

红外辐射材料在加热不燃烧(HNB)烟草中的应用研究

黄婷, 吴聪, 唐良颖, 谭健

湖北中烟工业有限责任公司(新型烟草制品工程中心), 湖北 武汉

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月22日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

通过改进加热方式来提高雾化效果是加热不燃烧(HNB)烟草制品的研发热点, 相对于目前广泛采用的电阻式加热技术, 红外辐射加热技术是一个全新的应用方向。本文对红外加热技术及其应用进行了概述, 对红外辐射材料在不同粉体含量、掺杂成分含量和膜厚条件下的发射率影响规律进行了探索, 对传统与红外基体烟气成分释放量表现进行了匹配性研究, 同时对红外辐射材料在新型烟草加热器具方面的应用形式和研究前景进行了展望。

关键词

红外辐射, 红外特性, 发射率

Research on the Application of Infrared Radiation Materials in Heat-Not-Burn Tobacco Products

Ting Huang, Cong Wu, Liangying Tang, Jian Tan

Engineering Center for New Tobacco Products, China Tobacco Hubei Industrial Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: May 9th, 2024; accepted: Jun. 22nd, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

Improving the atomization effect by improving the heating method is a hot spot in the research of heat-not-burn tobacco products. Compared with the resistance heating technology widely used at present, IR heating is a new application direction. In this paper, the IR heating technology and its

application are summarized, the matching characteristics of infrared radiation materials and HNB tobacco were studied, and the application forms and research prospects of infrared radiation materials in HNB appliances were prospected.

Keywords

IR Heating, Infrared Radiation Characteristics, Infrared Emissivity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前市场上的 HNB 热源以电加热为主, 这种加热方式存在两大缺陷。其一, 热量传导损失较大, 加热效果会随着 HNB 电加热热源加热路径的增加而急剧减小, 从而导致烟草制品受热不均, 部分烟草制品未完全释放烟气; 其二, 与 HNB 电加热热源直接接触的烟草易出现碳化、焦结等现象, 更有甚者会出现焦糊味, 严重影响消费者吸食 HNB 烟草制品的口感, 而且会在 HNB 电加热热源上形成焦化结块, 影响热源使用效果, 降低热源使用寿命。

红外辐射加热技术具有非接触式加热、无需中间介质、高穿透性等特点, 可以在物质表面及内部同时加热, 加热速度快且效率高。大多数有机化合物对远红外线都有强烈的吸收特性[1], 而 HNB 烟草制品对特定波长的红外辐射具有强烈的吸收特性, 因此将红外加热技术运用在 HNB 烟草制品上, 可有效避免现有电阻式加热技术存在的技术缺陷, 迅速将烟草加热到适宜的温度, 同时减少能源浪费和环境污染。

然而, 由于烟草材料的特殊性质, 在应用红外辐射材料加热时, 需了解烟草产品的红外吸收特性与热解特性, 从而确定需要关注的红外波段和辐射强度, 以确保烟草能够均匀加热且不会烧焦, 因此需要对红外辐射材料和 HNB 烟草的匹配特性进行研究, 从而为红外材料的工业化应用提供研究支撑。

2. 红外加热技术及应用概述

红外线(Infrared)是波长在 0.76 微米到 1000 微米之间、位于无线电波与可见光之间的非可见光。任何物体在温度高于绝对零度时, 都会不断地吸收其它物体辐射出来的能量, 并且把吸收的能量转化成热能再辐射出去。

2.1. 红外辐射技术概述

从物理学上讲, 红外辐射加热就是辐射材料发射红外波和被辐射材料吸收红外波这两个过程, 被辐射材料分子或原子吸收红外线后, 会发生能级跃迁, 扩大以平衡位置为中心的各种运动的幅度, 质点的内能加大, 宏观反映就是物体温度的升高[2]。

