

第1章

微波技术农业应用

1.1 微波与微波能

微波是指频率在 300 MHz~300 GHz 的电磁波,是无线电波中一个有限频带的简称,其波段及其中心波段频率见表 1-1。微波通常由直流电或 50 Hz 交流电通过半导体器件和电真空器件来产生,在微波加热工业应用中使用的主要微波源是磁控管及速调管,在受控聚变研究中用到回旋管。从电子学和物理学观点来看,微波以穿透性、选择性加热、热惯性小、似光性、似声性、非电离性和信息性等特性而不同于其他波段的磁频谱。

表 1-1 微波波段及其中心波段频率

波段代号	频率/GHz	中心频率波长/cm
L	0.72~2.00	22.00
S	2.00~4.00	10.00
C	4.00~8.00	5.00
X	8.00~12.00	3.00
Ku	12.00~18.00	2.00
K	18.00~30.00	1.25

微波的发展与应用始于微波振荡与放大器件的产生。20 世纪 30 年代波导管传输微波的实验获得成功,开始形成微波技术。起初,微波作为一种信息或信息载体被利用,但在微波通信工程应用中,发现始终伴随一种引起微波能损耗、需要设法防止和消除的有害因素——热效应,于是有学者提出利用微波的热效应对材料进行加热的想法,并进行不断探索、试验和研究,直到磁控管、速调管和回旋管的出现,将微波推向了毫米波大功率领域,为微波加热应用展示了更广阔的前景。

1.1.1 微波加热频段

不同频段电磁波的传播方式和特点各不相同,其用途也不同,微波频段包括 UHF 特高频、SHF 超高频、EHF 极高频和至高频。为了促进电磁波频谱资源的有效合理利用,避免频率使用的相互干扰,需要根据各个波段电磁波的传播特性和各种业务的特性及共用要求,对电磁波频谱进行分配。1979 年世界无线电管理协会(World Administrative Radio Conference, WARC)经过协商,分给工业、科学和医学用的频率有 433 MHz、915 MHz、2450 MHz、5800 MHz、22 125 MHz。目前国内用于工业加热的常用频率为 915 MHz 和 2450 MHz。

1.1.2 微波效应

微波可以对材料微生物产生物理、化学及生物效应,通常称为热效应和非热效应,这是微波在加热、干燥、杀菌、改性等诸多应用中的原理和基础。

热效应是指生物体吸收微波的能量后,温度升高,从而发生各种生物功能的变化。热效应主要与物质本身在特定频率和温度下将电磁能转化为热能的能力有关,用损耗因子来衡量。当微波作用于材料时,材料表面和中心同时吸收微波能,自身温度升高,同时材料中的微生物细胞分子也被极化并高频振荡,细胞内的温度快速升高使其蛋白质结构发生变化,从而失去生物活性。

非热效应又称生物效应,是在电磁波的作用下,生物体内不产生明显的升温,却可以产生强烈的生物响应,使生物体内发生各种生理、生化和功能的变化。微波能使生物体内的电子、离子和其他带电粒子的生物性排列组合状态和运动规律发生改变,也会使细胞膜附近电荷分布改变,干扰破坏细胞的正常代谢功能,使微生物细胞的生长受到抑制,甚至停止生长或使之死亡。微波还可以导致细胞 DNA 分子结构中的氢键松弛、断裂和重新组合,从而中断细胞的正常繁殖能力。

1.1.3 微波材料及装置

1. 微波加热材料

根据室温时材料在微波场中的响应与吸波特性,可对微波加热材料进行以下分类^[6]:

(1) 微波吸收材料。材料的介电损耗因子(ϵ'')一般大于 10^{-2} ,如 SiC、MoSi₂、HaO₂ 陶瓷等。在室温下具有较好的吸波能力,是目前主要的生产和研究对象。

