

李智, 肖忠铎, 赵文涛, 等. 烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶粒径分布和浓度的影响[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1):14-23. LI Zhi, XIAO Zhonghua, ZHAO Wentao, et al. Effects of tobacco moisture content and atomizing agent composition ratio on particle size distribution and concentration of electrically heated cigarette aerosol[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2025, 31(1):14-23. doi:10.16472/j.chinatobacco. 2023.T0186

烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶粒径分布和浓度的影响

李智^{1,2}, 肖忠铎^{1,2}, 赵文涛^{3*}, 汪旭³, 杨菁³, 冯奇³, 刘成³, 高乃平²

1 上海电力大学, 上海市杨浦区长阳路 2588 号 200090;

2 同济大学机械与能源工程学院, 上海市杨浦区四平路 1239 号 200092;

3 上海新型烟草制品研究院有限公司, 上海市浦东新区秀浦路 3733 号 201315

摘要:【目的】研究烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶粒径分布和浓度的影响。【方法】采用 SCS 抽吸模拟采样机和 DMS500 快速粒径谱仪系统, 测试不同烟丝含水率和雾化剂复配比例的电加热卷烟气溶胶粒径分布和浓度。【结果】①不同含水率和雾化剂复配比例电加热卷烟气溶胶粒径范围为 10~300 nm, 粒径分布轮廓主要趋向于单峰分布, 当烟丝含水率较高, 雾化剂为纯甘油时, 第 2 口或第 3 口的粒径呈双峰分布; ②在同一含水率下, 雾化剂为纯甘油电加热卷烟气溶胶粒数浓度、粒数中值粒径和体积浓度呈现不同的逐口变化趋势; ③丙二醇含量较高时, 逐口粒数浓度、粒数中值粒径和体积浓度逐口变化都较为平稳; ④烟丝含水率为 6.9%~17.1% 时, 电加热卷烟气溶胶的粒数浓度在含水率为 11.9% 时最大, 粒数中值粒径和体积浓度则在含水率为 6.9% 时最大, 且体积浓度随含水率的提高逐渐减少; ⑤研究范围内, 随着丙二醇含量的提高, 电加热卷烟气溶胶的粒数浓度和体积浓度均逐渐增大, 粒数中值粒径则较为接近。

关键词: 电加热卷烟; 含水率; 雾化剂复配比例; 气溶胶; 粒径分布

电加热卷烟是利用电加热器对烟丝进行低温加热而产生气溶胶的加热不燃烧 (Heat not Burn) 卷烟, 相比于传统卷烟高温燃烧的温度 (500℃~900℃), 电加热卷烟工作温度大多低于 400℃, 能有效避免烟丝中有机化合物在高温燃烧条件下热解^[1-3]。然而电加热卷烟较低的加热温度导致释烟介质无法充分释放烟雾, 从而影响烟气的产生和抽吸体验。为使电加热卷烟产生更多的烟气, 提高烟雾的释放量和浓度, 释烟介质中通常需要添加外源性雾化剂, 一般为低沸点的多元醇, 如甘油、丙二醇等, 其中甘油和丙二醇释烟特性有

着显著差异^[4-8]。研究表明, 在加热温度 250℃ 以下时, 同一添加量的丙二醇烟丝样品的丙二醇释放量及其在颗粒物中所占比例均明显高于甘油烟丝样品^[9-10]。雾化剂复配比例对加热卷烟释烟特性有着显著影响, 随丙二醇质量分数的增加, 总失重比例增加, 达到最大失重速率的温度降低, 但烟草颗粒的释烟时间范围减少, 累积释烟总量降低, 由 30% 丙二醇制备的烟草颗粒的起始释烟速率最小^[7]。在传统卷烟中, 不同含水率烟丝影响烟丝的燃烧和热解反应、烟气水分和易挥发性成分释放, 烟气气溶胶的物理特性也存在明显差异

基金项目: 中国烟草总公司科技重大专项“基于热力学的电加热卷烟传质传热机理研究及应用”(110202101016 (XX-02)); 上海新型烟草制品研究院有限公司科技项目“内芯加热卷烟烟支设计参数研究”(KF2020-001Y); 上海新型烟草制品研究院有限公司科技项目“基于加热卷烟烟气致香成分释放规律分析的调香技术研究”(K2021-001Z)

作者简介: 李智 (1999—), 在读硕士研究生, 从事多孔介质雾化传热传质研究, Email: 867725810@qq.com

通讯作者: 赵文涛 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事新型烟草制品研究, Tel: 021-61661816, Email: zhaowt@sh.tobacco.com.cn

收稿日期: 2023-09-20; **网络出版日期:** 2024-07-01

[11-14]。在电加热卷烟中，含水率对烟气水分释放量、雾化剂、烟碱和总粒相物的释放量均有影响，其中对甘油的影响最为显著[15-16]。电加热卷烟在抽吸过程中产生的烟气气溶胶主要由水和雾化剂组成[17-18]，因此烟丝含水率和雾化剂复配比例势必会影响气溶胶的物理特性。研究烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶总释放和逐口释放的粒数浓度、体积浓度、粒数中值粒径和粒径分布等物理特性的影响，可为提升电加热卷产品烟雾释放量以及逐口稳定性提供有力支撑。

研究烟气气溶胶物理特性的测试方法主要包括显微镜观察法、重力沉降法、惯性冲击法[19-20]、静电迁移法、光透射法[21-22]等。由于传统的重力沉降法和显微镜法等无法实现烟雾气溶胶的实时检测，影响到测定结果的准确性，而采用静电迁移法可实现实时在线测试烟雾气溶胶的粒径分布，且具有响应时间短、测定粒径达到纳米级等优点，基于静电迁移法的电子低压撞击器(Electrical low-pressure impactor, ELPI)[14,23]和快速粒径谱仪(Fast particulate analyzer)[24-25]等设备，已被广泛用于传统卷烟、电子烟和加热卷烟的烟气气溶胶粒径测试研究中。段沅杏等[26]采用静电迁移法研究了 ISO 抽吸模式下 10 个品牌传统卷烟和电子烟的烟气气溶胶粒径分布特性。目前已有研究再造烟叶原料[24]、温度[25]、抽吸模式[27]和抽吸参数[28]等对加热卷烟气溶胶物理特性的影响，均采用静电迁移法，而针对烟丝含水率和雾化剂复配比例的研究则鲜有报道。因此，本文基于静电迁移方法，研究不同烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟气溶胶物理特性的影响，分析烟气气溶胶颗粒释放量、粒径以及逐口释放差异，旨在为电加热卷烟产品的优化设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

中心加热型电加热卷烟以及配套加热烟具（上海新型烟草制品研究院有限公司）。烟支规格为直径 7.8 mm、总长度 43.5 mm（实心丝束滤嘴段长度 8 mm+薄壁醋酸纤维空腔降温段长度 12 mm+醋酸纤维空心滤棒支撑段长度 10 mm+发烟段长度 13.5 mm），不同

