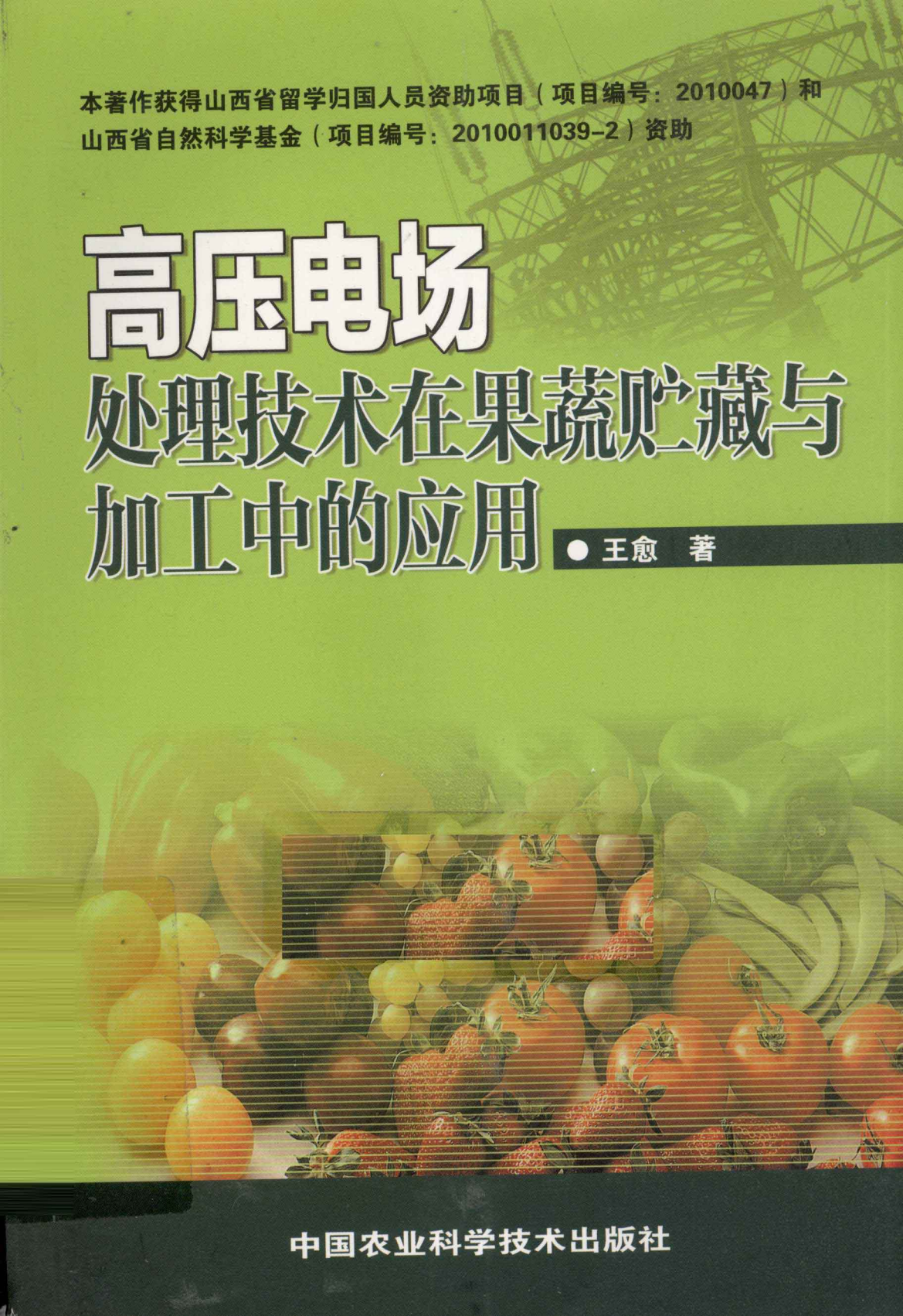


本著作获得山西省留学归国人员资助项目（项目编号：2010047）和  
山西省自然科学基金（项目编号：2010011039-2）资助

# 高压电场 处理技术在果蔬贮藏与 加工中的应用

● 王愈 著



中国农业科学技术出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高压电场处理技术在果蔬贮藏与加工中的应用/王愈著. —北京:  
中国农业科学技术出版社, 2011. 1  
ISBN 978 - 7 - 5116 - 0379 - 1

I. ①高… II. ①王… III. ①高电压 - 电场 - 应用 - 水果 - 食品  
贮藏②高电压 - 电场 - 应用 - 蔬菜 - 食品贮藏③高电压 - 电场 - 应  
用 - 水果加工④高电压 - 电场 - 应用 - 蔬菜加工 IV. ①TS255. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 258917 号

责任编辑 张孝安 赵 赟  
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)82109708(编辑室) (010)82109704(发行部)  
(010)82109703(读者服务部)  
传 真 (010)82109709  
网 址 <http://www.castp.cn>  
经 销 者 新华书店北京发行所  
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司  
开 本 782 mm × 1 092 mm 1/16  
印 张 15. 5  
字 数 270 千字  
版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷  
定 价 40. 00 元