(2) 微波透过材料。材料的介电损耗因子小于 10^{-2} ,如 BN、SiO₂、Al₂O₃ 等。在室温条件下,微波直接穿透材料,消耗能力不强,常被用作微波加热设备中的炉管或保温装置的主要材料。

(3) 微波反射材料。这类材料具有较高的电导率,如金属材料,微波能量在金属表面处被反射,反射波带走绝大部分能量,只有被吸收的极少部分电磁能量才会对加热有贡献。波导管、谐振腔等均为金属材料。

材料吸波特性的分类是相对的,因为材料的相对介电常数(ϵ)和介电损耗角正切($\tan\delta$)随着环境湿度、微波频率及加热温度等因素会发生变化。例如 SiO₂、Al₂O₃ 等材料在室温时为微波透过材料,当被加热到某一临界温度时,介电常数会突然增加,成为良好的微波吸

收材料^[7]。

2. 微波加热装置

微波加热装置主要包括微波功率源、加热器和控制器等部分^[8]。

1) 微波功率源

微波功率源是提供微波功率的装置,包括微波电子管(如磁控管或速调管)、提供直流能量的直流电源和传送微波功率到加热器的传输波导系统。一般在磁控管后面接有大功率环行器,防止在加热器失配或大驻波状态下,吸收反射回微波管的功率,保护磁控管正常工作,防止发生管内打火而造成损坏。

2) 加热器

加热器是对材料或工件进行加热的装置,材料在此区域里将微波能转换为对材料的加热和温升,是微波加热装置最重要的部分,决定了加热的效率、经济效益与安全性。加热器带有传送带系统、通风系统、热风系统或真空系统。

3) 控制器

控制器是成品质量检测与反馈控制系统。可配置测湿、测温、测厚装置,通过计算机控制反馈信号改变传送带电机的转速或调制微波源功率以达到控制产品质量的目的。

3. 加热装置选择

1) 微波加热器的选择

在进行微波材料加工前,需要考虑3方面的问题:一是分析材料特性,如物理特性、化学特性、介电特性、大小和质量等;二是根据材料性质选择适合的频率和功率的微波源;三是选择合适的加热器,以达到较好的经济效益。

2) 微波频率与损耗功率选择

由功率密度 $P/V=0.556f\epsilon_r E_r^2 \times 10^{-12} (\text{W}/\text{cm}^3)$ 可知,在一定场强下,加热功率取决于 $f \cdot \epsilon_r$,选择加热器时,一般把加热频率选择在 ϵ_r 最大值附近。工程应用中,微波加热主要选择 915 MHz 或 2450 MHz,频率选择时要根据穿透深度、材料尺寸综合考虑。对于厚而大的材料,要求穿透深,多选用 915 MHz,小而薄的材料多采用 2450 MHz。其次,微波功率的选定,除了考虑材料特点和频率,还要由升温速率、脱水快慢、每分钟要求处理量来估计,并扣除辐射、传导、对流产生的热损耗,实际选择的功率要有一定富余量,并最终由实验与经验决定。

3) 加热器的选择

微波加热器的效率主要取决于设备的热效率,在选择加热器时要重点关注以下问题:

(1) 高效率。在加热器中,微波功率应尽可能多地被待加热材料所吸收,要使壁耗、反射和剩余传输功率降至最小。

(2) 均匀加热。均匀加热是对加热器的基本要求,这种要求并非是在加热器中各处都有完全相同的场强,而是在加热器中实现对材料的均匀加热。

(3) 加热器与材料相适应。加热器的形状、大小、功率容量等与材料相匹配,加热器的传送带运行速度与材料的工艺特点相匹配,静止加工时则与装料和卸料相匹配。

(4) 加热器应简单、便宜。在实用的前提下,尽可能地做到结构简单、可靠,价格便宜,

易于用户操作。

(5) 微波源与加热器应符合国家规定的微波泄漏标准。中国微波泄漏标准是离设备表面 5 cm 处应小于 1 mW/cm^2 。

1.1.4 微波能利用

微波作为能源使用始于 20 世纪 30 年代后期,其应用随微波灶的商品化而得到迅速发展。70 年代初期,我国开始研究和利用微波加热技术,并于 80 年代开始生产微波炉,连续微波磁控管和大功率磁控管研制的技术突破,有力地推进了微波能技术的应用。当前,国产家用微波炉、工业微波炉系列产品质量已接近或达到世界先进水平,关于微波产生、放大、发射、接收、传输、控制、测量以及应用的技术不断发展和完善^[9]。