含水率卷烟样品发烟段由 87%辊压法和 13%造纸法再造烟叶构成（上海烟草集团太仓海烟烟草薄片有限公司），不同雾化剂复配比例卷烟样品发烟段再造烟叶由辊压法制备得到。

CH-XL 综合测试台（北京欧美利华科技有限公司）；SCS 模拟循环吸烟机和 DMS 500 快速粒径谱仪（英国 Cambustion 公司）；HNB-2020 帕夫曼烟草薄片制浆仪、HNB-2060 帕夫曼烟草薄片打样仪（上海帕夫曼自动化仪器有限公司）。

1.2 实验方法

1.2.1 不同烟丝含水率卷烟样品制备

实验卷烟雾化剂为纯甘油，根据 YC/T 345—2010[29]的方法测定雾化剂总含量为 21.3%，将实验卷烟平均分为 5 份，置于温度 50℃的烘箱中烘干 30 min，作为最低含水率，再置于在温度 22℃、相对湿度 60%的恒温恒湿箱中，通过调节放置时间，制备得到不同烟丝含水率烟支样品，根据 CORESTA（Cooperation Centre for Scientific Research Relative to Tobacco）推荐的第 57 号[30]方法测定含水率梯度分别为 6.9%、10.2%、11.9%、14.5%和 17.1%。

1.2.2 不同雾化剂复配比例卷烟样品制备

利用 HNB-2020 帕夫曼烟草薄片制浆仪和 HNB-2060 帕夫曼烟草薄片打样仪按照 20 g 烟粉、5 g 雾化剂的比例与胶粘剂、水混合制作烟丝目标含水率为 10.0%、雾化剂目标总含量为 20.0%的不同雾化剂复配比例再造烟叶，5 g 雾化剂中甘油(VG)和丙二醇(PG)的配比如表 1 所示，根据 CORESTA 推荐的第 57 号和第 60 号[31]方法检测各样品中水分、甘油和丙二醇实际含量，结果见表 2。

表 1 雾化剂中甘油与丙二醇的配比
Tab.1 Relative ratios of glycerol to propylene glycol in the atomizing agent

编号	甘油	丙二醇
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%

表 2 再造烟叶中雾化剂实际含量
Tab.2 Actual content of atomization agents in reconstituted tobacco

编号	水分	甘油	丙二醇
1	9.4%	20.9%	0%
2	9.4%	16.1%	4.9%
3	9.4%	11.8%	9.9%
4	9.8%	6.3%	14.1%
5	9.1%	0%	19.5%

1.2.3 抽吸方法

采用加拿大深度抽吸模式 (HCI), 即抽吸容量为 55 mL、抽吸持续时间为 2 s、抽吸频率为 30 s, 每次的抽吸口数为 8 口。测量时实验室内温度为 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 (RH) 为 $(60 \pm 5)\%$, 符合 GB/T 16447—2004^[32] 的规定。

1.2.4 气溶胶物理特性测试方法

为尽可能减小多因素综合作用对测试结果造成的影响, 应尽量减少同类烟支样品在规格参数上的差异。测试前采用 CH-XL 综合测试台筛选质量、滤嘴通风率在一定误差范围内的同种烟支, 其中质量误差范围为 $\pm 0.01\text{ g}$, 通风率误差范围为 $\pm 1\%$ 。

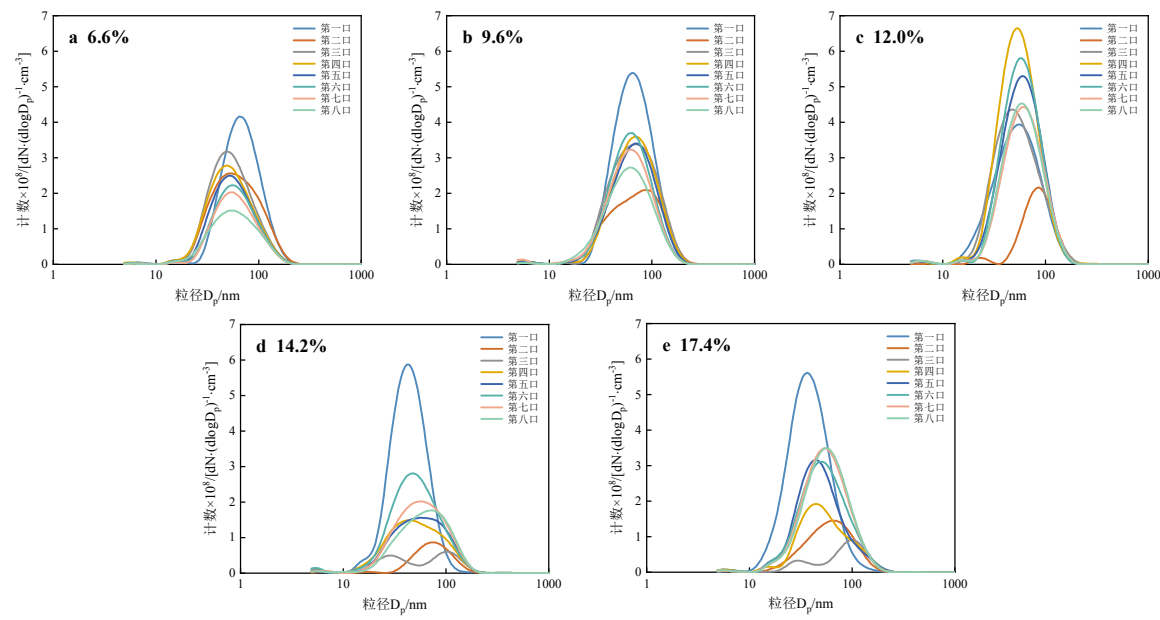
采用 SCS 抽吸模拟采样机根据设定的抽吸模式对筛选的样品烟支进行抽吸, 产生的烟气通过两级稀释系统快速稀释后进入 DMS500 快速粒径谱仪, 根据不同粒径颗粒的电迁移率差异, 测量得到烟雾气溶胶粒径和粒数的实时变化。一级稀释为恒定流量的采样方式, 设定一级稀释流量为 20.0 L/min; 二级稀释采用旋转碟稀释器, 设定二级稀释比为 200:1。平行测定加热卷烟样品 3 次, 对平行测定数据取平均值, 得到电加热卷烟总释放气溶胶和逐口释放气溶胶的物理特性数据。

2 结果与讨论

2.1 不同烟丝含水率和雾化剂复配比例对电加热卷烟逐口气溶胶粒径分布的影响

电加热卷烟样品在相同雾化剂含量 (21.3%) 和复配比例 (100%甘油)、不同烟丝含水率和相同烟丝含水率 (约 9.5%) 和雾化剂含量 (约 20.0%)、不同

