

感应电场在食品加工中的应用

张令涛, 金亚美, 吴石林, 徐悦, 徐学明, 杨哪*
(江南大学食品学院 江南大学食品科学与技术国家重点实验室 江苏无锡 214122)

摘要 感应电场(IEF)技术,一种在食品领域的新型电场加工技术。本文以现有的电场加工存在的问题为研究背景,分析发展 IEF 技术的必要性;简要阐述 IEF 技术的基本原理,并推导相关应用公式。同时综述 IEF 技术在微生物灭活及酶钝化、多糖改性、天然产物提取和其它处理方面的应用,在食品领域的最新研究进展以及现阶段存在的问题,展望今后的研究方向,为 IEF 技术更好地应用于食品加工领域提供依据。

关键词 感应电场; 交变磁场; 非热效应; 热效应; 应用

文章编号 1009-7848(2022)03-0353-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.03.038

随着人们对食品风味以及营养物质要求的不断提高,非热加工技术在食品领域得到很好的发展。这是因为非热加工在不破坏功能物质的情况下,保证了产品的安全^[1]。食品热加工的诸多弊端使得各种非热技术得以快速发展,目前部分非热加工能部分替代传统的热加工^[2-4]。物理场的热加工包括微波处理^[5]、射频处理^[6]等,都具有非热效应,而涉及电场的加工主要有欧姆加热 OH (Ohmic heating)^[7]、脉冲电场 PEF(Pulsed electric field)^[8]和中等电场 MEF(Moderate electric field)^[9] 3 种,主要应用它们的非热效应。这 3 种电场技术都是通过通电的电极直接接触食品原料进行处理,以完成加工的目的,因此不可避免地产生电极污染或金属腐蚀,造成产品风味和色泽发生改变。

在食品加工领域,单独将非热技术应用于工业化生产的情况相对较少,常见的是热加工与非热加工的结合。Riener 等^[10]将温度预处理和高压脉冲电场相结合对新鲜苹果汁进行灭活试验,结果表明:50℃预处理和 40 kV/cm 的脉冲电场处理 100 μ s 时,多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)

的酶活性降低最多。Mok 等^[11]将中强度电场和剪切应力(相当于一个产热处理)相结合,研究苹果汁中大肠杆菌的灭活情况,结果表明高剪切和高强度 MEF 处理相结合,在使微生物灭活的同时,可使热处理温度降至最低水平,且复合处理对苹果汁的 pH 值、颜色和自由基清除能力均无显著影响。鉴于此,设计一种热效应与非热效应相结合的 IEF 技术,将对食品加工领域产生深远影响。

近年来,基于变压器原理的 IEF(感应电场, induced electric field)技术正处于萌芽阶段,国内外对其报道较少。本文简述 IEF 的作用原理,IEF 在食品微生物灭活及酶的钝化、多糖改性、天然产物提取等领域的应用,分析 IEF 优缺点及改进方法,指出利用 IEF 技术弥补食品热和非热加工领域的空白,并展望其未来发展趋势。

1 感应电场的工作原理

基于变压器原理的 IEF 技术是依据法拉第电磁感应定律建立的,通过交变磁场感应出的交变感应电场用于食品的加工^[12]。传统的变压器结构主要由初级线圈、磁芯及次级线圈组成(图 1a),初次级线圈均为金属线圈。IEF 系统的次级线圈是绝缘材料包裹的连续流样品缠绕而成(图 1b),绝缘材料包括聚四氟乙烯管或玻璃管,避免通电电极与食品的直接接触以及接触食品时产生的金属离子腐蚀。

基本原理是:给初级线圈施加频率为 f 的激励电压(U_p),则初级线圈中产生瞬时的感应电压

收稿日期:2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(32172353);第 69 批博士后面资助(金亚美)(2021M691362);江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20211582);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题(FMZ202004)

