華東理工大學学报 自然科学版 Natural Science Edition
JOURNAL OF EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

基于CT技术的加热卷烟孔隙率特征可视化研究

李文锋 曾俊杰 邹大鹏 晁超越 李峰 刘义波 胡静 曹嘉瑞 刘静怡

Visualization and Analysis of Pore Structure Characteristics in HTP Using Computed Tomography

LI Wenfeng, ZENG Junjie, ZOU Dapeng, CHAO Chaoyue, LI Feng, LIU Yibo, HU Jing, CAO Jiarui, LIU Jingyi

在线阅读 View online: http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20251210001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加热卷烟制品传热与烟气流动过程数值模拟

Numerical Simulation of Heat Transfer and Smoke Flow of Heated Cigarette Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(1): 35-40 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20191029004

PEG/CDA膜状复合降温材料的制备及其在加热卷烟中的应用

Preparation of PEG/CDA Membrane Composite Cooling Material and Its Application in Heated Tobacco Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2025, 51(6): 748-756 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20250115003

基于挤压弯曲的柔性银导线力学可靠性试验研究

Experimental Study on Mechanical Reliability of Flexible Silver Wire Based on Extrusion Bending

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(3): 354-360 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20200212004

用于加热卷烟的石蜡改性二醋酸纤维素降温滤嘴的制备与表征

Preparation and Characterization of Paraffin Modified Cellulose Diacetate Cooling Filter for Heated Tobacco Product

华东理工大学学报（自然科学版）. 2024, 50(3): 377-382 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20230324001

基于GAB模型预测包装后卷烟烟丝水活度和含水率的方法

A Method for Predicting the Water Activity and Moisture Content of Cut Tobacco after Packaging Based on the GAB Model

华东理工大学学报（自然科学版）. 2025, 51(3): 316-321 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20240910001

基于深度学习的农场虫情检测算法研究及实现

Research and Implementation of Farm Insect Detection Algorithm Based on Deep Learning

华东理工大学学报（自然科学版）. 2024, 50(5): 732-739 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20231007001

扫码关注公众号，获取更多信息！

文章编号：1006-3080(2026)04-0499-12 DOI：10.14135/j.cnki.1006-3080.20251210001

基于 CT 技术的加热卷烟孔隙率特征可视化研究

李文锋[1]， 曾俊杰[2]， 邹大鹏[1]， 晁超越[2]， 李 峰[2]， 刘义波[2]， 胡 静[2]， 曹嘉瑞[1]， 刘静怡[1]
(1. 广东工业大学 广东省计算机集成制造重点实验室, 广州 510006;
2. 广东中烟工业有限责任公司技术中心, 广州 510385)

摘要: 为探究加热卷烟(Heated Tobacco Products, HTP)烟丝段孔隙结构分布与变化，采用计算机断层(Computed Tomography，CT)扫描与三维重构技术，对比分析了加热器具插入前后的体孔隙率、截面及环形圆柱孔隙率。结果显示，HTP 孔隙分布具有显著非均质性；器具插入导致孔隙结构压缩重分布，体孔隙率降至 0.47；径向最外层孔隙率受内壁挤压，降幅达 28.81%；轴向形成挤压程度递增的复合层、中间层及上部层。仿真与实验证实，内部气流与轴向面孔隙率呈负相关，吸阻特性受孔隙率与插入模式的影响。研究揭示了 HTP 孔隙演变规律，为产品与器具的协同优化设计提供了理论支撑。

关键词: CT 扫描；加热卷烟；孔隙率；多孔介质；可视化

中图分类号: TS41 **文献标志码:** A

卷烟加热系统由加热卷烟(Heated Tobacco Products, HTP)和加热器具组成，按加热形式可分为中心加热型和周向加热型。与传统卷烟相比，卷烟加热系统利用电能转换成热能，在 350 ℃ 以下对烟丝段进行加热以释放气溶胶，因而释放的有害物质更少，对环境的污染更低，近年来得到了广泛关注[1-5]。对于中心加热型产品，加热器具发热元件需插入 HTP 烟丝段进行加热。HTP 烟草段属于多孔介质，其插入发热元件后的形态、孔隙参数等，不仅直接影响产品抽吸体验，也是加热器具设计的关键影响因素。

HTP 烟丝段的孔隙结构较为复杂[6]，既包含烟草原料本身的固有孔隙[7-8]，也存在烟丝相互堆叠形成的缝隙孔隙。烟草固有孔隙的孔径普遍偏小，多为细小且部分呈封闭、孤立状态的孔道，对气体流动的影响有限[9]。与之相比，缝隙孔隙在烟丝段孔隙体系中占主导地位，是决定内部气流状态的主要通道。

孔隙率作为多孔介质的重要表征参数，直接影响材料特性，并且对传输性能以及气体扩散等性质也具有显著影响[10-14]。在卷烟加热系统中，HTP 孔隙率对内部气体流动、烟气交换、燃烧状态、抽吸体验及烟雾质量等有着决定性的影响[15-16]。然而，传统卷烟孔隙率测量方法不仅误差较大，还会对样品造成破坏，且无法表征孔隙分布特征[13,17]。当前，多数研究聚焦于卷烟温度分布、化学成分释放规律，以及烟丝段几何尺寸变化带来的影响，针对烟丝段孔隙率和卷烟置入加热器具后孔隙率变化的定量分析仍较为匮乏[16,18-20]。卷烟置入加热器具后，烟丝段孔隙结构会发生明显改变，进而显著影响 HTP 内部的气流运动与气溶胶生成过程[6,21-22]。因此，探究加热卷烟内部孔隙率的分布与演变规律，对产品结构优化、性能提升具有重要工程意义。

计算机断层(Computed Tomography, CT)扫描作为一种高分辨率、无损的显微成像技术，能够以微米级精度获取材料内部的三维结构图像[23-24]，为多孔介质的微观结构表征提供了强有力的技术支持。Li 等[25]通过 CT 技术，结合图像处理和自动化建模，提出一

收稿日期: 2025-12-10
基金项目: 中国烟草总公司重大专项(110202101073(XX-18))
作者简介: 李文锋(2000—)，男，湖南岳阳人，硕士生，主要研究方向为加热烟草产品热流仿真。E-mail: wenfengli2022@163.com
通信联系人: 邹大鹏，E-mail: anthonyzou@126.com；刘义波，E-mail: liuyibo@gdzygy.com
引用本文: 李文锋, 曾俊杰, 邹大鹏, 等. 基于 CT 技术的加热卷烟孔隙率特征可视化研究 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2026, 52(4): 499-510.
Citation: LI Wenfeng, ZENG Junjie, ZOU Dapeng, *et al*. Visualization and Analysis of Pore Structure Characteristics in HTP Using Computed Tomography[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2026, 52(4): 499-510.

种新孔隙尺度重建方法，并将其应用于电加热烟草(EHC)多孔段的裂解过程；Tang 等[26]通过逆向工程与 CT 技术，构建了卷烟的三维模型，结合计算流体力学(CFD)技术得出卷烟内部烟气的流速、温度和压力分布规律；赵鑫等[27]采用 CT 技术对香烟进行三维扫描，以此获取香烟内部的孔隙分布情况，并分析了常规、中支、细支和加热非燃烧卷烟等不同类型香烟的扫描结果。现有研究大多利用 CT 技术测算整体孔隙率，并分析其对加热卷烟的影响，但针对孔隙形态演变规律及空间分布梯度的探究较为有限。

本文基于 CT 技术与 Avizo Fire 8.1 软件建模，分析加热卷烟缝隙孔隙率的分布特征与变化规律，探究卷烟在初始状态及加热器具置入后的体孔隙率、面孔隙率与环形圆柱孔隙率的演变特性，明确其孔隙率空间分布的不均匀性与变化机制。结合有限元仿真与实验测试结果，为 THS 产品结构优化及加热器具性能提升提供理论依据与技术支撑。

