



赵金科,崔华鹏,徐海涛,等. 周向型加热卷烟烟芯段逐口热解过程的空间表征[J]. 轻工学报,2026,41(5):132-142.
Zhao J K, Cui H P, Xu H T, et al. Study on the spatial characterization of the puff-by-puff pyrolysis process in circumferentially heated cigarette core segments[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(5):132-142.
DOI: 10. 12187/2026. 05. 012

周向型加热卷烟烟芯段逐口热解过程的空间表征

赵金科¹, 崔华鹏¹, 徐海涛², 秦亚琼¹, 陈业娴³, 刘雨¹, 刘瑞红¹, 刘绍锋¹

1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 河南 郑州 450001;
2. 山东中烟工业有限责任公司 技术中心, 山东 济南 250100;
3. 四川三联新材料有限公司, 四川 成都 610000

摘要:【目的】探究周向型加热卷烟逐口抽吸过程中不同部位烟芯材料的热解过程。【方法】以逐口抽吸后的加热卷烟烟芯材料为原料,采用自研空间分离方法,将其从空间上分离为 9 个不同部位,并采用热重分析仪和氢火焰离子化质谱(GC-FID)进行分析,考查逐口抽吸后不同部位烟芯材料的理化特性差异。【结果】逐口抽吸过程中烟芯的炭化区域随抽吸口数增加,由中后段外层逐步向内层、前段扩散,最终抽吸段结束时烟芯整体发生明显炭化。烟芯材料的热解过程可分为 4 个阶段,其中阶段Ⅱ为主要的热失重阶段,对应热失重温度区间为 209~415℃,DTG 曲线上峰 A 主要由烟芯材料中甘油、烟碱和 1,2-丙二醇等化学成分的受热释放所引起。随抽吸口数增加,相同部位烟芯材料 DTG 曲线峰 A 的最大质量损失速率整体上呈降低趋势;第 5 口抽吸后,不同部位烟芯材料 DTG 曲线峰 A 的最大质量损失速率呈现径向上按前内、前中、前外和轴向上前内、后内、中内顺序由大到小的变化趋势。逐口抽吸过程中,甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟芯材料中的总残留量逐口降低;抽吸结束后,这 3 种成分在烟芯材料中的总残留量分别为初始含量的 21.90%,2.98%和 0.31%。逐口抽吸过程中,甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟芯材料中的残留量在径向上均呈现按内层、中层、外层顺序由大到小的分布,在轴向上由大到小的顺序由前段、中段、后段变为前段、后段、中段的分布。【结论】不同化合物在烟芯材料中残留量的逐口变化情况与其热解特性相一致,其在烟芯材料的空间分布情况受到温度和其沸点的影响。

关键词:加热卷烟;热重分析;GC-FID;空间表征

中图分类号:TS411.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2026)05-0132-11

0 引言

加热卷烟是通过加热元件对烟草材料进行低

温加热,产生气溶胶供消费者抽吸的一种新型烟草制品,其特点是加热而不发生燃烧,所释放的有害成分相比于传统卷烟明显降低^[1-4]。加热卷烟的加

收稿日期:2024-11-12;修回日期:2024-12-10;出版日期:2026-10-15

基金项目:国家烟草专卖局科技重大专项项目(110202101074(XX-19));中国烟草总公司烟草行业标准预研项目(2023QB008);山东中烟工业有限责任公司科技项目(20230216);四川三联新材料有限公司科技项目(2021510107340227)

作者简介:赵金科(2000—),男,河南省周口市人,中国烟草总公司郑州烟草研究院硕士研究生,主要研究方向为烟草化学。

E-mail: zjk325@126.com

通信作者:刘绍锋(1979—),男,福建省三明市人,中国烟草总公司郑州烟草研究院研究员,主要研究方向为烟草化学。

E-mail: sfliu@126.com

热方式多样,中心型和周向型电加热方式发展较为成熟,代表性产品有菲莫国际烟草公司的 IQOS 系列和英美烟草公司的 Glo 系列。不同于传统卷烟每口抽吸会燃烧相近量的烟丝,加热卷烟是对烟芯段进行持续加热,热解过程中各化学成分的释放趋势存在差异,易造成加热卷烟逐口气溶胶的释放不稳定^[5-6],影响其感官品质。

通常认为,加热方式、区域和温度是影响加热卷烟气溶胶逐口释放的关键因素^[7-8],目前较多研究集中于加热卷烟的加热条件和化学成分释放方面。例如,研究者利用热电偶阵列对中心型加热烟支的温度场分布进行了表征,发现高温区域均分布在加热片周围^[9-11]。肖卫强等^[12]对周向型加热卷烟的烟支温度场分布进行模拟,发现温度由烟支外部至内部逐渐降低。研究表明^[10,13-15],温度对加热卷烟烟草材料化学成分的释放过程有重要影响,通常随加热温度的升高,烟草材料释放的化学成分种类和释放量均明显增加。中心型加热烟芯材料温度由内向外辐射,气溶胶化学成分逐口释放稳定性相对较好,而周向型烟芯材料温度由外到内辐射,气溶胶化学成分释放相对集中,稳定性较差。龚淑果等^[5]研究表明,周向型加热卷烟气溶胶主要成分逐口释放的稳定性不及内加热型。因此,周向型加热是现有加热卷烟的重要加热方式,了解该类型产品在逐口抽吸过程中不同部位烟芯材料的热解行为,对提升其感官品质具有重要影响。

鉴于此,本文拟以周向型加热卷烟为研究对象,利用自制的烟芯材料分离装置,将周向型加热卷烟烟芯材料分离成 9 部分,分别采用热重分析仪和氢火焰离子化质谱(GC-FID)对不同部位的烟芯材料进行分析,考查加热卷烟抽吸过程中烟芯材料的热失重差异和残留的主要化学成分的空间分布,以期实现调控加热卷烟化学成分的稳定释放。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂和仪器

周向型加热卷烟及烟具为境外上市电加热卷烟产品,加热卷烟的烟支长度为 48 mm(14 mm 烟芯段+10 mm 空腔段+17 mm 膜纸降温材料+7 mm 醋纤滤嘴),圆周长为 23 mm。加热筒长度为 12 mm,加

热方式为均匀加热,加热温度在 30 s 内由室温升至 260 ℃,并保持恒定。加热筒与卷烟烟支的组合如图 1 所示。

烟碱标准品(纯度 $\geq 99\%$),国家烟草质量监督检验中心;1,2-丙二醇(AR),天津市大茂化学试剂厂;甘油(AR),天津市富宇精细化工有限公司;甲醇(梯度纯),德国 Merck 股份两合公司;1,3-丁二醇(内标,高纯),美国 Acros Organics 公司;2-甲基喹啉(内标,梯度纯),希爱上海化成工业发展有限公司。