作者简介:张令涛(1996—),男,硕士生

通信作者:杨哪 E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn

(e_p), 这时就会在磁芯中产生交变磁场(磁通为 Φ_m), 基于法拉第电磁感应定律原理, 磁芯中的交变磁场在电导性的样品线圈中产生交变的瞬时感应电动势(e_s)。

假设整个过程中没有漏磁损耗, 则初级线圈的瞬时感应电压值 e_p 如公式1所示:

$$e_p = N_p \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

式中, N_p ——初级线圈的匝数。

由于初级线圈所施加的激励电压(U_p)呈正弦变化, 因此产生的磁通 Φ_m 也呈正弦变化, Φ_m 计算公式:

$$\Phi_m = \Phi_{mp} \sin \omega t \quad (2)$$

式中, Φ_{mp} ——互感磁通的峰值; ω ——角速度(rad/s), 且 $\omega = 2\pi f$; f ——频率(Hz)。

对于一个正弦信号, 峰值为有效值的 $\sqrt{2}$ 倍, 初级线圈产生的感应电压有效值 E_p 如公式3所示:

$$E_p = \frac{e_p}{\sqrt{2}} = 4.44 \Phi_{mp} f N_p \quad (3)$$

同理, 在相同交变磁场下, 次级线圈产生的瞬时感应电压值为 e_s 如公式4所示:

$$e_s = N_s \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (4)$$

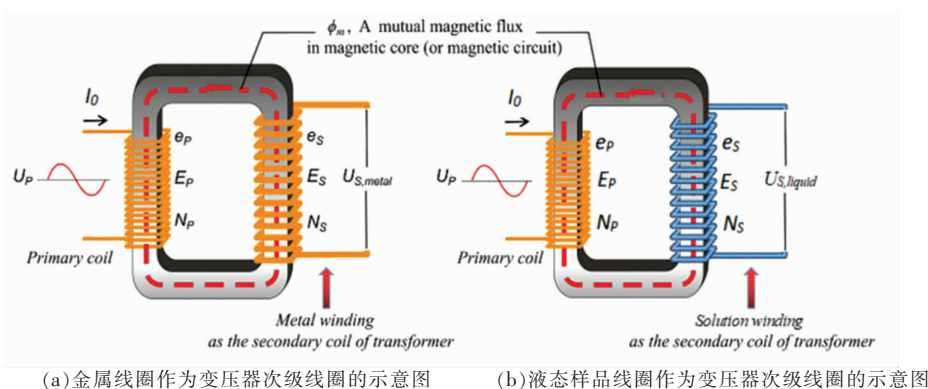
式中, N_s ——次级线圈的匝数。

同理, 次级线圈产生的感应电压有效值 E_s 如公式5所示:

$$E_s = \frac{e_s}{\sqrt{2}} = 4.44 \Phi_{mp} f N_s \quad (5)$$

当样品线圈为开路状态, 测得次级线圈两端的终端电压或输出电压(U_s), U_s 与样品线圈中溶解的离子或携带电荷的分子浓度相关。

当样品线圈为闭路状态时, 可测得闭路状态下的负载电压(U_L)。事实上, 这时的样品线圈相当于一个具有电动势和内阻的二次电源, 而且可对负载进行电场处理, 即利用感应电场的热效应和非热效应。 U_L 主要与样品线圈的阻抗和负载的阻抗相关, 可根据 U_L 计算IEF强度、感应电流强度和感应电流密度等参数, 这些参数对IEF的理论计算与实际加工分析具有重要的参考意义。



(a)金属线圈作为变压器次级线圈的示意图

(b)液态样品线圈作为变压器次级线圈的示意图

图1 变压器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a transformer

其中 U_p 为施加的交变励磁电压; e_p 和 e_s 分别为初级线圈和次级线圈的瞬时感应电动势。 E_p 和 E_s 分别为初级线圈和次级线圈的感应电动势有效值; N_p 和 N_s 分别为初级线圈和次级线圈的匝数(摘自Jin等^[13]和Wu等^[14]的相关报道)。

