

加热不燃烧卷烟烟草材料的特性分析

Characteristic analysis of heat-not-burn cigarette tobacco materials

杨雪燕¹ 温光 and ¹ 李 峰² 饶国华²

YANG Xue-yan¹ WEN Guang-he¹ LI Feng² RAO Guo-hua²

肯生叶¹ 段 勤¹ 金云峰¹ 高 朝¹

KEN Sheng-ye¹ DUAN Qin¹ JIN Yun-feng¹ GAO Chao¹

(1. 云南养瑞科技集团有限公司, 云南 昆明 650224; 2. 广东中烟工业有限责任公司技术中心, 广东 广州 510385)

(1. Yunnan Yangrui Tech Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Technology Center of China Tobacco Guangdong Industrial Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510385, China)

摘要:为了深入了解不同工艺制备的加热不燃烧(HNB)卷烟烟草材料的特点及其对卷烟制品特性的影响,从化学成分分析、热裂解分析及热重分析等方面对辊压法、稠浆法、造纸法、干法制备的4种烟草原味加热不燃烧卷烟的烟草材料进行了剖析。结果表明:① 辊压法、稠浆法制备的烟草材料纤维含量较低,结构紧密;造纸法、干法制备的烟草材料纤维含量高,结构相对疏松。② 不同工艺加热不燃烧卷烟烟草材料的水分含量差异不大,烟碱含量为6.68~13.56 mg/g;甘油含量明显高于丙二醇,且远远高于传统卷烟。③ 烟草材料裂解香气释放量随裂解温度的升高呈现先升高后下降,在270℃达到峰值后又缓慢降低的趋势,裂解香气成分各有特点。④ 加热不燃烧卷烟烟草材料的热失重均分为4个阶段,且以第2、第3阶段为主,烟草材料的热失重情况存在一定差异。

关键词:加热不燃烧卷烟;烟草材料;成分分析;热裂解;热重分析

Abstract: In order to deeply understand the characteristics of heat-not-burn (HNB) cigarette tobacco materials prepared by different processes and their effects on the characteristics of cigarette products, four kinds of sheets with different flavors prepared respectively by rolling press (RP), slurry process (SP), paper-making process (PP) and air-laid process (AP) were analyzed by chemical composition analysis, thermal cracking analysis and thermal weight analysis. The results are as follows. ① RP and SP tobacco materials had a low fiber content and tight structure,

while PP and SP tobacco materials had a relatively high fiber content and loose structure. ② Water content of cigarette tobacco materials in HNB was similar, and the nicotine content ranged from 6.68 mg/g to 13.56 mg/g. The content of glycerol was higher than that of propylene glycol, and much higher than that in traditional cigarettes. ③ With the increase of cracking temperature, the release volume of cracking aroma of tobacco materials increased first and then decreased, peaking at 270℃ and then slowly decreased. The components of cracking aroma have their own characteristics. ④ TG in tobacco materials of HNB cigarettes could be divided into four stages. The main weight loss stage was the second stage and the third stage, there are some differences in the thermal weightlessness of tobacco materials.

Keywords: heat-not-burn cigarette; tobacco material; composition analysis; thermal cracking analysis; thermal weight analysis

加热不燃烧卷烟(HNB)是利用特殊热源对烟草材料进行加热后释放烟气,烟草材料只受热并不燃烧的一种新型烟草制品^[1-2]。加热不燃烧卷烟的抽吸温度一般在500℃以下,仅发生蒸馏及较简单的热解反应^[3],可有效减少因高温燃烧、热解和热合成过程中很多潜在有害物质的产生^[4-5],很大程度上降低了烟草制品对人体的危害^[6]。

刘珊等^[7]从烟支结构、烟草材料化学成分、烟气释放等方面剖析了碳加热型及电加热型两种加热不燃烧型烟草制品。杨继等^[8]分析了碳加热型及电加热型新型卷烟烟草材料的热行为。再造烟叶是加热不燃烧卷烟制品的核心材料,再造烟叶又称烟草薄片,是利用烟梗、烟末等物料通过重组加工形成的样品^[9],其主要成分为烟粉、胶黏剂、保润剂(丙二醇和甘油)、增强剂、水、纤维和调配香精。再造烟叶的制作工艺很大程度上决定了烟草材料的

