

# 纺织纤维的交流导电浴盆效应及其应用

李晓峰<sup>1</sup>, 王建君<sup>1</sup>, 滕召胜<sup>2</sup>

(1. 湖南文理学院 电气系, 湖南 常德 415003; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要** 对纤维施加幅值固定、频率变化的激励信号时,其阻抗随着频率的增加,先迅速降低,超过某一频率后又迅速升高,谓之交流导电“浴盆效应”现象,利用此特性可设计交流阻抗法纤维回潮率快速测试系统,以克服传统电阻法测试纤维水分时“测量误差大”和“极板易极化”等缺陷,为设计开发新型纤维水分快速测试仪提供理论依据。

**关键词** 交流导电浴盆效应; 纺织纤维; 回潮率; 交流阻抗法

中图分类号: TS 101.921 文献标识码: A 文章编号: 0253-9721(2005)01-0044-03

## AC electric conductivity bathtub effect and its application of the textile fiber

LI Xiao-feng<sup>1</sup>, WANG Jian-jun<sup>1</sup>, TENG Zhao-sheng<sup>2</sup>

(1. Department of Electron, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415003, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410000, China)

**Abstract** When stimulating signals with fixed value and varied frequencies are fed to the textile fiber, the alternating current (AC) resistance fall quickly along with the increase of frequency at first. And after reaching a certain frequencies, then rise immediately. The phenomenon is called “AC electric conductivity bathtub effect.” Using this effect to design a prompt AC resistance method oriented testing system of the textile fiber moisture regain, the drawback on the excessive measuring error and the plate polarization with traditional resistance-testing method can be reduced, which can afford the theoretical proof for designing and developing a new prompt fiber moisture testing device.

**Key words** alternating current electric conductivity bathtub effect; textile fiber; moisture regain; alternating current resistance method

在恒定直流电压作用下,纺织纤维的电阻值随时间发生变化<sup>[1]</sup>。这一特性对含水纤维电阻值的测试结果将产生较大影响,从而使直流电阻湿法存在原理上的缺陷。纺织纤维的直流电阻值随时间变化的原因主要是纤维材料中杂质和电解质电解效应的影响。为了消除直流法测量纤维电阻值在原理上的缺陷,本文提出采用测试纤维材料的交流阻抗,进而间接测定纤维的回潮率的方法。

### 1 纺织纤维的交流导电浴盆效应现象

试验<sup>[2]</sup>发现,对纤维试样在一定频率范围内施加幅值不变的各种频率信号时,其导电能力随激励信号频率的变化而变化。图1为纺织纤维的阻抗—频率特性曲线,试样为原棉、苕麻精干麻(不含油剂)、粘胶纤维。其它纺织纤维(如羊毛纤维,见图2)均有类似特性。

由图1可见,纺织纤维的阻抗—频率关系有

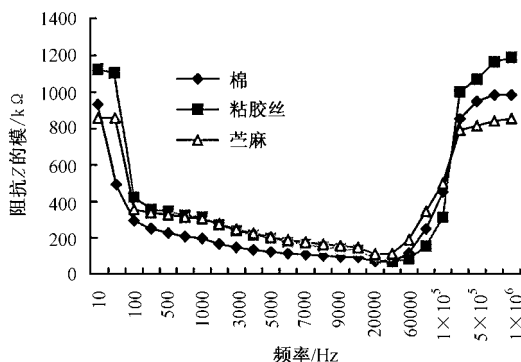


图1 纺织纤维的阻频特性

以下特点:1) 在外施激励信号的频率较低段,纺织纤维的阻抗随频率增加急剧降低;超过某一频带后(约100~500 Hz),纤维阻抗随频率增加而降低的速率迅速趋缓;在频率升至某一频段(约10~60 kHz),纤维阻抗值最小,随频率的变化率也极小;超过该频率

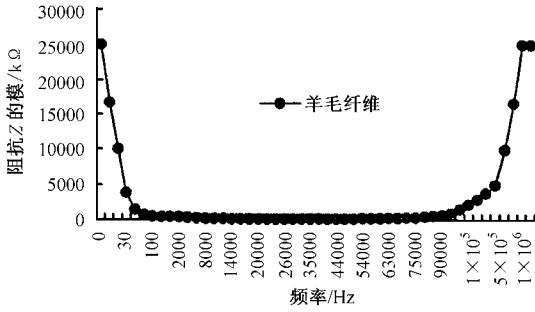


图 2 羊毛纤维的阻频特性

范围后,随着频率的进一步升高,纤维阻抗值开始急剧地增加。在一定频率范围内,纺织纤维阻抗频率的特性呈浴盆曲线状,为此本文定义为纺织纤维“交流导电浴盆效应”。2) 纺织纤维的品种不同,浴盆效应的边沿频率不同,但各种纤维在 10 ~ 60 kHz 频率范围内基本呈最小阻抗状态。施加这一频带的激励信号,纤维水分有最灵敏的反应。这一频带为纤维水分的敏感频带。3) 纺织纤维的阻抗与纤维品种、纤维含杂情况有关。试验发现,纤维品种不同,其浴盆效应的频带范围不同。此外,同品种纤维(如原棉)品级和含杂不同时,其浴盆效应的边沿不同,即低频段和高频段的形状不同。如图 2 3 所示。