由于微波能出色的节能、省时特性,国内外众多组织和公司参与了微波能应用研究^[8]。在国际上先后成立了如北美微波能应用协会(International Microwave Power Institute, IMPI)、欧洲微波能应用协会(Association for Microwave Power in Europe for Research and Education, AMPERE)和日本电磁波能量应用学会(Japan Society of Electromagnetic Wave Energy Applications, JEMEA)等微波能应用学术组织。同时,涌现了如 Cober Electronics、MKS Instrument 等公司,并在微波有机分子合成、微波食品干燥、微波褐煤脱硫、微波等离子体新材料等领域实现了工业化生产。众多学者对微波进行了广泛的研究,Adam D 于 2003 年在 *Nature* 上对微波能应用进行了综述,阐述了微波能的发展对工业热处理领域的重要意义^[10]。Kappe C O 在 *Angewandte Chemie-International Edition* 上分析了微波能应用中对加热过程温度进行精确控制的必要性,预测微波辅助有机物合成将成为实验室研究的标准技术^[11]。Chandrasekaran S 等在 *Food Research International* 中综述了微波在食品烹饪、干燥、杀菌领域的广泛应用前景,并指出需要在大功率应用、能量利用率方面进一步研究的必要性^[12]。这些在国际知名期刊发表的文章表明了微波能应用的广阔发展前景以及对其进行研究的必要性。国内学者几乎同步开展微波能的学术和应用研究,相关研究内容涉及电磁场微波技术、真空电子学、智能控制、化工和冶金等多个学科和技术领域,并呈现逐渐增加的趋势。

总的来说,微波能的利用几乎覆盖了社会生产生活的各个领域,且与其他学科相结合,正在形成许多新的交叉学科,如微波冶金、微波医学、微波生物学、微波化学等^[13-14]。但在微波能应用过程中,也面临着能耗高、反应体系温度突变、工业系统设计缺乏理念指导等现实问题^[15-16],从产业化角度看微波能的应用,还存在着技术力量短缺、基础技术不深、检测手段不全以及传统习惯势力很难短期克服、投资力度不够等困难^[17]。

1.2 微波能在农业领域的应用现状

当前,微波加热技术已在橡胶、陶瓷、煤炭、冶金、木材、家庭、医疗以及化学、新材料、微电子等领域得到广泛应用^[18],微波技术有力地推动了相关产业的发展。

在农业领域,由于绝大多数涉农介质都是非磁性的,故微波能在农业领域的应用主要是基于介质的介电特性而进行,其应用主要分为介电加热和传感检测两大类^[19]。研究表明,微波能在粮食和种子产品干燥、种子传播病原体处理、储藏产品虫害控制、种子处理以促进

发芽、土壤虫害控制、产品营养价值提升、农产品水分含量或其他质量属性感知等方面获得有效应用。

1.2.1 微波在农业生产中的应用

农业生产中,微波能主要应用在育种、除虫、储藏和保鲜等方面。

(1) 微波育种:农产品种子的电磁波处理,是电磁生物效应研究得最早、在农业上应用最多的一个方面。通过微波热效应和非热效应的共同作用,可以引起生物体产生一系列的正突变效应或副突变效应。种子经适当的微波处理后,呼吸强度提高、根系活力增强、发芽率提高,产量亦有不同程度的提高^[20]。美国农业局科学家研究发现,射频加热对硬质种子(紫花苜蓿)细菌致病菌有抑制作用,且大大提高了种子的发芽率^[19]。孔繁武利用微波处理大豆种子,表明微波对大豆起诱变作用,可以单独作为诱变育种的手段应用^[21]。里佐威、裴力使用微波辐射水稻种子,获得了种芽的生理、生化指标及水稻生长期的性状变化情况^[22]。研究表明,微波对蚕豆、大麦、小麦、高粱、玉米和水稻等都有不同程度的促进植株生长、增强抗病虫害能力及提高产量等作用^[23]。

