

〈红外应用〉

点状远红外发射源及其组合的辐照特性

单绍琪¹, 伍锦鸣², 文雅欣¹, 李汴生¹, 郭晓雪², 黎玉茗², 阮征¹, 李丹丹¹, 吴子东³

(1. 华南理工大学 食品科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东中烟工业有限责任公司, 广东 广州 5106103;

3. 广州才是科技有限公司, 广东 广州 510070)

摘要: 本文先探究3种材料的远红外辐照特性以及质量、辐照面积以及金属对远红外辐照的影响,再以点状远红外发射源为研究对象,研究了点状远红外发射源的不同影响因素及其功率密度分布规律。结果表明:远红外烧结材料的功率密度最高,陶瓷材料次之,玻璃材料最低,并确定了远红外材料功率密度的影响因素有质量、辐照面积以及金属外罩;点状远红外发射源的功率密度随着温度的升高而升高,其功率密度峰值对应的波长主要在 $\lambda=6, 10 \mu\text{m}$ 附近。点状远红外发射源其功率密度呈放射状分布,在法向距离 $L=0\sim 3 \text{ cm}$ 、平面内半径 $r=0\sim 1 \text{ cm}$ 范围内,远红外功率密度衰减率较低,并建立了功率密度 E 与法向距离 L 的数学模型。最后据此设计了一种均匀场能的远红外发射源组合模型,验证实验表明该模型场能分布均匀,达到预期。

关键词: 远红外辐照; 发射源; 功率密度; 分布规律; 数学模型

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)01-0079-10

Irradiation Characteristics of Point-shaped Far-Infrared Emission Source and Combination

SHAN Shaoqi¹, WU Jinmin², WEN Yaxin¹, LI Biansheng¹, GUO Xiaoxue²,
LI Yuming², RUAN Zheng¹, LI Dandan¹, WU Zidong³

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong China Tobacco Industry Co., Ltd., Guangzhou 510610, China;

3. Guangzhou Caishi Technology Co., Ltd, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In this study, the far-infrared radiation characteristics of three materials and the effects of different metals on far-infrared radiation were explored. The study used the point-shaped far-infrared emission source as a research object to examine the different influencing factors and power density distribution regulation of the point-shaped far-infrared source. Results indicated that the far-infrared sintered material exhibited the highest power density, followed by the ceramic and glass materials. Factors that affected the power density of far-infrared materials were identified as the quality, irradiated area, and metal cover. The power density of the point-shaped far-infrared source increased with temperature, and the wavelength corresponding to the maximum power density was approximately $\lambda=6-10 \mu\text{m}$. The power density of the point-shaped far-infrared emission source was distributed in a radial manner. In the range of the vertical distance $L=0-3 \text{ cm}$ and radius $r=0-1 \text{ cm}$, the far-infrared power density attenuation rate was low and was designed accordingly. In addition, a mathematical model of power density E and normal distance L was established. Based on these factors, we designed a far-infrared emitter combination model with a uniform field energy. Results revealed that the field energy of this model was evenly distributed to achieve the desired effect.

Key words: far infrared irradiation, emission source, power density, distribution law, mathematical model

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-12-24.

作者简介: 单绍琪 (1994-), 女, 浙江绍兴人, 硕士, 食品加工与保藏。

通信作者: 李汴生 (1962-), 男, 博士, 教授, 食品加工与保藏。E-mail: febsli@scut.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400400), 企业合作科技项目 (2018440000340003)。

0 引言

远红外辐照(Far infrared radiation, FIR)技术是一种新型的食品干燥技术,具有经济、高效、设备简单易操作等特点。由于红外线有很强的穿透力,能直接穿透厚层的不透明体^[1],因而远红外干燥技术的应用越来越广泛,尤其是对植物性原料的干燥^[2]。针对远红外干燥技术在食品干燥方面的研究,主要集中在以下3个方面:一是远红外干燥工艺条件的探究,申彩英^[3]等、胡洁^[4]、罗剑毅^[5]、李武强^[6]等对远红外分别在干燥香菇、胡萝卜、稻谷、桔梗等方面进行了工艺研究;二是远红外干燥机理的研究,多集中在远红外干燥过程中对物料内部水份迁移规律的探究,较少涉及远红外射线的研究,比如刘宗博^[7]等应用低场核磁共振技术对远红外干燥过程中双孢菇内部水分状态进行分析,探寻水份迁移规律。Xu^[8]等通过核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)和差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)研究了远红外干燥(far infrared drying, FID)对胡萝卜的水分状态和玻璃化转变温度(T_g)的影响。第三则是远红外结合其他干燥技术的拓展,比如热泵-远红外联合干燥工艺^[9]、微波-远红外组合干燥机理^[10]。

在远红外干燥技术的应用研究之外,对远红外发射源的开发亦成为研究热点。Guo等^[11]人和Lee等^[12]人分别发现晶体结构不同材料、不同氧化态,其比辐射率都存在着不同;林少波等^[13]人则发现不同材料配比亦可形成不同的远红外发射源;修大鹏等^[14]更是利用不同陶瓷材料之间的配比研制出新型远红外发射材料。同时,利用远红外发射材料分别形成了3种形式的远红外干燥设备:一是板状的远红外发射源,

Longyang Yao^[15]等研究不同预处理后远红外干燥对芒果片的品质影响中利用的远红外干燥箱即为板状的远红外发射源;二是灯管状的远红外发射源,赵丽娟^[16]在对枸杞的远红外干燥工艺条件的探究中使用了石英远红外灯管的真空远红外干燥箱;三是远红外涂层烤箱,黄飞^[17]等人设计了远红外涂层烟叶烤箱。这些远红外干燥箱均存在发射源更换不易,造价昂贵等问题,由此便携、易替换的点状发射源应运而生。但关于点状发射源的研究报道目前存在空白。

基于此,本实验以点状远红外发射源为研究对象,利用Ophir 3A功率计测定发射源在不同温度、不同测定波长对功率密度的影响,同时测定了点状发射源的功率密度分布规律并据此设计了一种均匀场能的远红外发射源组合模型,以期远红外辐照烘箱的设计、远红外干燥技术的研发与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 远红外材料

远红外发射源①、②由广州才是科技有限公司提供,发射源①内部装有发射源②,发射源①具有一半径为2 cm、高2 cm圆柱形金属外壳,其正面为不锈钢网($D=3.6$ cm、编织网格大小为1 mm×1 mm),反面及侧面为厚度为2 mm的不锈钢板焊接而成,发射源②为不锈钢网制成的圆柱形壳体(见图1),其金属网罩内部装3个呈等边三角形排列的远红外烧结材料圆环,圆环外径1.8 cm、内径0.7 cm,平均质量5.00 g(见图2(a));烧结材料比辐射率为0.86。

