

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.019

# 基于 X 射线法无损测定再造烟叶基片的定量

Nondestructive determination of reconstituted tobacco paper base based by X ray method

朱宏福<sup>1</sup> 堵劲松<sup>1</sup> 常纪恒<sup>1</sup> 樊新顺<sup>2</sup>

ZHU Hong-fu<sup>1</sup> DU Jin-song<sup>1</sup> CHANG Ji-heng<sup>1</sup> FAN Xin-shun<sup>2</sup>

田晓辉<sup>2</sup> 王嘉绍<sup>1</sup> 鲁端峰<sup>1</sup>

TIAN Xiao-hui<sup>2</sup> WANG Jia-shao<sup>1</sup> LU Duan-feng<sup>1</sup>

(1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001;

2. 河南卷烟工业烟草薄片有限公司, 河南 许昌 461100)

(1. Zhengzhou Tobacco Research of CNTC, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan Cigarette Industry Tobacco Sheet Co., Ltd., Xuchang, Henan 461100, China)

**摘要:**采用 X 射线定量仪对不同配比的再造烟叶基片进行测定,通过分析管电压对该仪器测定结果的重复性、灵敏度和检出限的影响,优化出 6 000 V 的管电压较适合测定基片的定量;并且发现测定不同配比再造烟叶基片的定量指示值和定量实测值有较高的线性关系,建立的线性回归模型决定系数  $>0.99$ ,预测最大相对偏差  $<1\%$ ;含有不同含量碳酸钙的再造烟叶基片对模型的建立影响较大,含有不同含量梗末比和外加纤维的再造烟叶基片对模型的建立影响相对较小。

**关键词:** X 射线法;再造烟叶基片;管电压;定量

**Abstract:** The reconstituted tobacco paper base with different ratios was determined by X-ray grammage instrument. The effect of tube voltage on repeatability, sensitivity and detection limit of the instrument was analyzed. The results show that tube voltage 6 000 V is more suitable for the determination about the grammage of the reconstituted tobacco paper base; and it is found that the grammage indication value has a high linear relationship with the grammage measured value about the reconstituted tobacco paper base with different ratios, and the established linear regression model with determination coefficient over 0.99, and the predicted maximum relative deviation less than 1%. The reconstituted tobacco paper base with different content of calcium carbonate has great influence on the establishment of the model.

**作者简介:**朱宏福,男,中国烟草总公司郑州烟草研究院在读硕士研究生。

**通信作者:**鲁端峰(1979—),男,中国烟草总公司郑州烟草研究院高级工程师,博士。E-mail:05498119@163.com

**收稿日期:**2018-10-10

The reconstituted reconstituted tobacco paper base containing different content of tobacco stem and tobacco powder ratio and external fiber wood pulp has relatively little influence on the establishment of the model.

**Keywords:** X ray method; reconstituted tobacco paper base; tube voltage; grammage

再造烟叶是利用烟梗、烟末、碎烟片等卷烟生产过程中的废弃物,外加植物纤维,经过重新组合而成的产品,又称烟草薄片<sup>[1]</sup>。造纸法再造烟叶借鉴了制浆造纸的工艺特点,与稠浆法和辊压法再造烟叶相比,其物理性能、焦油释放量、燃烧性能以及卷烟填充性等方面具有明显优势<sup>[2]</sup>。造纸法再造烟叶加工工序主要包括:提取、浓缩、打浆、抄造、涂布等,浆料经抄造后形成再造烟叶基片,基片定量波动也会传递到再造烟叶成品,引起再造烟叶成品定量波动,对成品的物理指标的稳定性有较大影响,而且基片定量波动势必引起进入涂布机之前的基片厚度和水分的变化,导致产品的涂布率波动剧烈,对成品的化学指标稳定性有很大的影响<sup>[3]</sup>。现阶段生产线上针对再造烟叶基片定量的测定通常按国标<sup>[4]</sup>执行,但该法周期时间长,数据反馈滞后不适合生产线的基片定量的测定与控制。目前也有针对基片定量的无损测定研究报道<sup>[5]</sup>,但存在测定准确度不高,测定仪器受环境温湿度影响较大等因素,不适合在线测定。

