{mD^2}{(D^2 - d^2)\rho_0} \quad (7)$$

已知容器内空隙率等于空隙的体积除以总体

<http://www.cimspaper.com>

积,可得

$$\varepsilon = 1 - \frac{mD^2}{V_1(D^2 - d^2)\rho_0} = 1 - \frac{m}{V_1 K_m \rho_0} \quad (8)$$

本文假设棉纤维在标准回潮率下复圆到标准直径,在研究过程中发现纤维截面的卷曲变形和成熟度变化会改变空隙率,考虑到苛仁纳公式用在不同的介质中,空隙率与流量的关系会发生变化,并且空隙率本身的变化也会影响公式的表达和 Kozeny-Carman 常数^[8],所以现在尚无明确的公式来统一这一影响因素,故暂且将其变化的影响忽略,则可得到棉纤维气流仪的原理方程

$$Q = \frac{\Delta PA}{K\mu L} \cdot \frac{V_1 \rho_0^2 K_m^2 D^2}{16m^2} \quad (9)$$

1.2.4 棉纤维线密度与成熟度和直径的关系

线密度^[5]是棉纤维的一个重要质量指标,单位为 mtex,可表示为

$$H = \frac{\rho_1 D^2 \pi \times 10^6}{4} \quad (10)$$

结合式(3)可得

$$H = \frac{\rho_0 K_m D^2 \pi \times 10^6}{4} \quad (11)$$

1.2.5 其他参数的确定

根据 Y145C 型棉纤维气流仪查询容器的相关数据:容器两端压差为 1 960 Pa;流体黏滞系数为 $18.09 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$;容器管道长度为 2.5 cm;容器管道截面积为 7.793 1 cm^2 ;棉纤维质量为 5 g;容器体积为 191.482 8 cm^3 。其他参数:大气温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;相对湿度为 65.0%;空气密度取 1.205 g/L ;形状系数取 7.95;棉纤维标准成熟度为 0.577 5;棉纤维壁密度为 1.524 g/cm^3 。

1.3 棉纤维质量指标的测定

任意选取 6 个棉样除去杂质,然后根据 GB/T 6529—2008《纺织品 调湿和试验用标准大气》的要求,将棉样放置在大气温度为 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(65.0 \pm 3)\%$ 的环境下调湿 4 h。随后使用 Y145C 型棉纤维气流仪测量马克隆值和流量。按照 GB/T 6498—2008《棉纤维马克隆试验方法》的规定,将调湿后的棉纤维各称量 5 g 放入测量容器,测量在 1 960 Pa 压差下通过棉样的流量和对应的马克隆值并记录。

棉纤维线密度的测量选择使用中段称重法,取适量棉纤维,手扯整理成一端整齐、伸直平行、宽约 5 mm 的棉束,使用 Y171 型纤维切断器(常州市第一纺织设备有限公司)切取中段棉纤维并进行称量,计数纤维根数,然后计算纤维线密度。

纤维成熟度的测量方法参照 GB 13777—2006《CIMS 论文的天地》

《棉纤维成熟度试验方法 显微镜法》,整理一端整齐的棉束均匀地排列在载玻片上,滴入 18% 的氢氧化钠溶液对其进行溶胀,之后用 400 倍的显微镜逐根观察纤维形态和中腔,对于每份样品分别计算正常纤维和死纤维的比例,然后计算成熟度。

6 种棉样的实验结果如表 1 所示。

表 1 棉纤维测量实验所得数据
Tab.1 Data for measuring cotton fibers

棉样 编号	马克隆值	体积流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	线密度/ mtex	成熟 度比	成熟度
1 [#]	4.12	3.42	208.69	0.74	0.43
2 [#]	4.98	4.51	196.89	1.09	0.63
3 [#]	4.83	4.17	230.83	0.83	0.48
4 [#]	4.02	3.42	204.13	0.74	0.43
5 [#]	4.46	3.83	185.02	0.95	0.55
6 [#]	4.89	4.31	229.64	0.80	0.46

用式(9)和(11)计算通过棉样的流量,并比较其与实验值的相对误差,结果如表 2 所示。

表 2 计算和实验所得流量及其相对误差
Tab.2 Calculated and experimentally measured flow
rates and their relative errors

