

# 新型微波真空干燥机设计

## Design of a new microwave-vacuum dryer

杨晓童 段续 任广跃

YANG Xiao-tong DUAN Xu REN Guang-yue

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

(Food and Biology Engineering College, Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:**设计了一种集微波干燥与真空干燥于一体的新型装置,将波导和波源冷却装置融为一体,有效地解决了微波分布不均和微波源受热易损坏两大难题。物料室是微波室和真空室的交集,可以使物料既能受到微波辐射,又能处于真空环境中。分层设计的物料盘一方面可以方便拆卸,另一方面可以充分地利用物料室的空间。模块化的冷阱设计,使冷阱可以根据干燥的需求自由的装卸,可以有效地提高冷阱的利用效率。该微波真空干燥设备设计巧妙,安全可靠,可以满足高品质物料的干燥加工。

**关键词:**微波干燥;真空干燥;模块化;冷阱

**Abstract:** A new type of microwave and vacuum drying device combining waveguide and wave source cooling device was designed. This improvement helped to solve two big problems effectively, uneven distribution of microwave and wave source easily broken on heat. Because the material chamber is the intersection of microwave and vacuum chambers, material could be in microwave radiation as well as in vacuum environment. Thus, the material plates were hierarchical designed. On the one hand, they were easily tear down, on the other hand, material room space could be made full use. Moreover, the cold traps designed by modular to make it easily loaded and unloaded according to the requirements of drying, and this could effectively improve the utilization efficiency of the themselves. The microwave vacuum drying equipment design was clever, safe and reliable, and could satisfy the drying processing of high quality material.

**Keywords:** microwave drying; vacuum drying; modular; cold trap

微波干燥可以使物料内外同步受热,具有干燥速度快,干燥均匀的特点。但是干燥温度一般在 70 °C 以上,容易造成物料糊化。真空干燥可以使物料在较低的温度下干燥,很好地保护了热敏性物料的有效成分,但是热传导速率慢,干

燥成本高。微波真空干燥是集微波干燥和真空干燥于一体的新型干燥技术,它以微波作为热源,可克服真空干燥热传导慢的缺点。在真空环境下对物料进行干燥,大大降低了干燥温度,很好地保护了物料中的有效成分。综合起来具有干燥速度快,干燥品质好,干燥成本低等优点,是极具发展潜力的新型干燥技术<sup>[1-2]</sup>。这样的优势使得它在食品<sup>[3-5]</sup>、农产品<sup>[6-9]</sup>和医药<sup>[10-11]</sup>方面都有广泛的应用。

微波真空干燥设备一般包括干燥室、微波系统、真空系统、测量系统和控制系统。根据设备中物料所处的状态,可以分为静态型微波真空干燥设备和动态型微波真空干燥设备。静态型微波真空干燥设备是指物料是静止不动的。李树军等<sup>[12]</sup>设计过一种微波真空干燥设备,保持物料静止不动,在微波源下面加了一个微波搅拌器,使微波能够更加均匀地作用于物料,但缺点是能装载的物料有限。吴琦<sup>[13]</sup>曾经设计了一种对开门式微波真空干燥设备,外观呈长方体,物料进口和出口位于箱体的前后两端。微波发生器均匀地分布在箱体的侧面上,将物料装入多个干燥盒,依序从进口处加入,至到加满为止。干燥完成后加入未干物料的新干燥盒,将干燥过的物料推向物料出口处取出,解决了干燥设备装料的瓶颈问题,但是物料干燥时静止不动,容易出现受热不均的问题。动态型微波真空干燥设备就是物料是运动的。Toai 等<sup>[14]</sup>开发了一套连续的微波真空干燥设备,将物料放在连续转动的搁板带上,物料和搁板都能吸收微波能,从而提高了干燥速率。但是单向运动的搁板带严重制约着物料的干燥。Kaensup 等<sup>[15]</sup>设计了一种转鼓式微波真空干燥实验设备,工作时,物料随转鼓运动,受热均匀,且可避免出现热点问题,但由于物料与转鼓之间存在相对运动,易损坏物料。此外,水蒸气易在转鼓上冷凝,影响干燥产品的质量。闫跃华<sup>[16]</sup>设计了一种微波真空干燥设备,在真空室内安装六角形转轮,在六角形转轮的每个角安装一个物料盘,物料随转盘不停运动,使得物料可以均匀受热。但是微波源只能自然冷却,容易因发热而损坏。针对这一现状,本研究专门设计了一种微波真空干燥设备。它将波源和波导进行了一