2 感应电场的应用

2.1 微生物杀灭及酶钝化

微生物的杀灭和酶钝化是食品生产环节中最

重要的一环, 直接关系到食品安全和货架期。传统的微生物杀灭和酶的钝化主要通过热处理来实现, 即高温使微生物死亡和酶失活, 然而热处理往往造成对食品中热敏性成分的破坏, 导致食品色泽和风味发生改变, 影响产品质量。超高静压、等离子体和高压脉冲电场以及其它电场技术开始应用于食品的低温杀菌, 然而单纯的非热效应不能完全达到所需的杀菌效果。利用感应电场产生的热效应与非热效应, 为杀菌和灭菌提供了新的技术

手段。

Wu 等^[14]选择典型的液态食品,即生鲜牛奶和葡萄柚汁作为 IEF 处理的研究对象,研究发现 IEF 的热效应和非热效应降低了生鲜牛奶和葡萄柚汁中的细菌总数,此外,还评价了 IEF 技术在连续流巴氏杀菌中的应用。该研究中,虽然 IEF 技术的应用效果得到证实,但是系统的运行效率较低,主要归因于样品线圈的高阻抗,以至感应电流较小所致。Wu 等^[15]设计出 IEF 杀菌系统对苹果汁中的酿酒酵母进行杀菌并对其品质进行分析,结果表明:IEF 处理组苹果汁的酿酒酵母数量明显降低,而且样品的电导率提高,酸碱度呈降低趋势,这意味着 IEF 可能破坏了细胞结构,导致内容物溶出。单纯的非热效应不足以破坏细胞膜,而 IEF 引起的温度上升即热效应会加大杀菌效应。由于连续流处理对于实现液态食品杀菌的工业化应用尤其重要,该研究中设计的多次级线圈和并联结构能够实现 IEF 的液态样品的连续处理,对液态饮料的工业化灭菌提供了技术指引。Zhang 等^[16]建立了一次性的连续流液态样品感应电场处理系统,结果显示:高励磁电压导致苹果汁中的多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)残余活性显著降低,在流速为 17.5 mL/min 条件下处理 7.6 min,多酚氧化酶失活,而 IEF 处理对苹果汁颜色和挥发性成分没有不利影响。感应电场避免了潜在的电极腐蚀和金属离子泄露污染,有利于维持贮藏过程中苹果汁的品质^[17]。

虽然近几年,IEF 技术及早期装置实现了对微生物的灭活和酶的钝化处理,但是该技术装备存在一些缺陷,比如加工能效低,电能利用效率低,加工量较小等。后续研究可以通过理论计算和低损耗磁芯材料的选取来改善上述问题,要搭建大流量的连续流处理系统来实现工业化生产。

2.2 多糖的改性

多糖的改性在食品副产物的资源综合利用领域扮演着重要角色,部分天然高分子多糖因具有复杂的结构和极低的溶解性,而限制了其在食品中的应用。多糖的改性方法包括物理改性、化学改性、酶法改性及复合改性,IEF 产生的热效应与非热效应相结合促进多糖的酸解改性,其中热效应占主导地位,而利用非热效应与多糖的电学性质

有关^[18]。传统的高压脉冲电场是利用的非热效应或无化学修饰的电处理方法来改善生物大分子,高压脉冲电场是当前一种改变生物大分子三级结构的有效技术^[19]。IEF 应用于多糖的改性属于复合改性法,现有的研究多与酸解反应相结合,在多糖改性领域具有很好的发展和应用潜力。