由于红外加热主要是通过红外线的发射及吸收两个过程组成, 因此红外加热的效果必然与辐射材料的红外辐射率及被辐射材料的红外吸收率密切相关。红外辐射率是物质的本质特性, 具有较高红外辐射率的材料在吸收能量(如加热)后能够将其以较高的比例(甚至 100%, 如纯黑体)转换为红外辐射能量; 而红外吸收则是一种匹配性吸收, 当红外辐射频率与被辐射材料热运动频率一致时, 红外辐射会很容易被物质吸收而转化为分子热运动从而发热。

2.2. 红外加热技术在工农业生产中的应用

红外加热方式作为一种高效的节能技术,已经在工业、农业生产中得到了一定范围的应用。大多数有机化合物,如纤维、树脂、橡胶等吸收可见光和近红外光能力很弱,而吸收远红外线能力较强,因此在工业应用中,大多选择波长较大的远红外线对上述化合物进行辐射加热或干燥;欧阳德刚[3] [4] [5]等人研究了一系列过渡金属氧化物系红外辐射材料,并将其应用于工业炉上,结果表明,在高温工业炉上应用过渡金属氧化物系红外辐射陶瓷粉体,能够获得较好的节能效果;魏忠彩等人[6]对国内外红外辐射干燥技术在果蔬和粮食干燥方面的应用及研究进展进行阐述,认为可以通过与其它新型干燥技术相融合的方式来提升干燥品质。

2.3. 红外加热技术在 HNB 领域的应用

将红外加热技术运用在 HNB 烟草制品上,可实现均匀加热,避免出现碳化、焦结现象,提升消费者的消费体验,同时其热效率高的特点亦可减轻 HNB 器具对电池电路的压力,增加 HNB 器具的使用寿命。在国内的 HNB 领域,贵州中烟[7]将红外加热材料以外围式和内芯式的结构形式应用到加热器具上,并实现微加热器和红外加热方式同时加热;深圳市子午线公司[8]将红外加热涂层进行分段设计,增大 HNB 烟丝的加热效率;安徽中烟[9]在红外加热材料成分和制备、湖北中烟[10]在红外加热管装备方面都有大量研究涉及。

3. 红外辐射材料与烟草物质匹配性研究

判断红外加热是否有效,主要是通过红外线被物体所吸收的程度来决定的,当红外放射源所辐射出的红外线波长和被加热物体的波长相匹配时,红外线的吸收量越大,其加热的效果越好。在 HNB 红外加热产品的应用中,重点研究 HNB 的烟草特性,探索得到与其相匹配的红外辐射材料,并进一步对红外辐射材料的特性、配方等开展研究,是提高 HNB 红外产品发热效率和产品优势的重要方面。

3.1. HNB 烟草制品特性

为探究某类型的 HNB 烟草制品特性,实验研究中分析了 HNB 烟草样品在不同升温速度下的吸热变化规律及能量消耗,并选择同批次 HNB 烟草样品分析其红外波长吸收情况。