SM100 型单孔道吸烟机,郑州嘉德机电科技有限公司;CP2245 型电子天平(感量 0.000 1 g),德国 Sartorius 公司;莱驰 MM400 型混合冷冻球磨仪,德国 Retsch 公司;Dispensette® S Organic, Digital, 5~50 ml with recirculation valve 瓶口分液器,德国 Brand 公司;Multipette® E3/E3x 型电动移液器,德国 Eppendorf 公司;Multifuge X4 Pro 型离心机,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;SCAA-104 型有机相针式滤器(尼龙)(13 mm $\times$ 0.22 μ m),上海安谱实验科技股份有限公司;6890 型气相色谱仪(配备有 FID 检测器),美国 Agilent 公司;TGA 550 型热重分析仪,美国 TA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 加热卷烟抽吸 采用逐口吸烟机,以 HCl 模式对加热卷烟进行逐口抽吸,即抽吸容量为 55 mL,每口抽吸持续时间为 2 s,抽吸频率为每 30 s 抽吸 1 口,设定抽吸口数为 8 口。

1.2.2 烟芯材料分离 先用刀具将烟芯段沿径向切割成 3 等份,再利用自制的分层装置(见图 2a))将每份烟芯段按照图 2b)所示进行同轴分层。其

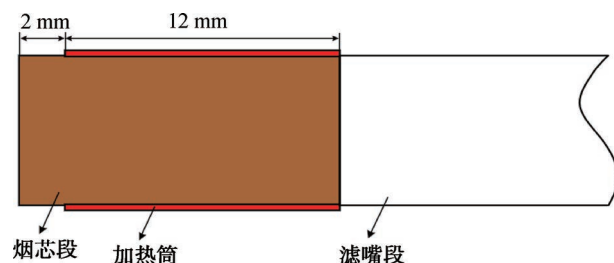


图 1 加热筒与卷烟烟支的组合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the assembly of a cartridge heater and a cigarette

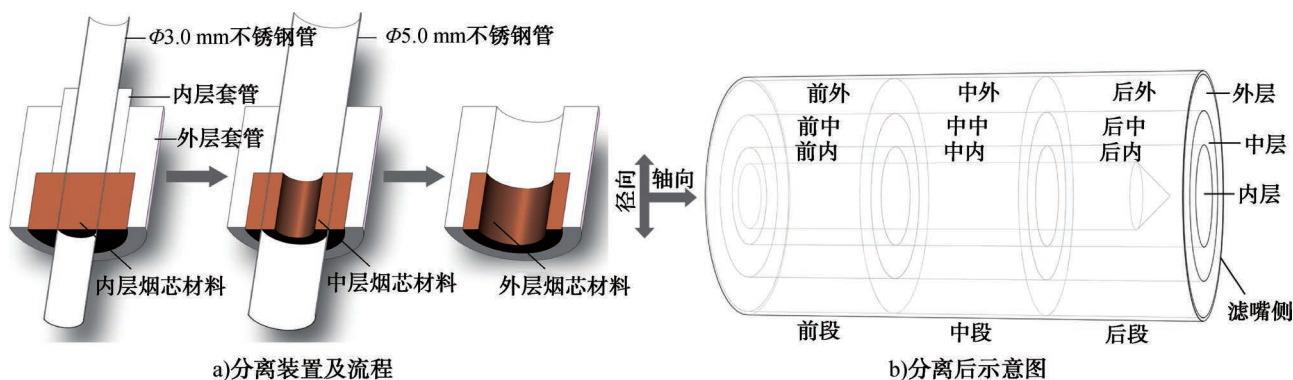


图 2 烟芯材料分离装置及分离示意图

Fig. 2 Cigarette core material separation device and schematic diagram of the separation procedure

中,分层装置由两个套管和两个直径不同的不锈钢管(直径分别为 3.0 mm、5.0 mm;壁厚 0.1 mm,长 25.0 mm)构成。分层时按照图 2a)所示,先将被切割后的烟芯段放入外层套管内,由 3.0 mm 不锈钢管分离得到内层烟芯材料;再取出内层套管,由 5.0 mm 不锈钢管分离得到中层烟芯材料;最后,取出剩余的外层烟芯材料。最终,将烟芯材料分离成前内、中内、后内、前中、中中、后中、前外、中外和后外 9 部分,将分离得到的各部分烟芯材料萃取后进行 GC-FID 分析。

1.2.3 热重分析 选取未加热抽吸(0 口)和抽吸口数分别为 2 口、5 口和 8 口的烟支烟芯,按照 1.2.2 所述方法将其分离成 9 部分,选取其中 5 个代表性部分:前内、中内、后内、前中和前外,作为不同抽吸口数和部位的实验样品。热重分析时,需对每个样品进行粉碎和充分混合,称取约 6 mg 放入铂金坩埚中,在 60 mL/min 流量的 N_2 氛围中升温加热,升温程序为由室温平衡到 30 $^{\circ}C$,再以 20 $^{\circ}C$ /min 的速率升温至 800 $^{\circ}C$ 。按照上述方法分别开展针对同一部位样品在不同抽吸口数下热解特性差异及抽吸口数为 5 口时不同部位样品热解特性差异的实验。TG-DTG 曲线的绘制方法:以加热温度($\theta/^{\circ}C$)为横坐标, TG 曲线以样品的质量变化率($w/\%$)为纵坐标, DTG 曲线以样品的质量变化率与时间的微商($(dw/dt)/(\% \cdot min^{-1})$)为纵坐标,绘制 TG-DTG 曲线。

1.2.4 甘油、烟碱和 1,2-丙二醇残留量测定 以未被加热的卷烟各部分烟芯材料原始质量为基准,采用 1 g 烟芯材料中目标化合物的质量(mg/g)来表

示抽吸过程中甘油、烟碱及 1,2-丙二醇的残留量。烟支经逐口抽吸后,选取同一抽吸口数序号的 5 个烟支进行分离,将相同部分汇总放入 15 mL 离心管中,加入 5 mL 甲醇,再分别加入质量浓度 0.5 mg/mL 的 1,3-丁二醇和 0.2 mg/mL 的 2-甲基喹啉混合内标溶液 100 μL ,球磨 10 min,离心 3 min,取上层萃取液过 0.22 μm 有机滤膜至色谱瓶中,参照文献[16]的方法进行 GC-FID 分析,重复测定 2 次,结果取平均值。

1.3 数据处理

采用 Origin 2021 绘图;基于 Matlab (2022b) 软件编写程序,并采用 griddata 命令调用 Linear 方法对数据进行插值处理,获得主要残留成分在烟芯段空间分布图。