Li 等^[20]以瓜尔多胶、壳聚糖和果胶为模型多糖,研究 IEF 辅助酸解的机理,发现 IEF 通过热效应和非热效应影响多糖的水解效率,IEF 破坏了多糖的结构致密性,显著降低了多糖溶液的黏度。这是因为随着励磁电压的增加,热效应增加并有助于多糖水解;次级线圈中带电物质的快速定向迁移引起的非热效应随多糖种类的不同而发生变化,这取决于多糖的电学性质。该研究阐明了 IEF 辅助酸解多糖的机理,为 IEF 在多糖化学改性方面提供了理论指导。Li 等^[21]研究再乙酰化对 IEF 辅助水解壳聚糖的影响,结果发现水解率受脱乙酰化程度的影响,再乙酰化对壳聚糖分子质量、黏度没有显著影响,然而破坏了其颗粒和晶体结构,使壳聚糖更易受酸的影响,从而有利于水解。壳聚糖的 IEF 辅助水解表明其结构致密性比电荷含量对水解的影响大,这为 IEF 在带电多糖改性中的应用奠定了基础。Li 等^[22]还考察了 IEF 条件下马铃薯淀粉的酸解特性,与传统热处理相比,IEF 处理可以显著提高马铃薯淀粉的水解率。通过分析淀粉颗粒在 IEF-盐酸水解过程中的颗粒度、晶体和分子结构的变化,得出 IEF-盐酸水解的催化过程分 3 个步骤,首先破坏马铃薯淀粉外部结晶;第二,内部无定形和结晶区域同时水解,表现出结晶度增加和分子质量降低;最后,密集堆积的结晶部分进一步水解,淀粉颗粒尺寸和分子质量略有降低。周宇益等^[23]研究感应电场加速玉米淀粉酸解也得出相同的结论,交变的感应电场加速自由离子与淀粉分子之间的碰撞,破坏了淀粉的非结晶区域,从而加速了淀粉的水解程度。Li 等^[24]还研究了 IEF 对马铃薯淀粉晶体结构和理化性质的影响,提出 IEF 的非热效应和热效应对天然聚合物进行有效改性的方法,表明与单独的 IEF 处理相比,50 ℃的热处理与 IEF 相结合,对淀粉的糊化和糊化特性有显著影响,这包括样品具有更好的组织结构,更强的热稳定性以及更高的剪切稳定性。

此外,IEF降低了马铃薯淀粉的峰值、分解和回生黏度,以及IEF作为淀粉改性的潜力。Li等^[25]通过控制电导率来改善IEF辅助多糖的水解,随着电导率的增加,阻抗降低,反应介质输出电压和温度升高,IEF能效提高,瓜尔多胶水解加速。虽然IEF在很大程度上破坏了瓜尔多胶的形态结构,但是对化学结构没有影响。与天然瓜尔多胶相比,水解的瓜尔多胶的剪切黏度急剧下降,而热稳定性略有下降。该研究补充了电导率对IEF辅助水解瓜尔多胶的影响,有助于更好地利用IEF对多糖进行改性。Li等^[26]设计出连续流动的IEF处理系统并用于酸解马铃薯淀粉,研究不同参数对水解速率的影响,包括反应器的数量、盐种类、盐浓度、温度及水解时间,结果显示IEF可在温和条件下常规水解,不需要直接的电极接触。Yang等^[27]也创建了IEF的流体系统,用于水解木质纤维素,结果表明:利用IEF辅助水解有利于还原糖产出,且励磁电压对总糖产率具有积极影响,而频率和样品阻抗对其水解有负面影响。与温和条件下的连续流水解相比,IEF辅助水解提高了多糖产率。IEF作为一种新型的电场处理方法,辅助多糖水解的机制尚未明晰,IEF的热效应和非热效应使得该技术在多糖改性领域具有潜在应用价值。未来,IEF在蛋白质等高分子改性方面的应用也值得研究。

2.3 天然产物提取

食品副产物的资源丰富,比如果蔬加工中产生的果皮、果壳,畜产品加工中产生的动物骨架,谷物加工中产生的谷糠等。这些副产品中包含丰富的天然功能性产物,若把这些天然产物以高性价比的方式进行提取,不仅可以增加企业效益,而且可以减少资源的浪费。IEF技术因涉及热效应与非热效应,故在天然产物提取中也发挥着重要作用。