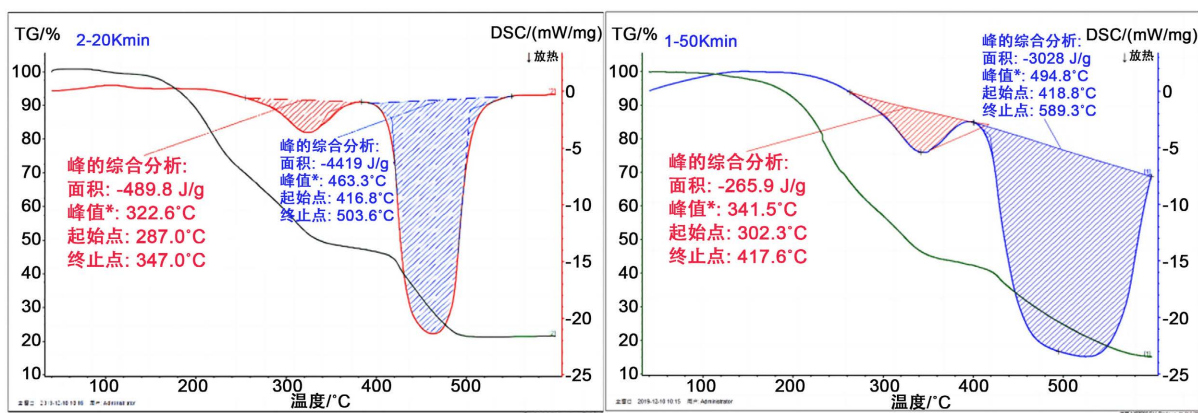


Figure 1. DSC/TG analysis of HNB tobacco products

图 1. HNB 烟草制品 DSC/TG 分析

上图 1 是 HNB 烟草制品不同升温速度下的 DSC/TG 曲线,从图中可以看到当升温速度分别为 20

K/min 和 50 K/min 时, 加热过程中均存在 2 个吸热峰, 其中高温峰对应烟草的燃烧过程, 低温峰对应烟草中部分物质的挥发过程, 不同加热速度下低温峰和高温峰峰值分别在 320℃~340℃和 463℃~495℃范围, 表明加热不燃烧烟草制品的实际使用温度在 320℃~340℃之间。

进一步测试发现, HNB 烟草平均比热值为 3.0 J/(g·℃), 若单只烟质量约 0.33 g, 则烟草在实际使用过程中, 从室温到可以吸食的温度需要热量约 300 J, 烟草完全被加热至烘烤完毕, 需要能量约 460 J。根据总的能量需求及使用过程中的加热时间, 可以推导出烟草红外加热所需的功率范围, 比如从器具开始加热到可以吸食的预热时间为 10 秒, 则加热功率约为 46 W。

下图 2 给出了 HNB 烟草制品近红外, 中红外和远红外分析曲线, 从图中可以看到, 烟草制品的主要吸收波长在 1.5~10 μm, 15~20 μm 范围, 而在远红外区域吸收峰较少。由于红外吸收是一种匹配性吸收, 对于本实验中的烟草物质而言, 物质对 1.5~10 μm 和 15~20 μm 范围的红外波有较强的吸收率, 对其他波段的红外线吸收较弱或不吸收, 因此, 要想提升红外材料对烟草的加热效果, 材料在 1.5~10 μm, 15~20 μm 范围内应具有较高的发射率。

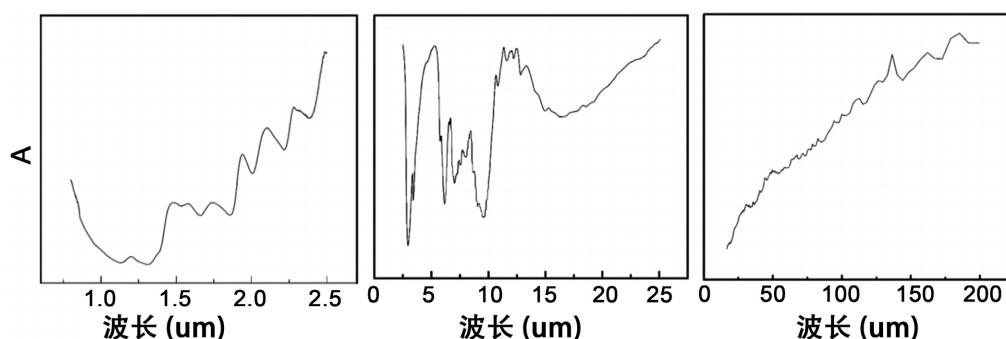


Figure 2. Infrared analysis of HNB tobacco products
图 2. HNB 烟草制品红外分析

3.2. 红外辐射材料特性研究

材料的红外辐射现象是由粒子振动引起的偶极矩变化而产生的, 根据振动对称性选择定则, 粒子振动时的对称性越低, 偶极矩的变化就越大, 其红外辐射就越强。根据斯特藩 - 玻尔兹曼(Stefan Boltzmann)定律 $M = \sigma \epsilon T^4$ 可知, 在温度 T 控制不变的情况下, 红外发射率 ϵ 与材料红外辐射能量呈正比例关系。红外发射率 ϵ 越大, 物体向外部辐射的能量也就越多, 红外发射率的高低是评价材料红外辐射性能优劣的重要指标。