1 模型建立与研究方法

1.1 卷烟插入加热器具前后的尺寸模型

本文选用的 HTP 全长 45 mm，其轴向结构依次为醋纤段(滤嘴段)、中空支撑段与烟丝段，对应长度分别为 7、23、15 mm(图 1(a))，卷烟整体直径为 7.73 mm。加热器具的核心结构包括加热针与加热腔(图 1(b))，其中加热针直径为 2.13 mm。加热腔采用倒锥形结构以容纳并固定烟支，入口直径为 8.0 mm，沿轴向逐渐收缩至底部直径 7.73 mm；腔体底座设有半径 0.5 mm 的收缩圆角，该结构可使卷烟底部插入后收紧并贴合加热针。

HTP 的装配方式为：均匀施加外力将烟支完全插入器具，保证醋纤段顶端与器具上壁面的距离为 20 mm。此时加热针刺入烟丝段的深度为 13.25 mm。受加热腔几何边界的压缩约束，烟丝段长度由初始 15 mm 压缩至 14.5 mm。

1.2 CT 数据三维模型重建

实验所用 HTP 均选自同一批次，样品质量偏差控制在总体均值 ±10 mg 以内，吸阻偏差不超过 ±50 Pa。从达标样品中随机抽取 8 支，采用 Bruker 公司 SKYSCAN 2214 型 CT 设备开展螺旋扫描测试。该设备具有低对比度分辨率(能够达到小于 0.50 μm)，最小像素尺寸可达 0.06 μm。扫描过程中采用 10 μm 分辨率，电压设定为 80 kV，电流设定为 70 μA。在此基础上，借助 Avizo Fire 8.1 软件和 OTSU 算法[9]

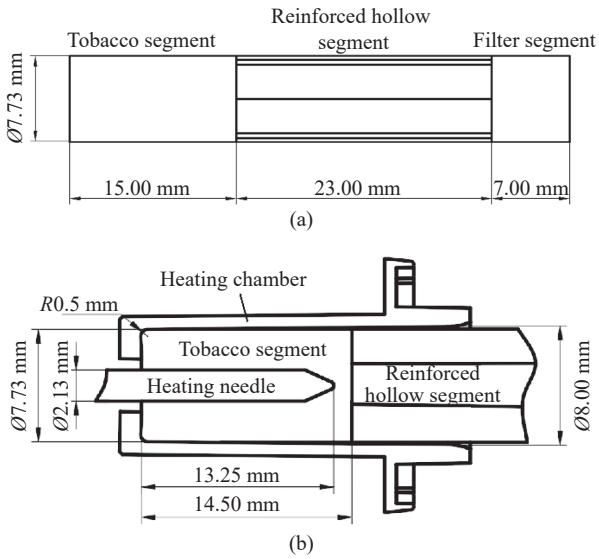


图 1 HTP 插入加热器具前后的尺寸

Fig. 1 Dimensions of HTP before and after insertion into the heating device

建立 HTP 三维孔隙结构模型，通过对模型进行分割，单独提取烟丝段区域进行分析，并通过 Materials Statistics 模块统计烟丝段自然状态下的总体素数与实体密实区域体素数。

CT 扫描时，设备噪声易形成伪影，这类伪影常被误判为孔隙；扫描产生的零散噪点也可能被当作烟丝固有孔隙。因此，建模阶段需对微小孔隙区域依次使用 Remove Small Spots 与 Fill Holes 命令进行填充、简化处理[28]，处理结果见图 2。

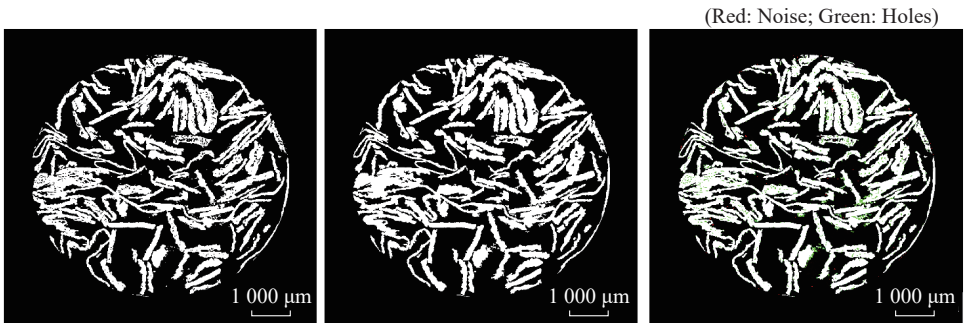
通过图像处理算法将原始 CT 二值化图像与经去噪填孔处理后的 1435 张截面进行对比分析。引入交并比(Intersection over Union, IoU)与 Dice 系数(Dice Coefficient)作为结构一致性的评价指标。交并比越接近于 1，表示两个区域重合越完全；Dice 系数越接近于 1，表示理工样本越相似，两者计算公式分别如下：

$$\mathrm{IoU}=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|},\ \mathrm{Dice}=\frac{2|A\cap B|}{|A|+|B|} \tag{1}$$

其中，A 为原始图像区域，B 为处理后图像区域。计算结果如图 3 所示，可以看出，经处理后的图像 IoU 均值为 0.96，Dice 系数均值为 0.98。这两个指标均接近于 1，尽管存在少量离群值，但其主体分布及平均值均显著高于 0.95 系数基准线，这表明上述处理方式可有效去除非结构性的噪声与无效微孔，未改变烟丝原本的状态与孔隙分布特征。

1.3 计算和表征方法

1.3.1 *孔隙率计算方法* 孔隙率是表征材料中孔隙体积占总体积比例的重要物理量，其计算公式为：



(a) Raw binary　(b) Processed image　(c) Difference map

图 2　CT 图像处理结果对比

Fig. 2　Comparison of CT image processing results

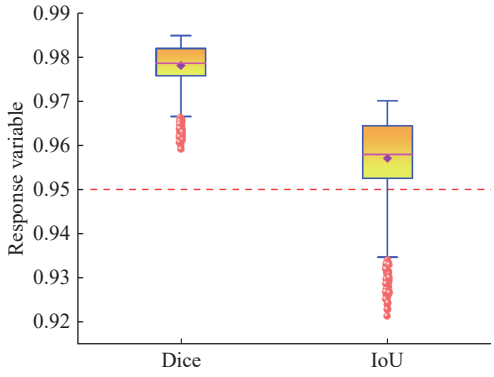


图 3　简化处理图像后 Dice 系数与 IoU 分布箱形图

Fig. 3　Box plots of Dice coefficient and IoU distribution after image simplification

$$\varepsilon = \frac{V_0}{V} \tag{2}$$

其中，ε 表示孔隙率；V_0 表示孔隙空间体积, mm³; V 表示材料自然状态下体积, mm³。

基于 CT 扫描图像及其三维模型, 体孔隙率、面孔隙率和环形圆柱孔隙率分别从整体、沿轴向面分布、沿径向体分布 3 种方式和尺度展现卷烟的孔隙特性。在后续定义中的孔隙率均指烟丝间的缝隙孔隙率, 不包含烟丝纤维内部固有的微孔结构。

图 4(a)~4(c)分别为插入加热器具前后体孔隙率的三维实体示意图。作为一种平均孔隙率, 体孔隙率通常用于建立均质等效模型, 其计算公式为:

$$\varepsilon_{vi} = \frac{B_{0i} - B_i}{B_{0i}} \tag{3}$$

其中，ε_{vi} 表示第 i 个 HTP 烟丝段体孔隙率，B_{0i} 表示第 i 个烟丝段自然状态下三维空间的整体体素数量，B_i 表示第 i 个烟丝段的密实实体在三维空间下的体素数量。

图 4(d)~4(f)分别为插入加热针前后面孔隙率的截面示意图。面孔隙率的计算过程如下: 首先在长度为 15 mm 的卷烟烟丝段上, 每隔 0.1 mm 提取一张横截面图像, 共获取 150 张图片, 将图像转换为灰度图并进行二值化处理。采用视觉算法识别孔隙区域, 标记目标孔隙区域, 计算该区域的像素数量, 最终得出面孔隙率 (计算公式见式 (4)), 平均面孔隙率计算公式见式 (5)。

$$\varepsilon_{si} = \frac{B_{p0i} - B_{pi}}{B_{p0i}} \tag{4}$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n}\varepsilon_{si} \tag{5}$$

