

加热卷烟烟气气溶胶的粒径分布特征

王 健¹, 谢 恺², 雷 振¹, 彭晓萌¹, 徐冰霞¹,

温作赢², 顾学军², 唐小锋^{2,*}

(1. 安徽省气溶胶解析调控及生物效应重点实验室(安徽中烟工业有限责任公司), 安徽 合肥 230088;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 近年来, 出现了一种可消除或减少吸烟危害的新型加热烟草产品, 且呈现日益普及的趋势。为评估加热卷烟烟气的环境和健康影响, 有必要对其理化特性进行研究。采用扫描电迁移率粒径谱仪, 通过测量多个单分散气溶胶浓度及总谱拟合的方式, 在线监测了 2 种不同加热烟具产生的烟气气溶胶的逐口粒径分布、总粒子数浓度和模式粒径。研究表明: (1) 由于其加热原理不同, 2 种加热方式所产生的加热烟气气溶胶呈现出不同的逐口分布情况, 其中电磁加热烟具的热效率高, 但加热不均匀, 其产生的气溶胶粒径和浓度在一定范围内波动, 而红外加热烟具的加热较均匀, 但加热效率低, 工作过程中温度逐口上升, 其气溶胶粒径和浓度存在逐口上升的情况; (2) 不同粒径范围的烟气气溶胶颗粒物, 对烟具加热温度存在相反的依赖性, 其中小粒径颗粒物倾向于在低温下产生, 而大粒径颗粒物倾向于在高温下产生; (3) 加热烟具的温度对于加热卷烟气溶胶的浓度和模式粒径具有显著影响, 随着加热温度升高, 加热卷烟气溶胶的浓度和模式粒径都显著升高。综上, 加热烟气气溶胶的总粒子数浓度和模式粒径均受到烟具加热温度的显著影响, 尤其是在不充分加热情况下小粒径颗粒物的大量释放, 对加热烟具的温度控制模块提出了更高的技术要求。

关键词: 加热不燃烧卷烟; 加热烟具; 在线分析; 气溶胶; 粒径分布

中图分类号: X831

文献标识码: A

Particle Size Distribution Characteristics of Aerosols from Heated Tobacco Products

WANG Jian¹, XIE Kai², LEI Zhen¹, PENG Xiaomeng¹, XU Bingxia¹,

WEN Zuoying², GU Xuejun², TANG Xiaofeng^{2,*}

(1. *Anhui Provincial Key Laboratory of Aerosol Analysis, Modulation and Biological Effect (China Tobacco*

*Anhui Industrial Co., Ltd.), Hefei 230088, China; 2. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,**

Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In recent years, heated tobacco products (HTPs), due to the release of fewer harmful substances than conventional smoking, have gained increasing popularity worldwide. To evaluate their environmental and health impacts, it is necessary to study their physical and chemical properties. This work employs a scanning mobility particle sizer to measure in real time the puff-resolved concentration of heated tobacco smoke aerosols, generated by two types of heating devices: an electromagnetic heating device and an infrared heating device. The puff-resolved concentrations of monodisperse particles at multiple selected sizes are measured and used to derive the overall size distributions. Subsequently, the puff-by-puff total particle number concentrations and mode diameters of the tobacco

收稿日期: 2025-07-08

修回日期: 2025-09-23

接受日期: 2025-09-25

DOI: 10.20078/j.eep.20251002

基金项目: 安徽中烟工业有限责任公司科技资助项目(2022305, 2024104); 皖江新兴产业技术开发中心项目(WJ24CYHXM08)

第一作者: 王 健(1986—), 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 主要研究方向为生物质热解、烟草化学。E-mail: wangj86@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者: 唐小锋(1979—), 男, 安徽宿松人, 研究员, 主要研究方向为大气化学、大气环境。E-mail: tangxf@aiofm.ac.cn

aerosols are determined in real time. Key findings are obtained from the experiments: (1) Due to their different heating mechanisms, the aerosols produced by the two devices exhibit distinct puff-resolved distribution characteristics. The electromagnetic heating device has relatively high heating efficiency but provides uneven heating. As a result, the concentration of heated tobacco aerosol fluctuates within the range of $(6.3 - 8.9) \times 10^6 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the mode particle size varies between 220 and 283 nm. The infrared heating device provides more uniform heating but has low heating efficiency, leading to a gradually increasing operating temperature during puffing, especially with insufficient preheating. The aerosol concentration increases puff-by-puff from 2.3×10^6 to $8.7 \times 10^6 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$, with mode diameters increasing from 151 to 319 nm. (2) Heated tobacco aerosol particles in different size ranges exhibit inverse dependence on the heating temperatures. Smaller particles ($\leq 80 \text{ nm}$) tend to be produced in large quantities at lower temperatures, while larger particles ($\geq 300 \text{ nm}$) are more likely to be produced at higher temperatures. (3) The total particle concentrations and mode diameters of heated tobacco smoke aerosols exhibit synchronous variation during the experiments. The temperature of the heating device significantly affects both the total particle concentration and the mode diameter. As the heating temperature increases, both the aerosol concentration and the mode particle size increase significantly. These results demonstrate that the total particle number concentrations and mode diameters of heated tobacco aerosols are highly sensitive to the operating temperature and heating mechanism. Thus, the substantial release of small particles under insufficient heating conditions poses challenges for the design of heating control modules in these devices, such as ensuring adequate preheating and maintaining stable operating temperatures.

