

高压脉冲电场预处理果蔬的 生物力学原理与应用

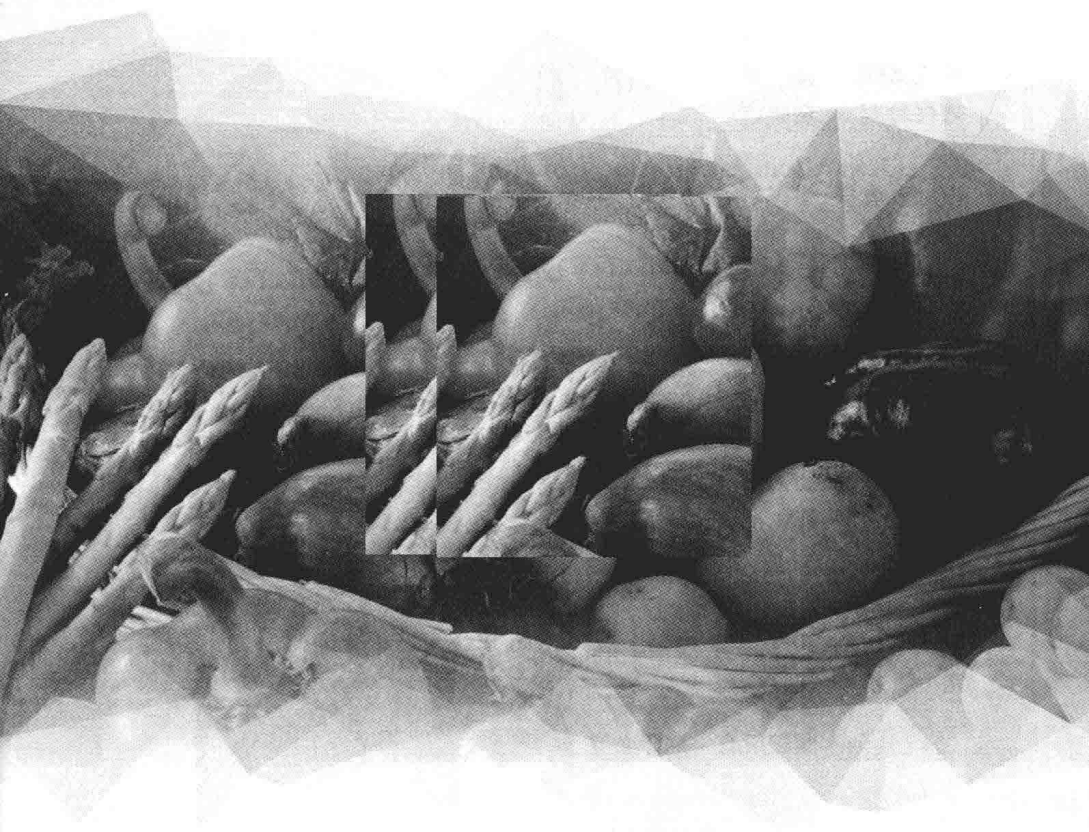
吴亚丽 著



中国农业科学技术出版社

高压脉冲电场预处理果蔬的 生物力学原理与应用

吴亚丽 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高压脉冲电场预处理果蔬的生物力学原理与应用 / 吴亚丽著.
北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 2

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1987 - 7

I. ①高… II. ①吴… III. ①脉冲电流 - 预处理 - 影响 -
果蔬加工 - 生物力学 - 研究 IV. ①TS255. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 017418 号

责任编辑 徐 毅

责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82106631 (编辑室) (010)82109702 (发行部)
(010)82109709 (读者服务部)

传 真 (010)82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京华忠兴业印刷有限公司

开 本 880mm × 1230mm 1/32

印 张 6

字 数 165 千字

版 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

定 价 15.00 元

❖ 版权所有 · 翻印必究 ❖

引 言

我国是果蔬生产大国，但由于果蔬含水量较高，损耗严重，对于如何更好地对果蔬进行贮藏保鲜成为人们日益关心的问题。高压脉冲电场由于其非加热特性，预处理果蔬能最大限度地保留果蔬的天然风味，与真空冷冻干燥技术结合，可以提高干燥速率，已受到广泛关注。研究高压脉冲电场对果蔬的贮存保鲜工艺，需要了解高压脉冲电场对果蔬生物力学性质的影响，从而解决干燥过程中存在的实际问题。