—————版权所有·翻印必究—————

# 前言

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

近 30 年来,我国在食品工业利用高压电场处理技术取得了较好成绩,其中高压静电场处理技术运用于果蔬保鲜,高压脉冲电场处理技术运用于果汁杀菌,日益受到人们的重视。作者在中国农业大学博士生学习期间,在导师李里特教授及硕士生导师郝利平教授的关怀、培养和启示下,经多年努力,在高压电场处理技术应用于果蔬贮藏与加工方面做了大量研究。为适应食品工业发展的需要,实现科技成果转化成为生产力,笔者系统总结了多年来主持和参加的多项科研项目资料,历时一年多,撰写了这本书。

本书是以笔者曾参加完成的“电磁场调控果蔬内源乙烯发生机理及保鲜控制研究”(北京市自然科学基金课题,6062016)和“采后果蔬的电磁应激生物效应及保鲜机理研究”(国家自然科学基金课题,30871764)等项目,现主持承担的“电场诱导采后果实应激生物效应的贮藏机制研究”(山西省自然科学基金课题,2010011039-2)和“电场调控采后果实应激效应发生的贮藏模式研究”(山西省归国留学人员科研资助项目)等项目的研究成果为基础而撰写的。在课题的组织申报和科研实施过程中,得到中国农业大学食品科学与营养工程学院李里特教授、薛文通教授、程永强副教授、鲁占会副教授、刘海杰副教授、朱振愉老师的指导和帮助。

在高压电场理论探讨过程中,承蒙中国农业大学理学院贾贵儒教授、刘红疆副教授多方指导;在生理指标的测试及其气相色谱使用方面,得到了姜微波教授、曹建康副教授和赵玉梅老师的鼎力帮助;在实验设置及其改进的完善过程中,得到了信电学院冯磊老师的大力协助。在此一并表示衷心感谢!

在课题实施及著作写作中,得到山西农业大学科技处杨万仓副处长的支持和帮助,在此表示衷心感谢!

作 者

2010 年 12 月

# 目 录

CONTENTS

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| <b>第一章 高压电场处理设计基础 .....</b>           | <b>(1)</b>   |
| 第一节 电场处理的基础设计 .....                   | (1)          |
| 第二节 高压电场处理果实设备的建立和完善 .....            | (8)          |
| 第三节 高压电场处理果实的电磁学分析 .....              | (15)         |
| <b>第二章 高压电场电磁生物效应 .....</b>           | <b>(21)</b>  |
| 第一节 高压电场电磁生物效应 .....                  | (21)         |
| 第二节 电磁场在食品工业中的应用及研究现状 .....           | (46)         |
| <b>第三章 高压电场处理技术在果蔬贮藏保鲜中的应用 .....</b>  | <b>(50)</b>  |
| 第一节 高压电场处理条件的筛选 .....                 | (50)         |
| 第二节 高压静电场处理与提高果实贮藏效果 .....            | (62)         |
| 第三节 高压交变电场处理与提高果实贮藏效果 .....           | (80)         |
| 第四节 高压电场处理果实的保鲜机理探讨 .....             | (83)         |
| 第五节 高压电场处理在抑制果实冷害方面的应用 .....          | (98)         |
| <b>第四章 高压电场处理对采后果实贮藏品质的影响 .....</b>   | <b>(102)</b> |
| 第一节 高压电场处理对番茄贮藏品质的影响 .....            | (103)        |
| 第二节 高压静电场处理对苹果采后品质的影响 .....           | (110)        |
| 第三节 高压静电场处理对枣采后品质的影响 .....            | (113)        |
| 第四节 高压静电场处理对桃采后品质的影响 .....            | (116)        |
| 第五节 高压静电场处理对梨采后品质的影响 .....            | (119)        |
| <b>第五章 高压电场处理对采后果实生理生化变化的影响 .....</b> | <b>(122)</b> |
| 第一节 高压电场处理对采后番茄的生理生化影响 .....          | (122)        |
| 第二节 高压电场处理对采后草莓果实生理生化影响 .....         | (136)        |
| 第三节 高压电场处理对采后青椒果实生理生化影响 .....         | (151)        |
| 第四节 电磁和放电环境对采后水果的生理影响 .....           | (156)        |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| <b>第六章 高压电场处理技术在果蔬加工中的应用 .....</b>   | <b>(161)</b> |
| 第一节 高压电场处理用于果蔬干制 .....               | (161)        |
| 第二节 高压脉冲电场处理用于果汁杀菌 .....             | (166)        |
| 第三节 利用高压脉冲电场技术提取天然产物 .....           | (182)        |
| <b>第七章 高压电场处理技术在其他食品工业中的应用 .....</b> | <b>(201)</b> |
| 第一节 高压电场处理在畜肉产品加工中的应用 .....          | (201)        |
| 第二节 高压电场处理用于食品解冻 .....               | (208)        |
| <b>参考文献 .....</b>                    | <b>(218)</b> |