基金项目:广东中烟工业有限责任公司项目(编号:QJ/GY G03.009/01)

作者简介:杨雪燕,女,云南养瑞科技集团有限公司工程师,硕士。
通信作者:温光 and (1979—),男,云南养瑞科技集团有限公司高级工程师。E-mail:13577065300@163.com

收稿日期:2019-07-06

材质、烟草原料的负载量以及热性能,这些因素造成了烟草材料在加热状态下的烟气释放量、烟气状态、烟香特征不同,并对加热不燃烧卷烟的抽吸感受造成影响。

目前很少有对不同工艺制备的烟草材料特性进行系统分析研究的报道^[10]。为了深入了解不同制作工艺的烟草材料对 HNB 卷烟特性的影响,试验拟通过化学成分分析、热裂解分析及热重分析等对 4 种不同工艺制备的加热不燃烧卷烟烟草材料进行对比研究,旨在为加热不燃烧卷烟烟草材料的研究开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器

辊压法加热不燃烧卷烟材料(样品 A)、稠浆法加热不燃烧卷烟材料(样品 B)、造纸法加热不燃烧卷烟材料(样品 C)、干法加热不燃烧卷烟材料(样品 D):市售;

1,2-丙二醇、丙三醇:分析纯,天津天津市大茂化学试剂厂;

烟碱:标准品,国家烟草质量监督检验中心;

乙醇:色谱纯,德国 Merck 公司;

电子天平:MS204S 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

气相色谱—质谱联用仪:7890B-5977A 型,美国 Agilent 公司;

热裂解仪:Pyroprobe 5200 型,美国 CDS 公司;

热重/差热综合热分析仪:TGA/DSC1 HT1600 型,瑞士 Mettler Toledo 公司。

1.2 方法

1.2.1 烟草材料的化学成分分析 将不同的烟草材料样品均匀地置于温度(22±1)℃、相对湿度(60±2)%的环境中平衡 48 h。

(1) 含水率:参照 YC/T 31—1996。

(2) 丙二醇和甘油含量:参照 YC/T 243—2008。

(3) 烟碱含量:参照 YC/T 246—2008。

1.2.2 热裂解分析 将烟丝样品剪成约为 1 mm² 的小碎片,称取(2.0±0.2) mg 样品,置于热裂解仪专用石英管中,用石英棉塞住裂解管两端,然后将石英管转入热裂解仪中进行热裂解。

(1) 裂解器附件温度:初始温度 80℃,以 100℃/min 升至 120℃并保持 2 min。

(2) 8 步裂解温度程序:① 120℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 150℃并保持 5 s;② 150℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 180℃并保持 5 s;③ 180℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 210℃并保持 5 s;④ 210℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 240℃并保持 5 s;⑤ 240℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 270℃并保持 5 s;⑥ 270℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 300℃并保持 5 s;⑦ 300℃保持 5 s,以 20℃/s 升至 330℃并保持 5 s;⑧ 330℃保持 5 s,以 20℃/s 升至

360℃并保持 5 s。

(3) 吸附与脱附条件:吸附温度 40℃,脱附温度 280℃,脱附及进样时间 4 min。裂解气(含 9%氧气的氮氧混合气)流速 30 mL/min。在裂解试验之间穿插进行空白试验,以观察样品是否脱附完全。

1.2.3 气相色谱/质谱条件

(1) 气相色谱条件:毛细管色谱柱 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);载气为高纯氦气;进样口温度 280℃;分流比为 20:1;色谱柱流量 1.0 mL/min;升温程序为初始温度 50℃,以 10℃/min 升至 250℃,然后以 35℃/min 升至 300℃,保持 10 min。

(2) 质谱条件:电子轰击(EI)电离源;电子能量 70 eV;传输线温度 300℃;离子源温度 230℃;溶剂延迟 1.5 min;质量扫描范围 33~450 amu;扫描方式为全扫描。