陶瓷碎片和玻璃碎片由超市购买陶瓷杯与玻璃杯敲碎制成,平均质量约5.50 g,如图2所示。

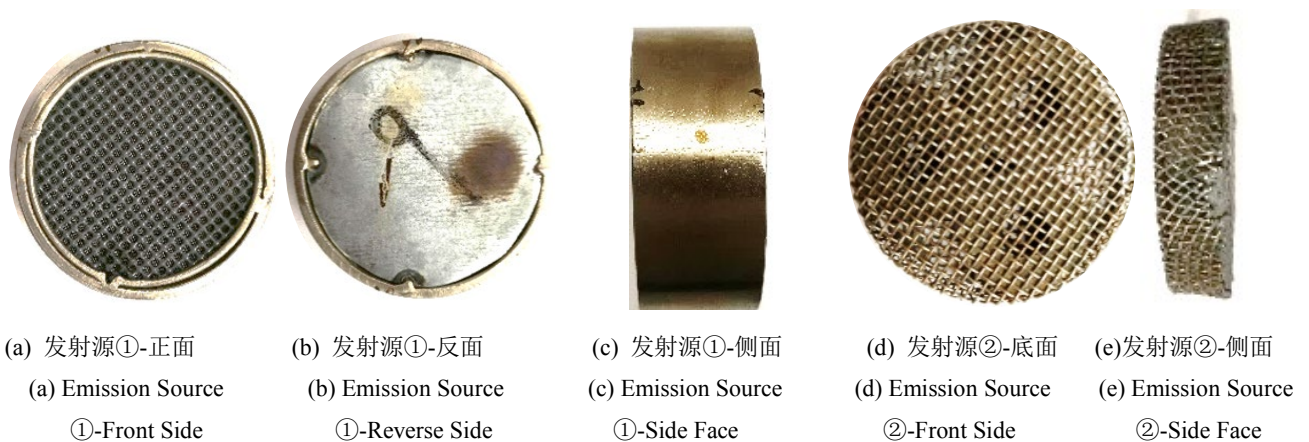
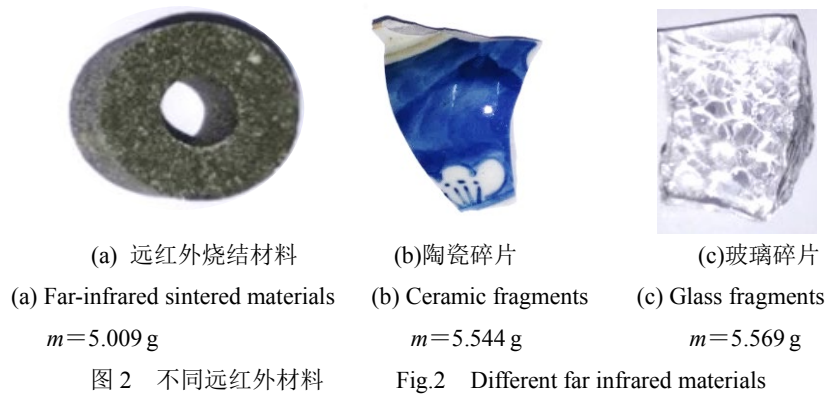


图1 点状远红外发射源

Fig.1 Point-Shaped Far-Infrared Emission Source



1.2 仪器和实验设备

DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱 (上海精宏实验设备有限公司)、Ophir 3A 功率计 (Ophir Optronics Solutions Ltd.)、NOVA II 表头 (Ophir Optronics Solutions Ltd.)、Center 309 热电偶 (Center Technology Corporation)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同远红外材料的功率密度测定

选择较为常见的陶瓷、玻璃材料与本实验的研究对象——远红外烧结材料进行对比。将相同质量的陶瓷碎片、玻璃碎片以及远红外烧结材料放入电热恒温鼓风干燥箱中, 200℃下加热至恒定温度, 用热电偶测定不同材料的实时温度。在同一法向距离 ($L=1\text{ cm}$) 下、同一波长 ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$) 下, 用 Ophir 3A 功率计测定每种材料的功率 (单位: W), 从 NOVA II 表头读数并记录, 测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度 (单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

1.3.2 质量对远红外烧结材料的功率密度影响

将远红外烧结材料粉碎后重新组合成3个底面直径 $D=2\text{ cm}$, 高分别为 1 cm 、 2 cm 、 3 cm 的圆柱体, 所得圆柱体质量分别为 3.007 g 、 6.000 g 、 9.006 g , 并标号为 M_1 、 M_2 、 M_3 。在 $L=1\text{ cm}$, $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 下, 功率密度测定方法同 1.3.1。

1.3.3 表面积对远红外烧结材料的功率密度影响

将远红外烧结材料粉碎后重新组合成3个质量相同 ($9.000\pm 0.005\text{ g}$), 底面直径分别为 $D=2\text{ cm}$ 、 3 cm 、 4 cm , 高分别为 3 cm 、 1 cm 、 0.5 cm 的圆柱体, 并标号为 D_1 、 D_2 、 D_3 。在 $L=1\text{ cm}$, $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 下, 功率密度测定方法同 1.3.1。

1.3.4 不同远红外发射源的功率密度分布测定

将远红外发射源①、②号均放入电热恒温鼓风干燥箱中, 150℃下加热至恒定稳定, 用热电偶测定远红外发射源的实时温度在 $L=1\text{ cm}$, $\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 下, 功率密度测定方法同 1.3.1。

1.3.5 不同波长下远红外发射源功率密度测定

将①号发射源放入电热恒温鼓风干燥箱中, 200℃下加热至恒定温度, 用热电偶测定远红外发射源的实时温度。在同一法向距离 ($L=6\text{ cm}$)、同一温度下, 用 Ophir 3A 功率计测定不同波长 ($2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $11\text{ }\mu\text{m}$) 下远红外发射源的功率 (单位: W), 从 NOVA II 表头读数并记录, 测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度 (单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

1.3.6 不同温度下远红外发射源功率密度测定

将①号发射源放入电热恒温鼓风干燥箱中, 200℃下加热至恒定温度后将其取出置于铁架台上自然冷却, 用热电偶测定远红外发射源的实时温度。在同一法向距离 ($L=6\text{ cm}$)、同一波长 ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$) 下, 用 Ophir 3A 功率计测定不同温度 ($50\sim 170\text{ }^\circ\text{C}$, 每 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 测定一次功率) 下发射源的功率 (单位: W), 从 NOVA II 表头读数并记录, 测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度 (单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