# 第一章 高压电场处理设计基础

## 第一节 电场处理的基础设计

“电场”是一种特殊形态的物质，它和物质的另一种形态——“实物”一起，构成了物质世界非常丰富的图像。电场存在于电荷的周围，并分布在一定的空间，电荷间的相互作用是通过电场对电荷的作用来实现的。自然界通常处于低压正静电场状态。地球上空的电离层对地面具有 360kV 的正电位，地面附近场强为 130V/m，只有在带电云层经过时才可能骤然上升到 10kV/m 以上。整个地球每秒钟内都有 1 800C 的正电荷从大气中流入地球内，而地球表面的生物是这 1 800C 的大气电流的重要通道。另外，大气表面还存在着正、负空气离子。正常情况下正、负空气离子的比例为 1.2 : 1，总离子数为 1 500 个/cm<sup>3</sup>，它们是正常大气的组分之一。

电磁场虽然看不见摸不着，但它们能表现力的性质。真空中的电荷系统 A 与其不接触的电荷系统 B 发生相对运动，那么 A 是如何作用在 B 上的，历史上有两种观点。第一种观点认为电磁场的传递有“超距作用”，即电磁场传递不需要任何媒质而直接作用于 B，这种传递是不需要时间的。另一种观点认为 A 对 B 的作用像实物间相互作用力一样必须借助媒质传递，并且需要时间。1857 年德国科学家基尔霍夫做试验证明：电信号在导体中的传播速度等于已知的光速，随后 1865 年麦克斯韦从电磁波波动方程也推导出电磁信号在空间的传播速度，其数值也恰好等于光速。这说明电磁场的传播是需要时间的，显然 A、B 间客观存在的这种媒质就是电磁场。

电磁场像粒子一样是有质量的，1900 年法国科学家彭加勒根据电磁波理论首次提出了电磁场可能有质量的想法。1906 年爱因斯坦确定了狭义相对论的质能关系后，电磁场的质量才真正被认识。一定空间的电磁场具有能量，由质能方程  $W = mc^2$  就可得到这一部分能量对应的质量，这个质量又称惯性质量，实际上光压现象也说明电磁场是有质量的，因为有质量的物质才能对其他物体表现压力作用。

电磁场和带电粒子间相互作用的例子在中学教材中已经涉及很多，本书不再详细讨论。这里仅做两点说明：①磁体与粒子间作用是通过电磁场来实现

的。量子场论的观点认为它们的相互作用就是通过交换光子来实现的。显然当它们之间的电磁场被截断时这些场力就不存在了，例如静电屏蔽、磁屏蔽现象。②场和带电粒子的作用是相互的。当粒子辐射电磁场时，粒子的运动必然受到阻尼，因此，此粒子的运动不是单纯被外场作用力所决定的，它自身所激发的场对粒子本身也有反作用，而且这种作用并不都表现为力的作用。例如静止的带电粒子激发静场，而所激发的静场对粒子本身的反作用是产生粒子的电磁质量。

电磁场具有波粒二象性，既具有波动性，也具有粒子性。电磁场的粒子就是光子，光子已在光电效应等试验中证实了。在一定条件下电磁场和粒子实物可以相互转化，例如1对正负电子对，可以转化2个 $\gamma$ 光子（也能产生1个或3个 $\gamma$ 光子，但概率甚小），而光子也可以转化为1对正负电子对。因此就物质性而言，实物和场没有严格的区别。现代量子理论表明，场和实物都是宇宙间的客观存在，是物质的两种不同的形式。它们是从不同的角度反映同一事物的两个方面。

生物（人、动物和植物等）生存在这样一个巨大的静电场中，其电荷分布、排序以及运动，都有一定的规律性，在长期的进化过程中，生物逐渐适应了这一电场环境。当这一环境发生变化时给生物带来什么样的影响，以及产生什么生物效应，已引起了科学界的极大关注。由此发展的电场处理技术成为一门新兴的边缘学科，其应用已经广泛渗透到农业、医学等各个领域。例如高压静电场可明显提高绵羊精子存活率；在医学上可以用电场治疗多种疾病；经高压静电场处理的作物种子发芽速度增加，活力增大，产量提高，由此可见，外加电场会导致某种生物学效应。研究探讨电磁生物效应时，首先抓好高压电场的基础设计是非常必要的。

### 一、高压静电场、交变电场和电晕电场的基础设计

将市电220V的电压升高整流，再通过高压电缆、保护电阻等加到电晕线或金属板上，这样就形成了高压电场。高压电场有静电场和交变电场以及高压脉冲电场等形式；静电场又分为非均匀电场和均匀电场，其中两块平行金属板作电极组成的电场是均匀电场（忽略边缘效应），用高压发生器连接两平行金属板，形成交变电场，处理果实示意如图1-1所示。高压发生器经硅堆整流，再连接两平行金属板形成稳恒静电场，其处理果实示意如图1-2所示。交变电场使用的电压大小和方向均随时间而改变，稳恒静电场所用电压大小和方向均不随时间改变。