Jin等^[28]利用阵列感应电压来提高葡萄柚皮中果胶的提取率,结果证实阵列感应电压技术对从葡萄柚皮中提取果胶具有积极作用,当电压的相位固定时,果胶产量随感应电压的增加而呈对数增加;阵列感应电压处理导致提取果胶中的中性糖含量、重均分子量、半乳糖醛酸、酯化度和黏度下降。Wu等^[29]设计了IEF多级串联系统,并将其应用于柑橘皮的预处理,以提高精油的提取率,

研究表明:励磁电压和反应级数对产率有积极影响,而频率的提高会降低产率。IEF预处理是一项绿色技术,无需金属电极即可强化精油的提取。Yang等^[30]搭建了基于O型磁芯变压器结构的大蒜多糖提取试验装置,利用交变磁场产生的IEF来提取大蒜样品,结果发现励磁电压、频率、酸碱度和温度对多糖得率有显著影响,与常规热处理相比,当施加在初级线圈上的激励电压增加时,多糖产量提高;产量随频率的增加而降低,低酸碱度有利于提高多糖的产量,这主要是因为IEF增强了离子传导。用IEF法提取的大蒜多糖具有清除DPPH自由基和还原铁的能力。基于该结构的试验系统,Yang等^[31]辅助提取橘子皮中的果胶,结果表明:励磁电压增加导致果胶产量增加,频率增加对其产量有负面影响,部分原因是初级线圈阻抗增加,而料液较低的阻抗有利于果胶的提取。这说明IEF技术在农业副产品处理中具有一定潜力。Yang等^[32]建立多级串联流体系统,用于IEF辅助提取桑叶多糖,结果发现该方法有利于多糖的释放,不会显著影响产物的质量,如碳水化合物、蛋白质、糖醛酸、总酚含量以及平均分子量;同时显示随励磁电压的增加,桑叶多糖得率提高,而频率对多糖有负面影响,相对较低的酸碱环境有利于电场下的辅助提取。Yang等^[33]基于IEF技术开发了一种串、并联组合的反应系统,用于温和条件下从黄角中快速提取果油,该方法不影响果油品质,利于油脂类物质的释放;影响出油率的积极因素包括串、并联反应级数以及励磁电压,增加励磁电压也可提高提取率。杨哪等^[34]利用IEF对青鱼鱼骨钙进行辅助提取,以实现鱼骨可溶性钙的高效提取,结果显示:低pH值有利于鱼骨中钙的溶出,励磁电压升高有利于钙的溶出,频率增加而钙的提取率减少;最后确定IEF技术的最优工艺参数,为农副高附加值产物的提取研究提供参考。

IEF技术为天然产物的提取研究提供了新的思路,即利用其热效应与非热效应作用来处理副产物,直接避免了金属电极的使用。未来,可以构建更多的反应器和串、并联系统来实现提取技术的工业化应用。