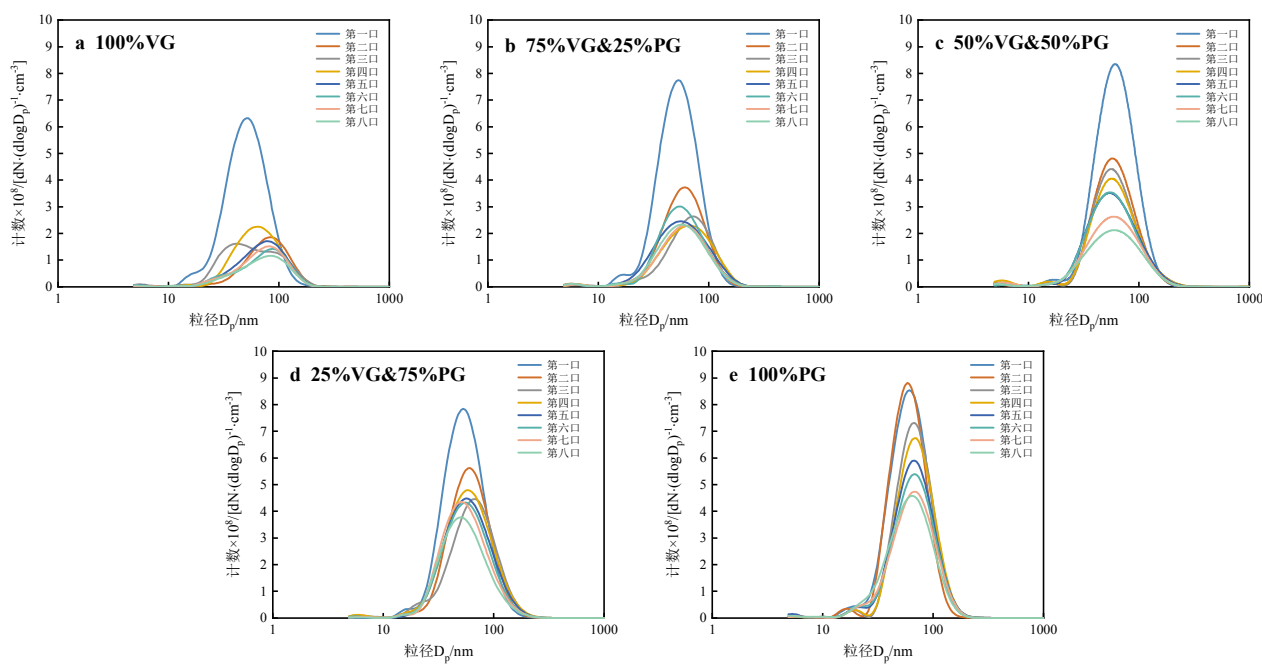
雾化剂复配比例下的粒径分布分别如图 1、2 所示。可以看出, 测试的电加热卷烟样品的粒径均分布在 10~300 nm, 主要集中于 40~90 nm, 含水率为 6.6% 的烟支样品第 1 口峰值与其他含水率的样品差距较大, 且粒径分布轮廓均呈现单峰分布, 而其他含水率样品都会在第 2 口或第 3 口出现双峰分布; 随着丙二醇的含量逐渐提高, 第 1 口与其他口数的峰值差距逐渐减少, 当雾化剂组成为纯甘油时, 第 2 口粒径呈双峰分布。对比图 1、2 发现, 当雾化剂组成为纯甘油且含水率较高会出现双峰分布, 出现双峰的口数随含水率的提高从第 2 口延后至第 3 口, 电加热卷烟的烟草基质受热在干燥、蒸发和热解过程中释放气态化合物, 在抽吸过程中气态化合物 (主要成分为水和雾化剂) 受到快速降温达到过饱和状态, 经均相成核、冷凝沉积和团聚等形成气溶胶^[33-34]。因此, 气溶胶粒径分布与气态化合物中水和雾化剂含量密切相关。研究表明, 在 HCI 抽吸模式下, 烟气中水分随抽吸口数的增加呈现逐渐下降趋势, 甘油随抽吸口序的增加呈先增大后减少的趋势, 第 1 口和第 2 口烟气中甘油含量差异明显, 第 1 口中烟气水分占比明显高于甘油^[35]。对于含水率较高且雾化剂为纯甘油的样品, 在第 1 口抽吸时烟气中以水分为主, 而对于均匀饱和的蒸汽体系, 分子会经过均相成核过程形成单峰分布的气溶胶^[36]。在第 2 口或第 3 口时, 烟气中是以水分和甘油为主, 水的沸点远低于甘油沸点 (290°C), 因此二者的成核和冷凝速率有着明显差异, 从而形成双峰分布的气溶胶。韩咚林等^[37]的计算结果也表明, 加热卷烟的“水蒸气-甘油”二元气溶胶为双峰分布。在后续口数中, 由于烟气中水分含量的下降, 甘油含量的提高, 烟气中逐渐以甘油为主, 则会呈现单峰分布。对于烟丝含水率为 6.9% 的纯甘油样品, 由于含水率较低, 导致第 1 口的峰值明显低于其他口数, 在第 2 口时水分含量过低, 没有形成“水蒸气-甘油”二元气溶胶, 而是直接形成甘油为主粒径呈单峰分布的气溶胶。而对于有丙二醇添加的样品, 可能是由于水和丙二醇的沸点 (188.2°C) 差异较小, 且丙二醇和甘油的沸点差异也较小, 这样形成以水分、甘油和丙二醇为主体的气溶胶, 物性差异较小不容易形成双峰分布。



注：雾化剂总含量：21.3%、甘油含量：100%。
Note: Total atomizing agent content: 21.3%, glycerol content: 100%.

图 1 不同烟丝含水率电加热卷烟烟气气溶胶逐口粒径分布

Fig.1 Puff-by-puff particle size distribution of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different moisture contents



注：烟丝含水率：约 9.5%、雾化剂总含量：约 20.0%。
Note: Moisture content: about 9.5%, total atomizing agent content: about 20.0%.