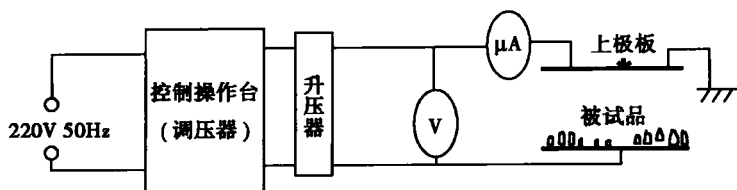


图 1-1 高压交变电场处理果实示意图

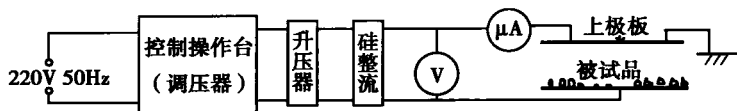


图 1-2 高压静电场处理果实示意图

高压静电场处理果实试验装置是用一台输出高压可以连续调节的高压静电电源，把高压输出端和零线端分别与被有机玻璃或其他绝缘材料隔离开的两块圆形平行金属薄板相连接，两块带电的平行金属薄板中间，形成了一个电场强度大小可调节的均匀静电场。把采后果实均匀放置在下金属板上，即可对贮藏果实进行高压静电场处理，具体设备如图 1-3 所示。利用高压静电场保鲜属

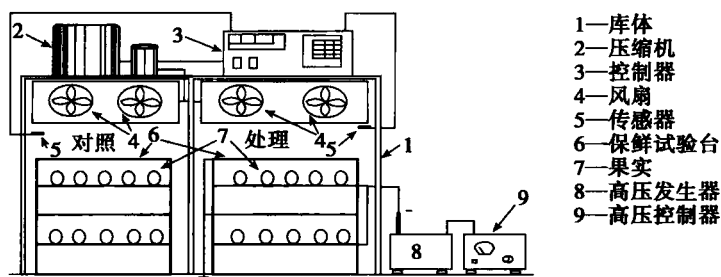


图 1-3 电场处理果实的设备示意图

于电磁微能技术一类，是利用电磁场微能源对食品进行节能、高效和高品质处理得到高效益的食品保藏品质的过程。对于呼吸跃变型难贮藏水果，它的应用相对于现代化的食品保藏加工技术，诸如冷藏、气调、生理活性物质调控、化学保鲜及辐射保鲜等技术来说，则具有投资少、能耗低和保藏品质高的优点。现在一些地方推广使用的电子保鲜贮藏器，就是运用高压放电，在贮存果品、蔬菜等食品的空间产生一定浓度的臭氧和空气负离子，从而达到果蔬防腐保鲜的一种设备。从分子生物学角度看，水果蔬菜就是一种生物蓄电池，当其受到带电离子的空气作用时，水果、蔬菜中的电荷就会起到中和作用。其生理活动

似假死现象，呼吸强度因此而减慢，有机物消耗也相对减少，从而达到贮藏保鲜目的。

电晕线电场属于非均匀电场，具体电晕电场的构建如图 1-4 所示。电晕电场由针板电极形成，而稳恒静电场与交变电场则是由板板电极形成的。

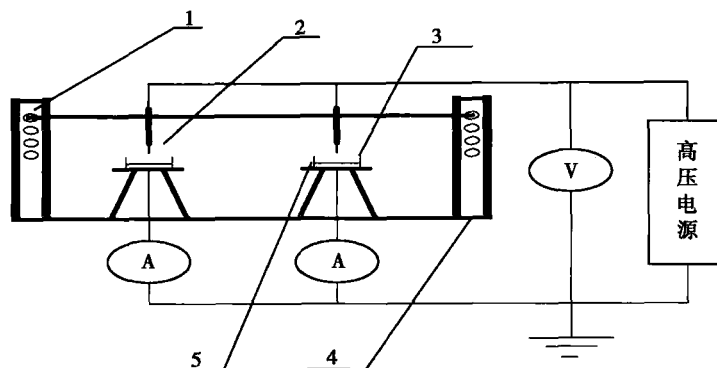


图 1-4 电晕电场的构建

1—高度调节孔 2—针电极 3—物料盛放器具 4—实验架 5—物料  
A—微安电流表 V—高压电压表

静电学研究表明，带电导体所携带的电荷，集中在导体的表面，而表面电荷的分布即电荷密度则与导体的曲率半径有关，针尖表面的电荷密度远大于其他部位，因此其附近的电场强度很强。如果用导电的针尖作为电极，电位升高到一定程度，针尖处积累的大量电荷所产生的强电场可使针尖周围的空气电离，从而产生局部的放电，出现晕光。

## 二、高压脉冲电场的基础设计

脉冲电场（Pulsed Electric Fields, PEF）杀菌技术被认为是一种潜在的经济有效的杀菌手段，它可以减少食品杀菌过程中营养成分的损失，最大限度地保持食品的新鲜状态，有低能耗、低操作费用、灭菌时间短、无环境污染、温升小、处理后可直接进行封装、生产效率高等特点，有很好的产业化应用前景。多年来，高压脉冲电场以其良好的应用特征而被国内外学者广泛研究，一般都有不同层次的进出口。从研究结果看，高压脉冲电场特别适合于果汁、牛奶、汤料和液态蛋等液态食品的杀菌处理。在影响杀菌效果的诸多因素中，脉冲电场强度、作用时间、脉冲个数及波形是杀菌的关键参数。为详细研究脉冲电场杀菌技术，提高杀菌效果，以便更好地应用，本书设计了  $100\text{kV/cm}$  的高

