

红外加热技术及其在食品杀菌中的应用研究进展
Infrared heating technology and its application in food sterilization

文家雄

WEN Jia-xiong

(四川信息职业技术学院, 四川 广元 628017)

(Sichuan Institute of Information Technology, Guangyuan, Sichuan 628000, China)

摘要:介绍红外加热技术的工作原理、特点以及对食品主要成分的影响,并总结红外加热技术在食品产业中的应用,结合实例,对红外加热技术在食品杀菌等方面的应用和研究进展进行分析。

关键词:红外加热;杀菌;烘烤效率

Abstract: Infrared heating technology has been widely used in the food industry, which has a very important significance for food sterilization, improve quality and improve the health of food. Meanwhile introduces the working principle of infrared heating technology, the characteristic as well as the influence on the main components of food, and summarizes the application of infrared heating technology in food industry, with examples, of infrared heating technology in food sterilization and other areas of application and research progress of the analysis.

Keywords: infrared heating technology; sterilization; baking efficiency

传统食品加热方法耗能大、效率低,而且会对周边环境带来极大的破坏,已经不能满足当前可持续发展的目标。为了满足现代食品产业的发展要求,许多新食品加热技术应运而生,不仅满足清洁、环保的要求,而且杀菌效果好,效率高。红外加热技术凭借环保、节能、无残留等优点已经在诸多行业得到了应用,尤其是在食品产业中的应用十分广泛。20 世纪 80 年代,红外加热技术在食品产业中开始使用。伴随能源消耗问题日渐严重,红外加热技术的开发和应用得到了人们的广泛关注。文章分析红外加热技术在食品产业应用中的相关理论,详细介绍具体应用,旨在为红外加热技术在食品杀菌中的进一步推广和使用提供参考。

1 红外加热技术工作原理及其对食品组分的影响

1.1 工作原理

传热主要通过辐射、对流以及导热 3 种方式实现。传统加热是通过通电或者是燃烧燃料进行加热,物体外部受热后会产生大量热量,然后通过上述 3 种方式将热量传递到物料中,从而达到杀菌的目的。而红外线辐射所产生的能量来自电磁波,红外波长在微波以及可见光之间,共分为 3 个波段,见表 1^[1]。通常来说,在食品领域采用的红外加热技术主要是远红外加热,这是因为大多数食品组分吸收的红外加热范围集中在远红外波段上。

红外加热技术工作原理和红外线辐射传热过程是一样的。红外线属于电磁波的一种,因此具有穿透性,可以通过辐射实现能量的传递。当红外线照射到物体上时,就会出现反射、吸收和穿透现象。对红外加热是否有效一般都是通过物体对红外线的吸收程度来进行判断,如果吸收量越大,则加

表 1 红外波长划分

Table 1 Infrared wavelength division

红外种类	波长/ μm
近红外	0.75~1.40
中红外	1.40~3.0
远红外	3.00~ 1×10^4

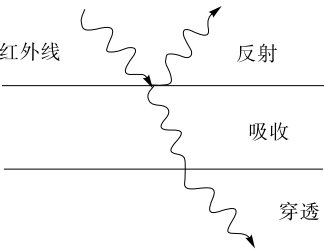


图 1 红外线辐射衰减原理图

Figure 1 Extinction of radiation

作者简介:文家雄(1969—),男,四川信息职业技术学院高级工程师。
E-mail: wenjiaxiong939@sina.cn

收稿日期:2015-12-17

热效果越好;反之,如果吸收量越小,则加热效果也就越差。当红外线波长和被加热物体的波长相等时,意味着大量红外线能量被加热物体所吸收,此时物体中的分子以及原子将会发生共振,在相互摩擦的作用下将会产生大量热量,这样一来,物体的温度就会逐渐升高,从而达到加热目的^[2-5]。

1.2 对食品组分的影响分析

食品属于一种复杂混合物,食物中包含大量的水、生物高分子、生化分子以及无机盐,由于食品种类不同,因此每种食品的表面状态、结构以及组分都不相同,对红外线的吸收程度也就存在较大差异,换句话说,不同食品的红外吸收范围是不同的^[6-9]。相关学者^[10-19]经过大量研究发现,食品的红外吸收范围取决于内部组分红外吸收范围的相互叠加。由于食品中不同组分对不同波长的红外线的吸收程度不同,也就是说,食品组分对红外射线的吸收强度是选择性的。