Keywords: Heated tobacco products (HTPs); Heating devices; Online analysis; Aerosols; Particle size distribution

0 引 言

卷烟烟气中含有大量对人体健康有害的物质^[1],是室内环境污染物的重要来源之一^[2]。为减少卷烟烟气对环境和健康的影响,近年来市场上出现了一种新型烟草产品——加热不燃烧(Heat-not-Burn, HNB, 后简称加热卷烟)^[3-5]。加热卷烟通过在较低温度(温度一般小于 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$)下加热烟草原料以释放烟气,相较于传统卷烟在高温燃烧(约 $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下发生裂解等反应,显著减少了有害成分的生成,因此得到了广泛关注和快速发展^[6-8]。加热卷烟的气溶胶主要来源于低温蒸馏过程,而传统卷烟通过烟草燃烧产生气溶胶;此外,在抽吸前后加热卷烟的烟支长度基本保持不变,而传统卷烟烟支则逐渐缩短。这些在加热机制、工作温度及发烟介质消耗等方面的不同,导致二者释放的烟气气溶胶在物理和化学性质上存在显著差异。当前,关于加热卷烟烟气气溶胶化学成分的研究已有较多报道^[9-10],然而对其粒径分布的探讨仍相对有限。烟气气溶胶的粒径分布直接影响其在人体呼吸道内的沉积效率,以及有害物质的传

输能力,对评估烟气气溶胶对健康和环境影响具有重要意义。因此,有必要深入研究加热卷烟所释放烟气气溶胶的粒径分布。

加热卷烟通常搭配专用烟具以实现烟草的加热。目前常见的烟具加热模式包括电磁加热和红外加热 2 种^[11-12]。电磁加热烟具利用高频交流电流在金属感应体上产生热能,对烟草进行加热^[13];红外加热烟具则通过发射红外线辐照直接加热烟草^[14]。作为烟草的直接加热载体,烟具类型对加热卷烟烟气气溶胶的释放有直接影响^[15-22]。然而,对于不同加热模式影响气溶胶粒径分布的机制仍缺乏系统讨论,尤其是电磁加热与红外加热在热效率、温度均匀性等方面的差异,以及其对气溶胶粒径分布的影响,目前尚不明晰。为此,本研究使用扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS),结合单通道吸烟机模拟抽吸过程,在线测量了安徽中烟公司(TOOP 牌)加热卷烟分别在红外和电磁 2 种加热烟具下所释放烟气气溶胶的粒径分布特征。本研究旨在为准确评价加热卷烟产品的环境和健康影响提供关键数据支持,并为相关烟草产品的规范管控等提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 烟草材料和烟具选择

本研究所用的烟草样品是安徽中烟公司提供的 TOOP 牌原味加热卷烟。每次实验前,加热卷烟样品均在 22 ℃、相对湿度为 60% 的环境中至少存储 48 h。

实验所用烟具为安徽中烟公司的电磁加热烟具(Electromagnetic Heating Device)和红外加热烟具(Infrared Heating Device)。电磁加热烟具采用内芯针式的加热原理,加热温度为 290 ℃,最高加热功率为 20 W,额定工作口数为 8 口,抽吸 8 口后烟具自动关机;红外加热烟具采用外周式的加热原理,加热温度为 260 ℃,最高加热功率为 30 W,额定工作口数为 10 口,抽吸 10 口后烟具自动关机。为保持实验条件一致,2 种烟具均抽吸 10 口。

烟气的溶胶由单孔道吸烟机模拟抽吸加热卷烟产生,采用加拿大深度抽吸方法(HCI),每口抽吸容量为 55 mL,抽吸持续时间为 2 s,抽吸间隔时间为 30 s。烟气的溶胶由吸烟机产生后与稀释气流(氮气 2 L/min)混合,稀释烟气随后进入 SMPS 进行单粒径浓度检测,选取每口单粒径图谱中的峰值再乘以稀释倍数,即获得该口抽吸所释放烟气的溶胶的浓度。

1.2 粒径测量方法

烟气的溶胶粒径测量的实验装置,主要包括 1 台单孔道吸烟机和 1 台扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS, Model 3936, 美国 TSI 公司)(图 1)。