图 2 不同雾化剂复配比例电加热卷烟烟气气溶胶逐口粒径分布

Fig.2 Puff-by-puff particle size distribution of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different atomizing agent composition ratios

2.2 不同烟丝含水率和雾化剂复配比例下电加热卷烟逐口释放气溶胶浓度

相同雾化剂含量（21.3%）和复配比例（100%甘

油）、不同烟丝含水率下电加热卷烟逐口释放气溶胶浓度及粒径如图 3 所示。由图 3a 可知，不同含水率的烟支样品烟气气溶胶的逐口粒数浓度均呈现先减少后增

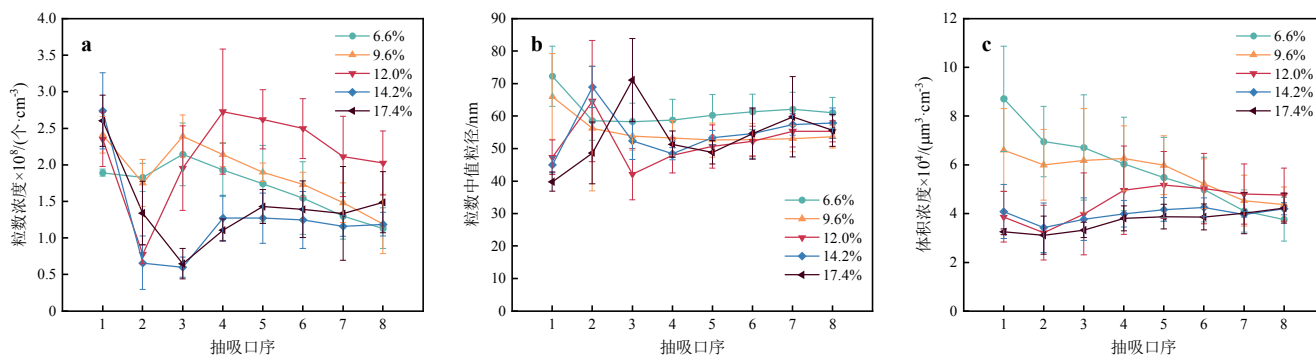
大的趋势, 粒数浓度最大值为 $2.73 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$, 在 11.9% 含水率烟支样品第 4 口抽吸时达到, 最小值在含水率为 17.1% 烟支在第 3 口抽吸时达到, 为 $6.50 \times 10^7 \text{ N/cm}^3$ 。随着含水率的升高粒数浓度下降口数从第 2 口逐渐延后至第 3 口, 且下降幅度逐渐增大。由图 3b 可知, 含水率为 6.9% 和 10.2% 的烟支样品逐口粒数中值粒径 (Count Median Diameter, CMD) 随口数增加呈现先减小后趋于平稳趋势, 含水率为 11.9%、14.5% 和 17.1% 的烟支逐口 CMD 随口数增加呈现先升高后减少在趋于平稳的趋势。不同烟丝含水率的电加热卷烟烟气的溶胶逐口 CMD 均存在一个峰值, 在 65~73 nm 之间, 且峰值随含水率的升高从第 1 口延后至第 3 口。由 3c 可知, 随着含水率的升高, 体积浓度呈现不同的变化规律。在含水率为 6.9% 的条件下, 逐口体积浓度整体上呈现逐渐下滑的趋势; 含水率为 10.2% 的烟支样品, 逐口体积浓度呈现先下降在略微升高再逐渐下降的趋势; 在含水率为 11.9%、14.5% 和 17.1% 的条件下, 逐口体积浓度呈现先下降在上升的情况。不同含水率样品都在第 2 口有一个较大的下降趋势。体积浓度在 6.9% 含水率烟支样品在第 1 口抽吸时达到最大值, 为 $8.71 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$, 含水率为 6.9% 和 10.2% 的烟支样品前 4 口的体积浓度均高于其他含水率的烟支样品。结合图 3a、b 可知, 当粒数浓度和 CMD 都较高时, 体积浓度则较高; 当粒数浓度较高而 CMD 较低时, 或者粒数浓度较低而 CMD 较高时, 体积浓度则较低。当温度较低时, 烟具产生的热量大部分供给水分蒸发所用, 导致供给甘油释放的热量减少, 使得甘油不能有效释放^[38]。在第 1 口抽吸时, 由于烟草基质温度整体偏低, 释放的成分以水分为主, 因此烟气的溶胶颗粒主要由水分冷凝而成。含水率较高的烟支样品, 在第 2 口或第 3 口抽吸时甘油逐步得到有效释放, 释放的成分以水和甘油两种成分为主。在抽吸时, 甘油的冷凝形成核, 水、烟碱在核上和其他成分可以凝结形成气溶胶液滴^[39]。这时水分释放量还较高, 大量水分凝结在甘油冷凝形成的核表面, 会形成粒径较大的气溶胶颗粒, 使得 CMD 出现一个峰值, 但甘油释放量还较少, 导致粒数浓度急剧下降, 而且少部分水分由于烟气温度的逐渐下降, 也冷凝成核从而形成双峰分布。后续口数随着甘油释放提高, 水分减少, 粒数浓度升高而 CMD 则会下降。对于含水率较低的样品, 在第 1 口抽吸时, 甘油能够提前得到有效释放与

水分形成较大粒径的气溶胶颗粒, 但水分释放相比与较高含水率的样品则相对较小, 因此第 1 口抽吸的粒数中值粒径和体积浓度会比含水率较高的样品更高, 而粒数浓度则相对较低。同时, 第 1 口的水分释放量仍然大于第 2 口, 因此第 1 口粒数浓度大于第 2 口, 但相比于含水率较高的烟支样品, 由于甘油在第 1 口就提前释放, 因此第 2 口粒数浓度下降幅度明显减少。

相同烟丝含水率 (约 9.5%) 和雾化剂含量 (约 20.0%) 的不同雾化剂复配比例的电加热卷烟逐口释放气溶胶浓度及粒径如图 4 所示。由图 4a 可知, 不同雾化剂复配比例的烟支样品逐口粒数浓度均在第 2 口大幅下降, 之后丙二醇含量在 75% 和 100% 的烟支样品逐口粒数浓度会呈逐渐下滑的趋势, 丙二醇含量在 50% 及以下的烟支样品逐口粒数浓度则会呈现先小幅升高再下降的趋势。随着丙二醇含量的提高第 2 口的下降幅度逐渐减少, 每口的粒数浓度均逐渐增大, 烟支样品粒数浓度的最大值在雾化剂为纯丙二醇的烟支样品第 1 口抽吸时达到, 为 $3.70 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$ 。图 4b 为不同雾化剂复配比例的烟支样品逐口 CMD 变化规律, 随着丙二醇添加比例的提高, 逐口 CMD 变化趋势逐渐趋于平稳, 当甘油添加比例为 100%, 与图 3b 含水率为 11.9% 和 14.5% 的逐口 CMD 变化趋势相同, 在第 2 口时会出现一个明显的峰值。对比图 3a、4a 可以发现, 在不同雾化剂复配比例工况下, 含水率约为 9.5%、雾化剂总含量约为 20.0% 的纯甘油烟支样品和不同含水率工况下, 含水率为 14.5%、雾化剂总含量 21.3% 的纯甘油样品的粒数浓度均在第 2 口抽吸时大幅下降, 后续口数的粒数浓度相比 11.9% 含水率的纯甘油烟支样品都处在一个较低值 ($6.01 \times 10^7 \text{ N/cm}^3 \sim 1.27 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$), 说明在不同雾化剂复配比例情况下, 烟丝含水率在 9.5% 左右对于雾化剂总含量约为 20.0% 的纯甘油烟支样品含量可能过高, 影响其甘油的释放。不同雾化剂复配比例的电加热卷烟烟气的溶胶体积浓度逐口变化规律如图 4c 所示, 逐口体积浓度整体上呈先逐渐升高后逐渐降低的趋势, 不同雾化剂复配比例的烟支样品的逐口体积浓度最大值随着丙二醇添加比例的提高逐渐增大, 在丙二醇添加比例 100% 的烟支样品第 1 口抽吸时达到峰值, 为 $9.75 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 。烟草挥发成分的释放可分为 3 个过程: 温度由初始温度至 150°C 时, 发生吸热蒸发过程, 自由水和部分结合水首先在低温下释放出来; 在 $100^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ 内, 主

