



胡安福,金一骁,孙通,等. 通风孔数对加热卷烟气溶胶逐口粒径及化学组分释放影响[J]. 轻工学报, 2026, 41(4): 66-74.
HU A F, JIN Y X, SUN T, et al. Effects of the number of ventilation holes on the puff-by-puff particle size and chemical component release of heated tobacco product aerosol[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(4): 66-74.
DOI: 10.12187/2026.04.006

通风孔数对加热卷烟气溶胶逐口粒径及化学组分释放影响

胡安福¹, 金一骁¹, 孙通², 夏骏¹, 许汇锋², 陈玲红², 王凯歌², 蒋健¹

1. 浙江中烟工业有限责任公司 技术中心, 浙江 杭州 310024;
2. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要:【目的】明确通风孔数对加热卷烟气溶胶逐口释放的物理参数及化学组分释放规律的作用。【方法】以细支周向加热卷烟为研究对象,通过设置通风孔数为30孔、40孔和50孔改变样品通风率,采用扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪(SMPS)和气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术测定逐口气溶胶粒径分布、D50、数浓度及VOCs、甘油和烟碱含量。【结果】不同通风孔数条件下,逐口气溶胶粒径均呈双峰分布;随着通风孔数增加,粒径峰值、D50和数浓度均表现为先减小后增大的趋势。通风孔数为50孔时,气溶胶总数浓度最大,通风孔数为40孔时,逐口释放稳定性较好。VOCs逐口组分变化与数浓度相关性较弱,且有机组分相对含量随通风孔数增加而降低。烟碱含量与气溶胶数浓度呈一定正相关,甘油含量与数浓度相关性较小,整体呈先增大后减小趋势。【结论】通风孔数会显著影响加热卷烟气溶胶的逐口粒径分布、数浓度及化学组分释放特征,且二者之间呈非线性关联。

关键词: 通风孔数; 加热卷烟; 气溶胶; 粒径; 化学组分

中图分类号: TS275.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)04-0066-09

0 引言

作为烟草产业重要的新兴产品^[1],加热卷烟借助加热器具在较低温度下实现烟碱等组分的释放,降低气溶胶中焦油的生成^[2],进而降低对健康的危害,因此受到业界广泛关注^[3-6]。加热卷烟气溶胶是一种复杂的体系,其生成及扩散过程受加热温度、卷烟原料、通风条件等多因素影响。加热卷烟

气溶胶的粒径分布、数浓度及化学组分是评价其生成与递送特性的关键参数,一定程度上体现气溶胶的品质特征。已有研究^[1]表明,加热卷烟气溶胶粒径主要分布在纳米尺度范围内,且逐口抽吸过程中粒径分布和颗粒浓度会发生动态变化。韩咚林等^[7]采用理论计算分析了甘油含量对加热卷烟气溶胶粒径分布的影响,并借助电子低压撞击器(Electrical Low Pressure Impactor, ELPI)测得气溶胶

收稿日期: 2024-12-17; 修回日期: 2025-01-07; 出版日期: 2026-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0111600); 浙江中烟科技项目(ZJZY2023C004)

作者简介: 胡安福(1982—),男,浙江省金华市人,浙江中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟草化学。E-mail: huanfu@zjtobacco.com

通信作者: 蒋健(1978—),男,浙江省丽水市人,浙江中烟工业有限责任公司高级工程师,主要研究方向为烟草化学。E-mail: kaigewang@zju.edu.cn

粒径范围为 10~1000 nm。Z. Y. Wen 等^[8-9]采用扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS)对加热卷烟逐口气溶胶粒径分布进行表征,发现其粒径主要分布在 20~900 nm,且不同抽吸口序之间的粒径分布存在差异。上述研究结果说明,加热卷烟气溶胶粒径分布具有明显的逐口变化特征,其形成过程可能受加热条件、气流输运及组分蒸发冷凝行为的共同影响。

除粒径分布外,气溶胶中挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)、烟碱、甘油等化学组分也是影响加热卷烟气溶胶理化特性的重要因素。J. P. Schaller 等^[10-12]采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术分析了加热卷烟气溶胶中的水分、甘油、烟碱等组分,指出水分、甘油和烟碱是气溶胶中的主要成分。R. A. Sussman 等^[13]综述了加热卷烟气溶胶的研究进展,认为甘油可作为气溶胶成核和生长过程中的重要物质,同时指出加热卷烟气溶胶中仍可能存在 VOCs 等副产物。徐月玲等^[14]研究发现,卷烟加香可改善感官品质,并对气溶胶中烟碱和甘油的迁移与递送产生一定影响。气溶胶粒径分布及 VOCs、烟碱、甘油等关键物质含量是表征加热卷烟气溶胶生成与递送特性的重要指标,也为进一步分析通风条件对气溶胶理化特性的影响提供了基础。

加热卷烟通风条件会影响气溶胶的流动状态,同时也影响气溶胶的演化过程。芦昶彤等^[15]通过改变常规卷烟长度得到不同通风率样品,发现通风率会影响气溶胶的逐口释放量。张博等^[16]通过改变激光开孔功率得到通风孔数相同但通风率存在差异的加热卷烟,发现滤嘴通风率对气溶胶中烟碱和甘油生成量具有显著影响。司晓喜等^[17]采用 HCI 与 ISO 2 种抽吸模式,通过改变抽吸气流量实现通风量的改变,并得出抽吸容量增加导致颗粒粒径中值增大的结论。加热卷烟通风率的改变会影响气溶胶的生成量,直接影响抽吸过程与感官体验。此外,通风孔数的改变会影响抽吸过程中的气流速度与气流量,进而改变气溶胶的生成、输运和扩散过程,最终影响气溶胶释放特性。然而,现