其中，ε_{si} 表示第 i 个截面面孔隙率，B_{p0i} 表示第 i 个烟丝段截面自然状态下的二维截面上整体像素数量，B_{pi} 表示第 i 个烟丝段截面密实实体二维截面上的像素数量，$\bar{\varepsilon}_s$ 表示平均面孔隙率，n 表示截面数量。

环形圆柱孔隙率计算公式见式 (6), 计算模型如图 5(c)所示。环形圆柱划分方法如下: 以烟丝圆柱中轴线为中心, 以 HTP 烟丝段直径 7.73 mm 为环形圆柱外直径, 考虑到加热针直径和 CT 分辨率的影响, 选择环宽为 0.56 mm, 划出最外侧的环形圆柱; 之后, 以上次环形圆柱的内直径为新环形圆柱的外直径, 并保持环宽为 0.56 mm, 划出第 2 个环形圆柱, 直至 HTP 烟丝圆柱中轴线或插入加热器具后的加热针外径。最终, 对不同环形圆柱区域孔隙率进行体积加权平均, 在后文中简述为平均环形圆柱孔隙率。它的计算公式见式 (7)。

$$\varepsilon_{hi} = \frac{B_{h0i} - B_{hi}}{B_{h0i}} \tag{6}$$

$$\bar{\varepsilon}_h = \frac{\sum(\varepsilon_{hi} \cdot V_i)}{\sum V_i} \tag{7}$$

其中，ε_{hi} 表示烟丝段第 i 个环形圆柱孔隙率，B_{h0i} 表示第 i 个环形圆柱烟丝段在自然状态下三维空间的整体体素数量，B_{hi} 表示第 i 个环形圆柱烟丝段的密实实体在三维空间下的体素数量，$\bar{\varepsilon}_h$ 表示平均环形圆柱孔隙率，V_i 表示第 i 个环形圆柱区域体积。

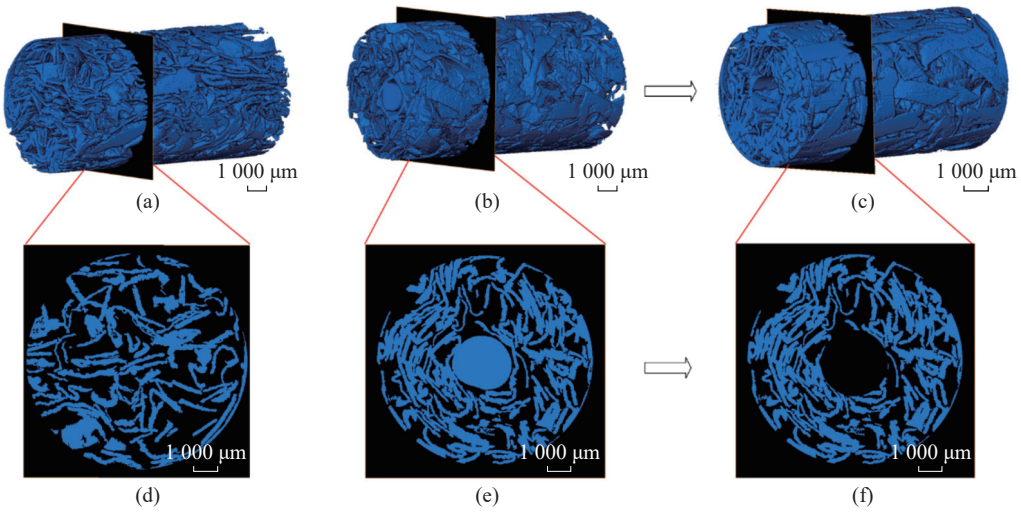


图 4 体孔隙率和面孔隙率计算区域示意图

Fig. 4 Schematic illustration of the calculation domains for volumetric and cross-sectional porosity

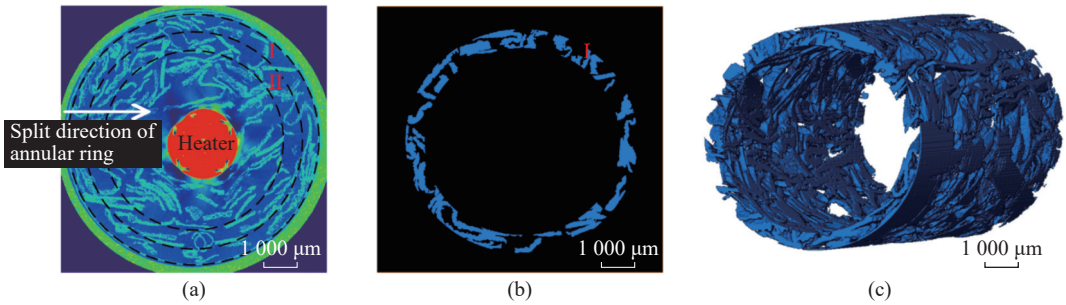


图 5 环形圆柱孔隙率计算区域示意图

Fig. 5 Schematic illustration of the calculation domain for annular cylindrical porosity

1.3.2 烟丝的均匀性表征方法 引入最大偏差率和相对偏离度这两个指标描述烟丝段孔隙率的不均匀性。其中,最大偏差率用于量化卷烟孔隙率最大值与最小值之间分布的差距程度,其计算公式如下:

$$D = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\min}} \tag{8}$$

其中,D 为最大偏差率;$\varepsilon_{\max}$ 为最大孔隙率,$\varepsilon_{\min}$ 为最小孔隙率。

相对偏离度反映了孔隙率与整体水平的偏离程度,用于评估孔隙率的离散性和均匀性,其计算公式为:

$$R_i = \frac{\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}} \tag{9}$$

其中,R_i 为第 i 支 HTP 体孔隙率(或第 i 个面孔隙率,或第 i 个环形圆柱孔隙率)的相对偏离度;ε_i 为第 i 支 HTP 体孔隙率(或第 i 个面孔隙率,或第 i 个环形圆柱孔隙率);$\bar{\varepsilon}$ 为对应的整体烟支的平均体孔隙率(或平均面孔隙率,或平均环形圆柱孔隙率)。

2 结果分析与讨论

2.1 HTP 体孔隙率

对 CT 扫描后的 8 支 HTP 烟丝段(标记为样品 Y1~Y8)的孔隙结构进行分析,根据式 (3) 计算得到的体孔隙率如表 1 所示,8 根 HTP 的体孔隙率的总体均值为 0.55,相对偏离度范围为−5.97% ~ 8.98%,最大偏差率为 18.18%。样品 Y8 的初始体孔隙率为 0.56,与总体均值的相对偏差最小,仅为 1.50%,部分样品(Y1 和 Y6)的体孔隙率明显偏离平均水平,显示出较大的波动性。由于 Y8 在整体孔隙率上表现出最佳的均值代表性,本文首先提取并对比了该样品整体受挤压前后的体孔隙率变化。

将样品 Y8 插入加热器具后,通过 CT 三维重建提取烟丝段,并去除中心加热针及其他非烟丝组成部分(图 4(b)和 4(c))后,测得该卷烟的体孔隙率为 0.47。与插入前体孔隙率 0.56 相比,整体下降了 16.07%,表明插入加热器具后器具的挤压和体积侵入,使得烟丝的孔隙结构发生压缩和重构,导致其体积压缩和孔隙率减小。

2.2 HTP 面孔隙率

基于表 1 的体孔隙率测量结果,为了进一步验证样品 Y8 在内部结构分布上的代表性,将样品 Y8 的轴向面孔隙率分布曲线与 8 支样品的统计平均分布及标准差区间进行了对比。如图 6 所示,样品