本书讲述高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质的影响，内容包括：高压脉冲电场预处理对果蔬宏观生物力学性质、细观力学性质、微观结构变形、果蔬崩塌现象的影响，高压脉冲电场作用机理。本书在阐述理论的同时，结合试验研究，从宏观角度结合微观变形定性定量地分析了高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质及脱水特性等方面的影响机理，获得最佳的电场预处理参数，为高压脉冲电场预处理技术在真空冷冻干燥中的应用提供了理论依据，同时，也为探索低能耗加工工艺过程奠定了基础。

本书是作者在多年的研究基础上，参考国内外相关文献和最新研究成果编著而成的。本书共有七章，内容包括绪论、高压脉冲电场预处理对果蔬宏观力学性质的影响、高压脉冲电场预处理对果蔬微观结构变形的影响、高压脉冲电场预处理果蔬细观力学分析、高压脉冲电场对苹果冻干崩塌现象影响的细观机理分析、高压脉冲电场对果蔬冻干影响的力学机理分析与验证试验、结束语。

考虑果蔬生物力学涵盖多学科的专业知识、涉及的领域较

广、读者的知识背景等差异，因此，在本书的编写过程中，尽量做到通俗易懂、深入浅出，从基本知识入手，利于不同知识背景的读者阅读。本书可供从事农业生物力学以及食品干燥的技术人员使用，也可作为农业工程专业本科生和研究生的参考书。

在本书的编著过程中，得到郭玉明教授、崔清亮教授、韩志军教授、张东光博士的热情帮助。在编著过程中，作者参考和引用了一些国内外相关作者的研究成果，在此一并表示感谢。

吴亚丽

2015 年 1 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 高压脉冲电场预处理技术概述	(1)
1.2 国内外关于高压脉冲电场预处理技术的研究进展	(2)
1.2.1 高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质影响方面	(3)
1.2.2 高压脉冲电场预处理对果蔬细观力学性质影响方面	(4)
1.2.3 高压脉冲电场预处理果蔬的力学作用机理方面	(5)
1.2.4 高压脉冲电场预处理果蔬冻干工艺优化的力学作用机理方面	(8)
1.3 本书研究内容	(10)
1.4 研究方法	(11)
2 高压脉冲电场预处理对果蔬宏观力学性质的影响	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 果蔬宏观力学性质测定方法	(13)
2.2.1 试验材料及仪器	(13)
2.2.2 试验设计	(15)
2.3 果蔬的剪切性能研究	(19)
2.3.1 测试方法	(20)
2.3.2 结果与分析	(20)
2.4 果蔬的硬度性能研究	(31)

2.4.1	测试方法	(32)
2.4.2	结果与分析	(33)
2.5	果蔬的压缩性能研究	(39)
2.5.1	测试方法	(40)
2.5.2	结果与分析	(40)
2.6	果蔬的压缩性能研究	(58)
2.6.1	引言	(58)
2.6.2	果蔬压痕力学性质测试试验研究	(60)
2.6.3	有限元法模拟分析	(62)
2.7	小结	(73)
3	高压脉冲电场预处理对果蔬微观结构变形的影响	(76)
3.1	引言	(76)
3.2	微观结构分析的 SEM 方法	(78)
3.3	材料、设备及方法	(78)
3.4	化学方法制备样品	(80)
3.4.1	新鲜样品	(81)
3.4.2	崩塌时的样品	(85)
3.4.3	干燥样品	(92)
3.5	低温断裂方法	(96)
3.5.1	新鲜样品	(97)
3.5.2	崩塌时的样品	(100)
3.5.3	干燥样品	(102)
3.6	小结	(104)
4	高压脉冲电场预处理果蔬微观力学分析	(106)
4.1	高压脉冲电场预处理对果蔬微观力学性质的影响	(106)
4.1.1	球形细胞膜的电特性	(107)
4.1.2	高压脉冲电场作用后细胞膜的受力分析	(109)