1.3.7 单个远红外发射源功率密度分布测定

将远红外发射源①放入电热恒温鼓风干燥箱中, 150℃下加热至恒定稳定, 用热电偶测定远红外发射源的实时温度。其功率密度测定定位如图3所示。

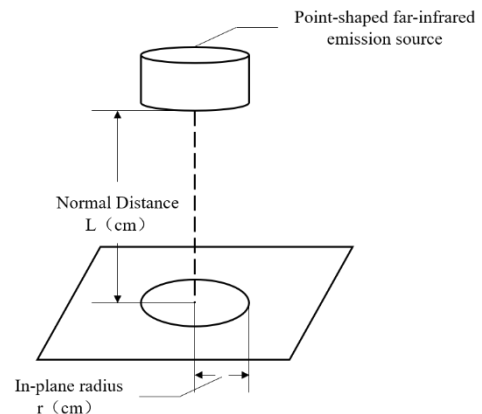


图3 ①号远红外发射源功率密度测定定位

Fig.3 Power density measurement location of far-infrared emission source①

在同一波长($\lambda=9\mu\text{m}$)、半径 $r=0\text{cm}$ 下,用 Ophir 3A 功率计测定不同法向距离($L=1\text{cm}$ 、 2cm 、 3cm 、 4cm 、 5cm 、 6cm 、 10cm 、 11cm)下的功率(单位:W),从 NOVA II 表头读数并记录,测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度(单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

在同一波长($\lambda=9\mu\text{m}$)、同一法向距离(L ,单位:cm)下,用 Ophir 3A 功率计测定不同半径($r=0\text{cm}$ 、 1cm 、 2cm 、 3cm 、 4cm 、 5cm 、 6cm 、 7cm 、 8cm)下的功率(单位:W),从 NOVA II 表头读数并记录,测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度(单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 以及 SPSS Statistics 软件进行分析;实验结果采用 GraphPad Prism 8、OriginPro 2018 以及 Firstoption 软件进行图像绘制与曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 不同远红外材料的功率密度比较

任何物体红外辐射主要由物体的比辐射率以及物体表面温度决定。每个物体的比辐射率均由材料本身的特性所决定的, Liu^[18]等人发现不同的材料组成会导致远红外辐射的强度不同。

不同材料的远红外发射功率密度如图 4 所示。在同一温度下,3 种远红外材料的功率密度并不相同,远红外烧结材料的功率密度最高,陶瓷碎片次之,玻璃碎片最低。这说明了不同材料之间的远红外辐照能量存在差异,这与董宏宇^[19]的研究结果相一致。在相同温度下,红外辐射的差异主要是由物体本身的比辐射率的不同所导致的^[19]。本研究中选择远红外烧结材料与一般陶瓷材料相比,功率密度较高,比辐射率较高,具有良好的远红外辐照性能。因而,选择该远红外发射源进行后续的辐照特性研究。

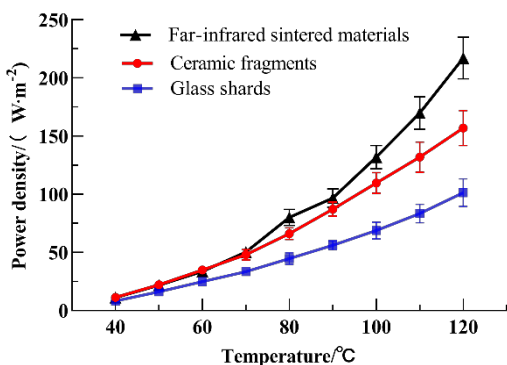
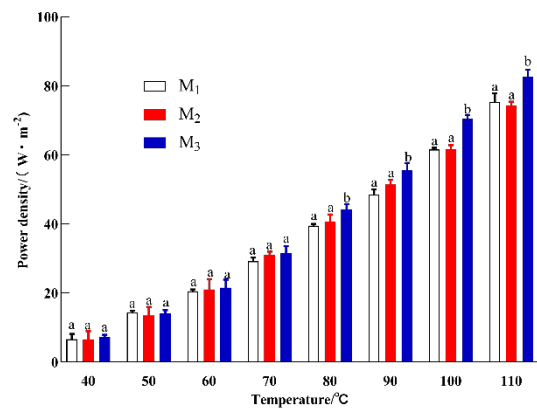


图 4 不同远红外材料的功率密度 ($\lambda=9\mu\text{m}$, $L=1\text{cm}$)
Fig.4 Power density of different far infrared materials ($\lambda=9\mu\text{m}$, $L=1\text{cm}$)

2.2 质量与辐照面积对远红外烧结材料功率密度的影响

相同辐照面积下质量对远红外烧结材料的功率密度如图 5 所示, p 为显著性分析参数。质量对远红外烧结材料的功率密度有一定影响:在低温($40\sim 70^\circ\text{C}$)状态下,不同质量的远红外烧结材料的功率密度并无显著性差异;当温度超过 70°C 时,质量的增加将导致远红外材料的功率密度显著提高。图 6 为相同质量下辐照面积对远红外材料功率密度的影响。在相同质量下,随着辐照面积的增大,远红外烧结材料的功率密度显著增加。对比图 5 与图 6 可知,辐照面积对远红外材料的功率密度的影响大于质量的影响。故在远红外发射源的设计中可适当加大辐照面积,提高辐照能的利用率。

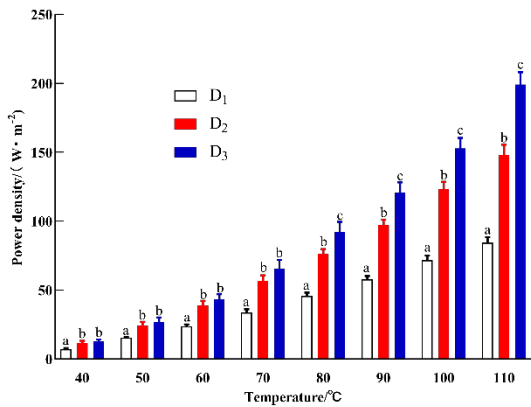


Note: $M_1=3.007\text{g}$; $M_2=6.000\text{g}$; $M_3=9.006\text{g}$
a, b: Significant difference in different groups at the same temperature, $p<0.05$