2.4 其它应用

Yang等^[35]建立了基于感应方法的果蔬浸渍试

验系统,在交变磁场作用下,钙溶液作为次级线圈,研究 IEF 对浸渍液中鲜切苹果钙含量的影响。鲜切苹果中钙含量随励磁电压的增加而增加,浸泡在氯化钙溶液中的鲜切苹果比乳酸钙溶液浸渍的苹果具有更高的钙含量,这是因为氯化钙溶液具有更低的阻抗,得到浸渍液中的离子电流更高;频率对鲜切苹果钙含量有负相关性。Jin 等^[36]建立了基于变压器原理的液态全蛋制品固形物和脂肪含量测定方法,以不同蛋黄和蛋清比例的全蛋液为次级线圈,在交变磁场作用下研究样品二次回路的电学参数。当感应电压固定时,测量的终端电压与总固形物和脂肪含量呈负相关。该方法有潜力在一定频率和温度范围评价液态食品的理化指标。Yang 等^[37]利用相同测量系统对鸡蛋蛋白和蛋黄贮藏过程中的水分含量和电导率进行分析,结果表明:50 Hz 时,蛋黄水分含量与终端电压的线性决定系数最高,电导率与终端电压呈指数关系。该研究对 IEF 技术在液态食品质量指标快速评估中的应用具有指导意义。金亚美等^[38]采用 IEF 处理连续流的蓝莓泥,研究不同励磁电压、温度及处理时间的样品阻抗和多酚氧化酶(PPO)活性的变化,同时将新鲜蓝莓泥、传统加热处理的蓝莓泥以及 IEF 处理的蓝莓泥颜色、粒径分布、流变性、风味和挥发性成分进行分析比较,结果表明:随着处理时间和温度的增加,蓝莓泥的阻抗逐渐降低,适当温度和励磁电压下的 IEF 处理,可使多酚氧化酶完全失活。弱电场利于稳定蓝莓泥中的色泽和风味成分,有利于延缓热处理引起的色泽和风味变化。另一项研究中,金亚美等^[39]利用此方法研究了励磁电压、温度和处理时间对多酚氧化酶、过氧化物酶和总花青素含量的影响,研究表明:100 V 的励磁电压下 IEF 可以维持多酚氧化酶和过氧化物酶的活性,而在 150 V 和 250 V 的励磁电压下 IEF 和传统热处理对两种酶的失活表现出协同效应;IEF 处理还可提高花青素分子的热稳定性。这两项研究为利用 IEF 对果泥的高品质加工提供参考。

3 结语

IEF 技术是基于变压器原理发展起来的新型电场加工技术。通过调节励磁电压、频率、样品线

圈数、磁芯材料等可以提高 IEF 的能量转化效率,通过搭建不同的反应系统以及设计串、并联的加工模式可以实现样品的连续化处理。IEF 技术利用其产生的热效应与非热效应的共同作用来实现的食品加工和处理。与其它电场技术相比,IEF 技术最大优点就是避免了电极与食品原料的直接接触,是一种无接触式的绿色电场加工技术,同时也是欧姆加热和高压脉冲电场的姐妹技术。

然而,目前 IEF 技术的实际应用还有一定的局限性,比如能效低,样品阻抗较大造成的感应电流小,磁芯损耗高,处理量过小等,都不利于实现工业化生产。未来,关于感应电场的研究方向可从以下几个方面出发:一是通过与工程研究人员合作,开发和应用高磁导率和低损耗的高频磁芯;二是减小样品线圈数,降低二次回路的阻抗;三是扩大模块化的处理器规模,增加管道内径,以实现 IEF 的工业化应用。

参 考 文 献

- [1] MA T J, LAN W S. Effects of non-thermal plasma sterilization on volatile components of tomato juice[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(12): 3767-3772.
- [2] 谢秀玲,李欣,高金燕,等.非热加工对食物过敏原影响的研究进展[J].*食品科学*, 2013, 34(17): 344-349.
XIE X L, LI X, GAO J Y, et al. A review of studies on the effect of non-thermal processing on food allergens[J]. *Food Science*, 2013, 34(17): 344-349.
- [3] 王允圃,刘玉环,阮榕生,等.食品热加工与非热加工技术对食品安全性的影响[J].*食品工业科技*, 2011, 32(7): 463-467.
WANG Y P, LIU Y H, RUAN R S, et al. Effect of food thermal processing and non-thermal processing on the safety of foods[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(7): 463-467.
- [4] 赵彩萍,许秀举.非热加工食品的安全性进展[J].*包头医学院学报*, 2011, 27(3): 118-119.
ZHAO C P, XU X J. Advances in safety of non-thermally processed foods[J]. *Journal of Baotou Medical College*, 2011, 27(3): 118-119.