2 结果与分析

2.1 烟芯材料逐口炭化过程分析

逐口抽吸过程中不同抽吸口数对应烟支烟芯段纵切面视图如图 3 所示。由图 3 可知,同初始状态相比,第 1 口抽吸后的烟芯材料颜色基本未发生变化,生物质炭化的程度与其颜色深浅相对应^[17],即此时烟芯材料还未发生明显的炭化,这可能是由于炭化温度对生物质炭化过程具有重要影响^[18],故此时烟芯材料内部温度较低;第 2 口抽吸后烟支中后段区域的外层烟芯材料颜色逐渐变为黑色,表明此时发生了明显的炭化,但烟芯前端区域烟芯材料未发生炭化,这是因为加热筒只覆盖至烟芯前端 2 mm 处(图 1),导致该区域烟芯材料温度较低;从第 3 口开始黑色区域向烟支内部扩散,中层和内层

烟芯材料也逐渐开始炭化,并且部分前段的外层区域烟芯材料也发生了炭化,这是因为热量由烟芯材料外层逐渐向中层和内层扩散,并由中后段向前段扩散,导致这些区域的烟芯材料开始炭化;随着加热的持续,炭化区域由外层向内层逐渐扩大,并且各个部位的炭化程度不断增加,至抽吸结束,烟芯材料基本都发生了较为明显的炭化。

2.2 烟芯材料热解特性分析

2.2.1 同一部位不同抽吸口数对应烟芯材料热解特性分析 以烟芯中内部位为例,未加热抽吸(0口)和抽吸口数为2口、5口和8口时烟芯材料的TG-DTG曲线如图4所示。整个热解过程可被划分为4个阶段(I—IV)^[19-20],由图4可知,阶段I(30~209℃)中峰A出现在100~209℃的温度区间,由于加热卷烟中添加了大量由甘油和丙二醇组成的发烟剂,因而峰A所代表的质量损失可归因于烟芯材料中的内源性化合物^[21-22]及外源性化合物的受热释放,例如甘油、烟碱、丙二醇等;阶段II(209~415℃)是烟芯材料的主要热失重阶段,在该阶段有两个明显的失重峰B和C,其中峰B出现在260℃附近,主要由半纤维素的热解形成,峰C出现在310℃左右,主要由纤维素的热解形成^[21,23-24];阶段III(415~650℃)没有出现明显的失重峰,可以归结为木质素的热解及炭化过程^[25];阶段IV(650~800℃)主要是烟芯材料中内源性无机化合物的分

解及炭的脱氢和芳香化过程^[26]。

阶段I中峰A的最大质量损失速率因抽吸口数不同存在明显差异,其中未抽吸和第2口的最大质量损失速率相接近,均明显大于第5口和第8口。这可能是因为周向型加热卷烟的温度由烟支外层至内层逐渐降低,加热前期的中内部分烟芯材料尚未被有效加热,使其热失重特性与未加热前差异较小。随着抽吸过程的持续,烟支内部不同区域温差逐渐降低,越来越多的化学成分在气流作用下形成气溶胶被释放,因而第5口抽吸后峰A的最大质量损失速率表现为进一步下降,第8口抽吸结束后阶段I中已没有明显的失重峰,这可能是因为此时烟芯材料中大部分易挥发化学成分都已发生热解释放。

2.2.2 同一抽吸口数对应不同烟芯部位材料热解特性分析 以第5口为例,考查加热卷烟的前内、前中、前外、中内和后内5个部位烟芯材料的热解特性差异,其TG-DTG曲线如图5所示。由图5a)可知,径向上3个样品峰A的最大质量损失速率顺序为前内>前中>前外,这可能是由于3个样品分布在热源的不同径向距离上,外层烟芯材料所受温度较高,其甘油、烟碱及1,2-丙二醇等化合物不仅有向内层扩散的趋势,而且随抽吸气流流动损失也较多,最终在DTG曲线上体现出差异性。由图5b)可知,轴向上3个样品峰A的最大质量损失速率顺序



图3 不同抽吸口数对应烟支烟芯段纵切面视图
Fig.3 Longitudinal views of cigarette core segments at different puff numbers

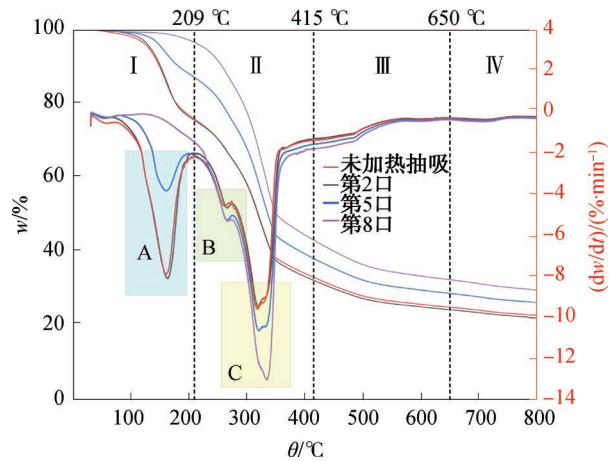


图4 未加热抽吸和抽吸口数为2口、5口和8口时中内部分烟芯材料的TG-DTG曲线
Fig.4 TG and DTG curves of the middle-inner part of cigarette core materials without heating and at puff numbers 2, 5, and 8

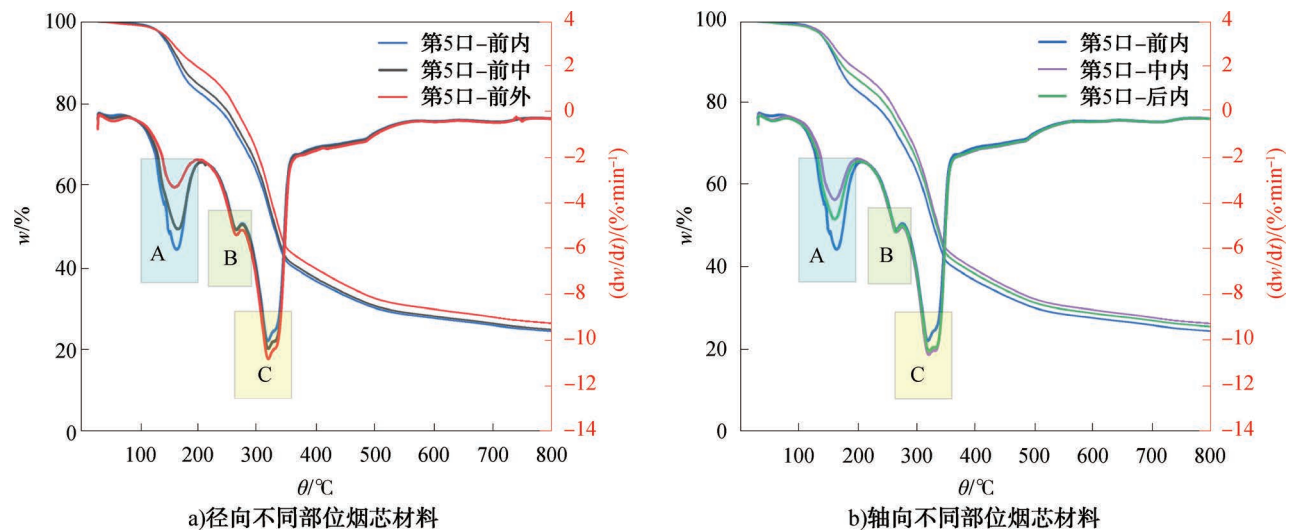


图 5 抽吸口序号为 5 口时不同部位烟芯材料的 TG-DTG 曲线

Fig. 5 TG and DTG curves of cigarette core materials at different positions at puff numbers