表 1　HTP 烟丝体孔隙率

Table 1　HTP tobacco segment volumetric porosity

Sample	B_{oi}	B_i	ε_{vi}	R_i/%
Y1	308 701 722	123 669 770	0.60	8.98
Y2	468 759 060	20 362 508	0.57	2.84
Y3	465 297 096	199 729 413	0.57	3.77
Y4	459 821 230	208 630 023	0.54	−1.67
Y5	421 626 862	194 117 647	0.54	−1.89
Y6	384 624 935	185 714 075	0.52	−5.97
Y7	379 985 558	180 627 690	0.52	−4.61
Y8	569 538 656	251 580 749	0.56	1.50

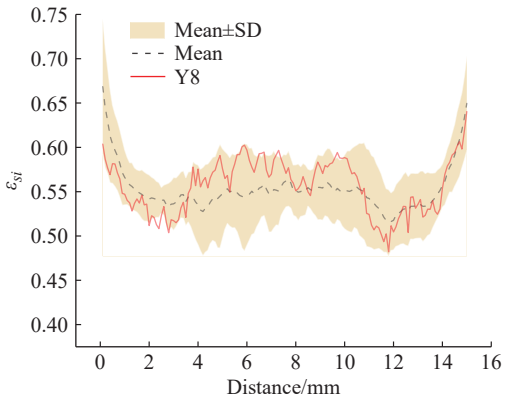


图 6　Y8 面孔隙率分布与总体样本统计特征对比

Fig. 6　Comparison of the cross-sectional porosity distribution of sample Y8 with the population statistics

Y8 的孔隙率变化曲线基本落在所有样本的统计误差区间内, 且紧密跟随平均曲线的“W 形”波动趋势。这表明样品 Y8 不仅在体孔隙率上具有代表性, 其内部孔隙的轴向空间分布特征也能准确反映该批次产品的普遍规律。因此, 本文选取样品 Y8 作为典型案例, 进行后续的三维重构与流场仿真分析。

在验证了样品 Y8 的空间分布代表性后, 对样品 Y8 插入加热器具前后的面孔隙率进行测量, 通过 CT 扫描生成的卷烟烟丝段截面图片有1411 张, 每隔 0.1 mm 选取一张, 均匀选取其中 150 张截面图片进行分析, 根据式 (4) 计算得出各个截面的面孔隙率。如表 2 所示, 插入加热器具前, 面孔隙率在卷烟烟丝段的不同截面上存在显著差异, 最大偏差率为 34.17%, 相对偏离度范围为−13.30% ~16.45%, 表明 HTP 烟丝段的孔隙率分布具有较高的不均匀性。插入加热器具后, 通过 CT 三维重建提取烟丝段, 去除中心加热针及其他非烟丝组成部分后, 提取相关截面图片, 以同样的方式计算面孔隙率, 最大偏差为 31.02%, 相对偏离度范围为−14.25% ~12.25%, 不同截面之间的孔隙率依旧存在明显差异。

插入加热器具后, HTP 的最值、平均值、最大偏差率和相对偏离度均有所降低。孔隙率的范围由 0.47~0.64 缩小到 0.40~0.53, 平均值由 0.55 下降到 0.47, 表明插入加热器具后, 加热器具对卷烟结构的压缩和重构使面孔隙率整体下降 14.54%。加热器具对卷烟的均匀性有一定作用, 但并不明显。

图 7 示出了 HTP 插入加热器具前后面孔隙率的对比, 可以通过孔隙率曲线斜率变化观察到, 插入加热器具前卷烟切面缝隙孔隙率的整体趋势呈“W”状: 两端孔隙率较高, 从两端向中央呈现先下降后上升的分布, 并在一定距离后趋于平稳。这表明烟丝在靠近末端区域较为疏松, 而中部区域则较为均匀致密, 这一分布趋势主要是由卷烟制造工艺所造成的。

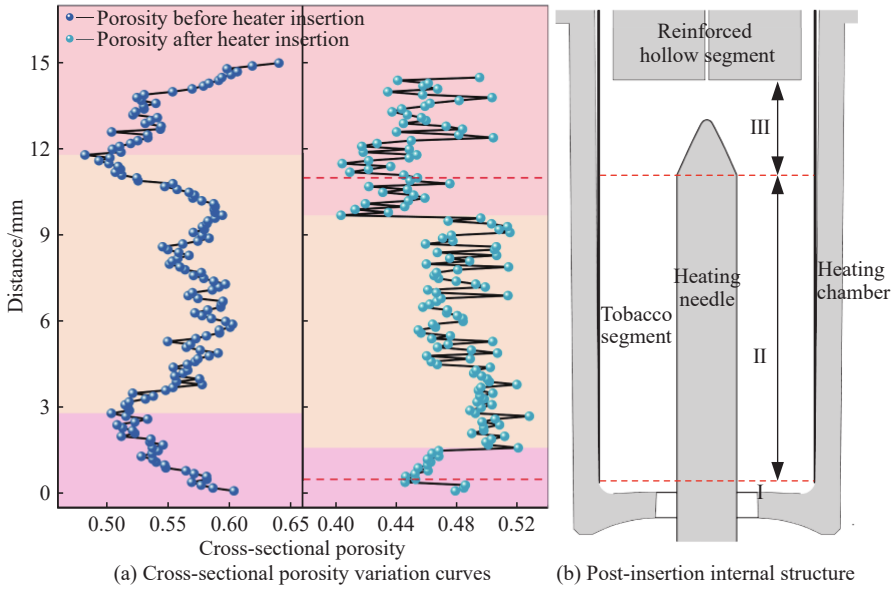
插入加热器具后的 HTP 烟丝段分为 3 层(图 7(b)), 这一结构的形成原因是器具几何边界对烟丝介质孔隙的重塑。实测表明, 加热器具的倒锥形设计以及插入方式, 使得原长 15.00 mm 的烟丝段在完全插入器具后, 被轴向压缩至 14.50 mm。第 1 层为复合挤压层(图 7(b)中区域Ⅰ), 该区域主要为器具底座的收缩圆角, 高度为 0.50 mm, 实测样品 Y8 卷烟孔隙率显示, 该层高度为 1.50 mm, 远大于器具加热腔底部圆角的半径, 平均面孔隙率从 0.54 降到 0.49, 减少了 9.26%。这是由于烟草段是由大量长纤维状的烟丝堆积成的疏松多孔结构组成, 这一层的烟丝受到器具收拢端口的挤压、加热针的侧向扰动, 以及器具内壁综合挤压作用的影响, 挤压作用会通过烟丝间的相互支撑和接触进行传递, 使得结构的影响效果超出原有底部圆角范围; 第 2 层为中间挤压层(图 7(b)中区域Ⅱ), 区域高度为 10.50 mm, 对应加热针截面主体区域, 此段加热针直径恒定。实测样品 Y8 卷烟在此段的高度为 8.20 mm, 平均面孔隙率从 0.56 降到 0.47, 减少了 16.07%。这一部分孔隙率下降主要是受到器具内壁和加热针的共同挤压作用, 实测高度小于加热针主体长度的原因是, 器具两端的结构对于烟草段的挤压影响程度远大于中间段结构的作用, 因此造成中间孔隙变化区域小于器具结构尺寸; 第 3 层为上挤压层(图 7(b)中区域Ⅲ), 对应加热针尖与烟支中空支撑段的交界处, 区域高度为 3.50 mm。实测样品 Y8 加热卷烟在此段的高度为 5.30 mm, 平均面孔隙率从 0.56 降到 0.46, 减少了 17.86%。这是因为加热针在插入过程中将部分烟丝向上推移, 而上方中空支撑段的支撑架形成了位移边界, 阻挡了烟丝的进一步上行, 导致烟丝在针尖与中空支撑段之间发生严重的拥塞与累积, 从而形成了高密度的

表 2 HTP 插入加热器具前后烟丝面孔隙率

Table 2 Cross-sectional porosity of tobacco of HTP before and after insertion into the heating device

Condition	$\bar{\varepsilon}_{s,\max}$	$\bar{\varepsilon}_{s,\min}$	$\bar{\varepsilon}_s$	SD	R_l/%	D/%
Before insertion	0.64	0.47	0.55	0.03	−13.30—16.45	34.17
After insertion	0.53	0.40	0.47	0.03	−14.25—12.25	31.02

