

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.016

王乔, 沈灿铎, 刘永新, 等. 电磁烹饪设备发展现状分析[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 112-119.

WANG Q, SHEN C D, LIU Y X, et al. Analysis of the current development of electromagnetic cooking equipment[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 112-119.

电磁烹饪设备发展现状分析

王 乔, 沈灿铎✉, 刘永新, 绳以健, 刘 毅, 孟令卿

(军事科学院系统工程研究院, 北京 100141)

摘 要: 采取文献资料汇总、问卷调查分析等手段, 多角度探析了电磁加热食品技术及电磁烹饪技术的总体发展概况。围绕电磁加热食品设备的主要构成与功能、技术要素、核心技术指标以及研究热点, 梳理了当前电磁烹饪食品技术的总体研究概况。聚焦商用电磁灶产品, 基于问卷调查法, 分析了电磁灶的市场应用概况以及主要使用问题。针对当前电磁烹饪产品日益凸显的问题现状, 提出了规范市场秩序、提升技术前瞻性的未来发展建议。

关键词: 电磁加热; 研究热点; 发展概况; 存在问题

中图分类号: TM925.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)03-0112-08

Analysis of the Current Development of Electromagnetic Cooking Equipment

WANG Qiao, SHEN Chan-duo✉, LIU Yong-xin, SHEN Yi-jian, LIU Yi, MENG Ling-qing

(System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100141, China)

Abstract: In this paper, the overall development of electromagnetic heating food technology and even electromagnetic cooking technology was analyzed from multiple perspectives by means of literature data summary, and questionnaire survey analysis. This paper focused on the main components and functions, technical elements, core technical indicators and research hotspots of electromagnetic heating food equipment, and the current overall research situation of electromagnetic cooking food technology was also summarized and analyzed. For the commercial electromagnetic cooker products, this paper summarized and analyzed the market application situation and main use problems of electromagnetic cooker based on the questionnaire survey analysis method. Finally, based on the current situation of increasingly prominent problems of electromagnetic cooking products, the future development suggestion of standardizing market order and improving technology foresight was pointed out.

Key words: electromagnetic heating food technology; research hotspots; development overview; existing problems

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 军队后勤科研项目

Supported by: Military Logistics Research Project

作者简介: 王乔, 女, 1986年出生, 博士, 工程师, 研究方向为给养保障。E-mail: tanlan1222@126.com.

通讯作者: 沈灿铎, 男, 1982年出生, 博士, 高级工程师, 研究方向为给养保障。E-mail: shencanduo@163.com.

传统食品加热多采用接触式、间接式加热方法,即基于传热表面的热传递实现食品由外至内的热传导式加热,如燃烧式明火传导加热和电阻式加热,存在食品受热不均匀、被加热食品品质显著降低、热能利用率低、安全性不高、电热元件损耗大以及易造成环境污染等问题。电磁加热食品技术利用交变磁场作用下导磁性物质内部原子的高速无规则运动产生的碰撞、摩擦热能来实现食品加热,具备非接触、无明火、高效节能、清洁环保等新型电加热技术的诸多优势。本文聚焦电磁加热食品技术,综合利用文献汇总和问卷分析等方法,多角度探析电磁烹饪技术的总体发展概况,可为紧贴实际应用需求快速聚焦技术难点、及时形成技术能力、高效完成技术转化提供信息数据支撑。

1 电磁烹饪设备研究概况

目前电磁加热技术在国内外食品加工领域已获得广泛应用,总体可划分为家用、商用和工业用 3 大类。工业领域现已广泛应用于食品加热、食品杀菌、食品干燥和食品保鲜等诸多方面。家用和商用场合下,电磁加热食品技术目前主要用于实现炒菜、炖汤、蒸煮、火锅、烧烤、煎扒等烹饪需求,其产品形式通常以电磁炉/灶、电磁型电饭锅、电磁型蒸饭柜、电磁型油炸机等电磁烹饪设备为主,其中家用电磁炉/电磁灶的应用尤为广泛。

电磁烹饪设备通常主要由加热线圈盘、负载锅具、电路主板(机芯和控制板等)、散热器、显示板以及底座支撑架等组成。其中关键部件的材料、尺寸、结构等技术要素直接影响设备相关部件乃至整机的性能,截止目前,已有大量学者充分聚焦各类技术要素,针对电磁烹饪设备的加热均匀性、加热稳定性、加热可靠性、加热品质、加热安全性、加热能效、电磁兼容性、电磁噪声、散热性能、使用寿命等关键技术指标,开展了大量的优化改进研究。针对电磁烹饪设备总体研究概况,本文聚焦各关键部件的主要构成及功能、技术要素、技术指标以及当前研究热点进行了分类汇总,汇总概况如表 1 所示。

目前,精准感温、广域控温、恒匀火加热、变频节能加热、锅具适配兼容、智能互联/物联、故障自诊断及全方位安全防护等代表当前电磁烹饪设备技术发展前沿。

2 电磁灶应用概况调研及结果分析

2.1 问卷调研基本概况

针对目前广泛使用的电磁灶设备,聚焦其使用过程中所存在的问题,开展了线上问卷调研,共计收集到 960 份答卷,剔除无效答卷 392 份(通过设置陷阱题、定位 IP 地址、统计作答时间、判断是否完整作答和是否了解相关信息等确定答卷有效性),保留答卷共计 568 份,答卷人员基本概况如表 1 所示。其中,男女比例相对平衡,女性略偏多;21~40 岁占比 85.89%,分布在全国各省市,北京 13.38%、广东 13.02%、上海 8.62%、江苏/河南 6.16%、河北 5.45%等地占比较高;答卷人员中 84.3% 所从事工作有更多机会接触本问卷调查对象,其中,共计 73.72% 使用过电磁灶,如表 2。