为前内>后内>中内,分析认为在周期性抽吸过程中,后段烟芯材料对来自前中段烟芯材料的化学成分存在截留作用,经前 5 口的抽吸后,相当一部分化学成分被释放,此时截留作用导致后内部位的化学成分残留量高于中内部位。此外,由于加热筒并未完全覆盖烟芯材料的前段(图 1),导致前内部位烟芯材料中始终含有较高含量的化学成分,最终在 DTG 曲线上体现出差异性。

2.3 甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟支中的动态空间分布分析

2.3.1 烟芯材料中甘油、烟碱和 1,2-丙二醇总残留量的逐口变化分析 不同抽吸口数对应烟芯材料中化学成分残留量的变化趋势如图 6 所示,其中以未经过抽吸的卷烟中各化学成分的原始含量为基准对数据进行了归一化处理。由图 6 可知,整体上,3 种化学成分残留量随着抽吸口数的增加呈逐渐降低趋势,与先前相关研究一致^[5,10,14-15,27],这是因为加热器的持续加热及周期性的抽吸气流,导致释放出的成分不断被带走,从而在整体上呈现烟芯材料中化学成分残留量的逐口降低。

随抽吸口数增加,1,2-丙二醇残留量下降速度最快,第 1 口抽吸结束其残留量为初始含量的 75.80%,第 8 口抽吸结束只剩下 0.31%,而烟碱和甘油第 8 口抽吸结束其残留量分别为初始含量的 2.98%和 21.90%。烟芯材料中 3 种化学成分残留

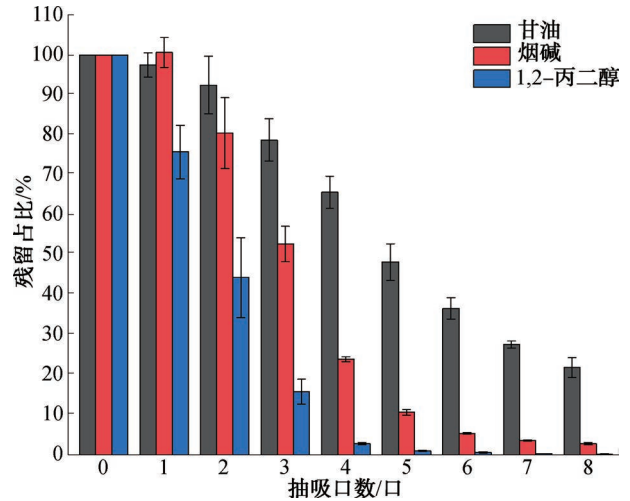


图 6 不同抽吸口数对应烟芯材料中化学成分残留量的变化趋势

Fig. 6 Trends in chemical component residues in cigarette core materials at different puff numbers

量在抽吸过程中降低速率存在明显差异,3 种化学成分沸点大小顺序为 1,2-丙二醇<烟碱<甘油,沸点的大小顺序与其残留量的降低速率相对应,表明化学成分沸点影响着烟芯材料化学成分的热释放过程,这与张璟等^[11]的研究相一致。

2.3.2 不同维度烟芯材料中甘油、烟碱和 1,2-丙二醇残留量的逐口变化分析 从烟芯材料不同维度观察其化学成分残留量的逐口变化,能够直观描述其化学成分释放的动态变化过程。烟支径向上 3 种化合物残留量的逐口变化趋势如图 7 所示,将每层的前段、中段及后段化合物残留量进行加和得到

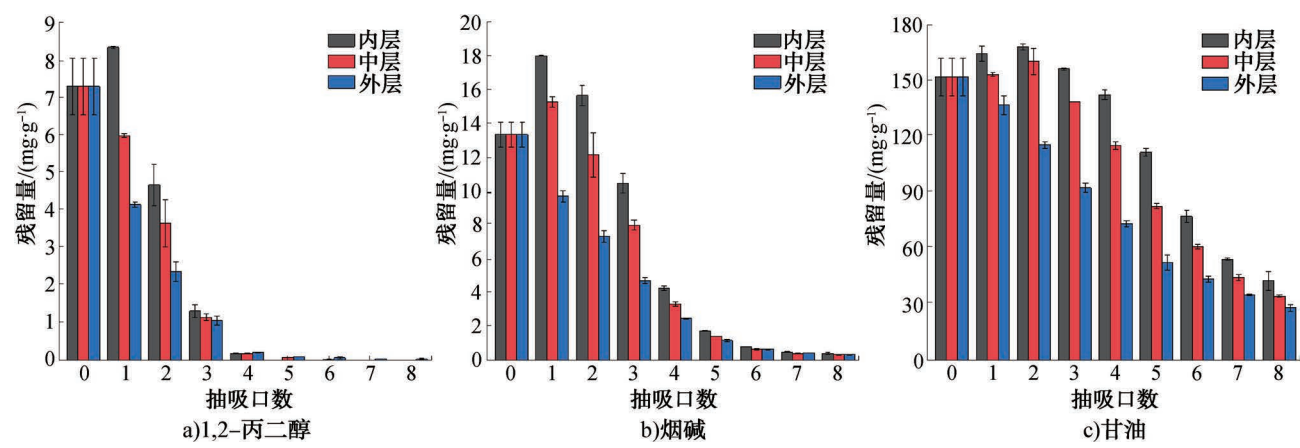


图 7 烟芯材料径向上 3 种化合物残留量的逐口变化情况

Fig. 7 Puff-by-puff changes in the residues of three compounds in the radial direction of cigarette core materials

烟芯材料径向上的总残留量。由图 7 可知,整个抽吸过程中 3 种化合物残留量基本呈现出内层>中层>外层的顺序。内层及中层烟芯材料中甘油、烟碱和 1,2-丙二醇的残留量均有高于初始含量的情况,这是由径向上温度梯度引起化学成分由外层向内层扩散导致的,随着加热的持续,化学成分不断被释放,最终此现象消失。其中 1,2-丙二醇仅在内层第 1 口抽吸后存在该现象,含量从最初的 7.37 mg/g 增加到 8.42 mg/g,随后其在内层的残留量逐渐降低,而中层和外层残留量呈现出逐口下降的趋势;烟碱在前 2 口存在该现象,第 1 口抽吸结束内层及中层残留量均达到最高,分别从初始的 13.51 mg/g 增加到 18.22 mg/g 和 15.47 mg/g,随后残留量均逐渐降低,而其在外层残留量整体上呈现逐口降低的趋势;甘油在前 3 口存在该现象,其在内层和中层的残留量均都在第 2 口抽吸结束达到最高,分别从初始的 152.53 mg/g 增加到 168.72 mg/g 和 160.95 mg/g,随后残留量均逐渐降低,外层残留量表现出逐口降低的趋势,这点同 1,2-丙二醇和烟碱类似。