有研究多通过改变烟支长度、开孔直径或抽吸模式调控通风条件,关于通风孔数变化对加热卷烟逐口气溶胶粒径分布及化学组分释放特征的影响鲜有报道。

鉴于此,本文拟以细支周向加热卷烟为研究对象,采用 HCI 抽吸方式,得到不同通风孔数卷烟在抽吸过程中产生的逐口气溶胶,借助 SMPS、GC-MS 仪等分析其粒径分布、D50、数浓度等物理参数及 VOCs、甘油、烟碱等化学组分含量,以期阐明通风孔数对加热卷烟气溶胶的影响,为加热卷烟通风结构优化和气溶胶释放特性调控提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

主要材料:同一批次某牌号细支加热卷烟,配套相应的加热器具,采用周向型加热方式,加热温度最高为 230 ℃,由浙江中烟工业有限责任公司提供;异丙醇(AR),天津市富宇精细化工有限公司;丙三醇(AR),国药集团化学试剂有限公司;正十七烷(纯度≥98.5%),北京百灵威科技有限公司;烟碱(纯度>97.0%),国家烟草质量监督检测中心。

主要仪器:SM450 型单孔道吸烟机,英国 Cerulean 公司;44 mm 剑桥滤片,英国 Whatman 公司;3936 型 SMPS,美国 TSI 公司;7890A/5975C 型 GC-MS 仪、7890B/5977A 型 GC-MS 仪,美国 Agilent 公司;7100A 型 VOC 预浓缩仪,美国 Entech 公司;SES1518 型空压机,美国 POWEREX 公司;737 系列纯净零空气发生器,美国 AASCO 公司;IDFB31 型除湿器,日本 SMC 公司;CP224S 型电子天平(感量 0.000 1 g),德国 Sartorius 公司;HY-5 型振荡器,江苏金坛中大仪器厂;0.22 μm 滤膜,中国天津津腾公司;一次性使用无菌注射器(1 mL),河南曙光健士医疗器械集团股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 加热卷烟样品制备 以圆周 17 mm 的细支周向型加热卷烟为研究对象,总长度 84 mm,烟芯段 42 mm,滤嘴部分 10 mm,二者中间为中空段,长度

32 mm。在距离烟芯末端 22 mm 处,使用激光打孔的方法沿周向均匀双排开孔,开孔位置如图 1 所示。

烟支开孔会改变卷烟的通风条件,影响加热卷烟气溶胶的理化特性。通过预实验和文献调研^[15-17],相较未开孔的烟支,开孔后的卷烟气溶胶浓度明显增加。因此,选择不同双排通风孔数的烟支作为研究对象,设置通风孔数分别为 30 孔、40 孔、50 孔,对应的通风率分别为 55.27%、63.99%、69.65%,探究不同通风孔数对加热卷烟气溶胶理化性质的影响。

1.2.2 实验系统 实验装置图如图 2 所示,主要包括气溶胶生成系统与气溶胶检测系统。气溶胶生成系统是由卷烟加热装置和抽吸装置组成。卷烟加热装置包含零空气发生系统、环境温湿度控制系统、恒温恒湿腔体、卷烟加热器具等。零空气发生系统产生的零空气经除水装置净化后,通入环境温湿度控制系统产生温湿度恒定的空气并充满整个恒温恒湿腔体,腔体内置温湿度计,实现腔体内的温湿度调节。设置恒温恒湿腔体的目的是减少实验过程中由于环境气氛改变带来的实验误差,因此实验过程中需保持腔体内温湿度恒定,温度变化

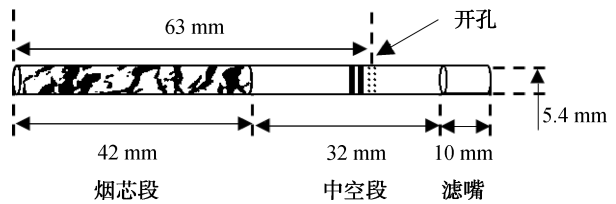


图 1 加热卷烟结构图

Fig. 1 Schematic diagram on the structure of a heated tobacco product

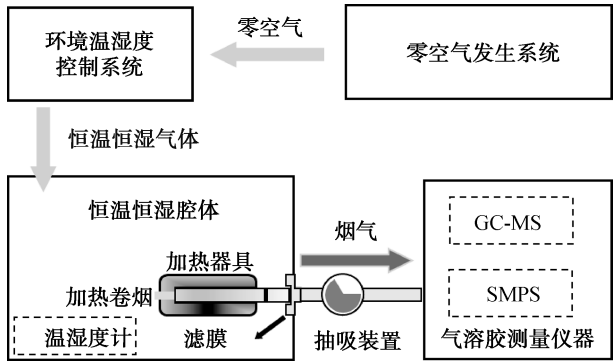


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度变化 $\pm 2\%$ 。抽吸装置由电脑控制的直线型单孔道吸烟机组成,可实现加热卷烟稳定抽吸。