棉样 编号	流量/($10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		相对 误差/%
	计算值	实验值	
1 [#]	73.49	68.74	-6.92
2 [#]	98.55	90.63	-8.74
3 [#]	85.98	83.70	-2.72
4 [#]	66.40	68.74	3.40
5 [#]	79.26	76.87	-3.12
6 [#]	80.81	86.46	6.53

由表 2 可知,其相对误差绝对值最大为 8.74%,可见式(9)原理方程的计算结果具有一定的准确性,故选择纤维直径和成熟度为建模变量。为精确控制棉纤维形态,从而探寻更准确的气流推导公式,本文将通过仿真的方法建立有效的棉纤维透气性模型。

2 棉纤维的建模与仿真

2.1 棉纤维三维模型的建立

由以上推导公式确定的模型特征,需要通过 Solidworks 建模软件进行反映,三维建模可以精确地控制棉纤维直径和成熟度的变化,并且可以显示出模型的表面积和体积,从而得到准确的比表面积和空隙率。建模思路为:先建立棉纤维的模型,再用 1 个实体减去棉纤维,从而得到棉纤维在试样筒中的空隙,即流体流动的空间范围,对其进行裁剪,最终得到所需要的流体模型。

建模具体过程如下:仿照棉纤维的外观形态和

<http://www.cimspaper.com>

真实平均直径,建立棉纤维的结构,由于棉纤维两端封闭,纤维空腔内的空气不发生流动,故在建模中空腔不表示出来。再由式(8)计算相应的空隙率,从而确定阵列距离。为简化建模、减少仿真的计算量和便于与实验结果比较,容器形状选择直径为 $315\ \mu\text{m}$,高为 $250\ \mu\text{m}$ 的圆柱,即 Y145C 型棉纤维气流仪容器体积的 $1/10^6$ 。为达到所需的体积要求,横向、纵向的阵列数分别为 10、15,得到整体的棉纤维模型^[9]。然后添加 1 个流体立方体,使棉纤维完全位于立方体内,使用组合里的删减操作,将流体立方体内的棉纤维部分删除,得到棉纤维的空隙,即流体流动的范围。最后对流体进行裁剪,得到直径为 $315\ \mu\text{m}$,高为 $250\ \mu\text{m}$ 的流体模型。建模流程如图 1 所示。

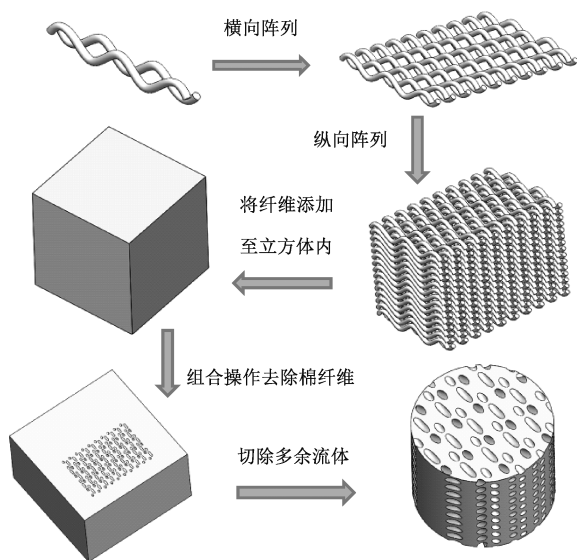


图 1 棉纤维透气性模型的建模流程

Fig.1 Modeling process of permeability model of cotton fibers

值得注意的是,在其他条件不变的情况下,棉纤维排列结构一旦发生改变,则流量也会发生变化,所以在所建模型体积与计算值相同的条件下,不同棉纤维横向和纵向阵列距离的比例要相同,从而保证不同棉纤维模型结构的一致性。

2.2 棉纤维流体模型的建模与仿真

建模中选取棉纤维直径和成熟度为自变量,因变量为流体体积,建立相应的棉纤维流体模型;最后比较其流量的差异,即在相同容器内,在相同压差的情况下,比较通过其内部流量值的不同。选取实验中的 6 种棉样进行所需数据的计算和建模。

根据式(10)计算纤维直径,再结合成熟度利用式(7)计算流体体积,所得结果如表 3 所示。

《CIMS 论文的天地》

表 3 流体建模数据

Tab.3 Data of fluid modeling

棉样编号	直径/ μm	体积/ (10^{-6}cm^3)
1 [#]	20.63	11.85
2 [#]	16.28	14.28
3 [#]	20.11	12.60
4 [#]	19.78	11.78
5 [#]	16.79	13.50
6 [#]	20.20	12.35