(2) 微波除虫:在不造成污染的前提下杀灭土壤中的有害虫卵是农业生产需要解决的重大问题。用微波直接辐射土壤,可以杀死杂草草籽及土壤中的害虫、真菌和线虫等微生物,减少因施农药造成的环境污染,而且使甜瓜增产60%、洋葱增产35%,成本仅为使用农药的50%。覃恩荣将感染害虫的粮食样品置于2.45 GHz微波场中,从大量实验中筛选出最短的照射时间与最大杀虫效率的关系^[24]。澳大利亚科学家发明了利用微波或高能粒子杀死新鲜水果和蔬菜中害虫的技术,该技术能杀灭苹果、牛油果、大辣椒和西葫芦中的昆虫和昆虫卵,研究发现在某些温度下杀虫率达100%^[25]。Nelson等认为微波加热防治土壤害虫的敏感性依次为昆虫、杂草种子、线虫、真菌和细菌,但微波耗能偏大^[19]。

(3) 微波储藏:如何有效地处理霉变和虫蛀是粮食储存中面临的挑战性难题。研究表明,许多危害谷物和谷物产品的昆虫,可以通过短时间暴露于不损害宿主材料的电磁波中而得以控制^[26]。粮食的介电测量结果显示,在频率10~100 MHz范围内昆虫的介质损耗比粮食大。加拿大和美国研究人员使用射频和微波选择性地杀灭储藏谷物中的昆虫,美国农业部实验证实,在室温24℃时,用频率为39 MHz的射频照射含水率为13.3%的冬小麦3 s,处理后小麦的温度不到40℃,但7 d后小麦中的米象已100%死亡^[19]。刘冬文等利用微波对呼吸强度大、难以储藏的栗仁进行处理,发现可储藏时间增长一倍。

(4) 微波保鲜:在鲜食保鲜中,荷兰食品公司对盒装茄汁鱼、牛肉等8个品种食品进行微波保鲜处理后,能在0~4℃冷藏柜中保存42 d,风味不变且新鲜如初,质量胜过一般的冷冻食品^[27]。南京三乐电器总公司研制出微波烹调南京咸水鸭、福建板鸭的设备,并将此技术应用于牛奶、营养口服液的杀菌和人参、肉类、泡菜的加工,发现生产工艺简化、保鲜时间延长,产品品质提高。山西省研制出基于电子微波、紫外线和臭氧相结合的保鲜技术,可抑制果蔬呼吸,使其处于休眠状态,使果蔬保鲜期延长达3个月以上^[28]。