图 5 相同辐照面积下质量对远红外材料功率密度的影响 ($\lambda=9\mu\text{m}$, $L=1\text{cm}$)
Fig.5 The effect of mass on the power density of far infrared materials under the same irradiation area ($\lambda=9\mu\text{m}$, $L=1\text{cm}$)

2.3 不同远红外发射源功率密度分析

远红外射线属于电磁波的一种,其具有反射、干涉等特性。在同一波长下,发射源①、②各表面的功率密度如图 7 所示。发射源①-正面的功率密度最大,发射源①-侧面的功率密度最小。原因在于发射源①其在陶瓷材外部的四周罩上一层金属隔层,只留正面为金属网状结构,远红外射线在内部因反射作用均聚集于网状一面,故其功率密度较大。而发射源①的底面和侧面因受到金属隔层的阻隔,内部远红外辐射并不能透过,同时,测得一定的数值其主要是由金属本身产生的红外射线所致,因金属的红外特性远低于陶瓷材料^[19],故其功率密度最低。



Note: $D_1=2\text{ cm}$; $D_2=3\text{ cm}$; $D_3=4\text{ cm}$
a,b,c: Significant difference in different groups at the same temperature, $p<0.05$

图6 相同质量下辐照面积对远红外材料功率密度的影响 ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ cm}$)

Fig.6 The effect of irradiation area on the power density of far-infrared materials at the same mass ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ cm}$)

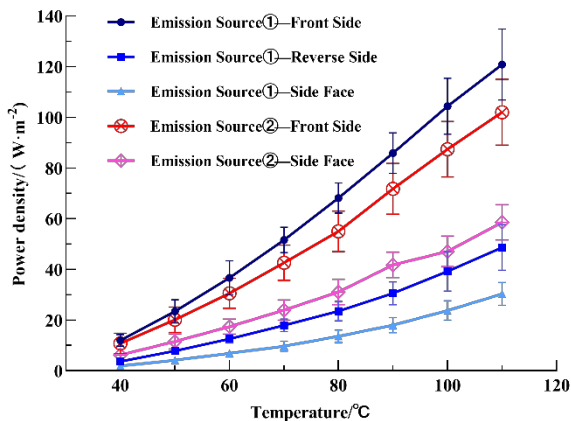


图7 不同远红外发射源功率密度比较 ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ cm}$)

Fig.7 Power density comparison of different far infrared emission sources ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ cm}$)

发射源②的组成主要是在陶瓷材料外部罩上一层与发射源①正面一致的金属网状结构, 对比发射源②-底面与发射源①-正面的功率密度, 进一步说明远红外辐射在发射源内部经过反射使其辐照能量聚集。此外, 发射源②-底面与发射源②-侧面的功率密度有所差异 (图7), 这进一步说明 2.2 中辐照面积对功率密度有较大的影响。

2.4 远红外发射源功率密度与波长、温度的关系

在远红外干燥中干燥温度更是远红外干燥技术中较为关键的一个控制条件, 胡洁^[4]、罗剑毅^[5]等分别对不同的植物性原料进行远红外干燥实验探究, 发现远红外干燥温度对干燥效果具有不同程度的影响。

不同温度下①号远红外发射源在不同波长下的功率密度如图8所示。从图中可以看出, 同一温度下

点状远红外发射源的功率密度曲线在波长 $\lambda=6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 附近出现两个峰值, 不同的辐照物其发射波长不同, 形成不同的吸收峰^[11]。由此可以反映出发射源内部并非由单物质组成, 至少应有两种不同的陶瓷材料组成。同时, 观察两个峰值可发现, 不同温度下的峰值对应的波长并不一致, 以波长 $\lambda=10\text{ }\mu\text{m}$ 附近的峰值为例, 随着温度的升高, 最大辐照波长会略向左偏移, 即温度越高其最大辐照波长略有减小, Mongpraneet^[20]等人的研究也证明了温度的升高会导致远红外辐射源的最大辐照波长有所漂移。利用远红外发射源的最大发射波长, 可以指导选择合适的物料进行远红外干燥, 如对红外吸收光谱在这峰值波长附近的物料比较适宜。

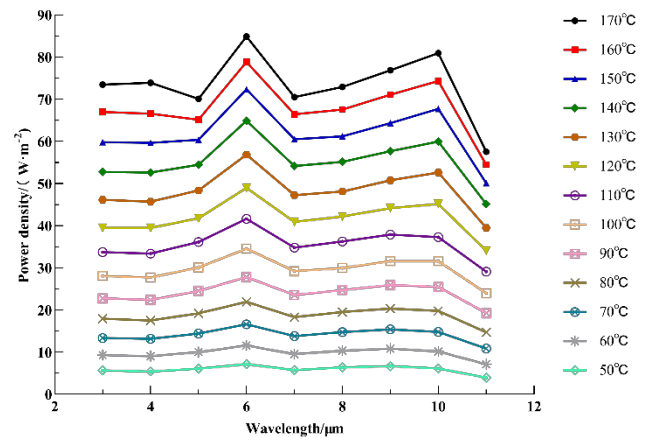


图8 不同温度下①号远红外发射源在不同波长下的功率密度

Fig.8 The power density of far-infrared emitters① at different wavelengths and temperatures

此外, 温度越高其功率密度曲线的峰值越明显, 在温度较低 ($T=50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $70\text{ }^\circ\text{C}$) 时, 其曲线较为平缓, 峰值不突出, 进一步反映出, 高温可以激发远红外辐射能量, 在低温时其辐照效果并不显著, 这与文雅欣^[21]的研究相一致。

2.5 远红外发射源①功率密度随法向距离的变化规律

在远红外干燥技术研究中, 辐射源与物料之间的距离对远红外辐照效果的影响是至关重要的, 万江静^[22]在探究远红外辐射干燥红枣片的实验中发现辐射距离是决定红枣干制效果的关键因素, 从而探究出最佳干燥工艺。