近年来基于  $\beta$  或 X 射线吸收原理无损测定方法在许多行业应用越来越成熟。朱芃睿等<sup>[6]</sup>根据  $\beta$  射线计数衰减及能量损失测量铝镀膜密度;吕松等<sup>[7]</sup>基于低能 X 射线透射成像技术研究块冻虾中虾的净含量在线检测;

Bergsten 等<sup>[8]</sup>使用 X 射线微密度计对完整或准备的钻芯上的木材密度进行批量测量; Anina 等<sup>[9]</sup>利用 X 射线微计算机断层扫描技术(mCT)开发了高通量方法,以确定玉米全粒体积和密度。以上技术的原理利用  $\beta$  或 X 射线在穿透物质时会产生光电、康普顿、电子对等效应,从而导致射出射线强度相对于射入射线强度有一定的衰减,衰减比例与被穿透物体的定量呈负指数关系,射线强度与定量的关系式遵循 lambert-beer 定律<sup>[10]</sup>。应用  $\beta$  射线测定不同材料样品时需要改变不同天然射线源,操作复杂,且在无工作状态时也会向外界辐射一定的能量,影响人体健康。X 射线技术测定不同材料时需要不同范围的管电压,管电压与射线能量呈一定的正比关系。本试验拟研究 X 射线定量仪测定再造烟叶基片所需的管电压,并研究 X 射线定量仪测定不同配比基片的定量指示值(X 射线定量仪设定参数不变的情况下测定样品的测定值)与参照 GB/T 451.2—2002 测定的定量实测值的规律,建立线性回归模型,通过线性回归模型计算得到定量实测值。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

烟梗、烟末、外加纤维、轻质碳酸钙(PCC):河南卷烟工业烟草薄片有限公司;

低浓盘磨机:MD-3000 型,巴西瑞格美德实业有限公司;

快速纸页成型器:ZQJ1-B-II 型,陕西科技大学机械厂;

标准浆料解离器:PD-10 型,西班牙 TECHLAB SYSTEMS 公司;

X 射线定量仪:DC-X0020 标准型,深圳市大成精密设备有限公司;

电子天平:感量 0.000 1 g,德国 Sartorius 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 浆料的制备

(1) 烟末浆的制备:烟末在磨浆之前先在恒温水浴锅中用水进行萃取,萃取条件为:料液比 1:6 (g/mL),温度 55 °C,处理时间 45 min;固液分离后的烟末利用低浓盘磨进行磨浆。

(2) 烟梗浆制备:烟梗原料在磨浆之前先在恒温水浴锅中进行萃取,萃取条件为:料液比 1:4 (g/mL),温度 65 °C,处理时间 45 min,处理后的烟梗进行固液分离,固液分离后的烟梗利用低浓盘磨进行磨浆。

(3) 外加纤维浆制备:利用低浓盘磨对外加纤维进行磨浆。

#### 1.2.2 再造烟叶基片的制备

(1) 不同碳酸钙含量再造烟叶基片的配料:固定梗末

比(烟梗浆与烟末浆的质量比)为 5:5,外加纤维浆含量占烟梗浆与烟末浆的总质量的 10%,分别添加不同含量的碳酸钙,使碳酸钙含量占烟梗浆与烟末浆的总质量百分比为 0%,5%,10%,15%,20%,依次记为 1#-1、1#-2、1#-3、1#-4、1#-5。

(2) 不同梗末比再造烟叶基片的配料:固定碳酸钙含量为 0%,外加纤维浆含量为 20%,分别添加不同含量的烟梗浆和烟末浆,使梗末比为 10:0,8:2,6:4,5:5,4:6,依次记为 2#-1、2#-2、2#-3、2#-4、2#-5。