4.1.3	高压脉冲电场作用后细胞的内压力	(112)
4.1.4	高压脉冲电场作用后细胞的变形	(114)
4.2	宏观力学性质的细观力学机理分析	(119)
4.3	小结	(121)
5	高压脉冲电场对果蔬冻干崩塌现象影响的细观机理分析	(123)
5.1	细观机理分析	(124)
5.2	崩塌温度界定试验	(127)
5.3	小结	(130)
6	高压脉冲电场对果蔬冻干影响的力学机理分析与验证试验	(132)
6.1	引言	(132)
6.2	高压脉冲电场预处理果蔬生物力学性质对真空冷冻干燥的影响	(132)
6.3	高压脉冲电场预处理果蔬微观结构变形对真空冷冻干燥的影响	(135)
6.4	高压脉冲电场预处理果蔬崩塌现象对真空冷冻干燥的影响	(137)
6.5	高压脉冲电场预处理果蔬的真空冷冻干燥试验 ...	(139)
6.5.1	试验材料方法和设计	(139)
6.5.2	高压脉冲电场预处理苹果和马铃薯的真空冷冻干燥试验研究	(144)
6.5.3	高压脉冲电场预处理参数对果蔬干燥特性的影响	(153)
6.5.4	高压脉冲电场预处理对果蔬干燥过程的影响	(158)
6.6	小结	(161)

7 结束语	(164)
7.1 总结	(164)
7.2 展望	(166)
附录	(168)
参考文献	(173)

1 绪 论

1.1 高压脉冲电场预处理技术概述

果蔬在农产品种类中占有重要比重，但是由于果蔬的含水率很高，在微生物作用下容易腐烂变质，导致果蔬的损耗严重。为了降低果蔬的损耗，延长保存期，常采用干燥脱水的方法。目前，我国的农产品和食品的脱水干燥，多采用热风干燥的方法，由于热风干燥存在干燥时间长、能耗高、生产效率低而且色泽品味和复水性较差等缺点，不能满足大众的需求。近年来兴起的真空冷冻干燥加工技术是以低温冷冻的方式进行脱水，低温脱水对于果蔬的质量，比热风干燥、红外干燥和微波干燥等方法更佳，能最大限度地保留果蔬的营养成分，而且残余的含水量很低，贮藏中一般不会引起水溶性成分的变化，是农产品加工的一种新技术。但是真空冷冻干燥技术存在着设备成本过高，能量消耗大以及加工时间长等缺点。因此，在保证产品品质的同时，实现节能降耗，缩短冻干时间，减少工序，降低生产成本成为真空冷冻干燥技术当前面临的主要问题。

高压脉冲电场（high pulsed electric field，简称 HPEF）预处理技术是近年来研究较多的非加热处理技术之一，具有传递快速均匀、处理时间短、能耗低、产热少等优点，并能避免由于热加工造成的多种损害。高压脉冲电场是以脉冲波的形式作用果蔬细胞，使果蔬的细胞组织结构、细胞内的微生物、酶、水分以及营养成分等发生改变，达到杀菌、干燥、钝酶、物质定向改性等目的。高压脉冲电场预处理果蔬，不仅可以提高果蔬的干燥速率，

还可以保证其品质的要求。利用高压脉冲电场预处理与真空冷冻干燥结合对果蔬进行干燥加工,具有干燥时间短、营养成分损失少等优势,在农产品的保鲜与加工方面有广阔的应用前景。

果蔬在极短的时间内受到高压脉冲电场力的作用,使果蔬的内部组织结构发生改变,果蔬中的水分子因受电场的作用而产生了有序排列,同时,高压脉冲电场能够改变细胞膜的通透性,从而提高果蔬的干燥速率。由于高压脉冲电场的非加热特性,在干燥过程中几乎没有热量的传递,因此,物料的温度不会升高,避免了果蔬中营养成分的损失。我们在国家自然科学基金等项目支持下研究探索高压脉冲电场预处理对果蔬真空冷冻干燥脱水特性、果蔬材料物性等方面的影响以及低能耗冻干工艺优化等,已取得许多新的进展,为进一步了解高压脉冲电场作用果蔬的机理和对果蔬冻干过程的影响机理,需要深入全面地研究高压脉冲电场预处理果蔬的生物力学性质、微观结构变形以及冻干中出现崩塌现象的原因及解决办法等内容。

本书通过理论分析和实验分析相结合的方法,从宏观和微观层面研究高压脉冲电场对果蔬的作用机理,探索高压脉冲电场对果蔬微观结构和生物力学性能的影响机制,确定崩塌温度的临界值,获得高压脉冲电场预处理果蔬冻干的最佳工艺参数。为真空冷冻干燥技术在果蔬加工中制定低能耗加工工艺以及其他农产品加工领域的应用奠定基础,对促进农产品加工业的发展、农产品增值、农民增收等均具有重要的现实意义。