烟芯材料轴向上前段、中段及后段 3 种化合物残留量的逐口变化情况如图 8 所示,将每段的内层、中层及外层化合物残留量进行加和得到烟芯材料在轴向上的总残留量。由图 8 可知,前 3 口前段烟芯材料中 3 种化合物残留量出现高于初始含量的现象,该过程中化学成分残留量大小顺序为前段>中段>后段,而从第 4 口开始,大小顺序发生变化,开始出现前段>后段>中段。结合图 3 可知,中后段烟芯材料最先开始发生炭化,因而该段区域内的化学

成分首先被释放,在加热前期,前段烟芯材料中化合物尚未受热释放,中后段烟芯材料释放的化合物会向前段烟芯材料扩散,使其化合物含量高于初始含量,也导致前 3 口 3 种化合物残留量基本呈现前段>中段>后段的大小顺序,并且由于加热筒并未完全覆盖前段烟芯材料,前段始终保持较高的化学成分残留量,经过前 3 口抽吸截留作用导致化合物残留量转变为前段>后段>中段。

2.3.3 甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟芯材料残留量的逐口空间分布分析 甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟芯材料中残留量的逐口空间分布情况如图 9-11 所示。由图 9-11 可知,抽吸过程中烟芯材料外层以及中后段区域内的化学成分先被释放,尤其中后段的外层区域表现最为明显,随着加热及抽吸过程的持续,中层及内层 3 种化学成分残留量也逐渐开始降低,这基本与烟芯材料内部温度场和逐口炭化程度的分布相一致(图 3)。同时,观察到内层及中层烟芯材料在抽吸前期其化学成分残留量均有高于初始含量的现象,对于 9 部位烟芯材料而言,前内和中内部位表现最为明显,而对于 3 种化学成分而言,甘油表现得最为明显,其次是烟碱。径向上,在整个抽吸期间烟芯材料中 3 种化学成分残留量基本呈现前内>前中>前外的顺序;轴向上,在加热前期呈现前内>中内>后内的顺序,而随着加热及抽吸过程的持续,大小顺序转变为前内>后内>中内,在第 6 口时表现得最为明显。以上结果进一步证实了峰 A 主要代表甘油、烟碱和 1,2-丙二醇等化学成分的受热释放过程,并且可以对同一部位不同抽吸口

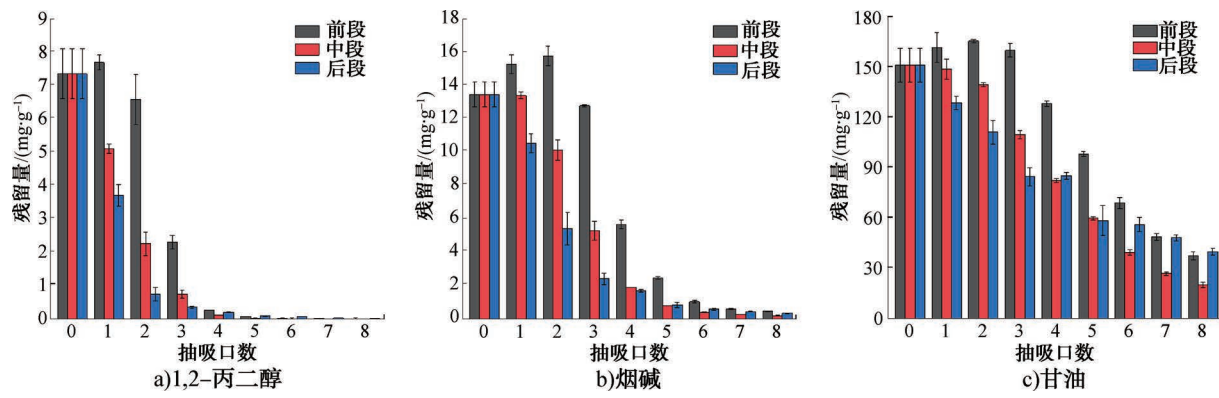


图 8 烟芯材料轴向上 3 种化学成分残留量的逐口变化情况

Fig. 8 Puff-by-puff changes in the residues of three chemical components along the axial direction of cigarette core materials

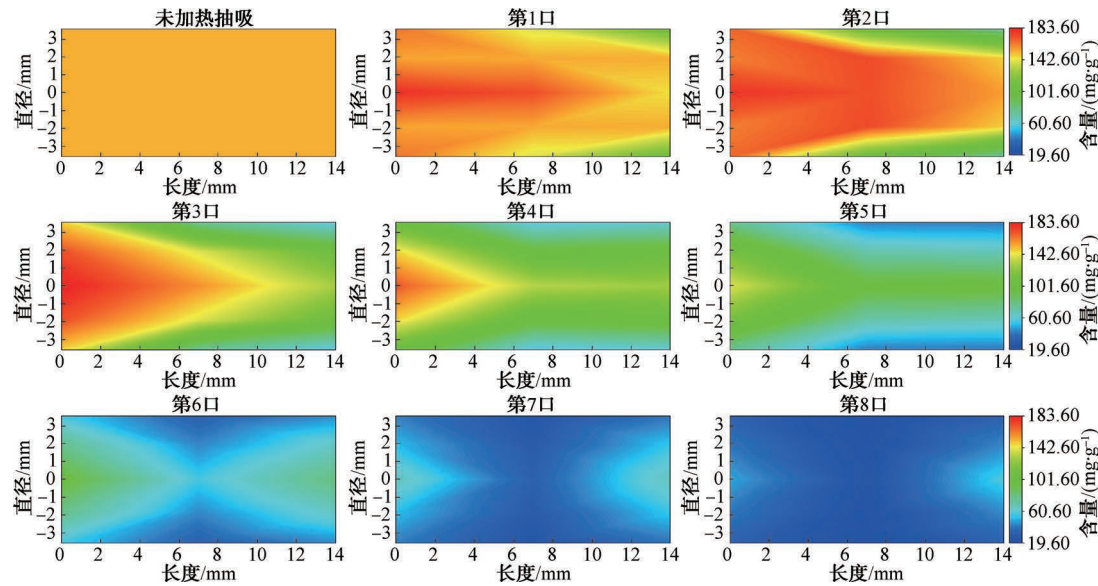


图 9 甘油残留量在烟芯材料中的逐口空间分布

Fig. 9 Puff-by-puff spatial distribution of glycerol residues in cigarette core materials