**作者简介:**杨晓童,男,河南科技大学在读硕士研究生。

**通信作者:**段续(1973-),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: duanxu\_dx@163.com

**收稿日期:**2016-07-05

体化设计,物料盘进行了分层设计,冷阱进行了模块化设计,有效地克服了已有设备的缺点,以利于微波真空干燥得到更广泛的应用。

## 1 整体布局和工作过程

如图1(a)所示,该微波真空干燥设备的外观呈长方体。在设备的正面设置了门体系统、控制系统和真空测量系统。门体上设置有可视性窗口,窗口由玻璃制成并加装了微波屏蔽金属网,既可以清楚地看清物料室内的干燥状况,又能保证微波不会泄漏。在门体的旁边设置了操作面板,用来控制设备的各个系统。门体的下方安装了真空计,用来测量真空发生室的真空度。在整个设备底部的4个角处对称安装了4个轮子,以方便设备的移动。如图1(b)所示,该微波真空干燥设备的内部结构主要包括微波制热部分和真空制冷部分。微波制热部分包括微波源,波导和微波室。真空制冷部分包括真空室、真空泵、制冷机和冷阱。微波室包括微波发生室和物料室。真空室包括真空发生室和物料室。物料室为真空室和微波室交叉部分。

该设备的工作过程:先将需要干燥的物料放在 $-20^{\circ}\text{C}$ 左右进行预冷冻2 h,然后将物料放入 $-80^{\circ}\text{C}$ 冰箱进行速冻,确保物料中的水分都变成固态冰。接着打开仓门,将物料放入物料室的托盘中,关闭仓门和冷阱放水阀。打开真空泵抽真空,真空度达到设定值时,打开制冷机,向冷阱中注入制冷剂,确保冷阱正常工作。然后,打开微波发生器对物料进行微波加热,并开启冷阱和波源冷却装置连接处的阀门。待加热结束后,关闭微波发生器和制冷机,打开放气阀,待真空仓内的压力恢复到大气压,打开仓门取出物料。接着,打开注水阀,向冷阱中注入水,待冷阱中的冰霜全部融化后,打开放水阀,将水排出。

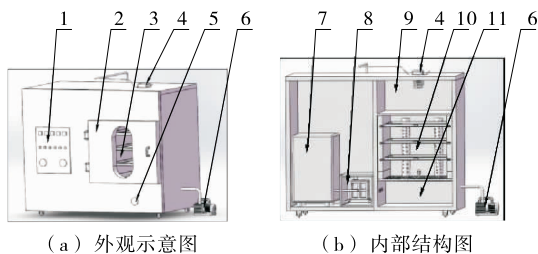


图1 总体图  
1. 控制面板 2. 门体 3. 门体观察窗 4. 波源波导 5. 真空计 6. 真空泵 7. 制冷机 8. 冷阱 9. 微波发生室 10. 物料室 11. 真空发生室

Figure 1 Schematic diagram of machine layout

## 2 微波真空干燥设备各部分的设计

### 2.1 微波制热部分

2.1.1 微波源及波导 如图2所示,微波源和波导焊接为一个整体,上层是微波源,下层是波导,波源和波导之间设置有法兰,该法兰与微波真空干燥设备的外层金属壁焊接或螺钉连接,保证微波不会泄漏。下层的波导结构是一个由空心不锈钢管制成的弹簧结构。弹簧底部设置了不锈钢底板,以利于微波的反射。弹簧结构的螺距为 $d$ ,该距离可以使反射的