(3) 不同外加纤维再造烟叶基片的配料:固定碳酸钙含量为 0%,梗末比为 5:5,分别添加不同含量外加纤维浆(5%,10%,15%,20%,25%),依次记为 3#-1、3#-2、3#-3、3#-4、3#-5。

(4) 不同再造烟叶基片的抄造:将烟末浆、烟梗浆、外加纤维浆和碳酸钙按着上述配料通过解离器进行疏解与搅拌,调整浆料浓度为(1.0±0.1)%,使用快速纸页成型器抄造成不同定量的基片,放在密封袋里备用。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2010、IBM SPSS Statistics 20、Origin Pro 9.0 软件进行数据分析与绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 X 射线定量仪测定再造烟叶基片的适用性检验

图 1 为 X 射线定量仪在电压 5 400 V 持续 10 s 测定空气和不同定量的 1#-4 再造烟叶基片射线强度。由图 1 可以看出不同定量的样品射线强度有所变化,可以区分不同定量的再造烟叶基片样品;表 1 为在电压 5 400 V 下测定不同配比不同定量的再造烟叶基片的质量吸收系数,通过测定的射出空气射线强度、射出再造烟叶基片射线强度和再造烟叶基片定量,根据 lambert-beer 公式求得质量吸收系数<sup>[10]</sup>:

$$m = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{I_0}{I}, \quad (1)$$

式中:

$I$ ——穿透被测物质的射出射线强度;

$I_0$ ——未穿透被测物质的入射射线强度;

$\lambda$ ——被测物质单位面积的质量吸收系数;

$m$ ——被测物质的定量, g/m<sup>2</sup>。

当 X 射线定量仪的靶材料和管电压确定时,质量吸收系数与样品含有成分有关<sup>[11]</sup>。由表 1 可以看出,同种配比的定量不同的基片质量吸收系数较稳定,不同配比的基片质量吸收系数有所变化,说明了同配比定量不同的基片含有化学成分较一致,保证了测定同配比定量不同的基片不需考虑质量吸收系数对测定结果的影响。综上,在测定同配比定量不同的再造烟叶基片时,在保证质量吸收系数稳定的情况下,可以识别同配比定量不同的

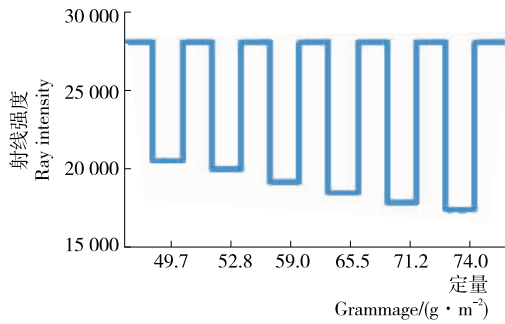


图1 不同定量基片的射线强度

Figure 1 Ray intensity of different grammage paper base

表1 不同定量基片质量吸收系数

Table 1 Mass absorption coefficient of different grammage paper base

定量/(g·m <sup>-2</sup> )		质量吸收系数/(m <sup>-2</sup> ·g)	
1#-4	3#-2	1#-4	3#-2
49.7	54.4	0.006 4	0.006 1
52.8	55.7	0.006 5	0.006 1
54.8	60.5	0.006 5	0.006 1
60.1	63.6	0.006 5	0.006 1
65.5	65.7	0.006 4	0.006 1
65.7	71.9	0.006 4	0.006 1
71.2	74.8	0.006 4	0.006 1
74.0	77.0	0.006 4	0.006 1
75.8	80.8	0.006 4	0.006 1