1.2.2 微波在农产品加工中的应用

农业物料是具有生命现象的生物体,泛指农业土壤、植物及各类农产品^[29]。农产品的微波热加工应用主要有加热或干燥处理、食品加工、特殊农(副)产品加工和微波检测等

方面。

(1) 微波加热或干燥处理: 微波干燥是有效解决传统农产品收获后在运输、储藏和销售环节有损耗的重要手段。近年来, 国内外对脱水后的干制农产品需求不断增长, 微波加热干燥的市场潜力巨大。从实用角度看, 微波加工特别适宜用于产品价值高、质量要求严格、热传导率低、用常规方法难以处理的物料^[30]。大量研究表明, 与其他干燥方式相比, 微波介入的干燥方式具有干燥速度快、加热时间短、干后品质和利用率高的优点。但一般情况下, 单纯用微波(如脱水)是不经济的, 有时难以保证加工质量, 而与常规方法相结合, 能得到较好效益, 将微波技术分别与冷冻技术、真空干燥技术、热风技术等结合起来, 使用微波提供热源, 利用真空状态或热风技术降低物料干燥的温度, 充分发挥各自的优势, 能取得较好的干燥效果^[31-36]。国外对小麦进行微波和热风干燥处理的成果表明, 时间成本仅为热风干燥的1/10, 并且粮食的蛋白质含量、出粉率均不受影响, 无虫蛀现象。我国西南地区的烤烟厂使用微波复烤烟叶, 不仅质量好、产量高、损耗少, 有的加工成本比蒸汽还低, 产品被列为免检商品^[30]。微波干燥已用于菠菜、香芹、芒果、猕猴桃、胡萝卜、南瓜、辣椒、紫薯、苹果、莴笋、蘑菇和芦笋等食品和农产品的脱水处理^[37]。

(2) 微波食品加工: 微波能在食品工业中也具有广泛应用, 主要体现在食品加热、杀菌、萃取、膨化等方面。食品的微波加热, 具有加热效率高、节能环保和易于控制的优势, 微波对同一材料的加热时间一般只需要传统方法的1/100~1/10, 效率可达60%以上, 加热快且易于控制。使用微波对南瓜进行膨化, 证明南瓜的还原糖含量增加3.36%, 其营养价值得到提升^[38]。经微波膨化将马铃薯制成营养脆片, 得到的产品能完整地保持原有的各种营养成分^[39]。使用微波加热可除去大蒜中的臭味, 抑制90%的蒜氨酸酶活性^[35]。林甄应用微波辅助萃取技术对树莓粉中的花青素成分进行萃取, 研究萃取液中花青素萃取量和介电特性的变化规律^[40]。也有研究表明, 微波可以分离提取植物天然成分, 加工保健食品, 获取天然色素、果胶、植物香油等。

(3) 微波特殊农(副)产品加工: 在物料营养保持、特殊农(副)产品干燥和药料蒸煮等领域, 微波加热技术也得到了应用^[41]。日本研究人员使用微波干燥茶叶, 将生茶再加工制成精茶, 由于加热时间短, 无表面过热, 可保持茶叶的色香味, 延长存放期, 类似的方法用于香菇干燥, 香味和质量均得到提高^[19]。使用43 MHz频率对大豆加热1 min左右, 其温度提高到130℃左右, 胰蛋白酶抑制剂活性降低, 营养价值得到了提升。对蘑菇、木耳和山野菜等林副产品的干燥加工能有效防止表面褐化, 保持原有的风味和色泽。微波加热处理山核桃已被评估为一种保存质量的方法, 而不需要冷藏储存^[42]。微波加热技术也被用于人参、枸杞、鹿茸、天麻、当归、党参及冬虫夏草等名贵药用植物采收后的蒸煮和干制, 使用过程中体现了微波的优势^[43-45]。

(4) 微波检测: 微波检测主要用于水分测量及物料质量无损检测。介电法测定谷物的含水量可能是迄今为止农产品介电性质最重要的应用之一。研究表明, 谷物与其他农产品的水分含量与其介电特性之间存在着明显的相关性, 其介电性能随外加电场频率, 物质的含水量、温度和体积密度而变化。近年来, 人们利用高频测量的优点和微波频率下的晶粒介电特性, 研究能同时检测颗粒材料水分含量和体积密度的新型谷物和种子水分计, 以提高粮食和种子工业的可靠性和实用性^[46]。另外, 电磁波也被用于新鲜水果和蔬菜质量的无损检测, 主要用于品质识别, 快速、非破坏性地进行分类改进和处理操作。研究表明, 超声波可用