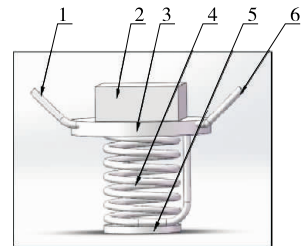


图2 波源与波导的示意图  
1. 进口 2. 波源 3. 法兰 4. 波导 5. 不锈钢底板 6. 出口

Figure 2 Schematic diagram of microwave source and waveguide

微波顺利通过。这样的波导结构可以使微波在波导底板和弹簧之间复杂的反射,最后从弹簧缝隙处射出,得到的微波更加均匀。另外,微波源使用过程中发热会严重影响其使用寿命,传统的自然冷却效果差,所以本波导的弹簧结构由空心不锈钢管制成,管内可以加入制冷剂对微波源进行冷却。并在波导的进口处分别设置了进口阀(图中未显示),便于控制制冷剂的进入,波导的出口是封死的,防止制冷剂泄漏。

2.1.2 微波室 微波室包括上层的微波发生室和下层的物料室。微波发生室和物料室之间用陶瓷板隔开。因为陶瓷板对微波能的吸收可以忽略。既可以最大程度地作用到冻干物料上,又能防止水、灰尘等进入波导部分,保证设备部件的性能和使用寿命,提高微波能的转换效率。

(1) 微波发生室:如图3所示,微波发生室上面和四周围为不锈钢,防止微波泄露。下面为陶瓷板,允许微波顺利进入物料室,陶瓷板与不锈钢外壁之间真空密封连接。

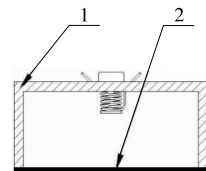
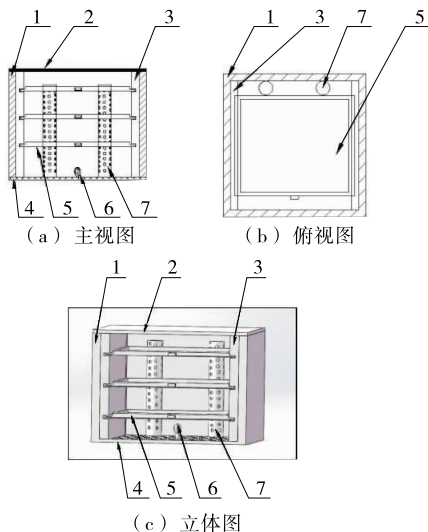


图3 微波发生室的示意图  
1. 不锈钢外壁 2. 陶瓷板

Figure 3 Schematic diagram of microwave generation room

(2) 物料室:如图4所示,物料室为双层结构。外层由不锈钢组成,防止微波泄露。内层由聚四氟乙烯组成,微波可以顺利的通过。物料托盘也是由聚四氟乙烯组成,既可以盛放物料又允许微波顺利通过。所述的物料托盘与物料室的聚四氟乙烯内层装配到一起。即聚四氟乙烯内层作为支架部分,物料托盘作为盛料部分。物料托盘为抽屉状的,可以自由地在内层聚四氟乙烯支架上推拉,既方便物料的装卸,又可以根据实际的需要增加物料托盘的数量。物料室的下面设置有微波屏蔽板。微波屏蔽板为不锈钢金属板,金属板上均匀分布有直径为 $2\sim 4\text{ mm}$ 的小孔。所述微波屏蔽板一方面可防止微波进入真空发生室,通过真空管泄露,另一方面可允许物料室中的水蒸气通过,被冷阱捕捉。