1.2 国内外关于高压脉冲电场预处理技术的研究进展

高压脉冲电场用于干燥预处理,具有降低干燥能耗、减少产品质量的破坏、提高干燥速率和缩短干燥时间等优势,在农产品如苹果、椰子、胡萝卜、红辣椒、马铃薯等的干燥加工中已经有广泛的应用。高压脉冲电场预处理技术涉及物理学、果蔬采后生

理学、农业物料学、农业生物力学、电磁力学和细观力学等多门学科。因此研究高压脉冲电场预处理中关于食品干燥加工的问题,必须结合各相关学科,深入了解高压脉冲电场的作用机理。本课题研究的是高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质和干燥特性的影响。本节主要综述了高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质的影响、对果蔬干燥特性的影响以及高压脉冲电场力学作用机理等方面的研究进展及其应用。

1.2.1 高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质影响方面

研究高压脉冲电场预处理后果蔬力学性质的变化,一方面可以为果蔬的贮藏保鲜提供理论依据;另一方面有助于了解高压脉冲电场的作用机理,为真空冷冻干燥工艺参数的优化提供理论依据。

目前,关于高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质的影响,国内研究的较少,而且大多集中在高压静电场对果蔬生物效应的影响方面,涉及种子萌发、幼苗生长、作物产量、果蔬保鲜等方面。徐树来对高压静电场处理后蒜薹的力学性能进行了测试,发现其力学性能有所改变,所有的力学参数都在一定程度上增大了,尤其是最大力,屈服应力和最大变形。张全国通过研究高压静电预处理技术对番茄保鲜的影响,指出高压静电预处理能有效地保持番茄较高的表面抗压强度和较低的失重率,延长番茄的贮藏保鲜时间。利用高压静电场处理苹果,结果表明,贮藏3个月后硬度比对照组高1.8%。处理水蜜桃,结果也显示硬度和好果率比对照组高。Dan Yang等运用了100kV/m高压静电处理黄瓜,指出短时高压静电场处理可以保持果蔬的硬度以及抑制果蔬膜系统的破坏,处理时间越长,黄瓜的腐烂率相对越高。国外关于高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质的影响方面,报道较少,而且主要集中在脉冲电场预处理后果蔬质地结构的变化对果蔬榨汁率的影响。Matvienko研究了在不同参数预处理情况下,

甜菜力学性质的变化情况,指出在电通透作用下,甜菜的弹性模量降低了 6.5 ~ 12.5 MPa。M. I. Bazhal 等研究了经高压脉冲电场预处理后,苹果在压缩过程中质地的变化情况。采用 Instron 试验机,在脉冲强度为 1 000 V/cm,脉冲宽度为 300 μ s,频率为 1 Hz,脉冲个数为 1 ~ 60 个的情况下对圆柱形苹果样品进行压缩试验,加载速度为 10 mm/min,得到了典型的应力应变曲线,并指出经高压脉冲电场预处理后苹果的脆性和弹性模量都有所降低。这与 Taiwo 等人提出的经脉冲电场处理后物料的最大压缩力明显下降的结果相符。

1.2.2 高压脉冲电场预处理对果蔬微观力学性质影响方面

在外加电场作用下,细胞膜磷脂双分子层两侧积聚电荷,磷脂双分子层受电荷的挤压作用所产生的压缩应力,使细胞膜的厚度逐渐减小,并有一定的弹性应变,当应力超过细胞膜的弹性极限时,在膜上形成一定半径的穿孔甚至破坏,促使细胞膜的渗透性大大增强。高压脉冲电场作用物料后,造成电穿孔或细胞不可逆的损坏,使生物组织细胞的渗透性增强,对深加工时物质的传输有积极的影响。高压脉冲电场预处理物料,使物料细胞膜发生改变,研究显示:最适合植物细胞膜的击穿电压在 1.5 ~ 3.0 kV/cm;脉冲个数为 15 ~ 30 个。

脉冲电场作用引起的磷脂双层膜表面产生的压缩应力可以由 Maxwell 应力求出,因此,Abidor 等人建立了脉冲电场作用后,液泡的表面张力和跨膜电位之间的关系式。Needham 等通过研究细胞膜的张力及压缩力在电通透性中的作用,建立了磷脂双层膜的变形公式,揭示了细胞张力、内压以及击穿电压之间的关系。Konstankiewicz 等指出细胞破裂变形主要是因为组织膨压的变化,增大细胞内的膨压,会引起细胞破裂,从而导致压缩应力和屈服应力降低。Lebovka 等通过研究脉冲电场预处理对胡萝卜、马铃薯和苹果结构性能的影响,指出脉冲电场使植物细胞膜出现电穿