要是烟碱、雾化剂和其他半挥发物（如香味成分）的释放；高于 200℃时，烟草中纤维素、半纤维素、果胶等大分子有机物发生有氧裂解^[40]。由于丙二醇沸点为 188.2℃，而甘油沸点为 290℃，丙二醇的沸点相比于甘油要低得多，使丙二醇能够甘油比更早释放，因此随着丙二醇添加比例的提高粒数浓度在第 2 口抽吸

时的下降幅度逐渐减少。研究表明，随丙二醇比例的增加，烟草颗粒起始失重速率明显增大，失重过程整体向低温区移动，高温裂解阶段的失重比例增大，烟草颗粒裂解程度更深^[7]。因此丙二醇的增加可能会使冷凝形成气溶胶颗粒的气态化合物增加，逐口粒数浓度和体积浓度随之提高。

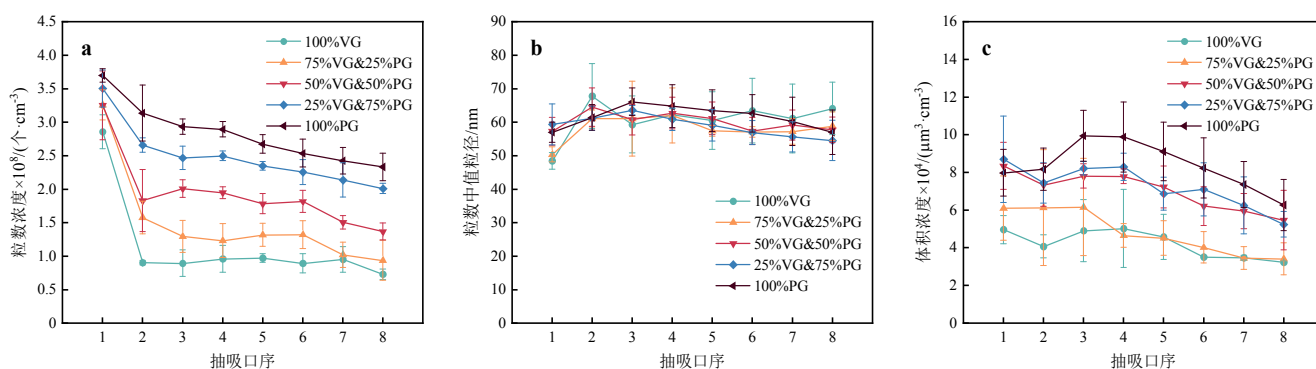


注：雾化剂总含量：21.3%、雾化剂中甘油含量：100%。

Note: total atomizing agent content: 21.3%, glycerol content: 100%.

图 3 不同烟丝含水率电加热卷烟烟气气溶胶的逐口粒数浓度(a)、粒数中值粒径 (b)和体积浓度(c)

Fig.3 Puff-by-puff particle number concentration (a), count median diameter (b), and volume concentration (c) of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different moisture contents



注：烟丝含水率：约 9.5%、雾化剂总含量：约 20.0%。

Note: moisture content: about 9.5%, total atomizing agent content: about 20.0%.

图 4 不同雾化剂复配比例电加热卷烟烟气气溶胶的逐口粒数浓度(a)、粒数中值粒径 (b)和体积浓度 (c)

Fig.4 Puff-by-puff particle number concentration (a), count median diameter (b), and volume concentration (c) of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different atomizing agent composition ratios

不同烟丝含水率和雾化剂复配比例烟支样品的逐口粒数浓度均在第 2 口或第 3 口大幅下降，对于纯甘油烟支样品，下降的幅度随着含水率的下降逐渐减少；对于烟丝含水率约 9.5%、不同雾化剂复配比例的烟支样品，下降幅度则会随着雾化剂中丙二醇含量的提高逐渐减少。当烟丝含水率或者雾化剂组分沸点较低时，

由于雾化剂都会较早释放，使第 2 口或第 3 口的粒数浓度得到提高。随着丙二醇含量的提高，逐口粒数浓度和体积浓度整体都逐渐增大，丙二醇含量较高时，逐口粒数浓度、CMD 和体积浓度都较为平稳，添加丙二醇有助于提高气溶胶的逐口释放稳定性。结合图 3a、3b、4a、4b 可以发现，对于含水率较高的纯甘油烟支

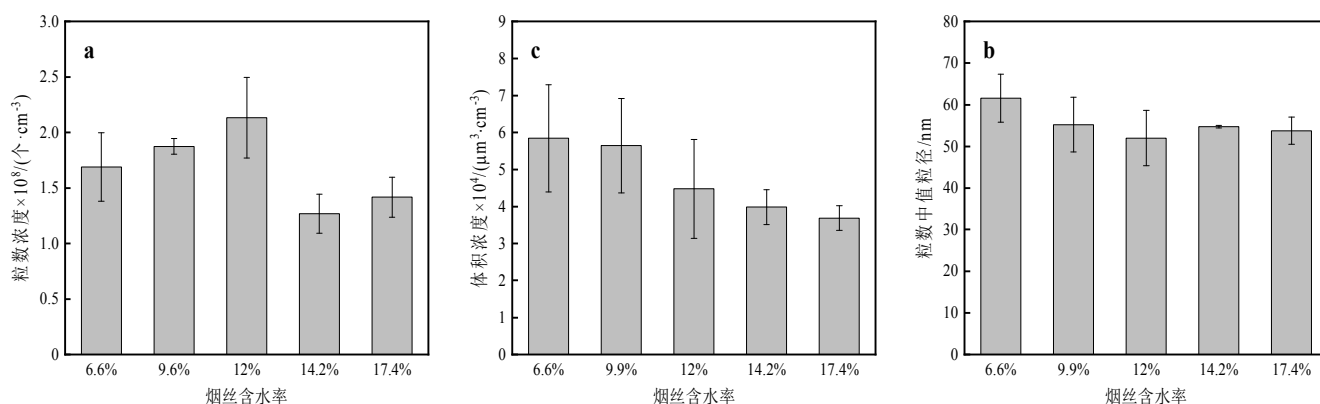
样品,逐口释放气溶胶的过程可能存在3个阶段,第一个阶段为以水蒸气为主的气溶胶体系,此阶段粒数浓度较高而CMD则较低;第二个阶段为以水分和甘油为主的二元气溶胶体系,此时粒数浓度急剧下降,CMD则急剧升高达到一个峰值;第三个阶段为以甘油为主的气溶胶体系,在这个时期,粒数浓度逐渐升高而CMD则迅速下降后趋于平稳。对于含水率较低的纯甘油烟支样品,由于甘油能够较早的释放,使得逐口粒数浓度逐口变化较为平稳,CMD则会在第1口达到峰值,体积浓度在前4口都会较高。