2.2 电磁灶市场概况调研结果

电磁灶市场概况调研结果如表 3 所示。针对电磁灶品牌了解度,结合电磁灶品牌盖得排行榜、品牌网排行榜、123 网排行榜、大型网购平台排行榜(如京东、苏宁易购、淘宝、阿里巴巴、爱采网等),甄选排名靠前的 36 家电磁灶品牌展开调研,家用型电磁灶产品中美的、樱花、华磁、伊利浦、红日等品牌的知名度较高,美的品牌电磁灶在本次问卷调研中知名度尤为突出,而商用型电磁灶产品中德玛仕、名厨、厨中厨、环球炉业等品牌的知名度较高,但其总体知名度低于家用型。不同类型的商用电磁灶中,触控模式、带水龙头的型号使用更广泛、更为大众熟知。而其烹饪功能中,炒菜功能应用最广泛,其次是蒸煮、烧水和炖汤,烧烤和煎扒的使用率相对较低,市面上相应的产品也较少。此外,根据调研结果可知,在购买电磁灶产品时,产品功能、安全性、加热效率等指标最受关注,且有 30% 以上人群对产品能效、加热均匀性、火候掌控、噪声、辐射等方面也颇为关注,总体来说,对设备技术的全面提升有更深层次的期待。

表 1 电磁烹饪设备研究概况

Table 1 Research overview of electromagnetic cooking equipment

关键部件	主要构成及功能	技术要素	核心技术指标及研究热点
线圈盘	<p>主要构成: 加热线圈、磁芯和支架等。</p> <p>主要功能: 加热线圈为 LC 振荡电路的关键组构件, 产生高频磁场, 使锅底形成涡流, 实现电能向磁场能以及锅具热能转化。磁芯引导磁力线方向, 改变磁路, 减少漏磁。</p>	<p>① 热线圈材质、尺寸、数量 (如匝数、股数)、布线结构 (即其绕线方式, 如单线圈布线^[1]、多线圈分区布线^[2-3]、多线圈分股布线^[4]、平面环绕式布线^[1,4]、立体式螺旋布线^[3], 以及绕线的疏密度和均匀性^[5]) 和供电模式 (如单线圈单电源供电、多线圈单电源磁耦合供电^[1]、多电源独立供电^[6]) 等。</p> <p>② 磁芯材料^[7]、尺寸、数量、结构 (如条形、L 型和 U 型等)、布局及其安装固定方式^[8]等。</p> <p>③ 电磁屏蔽材料及其结构设计等^[9]。</p>	<p>① 加热均匀性: 多段立体环绕分时分区加热技术^[2-3] (如电饭煲底部、侧面、顶部多方位布设加热线圈) 研究、线圈盘磁场分布解析与整体结构优化设计^[4]、加热均匀性测试方法解析^[25]等。</p> <p>② 加热品质: 锅具材质对加热品质 (如风味) 影响研究^[26]、电磁加热模式 (如功率、压力、时间及其分段烹制时的参数动态配置) 对营养品质影响及其优化研究^[27-28]、不同烹饪方式 (如电磁、微波等不同烹饪工具, 炒、蒸、烤等不同烹饪工艺) 烹饪品质对比研究^[29-30]等。</p> <p>③ 电磁兼容性: 电磁辐射限值标准及测试实验研究^[31-32]、电磁兼容限值标准及测试分析研究^[33]、电磁辐射屏蔽结构/组件设计^[34]等。</p>
负载锅具	<p>主要构成: 锅体、涂层/表面处理, 或复合锅体 (如由导磁层、导热层、不粘层、防腐耐磨层、抗氧化层、聚能蓄热层等多层复合而成)</p> <p>主要功能: 交变磁场的磁力线通过导磁性锅具, 在锅底形成感应涡流, 产生烹饪所需热能。</p>	<p>④ 锅具材料导磁性、电导率、导热性、厚度、结构/复合结构及加工工艺等^[10]。</p> <p>⑤ 表面处理法, 涂层材料导磁性、耐温性、厚度、附着力及其制备工艺等^[11-12]。</p> <p>③ 负载锅具与加热线圈、磁芯间的耦合关系等, 影响磁路、加热能效和加热均匀性等^[13]。</p>	<p>④ 电磁噪声: 电磁感应加热噪声来源分析 (如锅具材料、机械振动、谐振异常、PCB 走线和布局、线圈盘和散热系统等产生噪音) 与改善研究 (从材料、结构、工艺、电路、软件等方面开展优化研究) ^[35]等。</p> <p>⑤ 加热能效: 电磁灶能效标准及其测试方法对比分析^[36]、电磁灶能量损耗关键影响因素 (如线圈盘磁损耗、电器件发热损耗、锅具散热损耗等) 分析及其改善方法 (如优化风道、散热器、线圈盘、磁芯、电路关键器件的结构参数) 研究^[37-38] 电磁加热能效自动检测系统研发^[39]、电磁低功率加热、无级调功加热、自动控温系统的设计^[40]、加热载体精准测/控温技术研究等。</p>
电路主板	<p>主要构成: 电源输入电路、功率输出电路、控制电路、保护电路 (如 EMC 防护、过压保护、过热保护等)、操作显示电路等。</p> <p>主要功能: 实现加热控制、功率/温度调节、定时、监测和保护等功能。</p>	<p>① IGBT 性能、驱动电路、保护电路 (浪涌保护、过压过流保护) 等^[14-15]。</p> <p>② 测温控温^[16-17]、功率控制 (如低功率连续运行控制^[18]、无级调功控制^[19]) 等。</p> <p>③ 电磁干扰抑制设计^[20]、电磁兼容设计^[21]、改善温升设计^[22]、故障检测设计等。</p>	<p>⑥ 加热稳定性、可靠性和安全性: 加热效率稳控技术研究, 如保证加热效率不随负载变化而变化^[41]; 安全可靠加热控制技术^[42], 如改进浪涌保护电路、优化 EMC 电路提高抗干扰性、IGBT 失效因素分析与可靠性提升方案设计、改善测温精度^[43]实现温度可靠控制等; 磁芯结构优化设计^[44]减少漏磁, 防干烧保护装置设计^[45], 锅具自适应设计、锅具识别提高系统可靠性^[46]等。</p> <p>⑦ 散热性能: 散热结构优化设计改善机芯、控制主板散热性能等^[47]。</p>
散热系统	<p>主要构成: 风扇、风道、散热片及其他辅助部件等。</p> <p>主要功能: 对炉具主体发热部件实施散热, 保障其在正常温度范围内工作。</p>	<p>④ 热方式、散热功率, 风扇类型、风道结构、散热片材质及其结构等^[23-24]。</p>	