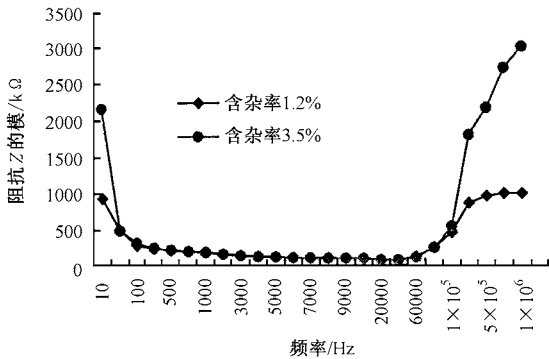


图 3 含杂率不同的棉纤维阻频特性

## 2 交流导电浴盆效应原理分析

纺织纤维交流导电浴盆效应的机理可用图 4 5 所示的模型予以分析。

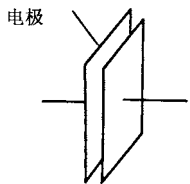


图 4 极板式传感器

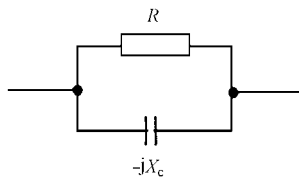


图 5 传感器等效模型

采用传感器(以极板式传感器为例)对纤维进行交流导电性测试时,其传感器结构如图 4 所示。纤维材料置于两电极板之间并被压紧时,其交流阻抗

Z 可用图 5 所示阻容电路模型模拟。其等效阻抗 Z 由式(1)确定:

$$Z = \frac{R \cdot (-j X_c)}{R - j X_c} \quad (1)$$

式(1)中,纯电阻值  $R = \rho \times L / S$ ,可见, R 仅取决于纤维材料的组成和纤维中水分的含量,与电场频率无关,而  $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ ,随电场频率 f 和电容器电容量 C 的变化而变化。因此,传感器的等效阻抗不仅与外施电场(激励)的频率 f 有关,还受等效电容器的电容量影响。即由式(1)得

$$|Z| = \frac{R \cdot X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{R}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1}} \quad (2)$$

式(2)表明,当  $X_c$  增大时,分母减小, Z 的模增大。可见  $X_c$  与传感器阻抗 Z 的模成正比。其作用过程可分为 4 个阶段讨论。

1) 仅从频率的角度分析:当 C 一定时,  $X_c$  随 f 的升高而减小,从而使 Z 减小,形成了在电场频率从零开始增加时,纤维材料的阻抗急剧减小的现象。在电场频率增加的初始阶段,可以认为纤维介质的介电系数基本保持不变,从而,纤维交流阻抗的减小主要是由于频率 f 增高引起的。这样就形成了纤维幅频特性曲线的下降沿。

2) 从电容量变化的方面分析:当 f 逐步增高时,纤维介质的介电系数将减小,从而使等效电容的电容量 C 也减小,并使  $X_c$  有增大的趋势。进而延缓了因 f 逐渐增高而使  $X_c$  急剧下降的趋势,形成纤维阻频特性曲线较为平缓的区段。

3) 当电场频率 f 继续增高并超过某一临界值时,纤维介质的极化率将急剧下降,进而使纤维的介电系数急剧减小,从而使以纤维为介质的极板式电容器的电容量也急剧减小。这一频率段内,由纤维介质介电系数减小引起的纤维阻抗增大的效应不仅能够抵消因频率 f 增高引起的纤维阻抗减小的趋势,且形成了纤维阻抗急剧增加的动力。这样就形成了纤维阻频特性曲线急剧上升的阶段,完成了浴盆效应的上升沿。由介质极化理论可知,电介质的极化可分为:电子极化、原子极化和偶极极化。电子极化为分子中原子的电子云向正极方向偏移,因而产生感应偶极矩,这类极化在所有的电介质中都存在。这种极化过程所需的时间极短,约为  $10^{-15} \sim 10^{-13}$  s,并且在外电场消失后即完全恢复原状,几乎不消耗能量。分子中带正电荷重心向负极方向移动,负电荷重心向正极方向移动,两者的相对位置发生变化而引起分子变形,产生偶极矩,称为原子极