SD—Standard deviation



(a) Cross-sectional porosity variation curves (b) Post-insertion internal structure

图 7 HTP 插入加热器具前后面孔隙率对比

Fig. 7 Comparison of cross-sectional porosity of HTP before and after insertion into the heating device

低孔隙区域。通过对面孔隙率数据的分析，所得分层结构清晰地揭示了插入加热器具后 HTP 内部孔隙率的演变规律，证实了其压缩程度与加热器具的几何特征结构存在对应关系。

2.3 HTP 环形圆柱孔隙率

在上述三维重构与图像处理的基础上，获取 HTP 样品 Y8 的烟丝段模型，并采用环形圆柱体的分割方式进行分析。插入加热器具前，烟丝段被分为 6 个环形圆柱体，联合式 (6) 和式 (7)，得到的平均环形圆柱孔隙率为 0.56。插入加热器具后的烟丝段，由于加热针的存在，可分割为 5 个环形圆柱体，依据同样的计算方法，得到平均环形圆柱孔隙率为 0.45。插入加热器具前后，平均环形圆柱孔隙率下降 19.64%，表明插入加热器具对烟丝段的压缩效应导致孔隙率显著降低。

如表 3 所示，插入加热器具前，环形圆柱孔隙率的相对偏离度范围为−7.14%~5.35%，最大偏差率为 13.46%；插入加热器具后，环形圆柱孔隙率的相对偏离度范围为−6.67%~6.67%，与插入前相比整体范围基本不变，但正负偏离对称性增强，最大偏差率为 14.28%，基本保持相当。插入加热器具前后，不同环形圆柱之间的孔隙率依旧存在差异。插入加热器具后，加热针挤压作用对环形圆柱体的孔隙分布产生较小的均化影响，加热卷烟烟丝段的孔隙率表现出一定的均匀性。

排除中心加热针 0~2.13 mm 区域的影响，其余各环形圆柱区域在几何划分上具有可比性。图 8 示出了 HTP 插入加热器具前后环形圆柱孔隙率对比。由图 8 可知，靠近器具内壁的最外层(6.61~7.73 mm 区域)孔隙率降幅最为剧烈，高达 28.81%；而紧贴加热针的内层(2.13~3.25 mm 区域)降幅仅为 12.73%，中间层区域降幅也均小于外层。这表明，虽然加热针的插入对内层烟丝产生了直接挤压，但器具内壁对外部烟丝的周向约束与压缩作用更为显著。造成这一显著差异的主要原因在于倒锥形加热腔，该几何结构在卷烟插入过程中，对位于最外层的烟丝施加了持续增强的径向约束与压缩作用，导致外层烟丝的致密化程度远高于仅受加热针侧向排挤的内层。因此，受到锥形内壁直接压缩的最外层区域，是导致 HTP 整体的体孔隙率显著降低的首要因素。

2.4 CT 图像分析

HTP 加热针插入情况示意如图 9 所示。图 9(a)

表 3　HTP 插入加热器具前后烟丝环形圆柱孔隙率

Table 3　Annular cylindrical porosity of tobacco of HTP before and after insertion into the heating device

Condition	$\bar{\varepsilon}_{h,\max}$	$\bar{\varepsilon}_{h,\min}$	$\bar{\varepsilon}$	SD	R_i/%	D/%
Before insertion	0.59	0.52	0.56	0.02	−7.14~5.35	13.46
After insertion	0.48	0.42	0.45	0.02	−6.67~6.67	14.28

是加热针插入深度不够的情况, 部分区域烟丝结构未被充分压缩, 从而影响整体孔隙率分布。图 9(b)是加热针正常插入状态, 烟丝段结构完整。图 9(c)是加热针插入过程中受力不均匀的情况, 烟丝段过度压缩使烟丝段外形发生变形, 影响整体孔隙分布。这表明加热针的插入方式是影响加热卷烟插入加热器具后孔隙分布的重要因素。

通过对 HTP 样品 Y8 插入加热器具前后的 CT 图像(图 10)进行观察, 可以了解烟丝在不同观察角度下的分布情况。正视剖面 (10(a)) 显示烟丝分布较为均匀, 烟丝排列呈现松散状态; 而侧视剖面 (10(c)) 中的烟丝分布明显更为密集。这与面孔隙率分析结果中孔隙轴向分布不均形成有效对应, 表明卷烟烟丝在不同方向上的分布与堆积方式存在显著差异。

分别比较剖面 10(a) 与 10(d), 以及剖面 10(c) 和 10(f) 发现, 在插入加热器具后, 卷烟烟丝整体排列呈现出更致密的特征, 烟丝堆积密度显著提高, 尤其是加热针头部以上区域。加热针的插入使周围烟丝分布重新调整, 加热针两侧部分区域出现烟丝堆积减少的现象, 对孔隙结构产生直接影响。这一现象与轴向上挤压层面孔隙率下降幅度最大的特点, 以及径向最外侧环形圆柱孔隙率变化幅度最大、最内侧环形圆柱孔隙率变化幅度最小的孔隙变化情况相对应。

2.5　仿真结果分析

采用 COMSOL Multiphysics 6.1 进行流体力学仿真, 鉴于 HTP 烟丝段在宏观上呈现显著的轴向孔隙率非均匀性, 若将整个烟丝段视为单一均质介质, 将无法准确表征其内部流场特征, 且不满足传统达西定律关于介质各向同性的基本假设。因此, 基于样品 Y8 的 CT, 测量出 150 张截面面孔隙率, 将烟丝段分为 15 段, 每段长度为 1 mm, 包含 10 张截面。尽管烟支整体具有非均质性, 但在单独分段中孔隙率变化相对平缓, 可以近似满足局部均质假设, 通过式 (5) 计算每段截面孔隙率的平均值并赋予对应的烟丝段。对于直径 7.73 mm 的空心圆管, 在 17.5 mL/s 的标准抽吸流量下, 其雷诺数为 192。当填充烟丝后, 由于实际孔隙通道直径远小于圆管直径, 实际雷诺数将远小于 192。因此, HTP 内部流动严格处于层流状态, 符合多孔介质流动的基本物理假设。

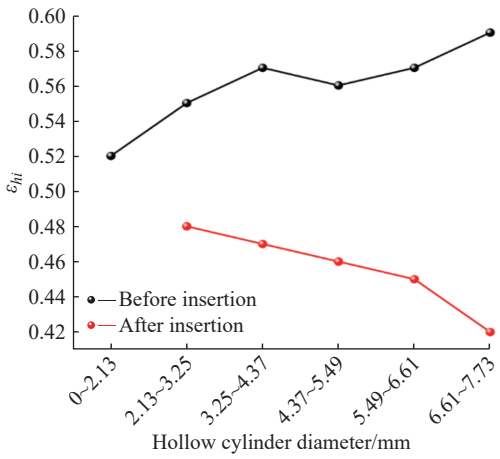


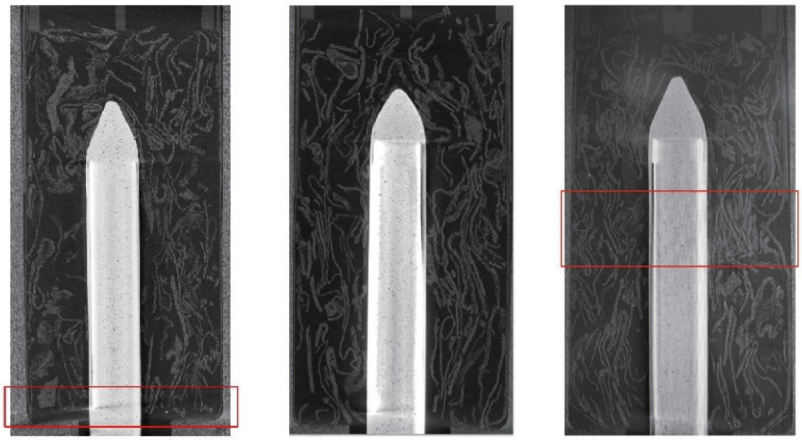
图 8　HTP 插入加热器具前后环形圆柱孔隙率对比

Fig. 8　Comparison of annular cylinder porosity of HTP before and after insertion into the heating device