2.3 电磁灶使用问题调研结果

电磁灶使用问题调研结果如表 4 所示。聚焦电磁灶优点, 调研结果显示约 50% 的人员认为存在操作简便, 无明火、舒适不闷热, 节能环保等优点, 30% 以上的人认为还存在热效率高、油烟少, 清洁便利, 火力大等优点, 间接印证了前述新型电加热技术的优点。

聚焦电磁灶缺点, 调研结果显示, 除去耗电量 (受制于其纯电加热方式, 在要求火力大的前提下, 耗电量必然大, 但其热效率较高, 故该缺点实质为其特点) 等, 约 25% 以上的人认为存

在火力难以精准掌控、电磁辐射大、火力不直观、烹饪时间难以精准掌控、不能颠锅等缺点。其中认为火力难以精准掌控的人数占比达 40.92%。结合电磁灶使用问题及改进建议征集意见结果 (如表 4 中词云图所示), 总体分析可知, 虽然电磁加热直观烹炒的传统烹饪技巧 (如颠锅等) 和火候掌控经验, 电磁烹炒时其功率和时间的有效调设需依赖后期烹饪经验的更新积累, 加之其火力大小、加热均匀性、火力覆盖面等目前难以匹及同热技术, 其能承袭传统烹饪工艺, 但无法直接延用应用场合下的明火加热方式, 综合导致其烹饪