气溶胶检测系统包括 SMPS 及 GC-MS 仪,实现对气溶胶中凝聚相粒径参数与组分及烟气的相组分测量。SMPS 用于测量逐口卷烟气溶胶凝聚相颗粒粒径及其分布特征,GC-MS 仪用于测试凝聚相组分和非颗粒相组分。凝聚相组分测试是将卷烟气溶胶通过剑桥滤片富集,再将滤片进行萃取得到甘油与烟碱的萃取液,最后将萃取液通过 GC-MS 仪进行测试,并根据标准物质曲线进行标定,得到凝聚相中甘油和烟碱含量。烟气中气相前体物借助预浓缩仪与 GC-MS 联用检测装置,定量测量气溶胶中 VOCs 含量,测量方法与文献^[18]相同,选取卷烟烟气气溶胶中相对含量较多的物质进行归一化处理分析。

1.2.3 气溶胶粒径测量 选择通风孔数分别为 30、40、50 的加热卷烟,在温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 50% 条件下静置 48 h,然后采用 HCl 模式进行抽吸,抽吸体积 55 mL,抽吸时间 2 s,抽吸间隔 30 s,单支卷烟共抽吸 7 口。将逐口气溶胶通入充满 7 L 零空气的气体采集装置中,使用 SMPS 对逐口气溶胶进行粒径测量,重复 3 次实验,结果取平均值。实验过程中,设定 SMPS 粒径测量范围为 $10\sim 1000\text{ nm}$,进气速率为 0.3 L/min ,单次抽吸产生的气溶胶稀释 129 倍。为减小实验误差,相邻 2 口气溶胶中添加空白样品,避免待测样品在设备中残留,相邻 2 个样品之间的测量误差不超过 5%。

1.2.4 加热卷烟烟气 VOCs 组分测量 将剑桥滤片作为凝聚相颗粒过滤器,采用 1.2.3 的实验方法,将过滤后的逐口烟气的气相组分通入充满 7 L 零空气的气体采集装置中,使用预浓缩仪与 GC-MS 联用检测装置对逐口卷烟气溶胶中的 VOCs 组分进行定量测量,并选取逐口卷烟气溶胶中相对含量较多的组分,如正戊烷、正己烷、2-甲基庚烷、甲苯、对二甲苯、邻二甲苯、丙酮、乙酸乙烯酯等,对 VOCs 每种组分分别进行归一化处理,得到逐口卷烟气溶胶 VOCs 组分相对含量变化数据,以揭示各组分相对含量的变化趋势。

1.2.5 气溶胶烟碱与甘油含量测量 根据 1.2.3 的实验方法,在抽吸装置前端放置含剑桥滤片的过滤收集装置,7 个滤片上分别收集逐口卷烟气溶胶 20 次,即单支卷烟抽吸 7 口,共收集相同通风孔数的 20 支加热卷烟。将得到的剑桥滤片按照《卷烟总颗粒物中烟碱的测定 气相色谱法》(GB/T 23355—2009)^[19]与《烟草及烟草制品 1,2-丙二醇、丙三醇的测定 气相色谱法》(YC/T 243—2008)^[20]测量甘油和烟碱含量,结果取平均值。

1.3 数据处理

通过 SMPS 获取逐口粒径及数浓度等参数信息。利用 Origin 2022 软件对数据进行可视化处理,根据内置函数对粒径分布进行高斯拟合,得到逐口气溶胶粒径分布。根据气溶胶的逐口粒径分布,计算累计粒度分布及 D50,并利用 D50 得到不同通风孔数卷烟气溶胶的 D50 平均值。采用 Origin 2022 软件对 VOCs 的相对含量进行热图绘制,得到卷烟气溶胶中 VOCs 组分的变化特征图谱。

2 结果与分析

2.1 通风孔数对卷烟气溶胶颗粒的影响分析

2.1.1 通风孔数对气溶胶粒径分布的影响 不同通风孔数卷烟气溶胶粒径分布特征如图 3 所示。由图 3a)可知,当通风孔数为 30 孔时,逐口气溶胶粒径表现为双峰分布状态^[7],且逐口气溶胶的第 1 个数浓度峰较高,对应的颗粒粒径范围为 113.4~181.1 nm,

但后续几次粒径范围为 168.5~181.1 nm,表明相对于第 1 个数浓度峰,前 2 口以粒径小于 150 nm 的小颗粒为主。第 2 个数浓度信号峰对应的颗粒粒径范围为 209~279 nm,且除第 1 口外,逐口数浓度峰值随抽吸时间延长不断降低。

由图 3b)可知,通风孔数增大至 40 孔时,逐口气溶胶数浓度开始下降,但整体仍呈现双峰分布。与通风孔数为 30 孔时相比,多数逐口气溶胶数浓度峰信号在第 1 个峰处出现最大值,仅第 4 口出现第 2 个数浓度峰略增加的现象。表明通风孔数增加,气溶胶中粒径小于 200 nm 的颗粒数量随之增加,这可能是因为增加通风孔数在一定程度上会增大环境气氛从通孔处进入气溶胶的几率,导致气溶胶被环境气氛稀释,减少颗粒碰撞概率,使小颗粒未能进一步凝聚形成大颗粒。同时,通风率增加会降低从烟支前端进入卷烟内部的主流气流量,使热解产物向气溶胶凝聚相中的输运量减少。张博等^[16]也指出,当通风率在 60%左右时,烟丝段单位气体体积中水分的产生会有所降低,气溶胶中凝聚相浓度进一步减少,出现信号峰降低的现象。此外,相较于 30 孔,40 孔条件下第 2 个数浓度峰对应的颗粒粒径范围减小,为 209~251 nm;同时,由于气溶胶数浓度减少与环境气氛的稀释作用,导致第 2 个数浓度峰差异较小。