2.3 不同烟丝含水率和雾化剂复配比例下电加热卷烟总释放气溶胶数量和中值粒径

研究相同雾化剂含量(21.3%)和复配比例(100%甘油)、不同烟丝含水率的电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度、粒数中值粒径和体积浓度,结果如图5所示。由图5a可知,烟气气溶胶总口数平均粒数浓度随着含水率的提高呈现先增大后减少的趋势,在含水率为11.9%时达到最大值 $2.13 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$ 。结合图3a这可能是由于水分的汽化热(约 2260 kJ/kg)远高于甘油的汽化热(约 810 kJ/kg),因此含水率过高会使烟草需要吸收更多热量来满足水分蒸发,从而影响甘油挥发。但在适宜的含水率下由于水的汽化体积(约 $1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$)较高,水分蒸发后迅速剧烈膨胀产生的多孔结构,在加热的中后期阶段,有利于抽吸时空气的进入将释放的挥发成分更多地携带出来。研究

表明,增加烟草颗粒的水分含量,烟气释放过程整体延迟,释烟总量降低。对比图5b、5c可以发现,含水率在6.9%时,总口数平均CMD和体积浓度最大,其中总口数平均体积浓度随着含水率增加逐渐减少^[41]。这可能是由于含水率较少时,有充足的热量促进甘油的挥发和大分子有机物的有氧裂解,使得形成的气溶胶粒径较大,体积浓度也较高。以上分析说明,降低含水率有助提高气溶胶CMD和体积浓度,但过高或是过低的含水率都会使电加热卷烟烟气气溶胶的粒数浓度减小。

图6为电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度、粒数中值粒径和体积浓度在相同烟丝含水率(约9.5%)和雾化剂含量(约20.0%)、不同雾化剂复配比例下的变化规律。随着雾化剂中丙二醇的含量提高,总口数平均粒数浓度和体积浓度均逐渐增大,最大值分别为 $2.67 \times 10^8 \text{ N/cm}^3$ 和 $7.12 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ 。雾化剂复配比例对CMD的影响则较小。分析认为,由于甘油沸点较高,而丙二醇沸点较低,丙二醇相比于甘油从烟草材料释放出的效率更高,同时烟丝含水率会对甘油释放产生较大的影响,而丙二醇还会使得烟草颗粒中的烃类以及酚类、有机酸等化合物的释放温区范围变大,烟草颗粒在有氧裂解阶段的反应更加剧烈^[7,16,38]。因此在烟丝含水率约为9.5%、雾化剂总含量约20.0%时,丙二醇相比于甘油能更好的提高电加热卷烟烟气气溶胶颗粒释放量。

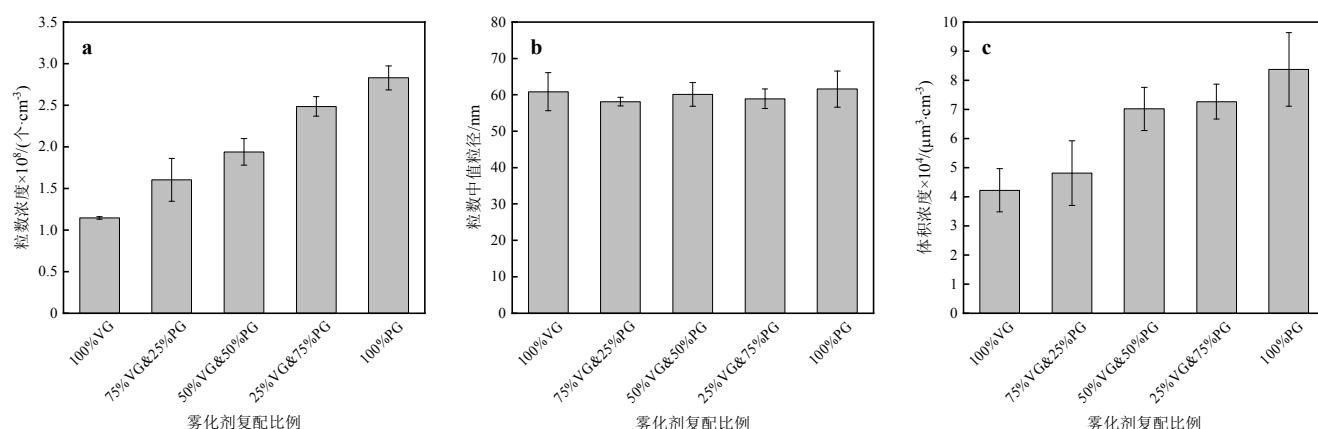


注: 雾化剂总含量: 21.3%、雾化剂中甘油含量: 100%。

Note: total atomizing agent content: 21.3%, glycerol content: 100%.

图5 不同烟丝含水率电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度 (a)、粒数中值粒径 (b)和体积浓度 (c)

Fig.5 Average particle number concentration (a), count median diameter (b), and volume concentration (c) for the total number of puffs of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different moisture contents



注：烟丝含水率：约 9.5%、雾化剂总含量：约 20.0%。

Note: moisture content: about 9.5%, total atomizing agent content: about 20.0%.