再造烟叶基片差异性,为测定的定量指示值与定量实测值建立相应的模型提供了依据。

### 2.2 X射线管电压的优化

为了考察不同管电压下(5 100~7 500 V)对测量结果重复性、灵敏度和检出限的影响,分别针对不同定量1#-4和3#-2的2组样品进行静态定点测定,图2为不同管电压下2组样品重复性结果,用  $\ln \frac{I_0}{I}$  值的相对标准偏差(RSD)表征重复性。从图2可以看出随着管电压的升高,RSD先降低后升高在6 000 V时出现了最低值,分析其原因主要是由于管电压低时噪音大重复性不好,管电压高时由于射出样品的射线强度大,导致了  $\ln \frac{I_0}{I}$  偏小,求其的相对标准偏差偏大;表2为不同管电压下2组样品灵敏度的结果,通过测定每组样品定量值( $m$ )、 $I_0$ 值和  $I$ 值,建立  $\ln \frac{I_0}{I}$ 与  $m$ 的线性拟合模型,用  $d \ln \frac{I_0}{I} / dm$  表征灵敏度,即线性回归模型的斜率或质量吸收系数,由图3可以看出随着管电压  $U$ 的升高,质量吸收系数越来

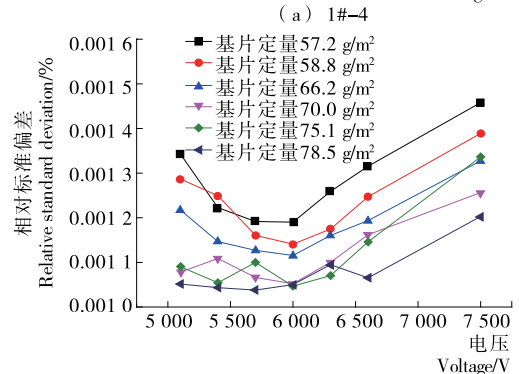
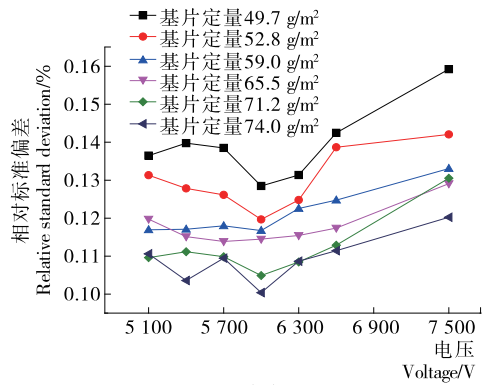


图2 1#-4和3#-2在不同管电压下基片定量指示值重复性结果

Figure 2 Repeatability results of 1#-4 and 3#-2 substrates under different tube voltages

越小,这与经验公式  $\lambda = K(\sum_1^n Z_i^3 N_i)(\frac{12.4}{U})^3$  表述一致的<sup>[12]219-234</sup>,即管电压越高灵敏度越差;图4为检出限随着电压变化的结果,检出限是指某一测定方法在一定的置信度能够被仪器测定样品的最低量,用  $\frac{3S_0}{\lambda}$  表征检出限<sup>[13]</sup>,其中  $S_0$ 为X射线定量仪在一定电压下持续10 s射出空气的射线强度的标准偏差, $\lambda$ 为该电压下的质量吸收系数即灵敏度,由图4可以看出基片在5 700 V时检测限最低,1#-4样品对应的最低定量值为21.8 g/m<sup>2</sup>,3#-2样品对应的最低定量值为20.7 g/m<sup>2</sup>。综上在6 000 V时重复性结果较好,5 700 V时检出限较好,但在6 000 V时X射线定量仪测定检出限最低定量 < 30 g/m<sup>2</sup>,在实际生产过程中基片定量 > 40 g/m<sup>2</sup>,在保证测定检出限的情况下,以重复性指标优选出了6 000 V作为试验的条件。

### 2.3 动态扫描径向路线的确定

图5为X射线定量仪正面图。为了解决X射线定量仪测定时环境温湿度在不停变化,射线强度、射线感应器也随着时间缓慢飘移。扫描时采用两点修正模型,在扫描架的右端留有足够的空气以保证扫描架能正确采集射

表 2 不同管电压灵敏度分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of at different tube voltages