孔现象,细胞组织的膨压降低,而细胞膨压的降低会导致水果的硬度以及大多数植物细胞力学性质的降低。这些为脉冲电场作用后细胞电穿孔以及细胞内部力学性质的变化等方面的研究提供了重要的理论参考。

国内的习岗等提出细胞膜的双电层模型,分析了植物细胞膜上电荷的分布情况,并建立了相应的公式。在此研究基础上,高永毅等推导出了植物细胞膜上电荷所产生的细胞壁应力的计算公式,分析了植物细胞壁厚度、细胞半径以及细胞膜上电荷面密度变化对细胞壁应力产生的影响。结果表明,细胞膜上电荷对细胞壁3个方向的应力都有影响,细胞膜上电荷产生的沿半径方向的细胞壁应力增量比另外两个方向的细胞壁应力增量小得多,而且细胞膜上电荷所引起的细胞壁应力与细胞壁厚度以及膜上电荷面密度的关系是非线性的。刘振宇进一步指出当电压为1V时,苹果细胞所受的内压力为 $3.7994 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于细胞膜受到电场力的方向是沿径向指向细胞壁,因此,高压脉冲电场处理之后的苹果果肉细胞结构松散,细胞壁出现明显的卷曲现象,而且部分细胞出现穿孔。

1.2.3 高压脉冲电场预处理果蔬的力学作用机理方面

Sale 和 Hamilton、Doevenspeck 等研究提出高压脉冲电场能破坏物料的细胞膜,增强其渗透性,结论认为,每个细胞膜内外都有自然电位差,外加电场可使膜内外电位差增大,当电位差高于细胞膜临界值时,细胞膜破裂,导致细胞膜结构紊乱和极的形成,从而使细胞膜的通透性增强。高压脉冲电场的作用机理主要有细胞膜穿孔效应、电磁机制模型、黏性极性形成模型、电解产物模型、臭氧效应等。下面简单介绍这几种模型:

(1) 细胞膜穿孔效应假说认为,当细胞膜上加一个外加电场,这个电场将使膜内外电势差增大,通透性随之增加,当电场强度增大到一个临界值时,细胞膜的通透性剧增,膜上出现许多

小孔，同时，所加的电场在极短时间内使细胞膜上产生振荡效应，细胞膜发生崩塌。

(2) 电磁机制模型认为，电场能量与磁场能量是相互转化的，在两个电极反复充电与放电过程中，磁场起了主要的杀菌作用，而电场能向磁场的转化保证了持续不断的磁场作用。

(3) 黏性极性形成模型认为，细菌的细胞膜在杀菌时受到强烈的电场作用而产生剧烈震荡，介质中产生的等离子体发生剧烈膨胀，产生强烈的冲击波，超出细菌细胞的可塑性范围而被击碎。

(4) 电解产物效应指出在电极上施加电场时，电极附近介质中的电解质电离产生阴、阳离子，在强电场作用下极为活跃，由于细胞膜的通透性提高，使其通过细胞膜与细胞内生命物质结合而使之变性。

(5) 臭氧效应理论认为在电场作用下，液体介质电解产生臭氧，在低浓度下能有效杀灭细菌。

目前，有关高压脉冲电场的作用机理说法不一，其中，“细胞膜穿孔效应”理论得到了较多学者的支持。即高压脉冲电场预处理可以使果蔬细胞产生电穿孔现象，改变细胞膜的通透性，从而提高干燥速率。

Zimmermann 研究发现，在正常的生理机能状况下，细胞膜能较好地阻碍离子和亲水分子的传输。当强度为 kV/cm 级、持续时间为 $\mu\text{s} \sim \text{ms}$ 级的电脉冲刺激细胞膜时，细胞膜会出现微孔；当增大外加电场时，细胞膜阻碍微粒渗透的能力降低，该现象称之为电穿孔。电穿孔后，膜电导率增大，跨膜电流增至 nA 数量级。如果在电流陡增前撤去外电场或在两脉冲的间隔时期，则跨膜电位快速衰减，细胞膜放电，膜屏障功能恢复，此现象称为可逆性电击穿；否则，微孔数量增加或者孔径激增，以至膜组织断裂，细胞凋亡，此现象称为不可逆性电击穿。两者的区别就