由图 3c)可知,通风孔数为 50 孔时,加热卷烟气溶胶粒径为双峰分布,且逐口气溶胶数浓度出现不同程度增加^[16],双峰分布中第 1 个数浓度峰逐口

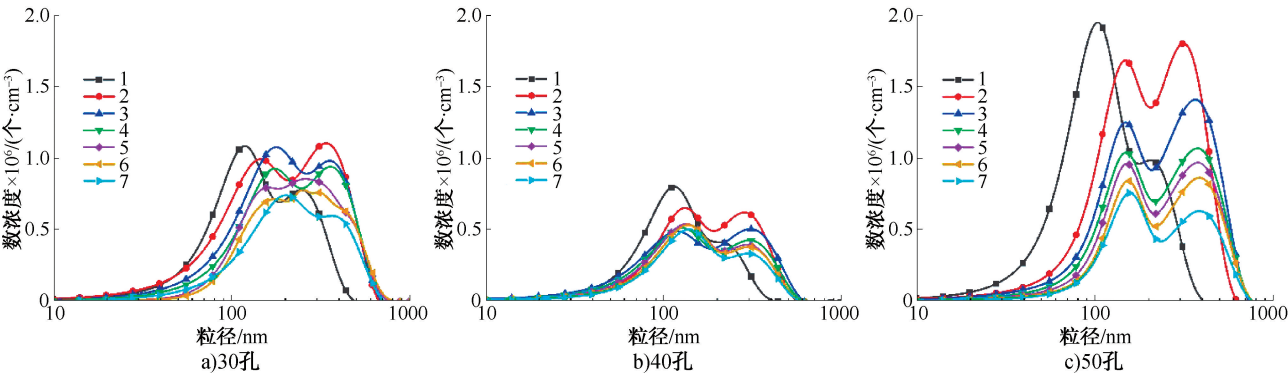


图 3 不同通风孔数卷烟气溶胶粒径分布特征
Fig. 3 Puff-by-puff aerosol particle size distribution characteristics of cigarettes with different numbers of ventilation holes

变化为逐渐减少,第 2 个数浓度峰随抽吸次数先增大后减小。第 1 个数浓度峰对应的颗粒粒径范围为 101~163 nm,第 2 口以后的数浓度峰对应的颗粒粒径范围变窄,为 145~163 nm。除第 1 口与最后 1 口外,逐口气溶胶第 2 个数浓度峰均高于第 1 个数浓度峰。表明在该实验条件下,气溶胶中凝聚相以大颗粒物质为主,通风孔数增加,气流量增大,对气溶胶稀释作用增强。但过多的通风孔数会导致气流在开孔处发生相互干扰,从而形成扰流,提高颗粒相互碰撞几率,增大气溶胶颗粒粒径;同时,大量环境气氛从开孔处进入中空部分,导致烟芯段空气流量减小。罗萌柔等^[21]提到烟芯段气流流速降低,将削弱流体与烟丝之间的热损耗,增加有机组分分析出几率,导致其数浓度峰出现升高现象。

综上所述,通风孔数会影响加热卷烟气溶胶粒径分布特征,且不同通风孔数逐口气溶胶粒径均呈双峰分布状态。通风孔数与数浓度峰值之间不存在正相关性,在较低通风孔数(30 孔)和较高通风孔数(50 孔)时,存在较大数浓度峰值,通风孔数为(40 孔)时,逐口气溶胶数浓度峰值较低,这可能是因为通风孔数会改变卷烟通风率,进而影响卷烟的进气流量分配,改变数浓度峰值特征。

2.1.2 通风孔数对气溶胶 D50 与数浓度的影响

与气溶胶粒径分布不同,气溶胶 D50 可表示气溶胶颗粒的累计粒度分布状态,能直观反映气溶胶的粒径特征。不同通风孔数卷烟气溶胶凝聚相参数如图 4 所示。由图 4a)和 b)可知,不同通风孔数产生

的逐口气溶胶 D50 变化趋势存在差异,当通风孔数为 30 孔时,逐口气溶胶 D50 随抽吸次数增加缓慢增大。增加通风孔数至 40 孔时,逐口气溶胶 D50 较通风孔数为 30 孔和 50 孔时大幅减小,并随抽吸口数增加出现先增大后减小的现象,与气溶胶粒径分布特征相似。这可能是由于该实验条件下,通风孔数增加会导致通过烟支的气流量减少,进而减小气溶胶中凝聚相的浓度,同时通风处气流量增大对气溶胶颗粒的稀释作用增加,进而降低颗粒团聚概率。通风孔数增大至 50 孔时,逐口气溶胶 D50 整体呈不断增大的趋势,第 4 口与最后 1 口小幅度减小,除第 1 口外,逐口气溶胶 D50 均大于其余开孔条件,表明增大通风孔数至 50 孔时,气溶胶中大颗粒数量增加,可能与气流扰动等增加小颗粒成核或团聚几率有关,且烟芯段流体的缓慢流动会增加有机组分逸出几率,增加大颗粒数浓度。气溶胶最大 D50 分布在通风孔数为 50 孔时,但其逐口变化差异最小值在开孔数为 40 孔时出现。