刘敏等^[20-27]也对这一问题进行了研究,通过将水的吸收光谱与主要食品组分的红外吸收波段相比较,得出部分食品组分的吸收光谱在光谱区内存在重叠。在所有组分中,水对红外入射光线吸收的影响最大,范围达到2~11 μm,蛋白质和多肽的吸收范围为6~9 μm,氨基酸类吸收范围在3~4 μm。除此之外,脂类在3.0~4.6,6.0,9.0~10.0 μm吸收波段表现出来的吸收现象非常强,食物中碳水化合物红外加热的吸收范围为3 μm和7~10 μm。通过对不同组分的对比发现,每种对红外线都呈现出不同的吸收效果,均在固定的红外吸收范围之内,并且,吸收波段出现了互相重叠的情况^[28]。值得一提的是,在食物的所有组分中,水的红外加热吸收范围最大,几乎涵盖了所有组分的吸收波段^[29]。

2 影响红外加热技术杀菌的因素

2.1 微生物种类

由于细胞成分不同,细菌、霉菌以及酵母对红外加热的抵抗力也存在较大差异^[30]。通常情况下,孢子与营养细胞相比,耐红外加热能力更强。Ali Motevali等^[31]研究发现:将枯草芽孢杆菌放置在生理盐水中用红外照射装置照射2 min时,枯草芽孢杆菌数量增长了5倍,当超过2 min之后,数量逐渐下降,并出现拖尾的情况;营养细胞较芽孢先被灭活,枯草芽孢杆菌数量之所以在2 min内出现剧增的情况,很可能是芽孢受热过多,开始萌发。经红外加热技术处理10 min之后,经测定,枯草芽孢菌群的数量减少达到了90%以上。

2.2 微生物生理阶段

一般来说,微生物生理阶段包括滞后期、指数期、稳定期以及衰亡期四期。微生物在生长的每个阶段化学组成都是不同的,因此,对红外加热的抵抗能力也存在差别。就指数期和稳定期而言,前者对红外加热更加敏感^[32]。Ragab K等^[33]研究发现:在辐射为3.2 kW/m²的条件下,对处于稳定期以及指数期的细胞进行处理,时间为5min,通过测定,稳定期细胞下降1.8 lg CFU/mL,指数期细胞下降3.9 lg CFU/mL。

2.3 样品厚度

红外加热的穿透力实际上是非常弱的,因此在加热过程中选择合适的样品厚度非常重要,只有样品厚度选取合理,杀菌效果才能达到理想状态。丁超等^[6]发现,孢子、金黄色葡萄球菌在红外加热条件下,厚度越大,死亡速度也就越快。残活细胞和受损细胞随着深度下降而不断增加,比如在301 K辐照下,当样品厚度为0.9 mm时,菌数比2.9 mm时下降了3 lg CFU/mL。需要注意的是,大肠杆菌样品厚度越薄,菌数下降越明显。

2.4 水分活度和峰值波长

Hamanaka等^[32]围绕枯草芽孢杆菌的红外灭活进行了研究。选取3个辐射器,每个辐射器的辐射波谱不同,分别编号为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ,Ⅰ峰值波长为950 nm、Ⅱ峰值波长为1100 nm、Ⅲ峰值波长为1150 nm。3种辐射器的红外加热条件相同,样品相同。结果显示,灭活效果最好的是Ⅰ辐射器。在这3种不同红外波长的照射下,枯草芽孢杆菌最耐辐射的初始水分活度并不相同。因此,在具体照射过程中,可以通过样品周围环境湿度、样品a_w值的适合参数进行确定,从而进行辐射杀菌。

2.5 能量强弱

红外加热的能量越高,杀菌效果也就更好。丁超等^[6]指出:在红外加热条件下,由于不存在导热物体,所以小麦表面温度持续上升。加热时间为60 s,当红外加热能量越来越强时,小麦表面温度相应升高,而小麦表面菌落数则相应减少。由此可以得出:加热能越高,食品杀菌的效果也就越好。

2.6 频带宽度

食品中每种组分对不同波段的红外加热表现出不同的吸收程度。为了保证最佳的灭活效果和食品安全,需要观察样品的关键组分对红外的吸收特征。Khamis M等^[34]利用光学带通滤波器,将红外波长控制在5.88~6.66 μm时对玉米粉中的镰刀菌和黑曲霉素进行灭活。结果表明,在红外波长控制为5.88~6.66 μm时,红外加热能够促使蛋白质发生变性。采用普通红外加热和选择性红外加热对黑曲霉进行处理,时间为5 min,当利用选择性红外加热时,镰刀菌数和黑曲霉菌群分别下降0.45 lg CFU/mL和0.5 lg CFU/mL,这种加热技术灭菌率比普通红外加热技术的灭菌率提高了40%左右^[35]。因此,在实际生产过程中需要根据食品的具体加工要求对红外加热条件进行选择,在确保食品达到理想杀菌效果的同时,又能避免由于温度过高导致的食物质量下降。