电压/V	1#-4		3#-2	
	$\ln \frac{I_0}{I}$ 与 $m$ 线性拟合模型	$R^2$	$\ln \frac{I_0}{I}$ 与 $m$ 线性拟合模型	$R^2$
5 100	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.006 9m + 0.058 9$	0.994 7	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.006 6m + 0.086 6$	0.992 6
5 400	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.006 4m + 0.045 3$	0.996 2	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.006 1m + 0.078 2$	0.992 8
5 700	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.006 1m + 0.046 0$	0.995 3	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.005 7m + 0.070 3$	0.993 2
6 000	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.005 6m + 0.047 7$	0.990 3	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.005 2m + 0.073 0$	0.990 6
6 300	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.005 3m + 0.040 7$	0.996 4	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.004 8m + 0.066 6$	0.993 1
6 600	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.005 0m + 0.036 2$	0.993 7	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.004 4m + 0.066 4$	0.996 5
7 500	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.004 0m + 0.035 2$	0.993 0	$\ln \frac{I_0}{I} = 0.003 6m + 0.061 1$	0.991 5

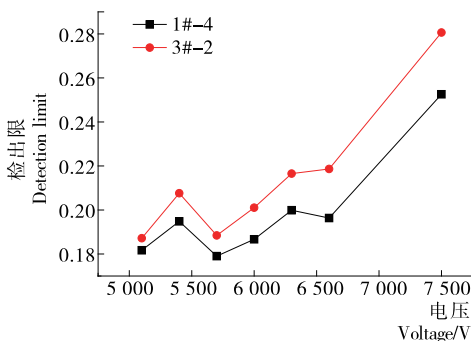


图 3 质量吸收系数随管电压的变化

Figure 3 Mass absorption coefficient with tube voltage

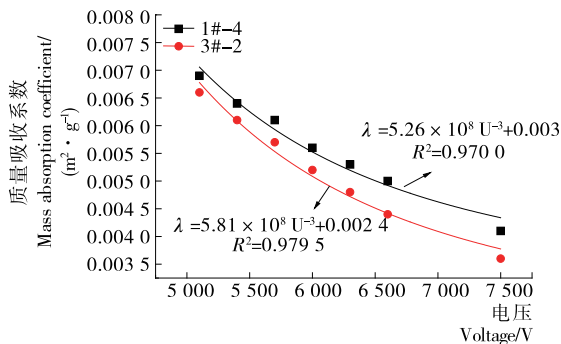


图 4 检出限随管电压的变化

Figure 4 Detection limit with tube voltage changes

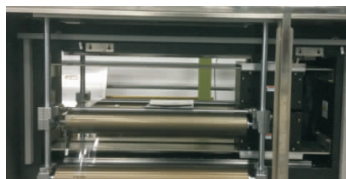


图 5 X 射线定量仪

Figure 5 X-ray grammage instrument

线穿透空气后的强度,此强度称为  $I_0$ ,在扫描的左端是一种热性能和机械能较稳定的高分子材料(Mylar 片),扫描过程中会每隔段时间扫描一次 Mylar 片和空气,Mylar 片的定量为已知,求出 Mylar 片质量吸收系数,通过 Mylar 片质量吸收系数测定出样品的定量指示值。

X 射线定量仪测定点光斑直径为 30 mm,不同配比基片规格皆为直径 200 mm 圆形样品,样品放在载物台上沿着不同径向路线(8 条和 4 条)进行扫描,8 条径向路线扫描结果可以反映出整个基片定量变化的信息,4 条径向路线扫描反映整个基片部分定量变化的信息。表 4 为分别沿着 8 条和 4 条径向路线扫描测定不同配比基片的定量指示值结果,其中 Shapiro-Wilk 是检验数据的正态性,Games-Howell 检验 8 条与 4 条测定结果的平均值是否有差异性,相对偏差为 8 条与 4 条扫描得到平均值的绝对差值除以两者的平均值。由表 3 可以看出沿 8 条与 4 条不同径向路线扫描得到平均值最大相对偏差为 0.223%,两者路线扫描不同配比基片的定量指示值数据的 Shapiro-Wilk 检验 P 值均  $>0.05$ ,说明了再造烟叶基片不同点的定量指示值符合正态分布,可以进行 Games-Howell 检验,Games-Howell 检验的 P 值均  $>0.05$ ,说明沿 8 条与 4 条径向测定路线得到的平均值无差异性。为了节省时间,本次试验选用 4 条径向扫描路线。