1.2.4 热重分析 样品分析前,设置热重分析仪在 800℃条件下保持 10 min,以使炉体内杂质排净。分别称取(5.00±0.05) mg 加热不燃烧卷烟烟草材料置于热重坩埚内进行测试。升温程序为初始温度 30℃,升温速率 20℃/min,升至 800℃,保持 10 min;空气流量 50 mL/min。

1.3 数据处理

1.3.1 化学成分 烟草材料的含水率、丙二醇和甘油、烟碱含量,按照 1.2.1 方法测定,平行测定 5 次,取平均值作为检测结果,计算 RSD 值。

1.3.2 热裂解分析 4 种 HNB 烟草材料分别进行 8 步程序升温裂解,产生的热裂解成分由 NIST11 数据库对照标准谱图进行检索定性,以组分峰面积响应值加和作为定量依据,用色谱峰面积归一化法计算各成分的相对含量,平行测定 5 次,取平均值。

1.3.3 热重分析 在 Origin 8.0 软件中对样品的 DTG 曲线进行分峰处理,通过 DTG 曲线上的拐点确定峰的位置和个数,对应 TG 曲线得到各时间点的热重质量,按式(1)计算热重损失率。

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

α ——热重损失率,%;

m_0 ——样品初始质量,mg;

m —— T 时的样品质量,mg;

m_∞ ——残留样品质量,mg。

2 结果与讨论

2.1 物理特性分析

将 4 种烟草材料分别放入水中搅拌,样品 A、B 中几乎观察不到明显的纤维状,样品 D 中有较多纤维,样品 C

呈片状几乎不溶于水。说明辊压法和稠浆法烟草材料中纤维添加量少;造纸法和干法烟草材料中纤维添加量多。

如表 1 所示,不同方法制备的再造烟叶物理特性有较大差异,其主要原因是:辊压法工艺经高机械强度挤压后,结构致密,填充值低;稠浆法可直接利用烟叶原料中的原生纤维及果胶成型,未经机械挤压,疏松度、柔韧性较好,密度居中;而造纸法工艺外加纤维多,抄造过程中负压抽走多余水分,表面褶皱,具有密度小,弹性好,填充值高,结构疏松、柔软多孔等特点^[11],组织结构更接近原生烟叶。干法再造烟叶利用软辊成型工艺,其平整度较造纸法再造烟叶好,厚度和填充值均高于造纸法再造烟叶。传统卷烟目前普遍使用结构较为蓬松的造纸法再造烟叶作为填充料,与之相比,HNB 烟草材料可选用的再造烟叶种类更多。

表 2 4 种加热不燃烧卷烟烟草材料中的化学成分

Table 2 Chemical composition for four types of heat-not-burn cigarette tobacco materials ($n=5$)

样品	含水率/%		丙二醇含量		甘油含量		烟碱含量	
	平均值	RSD	平均值/(mg·g ⁻¹)	RSD/%	平均值/(mg·g ⁻¹)	RSD/%	平均值/(mg·g ⁻¹)	RSD/%
A	11.90	0.82	2.58	0.42	215.80	0.26	10.24	0.62
B	11.79	0.79	3.18	0.44	152.12	0.17	13.56	0.57
C	10.52	0.43	3.37	0.63	113.70	0.37	6.68	0.86
D	11.86	0.62	19.45	0.86	196.20	0.23	8.82	0.61

由表 2 可知,辊压法、稠浆法、造纸法、干法 4 种加热不燃烧卷烟烟草材料的含水率差异不大,烟碱含量为 6.68~13.56 mg/g。丙二醇和甘油作为加热不燃烧卷烟的发烟剂使用,都具有促进烟草在加热状态下释放烟气的作用^[12]。4 种加热不燃烧卷烟制品中的甘油含量明显高于丙二醇,且远远高于传统卷烟。甘油作为 HNB 的主要发烟剂,受热后与烟草原料中的香味成分和烟碱发生气化,形成气溶胶,可强化烟气中烟草香味特征并保持稳定,提高抽吸的感官质量^[13]。而传统卷烟燃烧后形成固态烟雾颗粒,抽吸时有颗粒感、滞涩感、干刺感,舒适性不及 HNB 卷烟。