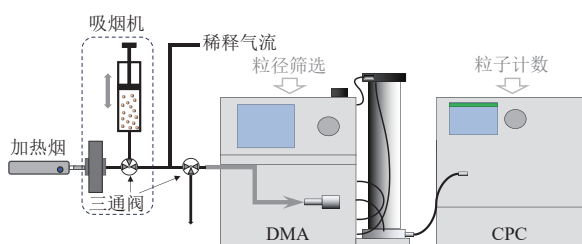


图 1 实验装置结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

SMPS 由差分迁移率分析仪(DMA, Model 3081, 美国 TSI 公司)和凝结核粒子计数器(CPC, Model 3776, 美国 TSI 公司)组成,分别进行粒径筛选和粒子数浓度测量。SMPS 有 2 种工作模式,一种为自动扫描模式(Analog ctrl),由软件控制对样品粒径进行从小到大的扫描测量,采集一张粒谱需 3 min;另一种是单分散粒径模式(Panel ctrl),可

在 5 s 内对单分散粒径颗粒的浓度进行快速测量。

由于 HCI 模式下新鲜烟气抽吸时间只有 2 s,采用自动扫描模式无法对单支烟的释放烟气进行在线测量。为此,本研究采用单分散粒径模式对加热卷烟烟气溶胶中的多个单分散粒径进行测量,进一步对各个粒径的粒径-浓度结果进行 Log-Normal 拟合,即得到加热卷烟烟气溶胶的总粒谱分布。本研究的单分散粒径模式选取 20、40、80、150、200、300、400、500、600 nm 分别进行单粒径浓度测量。这种测量模式的时间分辨率高,是新鲜烟气的溶胶的逐口粒谱分布,可最大程度减少烟气老化对粒谱的影响。为了排除烟具电量对实验结果的影响,每次实验前烟具均为满电状态,并使用 2 种烟具交替实验,即采用“一个做实验,一个充电”的方式。每种烟具实验均重复 3 次,共计 54 组实验。

2 结果与分析

2.1 2 种加热模式下的烟气单粒径浓度

图 2 为 TOOP 牌加热卷烟在 2 种加热模式下不同粒径的单分散气溶胶的峰值浓度结果。可以看出,不同粒径范围的烟气溶胶呈现不同的变化趋势。为方便对比,根据粒径大小将烟气溶胶分为小粒径(20、40、80 nm)、中粒径(150、200、300 nm)和大粒径(400、500、600 nm)3 种颗粒。小、中、大粒径颗粒物的峰值浓度分别在 10^3 、 10^5 、 10^4 个/cm³ 量级范围内。依据颗粒物浓度水平可知,TOOP 加热卷烟气溶胶的主流粒径分布于中粒径范围,该结果与其他加热卷烟的气溶胶粒径报道基本一致^[23-25]。

中粒径颗粒物的粒径与加热卷烟主流烟气的粒径接近,其在 3 种粒径范围内最高,因此对加热卷烟气溶胶的整体特性具有较好的代表性和主体性^[26]。图 2(b)(e)分别为电磁和红外加热模式下中粒径颗粒物的逐口浓度变化情况。可以看出,电磁加热模式下的中粒径颗粒物的浓度分布无明显规律,其值在一定范围内波动,并在烟具关机后的第 9 口后出现了明显降低。相比之下,红外加热模式下的中粒径颗粒物则表现出明显的逐口变化趋势:150 nm 颗粒物在前 4 口逐口上升,后 6 口缓慢下降;200 nm 颗粒物在前 4 口逐口上升,后 6 口趋于平稳;300 nm 颗粒物在整个抽吸过程中呈现明显的逐口上升。这种粒径逐口变化趋势,表明了电磁和红外 2 种加热模式在逐口温度分布