场强 PEF 杀菌系统。

### 1. 高压脉冲电场系统

高压脉冲电场系统由高电压脉冲电源和处理室两部分构成。图 1-5 为高压脉冲电场杀菌流程。

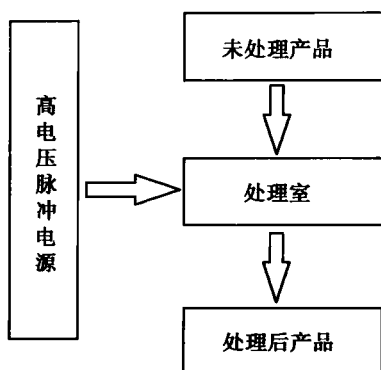


图 1-5 杀菌流程

#### (1) 高电压脉冲电源

高电压脉冲电源是整个装置的核心部分，具体设计参数为：脉冲峰值电压  $0 \sim 30\text{kV}$  连续可调，为指数衰减波形，频率  $0.550\text{Hz}$  连续可调。设计的高电压脉冲发生器工作原理如图 1-6 所示。220V 交流电通过调压器、升压变压器后得到交流高电压，通过保护电阻和硅堆整流后，对主电容充电，进而通过一个限流电阻对放电电容器进行充电。放电电容器的电压与直流高电压发生部分所产生的直流高电压相同，达到  $30\text{kV}$  的直流高电压，此时高压开关在点火脉冲（触发信号）的控制下若导通，则放电电容器两端的高电压通过液体介质迅速放电，产生高电压脉冲，并作用于处理室内液体介质的两端，形成高场强脉冲电场。

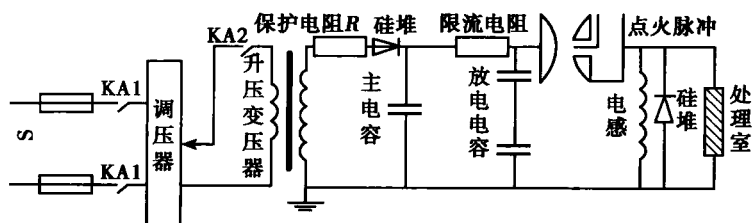


图 1-6 高电压脉冲发生器工作原理

## (2) 处理室设计

处理室是构成高压脉冲电场杀菌系统的又一重要组成部分。处理室的功能是将脉冲电场传递、施加和分配给待处理的液态食品并进行杀菌。处理室的结构和参数直接影响杀菌效果。为确保数据的准确性，必须保证处理室本身无菌，需对处理室本身采用高温湿热灭菌。所以处理室的材料一般选取耐高温的聚四氟乙烯，结构示意图如图 1-7 所示。

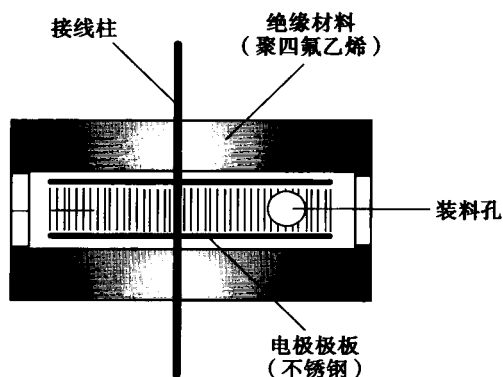


图 1-7 处理室结构示意图

处理室采用平行板电极，容积可设计为  $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 3\text{mm}$ ，电极材料为小不锈钢板，电极厚度为  $1\text{mm}$ ，电极间距为  $3\text{mm}$ ，系统最高场强达  $100\text{kV/cm}$ 。

高压脉冲电场杀菌系统是在两个电极间产生瞬时高压脉冲电场并作用于食品而杀菌的。其基本过程是用瞬时高压，处理放置在两极间的低温冷却食品。先用高压电源对一组电容器进行充电，将电容器与一个电感线圈及处理室的电极相连，电容器放电时产生的高频指数脉冲衰减波即加在两个电极上，形成高压脉冲电场，处理系统的原理结构示意图，如图 1-8 所示。

## 2. 获得高压脉冲电场方法

一种是利用 LC 振荡电路原理，先用高压电源对一组电容器进行充电，将电容器与一个电感线圈及处理室的电极相连，电容器放电时产生的高频指数脉冲衰减波即加在两个电极上，形成高压脉冲电场。由于 LC 电路放电极快，在几十至几百个微秒内即可将电场能量释放完毕，利用自动控制装置，对 LC 振荡器电路进行连续充电与放电，可以在几十毫秒内完成灭菌过程。另一种是利

