

一种新型的电子烟雾化方法研究

韩熠¹,李廷华¹,朱东来¹,雷芋琳²,李寿波¹,张霞¹,巩效伟¹,胡泓²

(1. 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 云南昆明 650231; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东深圳 518055)

摘要:针对电热式雾化电子烟存在核心专利受制于国外技术垄断、快速高热引发潜在安全健康风险、烟油接触雾化易烧结粘附等问题,该文基于声表面波(SAW)声流耦合效应,提出了一种新型的电子烟雾化方法,搭建了雾化系统实验平台,并采用成品烟油进行了雾化特性测试与分析。结果表明,系统能实现烟油非接触雾化,连续稳定地产生粒径小而分布均匀的气溶胶,且雾化速度快,功耗低,发热量小。研究验证了SAW雾化技术在电子烟中应用的可行性,是电子烟未来发展的一个新方向。

关键词:电子烟;声表面波;非接触雾化;气溶胶;粒径

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.023

Research on a Novel Atomizing Method of Electronic Cigarette

HAN Yi¹, LI Tinghua¹, ZHU Donglai¹, LEI Yulin², LI Shoubo¹,
ZHANG Xia¹, GONG Xiaowei¹, HU Hong²

(1. Technical Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650231, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Aiming at the problems that the core patents of electro-thermally atomized electronic smoke are subject to foreign technology monopoly, the potential safety and health risks are caused by rapid and high heat, the fume contact atomization is easy to sinter and adhere, a new method of electronic smoke atomization based on surface acoustic wave (SAW) acoustic-fluid coupling effect is proposed in this paper. An experimental platform for atomization system has been set up, and the atomization characteristics have been tested and analyzed by using finished fume. The results show that the system can realize non-contact atomization of smoke oil, and continuously and stably produce aerosol with small particle size and uniform distribution, and the atomization speed is fast, the power consumption is low, and the heat release is low. The feasibility of SAW atomization technology applied to electronic cigarette is validated. It is a new direction for the future development of electronic cigarette.

Key words: electronic cigarette; surface acoustic wave; non-contact atomization; aerosol; particle diameter

0 引言

近年来,随着全球控烟形势的日趋严峻和消费者健康意识的逐步提高,制约了传统卷烟的发展。电子烟作为一类极具发展潜力的低危害性新型烟草制品,因其在生理感受、心理感知和吸食方式等方面与传统卷烟接近,受到了消费者的普遍青睐^[1-2]。

雾化器是电子烟的核心部件,其将烟油雾化成气溶胶并供用户抽吸,其性能直接影响用户抽吸体验和身体健康状况。目前,市售主流的电子烟绝大

多数采用电热式雾化,该方式基于热传导原理,通过气流传感器、机械按键或触控按键激发电子烟工作,导通电路给由镍铬合金、不锈钢合金、镍200合金及钛合金绕制而成的发热丝或陶瓷发热片供电,加热烟液雾化产生气溶胶^[3-5]。尽管电热式雾化方式导热速率快,雾化效率高,但却普遍存在如下问题^[6-10]:

1) 雾化技术核心专利由帝国烟草公司掌控,具有较大知识产权侵权风险。

收稿日期:2018-06-29

基金项目:云南中烟工业公司科技基金资助项目(2018XY03);深圳市基础研究基金资助项目(JCYJ2016033016701343)

作者简介:韩熠(1976-),男,贵州威宁人,工程师,博士,主要从事新型烟草制品的研究。E-mail:15288389322@163.com。通信作者:胡泓(1965-),男,广东深圳人,教授,博士,主要从事微机电系统(MEMS)、微流控技术与精密仪器、线性、非线性控制系统理论、机电一体化系统与智能系统的研究。E-mail:honghu@hit.edu.cn。