表 2 答卷人员基本情况
Table 2 Basic profile of respondents

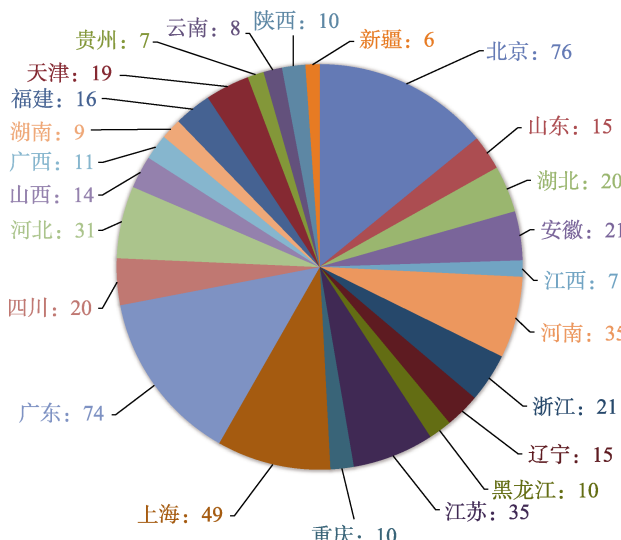
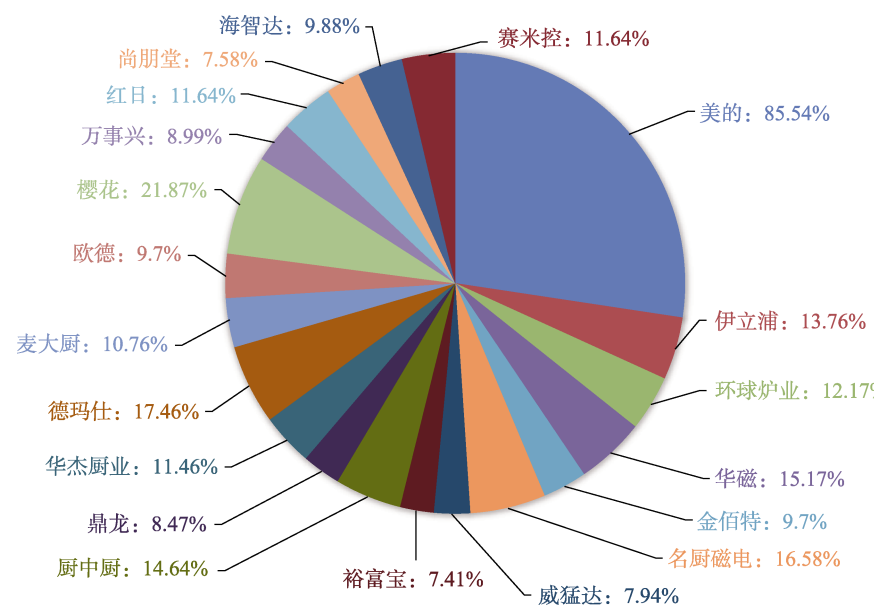
项目	统计结果																																																
性别比例	男：43.21%，女：56.79%。																																																
年龄段分布	21~30 岁：43.74%，31~40 岁：42.15%，41~50 岁：9.7%，51~60 岁：4.41%。																																																
地区分布	 <table border="1"> <caption>地区分布数据</caption> <thead> <tr> <th>地区</th> <th>人数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>北京</td><td>76</td></tr> <tr><td>天津</td><td>19</td></tr> <tr><td>福建</td><td>16</td></tr> <tr><td>湖南</td><td>9</td></tr> <tr><td>广西</td><td>11</td></tr> <tr><td>山西</td><td>14</td></tr> <tr><td>河北</td><td>31</td></tr> <tr><td>四川</td><td>20</td></tr> <tr><td>广东</td><td>74</td></tr> <tr><td>上海</td><td>49</td></tr> <tr><td>重庆</td><td>10</td></tr> <tr><td>江苏</td><td>35</td></tr> <tr><td>浙江</td><td>21</td></tr> <tr><td>辽宁</td><td>15</td></tr> <tr><td>黑龙江</td><td>10</td></tr> <tr><td>江西</td><td>7</td></tr> <tr><td>安徽</td><td>21</td></tr> <tr><td>湖北</td><td>20</td></tr> <tr><td>山东</td><td>15</td></tr> <tr><td>新疆</td><td>6</td></tr> <tr><td>陕西</td><td>10</td></tr> <tr><td>云南</td><td>8</td></tr> <tr><td>贵州</td><td>7</td></tr> </tbody> </table>	地区	人数	北京	76	天津	19	福建	16	湖南	9	广西	11	山西	14	河北	31	四川	20	广东	74	上海	49	重庆	10	江苏	35	浙江	21	辽宁	15	黑龙江	10	江西	7	安徽	21	湖北	20	山东	15	新疆	6	陕西	10	云南	8	贵州	7
地区	人数																																																
北京	76																																																
天津	19																																																
福建	16																																																
湖南	9																																																
广西	11																																																
山西	14																																																
河北	31																																																
四川	20																																																
广东	74																																																
上海	49																																																
重庆	10																																																
江苏	35																																																
浙江	21																																																
辽宁	15																																																
黑龙江	10																																																
江西	7																																																
安徽	21																																																
湖北	20																																																
山东	15																																																
新疆	6																																																
陕西	10																																																
云南	8																																																
贵州	7																																																
身份类别	了解商用电磁灶的小伙伴 44.97%、厨房设备管理人员 23.1%、厨师 7.94%、厨房设备销售人员 4.76%和厨房设备厂商 3.53%、其他人员 15.7%（涵盖科研、行政管理、财务审计、技术工程、教师、学生、医生、自由职业等）。																																																
熟悉电磁灶程度	经常使用人员 51.85%（商用 29.28%、家用 22.57%）、偶尔使用人员 21.87%、未亲自使用过但了解的人员 26.28%、从未接触过电磁灶人员 0%（相关答卷已视为无效答卷剔除）。																																																