为了便于测试红外辐射材料的性能, 将研究的红外辐射材料在加热器具基体上进行涂覆形成红外涂层, 通过红外吸收光谱(UV-Vis-NIR)和 IR-2 双波段发射率测量仪表征了红外材料涂层的红外发射率, 分析材料在对应波段的辐射性能, 探究其与 HNB 烟草样品的匹配性。

3.2.1. 红外材料不同含量对比

对某红外材料体系开展不同红外粉掺杂比例研究, 探究粉体含量对红外发射率的影响规律, 对比不同含量的红外材料在 3~5 μm 波段范围内、加热温度为 350℃、材料涂层厚度为 15 μm 时的发射率变化关系。

如下图 3 所示, 红外粉体含量为 0 时即为未添加红外材料的普通涂层, 可以看出, 普通涂层红外发射率不足 0.2, 而掺入红外陶瓷粉体后, 其发射率显著提升, 最大可以达到 0.836。测试表明在相同膜厚条件下, 红外涂层的发射率随红外粉体含量的增大而迅速增大。

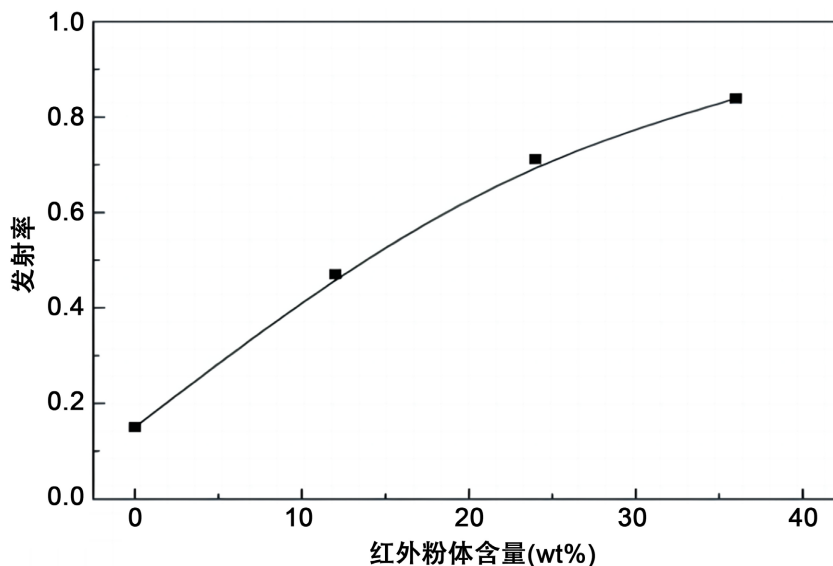


Figure 3. The relationship between infrared material content and emissivity under heating temperature of 350°C and thickness of 15 μm

图 3. 红外涂层在 350°C、膜厚 15 μm 条件下红外粉体含量与发射率的变化关系

3.2.2. 有效掺杂成分不同含量对比

对某红外材料开展关键成分掺杂含量研究,探究不同关键成分掺杂量对红外材料在 3~5 μm 波段红外发射率的影响规律。

对比不同 Cr^{3+} 掺杂量对红外材料在 1~20 μm 波段范围的红外发射率影响,如图 4 所示,未掺杂样品红外发射率为 0.81,掺杂后红外材料红外发射率逐渐提升。当掺杂量 $x = 0.2$ 时,红外发射率最高为 0.91,这是由于其降低了样品材料的禁带宽度,增大自由载流子浓度,提高了自由载流子吸收,提升红外辐射,当掺杂量达到 20% 时,性能达到顶峰,再继续添加时,红外材料结构孔隙已被填充,影响了最终的红外辐射性能,表明当 Cr^{3+} 的掺杂量为 20% 时,红外材料的红外发射率最好。