- [5] 刘盼盼, 任广跃, 段续, 等. 微波处理技术在食品干燥领域的应用[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 194-202.
LIU P P, REN G Y, DUAN X, et al. Application of microwave treatment technology in the field of food drying[J]. Food and Machinery, 2020, 36(12): 194-202.
- [6] 于殿宇, 郝凯越, 程杰, 等. 射频处理提高米糠稳定性及其对品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 20-26.
YU D Y, HAO K Y, CHENG J, et al. Radio frequency improves the stability and quality of rice bran[J]. Food Science, 2020, 41(20): 20-26.
- [7] CAPPATO L P, FERREIRA M V S, MORAES J, et al. Whey acerola-flavoured drink submitted Ohmic Heating: Bioactive compounds, antioxidant capacity, thermal behavior, water mobility, fatty acid profile and volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2018, 263: 81-88.
- [8] LIU T, BURRITT D J, EYRES G T, et al. Pulsed electric field processing reduces the oxalate content of oca (*Oxalis tuberosa*) tubers while retaining starch grains and the general structural integrity of tubers[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 890-898.
- [9] GAVAHIAN M, TIWARI B K. Moderate electric fields and ohmic heating as promising fermentation tools[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 64: 102422.
- [10] RIENER J, NOCI F, CRONIN D A, et al. Combined effect of temperature and pulsed electric fields on apple juice peroxidase and polyphenoloxidase inactivation[J]. Food Chemistry, 2008, 109(2): 402-407.
- [11] MOK J H, PYATKOVSKYY T, YOUSEF A, et al. Combined effect of shear stress and moderate electric field on the inactivation of *Escherichia coli* K12 in apple juice[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 262: 121-130.
- [12] 杨哪. 电磁耦合交变感应电场对食品体系作用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
YANG N. Application of alternating induced electric field in food processing via magnetoelectric coupling [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [13] JIN Y, YANG N, XU X. Innovative induction heating technology based on transformer theory: Inner heating of electrolyte solution via alternating magnetic field[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115732.
- [14] WU S, YANG N, JIN Y, et al. Development of an innovative induction heating technique for the treatment of liquid food: Principle, experimental validation and application[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 271: 109780.
- [15] WU S, YANG N, JIN Y, et al. Effects of induced electric field (IEF) on the reduction of *Saccharomyces cerevisiae* and quality of fresh apple juice[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126943.
- [16] ZHANG M, YANG N, GUO L, et al. Physicochemical properties of apple juice influenced by induced potential difference (induced electric field) during disposable continuous-flow treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 234: 108-116.
- [17] 张梦月. 苹果汁在感应电场处理下的理化品质变化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
ZHANG M Y. Study on the change of physicochemical properties of apple juice treated by induced electric field[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [18] 李丹丹. 感应电场辅助多糖酸解及其作用机制探究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
LI D D. Acid hydrolysis of polysaccharides under induced electric field: Effects and mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [19] GITERU S G, OEY I, ALI M A. Feasibility of using pulsed electric fields to modify biomacromolecules: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72: 91-113.
- [20] LI D, YANG N, TAO Y, et al. Induced electric field intensification of acid hydrolysis of polysaccharides: Roles of thermal and non-thermal effects[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105484.
- [21] LI D, TAO Y, SHI Y, et al. Effect of re-acetylation on the acid hydrolysis of chitosan under an induced electric field[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125767.
- [22] LI D, YANG N, ZHOU X, et al. Characterization of acid hydrolysis of granular potato starch under induced electric field[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71: 198-206.
- [23] 周宇益, 杨哪, 金亚美, 等. 感应电场加速玉米淀粉酸解及理化特性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(5): 140-146.
ZHOU Y Y, YANG N, JIN Y M, et al. Study on