另外,在微波屏蔽板上还开有允许照明设备和测温设备通过的管道,即测量装置在物料室,连接测量装置的电线在真空发生室。照明设备和测温设备的外面都设有微波屏蔽



1. 不锈钢外壁 2. 陶瓷板 3. 聚四氟乙烯内壁 4. 微波屏蔽板  
5. 物料盘 6. 测温装置 7. 照明装置

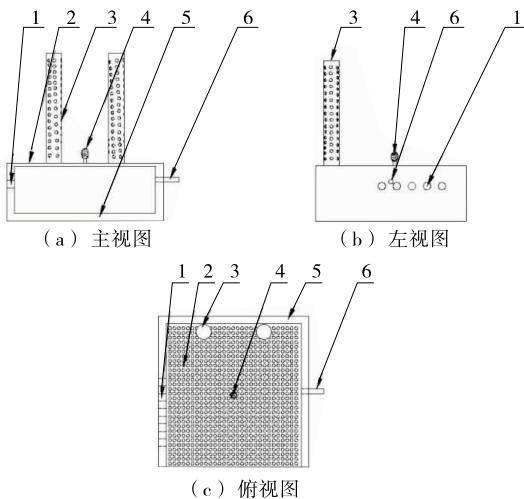
图 4 物料室的示意图

Figure 4 Schematic diagram of the material room

的外壳(即金属材质的外壳,上面均匀分布 2~4 mm 的小孔),这样可以有效防止测量装置打火放电。

## 2.2 真空制冷部分

2.2.1 真空室 真空室包括物料室和真空发生室。物料室是真空室和微波室的交叉部分,所以这里就不再赘述。真空发生室如图 5 所示,四周及底面由不锈钢组成,防止微波泄露。上面为微波屏蔽板,将物料室和微波发生室隔离。所述的微波屏蔽板与微波制热部分所述的屏蔽板为同一个屏蔽板,所以这里也不再赘述。微波发生室的左面上设置了均匀分布多个的水蒸气捕捉口,捕捉口与冷阱相通,物料室的水蒸气通过微波屏蔽板进入真空发生室,再从真空发生室通过水蒸气捕捉口进入冷阱被冷阱捕捉,均匀分布的水蒸气捕捉口可以防止冷阱出现局部冰层过厚的现象。

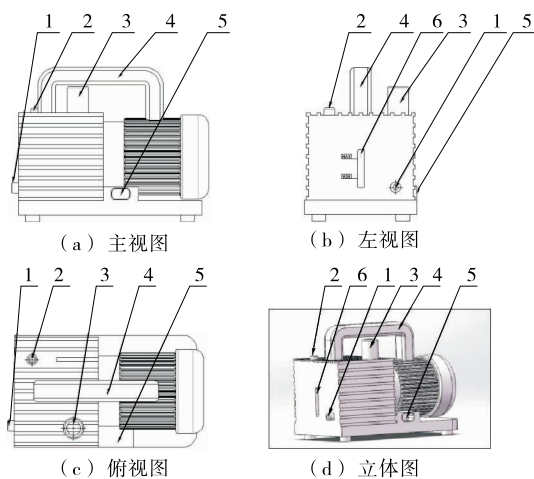


1. 水蒸气捕捉口 2. 微波屏蔽板 3. 照明装置 4. 测温装置  
5. 不锈钢外壁 6. 真空管道

图 5 真空发生室的示意图

Figure 5 Schematic diagram of vacuum chamber

2.2.2 真空泵 如图 6 所示,所述的真空泵由不锈钢制成。外观为近似的长方体,在泵体的最上部设置了把手以方便拿取。还设置了底座保证泵体受力平衡,可以平稳的放置。另外,在泵体上还设置了进油口和出油口。进油口为换油时注入油的地方,位于泵体上部,这样在重力的作用下可以保证油顺利的进入泵体。出油口为换油时流出油的地方,位于泵体下面,刚好与泵体油腔的底面相切,这样可以保证油完全流出。油腔的侧面上还设置了由玻璃制成的目视镜,可以清楚的观察油腔的内部情况。目视镜上设置了最高刻度和最低刻度,方便估算加入油的量。真空管道位于最上端,与真空发生室通过管道真空密封连接。底座处设置了电源插口,用来通电驱动真空泵工作。



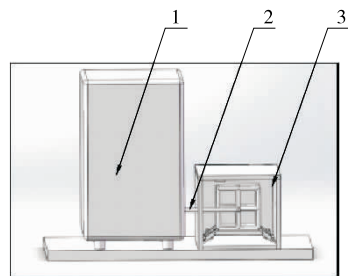
1. 出油口 2. 进油口 3. 真空管 4. 把手 5. 电源插口 6. 目视镜

图 6 真空泵的示意图

Figure 6 Schematic diagram of vacuum pump

2.2.3 制冷机和冷阱 如图 7 所示,制冷机的制冷剂输出端与冷阱的进口端相连。冷阱的出口端与波导的进口端相连,使得冷阱中的冷凝剂也可以进入波导的弹簧结构中,为微波源降温,提高微波源的使用寿命。并且在冷阱与波导的连接处设置了真空阀,用来控制冷阱与波导接通与否。冷阱与真空发生室之间设置有相通的水蒸气捕捉口,使得物料室内产生的水蒸气先进入真空发生室,再从真空发生室的水蒸气捕捉口进入冷阱,被冷凝管单元捕捉。