2) 电子烟连续抽吸过程中,发热组件持续升温可达 500~600 °C,存在潜在安全风险的同时,烟油高温热解会释放醛类等有害成分,健康隐患大。

3) 属于接触式雾化,烟油易在发热组件表面烧结粘附并产生积碳,进而热解释放 CO 等有害成分,发出焦糊味或引起发热组件阻值发生变化。

4) 烟油与发热组件长期接触,重金属会浸出并转移至气溶胶。

鉴于电热式雾化方式存在的问题,探索新型雾化技术在电子烟中的应用具有重要的意义。烟油雾化是微流体雾化的一种,除电热式外,常见的微流体雾化方式还包括压力喷嘴式^[11]、超声振动式^[12]、旋转离心式^[13]、高速气流辅助式^[14]及静电式^[15],但从设计便携性,结构复杂度,驱动功耗,雾化效率及产生气溶胶粒径等方面综合考虑,这些雾化方式在电子烟中难以得到实际应用。声表面波(SAW)雾化是近几年来新兴的一种微流体雾化方式,凭借能量定向集中,驱动功率小,激励频率高,易集成化和小型化等特点^[16-17],可能为电子烟的创新研发提供新的契机。

本文旨在突破传统电热式雾化方式存在的技术瓶颈,试图将 SAW 雾化技术引入电子烟领域,基于 SAW 声流耦合效应及其独特技术优势,提出了一种全新的电子烟非接触雾化方法,搭建了雾化系统实验平台,并对关键技术应用的可行性、产生气溶胶的过程及烟油雾化特性进行了测试分析。

1 实验平台

微流体在 SAW 作用下被雾化的机理是:当雾化芯片叉指换能器激励的 SAW 与置于压电基底一侧的微流体相接触时,SAW 携带的能量会以漏声表面波的模式以特定角度衍射进入液体产生声流耦合效应,并在微流体表面形成毛细波,当表面毛细波储蓄的惯性力足以克服微流体的自身表面张力和粘性力时,雾化便开始发生^[18]。

图 1 为雾化系统结构示意图。雾化芯片加工完成后,采用显微镜初步检测叉指换能器的结构分布及电极的均匀粗糙程度,并利用网络分析仪测试雾化芯片的中心频率。射频信号加载前,需要对输入信号的中心频率、幅值及功率进行测试,以便使雾化芯片处于最佳驱动模式。采用表面张力仪、电子天平、密度仪及粘度计等测量待雾化烟

油的基本特性(如表面张力、密度、粘度等)。在整个雾化系统工作过程中,高速摄像机实时监测烟油的雾化动态过程,热电偶实时监测雾化芯片的表面温度,粒度分析仪用于检测产生气溶胶颗粒的粒径大小分布。

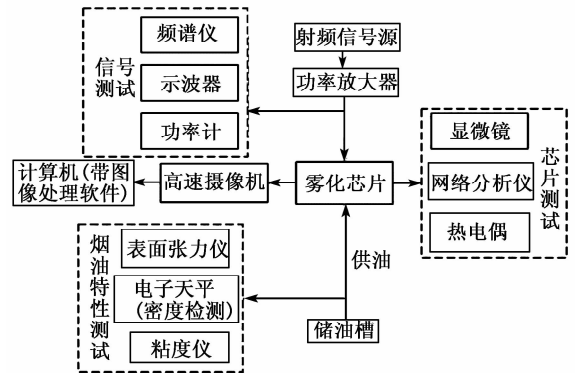


图 1 雾化系统结构示意图

图 2 为雾化系统实验平台。实验时,基于聚酯纤维纸条的毛细作用,将储油槽中的烟油导向雾化芯片叉指换能器一侧的压电基底表面,以确保 SAW 传播路径上分散有烟油;压电基底材料选用 128°Y-X 的铌酸锂压电单晶片,其厚度、机电耦合系数、温度系数和 SAW 理论传播速度(v)分别为 0.5 mm、5.5%、 $-72 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 3 990 m/s;叉指换能器通过采用标准紫外光刻技术,将具有手指交叉形状的 Al 金属电极沉积于压电基底表面,共包含 30 对叉指电极,电极的宽度和间隔设置为等间距,均为 $\lambda/4$,其中 λ 为 SAW 波长,设置为 132 μm ;采用信号发生器(RIGOL DSG3000)产生射频正弦信号,并经过功率放大器(Mini-circuit LZY-22)放大后施加给叉指换能器。信号加载前需采用功率计(DIAMOND SX-200)测定功率值,以确定实际驱动功率值。整个雾化过程使用高速摄像机(Photron FASTCAM SA8)辅以光源拍摄,并以视频和图片的形式进行存储。