2.4 不同配比的再造烟叶基片测定定量模型的建立

由图 6 中可以看出,不同配比的基片定量指示值与定量实测值线性关系较高,分别建立其线性回归模型如表 4~6。表 4~6 中  $k$ 、 $b$  和  $R^2$  分别为线性回归模型的斜率、截距和决定系数,MXRD 是同配比不同定量的基片通过其线性回归模型预测的定量值与定量实测值最大相对

表 3 不同径向扫描路径次数定量指示值结果

Table 3 Results of quantitative indication values for different radial scan path times

样品	8 条扫描线统计结果			4 条扫描线统计结果			相对偏差/%	Games-Howell	
	平均值	Shapiro-Wilk		平均值	Shapiro-Wilk			F 值	P 值
		W 值	P 值		W 值	P 值			
1#-4	137.131	0.985	0.454	136.945	0.962	0.195	0.135	0.078	0.781
	155.694	0.973	0.080	155.422	0.973	0.453	0.175	0.766	0.383
2#-1	140.916	0.988	0.688	140.995	0.978	0.605	0.056	0.015	0.902
	236.340	0.973	0.091	236.735	0.964	0.229	0.167	0.129	0.720
3#-3	155.694	0.973	0.080	155.422	0.973	0.453	0.175	0.766	0.383
	214.633	0.972	0.074	215.111	0.976	0.540	0.223	0.453	0.502

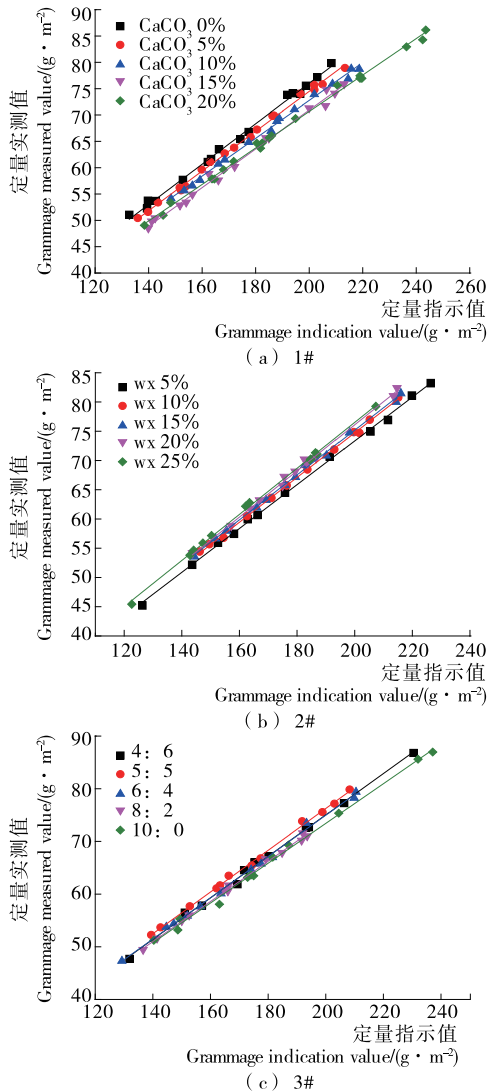


图 6 不同配比基片的定量指示值与定量实测值的散点图

Figure 6 Scatter plot of grammage indication value and grammage measured value of different ratio paper bases

偏差,其中线性回归模型决定系数  $R^2$  均  $>0.99$ ,模型预测值与定量实测值最大偏差均  $<1\%$ ,说明了针对不同配比的基片,可以先建立定量实测值与定量指示值的线性回归模型,然后进行基片定量的测定。