图 6 不同雾化剂复配比例下电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度 (a)、粒数中值粒径 (b)和体积浓度 (c)

Fig.6 Average particle number concentration (a), count median diameter (b), and volume concentration (c) for the total number of puffs of aerosolized smoke from electrically heated cigarettes with different moisture contents

3 结论

(1)不同含水率和雾化剂复配比例电加热卷烟烟气气溶胶粒径范围为 10~300 nm，粒径分布轮廓主要趋向于单峰分布。当烟丝含水率较高，雾化剂为纯甘油时，会在第 2 口或第 3 口，形成“水蒸气-甘油”二元气溶胶，使得粒径呈双峰分布。

(2)不同烟丝含水率和雾化剂复配比例电加热卷烟烟气气溶胶逐口粒数浓度均在第 2 口或第 3 口大幅下降，降低含水率或者提高丙二醇含量都会使得下降幅度减少。甘油含量较高时，逐口粒数浓度在大幅下降后会小幅升高；丙二醇含量较高时逐口粒数浓度在大幅下降后会呈缓慢下降的趋势。提高丙二醇含量，粒数浓度、CMD 和体积浓度逐口变化都较为平稳，添加丙二醇有助于提高气溶胶的逐口释放稳定性。

(3)对于含水率较高的纯甘油电加热卷烟，气溶胶逐口粒数浓度呈先减小后增大，逐口粒数中值则呈相反的趋势，且都在第 2 口或第 3 口对应大幅减小或增大，逐口体积浓度则变化较为平稳。对于含水率较低的纯甘油烟支样品，由于甘油能够较早的释放，使得逐口粒数浓度逐口变化较为平稳，CMD 则会在第 1 口达到峰值，体积浓度在前几口相对较高。

(4)在研究设置的水分梯度值中，电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度在含水率为 11.9%时最大，粒数中值粒径和体积浓度则在含水率为 6.9%时最大，且体积浓度随含水率的提高逐渐减少，因此对于雾化剂为纯甘油的电加热卷烟，提高烟气气溶胶的

粒数浓度需要较为适宜的含水率，粒数中值粒径和体积浓度则含水率较低时更好。

(5)在研究范围内，随着丙二醇含量的提高，电加热卷烟烟气气溶胶的总口数平均粒数浓度和体积浓度均逐渐增大，粒数中值粒径较为接近。因此提高丙二醇含量不仅能提高烟气气溶胶的逐口释放稳定性，还能提高气溶胶颗粒的释放量。

参考文献

- [1] Chapman F, Stickney E T, Wiczyk R, et al. Multiple endpoint in vitro toxicity assessment of a prototype heated tobacco product indicates substantially reduced effects compared to those of combustible cigarette[J]. Toxicology in Vitro, 2023, 86: 105510.
- [2] Bekki K, Inaba Y, Uchiyama S, et al. Comparison of chemicals in mainstream smoke in heat-not-burn tobacco and combustion cigarettes[J]. Journal of UOEH, 2017, 39(3): 201-207.
- [3] 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): 141-149.
- [4] 曹芸, 王鹏, 鲍穗, 等. 温度与甘油对烟草颗粒热解及释烟特性的影响[J]. 烟草科技, 2020, 53(8): 79-85.
CAO Yun, WANG Peng, BAO Sui, et al. Effects of temperature and glycerol on pyrolysis and smoke release of reconstituted tobacco particles[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(8): 79-85.
- [5] 赵龙, 刘珊, 曾世通, 等. 甘油对烟丝加热状态下烟气中挥发性和半挥发性成分的影响[J]. 烟草科技, 2016, 49(4): 53-60.
ZHAO Long, LIU Shan, ZENG Shitong, et al. Influence of glycerol on release of volatile and semi-volatile chemical components in cut tobacco under heating[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(4): 53-60.
- [6] 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 Qin, 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.
- [7] 曹芸, 王成虎, 王鹏, 等. 甘油与丙二醇复配比例对烟草颗粒热解和释烟特性的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(3): 50-58.
- CAO Yun, WANG Chenghu, WANG Peng, et al. Effects of glycerin/propylene glycol ratios on pyrolysis and smoke release of tobacco granules[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(3): 50-58.
- [8] 马亚萍, 刘朝贤, 王乐, 等. 不同温度条件下烟丝一发烟剂体系热物性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 69-73.
- MA Yaping, LIU Chaoxian, WANG Le, et al. Study on thermophysical properties of tobacco and smoke agent under different temperature[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 69-73.
- [9] 胡安福, 刘珊, 杨君, 等. 丙二醇对烟叶加热非燃烧状态下烟气释放的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(6): 818-822.
- HU Anfu, LIU Shan, YANG Jun, et al. Effects of propanediol on the characteristics of tobacco smoke releasing under non-combustion heating conditions[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(6): 818-822.
- [10] 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.
- TANG Peipei, ZENG Shitong, LIU Shan, et al. Effects of glycerol on thermal property and smoke release of tobacco leaves under heating[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(3): 61-65.
- [11] 张宏宇, 刘春波, 申钦鹏, 等. 烟丝含水率对其燃烧性的影响研究[J]. 分析测试学报, 2014, 33(11): 1279-1284.
- ZHANG Hongyu, LIU Chunbo, SHEN Qinpeng, et al. Effects of different moisture contents on combustibility of cut tobacco[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2014, 33(11): 1279-1284.
- [12] 黎洪利, 文鹏, 戴迎雪, 等. 烟支含水率对卷烟烟气成分的影响[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(2): 10-14.
- LI Hongli, WEN Peng, DAI Yingxue, et al. Effect of moisture content on mainstream cigarette smoke[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2009, 15(2): 10-14.
- [13] 孙雯, 李雪梅, 曾晓鹰, 等. 烟丝含水率对卷烟燃吸品质、烟气水分及粒相物挥发性成分的影响[J]. 烟草科技, 2009, 42(11): 33-39.
- SUN Wen, LI Xuemei, ZENG Xiaoying, et al. Influence of moisture content in cut tobacco on smoking quality, particulate volatile components and moisture content in cigarette smoke[J]. Tobacco Science & Technology, 2009, 42(11): 33-39.
- [14] 司晓喜, 张凤梅, 赵乐, 等. 不同烟丝含水率卷烟主流烟气的溶胶的粒径分布特征[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(5).
- SI Xiaoxi, ZHANG Fengmei, ZHAO Le, et al. Particle size distribution of aerosols in mainstream smoke of cigarettes with different moisture content in cut tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(5): 1-6.
- [15] 李朝建, 金勇, 周成喜, 等. 水分含量对不同类型加热不燃烧卷烟化学成分的影响[J]. 食品与机械, 2019(10): 35-39.
- LI Chaojian, JIN Yong, ZHOU Chengxi, et al. The effect of moisture content on chemical components of different types of heat-not-burn tobacco products[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 35-39.
- [16] 张丽, 王维维, 张小涛, 等. 加热不燃烧卷烟气溶胶中主要成分的转移行为[J]. 烟草科技, 2019, 52(3): 46-55.
- ZHANG Li, WANG Weiwei, ZHANG Xiaotao, et al. Transfer behavior of main aerosol components in heat-not-burn tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(3): 46-55.
- [17] Gasparyan H, Mariner D, Wright C, et al. Accurate measurement of main aerosol constituents from heated tobacco products (HTPs): implications for a fundamentally different aerosol[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2018, 99: 131-141.
- [18] Werley M S, Freelin S A, Wrenn S E, et al. Smoke chemistry, in vitro and in vivo toxicology evaluations of the electrically heated cigarette smoking system series K[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 52(2): 122-139.
- [19] Mikheev V B, Ivanov A, Lucas E A, et al. Aerosol size distribution measurement of electronic cigarette emissions using combined differential mobility and inertial impaction methods: Smoking machine and puff topography influence[J]. Aerosol Science and Technology, 2018, 52(11): 1233-1248.
- [20] 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.
- [21] Ingebrethsen B J, Cole S K, Alderman S L. Electronic cigarette aerosol particle size distribution measurements[J]. Inhalation toxicology, 2012, 24(14): 976-984.
- [22] 李寿波, 朱东来, 韩熠, 等. 电子烟烟雾质量浓度表征及影响因素[J]. 烟草科技, 2018, 51(4): 35-40.
- LI Shoubo, ZHU Donglai, HAN Yi, et al. Characterization of vapor mass concentration and influencing factors from e-cigarette[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(4): 35-40.
- [23] 司晓喜, 朱瑞芝, 王洪波, 等. 7种烟用添加剂对烟气的溶胶粒径分布的影响[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(3): 1-8.
- SI Xiaoxi, ZHU Ruizhi, WANG Hongbo, et al. Effects of seven tobacco additives on particle size distribution of cigarette smoke aerosol[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(3): 1-8.
- [24] 司晓喜, 唐石云, 朱瑞芝, 等. 不同原料稠浆法再造烟叶加热卷烟的气溶胶释放特性[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(6): 1-9.
- SI Xiaoxi, TANG Shiyun, ZHU Ruizhi, et al. Aerosol release characteristics of heated cigarettes made by slurry processed reconstituted tobacco with different tobacco materials[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(6): 1-9.
- [25] 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.
- [26] 段沅杏, 赵伟, 杨继, 等. 传统卷烟和电子烟烟气的溶胶粒径分布研究[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(1): 1-5.
- DUAN Yuanxing, ZHAO Wei, YANG Ji, et al. Research on particle size distribution in traditional cigarette and electronic cigarette smoke aerosols[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2015, 21(1): 1-5.
- [27] 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的溶胶的粒径分布[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.
- [28] 王帅鹏, 崔华鹏, 陈黎, 等. 抽吸参数对电加热卷烟气溶胶粒数和粒径的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(9): 44-50.
- WANG Shuapeng, CUI Huapeng, CHEN Li, et al. Effects of puffing parameters on aerosol particle number and size from electrically heated tobacco products[J]. Tobacco Science &