于检测与产品质量有关的某些内部特性,而微波则可以获取农产品有关组织质量的信息,进而进行某些水果和蔬菜产品质量的无损检测。基于介电特性的甜瓜、苹果、洋葱和大枣无损检测研究成果相继被报道^[46]。

综上所述,微波能在农业生产和农产品加工领域获得了一些应用,但无论是微波加热、微波干燥、微波育种、微波杀菌还是微波检测,微波能的应用主要围绕其介电特性而展开,预处理对象(物料)的介电特性始终是影响农产品微波辅助加工和应用效果的最关键指标之一。当前,不同种类的农产品介电参数量化数据相对比较缺乏,准确地掌握不同类型农产品的介电特性是一件非常困难但又非常重要的工作,农产品微波辅助应用中的许多基础性问题仍亟待研究者有针对性地去开展。

1.2.3 农产品微波加工的优势

微波能在农业生产、农产品加工和质量检测等方面都存在巨大的应用价值。农产品的微波热处理应用,具有以下优势^[47]:

(1) 加热均匀快速。由于微波具有穿透性,微波加热可对物体内外同时进行加热,不会出现“外焦里生”的现象,其加热速度是常规加热的几倍到几十倍。

(2) 能最大限度地保持产品的营养成分。由于微波加热的速度快、时间短,对各种维生素及营养物破坏少。

(3) 成品色泽风味好。微波干燥时间短,产品中的许多挥发性物质损失小,天然色素破坏少,所以产品色泽不变,鲜亮,口味好,形态美观。

(4) 安全卫生。微波有杀菌、灭霉、防霉作用,无任何烟尘及有害物质排放,所以产品生产安全、卫生且保质期长。

(5) 可在无损情况下进行农产品特性质量检测,获取物料的内部特性。

然而,农产品的种类繁多,性质各异,尽管微波农产品加工的优点突出、市场需求及开发潜力巨大,但与微波能在工业领域的应用相比,微波农产品加工的市场化、规模化应用还远未形成与需要相适应的规模。

1.3 农产品微波热加工的电磁理论基础

1.3.1 物质的介电特性

介电特性(dielectric properties)是指物料内部的束缚电荷对外加电场的响应特性,主要通过介电常数和介电损耗因子两个参数来进行表征,通常将其表达为

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (1-1)$$

式中, ϵ' 为介电常数,是指物料储藏微波能的能力,是介质“阻止”微波能通过能力的量度; ϵ'' 为介电损耗因子(简称损耗因子),是指物料把吸收的微波能转化为热能的能力; $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。当物料在微波作用下发生极化时,对于电场的变化会产生滞后损耗角 δ (loss angle), $\tan\delta$ 称为损耗角正切($\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$),它影响材料中微波能的衰减。

研究表明,物料的介电特性取决于各化学组分及水分中永久性偶极子动量^[48],它在物料吸收能量和能量转化过程中起决定作用。在微波热加工过程中,受农产品物料种类和加

工方式的影响,介电特性变化是一个非常复杂的过程,介电常数和损耗因子可能增加或者减小^[49],其变化规律随温度、湿度的动态变化呈现出动态变化特征^[50]。

总的来说,物料对微波能的吸收和转化取决于物料的介电特性,而介电特性又受到物料种类、加工条件的影响,介电特性是研究物料微波加工问题不可缺少的特征参数指标^[40]。

1.3.2 微波介电加热的机制

射频和微波加热统称为介电加热,二者的主要区别在于产生高频电场的方式不同;射频发生器主要由高频振荡器、传输线和电容器组成;微波发生器主要由磁控管、波导和谐振腔组成。射频加热在工业应用上早于微波加热,常用频率分别为 13.56、27.12、40.68 MHz,而微波加热一般涉及 500 MHz 以上的频率,工业用微波频率分别为 915 MHz 和 2450 MHz。