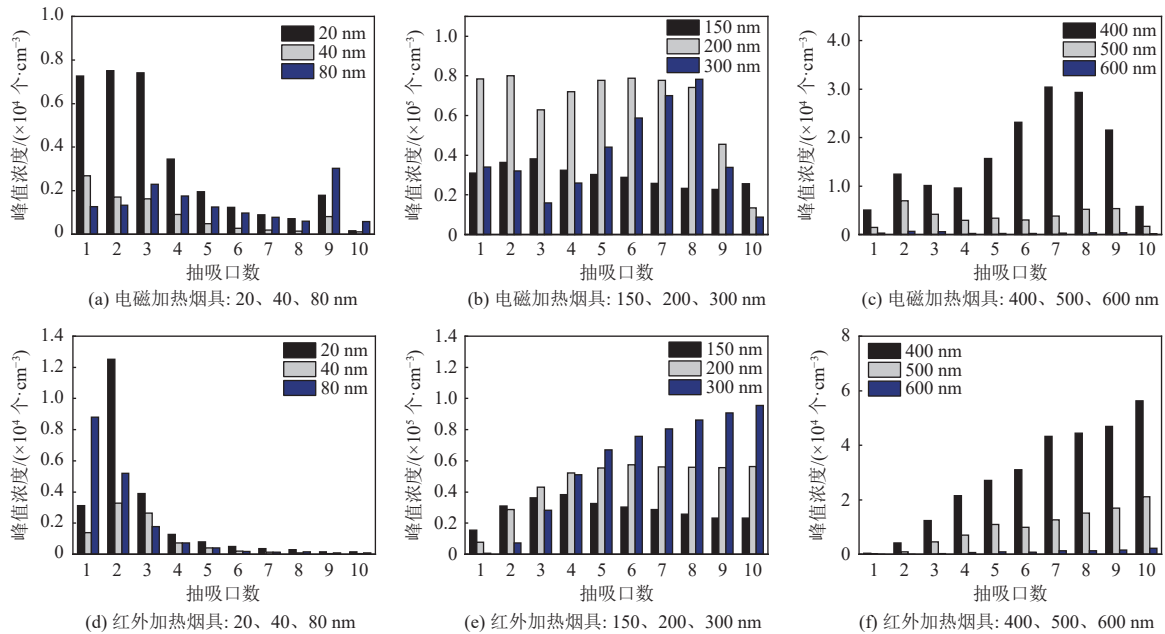


图2 电磁加热烟具和红外加热烟具得到的TOOP加热烟烟气溶胶的单粒径逐口浓度分布

Fig. 2 Puff-resolved monodisperse particle concentration distributions of the TOOP HNB tobacco smoke aerosols from the electromagnetic heating device and the infrared heating device

上存在显著不同。

2种烟具的加热原理和加热位点均存在差异。红外加热模式采用四周辐射加热,具有高穿透力、加热更均匀的特点,但热效率较低,具体表现为烟草温度在烟具启动时较低,在烟具工作过程中烟草温度缓慢上升。电磁加热模式采用金属感应体加热,升温更迅速,但对烟草的加热均匀程度不如红外。这种加热原理不同导致的温度变化,在谱图中呈现为电磁加热烟具产生气溶胶的中粒径分布较平均,并在一定范围内波动,但其粒径变化较大,稳定性不足;而红外加热烟具的中粒径颗粒物浓度则表现出较好的稳定性,但存在明显的逐口变化趋势。

2种烟具加热特征的区别在大粒径和小粒径颗粒物的逐口浓度上也有所体现。如图2(c)(f)所示,大粒径颗粒物出现了比中粒径颗粒物更明显的逐口变化趋势:电磁加热模式的大粒径颗粒物逐口变化特征不明显,无规律性,颗粒物释放浓度波动明显;红外加热模式的大粒径颗粒物均出现逐口上升趋势。结合中粒径颗粒物的结果可知,随着红外加热烟具工作过程中的温度上升,粒径大于200 nm的颗粒物都出现了逐口释放浓度上升的趋势,即大粒径颗粒物存在高温倾向性。

由图2(a)(d)所示,小粒径颗粒物浓度变化趋势与大粒径颗粒物相反。与中粒径和大粒径的颗

颗粒物不同,红外加热模式下的小粒径颗粒物浓度并未出现随温度变化的逐口上升情况。小粒径颗粒物浓度在前3口显著较高,在第1口或第2口达到峰值,随后明显下降。结果表明,小粒径颗粒物倾向于在相对低温下产生,红外加热烟具的前3口加热温度较低,促进了加热卷烟烟草的小粒径颗粒物的大量产生,在第4口后加热温度上升,小粒径颗粒物的产生则被抑制。同样的趋势出现在电磁烟具模式下加热的第9口(即烟具关机后的第1口),此时电磁加热烟具关机后内部的温度迅速降低,第9口抽吸气溶胶中的小粒径颗粒物浓度出现了明显的上升,由此表明加热卷烟中小粒径颗粒物存在低温倾向性。

不同粒径颗粒物的温度倾向性源于不同温度下的气溶胶产生机理:在低温加热条件下,烟草中低沸点组分优先释放,其总释放量较少且成核效率低,因此更易生成小粒径颗粒物;在高温条件下,高沸点组分得以挥发,并伴随烟支成分的热解反应,促进气溶胶凝并,形成高浓度的大颗粒物,同时高温也进一步加剧了小粒径颗粒物之间的碰撞与吸附,导致其浓度显著降低^[27-28],这与崔华鹏等^[29]的研究一致。因此,2种烟具的不同加热工作温度曲线直接导致了烟烟气溶胶不同粒径颗粒物的特征变化。此外,不同粒径范围的烟气颗粒物的人体吸收效果和健康效应影响不同。烟气颗

颗粒物尺寸越小,其在呼吸系统的沉积部位越深,造成的影响更严重^[30]。中粒径和大粒径颗粒物(主流认为的烟气粒径)会沉积在上呼吸道,小粒径的颗粒物则能绕过气道的防御,到达肺部深处并在肺泡处沉积,部分超细颗粒物甚至能够直接穿透毛细血管进入循环系统,其对人体健康的影响更为恶劣^[31]。

综上,电磁加热烟具虽然具有较高的传热效率与良好的预热性能,但其对加热卷烟的加热均匀性较差,导致所产生的烟气的溶胶浓度存在一定波动,逐口释放稳定性不佳。相比之下,红外加热烟具凭借其辐射均匀的特性,提高了气溶胶逐口释放的稳定性,然而其整体热效率低于电磁加热模式,烟气的溶胶仍呈现明显的逐口浓度变化,并在抽吸前3口产生大量小粒径颗粒物。鉴于小粒径颗粒物对人体健康可能造成更大的风险,未来烟具加热模块的开发需进一步提升预热能力和稳定性,以控制小粒径颗粒物的生成。