相较于其他气溶胶凝聚相参数,气溶胶数浓度能直观反映气溶胶的品质特征。由图 4c)可知,通风孔数 40 孔时,气溶胶数浓度峰值及颗粒粒径较小,但其逐口气溶胶粒径较接近,表现出相对稳定的气溶胶粒径分布特征,即该条件下气溶胶的释放趋于稳定,而逐口气溶胶的稳定释放是卷烟气溶胶品质优良的重要体现。整体气溶胶粒数浓度最大值在通风孔数为 50 孔时。逐口气溶胶数浓度随抽吸口数增加表现出先增大后减小的趋势,其中逐口

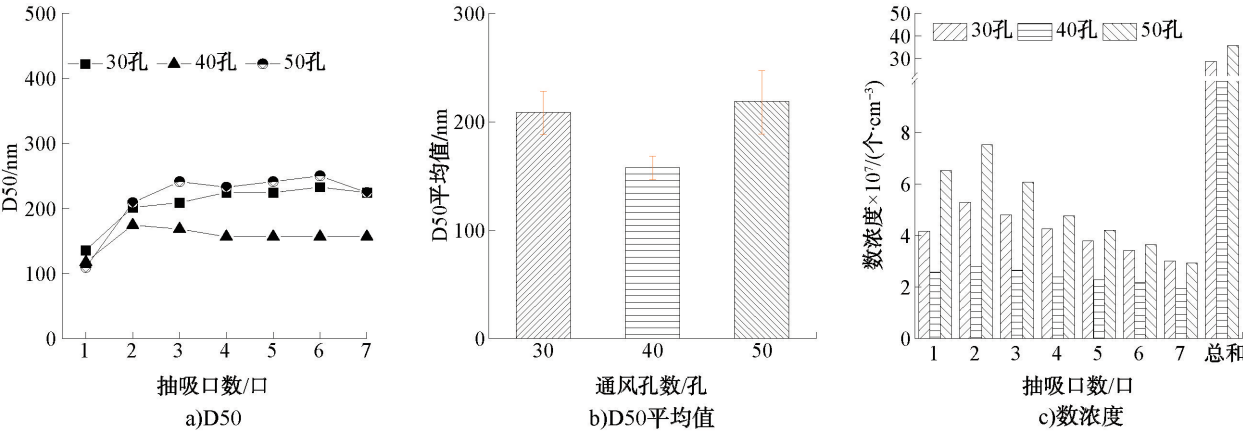


图 4 不同通风孔数卷烟气溶胶凝聚相参数

Fig. 4 Aerosol condensed phase parameters of HTPs with different numbers of ventilation holes

气溶胶最大数浓度均出现在第 2 口抽吸处。不同通风孔数的加热卷烟气溶胶总数浓度与通风孔数呈非线性相关,通风孔数由 30 孔增大至 40 孔时,总气溶胶数浓度降低约 41.4%,而增大通风孔数至 50 孔时,相比通风孔数为 40 孔的总气溶胶数浓度增长超过 100%,即加热卷烟气溶胶总数浓度随通风孔数增加表现出先减小后增大的趋势,这也在逐口气溶胶数浓度与粒径分布特征中体现。

逐口气溶胶数浓度随抽吸次数变化趋势为先增大后减小,但相比 30 孔,通风孔数为 40 孔时其逐口气溶胶数浓度出现不同程度减少,减少量最大值在第 2 口处,减少约 46.8%,其余逐口减少量均大于 35.0%。通风孔数增加至 50 孔时,逐口气溶胶数浓度大幅增加,第 2 口气溶胶数浓度增加超过 1.6 倍,变化量最小为最后 1 口,增加量约 50.0%。表明对于加热卷烟气溶胶,当通风孔数为 50 孔时,较大的通风孔数会改变卷烟加热过程中内部流场的扰动,而通风处的气流扰动会增加颗粒碰撞几率,同时降低气溶胶温度,导致气相组分快速冷凝,增大颗粒数浓度。此外,如逐口粒径分布中提到,烟芯段气流的缓慢流动在减少热损耗的同时会增加有机组分逸出概率。张博等^[16]通过实验也指出,通风率超过 60.0%时,烟丝段有机组分的生成量将增加,进而促进有机组分逸出进入气溶胶中,导致气溶胶数浓度增加。

2.2 通风孔数对加热卷烟烟气 VOCs 的影响分析

加热卷烟气溶胶中的 VOCs 被认为气溶胶组分的前驱体^[13],其相对含量变化与气溶胶颗粒粒径及数浓度存在一定关联性。在加热卷烟持续加热过程中,烟草基质中气相物质在温度作用下不断逸出,形成 VOCs 组分^[21],受卷烟通风率影响,VOCs 含量会随抽吸时间延长发生改变^[13]。

不同通风孔数加热卷烟烟气 VOCs 组分特征如图 5 所示。由图 5 可知,通风孔数增加,逐口烟气中 VOCs 组分的相对含量随之减少。通风孔数为 30 孔时,逐口烟气中 VOCs 组分相对含量较高,相对分子质量较小的物质如正戊烷、正己烷、丙酮、乙酸乙烯酯等更明显,这些物质在逐口烟气中的相对含量随