由于在 HNB 卷烟材料加工过程中,甘油、丙二醇等亲水物质暴露在环境中更易吸潮,因此烟草材料中的含水率与甘油、丙二醇等多元醇含量呈紧密正相关。烟草材料中的烟碱主要来源于选用的烟叶原料及外加烟碱。样品 A、B 的烟碱含量明显高于样品 C、D,可能是由 4 种烟草材料制造工艺的附香形式差异导致的,辊压法和稠浆法是在烟草原料混合过程中加香且香料添加量高;造纸法是通过基片涂布方式附香、干法是线上附香,载香量相对较少。

2.3 热裂解分析

对于加热不燃烧烟草制品,为了防止加热温度过高

2.2 化学成分分析

4 种加热不燃烧卷烟材料的含水率、丙二醇、甘油及烟碱含量测定结果见表 2。

表 1 不同再造烟叶物理特性的比较

Table 1 Comparison of physical characteristics of reconstituted tobacco prepared by different methods

样品	定量/ (g·m ⁻²)	厚度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	填充值/ (cm ³ ·g ⁻¹)
A	100~158	0.14~0.20	0.85~1.20	2.5~4.0
B	70~120	0.17~0.20	0.49~0.95	2.5~4.5
C	90~110	0.13~0.17	0.25~0.50	5.0~8.5
D	85~105	0.15~0.20	0.20~0.45	5.9~10.0

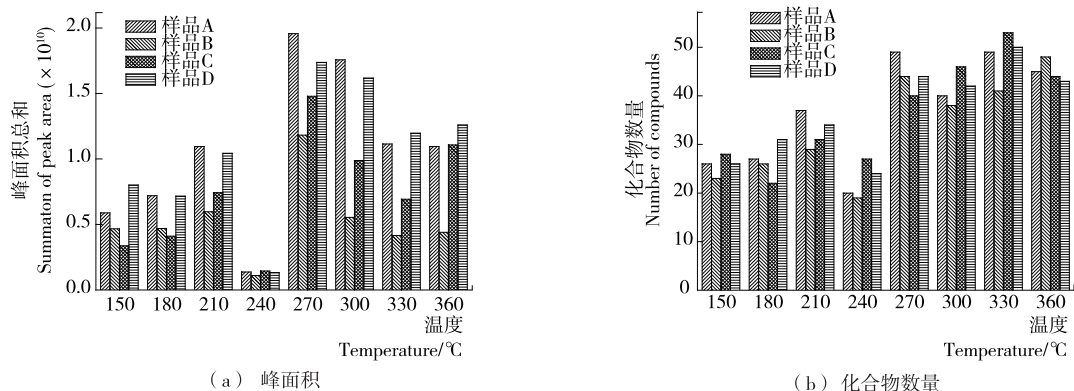
而发生燃烧,一般温度控制在 350 ℃ 以下^[14],为此模拟了 4 种加热不燃烧卷烟制品从 120~360 ℃ 的加热过程中裂解所释放的物质。使用程序升温进行分段模拟的裂解方式避免了本该通过蒸馏方式进入烟气中的组分被再次裂解的情况,符合烟草抽吸过程中既存在蒸馏也存在裂解的实际情况^[15]。

升温初始阶段,样品裂解香气成分释放总量随着温度的升高呈现先升高再降低,在 270 ℃ 达到峰值后又降低的趋势;裂解香气成分释放种类也呈现先增多后减少,再增多后趋于稳定(如图 1)。这可能是 250 ℃ 以下裂解物质生成量极少,主要为外加的挥发性物质的蒸馏;250 ℃ 以后裂解物质逐渐出现。与传统卷烟不同,HNB 材料整个裂解过程中均未检测出稠环芳烃,说明加热不燃烧卷烟材料在使用温度区间仅发生了较低程度的热裂解^[16],潜在有害物质生成量极少。