根据计算得到的直径和体积,使用 Solidworks 建模,保证直径相同,体积相对误差的绝对值不超过 2%,纤维横向与纵向阵列比例相同。所建三维模型如图 2 所示,因结构相似,只列出第 1 种棉样的流体模型。

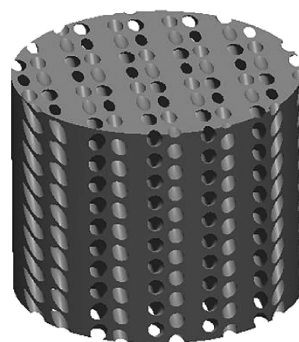


图 2 棉样 1[#]的流体模型

Fig.2 Fluid model of cotton sample 1[#]

完成三维建模后,另存为所需格式,然后将模型导入 ANSYS CFX,并划分网格,在前处理器中确定流体进出口位置,设置流体为温度等于 $20\ ^\circ\text{C}$ 的可压缩空气,流体流动模型为层流,进口压力为 $19.6\ \text{Pa}$,出口压力为 $0\ \text{Pa}$,设置完毕后进行求解,压差云图如图 3 所示,最后在后处理器中提取入口平面的流量值。

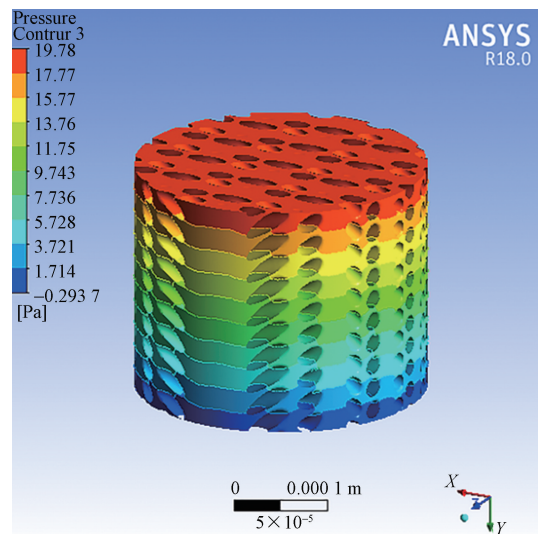


图 3 棉样 1[#]的仿真压差云图

Fig.3 Cotton sample 1[#] simulated pressure cloud picture

<http://www.cimspaper.com>

因为容器截面积和实验相比缩小了 10^4 倍,故流量也应减小相应倍数,将其和仿真得出的流量进行比较,并计算其相对误差,结果如表 4 所示。

表 4 计算流量及其相对误差

Tab.4 Computational flow and relative errors

棉样编号	流量/($10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		仿真流量 相对误差/%
	实验值	仿真值	
1 [#]	68.74	68.91	-0.25
2 [#]	90.63	97.80	-7.92
3 [#]	83.70	83.84	-0.17
4 [#]	68.74	64.78	5.75
5 [#]	76.87	78.44	-2.04
6 [#]	86.46	83.84	3.03

由表 4 可知,仿真结果与实验结果相对误差的绝对值最大为 7.92%,可见该模型可以反映棉纤维在一定情况下的透气性。经过计算发现棉纤维成熟度的变化会改变空隙率,该模型可以均匀地在很大范围内单一改变成熟度,而这在实验中却很难实现,所以该模型的建立为修正棉纤维的 Kozeny-Carman 常数、探究空隙率的影响进而提高马克隆值与成熟度的相关性提供了一种更为准确的方法。

2.3 结果分析

由以上实验和仿真结果可知,棉纤维气流仪通过棉花的入口流量值与棉纤维成熟度和直径乘积的平方大致成正比。

1956 年, Lord^[10] 提出了马克隆值 M 与纤维成熟度比 K_b 和线密度 H 的关系:

$$M = 0.509 \sqrt{K_b H + 8.359} - 2.352 \quad (12)$$

结合式(9)和(10)可得:

$$M = 0.509 \sqrt{2.214 \times 10^6 Q + 8.359} - 2.352 \quad (13)$$

$$M = 0.509 \sqrt{2.073 \times 10^8 K_m^2 D^2 + 8.359} - 2.352 \quad (14)$$

由式(14)可以看出,在忽略空隙率的情况下,影响马克隆值的独自变量有平均直径和成熟度。以前棉纤维的品种比较单一,直径相差不大,可以靠棉纤维气流仪测得的压差来确定棉纤维的线密度。但是现在棉花的常规品种逐年降低,杂交品种逐年提高,优质专用棉品种也有较大幅度的降低,未经审定品系一直占有相当高的比例,棉花品种呈现多乱杂的现象。品种增多难免会导致棉纤维直径差距越来越大,由式(14)可知,成熟度很低的棉花,其马克隆值也有可能高达 5.5,这就与马克隆值越大,成熟度越大的一般判断相悖。