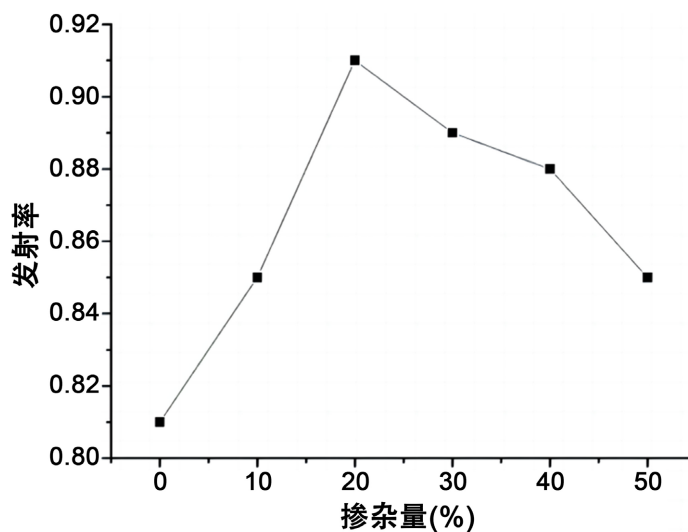


Figure 4. The infrared emissivity of the No.1 infrared material in the range of 1~20 μm wavelength range

图 4. 1#尖晶石体系在 1~20 μm 波段的红外发射率

3.2.3. 红外涂层不同膜厚对比

对红外材料开展涂层厚度研究,探究不同涂层厚度对红外发射率的影响规律。

如下图 5 所示,图为不同膜厚红外涂层在温度为 350℃的发射率(3~5 μm 波段范围内)变化关系曲线。其中 0#为未添加红外材料的普通涂层,1#为 12 wt% 红外粉体含量涂层,2#为 24 wt% 红外粉体含量涂层,3#为 36 wt% 红外粉体含量涂层。

由图 5 可以看到,0#普通涂层的红外发射率随膜厚的增加而略有增大,在 20~40 μm 厚度范围内,其发射率的提升并不明显,发射率最高也仅在 0.2。对于红外涂层而言,在 1#和 2#较低含量(≤24 wt%)情况下,其膜厚会随着膜厚的增加而增加,但是当膜厚超过 35 μm 后,其发射率变化很小;在 3#高含量情况下(36%),15 μm 厚度涂层其发射率已提升至 0.836,随膜厚度的增加,其发射率的进一步提高并不明显,25 μm 厚度涂层其发射率为 0.856,随着膜厚的进一步增加,其发射率并无变化,由此可见,膜厚最优控制在 25~35 μm 范围。