表 4 不同碳酸钙含量的基片线性回归模型参数

Table 4 Parameters of linear regression model of paper bases with different contents of calcium carbonate

样品号	碳酸钙/%	$k$	$b$	$R^2$	MXRD/%
1#-1	0	0.384	-0.775	0.996	0.562
1#-2	5	0.378	-1.014	0.997	0.487
1#-3	10	0.367	-2.563	0.992	0.789
1#-4	15	0.359	0.971	0.996	0.561
1#-5	20	0.346	1.430	0.997	0.842

表 5 不同梗末比的基片线性回归模型参数

Table 5 Parameters of linear regression model of paper bases with different tobacco stem and tobacco powder ratio

样品号	烟梗:烟末	$k$	$b$	$R^2$	MXRD/%
2#-1	4:6	0.393	-3.663	0.997	0.841
2#-2	5:5	0.396	-2.998	0.998	0.512
2#-3	6:4	0.392	-3.374	0.997	0.486
2#-4	8:2	0.381	0.392	0.996	0.368
2#-5	10:0	0.378	-2.098	0.996	0.678

表 6 不同外加纤维含量的基片线性回归模型参数

Table 6 Parameters of linear regression model of paper bases with different contents of external fiber

样品号	外加纤维/%	$k$	$b$	$R^2$	MXRD/%
3#-1	5	0.374	-1.544	0.999	0.544
3#-2	10	0.382	-1.752	0.999	0.873
3#-3	15	0.383	-1.457	0.998	0.556
3#-4	20	0.395	-2.824	0.996	0.444
3#-5	25	0.393	-2.185	0.998	0.342

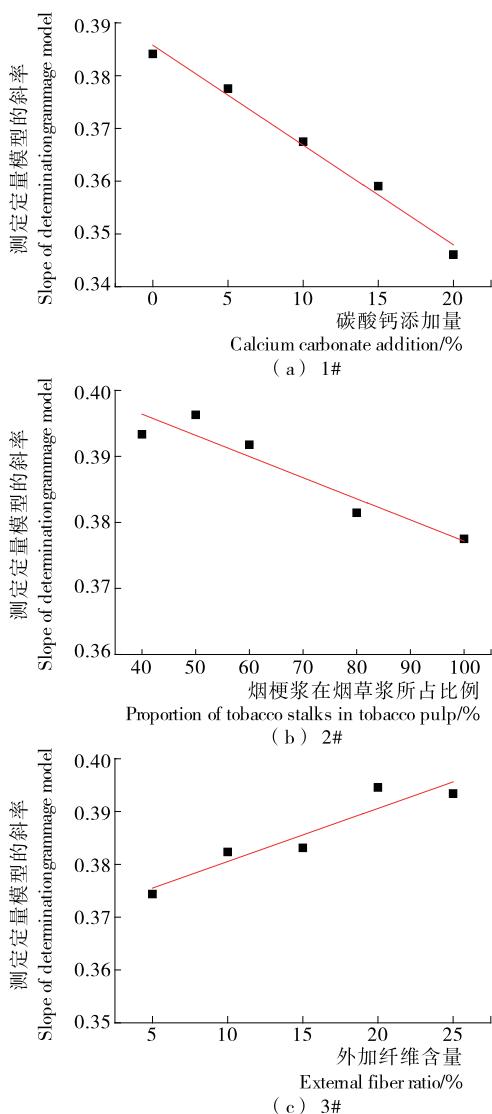


图 7 不同配比基片测定定量模型斜率的变化  
Figure 7 Variation of determination model slope about different ratio paper bases