图9为不同法向距离下①号远红外发射源功率密度的变化, 其衰减率如表1所示。随着法向距离 L 的增大, 发射源的功率密度呈下降趋势, 辐照能逐渐衰减。整个下降过程分为3个阶段: 在 $L\leq 3\text{ cm}$ 时, 其衰减幅度较小, 其功率密度衰减率在10.00%以内; 当 $3\text{ cm}<L\leq 6\text{ cm}$ 时, 功率密度衰减速率增大; 当 $L>6$

cm 时, 功率密度的衰减速率逐渐趋缓。由此, 远红外发射源①的辐射距离在 3 cm 以内时, 功率密度的衰减率最低, 能量利用率较高。

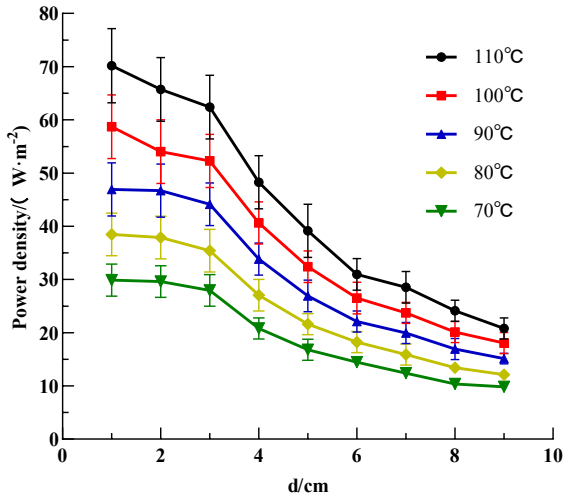


图9 不同法向距离下①号远红外发射源功率密度
($\lambda=9\mu\text{m}$, $r=0\text{cm}$)

Fig.9 Power density of far-infrared emitters① at different vertical distances ($\lambda=9\mu\text{m}$, $r=0\text{cm}$)

表1 $r=0\text{cm}$ 下①号远红外发射源功率密度的衰减率

Table 1 The decay rate of power density of far-infrared emission source① at $r=0\text{cm}$

Temperature/°C	110	100	90	80	70
$L=1\text{cm}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$L=2\text{cm}$	6.29	8.00	0.42	1.58	0.94
$L=3\text{cm}$	11.08	10.98	5.95	7.96	6.42
$L=4\text{cm}$	31.19	30.78	27.88	29.74	30.36
$L=5\text{cm}$	44.22	44.83	42.59	43.78	43.81
$L=6\text{cm}$	55.84	54.88	52.93	52.55	51.61
$L=7\text{cm}$	59.36	59.61	57.50	58.64	58.59
$L=8\text{cm}$	65.61	65.76	63.94	65.05	65.34
$L=9\text{cm}$	70.38	69.27	67.73	68.46	67.09

根据红外辐射原理, 光源在空间内的 M 点上的辐照强度可用以下公式表示^[23]:

$$E_j(M, \lambda_i) = I(S_j, \theta_{j\text{out}}, \varphi_{j\text{out}}, \lambda_i) \times \frac{\tau([M, S_j], \lambda_i)}{|S_j M|^2} \quad (1)$$

式中: $E_j(M, \lambda_i)$ 表示发射源在 λ_i 波长下、 M 点处的辐照强度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; $I(S_j, \theta_{j\text{out}}, \varphi_{j\text{out}}, \lambda_i)$ 表示发射源 S_j 在方向 $(\theta_{j\text{out}}, \varphi_{j\text{out}})$ 、辐照波长为 λ_i 下的发射强度; $\tau([M, S_j], \lambda_i)$ 表示大气透过率; $|S_j M|$ 则表示发射源 S_j 到 M 点之间的距离, m。

在本实验中, $E_j(M, \lambda_i)$ 即为所测功率密度, $|S_j M|$ 即

为法向距离 L 。而 $I(S_j, \theta_{j\text{out}}, \varphi_{j\text{out}}, \lambda_i)$ 在相同温度、相同波长、法向距离上仅由发射源决定, 故可视为常数。同时, 大气透过率的影响因素主要为大气中的各种气体物质以及辐照距离^[24]:

$$\tau = \exp(-\sigma * \chi) \quad (2)$$

式中: σ 表示衰减系数; χ 为法向距离 L 。联合公式(1)、(2), 可得功率密度 E 与法向距离 L 的关系:

$$E = I * \frac{\exp(-\sigma * L)}{L^2} \quad (3)$$

由此, 可以建立数学模型进行拟合, 结果如表 2。

表2 不同温度下远红外发射源①法向辐照强度的拟合结果
($\lambda=9\mu\text{m}$)

Table 2 Fitting results of far-infrared emission source ① normal radiation intensity attenuation at different temperatures ($\lambda=9\mu\text{m}$)

Irradiation temperature/°C	I	Attenuation coefficient σ	Goodness of fit R^2
110	0.03248	-20.04	0.9600
100	0.02705	-20.22	0.9637
90	0.02276	-20.13	0.9697
80	0.01826	-20.15	0.9675
70	0.01428	-20.20	0.9748

根据表 2 不同温度下远红外发射源①法向辐照强度的拟合结果, 决定系数的拟合优度 R^2 均大于 0.9600, 说明该模型能较好地反映远红外发射源①功率密度 E 与法向距离 L 之间的关系。图 10 为 70°C 下远红外发射源①功率密度 E 与法向距离 L 的拟合曲线, 实验所得数据均匀分布在拟合曲线附近, 重合度较高, 进一步体现了该模型的可信性。该模型的建立可为远红外干燥技术中辐照距离对干燥速率、成品品质的影响提供了理论依据, 同时对干燥工艺的参数设置提供参考。

2.6 远红外发射源①功率密度随半径 r 的变化规律

图 11 为不同半径下①号远红外发射源功率密度的变化, 其衰减率如表 3 所示。随着平面半径 r 的增大, 发射源的功率密度呈下降趋势, 辐照能量逐渐衰减。在法向距离 $L=6\text{cm}$, $r \leq 1\text{cm}$ 时, 其功率密度衰减率为 0, 辐照能量并没有减小, 主要原因在于实验中的发射源是一个底面半径为 1 cm、高为 1 cm 的圆柱体, 因而在圆柱底面垂直投影面下其辐照能量基本无衰减。当 $r > 1\text{cm}$ 时, 功率密度随 r 的增大而减小, 至 $r=7\text{cm}$ 左右, 功率密度为 0, 远红外能量基本衰减完全。其中, $L=6\text{cm}$, $r=3\text{cm}$ 时, 其衰减率在 40%~

45%，基本可以判断半衰减率发生在 $r=3\text{ cm}$ 。由于光路沿直线传播，根据相似三角形的原理（如图 12 所示），可知当 $L=3\text{ cm}$ 时，半衰减率发生在 $r=2\text{ cm}$ 。