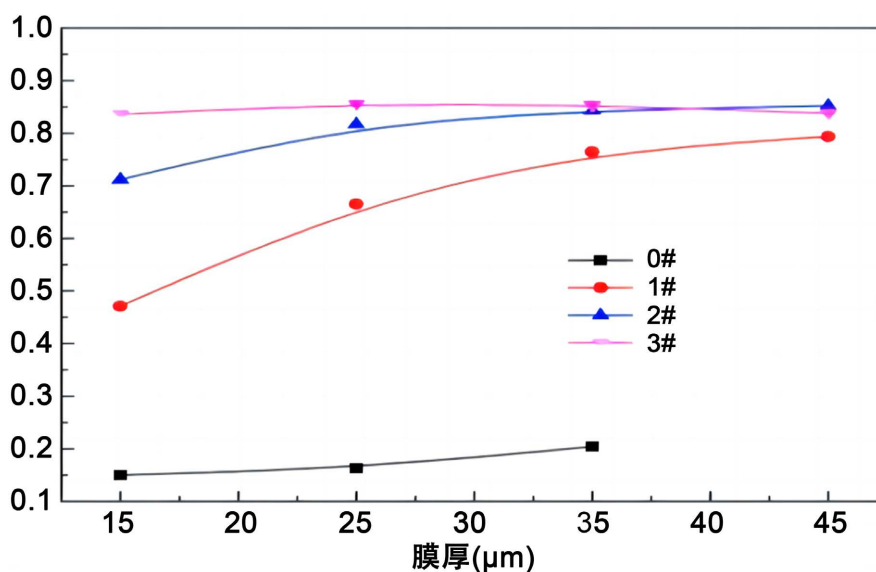


Figure 5. Emissivity variation curves of infrared coatings with different thicknesses at 350°C

图 5. 不同膜厚红外涂层在温度为 350℃的发射率变化曲线

3.3. 红外材料匹配性应用

基于上述研究成果形成定型的某批次红外加热材料,选定传统加热基体,同时保持基本结构性能参数不变,在传统加热基体上涂布红外加热材料制备成红外加热基体并与传统加热基体进行烟草匹配性对比,通过在相同加热条件下比较主流烟气中烟气成分释放量表现来验证红外效果。

抽取实验室样品,抽吸加热卷烟,并收集和测定总颗粒物,其中 TPM 总颗粒物以单支卷烟浓度含量表征,具体烟气成分以多支卷烟浓度含量表征。每个样品平行测定两次,萃取样品后用气相色谱仪测定标准工作溶液,测定样品时,根据样品中目标物与相应内标的峰面积计算加热卷烟主流烟气中烟碱等物质浓度。

如图 6 为不同基体抽吸后单只烟总颗粒物 and 不同烟气成分对比数据。从烟气成分来看,红外加热基体 TPM 释放最多,同时在烟碱、丙二醇、丙三醇等主要烟气释放物表现方面,红外加热基体的效果也优于传统加热基体,表明红外辐射材料的添加能有效改善 HNB 烟草加热性能。

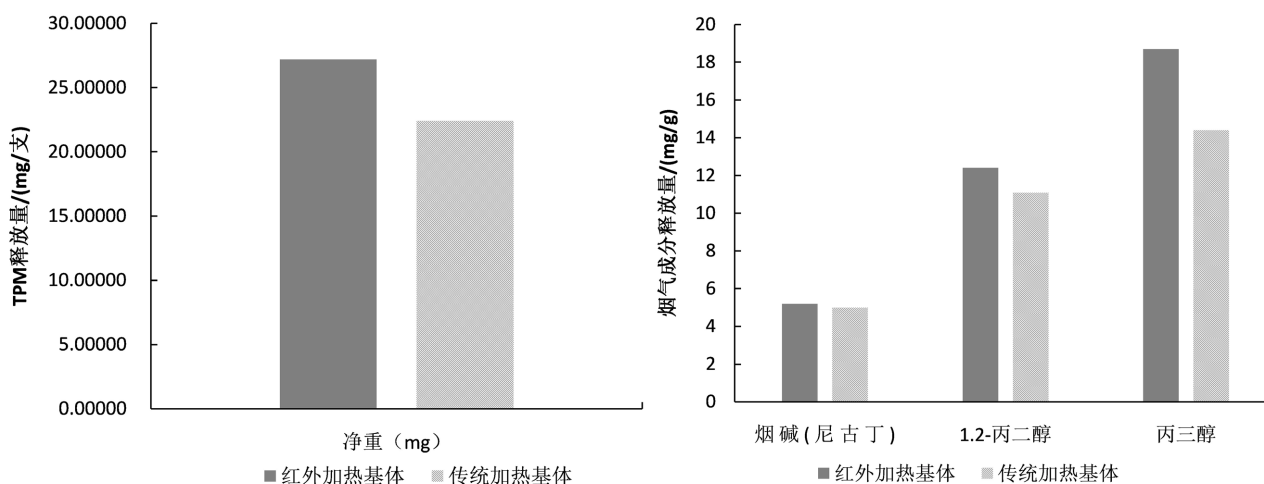


Figure 6. Comparison of the content of smoke components with different heating structures
图 6. 不同基体烟气成分含量对比