由图 7 可以看出不同配比碳酸钙对模型斜率影响较大,不同配比的外加纤维和梗末比对模型斜率影响相对较小。从图 7(a)中可以看出,碳酸钙在 0%~20%时随着碳酸钙的增多,斜率逐渐降低,不同配比的碳酸钙模型的斜率与添加碳酸钙的含量有着较高的线性关系,这是由于碳酸钙的增多导致了质量吸收系数的增大,因而斜率减小;从图 7(b)可以得出,在烟梗浆占烟梗浆和烟末浆总质量的百分比为 40%~100%时,随着烟梗浆占烟草浆的增多,质量吸收系数有呈上升的趋势,分析其原因是质量吸收系数与样品含有的元素序数、元素含量百分比有关<sup>[12]237-241</sup>,样品中较大元素序数的元素含量越多,质量吸收系数越大。烟梗浆含有的灰分比烟末浆的灰分多<sup>[14]</sup>,随着烟梗浆的增多,灰分含量增多,质量吸收系数升高,斜率减小。从图 7(c)可以得出,外加纤维在 5%~

25%时随着外加纤维的增多,斜率呈上升趋势,分析原因主要是因为外加纤维含有的灰分相对于烟梗烟末较小<sup>[14]</sup>,随着外加纤维的增多,灰分含量百分比变少,质量吸收系数减小,斜率增大。

### 3 结论

本试验以不同再造烟叶基片为研究对象,研究了 X 射线定量仪测定再造烟叶基片的定量的方法,通过研究得出以下主要结论:① 采用 X 射线定量仪测定再造烟叶基片的定量具有较高的可行性;② 在本试验范围内本方法与国标法测定再造烟叶基片的定量最大相对误差 < 1%;③ 不同配比的再造烟叶基片对于测定结果有一定的影响,其中碳酸钙的含量对测定结果影响较大,梗末比和外加纤维的含量对于测定结果影响相对较小。

X 射线定量仪测定再造烟叶基片的定量具有准确度高、数据反馈迅速等优势,不同配比再造烟叶基片对测定结果有着不同程度的影响,在实际应用中,需对不同含量碳酸钙的再造烟叶基片对测定结果的影响进行深入研究。

### 参考文献

- [1] 王迅键, 钟芳, 陈茂深, 等. 烟草薄片平衡含水率影响因素探究[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 189-194.
- [2] 武超伟. 通过磨片优化提升造纸法再造烟叶的物理性能[J]. 烟草科技, 2018, 49(5): 74-79.
- [3] 王凤兰, 廖夏林, 何北海, 等. 造纸法烟草薄片双辊表面涂布影响因素的研究[J]. 造纸科学与技术, 2012, 31(5): 21-25.
- [4] 中国轻工业联合会. GB/T 451.2—2002 纸和纸板定量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 428-431.
- [5] 吴丽君, 白晓莉, 王毅, 等. 近红外光谱结合 SVR 测定造纸法再造烟叶物理指标[J]. 食品工业, 2017, 38(8): 262-264.
- [6] 朱芃睿, 文杰, 姚玉华, 等. 利用  $\beta$  射线测量镀膜密度[J]. 大学物理, 2017, 36(3): 57-62.
- [7] 吕松, 蔡健荣, 袁雷明, 等. 基于 X 射线成像的块冻虾净含量测定研究[J]. 食品科技, 2014, 39(1): 147-151.
- [8] BERGSTEN U, LINDBERG J, RINDBY A, et al. Batch measurements of wood density on intact or prepared drill cores using x-ray microdensitometry[J]. Wood Science and Technology, 2001, 35(5): 435-452.
- [9] GUELPA A, DU Plessis A, MANLEY M. A high-throughput X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ CT) approach for measuring single kernel maize (*Zea mays* L.) volumes and densities[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69(4): 321-328.
- [10] BERNAL J D. X-Rays in theory and experiment [J]. Nature, 1935, 136(3 443): 661-662.
- [11] 魏光普. X 射线吸收分析法简介[J]. 化学通报, 1965, 37(4): 38-44.
- [12] 褚圣麟. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [13] 冉敬, 杜谷, 杨乐山, 等. 关于检出限的定义及分类的探讨[J]. 岩矿测试, 2008, 27(2): 155-157.
- [14] 赵德清, 戴亚, 冯广林, 等. 烟梗、烟叶碎片和烟末的化学成分与纤维形态[J]. 烟草科技, 2016, 49(3): 91-98.