如图 8 所示,冷阱包括冷凝管单元、外壳、进水口、出水



1. 制冷机 2. 连接管 3. 冷阱

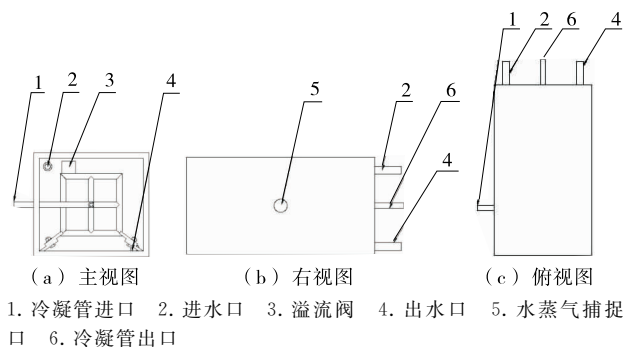
图 7 制冷机和冷阱连接示意图

Figure 7 Schematic diagram of connection of refrigerator and cold trap

口和溢流阀。如图9所示冷凝管单元是由空心不锈钢管组成的正方体,使得正方体的每个面都呈“田”字型,空心管之间通过无缝焊接相互连通,保证冷凝剂可以在冷凝管单元内自由流动。在正方体的前后两面的正中间分别设有冷凝剂的进出口。由于冷凝管单元的尺寸都是标准化设计,可以方便地根据干燥物料的多少来增减冷凝管单元的数量,以提高冷阱的利用率。冷凝管单元的进出口处都有螺纹,冷凝管单元之间用标准管接头连接。冷凝管单元位于冷阱外壳正中央,它们之间通过螺栓连接,冷阱外壳为长方体,四周面和后面用不锈钢制成,前面用透明玻璃制成,玻璃和不锈钢之间真空密封配合。这样的构造可以清楚地从玻璃窗处观察冷阱里面水分捕捉情况及加入水的量。干燥结束以后,水蒸气被冷阱捕捉成冰霜,附着在冷凝管单元上,此时加入常温的水可以将冰霜融化成液态水,顺利地排出。因此,在冷阱外壳的最里面设置有进水口,出水口及溢水阀。进水口位置最高,出水通道位置最低,这样可以利用重力作用方便地加水或放水。溢水阀位于进水口和出水口之间,用于防止加入的水过多溢出。