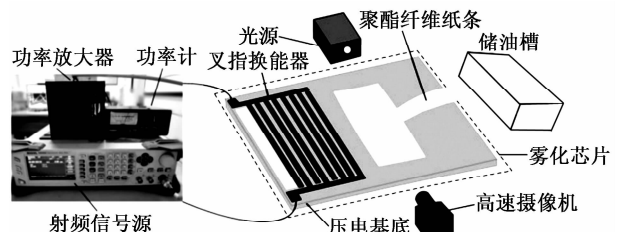


图 2 雾化系统实验平台

2 结果与讨论

2.1 雾化芯片特性测试

雾化芯片的频率响应曲线采用网络分析仪(AV3656)进行测试,结果如图3所示。由图可知,雾化芯片的频率响应特性较稳定,中心工作频率 f 基本满足 $f = v/\lambda = 29$ (MHz)。该频率与理论值(30 MHz)出现细微偏差的原因是:SAW在压电基底上的实际传播速度与理论传播速度存在微小差异,由于压电单晶片上的电极结构、电极厚度、加工品质等带来的衍射效应引起SAW在压电基底上传播速度下降,这可通过选用高品质的压电单晶片和优化芯片加工工艺加以改善。尽管如此,其对提出方法应用可行性的验证影响不大。

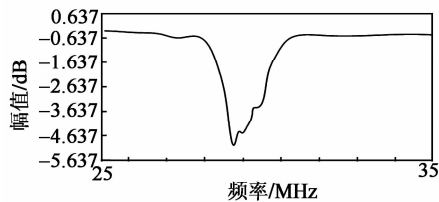


图3 驱动器频率特性曲线

2.2 雾化现象与分析

实验中,根据雾化芯片的工作频率,设置信号源产生对应固定频率的高频正弦交流电信号,经功率放大器放大后,直接加载到叉指换能器的电极两端,通过调节输入电压的幅值以改变驱动功率,使烟油产生不同的动作。当驱动功率较小($0 \sim 0.2$ W)时,聚酯纤维纸条中的烟油会沿着与SAW传播相反的方向被拉出一段距离,然后拉出的烟油面积开始逐渐收缩,形成弯月面的形状,这是由于毛细-粘性效应产生的;当驱动功率增加到 $0.2 \sim 0.9$ W时,烟油同样首先会被往外拉出比上一段更短的弯月面,同时能清晰地看到弯月面表面产生明显的波动现象,这是SAW纵向压力波传播到烟油表面产生扰动形成的表面张力波现象;当继续将驱动功率增加到 $0.9 \sim 1.5$ W时,液体被拉出微小的一部分,观察到聚酯纤维纸条表面有微弱冒泡现象,但并未观察到雾化现象,说明即使烟油表面被激发出毛细波,但毛细扰动产生的惯性力还不足以克服烟油的表面张力;若进一步加大驱动功率(大于 1.6 W),会产生雾化现象,且随着驱动功率的增加,雾化现象越明显。图4为驱动功率 1.8 W时的烟油雾化过程。显然,从信号加载到持续稳定雾化的时间仅为 5.4 ms。此外,整个雾化过程中,雾化芯片的发热量较小,芯片表面温度不高,低于 100 °C。