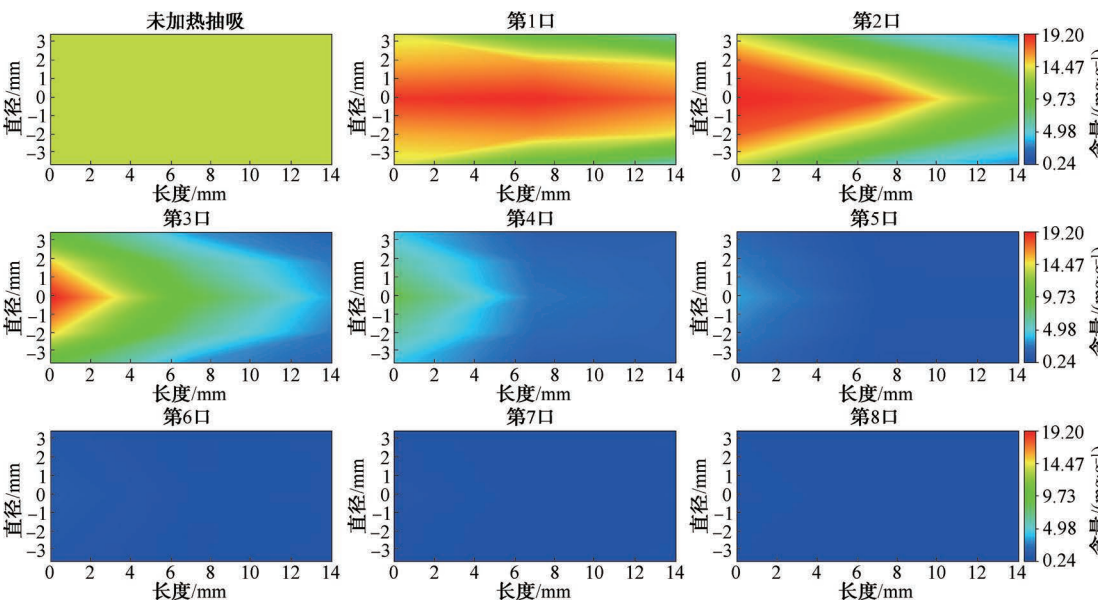


图 10 烟碱残留量在烟芯材料中的逐口空间分布

Fig. 10 Puff-by-puff spatial distribution of nicotine residues in cigarette core materials

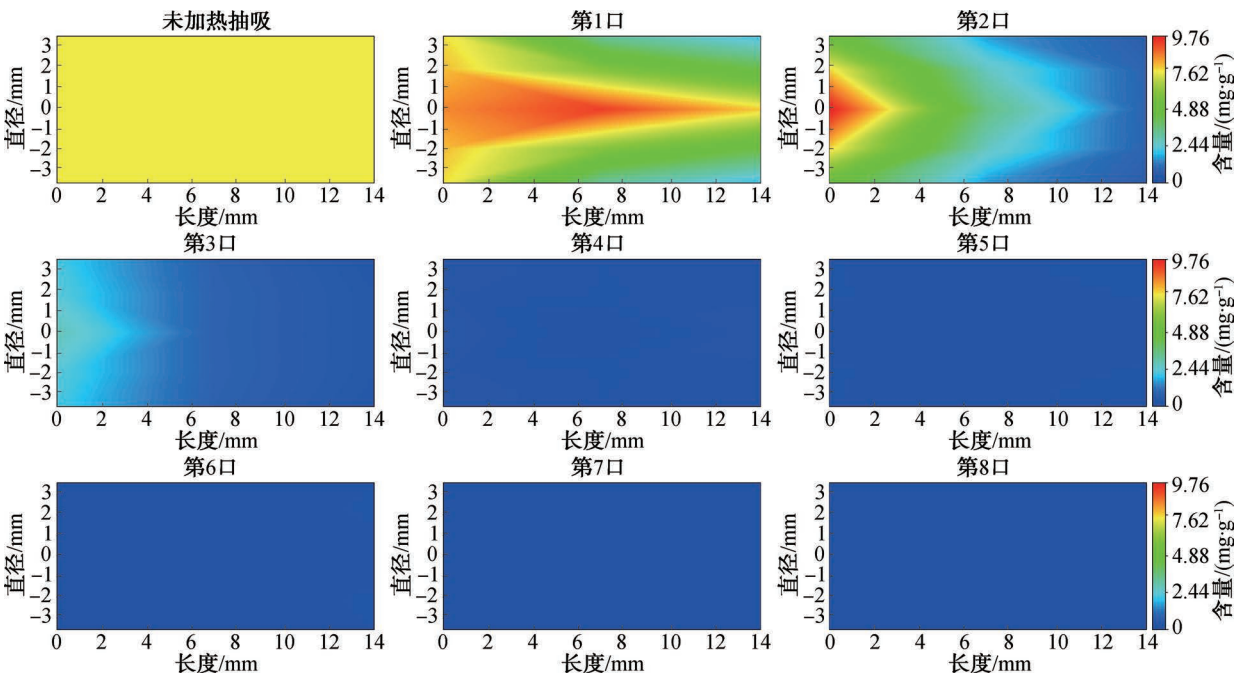


图 11 1,2-丙二醇残留量在烟芯材料中的逐口空间分布

Fig. 11 Puff-by-puff spatial distribution of 1,2-propanediol residues in cigarette core materials

序号(图4)和不同部位同一抽吸口序号(图5)下烟芯材料的热解特性做出解释。

综上可知,温度对化合物在烟支中的空间分布情况有着较强的影响,同时加热温度是影响化合物释放量的重要因素^[28-29]。总的来说,化合物在烟芯材料中的动态空间分布情况是多种因素共同作用的结果,同时受到温度和化合物沸点的影响。

3 结论

本文建立了加热卷烟烟芯段材料的空间分离方法,结合热重分析和 GC-FID 分析方法考查了逐口抽吸后烟芯材料的热失重差异和残留主要化学成分(甘油、烟碱和 1,2-丙二醇)的空间分布。主要得到如下结论:在逐口抽吸过程中,烟芯段的炭化呈现从第 1 口无明显炭化、第 2 口仅中后段外层烟芯率先发黑炭化,到第 3 口起炭化区域逐步由外层向内层、由中后段向前段动态扩展,最终至抽吸结束时烟芯整体完成明显炭化的演变规律。热解特性方面,加热温度对烟芯材料的炭化过程有着重要的影响,逐口抽吸后中内部位烟芯材料中内源性和外源性化合物的最大质量损失速率由大到小依次为第 2 口、第 5 口、第 8 口;第 5 口抽吸后,不同部位烟芯材料中内源性和外源性化合物的最大质量损

失速率由大到小径向上依次为前内、前中、前外,轴向上依次为前内、后内、中内。成分残留量方面,甘油、烟碱和 1,2-丙二醇在烟芯材料中的总残留量均呈现逐口降低的趋势,3 种化学成分的残留量在径向上均呈现内层>中层>外层的顺序分布,在轴向上均呈现由前段>中段>后段逐渐变为前段>后段>中段的分布。因此,3 种化学成分在烟芯材料中残留量的逐口变化情况与其热解特性相一致,不同化学成分在烟芯材料的空间分布受到温度和其沸点的影响。本研究揭示了周向型加热卷烟烟芯材料的热解和主要化学成分释放过程,可为加热卷烟化学成分稳定释放的科学调控提供重要思路。

参考文献:

[1] Sun T Z, Anandan A, Lim C C W, et al. Global prevalence of heated tobacco product use, 2015 – 22: a systematic review and meta-analysis[J]. *Addiction*, 2023, 118(8): 1430–1444.