2.2 加热卷烟烟气气溶胶粒径分布拟合结果

以电磁加热烟具为例,将不同单分散粒径的加热卷烟烟气气溶胶浓度绘制在同一张谱图上,并进行 Log-Normal 拟合,即得到 TOOP 加热卷烟气溶胶的粒径分布,结果如图 3 所示。TOOP 加热卷烟烟气气溶胶的粒径分布符合单模分布,其单口的气溶胶中心粒径在 190 ~ 250 nm 之间变化,单口的气溶胶峰值浓度分布在 $2.5 \times 10^5 \sim 3.8 \times 10^5$ 个/cm³,且随抽吸口数有明显变化。为了得到不同抽吸口数下气溶胶粒径浓度和模式粒径变化,以拟合得到的曲线为该加热烟具下的逐口气溶胶粒径分布图,以其峰值浓度处为模式粒径 (Mode diameter),对每一口得到的粒径分布图进行计算,可获得该口的总粒子数浓度 (Total particle number concentration),结果如图 4 所示。

图 4(a)(b)分别展示了电磁和红外加热产生 TOOP 加热卷烟烟气的逐口总粒子数浓度分布。其中,电磁加热产生的逐口总粒子数浓度(工作状态)在一定范围内 ($(6.3 \pm 0.7) \times 10^6 \sim (8.9 \pm 0.7) \times 10^6$ 个/cm³) 上下波动,但分布相对均匀。红外加热卷烟的粒子数浓度与抽吸口数存在正相关,随抽吸口数增加,其烟气气溶胶的粒子数浓度明显上升,由第 1 口的 $(2.3 \pm 1.7) \times 10^6$ 个/cm³ 上升至第 10 口的 $(8.7 \pm 0.5) \times 10^6$ 个/cm³,这也与 2.1 节中提到的主流粒径与温度的变化趋势相吻合。

图 4(c)(d)分别展示了电磁和红外加热产生

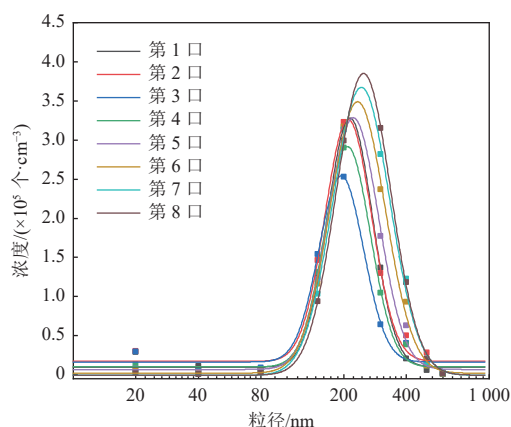


图 3 电磁加热烟具得到的 TOOP HNB 烟气气溶胶颗粒物的粒径分布图

Fig. 3 Particle size distributions of the TOOP HNB tobacco smoke aerosols released by the electromagnetic heating device

的 TOOP 加热卷烟气溶胶的逐口模式粒径变化。对于 2 种加热模式下烟气气溶胶的模式粒径变化规律与粒子数浓度基本一致:电磁加热模式下的烟气气溶胶颗粒物模式粒径相对平均,在 $(220 \pm 6) \sim (283 \pm 20)$ nm 波动;红外加热模式下的烟气气溶胶的模式粒径随抽吸口数显著增加,由第 1 口的 (151 ± 20) nm 逐口增加到第 10 口的 (319 ± 11) nm。

由于烟支填料差异、仪器工作状态以及温湿度变化等系统误差,不同实验组的总粒子数浓度存在一定差异(图 4(a)(b)),除红外加热烟具的前 5 口,总粒子数浓度的总体变异系数(CV)基本低于 10%。红外烟具预热不充分显著影响前 5 口的粒子数释放量,不同的烟具工况对其测量结果有着明显影响,因此红外烟具的前 5 口的总粒子数浓度的平均 CV 高达 40%。该结果也与 2.1 节中小粒径颗粒物的低温倾向性一致,在前 5 口抽吸过程中,红外烟具的工作温度较低,从而抑制中粒径和大粒径颗粒物的产生,促进了小粒径颗粒物大量生成。总粒子数浓度受到小粒径颗粒物的影响更显著,而小粒径颗粒物的释放浓度又与加热温度密切相关,因此红外加热烟具前 5 口的工作温度波动显著影响了其总粒子数浓度结果,导致其存在较大的数据波动。与总粒子数浓度数据不同,不同重复实验的模式粒径实验结果表现出较小的 CV(图 4(c)(d)),总体(红外前 5 口除外)的 CV 在 5% 左右,表明虽然烟支本身和测量条件虽然存在一定差异,但产生的烟气气溶胶表现出相对稳定的粒径逐口释放特征。