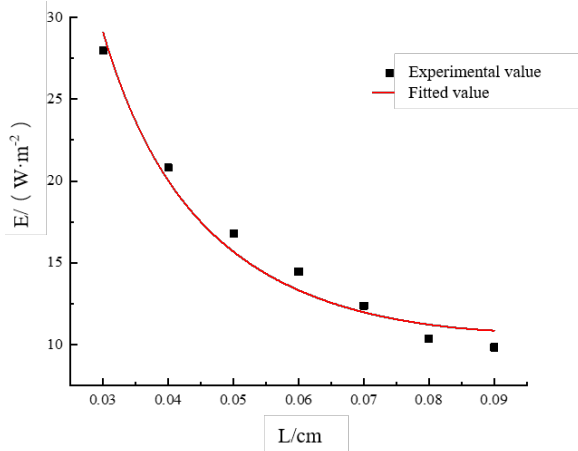


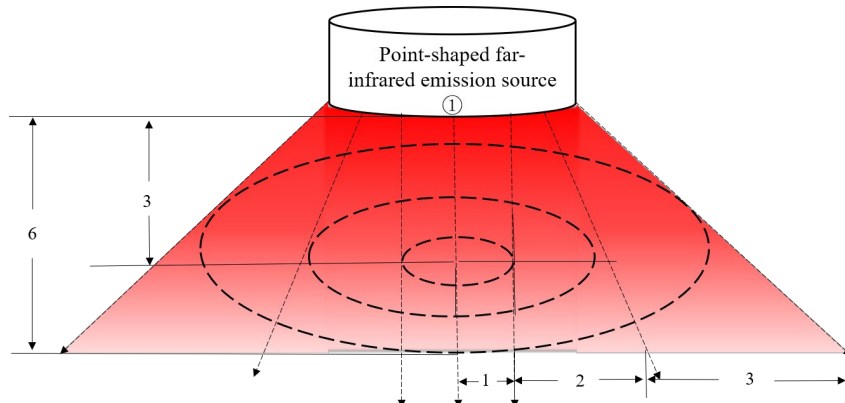
图 10 70°C 下远红外发射源①法向辐照强度的拟合结果 ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.10 Fitting result of the normal radiation intensity of the far-infrared emission source at 70°C ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$)

由此该远红外发射源的功率密度空间分布如图 12 所示。

2.7 探究组合式远红外发射源功率密度分布模型

根据 2.5 中远红外发射源的功率密度与法向距离 L 、半径 r 的关系，拟设计一个能源利用率最大化、场能分布均匀的远红外组合模型。因 $L=3\text{ cm}$ ， $r=2\text{ cm}$ 时，其衰减率为 50%左右，同时考虑发射源本身的半径大小，故相邻的两个发射源间距为 2 cm。该设计下，物料辐照距离为 3 cm ($L=3\text{ cm}$) 时，远红外辐照能量利用率最高。图 13 为两个①号远红外发射源的相距 2 cm 组合后，功率密度分布示意。



注：虚线同心圆为 $L=3\text{ cm}$ 时功率密度分布示意；虚线箭头表示远红外射线 单位：cm

Note: The dashed arrow indicates far infrared rays when the dashed concentric circle is $L=3\text{ cm}$, the distribution of far-infrared rays is shown

图 12 点状远红外发射源功率分布示意图

Fig.12 Power distribution of point-shaped far-infrared emission source

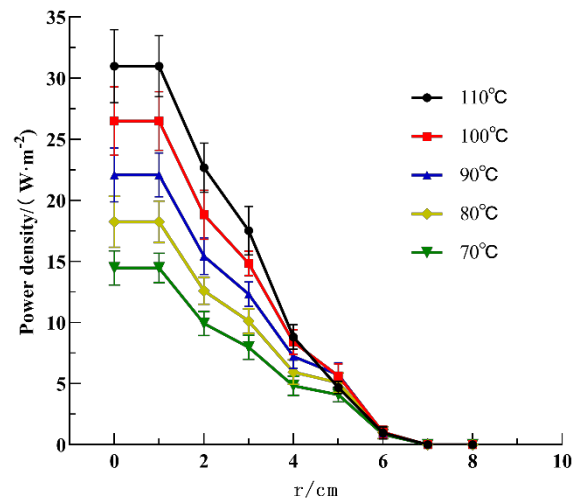


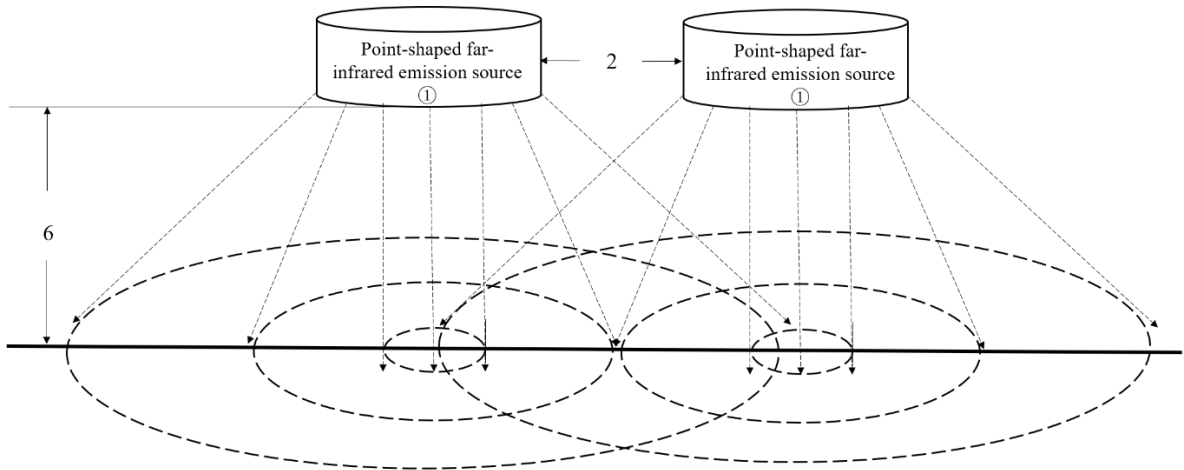
图 11 不同半径下远红外发射源功率密度($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=6\text{ cm}$)

Fig.11 Power density of far-infrared emitters① with different radii ($\lambda=9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L=6\text{ cm}$)

表 3 $L=6\text{ cm}$ 下远红外发射源功率密度的衰减率

Table 3 Decay rate of power density of far-infrared emission source① at $L=6\text{ cm}$