化。原子极化伴随着微量的能量消耗,极化所需时间比电子极化稍长。极性分子中,原子或基团不对称排列,分子具有永久性偶极矩。在没有外加电场时,分子的热运动使各个偶极矩在各方向取向的概率相等,由大量分子组成的材料总平均偶极矩为零,电介质表现为中性。在外加电场作用下,极性分子沿电场方向排列,发生分子的取向。这种现象称为偶极极化或取向极化。在偶极分子受电场作用旋转向时,由于分子本身的惯性,取向受到阻力,需要消耗一定能量,而且需要相当长的时间才能完成取向。

在电场频率较低时,介质中将产生3种极化,此时介质的总极化率最大,介电系数也最大。电场频率逐渐升高后,部分偶极极化逐渐不能跟随电场频率的变化而形成,使得由偶极极化所决定的取向极化率减小,介质的介电系数也相应减小。当电场频率升高至超过某一范围后,偶极极化完全不能形成,介质的极化率仅决定于电子极化和原子极化,称为诱导极化率,从而使其相对介电系数大大降低。介电系数降低的结果,使得电容器的电容量大幅度降低,交流导电性降低。这就使得材料的交流阻抗大幅度增加,形成材料交流阻抗在电场频率升高到一定值后又大幅度增加的现象。

4) 当电场频率  $f$  继续增高时,介质中的原子极化也不能完成,此时的极化率达到最小并基本保持恒定。由此而产生的纤维阻抗增大的作用正好与因频率  $f$  增高使纤维阻抗减小的作用相抵消,使得当频率超过第二个转折点,纤维阻抗变化幅度趋缓。

综上所述可知,纤维交流导电浴盆效应产生的机理可由介质极化理论予以解释。即由于纤维介质的极化率取决于电子极化、原子极化和偶极极化,其中偶极极化率随电场频率的增高而降低直至不能完成,使得纤维介质的极化率随电场频率而变化,从而使得纤维介质的介电系数随电场频率变化,进一步使得纤维的电容量随电场频率变化,形成了纤维交流阻抗呈现随电场频率增加先下降,当超过某一频

率后又上升的“浴盆轮廓曲线”现象。

### 3 交流导电浴盆效应的应用

纺织纤维的交流导电浴盆效应,指在某一频带范围内,纤维材料的交流阻抗最小且对纤维水分含量最为敏感,即存在纤维水分的敏感频带。利用纤维材料的交流导电浴盆效应,对含水纤维施加其敏感频带的激励信号,通过测量其导通电流,可以间接测量其水分含量。

回潮率的测定是纺织企业和纤维收购部门的必不可少的检验项目。目前我国国家标准规定,可采用烘箱法和电阻法测定纺织材料的回潮率(GB/T 9995-1997、GB/T 6102.1-1985、GB/T 6500-1986)。烘箱法具有测试结果准确、重复性好的优点,故常被应用于对其它测试方法进行标定和仲裁测试。但是烘箱法也存在耗能费时,不能满足现场快速测试需要的缺陷,因此人们正在大力研究快速节能的测试方法,其中,直流电阻测湿法在原棉水分快速测试中被普遍采用。然而,目前成熟的 Y412A 原棉水分测湿仪仍然存在测量误差大、噪声大、易极化、互换性差(只能用于棉纤维的水分测量)等明显缺陷。这些缺陷的主要原因是纤维材料在直流电压作用下的电阻值“漂移”引起的<sup>[1,4]</sup>。如果采用频率为纤维水分敏感频带范围内的激励信号作用于纤维传感器,则可通过测定含水纤维的交流阻抗来间接测定纤维材料的回潮率,即“交流阻抗法”测试纤维水分。实验证明<sup>[2]</sup>,交流阻抗法测定纺织纤维的回潮率,可克服传统电阻法测湿的测量误差大和极板易极化的缺陷,为纺织材料回潮率快速测试的较优方法。

#### 参考文献:

- [1] 严灏景. 纤维材料学导论[M]. 北京:纺织工业出版社,1990.
- [2] 李晓峰. 新型纤维水分快速检测原理与方法的研究[D]:[硕士论文]. 长沙:湖南大学,2002.
- [3] 滕召胜,周光俊,童调生. 粮食的导电浴盆效应与新型水分检测方法研究[J]. 中国粮油学报,1999,14(1):59-62.
- [4] 钱云青. 纺织试验仪器学[M]. 北京:纺织工业出版社,1991.