微波是交变的电磁场,本身是一种能量形式,而不是热量形式;微波加热过程实际就是电磁波能量转化为热能的过程。当具有较高介损系数的材料受到微波的作用后,材料可以吸收微波并将其转化为内部热能^[51]。以民用微波炉为例,磁控管将电能转变成微波,以 2.45 GHz 的振荡频率穿透材料,当微波被材料吸收时,材料内极性分子(如水、蛋白质等)即被吸引以每秒钟 24.5 亿次的速度快速振荡、深入材料加速分子运转,振荡的宏观表现就是材料被加热。

微波能量转换的机制有多种,如离子传导、偶极子转动、界面极化、磁滞、压电现象、电致伸缩、核磁共振、铁磁共振等,其中离子传导和偶极子转动是介电加热的主要机制^[8]。

(1) 离子传导:带电粒子在外电场作用下被加速,并沿着与它们极性相反的方向运动,即定向迁移,在宏观上表现为传导电流。这些离子在运动过程中将与其周围的其他粒子发生碰撞,同时将动能传给被碰撞的粒子,使其热运动加剧。如果物料处于高频交变电场中,物料中的粒子就会发生反复的变向运动,致使碰撞加剧,产生耗散热(或焦耳热),即发生了能量转化。

(2) 偶极子转动:当电介质置于交变的外电场中,含有非极性分子和有极性分子的电介质都被反复极化,偶极子随电场的变化在不断地发生“取向”(从随机排列趋向电场方向)和“弛豫”(电场强度为零时,偶极子又回复到近乎随机的取向排列)排列。由于分子原有的热运动和相邻分子之间的相互作用,分子随外电场转动的规则运动受到干扰和阻碍,产生“摩擦效应”,使一部分能量转化为分子热运动的动能,即以热的形式表现出来,使物料的温度升高,即电场能被转化为热能。

1.3.3 微波介电加热的特点

与热传导、对流和辐射等传统加热方式相比,微波介电加热有以下特点^[50]:

1. 直接快速加热

传统加热方式是间接加热,先加热盛装物料容器的外壁,再通过传热将热量传递给物料,造成一部分热量损耗在加热容器外壁和发散到周围环境中。而电磁波是以光速的传播速度透入物质,直接与物料作用,能量转变为物质分子热量的时间快于 1×10^{-7} s,微波能几乎全部用来加热物料,提高加热效率。

2. 体相均匀加热

传统加热方式依靠热传导加热物料,会在物料中形成温度梯度,导致加热不均匀。尽管介电加热不能保证加热均匀,但它依靠微波辐射来加热物料,是体相加热。通常情况下,其体积加热效应将导致加热均匀,电磁波辐射到的物料都会吸收微波能而生热,避免了普通加热系统中出现的较大温度梯度,物料表面过热和结壳现象很少发生,比传统加热方式更均匀。

3. 选择性重点加热

电磁波主要与物料中的极性物质相作用,微波介电加热所产生的热量和被加热物的损耗有着密切关系,由于不同物质的损耗有差异,表现出对微波的吸收能力不同。在同一个物质中温度低及含水率较高的位置,具有较高的介电常数和介电损耗,微波会集中在相应位置,致使该位置温升更快。

4. 节能高效无污染

传统方法加热物料是在开放的空间中进行,获得热平衡需要较长时间且会向周围环境散发热量。而在微波介电加热中,微波功率处于金属制成的全封闭腔体内,加热室反射电磁波使之不向外泄漏,加热过程中几乎没有热散失,这就是微波加热的节能原理。另外,在微波加热中,微波能只会被加热物体自身吸收而生热,不会对食品造成污染,加热室壁和加热室内的空气及相应的容器都不会发热,所以热效率较高,生产环境也明显改善。

5. 瞬间加热易控制

传统加热方式将热量由容器壁传递到物料内部需要一段时间,物料的加热和降温都具有一定的滞后性。而微波加热是瞬时的,微波开关打开后,所有被辐射到的物料开始加热,微波开关关闭后,加热结束。此特点可以实现温度升降的快速控制,简化了未知滞后的控制问题。