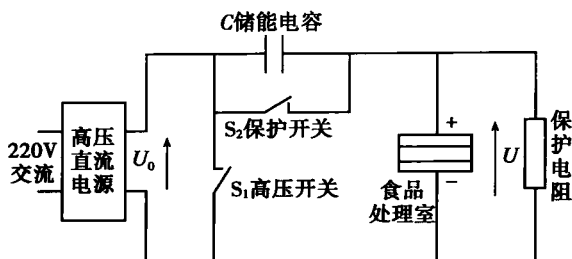


图 1-8 脉冲电场食品处理系统的结构示意图

用特定的高频高压变压器来得到持续的高压脉冲电场。灭菌用的高压脉冲电场强度一般为  $15 \sim 100 \text{ kV/cm}$ ，脉冲频率为  $1 \sim 100 \text{ kHz}$ ，放电频率为  $1 \sim 20 \text{ kHz}$ 。高压电场脉冲灭菌一般在常温下进行，处理时间为几十毫秒。这种方法有两个特点：一是由于灭菌时间短，处理过程中的能量消耗远小于热处理法；二是由于在常温、常压下进行，处理后的食品与新鲜食品相比在物理性质、化学性质、营养成分上改变很小，风味、滋味无感觉上的差异。而且灭菌效果明显，可达到商业的无菌要求，特别适用于热敏性食品，具有广阔应用前景。

本节介绍一种用于食品、饮品高压脉冲电场处理的高压脉冲电场处理装置，由分别与可控高压脉冲电源两极相联结的两个电极组成，所述的两个电极是两个径向尺寸大小不同、而截面形状相同的空心管，该两个空心管电极呈同轴状的套装在一起，其两端通过绝缘体隔离环将两个空心管电极隔离开，并由绝缘体隔离环固定盘固定封闭，在该两个空心管电极间形成的环状间隙即为承载需处理物料的容腔，在外层极板上设有与该容腔相通的物料进、出口。本高压脉冲电场处理装置可广泛适用于食品、饮料的常温下的灭菌处理及酒的人工陈酿处理，对物料原来的风味、形态、营养成分几乎都没有任何改变；在做酒的人工陈酿处理时，陈化速度快，并使处理工艺更方便、高效。

PEF 系统设计应分为两个方面：一是脉冲发生器装置的设计，高压脉冲发生器示意如图 1-9 所示；二是食品接受电场处理的生产线设计。脉冲发生器的功能是提供作用于食品的最佳电场条件。衡量其优劣的指标，从影响因素方面来说，主要有脉冲波形、最大电压、脉冲宽度、延迟时间等参数；从精度控制方面来说，电压、时间的可调精度、误差及参数控制的灵活性等也是重要指标。实际工业生产用的食品处理系统，必须使用流动设计，针对不同的应用，这方面有很大的灵活性，存在更多的优化改良余地。食品处理室形状不同，则

电场分布不同，食品流速不同，则处理时间不同，两者都直接影响食品的灭菌效果。

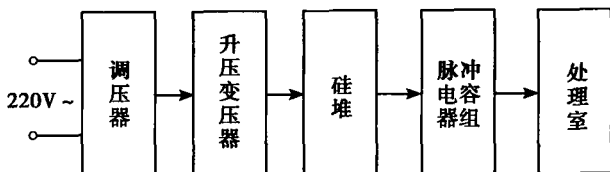


图 1-9 高压脉冲发生器示意图

脉冲可以是单极性指数衰减波、方波及双极性波。方波需脉冲整形网络，结构复杂、成本高，但电能效率高。双极性和短脉冲可减少电化学效应和电极沉积物。PEF 系统的主要工作参数有：

①脉冲工作电场值，一般为  $10 \sim 30 \text{ kV/cm}$ 。

②脉冲宽度及波形，应确保既要杀灭微生物，又要严格限制对处理食品的能量输入。

③连续脉冲间隔或脉冲数，由食品流量决定。

④食品电阻率，影响所需脉冲宽度和重复频率。

其他非独立参数，如食品温度，主要影响电阻率，必要时可在进入处理室前冷却；流体状态也有影响，如湍流有利于处理均匀食品，对电阻率也有影响。

## 第二节 高压电场处理果实 设备的建立和完善

静电场对果蔬进行保鲜的方法：是采用两块平行电极板产生静电场，通过变压器升压而产生很高的直流电压，对处于极板间的果蔬进行处理。极板可由多种导体材料制作，视具体需要而定。一般试验设置如图 1-3 所示。

静电场的发生其装置工作原理是交流电（220V）→整流电路→滤波→震荡电路→驱动电路→升压系统→整流→静电场。高压区内的电场强度可通过改变电源电压和极板间距，进行调节。通过改变两极板间的电压、距离，可设置不同的工作参数，对果蔬保鲜效果进行分析，测定其硬度、失重、呼吸强度、跃变型果蔬呼吸高峰的出现时间、反映果蔬成熟和衰老的相关酶活性的变化，

以及其他感官指标,以此来衡量静电场对果蔬贮藏保鲜的效果。

电场处理用的试验装置是进行果蔬电场处理贮藏保鲜试验的基本设备。一批致力于该领域研究的科技工作者在探索试验中建立了高压静电场果蔬保鲜装置。随着研究深入和高压电场处理类型的扩展,建立新的能适应试验要求的电场处理装置系统,显得非常重要。大体上,电场处理试验系统分为贮藏库(可调温、湿度)、电场处理保鲜试验台、高压发生器、整流控制部分、高压导线、接地器件等几个部分。本书针对原试验装置不能进行连续电场处理、加高电压时易跳闸(即因泄漏电流超过额定值,使高电压加不上去)及批量处理果实时电场处理后果实保鲜效果不均匀,带来果实后熟衰老不一致等问题,在原装置的基础上,建立和完善了电场处理装置,使操作能按试验要求方便和安全地运行。