### 3 性能试验

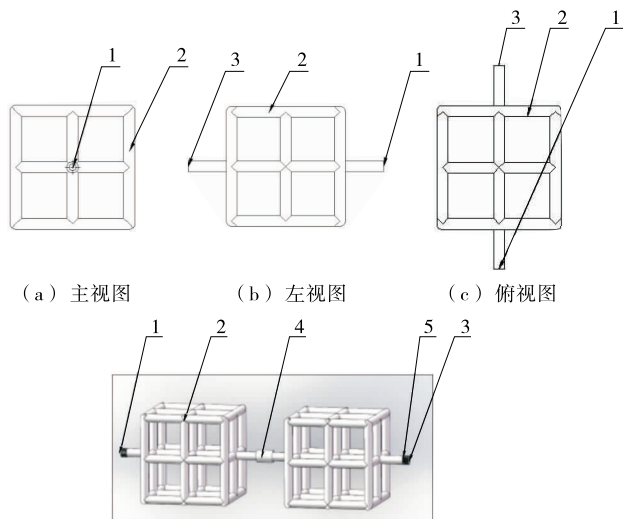
该微波真空干燥设备微波输入功率设计为 20 kW,波导



1. 冷凝管进口 2. 进水口 3. 溢流阀 4. 出水口 5. 水蒸气捕捉口 6. 冷凝管出口

图8 冷阱的示意图

Figure 8 Schematic diagram of cold trap



(d) 冷凝管单元连接立体图

1. 冷凝管进口 2. 冷凝管 3. 冷凝管出口 4. 管接头 5. 螺纹

图9 冷凝管单元的示意图

Figure 9 Schematic diagram of condenser tube unit

尺寸为 100 mm×150 mm,物料室体积为 0.66 m<sup>3</sup>,微波屏蔽板上小孔直径为 2~4 mm。选取型号为 WBL-1000 的微波源一只,型号为 IS-KI5100 的测温装置 1 只,型号为 6RG781212 的照明装置 2 只。挑选大小均匀且无病虫害的新鲜荔枝,按照前面所述的设备工作过程干燥荔枝,测定设备的主要性能参数(见表1)。从表1可以看出该设备的各项指标均达到了设计要求。所得的荔枝干的干基含水率为 0.17 kg/kg,干燥后荔枝皮的形状保持不变,里边的果肉呈暗褐色,果肉香软可口。

表1 微波真空干燥设备性能参数<sup>†</sup>

Table 1 Performance parameters of the microwave vacuum drying equipment

参数	设计值	实测值
干燥速率/(kg·h <sup>-1</sup> )	30	34.7
微波输出功率/kW	15	16.8
干燥温度/℃	<50	35
微波泄漏量/(mW·cm <sup>-2</sup> )	<1	<1
真空度/MPa	-0.001~-0.01	-0.001~-0.012

<sup>†</sup> 干燥速率是干燥荔枝的速率,微波泄漏量是距设备 5 cm 处检测的数值。

### 4 结论

本研究设计将波导和波源冷却装置巧妙地融为一体,既能保证物料受热均匀,又提高了波源的使用寿命。物料室为真空室和微波室的交叉部分,能同时满足微波和真空的环境。将物料托盘设计为抽屉型,既方便装卸,又充分利用了空间。“田”字型的冷阱设计,可以单元化的安装和拆卸,大大地提高了冷阱的利用率。经实验验证,该微波真空干燥设备结构合理,操作方便、性能稳定、安全可靠,完全满足设计的要求。

本研究设计的微波真空干燥设备是在实验室试验的基础上设计的,很多参数需要在实际应用的过程中进行完善或修正。

该设备可以满足大多数热敏性物料对于干燥速率和干燥品质的要求,但是它的自动化控制系统仍需完善,以便进一步降低加工成本,适应更宽广的市场。

### 参考文献

[1] 曹崇文. 微波真空干燥技术现状[J]. 干燥技术与设备, 2004, 2(3): 5-9.

[2] 徐小东, 崔政伟. 农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 171-174.

[3] 韩翠萍, 郑先哲, 霍贵成, 等. 鲜牛奶真空微波干燥工艺的研究初探[J]. 中国乳品工业, 2007, 35(1): 39-41.

[4] CUI Zheng-wei, SUN Li-juan, CHEN Wei, et al. Preparation of dry honey by microwave-vacuum drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(4): 582-590.

[5] 王霞, 杨宏志, 刘海军. 绿豆脆饼微波真空膨化条件研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 191-193.

(下转第 206 页)

表5 研究文献被引频次统计

Table 5 Statistics of Cited Frequency of Research Literature

文献名	发表年份	被引频次
转基因植物食品中标志基因的安全性评价	1997	308
转基因植物的环境及食品安全性	1997	224
欧盟转基因食品法律管制制度研究	2004	76
欧盟转基因食品立法规制及其对我国的借鉴意义	2008	59
美国、欧盟有关转基因食品的管理、法律法规对我国的启示	2005	59
关于转基因食品安全性	2000	59
标明特殊身份——转基因食品安全隐患与标签论争	2000	53
欧美转基因食品法律管制制度比较研究	2005	52
转基因食品安全性评价的研究进展	2001	51
生物技术与转基因食品安全性的争论	2001	46
转基因食品的发展现状及安全性评价	2003	45
美国转基因食品标识制度法律剖析	2007	41
转基因植物食品的检测策略	2001	41
美国转基因食品管制制度研究	2006	40
转基因食品的标签与知情选择的伦理分析	2004	37
转基因食品的利与弊	2001	37
转基因食品安全性检验的核酸检测技术研究	2002	36
欧盟转基因食品标识制度浅析	2007	35
实质等同性:转基因食品安全性评估的基本原则	2001	35
转基因食品的安全性与标识管理	2008	34
转基因食品标识的核心法律概念解析	2010	33
转基因植物的食品安全性问题及评价策略	2011	32
转基因食品的食用安全性评价	2005	30