[2] Takahashi Y, Kanemaru Y, Fukushima T, et al. Chemical analysis and *in vitro* toxicological evaluation of aerosol from a novel tobacco vapor product: a comparison with cigarette smoke [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2018, 92: 94–103.

[3] 李翔, 谢复炜, 刘惠民. 新型烟草制品毒理学评价研究

- 进展[J]. 烟草科技, 2016, 49(1): 88-93.
- Li X, Xie F W, Liu H M. Recent advances in toxicological evaluation of novel tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(1): 88-93.
- [4] 刘亚丽, 王金棒, 郑新章, 等. 加热不燃烧烟草制品发展现状及展望[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(4): 91-106.
- Liu Y L, Wang J B, Zheng X Z, et al. Current status and prospect of heat-not-burn tobacco products [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(4): 91-106.
- [5] 龚淑果, 刘巍, 黄平, 等. 加热不燃烧卷烟烟气主要成分的逐口释放行为[J]. 烟草科技, 2019, 52(2): 62-71.
- Gong S G, Liu W, Huang P, et al. Puff-by-puff release of main aerosol components from two commercial heat-not-burn tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(2): 62-71.
- [6] 崔华鹏, 陈黎, 樊美娟, 等. 电加热卷烟气溶胶物理特性的表征[J]. 轻工学报, 2022, 37(2): 87-93, 101.
- Cui H P, Chen L, Fan M J, et al. Characterization of physical properties of aerosol from electrically heated cigarette[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(2): 87-93, 101.
- [7] Cozzani V, Barontini F, Mcgrath T, et al. An experimental investigation into the operation of an electrically heated tobacco system [J]. Thermochimica Acta, 2020, 684: 178475.
- [8] 崔华鹏, 陈黎, 樊美娟, 等. 加热温度对加热卷烟气溶胶物理特性的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(4): 36-41.
- Cui H P, Chen L, Fan M J, et al. Effects of heating temperature on physical properties of aerosol from heated tobacco products [J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(4): 36-41.
- [9] 孟璠, 崔华鹏, 陈黎, 等. 不同加热温度加热卷烟抽吸过程中烟芯段气溶胶的动态分布[J]. 烟草科技, 2023, 56(3): 41-50.
- Meng F, Cui H P, Chen L, et al. Dynamic distribution of aerosol inside tobacco section of a heated tobacco product during smoking at different heating temperatures [J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(3): 41-50.
- [10] 王乐, 王亚林, 李志强, 等. 电加热卷烟烟芯段温度分布和烟气关键成分逐口变化: 第1部分 实验[J]. 烟草科技, 2021, 54(3): 31-39.
- Wang L, Wang Y L, Li Z Q, et al. Temperature distribution in tobacco section of an electrically heated cigarette and puff-by-puff variation of key smoke components: part 1. Experiments[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(3): 31-39.
- [11] 张璟, 王康, 谭健, 等. 针式中心加热卷烟抽吸后烟丝中烟碱和雾化剂的径向变化[J]. 烟草科技, 2023, 56(1): 66-73.
- Zhang J, Wang K, Tan J, et al. Radial distributions of nicotine and atomizing agents in tobacco section of a needle-style centrally heated tobacco product after smoking [J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(1): 66-73.
- [12] 肖卫强, 周国俊, 蒋健, 等. 加热卷烟制品传热与烟气流动过程数值模拟[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 35-40.
- Xiao W Q, Zhou G J, Jiang J, et al. Numerical simulation of heat transfer and smoke flow of heated cigarette product [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2021, 47(1): 35-40.
- [13] 吴键, 管庆林, 汤晓东, 等. 八大香型烤烟的低温热解特性及香味物质释放差异分析[J]. 河南农业科学, 2026, 55(6): 156-168.
- Wu J, Guan Q L, Tang X D, et al. Analysis of low-temperature pyrolysis characteristics and aroma compound release differences in eight aroma styles of flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2026, 55(6): 156-168.
- [14] 王乐, 王亚林, 李志强, 等. 电加热卷烟烟芯段温度分布和烟气关键成分逐口变化: 第2部分模拟[J]. 烟草科技, 2021, 54(6): 58-64.
- Wang L, Wang Y L, Li Z Q, et al. Temperature distribution in tobacco section of an electrically heated cigarette and puff-by-puff releases of key smoke components: part 2 Simulation[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(6): 58-64.
- [15] 高峰涵, 黄洁洁, 王雨青, 等. 电加热卷烟传热与原料组分变化的数值模拟[J]. 烟草科技, 2023, 56(12): 67-75.
- Gao Y H, Huang J J, Wang Y Q, et al. Numerical simulation of heat transfer and main aerosol constituents released from electrically heated tobacco products [J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(12): 67-75.
- [16] 温光和, 肯生叶, 李峰, 等. 加热不燃烧卷烟烟草材料中1,2-丙二醇、丙三醇和烟碱的测定[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(4): 69-75.
- Wen G H, Ken S Y, Li F, et al. Determination of 1, 2-propylene glycol, glycerol and nicotine of tobacco materials in heat-not-burn cigarettes [J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(4): 69-75.
- [17] 王秦超, 卢平, 黄震, 等. 生物质低温热解炭化特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 121-126.
- Wang Q C, Lu P, Huang Z, et al. Experimental study on low temperature pyrolysis of biomass [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 121-126.
- [18] 严伟, 陈智豪, 盛奎川. 适宜炭化温度及时间改善生物质成型炭品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 245-249.
- Yan W, Chen Z H, Sheng K C. Carbonization temperature and time improving quality of charcoal briquettes [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 245–249.
- [19] Gao W H, Chen K F, Xiang Z Y, et al. Kinetic study on pyrolysis of tobacco residues from the cigarette industry [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44: 152–157.
- [20] Wu W X, Mei Y F, Zhang L, et al. Kinetics and reaction chemistry of pyrolysis and combustion of tobacco waste [J]. Fuel, 2015, 156: 71–80.
- [21] Zhu L J, Xu J, Dai Y J, et al. Mechanism study of tobacco pyrolysis based on the analysis of characteristic products and *in-situ* identification of functional groups evolution on pyrolytic char [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 167: 105681.
- [22] Li X, Zhao Q Q, Han M, et al. Pyrolysis characteristics and kinetic analysis of tobacco stem pretreated with different solvents [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(1): 501–515.
- [23] 马俊, 王晓斌, 朱绍胤, 等. 云南烟叶加热状态下的失重及产物释放特性的热重-质谱联用分析 [J]. 云南农业大学学报, 2025, 40(5): 78–84.
- Ma J, Wang X B, Zhu S Y, et al. TG-MS analysis of weight loss and product release characteristics of Yunnan tobacco leaves under heating [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2025, 40(5): 78–84.
- [24] 杜赫, 王轶群, 乔月梅, 等. 基于加热卷烟的国内外烤烟低温热解特性研究 [J]. 农产品加工, 2025(12): 74–78.
- Du H, Wang Y Q, Qiao Y M, et al. Low-temperature pyrolysis characteristics of the domestic and foreign flue-cured tobacco based on heated cigarettes [J]. Agricultural Products Processing, 2025(12): 74–78.
- [25] 梁淼, 刘语煊, 朱海波, 等. 不同类型烟叶热失重特性及分步热释放香味成分分析 [J]. 河南农业科学, 2025, 54(3): 157–169.
- Liang M, Liu Y X, Zhu H B, et al. Analysis of thermogravimetric characteristics and stepwise thermal release aroma components of different types of tobacco [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(3): 157–169.
- [26] 苏小平, 申涛, 张平, 等. TG 和 Py-GC/MS 研究不同烟草的热解特性 [J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 14–24.
- Su X P, Shen T, Zhang P, et al. TG and py-GC/MS studies on pyrolysis characteristics of different cut-tobacco [J]. Journal of Northwest University for Nationalities (Natural Science), 2024, 45(1): 14–24.
- [27] 刘广超, 刘鸿, 张玮, 等. 调节湿度对国外两款市售加热卷烟烟气主要成分逐口释放行为的影响 [J]. 烟草科技, 2021, 54(9): 40–47.
- Liu G C, Liu H, Zhang W, et al. Effects of conditioning humidity on puff-by-puff releases of main aerosol components from two foreign commercial heated tobacco products [J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(9): 40–47.
- [28] 周慧明, 刘鸿, 刘广超, 等. 自制研究平台不同加热温度下电加热卷烟主要成分的释放行为 [J]. 烟草科技, 2021, 54(6): 50–57.
- Zhou H M, Liu H, Liu G C, et al. Release behaviors of main aerosol components from electrically heated cigarettes at different temperatures based on a bespoke test platform [J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(6): 50–57.
- [29] 司晓喜, 罗萌柔, 尤俊衡, 等. 加热温度对气溶胶化学成分释放的影响 [J]. 烟草科技, 2022, 55(12): 46–58.
- Si X X, Luo M R, You J H, et al. Effects of heating temperature on releases of chemical components in aerosol [J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(12): 46–58.