### 1. 原装置简述

高压静电场果实保鲜设备的主体部分为高压静电保鲜试验台。高压静电试验台采用横截面为 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 的木制主体支撑框架,内侧自上而下根据试验需要可以铣出多个水平槽,用于放置不锈钢极板。试验过程中试验台整体置于试验冷库(内部空间尺寸为 $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3.2\text{m}$ )内,冷库内部温度、湿度可调。电场发生部分包括高压电源(北京互感器厂生产的TDM2.5/60型泄漏试验变压器,输出负高压的电压范围为 $0 \sim 60\text{kV}$ ,电流 $0 \sim 2.5\text{mA}$ )和控制器、放电接地体、高压导线及绝缘套筒等部件。使用表面平整光洁的不锈钢板组成平行极板。为防止尖端放电,钢板边角打磨光滑。电极板间距离可调,由于试验过程中操作者仅能控制高压电源输出电压及极板距离,故定义为:表观电场强度 = 所加电压  $\div$  极板间距离,后文如无特别说明,试验中所用电场强度均指表观电场强度( $\text{kV/m}$ )。所用的试验装置主要由高压静电保鲜试验台、高压直流电源及控制器等部分组成。

由于原装置主体支撑结构为木材,当整体置于保鲜试验冷库内,通常采用 $80\% \sim 95\%$ 的高湿度进行果蔬保鲜,在平行钢板间加高电压时,常常出现泄漏电流过大,而加不上的现象,影响试验的正常进行。这时研究者在做电场处理果蔬贮藏试验过程中,经常要把木材主体拿出晾晒,以消除木材吸湿带来的影响,另外试验高压发生器只能采用额定泄漏电流较大的机器(如选用北京互感器厂生产的泄漏实验变压器,其额定泄漏电流 $0 \sim 2.5\text{mA}$ ),如果选用额定泄漏电流较小的高压发生器(如天津东文高压电源厂生产的DW-N303-1AC型高压电源,其额定泄漏电流 $0 \sim 1\text{mA}$ ),会因环境湿度较大使装置漏电而跳闸,并中断试验的进行。针对上述问题,笔者先进行了材质的选择,在此基础上,

通过反复试验，研制出电场处理果蔬保鲜试验改进装置，从而可保证试验有效进行。

## 2. 材料与方法

### (1) 材质的选择

试验选用 DW - N303 - 1AC 型直流高压电源（天津东文高压电源厂生产），其额定泄漏电流 0 ~ 1mA。用木材、钢化玻璃、普通砖和聚氨酯泡沫构筑支撑框架，在平行钢板间加高压，将该支架置于相对湿度分别为 40%、80% 和 95% 的环境中进行试验，钢板间距离统一选用 10cm，以泄漏电流作为评价指标。

### (2) 果实

试验番茄品种为“佳粉 15 号”，花期为 40d 左右，选择成熟度一致、无机械伤、无病虫害、大小一致的绿熟顶白期果实，贮藏于电场处理试验装置（番茄贮于温度为 13℃，相对湿度为 85% ~ 90% 的试验冷库），采用板间距为 10cm，所加电压为 20kV 的高压静电场处理，处理频度为 2h/d，果实经受的场强为 200kV/m，以转红指数作为颜色转化评判指标。

### (3) 设备与产生高压电场及其稳定性试验

将试验装置置于相对湿度为 85% 的冷藏库中，在间距为 30cm 的各自两极板间，加 10kV、20kV、30kV、40kV、50kV 和 60kV 的高压，记录持续加高压而中间不断电的时间和泄漏电流值。

### (4) 设备与高压电场处理批量果实的比较试验

原装置高压电场处理批量番茄时，在平行板电容器中，是将番茄堆码为几层，如图 1-10 所示。改进设备的高压电场处理批量番茄果实，是在该装置内侧黏合支撑点处，放置与上下极板同样的金属板，果实就放置于这些金属板上，如图 1-11 所示。

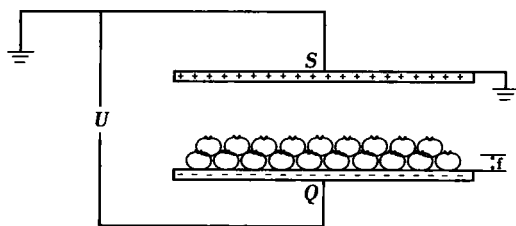


图 1-10 原装置处理批量番茄果实堆码示意图

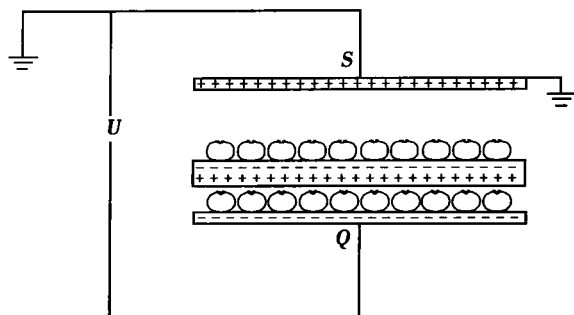


图 1-11 改进设备与处理批量番茄果实中间插入金属板存放示意图

#### (5) 果实色泽变化情况观察

果实颜色评价参照 Kobiler 等人方法，色泽分为：0 级果面全绿；1 级果顶开始转红，果面 < 25% 转红；2 级果面 25% ~ 50% 转红；3 级果面 50% ~ 100% 转红；4 级全部转红。每个处理用果 30 个，重复 3 次。