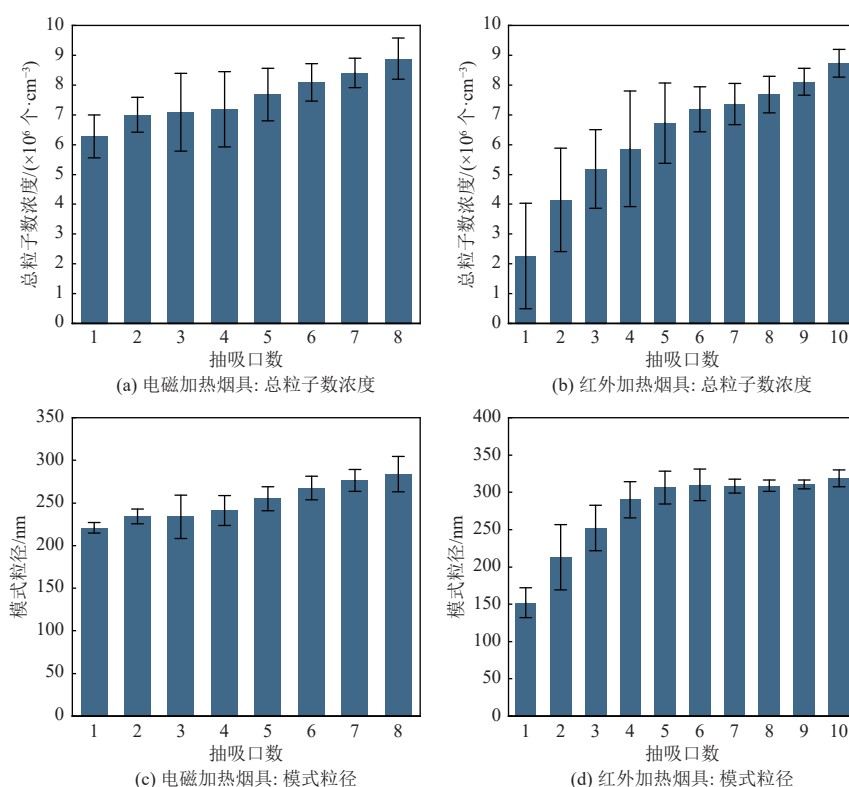


图 4 电磁加热烟具和红外加热烟具得到的 TOOP 加热烟烟气溶胶的逐口总粒子数浓度分布图和模式粒径分布图

Fig. 4 Puff-resolved total particle number concentrations and mode diameters of the TOOP HNB tobacco smoke aerosols released by the electromagnetic heating device and the infrared heating device

通过纵向对比图 4(a)(c)和图 4(b)(d)可以看出,加热卷烟烟气的单口粒子数浓度和模式粒径之间存在显著的相关性。在红外加热模式下,这一关系尤为明显,表现为逐口粒子数浓度和模式粒径呈现协同上升的趋势。该趋势与加热烟具的温度密切相关:高温工作状态有助于促进加热卷烟烟气生成粒径更大和浓度更高的气溶胶。具体而言,电磁加热烟具的温度在稳定值附近波动,其气溶胶的粒子数浓度和模式粒径也相应地在一定范围内同步波动;红外加热烟具在工作过程中温度逐渐上升,其烟烟气溶胶的粒子数浓度和模式粒径均随烟具温度的上升而上升。

基于红外加热烟具产生的粒子数浓度和模式粒径浓度出现了大范围的同时变化,以其逐口的粒子数浓度为横坐标,模式粒径为纵坐标,作逐口浓度和模式粒径的变化关系图(图 5)。可以看出,二者之间存在一定相关性,在低粒子数浓度下模式粒径与总粒子数浓度呈现近线性的变化关系,而在高粒子数浓度下($> 7 \times 10^6$ 个/cm 3)模式粒径基本稳定在 310 nm 附近,不再随粒子数浓度上升而上升。加热烟具的加热温度是粒子数浓度和模式粒径的自变量,2 种因变量同步发生了显著变

化。由此可见,加热卷烟烟烟气溶胶的粒径和浓度表现出显著的温度依赖性,温度波动会迅速影响其释放特性。因此,在加热烟具的温度模块设计中,必须加强对加热稳定性和均匀性的控制,例如,确保充分预热、实现加热过程中的温度均匀

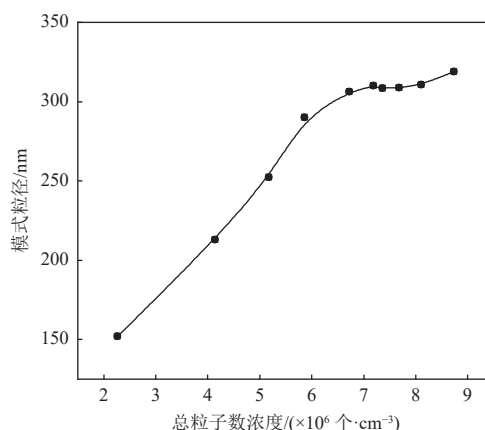


图 5 红外加热烟具产生 TOOP HNB 烟烟气溶胶的粒子数浓度-模式粒径相关图

Fig. 5 Correlation diagram of particle number concentrations and mode particle diameters of the TOOP HNB tobacco smoke aerosols released by the infrared heating device