Study on the spatial characterization of the puff-by-puff pyrolysis process in circumferentially heated cigarette core segments

Zhao Jinke¹, Cui Huapeng¹, Xu Haitao², Qin Yaqiong¹, Chen Yexian³,

Liu Yu¹, Liu Ruihong¹, Liu Shaofeng¹

1. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China;

2. R&D Center of China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Jinan 250100, China;

3. Sichuan Sanlian New Materials Co., Ltd., Chengdu 610199, China

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the pyrolysis process of tobacco core materials at different positions in circumferentially heated cigarettes during puff-by-puff smoking. [Methods] Tobacco core materials from heated cigarettes after puff-by-puff smoking were used as raw materials. A self-developed spatial separation method was used to divide the tobacco core into nine different positions. A thermogravimetric analyzer and gas chromatography-flame ionization detection (GC-FID) were used to analyze the physicochemical property differences

of tobacco core materials at different positions after puff-by-puff smoking. 【Results】During puff-by-puff smoking, the carbonization region of the tobacco core gradually spread from the outer layer of the middle-rear section to the inner layer and the front section with increasing puff number, and the entire tobacco core showed significant carbonization by the end of the smoking session. The pyrolysis process of tobacco core materials could be divided into four stages, among which Stage II was the main mass-loss stage, corresponding to a temperature range of 209~415 °C. Peak A on the DTG curve mainly resulted from the thermal release of chemical components such as glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials. With increasing puff number, the maximum mass-loss rate of Peak A on the DTG curve for tobacco core materials at the same position showed an overall decreasing trend. After the fifth puff, the maximum mass-loss rate of Peak A on the DTG curve for tobacco core materials at different positions decreased in the order of front-inner, front-middle, and front-outer in the radial direction, and in the order of front-inner, rear-inner, and middle-inner in the axial direction. During puff-by-puff smoking, the total residual amounts of glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials decreased puff by puff. After the smoking session, the total residual amounts of the three components in the tobacco core materials were 21.90%, 2.98%, and 0.31% of their initial contents, respectively. During puff-by-puff smoking, the residual amounts of glycerol, nicotine, and 1,2-propanediol in the tobacco core materials all decreased in the order of inner layer, middle layer, and outer layer in the radial direction, while their decreasing order in the axial direction changed from front section, middle section, and rear section to front section, rear section, and middle section. 【Conclusion】The puff-by-puff changes in the residual amounts of different compounds in tobacco core materials were consistent with their pyrolysis characteristics, and their spatial distribution in the tobacco core materials was affected by temperature and their boiling points.

Key words: heated tobacco product; thermogravimetric analysis; GC-FID; spatial characterization

[责任编辑:刘丹丹]

(上接第 58 页)

(SEM), and field-emission transmission electron microscopy (FETEM). The sustained-release performance was investigated using three kinetic models: first-order kinetics, Higuchi kinetics, and Peppas kinetics. 【Results】Using KGM dosage, Tween 80 dosage, and sodium tripolyphosphate (STP) dosage as independent variables and the loading efficiency of benzyl alcohol microcapsules as the dependent variable, response surface methodology was applied to determine the optimal preparation conditions: KGM, 0.10 g; Tween 80, 0.25 mL; and STP, 0.50 g. Under these conditions, the loading efficiency of the benzyl alcohol microcapsules reached 16.95%. FTIR showed that the characteristic absorption peaks of benzyl alcohol, CS, and KGM appeared at 1040 cm^{-1} , 2880 cm^{-1} , and 874 cm^{-1} , respectively, confirming that all three components were present in the microcapsule system. SEM and FETEM revealed that the microcapsules exhibited a spherical morphology with granular protrusions. At both room temperature (20 °C) and high temperature (80 °C), the microcapsules significantly reduced the volatilization loss of benzyl alcohol, and their sustained-release process followed first-order and Peppas kinetic equations. 【Conclusion】The thermal stability and sustained-release performance of benzyl alcohol were significantly improved after microencapsulation.

Key words: benzyl alcohol; microcapsules; konjac glucomannan; chitosan; response surface optimization; sustained release

[责任编辑:杨晓娟]