综上所述,随着棉纤维直径范围的扩大,仅靠马克隆值已经不能作为判断棉纤维成熟度、线密度等《CIMS 论文的天地》

质量指标的依据,所以如果要沿用马克隆值这一质量指标,可以先按纤维直径将棉纤维的品种进行大致分类,然后分别制定对应的马克隆值分档标准,这样就可以根据马克隆值大致确定纤维的成熟度和线密度,进而判断可纺性等质量指标。

3 结束语

近年来马克隆值与棉纤维线密度等相关质量指标的关系混乱,传统分级方法不能反映可纺性等品质指标,究其根本是纤维形状与一定密度下透气性的关系比较复杂。本文根据苛仁纳公式推导出 Y145C 棉纤维气流仪两端流量的原理方程,方程表明在不考虑空隙率的影响下,容器两端流量与纤维直径和成熟度有关。用实验验证了该方程的计算结果具有一定的准确性。但若要进一步提高准确性,就需要明确空隙率的影响,所以最后通过建立三维棉纤维透气性模型和相关仿真,证明了该模型的有效性,为探究空隙率影响、进一步提高方程的准确性提供了参考。

FZXB

参考文献:

- [1] 院志霞.浅析影响棉纤维马克隆值的关键因素[J].中国纤检, 2016(6):141-143.
YUAN Zhixia. Analysis of the key factors affecting the micronaire value of cotton fibers [J]. China Fiber Inspection, 2016 (6): 141-143.
- [2] 翟亚丽,赵春生,孔繁荣.马克隆值与成纱质量的相关性能[J].纺织学报, 2009, 30(2):34-37, 47.
ZHAI Yali, ZHAO Chunsheng, KONG Fanrong. The related properties of micronaire value and yarn quality [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30 (2): 34-37, 47.
- [3] LORD E. Air flow through plugs of textile fibers, part I: general flow relations[J]. Journal of The Textile Institute Transactions, 1955, 46 (3): 191-213.
- [4] 孙勇.棉花检验中的马克隆值测试方法[J].化工管理, 2017(17):85.
SUN Yong. Test method of micronaire value in cotton inspection [J]. Chemical Management, 2017 (17): 85.
- [5] 陈美玉,孙润军,来侃.棉纤维气流仪理论方程及其修正[J].纺织学报, 2011, 32(4):118-122.
CHEN Meiyu, SUN Runjun, LAI Kan. Theoretical equation of cotton fiber airflow meter and its correction [J]. Journal of Textile Research, 2011, 32 (4): 118-122.
- [6] JAMES Rodgers, JIMMY Zumba, CHANEL Fortier. Measurement comparison of cotton fiber micronaire and its components by portable near infrared spectroscopy instruments[J]. Textile Research Journal, 2017, 87(1): 57-69.

<http://www.cimspaper.com>

- [7] 孟莉莉.棉花检验中的马克隆值测试方法[J].中国纤检,2014(7):78-79.
MENG Lili. Testing method of micronaire value in cotton inspection [J]. China Fiber Inspection, 2014(7): 78-79.
- [8] 何晓峰,徐守东,刘从九.棉纤维线密度检测技术综述[J].中国纤检,2018(10):88-93.
HE Xiaofeng, XU Shoudong, LIU Congjiu. A review of cotton fiber fineness detection technology [J]. China Fiber Inspection, 2018(10): 88-93.
- [9] CHEN Xiaochuan, WANG Di, QIU Yiping, et al. Finite element analysis of cotton ginning state based on ANSYS[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(11): 2142-2153.
- [10] LORD E. Air flow through plugs of textile fibers, part II: the micronaire test for cotton [J]. Journal of The Textile Institute Transactions, 1956, 47: 16-47.