分布等^[12]。

3 结 论

本文采用 SMPS 对电磁和红外加热烟具产生的烟气的溶胶浓度和粒径进行了在线表征,研究了烟气的溶胶的单粒径逐口浓度分布情况,并拟合得到了烟气总粒子数浓度和粒径的逐口变化情况,主要结论如下。

(1)红外加热烟具和电磁加热烟具的工作原理不同,二者加热温度变化具有显著差别,其中红外加热较均匀,但是加热效率较低,工作状态下卷烟烟支的逐口温度逐渐上升,而电磁加热的加热效率较高,但对加热卷烟的加热不均匀。

(2)加热卷烟烟气的溶胶中小粒径颗粒物的生成表现出明显的低温倾向性,倾向于低温条件下生成;而大粒径颗粒物则更多在高温条件下形成。鉴于超细颗粒物对于人体健康的显著影响,其在低温阶段的释放特性尤其值得关注,有必要结合毒理学深入探讨其潜在的健康影响机制。

(3)随着烟具的加热温度上升,卷烟烟气的溶胶的总粒子数浓度和模式粒径都明显增加,烟气的溶胶的粒子数浓度和中心粒径都具有显著的温度依赖性,对加热卷烟烟具的设计和生提出了更高的要求。

(4)加热卷烟烟气的溶胶的总释放量虽较传统卷烟有所降低,但仍处于 10^6 个/ cm^3 量级,远高于室内空气背景浓度,对人体健康及室内封闭环境具有重要影响,长期暴露仍存在明确的健康风险。本研究结果为系统评估该类气溶胶的长期暴露健康效应提供了重要的数据支持。

参考文献 (References) :

- [1] SOLEIMANI F, DOBARADARAN S, DE LA TORRE G E, et al. Content of toxic components of cigarette, cigarette smoke vs cigarette butts: A comprehensive systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152667.
- [2] HABRE R, DORMAN D C, ABBATT J, et al. Why indoor chemistry matters: A national academies consensus report[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(15): 10560–10563.
- [3] 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 Yali, WANG Jinbang, ZHENG Xinzhang, et al. Current status and prospect of heat-not-burn tobacco products[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2018, 24(4): 91–106.
- [4] UPADHYAY S, RAHMAN M, JOHANSON G, et al. Heated tobacco products: Insights into composition and toxicity[J]. *Toxics*, 2023, 11(8): 667.
- [5] SIMONAVICIUS E, MCNEILL A, SHAHAB L, et al. Heat-not-burn tobacco products: A systematic literature review[J]. *Tobacco Control*, 2019, 28(5): 582–594.
- [6] LI Xiangyu, LUO Yanbo, JIANG Xingyi, et al. Chemical analysis and simulated pyrolysis of tobacco heating system 2.2 compared to conventional cigarettes[J]. *Nicotine & Tobacco Research*, 2019, 21(1): 111–118.
- [7] 周昆, 杨继, 杨柳, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶研究进展 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23(5): 121–129.
ZHOU Kun, YANG Ji, YANG Liu, et al. Research advances related to heat-not-burn cigarette aerosol[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017, 23(5): 121–129.
- [8] 张霞, 朱东来, 李寿波, 等. 电加热雾化技术在降低卷烟烟气有害成分中的应用研究 [J]. 中国烟草学报, 2016, 22(6): 3–10.
ZHANG Xia, ZHU Donglai, LI Shoubo, et al. Application of electronic-heating atomizing technology in to reducing harmful components in cigarette mainstream smoke[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2016, 22(6): 3–10.
- [9] WEN Zuoying, GU Xuejun, TANG Xiaofeng, et al. Time-resolved online analysis of the gas- and particulate-phase of cigarette smoke generated by a heated tobacco product using vacuum ultraviolet photoionization mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2022, 238: 123062.
- [10] HEIDE J, ADAM T W, JACOBS E, et al. Puff-resolved analysis and selected quantification of chemicals in the gas phase of E-cigarettes, heat-not-burn devices, and conventional cigarettes using single-photon ionization time-of-flight mass spectrometry (SPI-TOFMS): A comparative study[J]. *Nicotine & Tobacco Research*, 2021, 23(12): 2135–2144.
- [11] 陈昆, 黄福利, 吴承澄, 等. 高发射率发热针对加热卷烟温度及气溶胶释放的影响 [J]. 轻工学报, 2024, 39(6): 108–115.
CHEN Kun, HUANG Fuli, WU Chengcheng, et al. The impact of high-emissivity heating pins on temperature and aerosol emission in heated tobacco products[J]. *Journal of Light Industry*, 2024, 39(6): 108–115.
- [12] 魏信建, 邹金慧, 郑绪东, 等. 电磁式卷烟加热器磁热耦合数值模拟研究 [J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(6): 42–48.
WEI Xinjian, ZOU Jinhui, ZHENG Xudong, et al. Numerical simulation of electromagnetic-thermal coupling of electromagnetic cigarette heater[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 36(6): 42–48.
- [13] 段伟, 徐继藩, 尤俊衡, 等. 电磁加热烟具励磁线圈对感应温度影响仿真分析 [J]. 电视技术, 2022, 46(5): 30–33+37.
DUAN Wei, XU Jifan, YOU Junheng, et al. Simulation analysis of the influence of the electromagnetic tobacco heater