为了更好地描述复杂变孔隙结构时的气流流动[29-31], 基于上述假设, 采用 Ergun 方程[21,32-34]作为描述多孔介质区域的动量守恒方程。边界条件设置如下: 设置滤嘴段出口为恒定流量(17.5 mL/s), 入口为压力边界条件(0 Pa)。流体介质选用常温空气, 仿真网格数为 106 万, 网格质量为 0.69, 满足网格无关性要求。

对 HTP 卷烟模型插入加热器具前后的等效模型进行仿真研究, 结果如图 11 所示, 流速(v)和吸阻变化值(Δp)的变化与平均面孔隙率的分布存在明显关联。在插入加热器具前后, 平均面孔隙率变化曲线与流速变化曲线、吸阻变化值曲线均存在较为明显的对应峰谷关系, 即当各段面孔隙率沿轴向呈现"W 形"分布特征时, 流速和吸阻变化值对应呈现出"M 形"分布。这一现象可由多孔介质的达西定律和局部阻力分布解释: 在孔隙率较高的区域, 烟丝结构对流体的阻力较小, 局部吸阻降低, 气流分布较为均匀, 流速较低; 相反, 在孔隙率较低的区域, 气流受到更大的黏性剪切作用, 局部吸阻增加, 使得流体被迫通过较窄的通道, 流速相应增加。体孔隙率对局部流动的调控作用, 使得局部流场特征呈现出“低孔隙-高吸阻-高流速”的规律性分布。

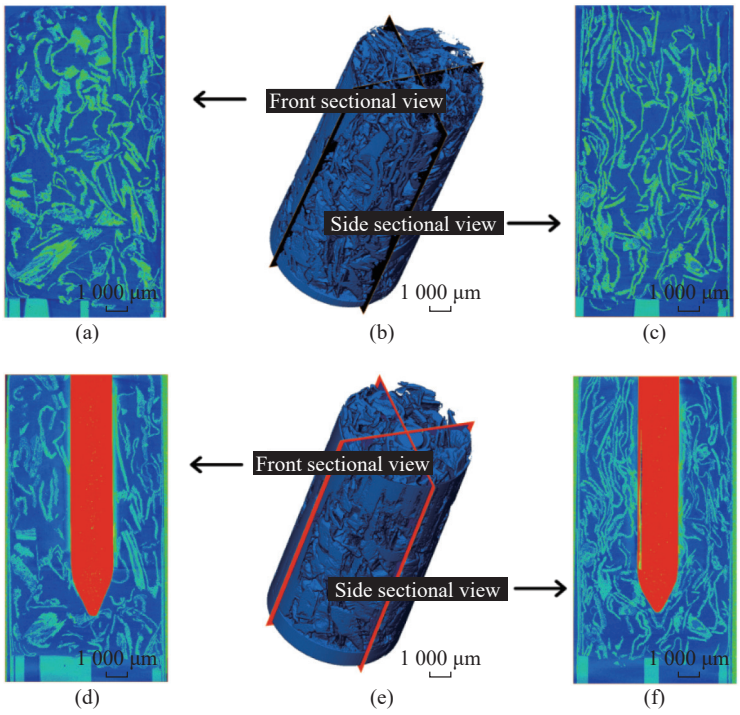
在未插入状态下, 15 段烟丝面孔隙率相对偏离度范围为−8.73%~8.18%, 最大偏差率为 18.50%, 15 段流速的相对偏离度范围为−5.88%~10.29%, 最大偏



(a) (b) (c)

图 9 HTP 插入加热针情况示意图

Fig. 9 Schematic diagram of HTP inserted into the heating pin



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

图 10 HTP 烟丝段插入加热器具前后不同方向剖面示意图

Fig. 10 Multi-directional sectional views of the tobacco section of HTP before and after insertion into the heating device

差率分别为 14.10%。在插入加热器具后，由于烟丝的压缩与结构调整，面孔隙率整体下降，15 段烟丝面孔隙率的相对偏离度范围为−8.51%~6.38%，最大偏差率为 16.30%，15 段流速的相对偏离度范围为−5.00%~10.47%，最大偏差率为 15.90%。插入加热器具前后各段面孔隙率的最大偏差率与流速的最大偏差率差异较小，进一步表明各段烟丝面孔隙率的分布特征对局部流动规律起到较为明显的调控作用。

2.6 HTP 抽吸测试结果分析

依据标准 GB/T 22838.5—2009，使用 XZY7500 加热卷烟吸阻检测仪（青岛颐中科技有限公司），取 30 支 HTP，在相对湿度 60%±5%、温度（22±2）℃ 下平衡 48 h，随后以（17.5±0.2）mL/s 恒定抽吸流量进行吸阻测试，测试结果统计量见表 4。

插入加热器具对 HTP 吸阻特性产生了显著影响，表现为吸阻强度整体提升。如表 4 所示，插入前 HTP 吸阻为（321.50±11.10）Pa，相对偏离度范围为−6.84%~7.74%，与通过 CT 扫描模型重建得到体孔隙率的相对偏离度范围（−5.97%~8.98%）基本一致，表明体孔隙率可以在一定程度上表征卷烟的吸阻特性。插入加热器具后，吸阻增加至 426.70±27.97 Pa，相对偏离度的范围扩大为−10.34%~11.53%，标准差增加 16.87 Pa，最大偏差率增长至 24.39%，吸阻数据离散程度显著增大。而在 2.2 节 HTP 面孔隙率分析中，

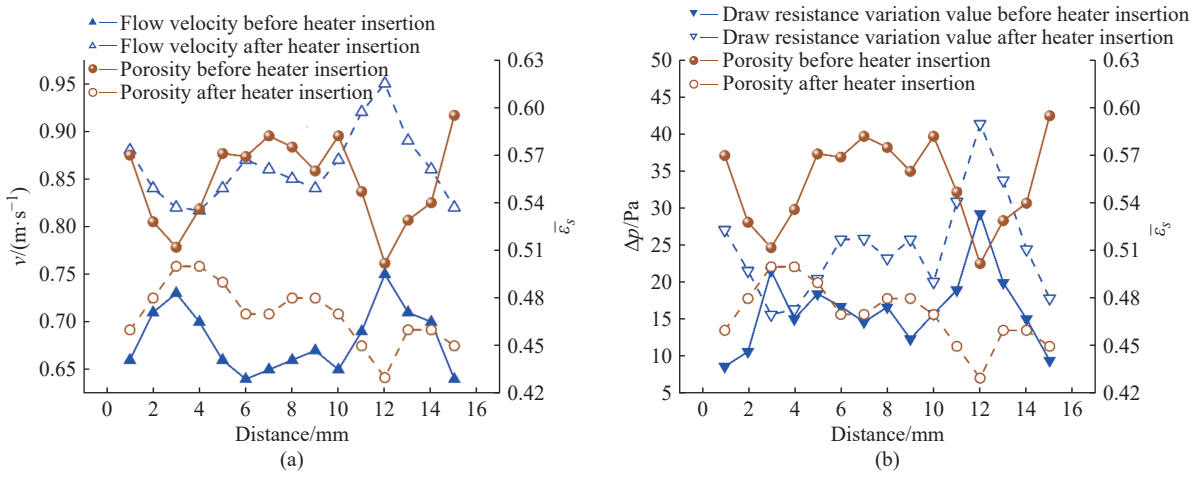


图 11　HTP 插入加热器具前后孔隙率与流速和吸阻变化值仿真关系对比

Fig. 11　Comparative simulation of flow velocity and draw resistance variation versus porosity of HTP before and after insertion into the heating device

表 4　HTP 插入加热器具前后吸阻变化值

Table 4　Draw resistance variation of HTP before and after insertion into the heatering device