抽吸口数增加呈先增大后减小的趋势,相对含量峰值出现在第 5 口处。2-甲基庚烷等在通风孔数为 50 孔时逐口相对含量降低至通风孔数为 40 孔时的一半左右,表明通风孔数增加会导致开孔处扰流作用更显著,对 VOCs 组分的降温效果更明显,进而减少 VOCs 组分的相对含量。此外,结合 2.1.2 中气溶胶数浓度,50 孔时存在卷烟气溶胶颗粒数浓度最大值,凝聚相颗粒在流动过程中可能存在颗粒对气相组分的吸附作用,进而降低气相组分相对含量。随着颗粒数浓度不断降低,气相组分相对含量开始增加,因此存在部分 VOCs 组分相对含量不断升高的现象。随着抽吸口数增加,加热卷烟烟丝内有机化合物不断减少,导致多数 VOCs 组分相对含量不断下降。

2.3 通风孔数对气溶胶甘油和烟碱含量的影响分析

卷烟气溶胶组分中,甘油被认为是气溶胶中的关键组分,相对含量占比接近 50%。不同通风孔数加热卷烟气溶胶的甘油和烟碱含量如图 6 所示。由图 6a)可知,不同通风孔数加热卷烟气溶胶中的甘油含量变化相似,整体呈先增大后减小的趋势,区别在于当通风孔数较少时,如 30 孔,其逐口气溶胶中甘油含量最高在第 4 口,而通风孔数增加至 40 孔或 50 孔时,甘油含量最高出现在第 3 口。通风孔数增加,甘油生成总量先减少后增大,通风孔数为 30 孔时存在气溶胶甘油含量最大值,即甘油总生成量与气溶胶总数浓度分布相似。但逐口气溶胶中甘油生成量与逐口气溶胶数浓度关联性较小,在最大

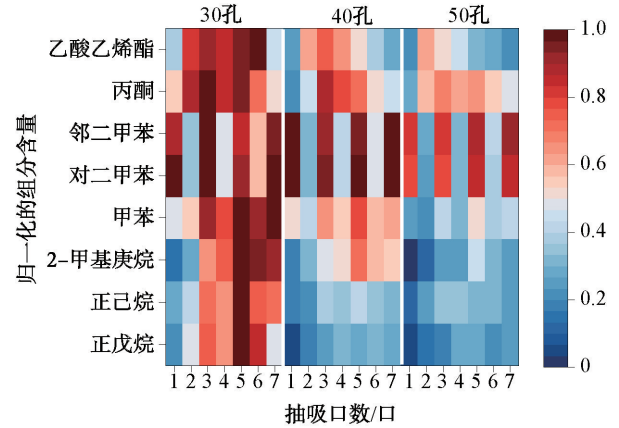


图 5 不同通风孔数加热卷烟烟气 VOCs 组分特征
Fig. 5 VOC profiles of HTP aerosol with different numbers of ventilation holes

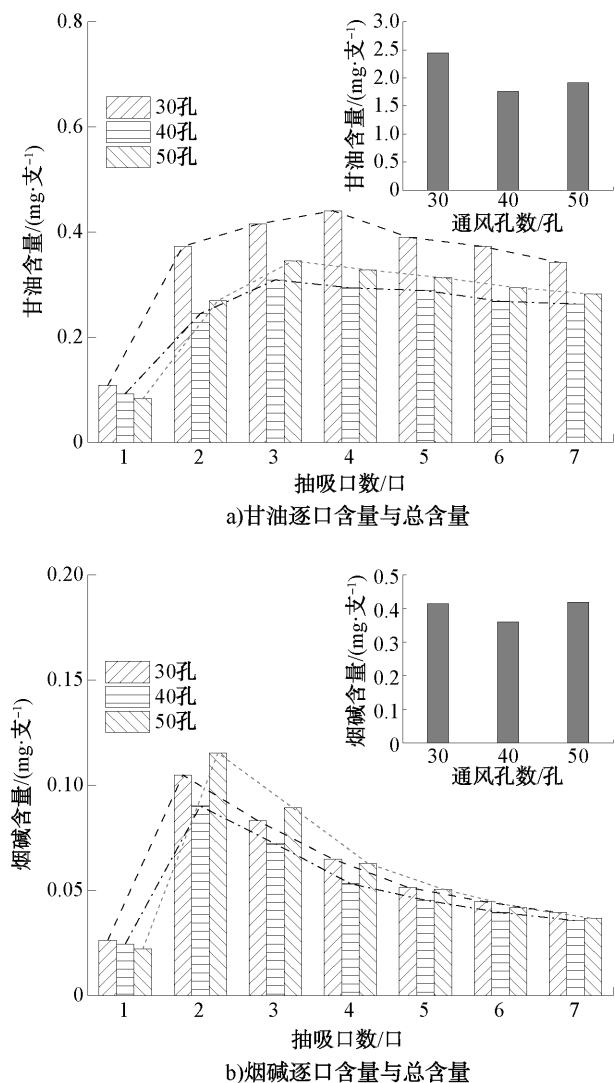


图6 不同通风孔数加热卷烟气溶胶的甘油和烟碱含量

Fig. 6 Condensed-phase components of HTP aerosol with different numbers of ventilation holes