- p>coil on the induction temperature[J]. Video Engineering, 2022, 46(5): 30–33+37.
- [14] 黄婷, 吴聪, 唐良颖, 等. 红外辐射材料在加热不燃烧 (HNB) 烟草中的应用研究 [J]. *应用物理*, 2024, 14(6): 481–488.
HUANG Ting, WU Cong, TANG Liangying, et al. Research on the application of infrared radiation materials in heat-not-burn tobacco products[J]. *Applied Physics*, 2024, 14(6): 481–488.
- [15] 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 Xiaoxi, LUO Mengrou, YOU Junheng, et al. Effects of heating temperature on releases of chemical components in aerosol[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(12): 46–58.
- [16] 郑绪东, 李志强, 王程娅, 等. 不同加热温度下电加热不燃烧卷烟烟气释放特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46(36): 168–171.
ZHENG Xudong, LI Zhiqiang, WANG Chengya, et al. Study on release characteristics of electrically heat-not-burn cigarette smoke under different heating temperatures[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(36): 168–171.
- [17] 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 Shuguo, LIU Wei, HUANG Ping, 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.
- [18] FU Lili, HAN Jingmei, ZHANG Qi, et al. Thermal state of tobacco materials in an electrically heated tobacco product (eHTP): Evaluation framework and experimental verification[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2025, 186: 106931.
- [19] 周顺, 王孝峰, 宁敏, 等. 烟草低温加热状态下气溶胶粒径分布及影响因素 [J]. 烟草科技, 2016, 49(9): 76–81.
ZHOU Shun, WANG Xiaofeng, NING Min, et al. Aerosol particle size distribution of tobacco heated at low temperature and its influencing factors[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(9): 76–81.
- [20] 王孝峰, 周顺, 何庆, 等. 加热状态下烟草气溶胶释放特性的影响因素: 温度、甘油和气氛 [J]. 烟草科技, 2017, 50(10): 48–54.
WANG Xiaofeng, ZHOU Shun, HE Qing, et al. Factors influencing aerosol release characteristics of tobacco heated at low temperature: Temperature, glycerol and atmosphere[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(10): 48–54.
- [21] 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 Le, WANG Yalin, LI Zhiqiang, 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.
- [22] 杨志博, 康艺馨. 挥发性有机物生成二次有机气溶胶影响因素的研究进展 [J]. 能源环境保护, 2020, 34(4): 12–16.
YANG Zhibo, KANG yixin. Research progress on influencing factors of secondary organic aerosols formation from volatile organic compounds[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 12–16.
- [23] 司晓喜, 汤建国, 朱瑞芝, 等. 两种抽吸模式下电加热不燃烧卷烟烟气气溶胶的粒径分布 [J]. 烟草科技, 2018, 51(8): 47–52.
SI Xiaoxi, TANG Jianguo, ZHU Ruizhi, et al. Aerosol particle size distribution from an electrical heat-not-burn product under ISO and HCI smoking regimes[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(8): 47–52.
- [24] ZARVALIS D, BALTZOPOULOU P, DELOGLOU D, et al. Assessment of particulate matter emissions from tobacco products[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2025, 25(6): 24.
- [25] PACITTO A, STABILE L, SCUNGIO M, et al. Characterization of airborne particles emitted by an electrically heated tobacco smoking system[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 248–254.
- [26] 韩咚林, 刘锴, 梁坤, 等. 加热卷烟气溶胶陈化特性的双模态粒径分布及动力学特性 [J]. 烟草科技, 2021, 54(12): 53–63.
HAN Donglin, LIU Kai, LIANG Kun, et al. Bimodal particle size distribution and aging kinetics of heated tobacco product aerosol[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(12): 53–63.
- [27] EINAR, KUSTERS, PRATSINIS E, et al. A simple model for the evolution of the characteristics of aggregate particles undergoing coagulation and sintering[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1993, 19(4): 514–526.
- [28] KANG Jialin, ZHANG Yue, FULK S, et al. Modeling amine aerosol growth in the absorber and water wash[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 959–976.
- [29] 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 Huapeng, CHEN Li, FAN Meijuan, et al. Effects of heating temperature on physical properties of aerosol from heated tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(4): 36–41.
- [30] World Health Organization. Air quality guidelines: global update 2005[S]. World Health Organization. Regional Office for Europe, 2006: 9–19.
- [31] MILLER M R, RAFTIS J B, LANGRISH J P, et al. Inhaled nanoparticles accumulate at sites of vascular disease[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 4542–4552.