3 红外加热技术在食品杀菌中的应用

采用红外加热技术则能够有效避免上述问题。红外加热技术不仅能够有效杀死致病菌,而且可保持食品品质,同时,红外加热技术成本较低,具有极高的推广和应用价值。红外加热杀菌研究方向主要集中在理论和应用两个方面,从理论层面上来说主要是对微生物杀灭动力学进行研究;应用层面侧重于红外和其它加热方法联合杀菌的新技术。

3.1 食品表面杀菌

红外辐射的穿透力并不强,一般来说,只能加热到几毫米,对食品进行红外加热处理,其表面会迅速升温,热量通过热传导被传递到食品内部。由于大多数固态食品的导热性并不好,所以,如果物料的厚度有所增加,那么,热传导也会被削弱,这也意味着传递到食品内部的热量变少,进而影响到杀菌效果。但是,大多数固态食品的染菌都是出现在表面,因此,采用红外加热技术能够有效消灭表面细菌,并最大程度保护食品内部品质。所以,红外加热技术更适合食品表面杀菌,而且在食品表面杀菌中的应用也最为广泛。

3.1.1 新鲜水果 在水果储藏的过程中,霉菌感染是最常见的。柑橘等果皮较厚的水果保存时间过长就容易发生霉变。草莓等果品脆弱的水果存储时间较短,大约 7 d 左右就会出现霉菌大量繁殖的情况,水果不仅外部变坏,而且气味也会变坏。一般来说,大多数厂家都会采用试剂或者是气体方法对水果进行杀菌。但是随着近年来食品安全问题越来越突出,消费者更加注重食品安全,这就迫使厂家寻求现代化、无污染的杀菌方式。Khamis M 等^[36]用采摘下来的新鲜草莓做试验,对草莓进行 5 min 红外加热处理。结果表明,红外加热技术能够有效防止在储存过程中草莓出现霉变,并且对草莓品质不产生任何影响。Khamis M 等^[37]也对这一结果表示认同,在红外加热条件下对新鲜无花果加热 30 s,然后用紫外线进行再次处理,时间同样为 30 s。处理完毕后,新鲜无花果中的酵母数和霉菌均减少 50% 左右,并且丝毫没有对储藏中的无花果的品质造成任何影响。

3.1.2 食用香料 食用香料中的水分含量是非常低的,保存时间较长,不易发生腐坏。但是如果将食用香料和水分含量较高的食品放在一起时,如果环境合适,芽孢和细菌就会迅速繁殖,对香料品质造成严重影响。目前食用香料杀菌最常用的方法就是 Co⁶⁰ 放射法,但是由于有些香料存在辐射物质残留^[36],所以该方法一直备受争议。由于食用香料的细菌感染部位大多发生在表面,内部极少出现细菌感染的情况,所以可以用红外加热技术对食用香料进行杀菌处理。也有研究^[4]指出,食用香料经红外加热和紫外线联合处理,目标菌数下降到指标值的时间非常短。这种联合杀菌方法要比单独使用红外加热或者是单独使用紫外线处理的效果更好,而且处理时间也较短。一般来说,在 300 °C 条件下对黑胡椒籽进行处理只需要 4.7 min,在 350 °C 条件下对黑胡椒籽进行处理只需要 3.5 min。处理后能够将黑胡椒籽中的酵母菌和总霉菌全部杀死,并且黑胡椒籽的质量不会受到任何影响。由此不难看出,在食用香料杀菌领域,红外加热技术是非常有前途的,具有极高的推广和应用价值。

3.1.3 即食食品 对即食食品来说,最有效的杀菌方式就是热杀菌。将即食食品完全煮熟,在后期加工过程中由于灭菌不充分的表面会与生产线发生接触,所以在包装前很容易染上致病菌。这些致病菌基本都是发生在即食食品的表面,采用有效的表面杀菌技术可以解决这一问题。目前红外加热技术已经在即食食品杀菌中得到了广泛应用,在应用过程