逐口气溶胶数浓度处,甘油含量未达到最高值。通风孔数增加,开孔处进气量增加,烟支前端进气量相对减少,加热产生气溶胶的携带气减少,这进一步减少气溶胶的生成量,但通风率增大可能导致烟芯段流体流速减慢,降低烟丝与流体之间热损耗,增加有机组分逸出。同时,通风孔数增加将增大滤嘴端气流量,导致气溶胶快速降温,发生冷凝团聚,增加甘油等组分形成初始纳米颗粒的几率^[16]。因此,当通风孔数增大至50孔时,甘油等易冷却物质在气溶胶中含量增加。

烟碱作为加热卷烟气溶胶中的关键组分,受到业界普遍关注,其逐口含量变化与甘油存在差异。

由图6b)可知,逐口气溶胶中烟碱含量分布整体呈先增加后减小的趋势。烟碱含量分布与逐口气溶胶颗粒数浓度呈正相关,即颗粒数浓度增加,气溶胶中烟碱含量亦增加,二者在第2口处均存在最大值。与数浓度分布相似,气溶胶中烟碱含量变化最明显为前2口,第1口产生的气溶胶组分多以水蒸气为主,烟碱含量较低;抽吸第2口时,烟碱等有机组分快速逸出进入气溶胶,导致其含量快速上升。加热卷烟总气溶胶中烟碱含量与通风孔数呈非线性相关,随通风孔数增加,单支卷烟气溶胶中烟碱生成量表现为先减少后增加,表明通风孔数增大会减少烟支气流量,降低气溶胶中烟碱含量,而高速气流在对烟碱降温的同时会减少烟芯段的热损耗,导致其在较少携带流与快速扰流条件下,气溶胶中烟碱仍保持较高含量。

3 结论

本文以细支周向加热卷烟为研究对象,采用SMPS与GC-MS分析方法,测量通风孔数为30孔、40孔和50孔时加热卷烟气溶胶粒径分布、D50、数浓度及VOCs、甘油和烟碱的逐口含量,探究通风孔数对加热卷烟气溶胶逐口粒径及化学组分释放的影响。结果表明,逐口气溶胶粒径峰值、D50及气溶胶数浓度等参数随通风孔数增加均表现为先减小后增大,其中气溶胶总数浓度最大值出现在通风孔数为50孔时,但通风孔数减少至40孔时,逐口气溶胶释放趋于稳定。卷烟烟气中VOCs逐口组分变化与数浓度关联性较小,通风孔数增加会减小VOCs组分相对含量,通风孔数为30孔时,烟气中VOCs组分相对含量存在最大值。不同通风孔数加热卷烟的逐口气溶胶中烟碱与甘油含量存在区别,烟碱逐口含量分布与凝聚相数浓度相关,第2口时存在最大值,而甘油逐口最高含量出现在第3口或第4口时,相同点为通风孔数为30孔和50孔时均存在总含量较大值,即通风孔数与逐口组分非线性关联。本研究明晰了通风孔数调控加热卷烟气溶胶理化释放的非线性作用机制,未来将进行不同通风孔数条件下加热卷烟气溶胶的模拟实验,深入研究加热卷烟内部流场与温度场对气溶胶粒径与组分

的影响规律。

参考文献:

[1] 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.

[2] FEARON I M, CORDERY S F, FITZPATRICK M, et al. A scoping review of behavioural studies on heated tobacco products[J]. Cureus,2024,16(7):e65773.

[3] 黄朵朵,王乐,雷萍,等. 基于烟芯段和滤嘴段耦合的加热卷烟烟气关键成分释放模型构建[J]. 轻工学报,2024,39(6):116-126.
HUANG D D, WANG L, LEI P, et al. Modeling the release of key components of heated cigarette smoke based on the coupling of tobacco rod section and filter section[J]. Journal of Light Industry,2024,39(6):116-126.

[4] 郑燕婷,马婉婉,陈欢,等. 加热卷烟气溶胶特征性成分及其分析方法研究进展[J]. 烟草科技,2024,57(2):103-112.
ZHENG Y T, MA W W, CHEN H, et al. Research progress on characteristic components in aerosol from heated tobacco products and their analytical methods[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(2):103-112.

[5] 何红梅,尤晓娟,王鸣,等. 基于单料烟的加热卷烟与传统卷烟香气成分释放差异分析[J]. 轻工学报,2024,39(3):99-108.
HE H M, YOU X J, WANG M, et al. Differential analysis in aroma component release between heated cigarettes and traditional cigarettes based on unblended leaf tobacco[J]. Journal of Light Industry,2024,39(3):99-108.

[6] ZHANG B, XIAO L J, HUANG J J, et al. Numerical study on heat transfer and release characteristics of key components in electrically heated tobacco products[J]. International Journal of Chemical Engineering, 2024, 2024:6690487.

[7] 韩冬林,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 D L, LIU K, LIANG K, et al. Bimodal particle size distribution and aging kinetics of heated tobacco product aerosol[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(12):53-63.

[8] WEN Z Y, GU X J, TANG X F, 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.

[9] WEN Z Y, LI X Y, GU X J, et al. Online analysis of chemical composition and size distribution of fresh cigarette smoke emitted from a heated tobacco product[J]. MethodsX,2022,9:101912.