Condicition	Δp/Pa				R_i/%	D/%
	Max	Min	Mean	SD		
Before insertion	346.40	299.50	321.50	11.10	−6.84~7.74	15.66
After insertion	475.90	382.60	426.70	27.97	−10.34~11.53	24.39

相对偏离度范围从−13.30%~16.45%变化为−14.25%~12.25%, 插入加热器具前后的面孔隙率标准差基本一致, 最大偏差率从 34.17% 降至 31.02%, 变化并不显著。这是由于加热卷烟插入加热器具后, 由于器具的复杂气道结构使得吸阻增大, 而具有一定柔性的 HTP 在插入过程中易出现插入深度不足和局部变形差异问题(如图 9 所示), 从而使插入加热器具后吸阻的相对偏离度和标准差有所增加。

结合 CT 获得的体孔隙率, 通过仿真实验与抽吸实验对 HTP 在插入加热器具前后的平均体孔隙率与吸阻变化进行分析, 结果如表 5 所示。插入加热器具前, 仿真实验与抽吸实验测量的吸阻结果偏差为 5.68%; 插入加热器具后, 吸阻结果偏差为 4.44%。说明仿真实验能够较好地反映抽吸实验中的吸阻变化。在仿真实验中, 插入加热器具的体孔隙率低 14.54%, 吸阻增加 34.30%; 在抽吸实验中, 插入加热器具的体孔隙率下降 16.07%, 吸阻上升 32.72%。在仿真实验和抽吸实验中, 体孔隙率变化导致吸阻变化呈现相似幅度, 表明在 HTP 的抽吸过程中, 体孔隙率变化对吸阻的变化有较大影响。

2.7　讨论

通过 CT 技术同步获取表征三维结构的体孔隙率与表征二维界面特性的面孔隙率, 实现多维度孔隙特征联合解析, 为表征卷烟之间和卷烟内部的差异提供一种有效的可视化分析方法。通过 CT 技术对烟丝段体孔隙率进行可视化表征发现, 不同 HTP 样品之间存在体孔隙率的差异; HTP 烟丝段在插入加热器具前后体孔隙率、面孔隙率、环形圆柱孔隙率都呈现出一定程度的不均匀性: 与插入前相比, 插入加热器具后烟丝段的体孔隙率和环形圆柱孔隙率均呈现出不同程度的下降趋势, 展现了显著的径向梯度压缩特征, 其中靠近器具内壁的环形圆柱的外层

表 5　HTP 仿真实验和抽吸实验数据

Table 5　HTP simulation experiment and pumping experiment data

Condicition	Experiment type	$\bar{\varepsilon}_{vi}$	Δp/Pa
Before insertion	Simulation	0.55	304.21
	Suction	0.56	321.50
After insertion	Simulation	0.47	408.55
	Suction	0.47	426.70

孔隙率降幅显著高于靠近加热针的内层;在轴向上,平均面孔隙率呈现明显下降趋势,受挤压后的烟丝段由中空支撑段向着烟丝端方向形成上挤压层、中间层、复合挤压层的分层压缩结构。与刘洋等[35]通过乙醇浸泡法测得静态烟叶孔隙率和赵鑫等[27]基于微焦点CT的HTP静态孔隙分析的方法相比,本文综合采用体孔隙率、面孔隙率和环形圆柱孔隙率,实现了对加热器具插入并挤压烟丝过程的多维度量化表征。

尽管插入器具前烟丝段的体孔隙率与平均面孔隙率在数值上基本一致,但这3种指标在物理表征与适用范围上各有侧重。结合气流阻力特性分析可知:体孔隙率作为三维宏观统计量,其变化幅度与吸阻实验结果一致性最高,是反映卷烟整体气流阻力变化的最佳指标;面孔隙率基于轴向二维分布,其波动特征能精确捕捉由局部致密化引起的流速脉动,适用于评估轴向气流的不均匀性及批次稳定性;环形圆柱孔隙率则从径向维度,直接揭示了器具内壁的压缩是导致整体孔隙率下降与吸阻升高的主要结构成因。3种表征方式的针对性选择与协同应用,能够为加热卷烟的产品设计、生产工艺优化及抽吸体验提升提供更全面的数据支撑。

从HTP样品Y8插入加热器具前后的CT图像发现,加热器具的插入显著改变了烟丝的排列与分布,尤其是在加热针附近,烟丝密度增加,孔隙发生改变。这些结构变化可能直接影响传热效率、燃烧速率和气体流动特性。此外,在实际使用中,由于吸烟者在插入加热器具时操作方式的差异,烟丝的孔隙状态和孔隙度变化存在一定的不确定性,表明操作方式可能对卷烟性能产生个体化影响。结合CT技术对烟丝孔隙结构进行分析,为烟丝结构优化和性能改善提供了新的研究方向,未来可进一步探讨加热器具不同插入操作方式对卷烟性能的影响。

对室温下CT扫描数据进行的三维重构与仿真研究,虽然未包含HTP在高温环境下烟丝的热解挥发和形态变化,但量化了加热器具插入这一机械行为对烟丝段初始堆积结构的重塑作用。这种由机械压缩形成的初始孔隙结构是气流通道建立的物理基础,对于理解加热启动阶段的流场分布特征与吸阻形成机理具有重要的参考价值。

3 结 论

(1) 通过CT检测和Avizo Fire 8.1软件三维重建图像分析,实现HTP烟丝段体孔隙率、面孔隙率、环形圆柱孔隙率3种孔隙率的表征,发现卷烟之间和卷烟内部在不同方向和维度上呈现出不同的不均匀性。在插入加热器具前,HTP之间的体孔隙率分布存在显著的非均匀性,不同卷烟的体孔隙率相对偏离度范围达到−5.97%~8.98%,最大偏差率达15.86%。截面扫描发现,单支HTP内部面孔隙率在轴向上呈现较为显著的非均匀性,其相对偏离度范围可达−13.30%~16.45%,最大偏差率达34.17%;通过环形圆柱孔隙率发现,单支HTP内部在径向上也呈现出非均匀性,相对偏离度范围达−7.14%~5.35%,最大偏差率达13.46%。

(2) 插入加热器具后,受内壁与加热针的综合挤压,烟丝孔隙结构发生显著重构。整体上,体孔隙率由0.56降至0.47,降幅16.07%;径向上,受内壁强约束的外层孔隙率降幅28.81%显著高于内层12.72%;轴向上则形成梯度压缩特征,复合层、中间层和上挤压层的面孔隙率分别下降9.26%、16.07%和17.86%。

(3) 基于CT测量进行面孔隙率和多孔介质模型仿真实验,分析了面孔隙率分布与HTP内部气流流动特征之间的关系,结果表明面孔隙率分布对HTP内部气流特性具有调控作用。面孔隙率越大,通过的流速越小,各段面孔隙率沿轴向呈现"W形"分布特征时,流速和吸阻变化值对应呈现出"M形"分布。插入加热器具前,平均面孔隙率和流速的相对偏离度范围分别为−8.73%~8.18%和−5.88%~10.29%,最大偏差率分别为18.50%和14.10%;插入加热器具后,平均面孔隙率和流速的相对偏离度范围分别为−8.51%~6.38%和−5.00%~10.47%,最大偏差率分别为16.30%和15.90%,面孔隙率的分布特性解释了烟支内部流速的分布变化和不均匀性。

(4) 抽吸实验结果表明,基于CT技术获得的体孔隙率可以在一定程度上表征卷烟的吸阻特性。在插入加热器具前,通过CT获取的体孔隙率的相对偏离度为−5.97%~8.98%,可以解释HTP吸阻相对偏离度范围为−6.84%~7.74%。在插入加热器具后,器具结构气道的引入使吸阻从321.50±11.10 Pa提升至426.7±27.97 Pa,吸阻的相对偏离度范围从−6.84%~7.74%增大至−10.34%~11.53%,标准差增大16.87 Pa,最大偏差率增长至24.39%,吸阻数据离散程度增大。CT图像数据表明,HTP的吸阻不仅受体孔隙率整体变化的影响,加热器具插入状态的不确定性也会加剧空隙率分布的离散程度。

参考文献:

[1] TATTAN-BIRCH H, HARTMANN-BOYCE J, KOCK L,

et al. Heated tobacco products for smoking cessation and reducing smoking prevalence[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2022(1): CD013790.