表 3 电磁灶市场概况调研结果
Table 3 Survey results of electromagnetic cooker market

项目	统计结果																																										
电磁灶品牌了解度	 <table border="1"> <caption>电磁灶品牌了解度数据</caption> <thead> <tr> <th>品牌</th> <th>占比</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>美的</td><td>85.54%</td></tr> <tr><td>赛米控</td><td>11.64%</td></tr> <tr><td>红日</td><td>11.64%</td></tr> <tr><td>樱花园</td><td>21.87%</td></tr> <tr><td>欧德</td><td>9.7%</td></tr> <tr><td>麦大厨</td><td>10.76%</td></tr> <tr><td>德玛仕</td><td>17.46%</td></tr> <tr><td>华杰厨业</td><td>11.46%</td></tr> <tr><td>鼎龙</td><td>8.47%</td></tr> <tr><td>厨中厨</td><td>14.64%</td></tr> <tr><td>裕富宝</td><td>7.41%</td></tr> <tr><td>威猛达</td><td>7.94%</td></tr> <tr><td>名厨磁电</td><td>16.58%</td></tr> <tr><td>金伯特</td><td>9.7%</td></tr> <tr><td>华磁</td><td>15.17%</td></tr> <tr><td>环球炉业</td><td>12.17%</td></tr> <tr><td>伊立浦</td><td>13.76%</td></tr> <tr><td>海智达</td><td>9.88%</td></tr> <tr><td>尚朋堂</td><td>7.58%</td></tr> <tr><td>万事兴</td><td>8.99%</td></tr> </tbody> </table>	品牌	占比	美的	85.54%	赛米控	11.64%	红日	11.64%	樱花园	21.87%	欧德	9.7%	麦大厨	10.76%	德玛仕	17.46%	华杰厨业	11.46%	鼎龙	8.47%	厨中厨	14.64%	裕富宝	7.41%	威猛达	7.94%	名厨磁电	16.58%	金伯特	9.7%	华磁	15.17%	环球炉业	12.17%	伊立浦	13.76%	海智达	9.88%	尚朋堂	7.58%	万事兴	8.99%
品牌	占比																																										
美的	85.54%																																										
赛米控	11.64%																																										
红日	11.64%																																										
樱花园	21.87%																																										
欧德	9.7%																																										
麦大厨	10.76%																																										
德玛仕	17.46%																																										
华杰厨业	11.46%																																										
鼎龙	8.47%																																										
厨中厨	14.64%																																										
裕富宝	7.41%																																										
威猛达	7.94%																																										
名厨磁电	16.58%																																										
金伯特	9.7%																																										
华磁	15.17%																																										
环球炉业	12.17%																																										
伊立浦	13.76%																																										
海智达	9.88%																																										
尚朋堂	7.58%																																										
万事兴	8.99%																																										
商用电磁灶类型熟悉度	双头双尾炒灶 52.91%、单头单尾炒灶 48.15%、单头大锅灶 31.04%、一大一小组合灶 26.63%、双头大锅灶 18.87%、其他 3%。																																										

续表 3

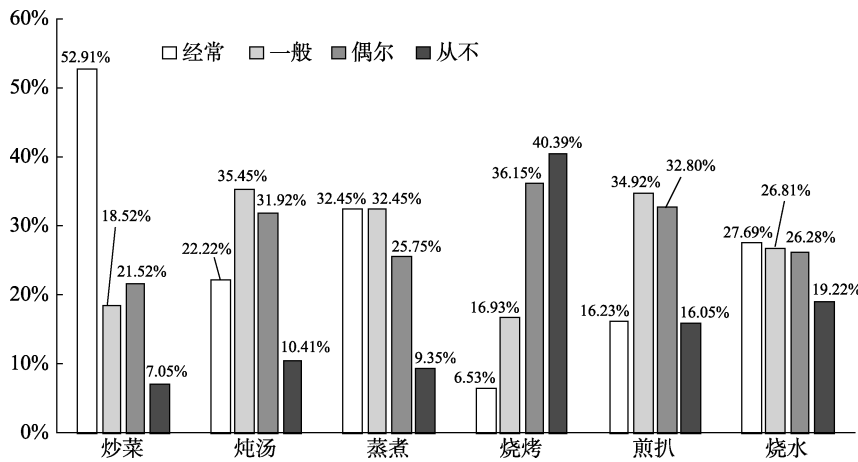


项目	统计结果
商用电磁灶烹饪功能使用频度	
操控方式喜爱度	触摸式 59.61%、按键式 23.46%、旋钮式 12.35%、遥控式 4.59%。
产品关注点热度	功能 80.78%、安全性 69.49%、加热效率 60.85%、价格 56.97%、能效 47.97%、加热均匀性 46.74%、品牌知名度 43.92%、火候掌控 42.68%、噪声 41.27%、外观设计 38.27%、辐射 32.1%、操控面板布局与显示 31.04%、制造工艺 20.28%、配件 13.93%。

表 4 电磁灶使用问题调研结果

Table 4 Investigation results on the use of electromagnetic cooker

项目	统计结果
电磁灶优点认同度	操作简便 57.5%，无明火、舒适不闷热 49.03%，节能环保 48.68%，热效率高 42.15%，油烟少 37.92%，清洁便利 34.74%，火力大 32.8%，使用安全 22.93%，其他 0.18%。
电磁灶缺点认同度	耗电量大 44.27%，火力难以精准掌控 40.92%，电磁辐射大 32.1%，火力不直观 27.51%，烹饪时间难以精准掌控 26.81%，不能颠锅 25.04%，清洗维护不方便 24.69%，噪音大 21.52%，火力不足 20.11%，加热不均匀 19.58%，太重、太占地方、不够小巧 19.05%，挑锅具、不实用 17.46%，按键使用不够灵敏、出现无作用不反应情况 16.05%，防水性能差 15.87%，安全不可靠 12.7%，使用不习惯 12.7%，程序参数调节复杂 11.11%，功能少 11.11%，操控面板界面布局与显示不合理 4.76%，其他 4.76%。
故障发生年限	“电磁灶一般使用多久会出现问题”，35.27%认为 2 年，32.63%认为 3 年，15.52%认为 5 年以上，8.29%认为 1 年，4.94%认为 4 年，3.35%认为 1 年以内。
易损部件	电磁灶产品易损部件调研结果如下：机芯 62.43%，控制板 47.09%，线圈盘 42.33%，风机 36.68%，档位开关 36.68%，锅体 19.22%，水龙头 5.64%，其他 0.53%。
电磁灶使用问题描述	
改进建议	