[10] SCHALLER J P, KELLER D, POGET L, et al. Evaluation of the Tobacco Heating System 2.2. Part 2: chemical composition, genotoxicity, cytotoxicity, and physical properties of the aerosol[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology,2016,81(Suppl 2):S27-S47.

[11] BENTLEY M C, ALMSTETTER M, ARNDT D, et al. Comprehensive chemical characterization of the aerosol generated by a heated tobacco product by untargeted screening[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020,412(11):2675-2685.

[12] 尚梦琦,于航,刘砚婷,等. 不同抽吸模式加热不燃烧卷烟各部位中烟气化学成分分布研究[J]. 科技创新与应用,2022,12(12):86-89.
SHANG M Q, YU H, LIU Y T, et al. Study on chemical composition distribution of flue gas in different parts of unburned cigarettes heated by different smoking modes[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(12):86-89.

[13] SUSSMAN R A, SIPALA F, EMMA R, et al. Aerosol emissions from heated tobacco products:a review focusing on carbonyls,analytical methods,and experimental quality[J]. Toxics,2023,11(12):947.

[14] 徐月玲,徐瑞霜,杨歌,等. 不同位置及加香水平对加热卷烟释放行为的影响[J]. 中国烟草学报,2024,30(2):98-105.
XU Y L, XU R S, YANG G, et al. Effects of different positions and flavoring levels on the release behavior of heated tobacco products[J]. Acta Tabacaria Sinica,2024, 30(2):98-105.

[15] 芦昶彤,王丁众,李鹏,等. 短支卷烟烟气香味成分逐口释放分析[J]. 烟草科技,2021,54(12):64-72,94.
LU C T, WANG D Z, LI P, et al. Puff-by-puff releases of aroma components in mainstream smoke of short cigarettes[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(12):64-72,94.

[16] 张博,杜文,王志国,等. 滤嘴通风率对加热卷烟气溶胶主要成分释放量的影响[J]. 烟草科技,2023,56(8):54-62.
ZHANG B, DU W, WANG Z G, et al. Effects of filter ventilation rate on releases of main aerosol components from heated tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(8):54-62.

[17] 司晓晔,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 X X,TANG J G,ZHU R Z,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.

[18] HAN L X, CHEN L H, LI K W, et al. Source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) during ozone polluted days in Hangzhou, China[J]. Atmosphere, 2019,10(12):780.

[19] GB/T 23355—2009 卷烟 总粒相物中烟碱的测定 气相色谱法[S].

GB/T 23355—2009 Cigarettes—Determination of nicotine in smoke condensates—Gas-chromatographic method[S].

[20] YC/T 243—2008 烟草及烟草制品 1,2-丙二醇、丙三醇的测定 气相色谱法[S].

YC/T 243—2008 Tobacco and tobacco products—Determination of 1,2-propylene glycol and glycerol—Gas chromatographic method[S].

[21] 罗萌柔,李世卫,赵杨,等. 点燃和加热条件下不同滤嘴通风率卷烟的气溶胶释放特征[J]. 烟草科技, 2023,56(2):53-61.

LUO M R, LI S W, ZHAO Y, et al. Aerosol release characteristics of cigarettes with different filter ventilation rates during burning or heating[J]. Tobacco Science & Technology, 2023,56(2):53-61.

[22] MIGLIACCIO R, CERCIELLO F, OLIANO M M, et al. Effect of oxidative atmospheres on thermochemical degradation of tobacco: discriminating between oxidative pyrolysis and combustion[J]. Fuel, 2024,374:132313.

Effects of the number of ventilation holes on the puff-by-puff particle size and chemical component release of heated tobacco product aerosol

HU Anfu¹, JIN Yixiao¹, SUN Tong², XIA Jun¹, XU Huifeng², CHEN Linghong², WANG Kaige², JIANG Jian¹

1. Technology Center, China Tobacco Zhejiang Industrial Co., Ltd., Hangzhou 310024, China;

2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: [Objective] To clarify the effect of the number of ventilation holes on the physical parameters and chemical component release of puff-by-puff aerosol from heated tobacco products (HTPs). **[Methods]** Circumferentially heated cigarettes were used as the test samples. The ventilation rate was varied by adjusting the number of ventilation holes, with three conditions of 30, 40, and 50 holes. A scanning mobility particle sizer (SMPS) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were employed to determine the puff-by-puff aerosol particle size distribution, D50, number concentration, and the contents of volatile organic compounds (VOCs), glycerol, and nicotine. **[Results]** Under different numbers of ventilation holes, all puff-by-puff aerosol particle size distributions exhibited a bimodal pattern. As the hole number increased, the particle size peak, D50, and aerosol number concentration all showed a trend of first decreasing and then increasing. The highest total aerosol number concentration was observed at 50 holes, while the puff-by-puff release stability was better at 40 holes. The puff-by-puff variation in VOC components was weakly correlated with aerosol number concentration, and the relative content of organic components decreased as the hole number increased. The nicotine content was positively correlated with the aerosol number concentration to some extent, whereas the glycerol content showed a weaker correlation with number concentration but exhibited an overall trend of first increasing and then decreasing with increasing hole number. **[Conclusion]** The number of ventilation holes significantly influences the puff-by-puff particle size distribution, number concentration, and chemical component release of HTP aerosols, and a nonlinear relationship exists between hole number and these aerosol release characteristics.

Key words: ventilation hole; heated tobacco product; aerosol; particle size; chemical composition

[责任编辑:刘丹丹]