$$\text{转红指数}(\%) = \sum \frac{\text{色泽级别} \times \text{该级别果数}}{\text{最高颜色级别} \times \text{检查总果数}} \times 100\%$$

原装置与改进装置电场处理番茄果实贮藏效果以颜色变化作为评价指标，应用 SPSS11.5 软件对数据进行方差分析（ANOVA），利用邓肯式多重比较对差异显著性进行分析。 $P < 0.05$  表示差异显著。

### 3. 结果与分析

#### (1) 不同材质在几种相对空气湿度下的高压电场试验

试验结果可以看出（表 1-1），随着所加电压增大，极板间泄漏电流也明显变大，如相对湿度是 80% 时，钢化玻璃在 10kV、20kV 和 30kV 电压作用下，其泄漏电流分别为 0.01mA、0.08mA 和 0.15mA，其他材料也有同样的变化规律；不管是何种材质构建的平行板电场，均随着环境中湿度的加大，泄漏电流也增大，如钢化玻璃在同样 20kV 作用下，湿度是 40%、80% 和 95% 时，其泄漏电流分别为 0.00mA、0.08mA 和 0.28mA，供试几种材质进行比较可以发现，以泄漏电流为评价指标，一般聚氨酯泡沫 < 钢化玻璃 < 普通砖 < 木材。为实现处理设备有稳定的高压电场作用，可优先选用聚氨酯泡沫和钢化玻璃等材质构建，考虑到该设备要有足够的坚实及其可操作性，为改进设备选择了钢化玻璃材料。

表 1-1 不同材质构建的平行板电场中发生高电场试验泄漏的电流值

| 相对湿度 (RH)<br>(%) | 材质    | 电压 (kV) |      |      |
|------------------|-------|---------|------|------|
|                  |       | 10      | 20   | 30   |
| 40               | 木材    | 0.12    | 0.18 | 0.22 |
| 40               | 普通砖   | 0.10    | 0.16 | 0.21 |
| 40               | 钢化玻璃  | 0.00    | 0.00 | 0.00 |
| 40               | 聚氨酯泡沫 | 0.00    | 0.00 | 0.00 |
| 80               | 木材    | 0.66    | 0.88 | 0.97 |
| 80               | 普通砖   | 0.58    | 0.76 | 0.93 |
| 80               | 钢化玻璃  | 0.01    | 0.08 | 0.15 |
| 80               | 聚氨酯泡沫 | 0.00    | 0.00 | 0.03 |
| 95               | 木材    | —       | —    | —    |
| 95               | 普通砖   | —       | —    | —    |
| 95               | 钢化玻璃  | 0.15    | 0.28 | 0.35 |
| 95               | 聚氨酯泡沫 | 0.03    | 0.11 | 0.22 |

注： —表示泄漏电流超过额定电流值，高压加不上去，单位为 mA。

## (2) 改进设备的建立

所用的试验设备主要由试验冷库、高压电场保鲜试验台、高压直流电源及控制器等部分组成。高压电场处理果蔬保鲜设备的主体部分为电场处理保鲜试验台。试验台采用钢化玻璃制作的主体支撑框架，两侧钢化玻璃横截面为 40cm × 120cm，底和顶钢化玻璃横截面为 40cm × 90cm，内侧自下而上根据试验需要黏合（高强度玻璃胶）若干支撑点，用于放置不锈钢极板，距离分别为 10cm、15cm 和 30cm，从而在通入 30kV 高压时，可产生 100kV/m、200kV/m 和 300kV/m 的电场。在贮藏试验过程中，试验台整体置于试验冷库内（内部空间尺寸为 3m × 3m × 3.2m），冷库内部温度、湿度可根据试验要求来调节。该设备的电场发生部分包括高压发生器（天津东文高压电源厂生产的 DW-N303-1AC 型高压电源）和控制器、放电接地体、高压电线及绝缘套筒等部件。

## (3) 设备产生高压电场及其稳定性试验

如表 1-2 所示，从试验结果可以看出，改进设备在试验高电压范围内（10 ~ 60kV），均可稳定地加入所需的高压电场，可实现持续 30d 以上不断电，从而可保证试验顺利进行。但原设备却只能在较低高电压（例如 10kV）较短时间内（最长 5d）持续加高压电场，而升高电压持续加高电压的时间则大大缩短。例如 60kV 的高电压，只能持续加 0.04d，这样的设备，则很难实现高