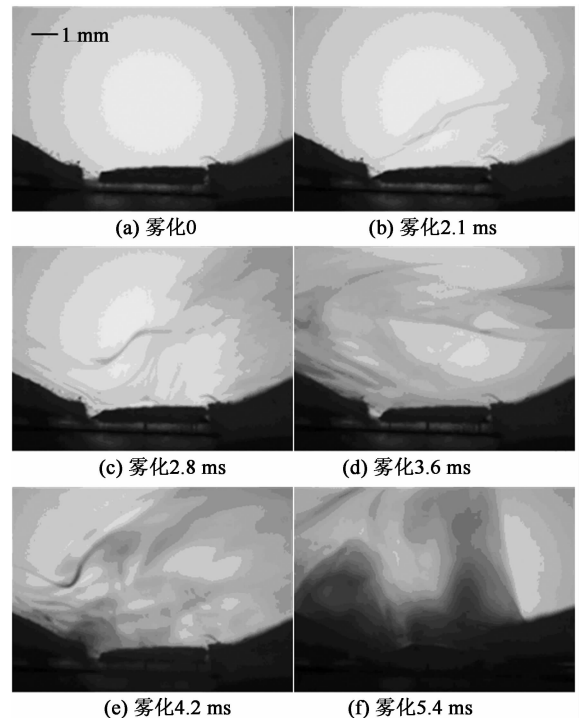


图4 驱动功率为 1.8 W时的烟油雾化过程

2.3 雾化特性讨论

在电子烟抽吸过程中,烟油雾化产生气溶胶的粒径大小一方面会直接影响用户抽吸体验;另一方面,气溶胶粒径对于在人体肺部的沉积或沉积量的多少严重影响人体健康^[19]。颗粒物在肺部沉积引起机理主要有重力沉降、惯性冲击和布朗扩散^[15] 3种。重力沉降表现为颗粒随气流进入且动量较小时,在流动过程中由于重力的作用而逐渐偏离流动方向,最终与壁面碰撞而沉积;惯性冲击表面为颗粒随气流进入且动量较大时,若流动方向发生改变,那么由于惯性作用将会沿着原来的方向继续运动,并与壁面发生碰撞而沉积;布朗扩散是对于亚微米颗粒物,因布朗运动较显著,颗粒物从高浓度向低浓度扩散过程中与壁面接触发生的沉积现象。由于肺泡内的流速很小,对于亚微米颗粒重力效应也小,因此,重力沉降和惯性冲击的影响可忽略,而布朗扩散的沉积效率与颗粒粒径呈指数增长关系,即颗粒粒径越大,沉积效率越高,危害越大。因此,应严格控制雾化气溶胶颗粒的粒径大小,尽量减少雾化烟气在肺部的沉积。根据SAW与微流体作用产生雾化的机理来分析,预测雾化气溶胶粒径与输入参数、烟油特性参数之间应满足如下关系^[20] :

$$D \approx K\lambda_c \approx \frac{K\gamma H^2}{\mu f \cdot L^2} \quad (1)$$

式中: K 为与烟油特性相关的常量; γ 为烟油表面张

力; μ 为烟油剪切粘性力; f_c 为表面毛细波频率; H , L 分别为烟油液膜的特征高度与长度; λ_c 为液体表面毛细波波长; D 为雾化气溶胶直径。

实验时,采用市售华液品牌薄荷口味成品烟油进行测试,其 $\gamma=43.62\text{ mN/m}$, $\mu\approx 0.3859\text{ Pa}\cdot\text{s}$ (常温下), $H/L\approx 0.1$, $f_c\approx 1\text{ kHz}$ 。根据式(1)预测产生气溶胶的粒径为 $\varnothing 1.13\text{ }\mu\text{m}$ 。为了进行对比分析,采用珠海欧美克仪器有限公司的DP-02激光粒度分析仪(可测粒径为 $\varnothing(1\sim 1500)\text{ }\mu\text{m}$)对实际烟油雾化产生的气溶胶粒径进行了测试,结果如图5所示。由图可以看出,气溶胶粒径为 $\varnothing(1.20\sim 2.04)\text{ }\mu\text{m}$,其中88.03%的气溶胶粒径为 $\varnothing 1.71\text{ }\mu\text{m}$,其与理论预测值基本吻合。此外,还对气溶胶进行了人体抽吸测试与抽吸品质评价,结果表明,气溶胶可吸入吐出,且烟气饱满、味道纯正。