在于前者可在短暂时间内恢复,而后者则不能恢复或者是恢复较慢。目前,由于多种因素的影响,人们还无法确定两种电击穿之间的界限。随后 Zimmermann 等根据电介质击穿的机制提出了一个电致压缩模型。即将细胞膜等效为一层均匀的电介质层,在电场的作用下,两侧的极化电荷产生的压缩力导致细胞膜变薄,至极限时发生电击穿,并指出膜的通透性不可逆所需的电脉冲与细胞直径的大小成正比。经电场处理后,细胞膜等离子体变得可以透过小分子,由于渗入导致细胞膜膨胀,使细胞膜破裂。有效的高压电场的作用导致孔的形成和细胞膜的破坏。尽管各种细胞有不同的形态结构和电生理学特性,但都有一个临界的膜电压。James Weaver 建立的瞬态亲水孔模型,对电穿孔过程进行了宏观描述。并计算出跨膜电位的增加会导致微孔半径的增大,当微孔半径大于临界值时,细胞膜会趋于破裂。亲水孔模型认为电穿孔只是形成控制细胞膜电特性的初级孔,在电场作用及细胞膜扩散系数和电导率改变的共同作用下,初级孔向更大次级孔转变。

Benz 等人通过微电极测量表明,造成细胞膜可逆电穿孔的跨膜电压的阈值电压为 1V,但有许多因素影响该电压值的大小。脉冲宽度对膜穿孔电压阈值影响较大,两者之间呈反比关系。Angersbach 等研究发现,当细胞直径大小为 50 ~ 120 μm 时,电磁场强度大于 400 ~ 800V/cm 的临界值时,细胞膜的渗透性是可逆的;使细胞膜破坏的处理时间与物料本身结构有关,破坏马铃薯细胞膜的时间为 0.7 μs ,苹果为 1.4 μs 。

电穿孔理论认为,产生电穿孔所需脉宽的下限需要比细胞膜的充电时间长。对于矩形脉冲电场导致细胞膜可逆电穿孔的脉冲时间为 μs ~ ms 级。细胞膜电穿孔是电场和具有不同介电常数的两种材料相互间物理作用的结果。而且脉冲宽度和强度之间存在互补关系,即降低电场强度,则需要更大的脉冲宽度来弥补;穿孔的效率往往与脉冲强度与宽度的乘积成正比。在脉冲电场的作用

用下,细胞膜的充电及复原时间是非常重要的参数。脉冲电场在细胞膜上具有累积效应,电穿孔的累积效应与细胞膜的充电时间即脉冲宽度、细胞膜复原时间和脉冲间隔密切相关。

1.2.4 高压脉冲电场预处理果蔬冻干工艺优化的力学作用机理方面

利用电场预处理果蔬是在 20 世纪 40 年代提出的。高压脉冲电场可以提高生物细胞膜的通透性,提高果蔬在干燥过程中的传热传质效率,缩短干燥时间,能够避免对热敏性成分的破坏,与其他传统干燥预处理方式相比,适当的高压脉冲电场预处理能够较大限度地保持果蔬干燥制品中的营养成分。高压脉冲电场的波形有很多种,其中,方波电能效率高,双极性和短脉冲可以减少电化学效应。影响处理效果的高压脉冲电场参数主要有电场强度、脉冲宽度和脉冲个数等。

国内外关于高压脉冲电场预处理对果蔬干燥特性影响方面的研究较多,但是从力学角度解释高压脉冲电场的干燥机理目前还没有报道。日本的浅川发现了“浅川效应”,即在高压电场下,水的蒸发变得十分活跃,施加电压后水的蒸发速度加快,并证明电场消耗的能量很小。Angersbach 和 Knorr 论证得出,高压脉冲电场预处理马铃薯缩短了将近 1/3 的干燥时间。用高压脉冲电场做椰子脱水预处理,可以提高干燥速率,并且在椰子空气干燥之前,用高压脉冲电场和离心分离组合进行预处理试验,结果表明干燥时间缩短了 22%。Bajgai 和 Hashinaga 通过高压电场对菠菜叶干燥的研究发现高压电场干燥时物料不升温,速度快,能很好地保留物料的营养元素。Ade-Omowaye 等人的研究表明高压脉冲电场预处理导致了细胞膜通透性的提高,从而提高了干燥速率。使用流化床干燥机对不同预处理条件下红辣椒干燥的试验结果表明:与传统的预处理工艺相比,高压脉冲电场预处理提高了红辣椒的干燥速率和传热传质系数。Lai 等指出高压电场预处理后,