- inducted electric field enhancing acid hydrolysis of corn starch and its physicochemical properties [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(5): 140–146.
- [24] LI D, YANG N, JIN Y, et al. Changes in crystal structure and physicochemical properties of potato starch treated by induced electric field[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 153: 535–541.
- [25] LI D, ZHANG Y, YANG N, et al. Impact of electrical conductivity on acid hydrolysis of guar gum under induced electric field [J]. *Food Chemistry*, 2018, 259: 157–165.
- [26] LI D, YANG N, JIN Y, et al. Continuous-flow electro-assisted acid hydrolysis of granular potato starch via inductive methodology[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229: 57–65.
- [27] YANG N, JIN Y, LI D, et al. A reconfigurable fluidic reactor for intensification of hydrolysis at mild conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 599–609.
- [28] JIN Y, YANG N. Array-induced voltages assisted extraction of pectin from grapefruit (*Citrus paradisi* Macf.) peel and its characterization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 152: 1205–1212.
- [29] WU F, JIN Y, XU X, et al. Electrofluidic pretreatment for enhancing essential oil extraction from citrus fruit peel waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159: 85–94.
- [30] YANG N, JIN Y, JIN Z, et al. Electric-field-assisted extraction of garlic polysaccharides via experimental transformer device [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(9): 1612–1622.
- [31] YANG N, JIN Y, TIAN Y, et al. An experimental system for extraction of pectin from orange peel waste based on the o-core transformer structure[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 148: 48–54.
- [32] YANG N, ZHANG N, JIN Y, et al. Development of a fluidic system for efficient extraction of mulberry leaves polysaccharide using induced electric fields [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 172: 318–325.
- [33] YANG N, JIN Y, LI D, et al. Development of a series-parallel reaction system for rapid aqueous extraction of seed oil from yellow horn at mild condition[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2017, 102: 144–152.
- [34] 杨哪, 金亚美, 吴凤凤, 等. 感应电场辅助提取鱼骨钙工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 258–262.
- YANG N, JIN Y M, WU F F, et al. Process optimization for efficient extraction of soluble calcium from fishbone assisted by induced electric field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(7): 258–262.
- [35] YANG N, ZHU L, JIN Y, et al. Effect of electric field on calcium content of fresh-cut apples by inductive methodology[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 182: 81–86.
- [36] JIN Y, YANG N, DUAN X, et al. Determining total solids and fat content of liquid whole egg products via measurement of electrical parameters based on the transformer properties [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 70–77.
- [37] YANG N, JIN Y, WANG H, et al. Evaluation of conductivity and moisture content of eggs during storage by using transformer method[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 155: 45–52.
- [38] 金亚美, 言东哲, 徐丹, 等. 感应电场对连续流动蓝莓果泥理化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 46–52, 58.
- JIN Y M, YAN D Z, XU D, et al. Effect of induced electric field on physical and chemical characteristics of continuous-flow blueberry puree[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 46–52, 58.
- [39] 金亚美, 黄煦, 徐悦, 等. 感应电场处理后蓝莓泥酶活性及总花青素含量变化[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(5): 108–114.
- JIN Y M, HAUNG X, XU Y, et al. Changes of enzyme activity and total anthocyanin content in blueberry puree after induction electric field treatment[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(5): 108–114.

Application of the Induced Electric Field in Food Processing

Zhang Lingtao, Jin Yamei, Wu Shilin, Xu Yue, Xu Xueming, Yang Na*

(School of Food Science and Technology, State Key Lab of Food Science and Technology,
Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu)

Abstract Inductive electric field (IEF) technology, as a new electric field processing technology in the food field, has potential advantages in its processing. Based on the existing problems of electric field processing as the research background, this paper analyzes the necessity of developing IEF technology, briefly explains the basic principles of IEF technology, and derives related application formulas. At the same time, the application of IEF technology in microbial inactivation and enzyme inactivation, polysaccharide modification, natural product extraction and other treatments is reviewed. The latest progress of IEF in the food field and the current problems of IEF are introduced, and the future research direction is prospected, which provides a basis for the better application of IEF technology in the food processing field.

Keywords Induced electric field; alternating magnetic field; non-thermal effect; thermal effect; application