加热不燃烧卷烟的抽吸温度对主产物及其相对含量有很大影响:烟碱传递主要集中在升温初始阶段,且在 240 ℃ 达到最大。丙二醇主要出现在升温初始阶段并接近完全释放。甘油的释放比例随着温度的升高呈现逐渐升高后降低,在 270 ℃ 达到峰值后缓慢降低的趋势;与挥发性成分释放总量随温度的变化规律一致。丙二醇和甘油分别在不同阶段呈现最大释放量,可见其合适的添加

量控制着整个温度变化过程中烟雾的稳定释放。裂解前阶段乙酸的释放量较低,210 °C 以后乙酸的释放比例明显增多,可能与材料中的一些小分子糖类的裂解有关。图 2 为 4 种烟草材料的主要成分随温度的变化曲线。裂解产物有小分子醛、酮、醇及酚类出现,且相对含量随裂解温

度的升高逐渐增加。4 种烟草材料都含有茄酮、巨豆三烯酮等烟草特征的致香成分^[7],以及吡喃酮、糠醛、糠醇、呋喃酮等化合物,正是这些化合物赋予了裂解产物以烘焙、焦甜香韵^[17]。由于使用原料的差异,各样品的香气成分也各有特点:香兰素、乙基香兰素等香草香物质为样品 C