Temperature/°C	110	100	90	80	70
$r=1\text{ cm}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$r=2\text{ cm}$	26.82	28.97	30.10	30.99	31.41
$r=3\text{ cm}$	43.44	43.98	44.15	44.59	44.88
$r=4\text{ cm}$	71.54	68.26	67.22	67.39	66.54
$r=5\text{ cm}$	84.88	78.75	73.99	72.10	71.61
$r=6\text{ cm}$	96.86	96.11	95.53	94.51	94.05
$r=7\text{ cm}$	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
$r=8\text{ cm}$	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

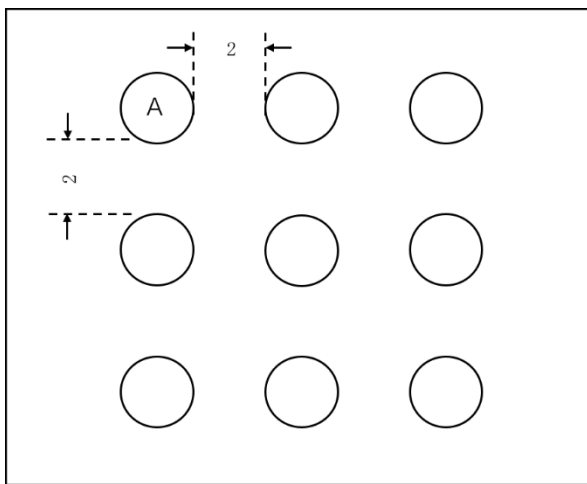


Note: The dashed arrow indicates far infrared rays when the dashed concentric circle is $L=6\text{ cm}$, the distribution of far-infrared rays is shown unit: cm

图 13 两个①号远红外发射源组合功率密度分布

Fig.13 Combined power density distribution of two No. ① far infrared emission sources

图 14 为组合式远红外发射源的分布。



Note: A is the far-infrared emission source ① Unit: cm

图 14 组合式远红外发射源的分布模型

Fig.14 Distribution model of combined far-infrared emission source

为了验证以上模型是否做到使远红外能量分布均匀化, 特进行以下验证实验:

将组合式远红外发射源放入电热恒温鼓风干燥箱中, 150°C 下加热至恒定稳定, 用热电偶测定远红外发射源的实时温度。组合式远红外发射源功率密度测定点分布如图 15 所示。

在同一波长 ($\lambda=9\ \mu\text{m}$), $L=3\ \text{cm}$ 下, 用 Ophir 3A 功率计测定各测定点的功率 (单位: W), 从 NOVA II 表头读数并记录, 测定得到的功率除以靶面面积即可计算得到其功率密度 (单位: $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)。

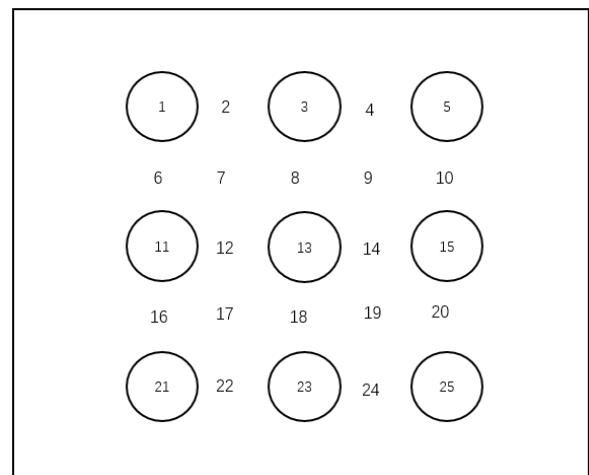


图 15 组合式远红外发射源功率密度测定点分布

Fig.15 Distribution of power density measurement points of combined far-infrared emission source

测定结果如图 16。

对照图 15 的测定点分布, 可以将测定点分为 3 类: 第一类为每个点状远红外发射源正下方的测定点, 即为测定点 1、3、5、11、13、15、21、23、25; 第二类为相邻两个点状远红外发射源之间的中心位置的测定点, 即为测定点 2、4、6、8、10、12、14、16、18、20、22、24; 第三类为相邻的 4 个点状远红外发射源所形成的正方形的中心位置的测定点, 即为测定点 7、9、17、19。每两个相邻的发射源之间的距离为 2 cm, 结合发射源半径为 2 cm, 故 3 类测定点在 $L=3\ \text{cm}$ 下, 距离相邻点状远红外发射源的 r 分别为第一类测定点的 $r=0\ \text{cm}$, 第二类测定点的 $r=3\ \text{cm}$, 第三类测定点的 $r=3\times 2^{1/2}\ \text{cm}$ 。



图 16 组合式远红外发射源功率密度分布
($\lambda=9\mu\text{m}$ 、 $T=90^\circ\text{C}$ 、 $L=3\text{cm}$)

Fig.16 Power density distribution of combined far-infrared emission source ($\lambda=9\mu\text{m}$ 、 $T=90^\circ\text{C}$ 、 $L=3\text{cm}$)

观察图 16, 第一类测定点的功率密度较为接近且普遍高于其他两类测定点的功率密度, 原因在于这类测定点位于每个发射源的正下方 $r=0\text{cm}$, 其功率密度的衰减率最低。第二类测定点的功率密度仅次于第一类测定点的功率密度, 基本高于第三类测定点的功率密度。结合 2.6 中同一法向距离下 r 对功率密度的影响规律: 功率密度随着 r 的增大而减小。故第二类测定点距离相邻的发射源的 $r=3\text{cm}$, 由表 3 可知相邻两个发射源的功率密度在该类测定点的衰减率均为 50%, 功率密度叠加之后其效果与第一类测定点相近。而第三类测定点距离相邻的发射源的 $r=3\times 2^{1/2}\text{cm}$, 由表 3 可知, 相邻的发射源在该类测定点的功率密度衰减率为 70%~80%, 由此可以解释第三类测定点的功率密度均低于前两类测定点。此外, 在同一类测定点中存在差异功率密度差异较大的情况, 比如第二类测定点中测定点 6、16 的功率密度较大, 导致这种差异的主要原因在于每个点状远红外发射源之间存在差异。

整体上来看, 组合式远红外发射源功率密度分布结果基本符合模型预想, 各点的功率密度趋于均匀化, 利用这个组合式远红外发射源进行干燥实验可以使物料受到较为均衡的辐照处理, 提高干燥效果。

3 结论

3 种材料(陶瓷、玻璃、远红外烧结材料)均具有红外辐射特性, 其中远红外烧结材料的功率密度最高。故该远红外烧结材料具有良好的远红外辐照特

性, 同时, 质量、辐照面积以及金属外罩均对功率密度有显著影响。此外, 远红外发射源的功率密度随着温度的升高而升高, 其功率密度峰值对应的波长主要在 $\lambda=6\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 附近。单个远红外发射源①其功率密度分布呈放射状: $L=0\sim 3\text{cm}$ 、 $r=0\sim 1\text{cm}$ 范围内, 远红外能量的衰减率较低, 并建立了功率密度 E 与法向距离 L 的数学模型: $E = I * \frac{\exp(-\sigma * L)}{L^2}$ 。之后, 利用①号远红外发射源的功率密度分布规律设计了一个组合式远红外发射源: 两个发射源之间相距 2 cm, 物料辐照距离为 3 cm 时, 其功率密度较为均匀, 能量利用率较高。

参考文献:

[1] 君轩. 红外和远红外技术[J]. 世界橡胶工业, 2009, 36(1): 43-45.
JUN Xuan. Infrared and far infrared technology[J]. World Rubber Industry, 2009, 36(1): 43-45.