6. 非热效应

在微波化学反应中有非热效应存在,可以按照需求提高或降低化学物的化学反应速率,提高化学产物的收率。同时,在微波食品加热领域,非热效应对各种细菌具有良好的灭杀作用。

1.4 多模微波加热腔应用研究进展

1.4.1 多模微波加热存在的主要问题

目前,工程领域内常用的微波腔主要为多模腔,多模腔中多个模式的电场相互叠加,可以在腔体内形成相对均匀的电磁能分布,加热的均匀性得到提升^[52]。与单模微波腔和传统加热方式相比,多模微波腔有诸多优点,但在现实工程应用中也有一些问题需要解决。

1. 加热均匀性问题

一方面,由于反应腔壁的反射作用,微波在反应腔壁上经过数次反射叠加而在腔体中形成稳恒场,导致了微波能的非均匀分布,同时,由于非均匀介质分界面对微波存在反射作用,加热物料内通常也会存在微波能的非均匀分布。另一方面,物料中的电磁和热参量与温度或者含水率非线性相关,微波加热过程是一个未知参数即时变化的过程,且物料的形状、位置和微波腔体结构的不同也会导致不同的微波能分布。这些不均匀性致使物料内部不同位置的温度存在差异,从而影响最终加热效果。关于多模微波加热腔均匀性的提升,需要大量的先验知识,对不同物料的微波加热特点进行研究,获取其复介电特性,才能实现满意的实际加热结果。

2. 热点与热失控问题

在微波加热过程中,由于微波功率分布的非均匀性,加热媒质的某些部位一直具有很强的微波功率分布,致使该位置的温度迅速上升,造成局部过热的现象,导致“热点”的产生,以物质分相界面附近为甚。有些媒质的热平衡温度对功率变化很敏感,输入功率的微小变化会引起媒质温度迅速发生剧烈变化,媒质温度上升会引起本身电特性的变化,当其电特性向吸收更多的微波能量进行时,会形成微波和加热媒质之间的正反馈过程,加热媒质温度会急剧上升,从而出现局部过热现象,甚至会引起热失控^[53]。“热点”的产生是微波加热不均匀的最典型表现,轻则会影响加热物料的质量,重则会造成局部温度过高,甚至烧毁被加热物质和微波器件。

3. 温度动态监测困难

微波加热腔体内部存在强电磁场,现有的温度检测传感器在加热媒质温度场检测方面或多或少均存在一定问题。例如,光纤温度计只能测量媒质离散点温度,并且成本较高;热电偶、热电阻等金属材料温度计在电磁场作用下会产生感应电流,引起测温元件和引线自身发热,从而影响测温准确性;红外与热成像仪只能测量物体表面温度,不能完整地描述物体整体温度变化状态。在使用同轴传输线法测量高频段的物料介电特性时,在封闭的同轴腔体内准确地对物料进行加热并测量其温度的变化是一件非常困难的事情。因此,微波加热过程中的温度场的全面、准确测量问题仍有待解决。

4. 微波能量未能被高效利用

一方面,工业物料是典型的复杂时变非均匀媒质,物料对微波的吸收能力随时间和温度会发生变化,此时使用固定功率微波源就不能高效率地利用微波能。另一方面,多相混合物中各组成成分对微波辐射的响应具有差异性,从而会对微波能耗提出较高要求。例如,实验表明许多危害谷物的昆虫可以通过短时间暴露于不损害寄主材料的电磁波中而得到控制^[26],但迄今为止,射频和微波土壤杀虫方法尚未得到实际应用,因为与传统的化学和物理控制方法相比,通过介电加热杀灭害虫的能源和设备费用太高,且微波能量在浅层土壤深度中迅速衰减,使微波能量的潜在利用变得不现实。Nelson指出,任何考虑微波电磁能量对土壤害虫的控制都必须经过仔细和严格的分析^[19]。