食物手感和口感整体欠佳。值得一提的是, 由于大锅烹炒本身易导致锅气缺失、口感下降, 为此宽口径大容量烹炒时, 电磁加热与明火加热的食物口感差别并不明显。

同时, 其安全性、清洁便捷性、质量问题和噪音问题等方面也备受关注。另外, 针对电磁辐射问题, 一方面大家主观认同存在电磁辐射大的缺点, 另一方面又未将其纳入问题描述和改进建议当中, 相关认知较为模糊或不确定, 为此针对市场上不同品牌、不同型号电磁灶开展电磁兼容性相关技术指标参数检测, 借以推动电磁灶电磁兼容性优化技术研究, 在规范大众认知的同时, 进一步提升其使用安全性, 消除大众疑虑。此外, 聚焦电磁灶使用年限和易损部件展开调研, 调研结果显示 67.9% 表明其可稳定使用 2~3 年, 其中机芯、控制板、线圈盘、散热器等部件较易受损。

3 结论与展望

电磁加热技术具备无明火、非接触、清洁环保、高效节能、安全可靠、易于实现自动化等诸多优势, 目前在国内外食品加工领域已获得广泛应用, 相关产品早已步入千家万户。然而, 结合现有电磁烹饪产品概况、市场概况以及实际使用问题发现, 当前商用电磁灶存在着诸多与技术发展成熟度不相匹配的问题, 随着电磁烹饪技术的广泛普及, 市场竞争日益激烈、价格内卷严重, 成本的极限压缩导致设备的可靠性、安全性、耐用性、节能性等随之下降。面对现有厨房商用电磁灶存在的电路抗干扰性不足、核心元器件依赖进口, 关键部件散热性不足、散热噪音大, 锅具防过热保护缺失、适配兼容性差, 功率控温粗放不节能、电磁兼容设计不完善, 对外接口标准不统一、智慧物联升级不支持等问题, 亟需在规范市场秩序, 确保其结构要素齐全、保底性能托底、接口标准统一的同时, 破解核心元器件依赖进口的卡脖子难题, 确保其全国产化以及来源的自主可控性, 同时可考虑融入智慧物联等现代信息化、智能化技术, 预留技术升级换代接口, 整体提升技术的前瞻性和预见性。

参考文献:

- [1] 惠永康. 感应加热电磁炉加热均匀性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
HUI Y K. Research on heating uniformity of induction heating inuction cooker[D]. Xi'an, College of Science and Tenhnology, 2021.
- [2] 周毅. 电磁加热电饭煲加热均匀性及防溢技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHOU Y. Research on heating uniformity and overflow prevention technology of induction hrating rice cooker[D]. Harbin: Harbin Insitute of Technology, 2020.
- [3] 袁宏斌. 基于电饭煲的多段电磁加热电路系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
YUAN H B. Design and implementation of multichannel induction heating circuit system based on rice-cooker[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [4] 覃琼. 电磁炉加热线圈磁场特性分析与加热均匀性优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
QIN Q. The analysisi of magnetic field characteristics and the optimization design of heating uniformity of induction cooker heating coil[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 陈剑, 张少君, 徐善伟. 家用电磁灶线圈盘对热效率测试影响的研究[J]. 中国测试, 2012, 38(6): 107-109.
CHEN J, ZHANG S J, XU S W. Research on influence of coil panels of household induction cookers on heat efficiency testing[J]. China Measurement & Test, 2012, 38(6): 107-109.
- [6] FERNANDO S. Power distribution in coupled multiple-coil inductors for induction heating appliances[J]. Ieee Transactions On Industry Applications, 2016, 52(3).
- [7] 李兆玉. 稀土添加对电磁加热用锰锌铁氧体磁条材料性能的影响[J]. 广州: 华南理工大学, 2019.
LI Z Y. Effects of rare earch doping on the properties of mn-zn ferrites for magnetic strips in electromagnetic heating system[J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [8] 朱泽春, 赖七生. 一种电磁加热的烹饪器具: ZL207219079U[P]. 2018.04.10.
ZHU Z C, LAI Q S. A cooking appliance with electromagnetic heating:ZL207219079U[P]. 2018.04.10.
- [9] 朱泽春, 陈国栋, 田海峰. 防辐射电磁炉: ZL207762989[P]. 2018.08.24.
ZHU Z C, CHEN G D, TIAN H F. Radiation-proof induction cooker: ZL207762989[P]. 2018.08.24.
- [10] 黄永俊, 蓝海凤, 李少杰, 等. 电磁电饭锅内胆材料技术的发展现状[J]. 中国材料进展, 2018, 37(6): 469-475.
HUANG Y J, LAN H F, LI S J, et al. Development of the material technology of inner pot for induction heating[J]. Materials China, 2018, 37(6): 469-475.
- [11] 李康, 曹达华, 李兴航, 等. 电磁加热锅及其制备方法和煮食设备: CN109199077A[P]. 2019.01.15.
LI K, CAO D H, LI X H, et al. Electromagnetic heating pan and