中还可以结合热水浸泡共同杀菌^[37],但杀菌需要在食品包装前进行。

Deliephan A^[38]曾以美国大杏仁为例,对红外加热技术的杀菌效果进行了研究,通过 3 种红外加热和保温组合方式均可使大杏仁表面的小球菌下降 5.5 lg CFU/g 以上。经处理之后的大杏仁在气味、外观、品质等方面与未处理的并无不同。

3.1.4 粉末食品 粉末食品同食用香料一样,含水量都非常低,虽然大多数情况下不需要进行杀菌处理,但是如果存储条件不符合要求,也会导致粉末食品变质。目前来看,大多数杀菌方法都是针对水分含量较高的食品,应用于粉末食品等干燥食品的灭菌技术还比较少,而红外加热技术的出现则为干燥食品杀菌提供了新的思路。相关学者^[39]利用红外加热技术调成不同水分含量的辣椒粉,先用高热流密度将辣椒粉加热到 350 °C,再保 30 min,在 95~100 °C 条件下处理 6 min, a_w 值为 0.88 的辣椒粉中枯草芽孢杆菌数下降 4.5 lg CFU/g。选择合适的热流密度和水分活度,可在保证品质的前提下最大限度的减少染菌数。

3.2 液态食品

牛奶是最为常见的液态食品。从目前来看,液态食品常用的杀菌方法就是利用管状或者是片状换热器进行杀菌,热量通过不锈钢壁传递到液态食品。但是如果液态食品的黏度比较高,并且不锈钢壁生垢,就会导致染菌,对食品的品质造成影响。所以,要想确保液态食品的杀菌效果,保持杀菌设备的洁净是前提条件。但这也意味着需要消耗大量时间,而且还会产生大量酸碱废水,严重污染环境。所以,必须要寻求一种新设备,不仅要省时省力,而且还要达到环保要求,研究^[21]认为,红外加热技术是比较理想的选择。相关学者^[40]利用红外加热技术对牛奶中的金黄色葡萄球菌进行了杀菌试验,在 619 °C 条件下对牛奶进行 4 min 的处理,当牛奶体积为 3 mL 和 5 mL 时,能够将金黄色葡萄球菌全部灭活,菌群下降了 40%。经大量实践^[25]证明,红外加热技术设备简单,效率高,而且达到了环保要求,尽可能减少了对生态环境的破坏。

4 结语

红外加热技术作为一种高效、环保的新型杀菌技术已经在食品产业杀菌工作中得到了广泛应用,发展前景十分广阔。文章介绍了红外加热技术的工作原理、特点以及对食品主要成分的影响,并总结了红外加热技术在食品产业中的应用,结合实例,对红外加热技术在食品杀菌等方面的应用和研究进展进行了分析。结果表明,红外加热技术杀菌效果良好,而且能够保持食品原本的品质,是一种比较理想的杀菌技术。

参考文献

[1] 易志, 潘忠礼, 马海乐, 等. 食品红外辐射杀菌技术的应用与展望[J]. 食品工业, 2014, 35(10): 231-235.
[2] 潘忠礼, Atungulu G G, 马海乐. 食品和农产品干燥的一种有效

方法—红外加热法[J]. 干燥技术与设备, 2013, 11(1): 61-66.

[3] 高扬, 解铁民, 李哲滨, 等. 红外加热技术在食品加工中的应用及研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 218-222.

[4] 张鑫, 曲文娟, 马海乐, 等. 脱水菠菜的催化式红外辐射灭菌研究[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 133-137.

[5] 张琥. 红外辐照下马铃薯片灭酶工艺优化及多酚氧化酶失活机理的研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2012: 12-13.

[6] 丁超, 陶婷婷, 刘强, 等. 红外加热技术在粮食行业的研究进展[J]. 粮油仓储科技通讯, 2015, 31(3): 5-9.

[7] 刘斌, 吴本刚, 陈盼, 等. 红外技术在果蔬干燥中的应用及研究进展[J]. 包装与食品机械, 2015, 35(3): 50-53.

[8] 李河, 林勤保, 郭捷, 等. 近红外光谱技术及其在液态食品上应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 376-383.

[9] 吴全金, 孙威江, 吴占富. 远红外加热技术在茶叶加工及制品中的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 23(4): 220-224.

[10] 杨晓建, 金东. 中波红外加热技术在机油滤清器粉末涂料固化中的应用[J]. 涂料技术与文摘, 2013, 34(1): 15-17.

[11] 闻章勇, 郑俊庆. 燃气红外辐射加热技术在大型模具加热中的应用[J]. 工业炉, 2013, 35(1): 32-34.