[2] 魏忠彩, 孙传祝, 张丽丽, 等. 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.
WEI Zhongcai, SUN Zhuanzhu, ZHANG Lili, et al. Progress of infrared drying technology applied processing of fruits and vegetables and grain[J]. Food and Machinery, 2016, 32(1): 217-220.

[3] 申彩英, 李峰, 朴在林. 香菇远红外连续干燥主要工艺参数的试验研究[J]. 农机化研究, 2006(9): 132-134.
SHEN Caiying, LI Feng, PIAO Zailin. Research on the major technical parameters of far infrared dryer formushroom drying[J]. Agricultural Mechanization Research, 2006(9): 132-134.

[4] 胡洁. 果蔬远红外真空干燥技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
HU Jie. Research on Far-Infrared Vacuum Drying of Vegetables And Fruits[D]. Wuxi: Jiangnan university, 2008.

[5] 罗剑毅. 稻谷的远红外干燥特性和工艺的实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LUO Jianyi. Study on Drying Characteristic And Technology of Paddy Dried on Far-Infrared[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2006.

[6] 李武强, 黄晓鹏, 马嘉伟, 等. 响应面法优化桔梗切片远红外干燥工艺[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(8): 47-51.
LI Wuqiang, HUANG Xiaopeng, MA Jiawei, et al. Optimization of far infrared drying process of platycodongrandiflorum slice by response surface methodology[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2019, 47(8): 47-51.

[7] 刘宗博, 张钟元, 李大婧, 等. 双孢菇远红外干燥过程中内部水分的变化规律[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 82-86.
LIU Zongbou, ZHANG Zhongyuan, LI Dajing, et al. Analysis of moisture change during far-infrared drying of agaricus bisporus[J]. Food

- Science*, 2016, **37**(9): 82-86.
- [8] XU C, LI Y, YU H. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, **136**: 42-47.
- [9] Nathakaranakule A, Jaiboon P, Soponronnarit S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, **100**(4): 662-668.
- [10] GONG Y J, SUI Y, HAN C S, et al. Drying Ginseng Slices Using a Combination of Microwave and Far-Infrared Drying Techniques[J]. *Journal of Biosystems Engineering*, 2016, **41**(1): 34-42.
- [11] GUO S, CHI Y, GUO G. Recent achievements on middle and far-infrared second-order nonlinear optical materials[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2017, **335**: 44-57.
- [12] LEE S, KIM Y, KANG S. Far-infrared emission of Ti-based oxides[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2011, **987**(1-3): 86-90.
- [13] 林少波, 郭小华, 毛海波, 等. 竹炭远红外比辐射率测试条件研究[J]. *浙江林业科技*, 2016(3): 28-30.
LIN Shaobo, GUO Xiaohua, MAO Haibo, et al. Determination on far-infrared radiance of bamboo carbon under different condition[J]. *Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2016(3): 28-30.
- [14] 修大鹏, 许建华, 周吉学, 等. 远红外辐射黑瓷板研制及其性能研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(11): 168-172.
XIU Dapeng, XU Jianhua, ZHOU Jixue, et al. Research on development and its performance of far-infrared radiation black porcelain plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(11): 168-172.
- [15] YAO Longyang, FAN Liuping, DUAN Zhenhua. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices[J]. *Food Chemistry*, 2020, **305**: 125477.
- [16] 赵丽娟, 王丹丹, 李建国, 等. 枸杞真空远红外干燥特性及品质[J]. *天津科技大学学报*, 2017, **32**(5): 17-22.
ZHAO Lijuan, WANG Dandan, LI Jianguo, et al. Drying characteristics and product quality of lyciumbarbarumin vacuum far-infrared drying process[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2017, **32**(5): 17-22.
- [17] 黄飞, 杨涛, 徐坤. 远红外涂料在烟叶烤房中的应用[J]. *农业科技与装备*, 2010(6): 9-12, 16.
HUANG Fei, YANG Tao, XU Kun. The application of far-iR coating during the flue-cured tobacco curing[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2010(6): 9-12, 16.
- [18] LIU J, MENG J, LIANG J, et al. Effect of far infrared radiation ceramics containing rare earth additives on surface tension of water[J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, **32**(9): 890-894.
- [19] 董宏宇. 谷物干燥的红外辐射陶瓷材料及红外干燥机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
DONG Hongyu. Study on Infrared Ceramics Material and Drying Mechanism for Grain Drying[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [20] Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. *Elsevier*, 2002, **55**(2): 147-156.
- [21] 文雅欣. 远红外辐照-热风干燥八角的动力学及品质变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
WEN Yayin. Study on kinetics and quality changes of illicium verum by far infrared radiation-hot Air (FIR-HA) drying[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [22] 万江静, 郑霞, 高振江, 等. 红枣片远红外辐射干燥的干燥特性及V_C变化[J]. *食品工业科技*, 2016, **37**(8): 110-115.
WAN Jiangjing, ZHENG Xia, GAO Zhenjiang, et al. Far-infrared drying characteristics and the changes of VC of red jujube sheet[J]. *Food Industry Technology*, 2016, **37**(8): 110-115.
- [23] 郭晨光. 基于光线跟踪的高真实感红外三维场景仿真方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
GUO Chenguang. Research on Method of High Realistic Infrared Scene Simulation System Based on Ray Tracing[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2013.
- [24] 贾光亮, 宋雨宸. 基于MODTRAN的红外大气透过率计算方法研究[J]. *电子世界*, 2018(1): 71-72.
JIA Guangliang, SONG Yuchen. Research on the calculation method of infrared atmospheric transmittance based on MODTRAN[J]. *Electronic World*, 2018(1): 71-72.