- its preparation method and cooking equipment: CN109199077A[P]. 2019.01.15.
- [12] 屈雪平, 曹达华, 黄宇华, 等. 陶瓷锅具及其制备方法与烹饪器材: CN 109199127A[P]. 2019.01.15.
 QU X P, CAO D H, HUANG Y H, et al. Ceramic pots and pans, their preparation methods and cooking equipment: CN 109199127A[P]. 2019.01.15.
- [13] 张祥林. 一种电磁加热单元、组件: ZL 212486830U[P]. 2021.02.05.
 ZHANG X L. An electromagnetic heating unit and component: ZL 212486830U[P]. 2021.02.05.
- [14] 江德勇, 王云峰, 雷俊, 等. IGBT 驱动装置和电磁加热控制装置和电磁炉: ZL208445781U[P]. 2019.01.29.
 JIANG D Y, WANG Y F, LEI J, et al. IGBT Drive device, electromagnetic heating control device and induction cooker: ZL208445781U[P]. 2019.01.29.
- [15] 马志海, 王志锋, 刘传兰, 等. 电磁加热装置及其保护电路: ZL208445783U[P]. 2019.01.29.
 MA Z H, WANG Z F, LIU C L, et al. Electromagnetic heating device and its protection circuit: ZL208445783U[P]. 2019.01.29.
- [16] 廖哲. 一种电磁炉的电磁加热系统及其控制方法: CN 106219176A[P]. 2019.01.15.
 LIAO Z. An electromagnetic heating system of induction cooker and its control method: CN 106219176A[P]. 2019.01.15.
- [17] 汪钊, 熊君, 任玉洁. 一种控制磁性锅具温度的电磁加热系统、烹饪电器及方法: CN107438298A[P]. 2017.12.05.
 WANG Z, XIONG J, REN Y J. An electromagnetic heating system, cooking appliance and method for controlling the temperature of a magnetic cooker: CN107438298A[P]. 2017.12.05.
- [18] 朱泽春, 陈修伟, 崔卫民. 电磁加热电饭煲及其烹饪方法: CN108371471A[P]. 2018.08.07.
 ZHU Z C, CHEN X W, CUI W M. Electromagnetic heating rice cooker and its cooking method: CN108371471A[P]. 2018.08.07.
- [19] 艾永东, 汪钊, 刘文奇, 等. 电磁加热烹饪系统及其功率调节装置: CN107448996A[P]. 2017.12.08.
 AI Y D, WANG Z, LIU W Q, et al. Electromagnetic heating cooking system and its power regulating device: CN107448996A[P]. 2017.12.08.
- [20] 朱泽春, 张伟. 高电磁兼容性的电磁加热烹饪器具: ZL 207640116U[P]. 2018.07.24.
 ZHU Z C, ZHANG W. Electromagnetic heating cooking appliances with high electromagnetic compatibility: ZL 207640116U[P]. 2018.07.24.
- [21] 王彪, 麻百忠, 陈锦森, 等. 一种抗干扰电磁加热烹饪电器: ZL205648054[P]. 2016.10.12.
 WAGN B, MA B Z, CHEN J S, et al. An anti-interference electromagnetic heating cooking appliance: ZL205648054[P]. 2016.10.12.
- [22] 赵于奎. 一种新型 IH 电磁加热电路: ZL 208317041U[P]. 2019.01.01.
 ZHAO Y K. A novel IH electromagnetic heating circuit: ZL 208317041U[P]. 2019.01.01.
- [23] 王彪, 麻百忠, 陈锦森, 等. 电磁加热烹饪电器的电子元件散热结构及电磁加热烹饪电器: CN 107369661A[P]. 2017.11.21.
 WANG B, MA B Z, CHEN J S, et al. The cooling structure of electronic components and electromagnetic heating cooking appliances: CN 107369661A[P]. 2017.11.21.
- [24] 朱泽春, 余星光, 李青松, 等. 一种高效散热的电热锅: ZL206213802[P]. 2017.06.06.
 ZHU Z C, YU X G, LI Q S, et al. An electric heat cooker with high efficiency heat dissipation: ZL206213802[P]. 2017.06.06.
- [25] 辛勇, 王鑫, 王洪建, 等. 家用电磁灶加热均匀性测试方法解析[J]. 家电科技, 2018: 86-88.
 XIN Y, WANG X, WANG H J, et al. Analysis of heating uniformity test method for household electromagnetic range[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018: 86-88.
- [26] 傅婕, 吴跃, 隋鹤齐. 基于气相离子迁移谱的不同材质锅具电磁加热米饭风味物质研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 56-63.
 FU J, WU Y, SUI H Q. Research on flavor substances of cooked rice by electromagnetic induction heating with pots made of different materials based on GC-IMS[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 56-63.
- [27] 郭婉冰, 张静, 贾才华, 等. 不同电磁烹饪条件对鸡汤体系营养及感官品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(6): 319-324.
 GUO W B, ZHANG J, JIA C H, et al. Influence of cooking conditions of induction heating pressure cooker on the quality of chicken soup[J]. The Food Industry, 2020, 41(6): 319-324.
- [28] 曹珍珍, 贾才华, 牛猛, 等. 电磁烹制米饭的质构与营养特性研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 33(9): 7-12.
 CAO Z Z, JIA C H, NIU M, et al. Textural and nutritinal characteristics of cooked rice prepared by electromagnetic treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 33(9): 7-12.
- [29] 杨娟, 陈龙, 孙晋康, 等. 五种烹饪方式对菜品食用品质的差异性比较[J]. 现代食品, 2020: 198-201.
 YANG J, CHEN L, SUN J K, et al. Comparison of five cooking methods on food quality[J]. Modern Food, 2020: 198-201.
- [30] 孙灵霞, 李苗云, 李闯, 等. 烹制工具及烹饪方法对鸡肉品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(1): 150-154.
 SUN L X, LI M Y, LI C, et al. Effects of cooking tool and method on chicken quality[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(1): 150-154.
- [31] 苏晨, 张鹏. 电磁灶的电磁辐射监测研究[J]. 家电科技, 2018: 44-46.
 SU C, ZHANG P. The monitor study on electromagnetic radiation for induction cooking appliance[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2018: 44-46.
- [32] 袁晓曦, 李滢, 周纪军, 等. 电磁灶电磁辐射试验方法研究[J]. 家电科技, 2020: 114-116+119.