[12] 刘敏, 杨庆浩, 唐娟, 等. 微波加热植物油的红外光谱分析[J]. 真空电子技术, 2013, 31(5): 10-14.

[13] 孙露萍, 王举涛. 近红外在食品及药品农残检测中的应用研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41(15): 12-13.

[14] 马冬红, 王锡昌, 刘利平, 等. 近红外光谱技术在食品产地溯源中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 877-881.

[15] 马海乐, 王娟, 刘斌, 等. 马铃薯片红外加热灭酶脱水试验及动力学[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 304-310.

[16] 张孟丽, 马成龙, 戴冬冬, 等. 红外加热辐射时间对生丝性能的影响[J]. 现代纺织技术, 2015, 23(4): 1-4.

[17] 费维科. 远红外加热缩膜机的智能控制[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2014: 5-6.

[18] 刘功明, 孙京新, 李鹏, 等. 近红外光谱法检测鸡、鱼肉加热终点温度[J]. 中国农业科学, 2016, 12(1): 155-162.

[19] 王蓓. 脉冲强光、紫外和红外辐射对稻谷黄曲霉及其毒素的杀灭降解研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014: 11-12.

[20] 刘敏. 微波加热食物的红外光谱分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 17-19.

[21] 马梦晴, 高海生. 食品杀菌与无菌包装新技术综述[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(3): 39-44.

[22] 易志. 稻谷催化式红外辐照防霉杀虫研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014: 7-10.

[23] 李家旺, 刘仁明, 司民真. 红外光谱法研究⁶⁰Co- γ 射线辐照对天麻粉成分的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(4): 617-622.

[24] 刘国丽. 红外辐射加热用于食品物料干燥的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014: 6-7.

[25] 郑霞, 万江静, 高振江, 等. 红外干燥技术在果蔬加工中的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 1-6.

[26] 王忆锋. 2013年的中国红外技术(下)[J]. 红外技术, 2014, 14(3): 180-189.

[27] 刘春山. 远红外对流组合谷物干燥机理与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 12-13.

[28] Tanaka F, Verboven P, Scheerlinck N. Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 79(2): 445-452.

[29] Wu Quan-jin, Sun Wei-jiang, Wu Zhan-fu. Research advance on tea processing and production based on far infrared heating technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 34(2): 45-49.

[30] Navin K, Rastogi. Recent Trends and Developments in Infrared Heating in Food Processing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012(52): 9, 737-760.

[31] Ali Motevali, Saeid Minaei, Mohammad Hadikhoshtagaza. Evaluation of energy consumption in different drying methods[J]. Energy Conversion and Management, 2011(52): 1 192-1 199.

[32] Daisuke Hamanaka, Naoko Norimura, Noriko Baba, et al. Surface decontamination of fig fruit by combination of infrared radiation heating with ultraviolet irradiation[J]. Food Control, 2011, 22(3): 375-380.

[33] Ragab K, Zhongli P, Adel S, et al. Moisture diffusivity of rough rice under infrared drying[J]. Food Science and Technology, 2011(44): 1 126-1 132.

[34] Khamis M, Subramanyam B, Flinn P W, et al. Susceptibility of various life stages of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) to flameless catalytic infrared radiation[J]. Journal of Economic Entomology, 2010(103): 1 508-1 516.

[35] Khamis M, Subramanyam B, Dogan H, et al. Effects of flameless catalytic infrared radiation on *Sitophilus oryzae* (L.) life stages[J]. Journal of Stored Products Research, 2011(47): 173-178.

[36] Khamis M, Subramanyam B, Flinn P W, et al. Susceptibility of *tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) life stages to flameless catalytic infrared radiation[J]. Journal of Economic Entomology, 2011(104): 325-330.

[37] Khamis M, Subramanyam B, Dogan H, et al. Flameless catalytic infrared radiation used for grain disinfection does not affect hard red winter wheat quality[J]. Journal of Stored Products Research, 2011(47): 204-209.

[38] Deliephan A. Exposure of wheat to flameless catalytic infrared radiation on temperatures attained, wheat physical properties, microbial loads, milling yield, and flour quality[D]. Manhattan: Kansas State University, 2013: 7-12.

[39] Kang B J, Ryu D K. Method for detecting pedestrians based on far infrared ray camera at night[J]. Click for Automatic Bibliography Generation, 2014, 13(4): 62-65.

[40] Belgin Erdogan S. Far infrared and ultraviolet radiation as a combined method for surface pasteurization of black pepper seeds[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 310-314.