- Technology, 2022, 55(9): 44-50.
- [29] YC/T 345—2010 烟草及烟草制品 水分的测定 气相色谱法[S]. YC/T 345-2010 Tobacco and tobacco products-Determination of 1,2-propylene glycol and glycerol-Gas chromatographic method[S].
- [30] CORESTA No. 57. Determination of water in tobacco and tobacco products by gas chromatographic analysis[S].
- [31] CORESTA No. 60. Determination of 1,2-propylene glycol and glycerol in tobacco and tobacco products by gas chromatography[S].
- [32] GB/T 16447—2004 烟草及烟草制品 调节和测试的大气环境[S]. GB/T 16447-2004 Tobacco and tobacco products-Atmosphere for conditioning and testing[S].
- [33] Nordlund M, Kuczaj A K. Modeling aerosol formation in an electrically heated tobacco product[J]. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 2016, 10(4): 358-370.
- [34] Prakash A, Bapat A P, Zachariah M R. A simple numerical algorithm and software for solution of nucleation, surface growth, and coagulation problems[J]. Aerosol Science & Technology, 2003, 37(11): 892-898.
- [35] 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.
- [36] 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(02): 87-93.
- CUI Huapeng, CHEN Li, FAN Meijuan, et al. Characterization of physical properties of aerosol from electrically heated cigarette[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(2): 87-93.
- [37] 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.
- [38] 张虎, 段沅杏, 赵杨, 等. 含水率对加热卷烟气溶胶主要成分释放量的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(07): 43-46.
- [39] 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.
- [40] 高峰涵, 黄洁洁, 高洁, 等. 电加热卷烟传热质和关键物质释放规律研究进展[J]. 烟草科技, 2022, 55(8): 100-112.
GAO Yihan, HUANG Jiejie, GAO Jie, et al. Research progress on mechanism behind heat and mass transfer and key substance release of electrically heated tobacco products[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(8): 100-112.
- [41] 曹芸, 张劲, 王鹏, 等. 烟草颗粒热解与释烟特性影响因素研究[J]. 中国烟草学报, 2021, 27(1): 1-9.
CAO Yun, ZHANG Jin, WANG Peng, et al. Study on influential factors of pyrolysis and smoke release characteristics of tobacco particles under low-temperature condition[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2021, 27(1): 1-9.

Effects of tobacco moisture content and atomizing agent composition ratio on particle size distribution and concentration of electrically heated cigarette aerosol

LI Zhi^{1,2}, XIAO Zhonghua^{1,2}, ZHAO Wentao^{3*}, WANG Xu³, YANG Jing³, Feng Qi³, LIU Cheng³, GAO Naiping²

1 Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2 School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3 Shanghai New Tobacco Product Research Institute Limited Company, Shanghai 201315, China

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of moisture content and atomizing agent composition ratio on particle size distribution and concentration of aerosol from electrically heated tobacco products (EHTPs). [Methods] A smoking cycle simulator (SCS) and DMS500 fast particulate analyzer were used to test the aerosol particle size distribution and concentration of EHTPs with different moisture contents and atomizing agent composition ratio. [Results] (1) The particle size range of the EHTP aerosol particles, varying with different moisture contents and aerosol formulation ratios, was 10-300 nm, predominantly exhibiting a log-normal distribution. When the moisture content was high and the aerosol formulation consisted of pure glycerol, the particle size distribution exhibited bimodal peaks at the second or third puff. (2) Under the same moisture content, the aerosol particle number concentration, count median diameter (CMD), and volume concentration of EHTPs with pure glycerol as the aerosol formulation displayed different trends with each puff. (3) Higher propylene glycol content resulted in relatively stable changes in particle number concentration, CMD, and volume concentration from puff to puff. (4) In the moisture content range of 6.9% to 17.1%, the particle number concentration of aerosols generated by EHTP was maximized at a moisture content of 11.9%. Meanwhile, the CMD and volume concentration reached their peaks at a moisture content of 6.9%. Additionally, the volume concentration gradually decreased with increasing moisture content. (5) Within the scope of the study, as the content of propylene glycol increased, both the aerosol particle number concentration and volume concentration of EHTPs increased, while the CMD remained relatively consistent.

Keywords: electrically heated tobacco product; moisture content; atomizing agent composition ratio; aerosol; particle size distribution

*Corresponding author. Email: zhaowt@sh.tobacco.com.cn