- YUAN X X, LI Y, ZHOU J J, et al. Research on the test method of electromagnetic radiation of induction cooker[J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2020: 114-116+119.
- [33] 林德丰, 梁永贤. 电磁灶产品在 GB 4824-2013 标准的测试分析[J]. 科技创新导报, 2017, 14(21): 95-98.
- LIN D F, LIANG Y X. Test and analysis of electromagnetic cooker products in GB 4824-2013 standard[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(21): 95-98.
- [34] 汪志钢, 何柏锋, 吴伟. 电磁加热设备的电磁屏蔽组件及电磁加热设备: ZL208190956[P]. 2018.12.04.
- WANG Z G, HE B F, WU W. Electromagnetic shielding components and electromagnetic heating equipment: ZL208190956[P]. 2018.12.04.
- [35] 徐春龙. 电磁灶噪音改善技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- XU C L. Research on noise improvement technology of induction hob[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [36] 罗立刚, 方宗达, 袁世斌. 家用电灶(电磁炉、电陶炉)节能性能测试方法的探讨[J]. 家电科技学术年会论文集, 2020: 345-348.
- LUO L G, FANG Z D, YUAN S B. Discussion on energy-saving performance test method of household electric hobs (induction hobs、electric hobs)[J]. Appliance Science & Technology Conference, 2020: 345-348.
- [37] 刘志伟, 梅阳寒, 熊长炜, 等. 提升电磁灶能效的电路参数优化设计[J]. 现代制造技术与装备, 2020, (9): 12-13+24.
- LIU Z W, MEI Y H, XIONG C W, et al. Optimization of circuit parameters for improving energy efficiency of induction cooker[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, (9): 12-13+24.
- [38] 范吉昌, 易亮, 任玉洁. 电磁加热线圈盘和电磁加热厨具及电磁加热方法: CN108207048A[P]. 2018.06.26.
- FAN J C, YI L, REN Y J. Electromagnetic heating coils and electromagnetic heating kitchenware and methods of electromagnetic heating: CN108207048A[P]. 2018.06.26.
- [39] 王斌斌. 家用电磁灶能效自动化检测系统的研发[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- WANG B B. The research and development of automatic detection system for electromagnetic energy efficiency of household[D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Technology, 2018.
- [40] 黄狄文, 邓子彪, 张震. 电磁加热电路、无级调功电磁加热电路和自动控温系统: ZL 208241928U[P]. 2018.12.14.
- HUANG D W, DENG Z B, ZHANG Z. A power control method and device for electromagnetic heating equipment, electromagnetic heating circuit, stepless power regulating electromagnetic heating circuit and automatic temperature control system: ZL 208241928U[P]. 2018.12.14.
- [41] 刘忠鹏. 提高自由感应加热效率的软控制技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- LIU Z P. Software control technology to improve the efficiency of free induction heating[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [42] 汪钊. 基于 IH 加热的安全节能电磁炉控制系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- WANG Z. Design and realization of induction cooker software control system based on electro magnetic heating[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [43] 张玮. 测温方法、装置、及电磁加热设备: 201910943482.7[P]. 2019.09.30.
- ZHANG W. Temperature measurement method, device and electromagnetic heating equipment: 201910943482.7[P]. 2019.09.30.
- [44] 杨广良, 何田田. 一种电磁加热线盘组件: ZL209994574[P]. 2020.01.24.
- YANG G L, HE T T. An electromagnetic heating wire plate assembly: ZL209994574[P]. 2020.01.24.
- [45] 麦剑峰. 一种电磁加热烹饪器具的防干烧保护装置: ZL 208431821U[P]. 2019.01.25.
- MAI J F. A dry burning protection device for electromagnetic heating cooking appliances: ZL 208431821U[P]. 2019.01.25.
- [46] 刘志才, 王志锋, 区达理, 等. 电饭煲的电磁加热控制方法及电饭煲: CN109077622A[P]. 2018.12.25.
- LIU Z C, WANG Z F, QU D L, et al. Electromagnetic heating control method and rice cooker: CN109077622A[P]. 2018.12.25.
- [47] 朱泽春, 陈国栋, 颜振周. 一种高效散热电磁炉: ZL 207762990U[P]. 2018.08.24.
- ZHU Z C, CHEN G D, YAN Z Z. An efficient heat dissipation induction cooker: ZL 207762990U[P]. 2018.08.24. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。