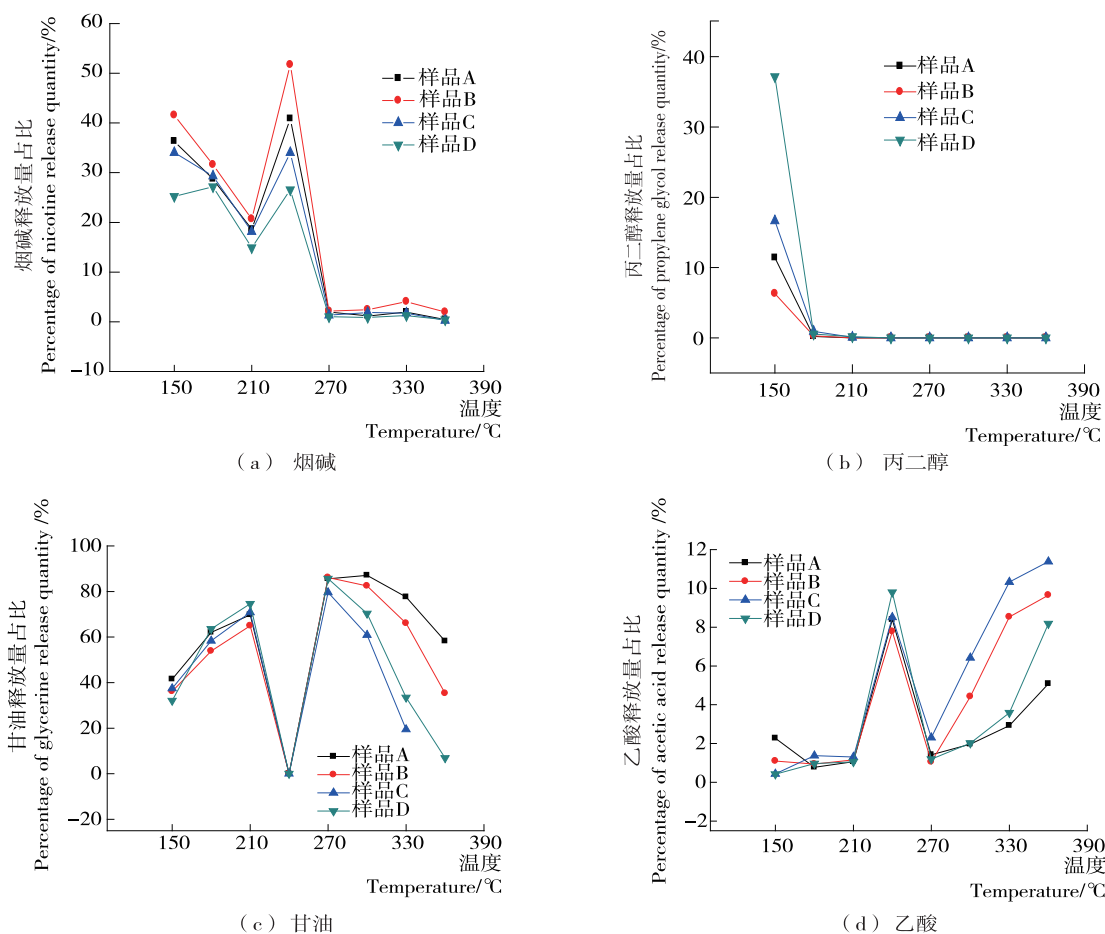


(a) 峰面积

(b) 化合物数量

图 1 4 种 HNB 烟草材料在不同温度下的裂解情况

Figure 1 Cracking of four HNB tobacco materials at different temperatures



(a) 烟碱

(b) 丙二醇

(c) 甘油

(d) 乙酸

图 2 烟草材料的主要成分随温度的变化曲线

Figure 2 Temperature-dependent curves of main components in tobacco material

特有;样品 D 中呋喃酮、甲基环戊烯醇酮、乙基环戊烯醇酮、甲基麦芽酚等焦甜香、坚果香较突出;样品 B 中乙酸异丙烯酯、丙烯酸烯丙酯^[18]等果香类物质及愈创木酚、乙基愈创木酚等烟熏香物质^[19]总含量均高于其余 3 种材料。

由于卷烟材料的制备工艺不同、烟草香原料不同导致不同加热不燃烧卷烟裂解成分有一定差异:样品 C(造纸法)中保润剂(丙二醇、甘油)的添加量最低,加上其衰减较快的特点,在裂解后阶段(300~360 °C),甘油的释放浓度已明显低于其他材料;样品 D(干法)比其他样品中加有更多的丙二醇,但在 120~150 °C 已基本释放完全,可能是干法制作的烟草材料材质疏松,保润剂过快消耗。样品 A(辊压法)、B(稠浆法)中甘油的释放比例到后期还保持有较高释放浓度,除了其本身甘油添加量相对较高外,还与其制作工艺导致的材质相对紧密有关。