庭,公众希望通过转基因食品工程技术的创新,来保障转基因食品的安全性,特别是转基因食品对人类健康的影响,学术界还没有明确的界定结论。希望更多的学者从事转基因

工程技术的研究,促进转基因食品行业的发展,在给社会带来效益的同时,提供安全可靠的保障,形成绿色可持续发展。

(3) 转基因食品风险交流研究须进一步创新。在统计的19篇关于转基因食品风险交流的文献中,研究方法、原因剖析均借鉴国外研究结论,特别是面对“互联网+”时代,公众易受网络信息的冲击和影响,风险交流尤为重要,转基因食品公众认知问题归根结底是风险交流问题,学者们对转基因食品的安全问题探讨,解决的途径仍然是风险交流,中国工程院院士、国家食品安全风险评估中心研究员陈君石说,风险交流是解决食品安全问题的重要手段<sup>[10]</sup>。中国学者应致力于风险交流领域的研究,通过风险交流体制机制的创新,形成一批具有国际影响力的跨学科、交叉研究成果。

### 参考文献

- [1] 刘光明, 苏文金. 植物性转基因食品的发展与安全管理[J]. 集美大学学报, 2001(3): 214-218.
- [2] 关海宁, 徐桂花. 转基因食品安全评价及展望[J]. 食品研究与开发, 2006(4): 172-175.
- [3] 齐振宏, 王瑞懂. 中外转基因食品消费者认知与态度问题研究综述[J]. 国际贸易问题, 2010(12): 115-119.
- [4] 张忠民. 转基因食品标识阈值问题研究[J]. 食品科学, 2015(9): 254-259.
- [5] 于川, 徐飞. 现代农业生物科技的认知困境及反思: 从当前关于转基因食品的争议谈起[J]. 自然辩证法研究, 2015(1): 108-114.
- [6] 刘鹏. 中国转基因食品安全监管: 基于监管成本-收益视角的分析[J]. 华中师范大学学报: 人文社会科学版, 2016(2): 1-7.
- [7] 张振霞. 转基因食品的安全综合评价与监管优化路径[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 222-225.
- [8] 张明杨, 章棋. 消费者转基因食品态度研究的调查方法荟萃分析: 基于SCI、SSCI、CSSCI等索引的统计[J]. 统计与信息论坛, 2016(6): 98-105.
- [9] 余硕, 张聪丛. 中国食品安全风险交流研究的文献计量分析[J]. 食品工业, 2016(3): 239-243.
- [10] 王薇. 补齐食品安全风险交流短板, 加强立法, 透明互动是关键[N]. 中国食品报, 2015-3-13(A3).
- [11] 张永萍, 徐剑, 黄燕琼. 微波真空干燥对中药有效成分的影响[J]. 中成药, 2007, 29(3): 439-440.
- [12] 李树军, 曹有福, 杨炳南, 等. 一种微波真空干燥设备: 中国, 201010135306.X[P]. 2011-09-28.
- [13] 吴琦. 对开门微波真空干燥机: 中国, 201310184080.6[P]. 2014-11-26.
- [14] TOAI L V. Microwave freeze drying method and apparatus: United States, 4204336[P]. 1980-05-27.
- [15] KAENSUP W, CHUTIMA S, WONGWISES S. Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum rotary drum dryer[J]. Drying Technology, 2002, 20(10): 2067-2079.
- [16] 闫跃华. 微波真空干燥设备: 中国, 201110361267.X[P]. 2012-04-04.

(上接第96页)

- [6] FIGIEL A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum micro-wave methods[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 461-470.
- [7] LI Yu. Characteristics of microencapsulated garlic powder dried by microwave-vacuum combined with vacuum drying[J]. Food Science, 2008, 29(8): 208-213.
- [8] CUI Zheng-wei, XU Shi-ying, SUN Da-wen, et al. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(2): 157-164.
- [9] 胡庆国, 卜召辉, 陆宁. 金针菇真空微波干燥动力学模型的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 48-50.
- [10] 孙丽娟, 崔政伟. 微波真空干燥高粘度的灵芝浓缩液[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(1): 36-38.