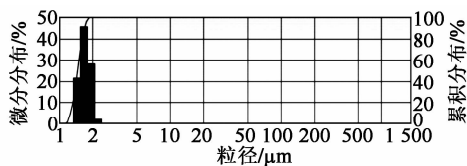


图5 烟油雾化产生气溶胶的粒径分布图

3 结束语

为了改善或解决电热式雾化电子烟存在的技术缺陷,提出了一种基于SAW的全新电子烟雾化方式。搭建了雾化系统实验平台,论证了雾化技术应用的可行性,并对SAW引起烟油雾化的整个过程及烟油雾化特性进行了详细分析。实验结果显示,SAW是一种强而有效的烟油雾化技术,具有非接触连续稳定雾化,气溶胶粒径小且分布均匀,驱动功耗小,雾化效率高,低发热等特点,是电子烟未来发展的一个新方向。

参考文献:

[1] MYERS M L. Towards more effective FDA premarket review of new tobacco products[J]. Tobacco Control, 2016, 25(3): 243-244.

[2] JIANG N, HO S Y, LAM T H. Electronic cigarette marketing tactics in mainland China[J]. Tobacco Control, 2017, 26(2): 230-232.

[3] 朱东来, 陈永宽, 韩熠, 等. 电子烟[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2015.

[4] GRANA R, BENOWITZ N, GLANTZ S A. E-cigarettes: a scientific review[J]. Circulation, 2014, 129(19): 1972-1986.

[5] NAYIR E, KARACABEY B, KIRCA O, et al. Electronic cigarette (e-cigarette)[J]. Journal of Oncological Science, 2016, 2(1): 16-20.

[6] FARSALIONS K E, GILLMAN I G, HECHT S S, et al. Analytical assessment of e-cigarettes: From contents to chemical and particle exposure profiles[M]. North Carolina: Elsevier, 2016.

[7] GUTHERY W. Emissions of toxic carbonyls in an electronic cigarette[J]. Beiträge Zur Tabak for Schung, 2016, 27(1): 30-37.

[8] MIKHEEV V B, BRINKMAN M C, GRANVILLE C A, et al. Real-time measurement of electronic cigarette aerosol size distribution and metals content analysis[J]. Nicotine & Tobacco Research Official Journal of the Society for Research on Nicotine & Tobacco, 2016, 18(9): 1895-1902.

[9] SLEIMAN M, LOGUE J M, MONTESINOS V N, et al. Emissions from electronic cigarettes: key parameters affecting the release of harmful chemicals[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(17): 9644.

[10] ZULKIFLI A, ABIDIN E Z, ABIDIN N Z, et al. Electronic cigarettes: a systematic review of available studies on health risk assessment[J]. Reviews on Environmental Health, 2018, 33(1): 43-52.

[11] RIDDER S D, BIANCANIELLO F S. Process control during high pressure atomization[J]. Materials Science & Engineering, 1988, 98(88): 47-51.

[12] AWARU B, PATIL M N, GOGATE P R, et al. Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 146-158.

[13] LIU J, YU Q, GUO Q. Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73(19): 44-50.

[14] KOURMATZIS A, MASRI A R. Air-assisted atomization of liquid jets in varying levels of turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 764: 95-132.

[15] WATANABE H, MATSUYAMA T, YAMMOTO H. Experimental study on electrostatic atomization of highly viscous liquids[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57(2): 183-197.

[16] QI A, FRIEND J R, YEO L Y, et al. Miniature inhalation therapy platform using surface acoustic wave microfluidic atomization[J]. Lab on A Chip, 2009, 9(15): 2184-2193.

[17] WANG J X, HU H, YE A P, et al. Experimental investigation of surface acoustic wave atomization[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2016, 238: 1-7.

[18] YEO L Y, FRIEND J R. Surface acoustic wave microfluidics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 379-406.

[19] 郭西陇. 颗粒物在人体肺部沉积规律及影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

[20] QI A, YEO L Y, FRIEND J R. Interfacial destabilization and atomization driven by surface acoustic waves[J]. Physics of Fluids, 2008, 20(7): 074103.