[2] THORNE D, MCHUGH D, SIMMS L, *et al*. Applying new approach methodologies to assess next-generation tobacco and nicotine products[J]. Frontiers in Toxicology, 2024, 6: 1376118.

[3] LIU Y, CAO J, ZHANG J, *et al*. Research progress and prospect on the safety of heated tobacco products[J]. Toxicology, 2024, 505: 153823.

[4] 卢昕博, 董晨晓, 徐建, 等. 用于加热卷烟的石蜡改性二醋酸纤维素降温滤嘴的制备与表征 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 377-382.

[5] DEBETHIZY J D, BORGERDING M F, DOOLITTLE D J, *et al*. Chemical and biological studies of a cigarette that heats rather than burns tobacco[J]. The Journal of Clinical Pharmacology, 1990, 30(8): 755-763.

[6] 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.

[7] MEFTAH R, BERGER S, JACQUS G, *et al*. Multiscale characterization of glass wools using X-ray micro-CT[J]. Materials Characterization, 2019, 156: 109852.

[8] STRAUMIT I, LOMOV S V, WEVERS M. Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 69: 150-158.

[9] MOREIRA A C, APPOLONI C R, MANTOVANI I F, *et al*. Effects of manual threshold setting on image analysis results of a sandstone sample structural characterization by X-ray microtomography[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2012, 70(6): 937-941.

[10] DONG J, SUN H, ZOU D, *et al*. Model and prediction relationship of sound velocity and porosity of seafloor sediments[J]. Journal of Sea Research, 2023, 194: 102413.

[11] JING S Y, SUN Z Y, YANG L, *et al*. Effects of porosity and porosity distribution in gas diffusion layer on the performances of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2024, 613: 234957.

[12] ZOU D, XIE J, MENG X, *et al*. Analysis of the variation of *in situ* seafloor sediments acoustic characteristics with porosity based EDFM[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1170757.

[13] SHEN K, XIA L, JIAO K, *et al*. Characterization techniques for tobacco and its derivatives: A systematic review[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1402502.

[14] ZHANG K, WANG J, LI X, *et al*. Study on pore characteristics of cigarette porous carriers with the CT method[J]. AIP Advances, 2025, 15(11): 115126.

[15] JIN X, MENG D, FU L, *et al*. Analysis of the key component puff-by-puff transport in special segments and aerosol for electrical heated tobacco product[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1477795.

[16] ZHANG B, XIAO L, HUANG 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(1): 6690487.

[17] STEPIEN A, DURLEJ M, SKOWERA K. Application of the computed tomography method for the evaluation of porosity of autoclaved materials[J]. Materials, 2022, 15(23): 8472.

[18] 张智轩, 李志强, 尹献忠, 等. 加热卷烟复合传热过程的数值模拟 [J]. 烟草科技, 2024, 57(2): 61-69.

[19] 祝冬杰, 姚燕, 蔡晋辉, 等. 加热不燃烧卷烟抽吸效果模拟研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(3): 304-310.

[20] WU Z, ZHANG Q, YU H, *et al*. Quantitative analysis of pyrolysis characteristics and chemical components of tobacco materials based on machine learning[J]. Frontiers in Chemistry, 2024, 12: 1353745.

[21] SONG Y, LIU Z, SUN Z, *et al*. Flow field analysis of cigarette filter through micro-CT-based geometries and CFD simulation[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e29253.

[22] KIM S H, CHOI H, JUNG Y, *et al*. Numerical analysis of the coupling between heat transfer and pyrolysis in heat-not-burn tobacco using computational fluid dynamics[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(11): 2907-2915.

[23] CHEN Z, LI W, YU Y, *et al*. Study on high temperature evolution of pore structure and permeability characteristics of C/SiC composites based on *in-situ* X-ray computed tomography[J]. Ceramics International, 2024, 50(21): 43299-43310.

[24] MEEK M C, BEST S, CAMERON R. The effects of despeckling filters on pore size measurements in collagen scaffold micro-CT data[J]. Journal of Microscopy, 2021, 284(2): 142-156.

[25] LI Z, KE Z, HUANG Y, *et al*. A pore-scale reconstruction-based approach to analyze the tobacco-containing segment in electrically heated cigarettes[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(2): 023602.

[26] TANG D, WU J, ZENG J, *et al*. Research on cigarette during smoking based on reverse engineering and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(10): 2359-2375.

[27] 赵鑫, 刘朝贤, 朱文魁, 等. 基于微焦点 CT 的烟支内部孔隙率检测 [J]. 烟草科技, 2024, 57(5): 75-82.

[28] ZENG X, BROWN L P, ENDRUWEIT A, *et al*. Geometrical modelling of 3D woven reinforcements for polymer

composites: Prediction of fabric permeability and composite mechanical properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 56: 150-160.
[29] 杜亮. 基于CFD的卷烟烟气流动与扩散状态研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
[30] BAKER R R. Gas velocities inside a burning cigarette[J]. Nature, 1976, 264(5582): 167-169.
[31] WEI J, XIAO H, WANG X, *et al*. Analysis of parametric instability of cigarettes based on computational fluid dynamics methods[J]. Heliyon, 2023, 9(9): e19449.
[32] ERGUN S, ORNING A A. Fluid Flow through randomly packed columns and fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1949, 41(6): 1179-1184.
[33] CIMOLIN F, DISCACCIATI M. Navier-Stokes/Forchheimer models for filtration through porous media[J]. Applied Numerical Mathematics, 2013, 72: 205-224.
[34] 陈俊宏, 程辉, 胡贵华. 一种基于冷扩散模型的复杂反应流场建模方法 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2024, 50(5): 720-731.
[35] 刘洋, 胡军, 刘菲, 等. 不同类型烟叶的孔结构表征 [J]. 烟草科技, 2015, 48(3): 84-88.

Visualization and Analysis of Pore Structure Characteristics in HTP Using Computed Tomography

LI Wenfeng[1], ZENG Junjie[2], ZOU Dapeng[1], CHAO Chaoyue[2], LI Feng[2], LIU Yibo[2], HU Jing[2], CAO Jiarui[1], LIU Jingyi[1]

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Technology Center, China Tobacco Guangdong Industrial Co. Ltd, Guangzhou 510385, China)

Abstract: The distribution and variability of pore space within the tobacco segment of heated tobacco products (HTP) are important factors affecting user experience and the design of heated tobacco devices. In this study, computerized tomography (CT) combined with 3D reconstruction technology was utilized to examine the pore distribution and structural changes in the tobacco segments of HTP. The research specifically analyzed volumetric porosity, cross-sectional porosity, and annular cylindrical porosity.The results revealed that the porosity distribution was significantly inhomogeneous across different HTP samples and within individual samples along various directions, both before and after device probe insertion. The mechanical insertion of the heated tobacco device induces a redistribution and compression of the pore structure, reducing the overall volumetric porosity to 0.47. In the radial direction, the outermost annular porosity is most significantly affected by the inner wall of the heated tobacco device, showing a reduction of 28.81%. In the axial direction, the structure forms three distinct regions: a composite extruded layer, an intermediate extruded layer, and an upper extruded layer. The degree of pore extrusion increases progressively within each of these layers. Furthermore, simulations and experiments confirm that the internal airflow characteristics of HTP follow an inverse relationship with the axial cross-sectional porosity distribution.The study indicates that draw resistance characteristics are influenced not only by volumetric porosity but also by the insertion mode of the heated tobacco device. These insights provide a theoretical basis and technical support for the optimal design of both HTP and the heated tobacco device.

Key words: CT scan; heated tobacco products; porosity; porous media; visualization

（责任编辑：李娟）