4. 结论与展望

本文通过对 HNB 烟草样品和红外辐射材料样品的自身特性和红外波段进行研究,发现二者的红外波段匹配性较为吻合,研究的红外辐射材料可以适用于 HNB 烟草制品,能实现烟草制品的更有效加热,从而提升用户的抽吸体验,具有产业化应用前景,同时通过本次研究,也发现了诸多红外辐射材料在产业化应用方面可以进一步开展的研究改进方向。

1) 加热方式多元性研究。红外辐射是非接触式加热,发热均匀,但是研究过程中发现红外加热形式电热转换效率不够高,可以探索在单一红外辐射形式之外的复合加热形式转化,研究红外加热材料与其他加热材料的结合形式,在受热均匀的同时提高整体热利用率。

2) 红外加热材料特性深入研究。当红外材料与被加热物质存在红外发射波段不匹配、发射衰减等问题,考虑通过微纳化、复合等方法改进优化的可行性研究;通过探究红外材料的掺杂量与发射率的变化规律,发现当红外材料在使用过程中存在发射率较低的问题,可以考虑通过掺杂的方法进行优化。

3) 红外辐射材料产业化应用研究。通过研究发现,将红外辐射材料应用在 HNB 烟草受热领域有较高的应用前景,通过稳定高效的远红外辐射能有效提升消费者抽吸体验。然而在材料应用的工业化放大生产中,要充分考虑工艺实现性、安全性、涂层材料与基体材料的热膨胀系数差异大小和涂层与基体材料结合的强弱等,合理调配辐射基料、陶瓷浆料基体等组分,整体是一项系统性的工作,需要反复验证调试反馈才能实现红外辐射材料在新型烟草加热器具上的最优效果。

参考文献

- [1] 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [2] 刘建学. 远红外光谱及技术应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 欧阳德刚, 赵修建, 胡铁山. 高抗热震性红外辐射涂料的实验研究[J]. 耐火材料, 2002(4): 201-203.
- [4] 欧阳德刚, 胡铁山, 罗安智, 赵修建. 过渡金属氧化物系红外辐射涂料抗热震性实验研究[J]. 钢铁研究, 2002(3): 34-37.
- [5] 欧阳德刚, 罗安智, 胡铁山, 赵修建. 过渡金属氧化物系辐射材料老化过程的实验研究[J]. 钢铁研究, 2001(4): 54-56.
- [6] 魏忠彩, 孙传祝, 张丽丽, 苏国梁, 石东岳. 红外干燥技术在果蔬和粮食加工中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 217-220.

- [7] 刘剑, 王维维, 胡世龙, 阮艺斌, 惠建权, 万强. 基于微加热器的电加热吸烟系统[P]. 中国专利, CN108338417A. 2018-07-31.
- [8] 周顺, 王成虎, 陈磊, 陈韶坤. 基于纳米远红外分段加热装置及电子烟[P]. 中国专利, CN109077358A. 2018-12-25.
- [9] 曹芸, 周顺, 王孝峰, 张晓宇, 何庆, 王成虎, 张亚平. 一种用于加热不燃烧烟草制品的红外电热材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN109793284A. 2019-05-24.
- [10] 刘华臣, 李丹, 陈义坤, 柯炜昌, 董爱君. 一种光波加热的电吸烟装置[P]. 中国专利, CN108513373A. 2018-09-07.