2.4 热重分析

图 3~5 分别为 4 个加热不燃烧卷烟烟草材料的热重(TG)、微商热重(DTG)和差热分析(DSC)曲线。

从 TG/DSC 曲线可知,4 个加热不燃烧卷烟烟草材料的热失重都分为 4 个阶段:52~122 °C 失重 4.0%~4.52%,

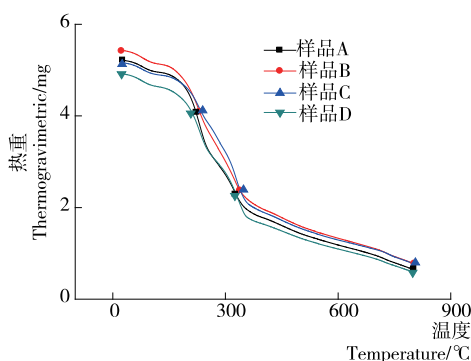


图 3 4 种加热不燃烧卷烟烟草材料的热重曲线

Figure 3 TG curves of four types of heat-not-burn cigarette tobacco materials

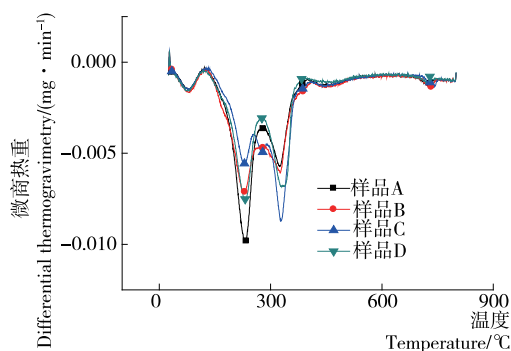


图 4 4 种加热不燃烧卷烟烟草材料的微商热重曲线

Figure 4 DTG curves of four types of heat-not-burn cigarette tobacco materials

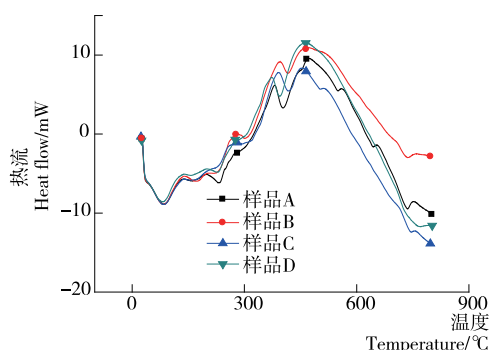


图 5 4 种加热不燃烧卷烟烟草材料的差热分析曲线

Figure 5 DSC curves of four types of heat-not-burn cigarette tobacco materials

122~282 °C 失重 28.55%~35.94%, 282~650 °C 失重 36.69%~40.95%, 650~800 °C 失重 7.05%~9.16%, 可见第 2、第 3 阶段为主要失重阶段,对应的 DSC 曲线分别呈现 1 个较小的吸热峰和 2 个较大的放热峰。大致可以判断 4 个失重阶段分别为水分的挥发,保润剂失重,挥发性物质受热分解以及纤维素、单糖和其他一些小分子物质因热裂解^[20],大分子物质及残留物进一步热解和碳化的过程。

从横向上来看,不同加热不燃烧卷烟样品的热失重情况存在一定差异:样品 C 的第 2 个失重峰相对较小,而第 2 个失重阶段主要为甘油保润剂的失重^[21],与 C 样品中甘油的添加量最少有关。样品 A、B 的第 3 个失重峰相对较小,表明两者中高沸点化合物或纤维素含量较低,与其制备工艺中纤维素添加量少有关。样品 C、D 的第 3 个失重峰显得相对大而尖锐,说明此时样品衰减较快,与其纤维素含量高,纤维素在此时大量分解有关。与传统卷烟燃吸相比,HNB 卷烟可以调控加热温度在 280 °C 以内,保证致香物质的合理挥发与裂解,以达到丰富香气、延缓衰减并降低纤维素、糖类物质因热裂解产生的杂气的程度。

几种加热不燃烧卷烟都存在随着抽吸口数增加,香气、劲头及烟雾量逐渐衰减的情况。其中样品 A 香气丰富性尚可,持续性较好,衰减缓和;样品 B 前段烟香丰富性较好,无明显衰减;样品 C 香气较单调,烟香不足;样品 D 烟香明显,香气丰富性一般。究其原因可能是辊压法和稠浆法样品材质较为紧密,烟草原料负载量大,香气较丰富且衰减慢;而干法和造纸法的样品材质较为疏松衰减快,负载量小的缘故。

3 结论

研究分别从物理特性、化学成分分析、热裂解分析及热重分析等方面对造纸法、干法、稠浆法、辊压法烟草材料制备的 4 种烟草原味的加热不燃烧卷烟样品进行了剖

析。结果表明:4 种工艺制备的烟草材料的纤维含量不同、结构致密度也不尽相同。不同烟草材料间的化学成分差异不大,但保润剂(甘油、丙二醇)含量远远高于传统卷烟。烟草材料的热分析研究表明烟草材料的香气释放量在 270 ℃时达到峰值,可作为加热不燃烧卷烟器械温度设计的参考。

试验发现,适当增加加热不燃烧卷烟烟草材料的紧密度,优化赋香形式,可以提高烟草原料的负载量,减缓加热不燃烧卷烟在抽吸过程中的香气衰减,后续将对此进行深入研究。

参考文献

- [1] SIMONAVICIUS E, MCNEILL A, SHAHAB L, et al. Heat-not-burn tobacco products: A systematic literature review[J]. Tob Control, 2018, DOI: 10.1136/tobaccocontrol-2018-054419.
- [2] BROSE L S, SIMONAVICIUS E, CHEESEMAN H. Awareness and use of 'heat-not-burn' tobacco products in great britain[J]. Tob Regul Sci, 2018, 4(2): 44-50.
- [3] 朱浩, 席辉, 柴国壁, 等. 温度对加热非燃烧卷烟烟熏香成分释放的影响[J]. 烟草科技, 2017, 50(11): 33-38.
- [4] HUGHES J R, KEELY J P. The effect of a novel smoking system-accord-on ongoing smoking and toxin exposure[J]. Nicotine & Tobacco Research, 2004, 6: 1 021-1 027.
- [5] 艾思. 非传统烟草制品初探[J]. 中国烟草, 2013(5): 59.
- [6] WERLEY M S, FREELIN S A, WRENN S E, et al. Smoke chemistry, invitro and in vivo toxicology evaluations of the electrically heated cigarette smoking system series[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 52: 122-139.
- [7] 刘珊, 崔凯, 曾世通, 等. 加热非燃烧型烟草制品剖析[J]. 烟草科技, 2016, 49(11): 56-65.
- [8] 杨继, 杨帅, 段沉杏, 等. 加热不燃烧卷烟烟草材料的热分析研究[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(6): 7-13.
- [9] 戴路, 陶丰, 袁凯龙, 等. 造纸法再造烟叶的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2013, 28(1): 65-69.
- [10] 马鹏飞, 李巧灵, 林凯, 等. 加热非燃烧烟草薄片的热解特征研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 71-74.
- [11] 况志敏, 刘建平, 王茜茜. 造纸法再造烟叶发展综述[J]. 纸和造纸, 2018, 37(6): 26-31.
- [12] 唐培培. 烟叶原料加热非燃烧状态下释放烟气特征研究[D]. 郑州: 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2015: 79-84.
- [13] 杨继, 汤建国, 尚善斋, 等. 利用顶空-GC/MS 法对比新型卷烟和传统卷烟的挥发性成分[J]. 烟草科技, 2015, 48(11): 33-39.
- [14] 李巧灵, 刘江生, 邓小华, 等. 烟草热解燃烧过程香味成分的释放变化[J]. 烟草科技, 2014(11): 62-66.
- [15] 孔浩辉, 郭璇华, 沈光林. 卷烟烟丝热裂解产物香味成分分析[J]. 烟草科技, 2009(5): 38-43.
- [16] 戴路, 史春云, 卢昕博, 等. 加热不燃烧制品与传统卷烟再造烟叶物理特性及化学成分差异分析[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(1): 20-26.
- [17] 霍现宽, 刘珊, 崔凯, 等. 加热状态下烟草烟气香味成分释放特征[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 37-45.
- [18] 谢剑平. 烟草香原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 262, 290.
- [19] MAGA J A. Contribution of phenolic compounds to smoke flavor[C]// Phenolic compounds in food and their effects on health I ACS Symposium Series. Washington DC: American Chemical Society, 1992: 170-179.
- [20] 杨继, 赵伟, 杨柳, 等. "Eclipse"卷烟的热重/差热分析[J]. 化学研究与应用, 2015(5): 560-565.
- [21] 唐培培, 曾世通, 刘珊, 等. 甘油对烟叶热性能及加热状态下烟气释放的影响[J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 61-65.
- [22] 麦润萍, 冯银杏, 李汴生. 基于分形理论的预冻温度对冻干猕猴桃片干燥特性及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(12): 159-164, 169.
- [23] HUANG Lue-lue, ZHANG Min, MUJUMDAR A S, et al. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 279-284.
- [24] CUI Zheng-wei, XU Shi-ying, SUN Da-wen. Microwave vacuum drying kinetics of carrot slices[J]. J Food Eng, 2004, 65: 157-164.
- [25] 肖鑫, 陶乐仁, 顾茜皎. 冻干草莓内部孔隙率的分布及其影响的实验研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(2): 66-69.
- [26] JIANG Ning, LIU Chun-quan, LI Da-jiang, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 216-226.
- [27] WITROWA-RAJCHERT D, RZA M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples[J]. Drying Technology, 2009, 27(7): 903-909.
- [28] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 基于温度梯度的带壳鲜花生热风干燥收缩模型研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 148-154.
- [29] 许冰洋, 朱文魁, 潘广乐, 等. 基于收缩特性分析的叶丝快速对流干燥动力学模型[J]. 烟草科技, 2015, 48(9): 69-74.
- [30] 陈良元, 韩李锋, 李旭, 等. 茄子片热风干燥收缩特性及其修正的湿分扩散动力学模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 275-281.
- [31] 韦玉龙, 于宁, 陈恺, 等. 热风干制对红枣收缩特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22): 114-118, 123.

(上接第 145 页)