

高压脉冲电场影响果蔬介电特性试验与机理分析*

马飞宇 郭玉明

(山西农业大学工学院, 太谷 030801)

摘要: 以苹果为试材,进行高压脉冲电场预处理对其介电特性影响试验研究,分析获得脉冲电压、频率对介电特性的影响,并运用电磁场理论分析其影响机理。结果表明,苹果的等效电容、等效阻抗均随脉冲电压、脉冲频率的增大而减小;高压脉冲电场参数对果蔬介电特性有一定影响。

关键词: 苹果 高压脉冲电场 介电特性 影响规律 机理分析

中图分类号: S125; Q64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0177-04

Influence Experiment and Mechanism Analysis of High-voltage Pulsed Electric on Dielectric Properties of Fruits and Vegetables

Ma Feiyu Guo Yuming

(College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Taking apples as experimental materials, effect of pretreatment of high-voltage pulsed electric field on dielectric properties was studied. The effect of pulse voltage, frequency on dielectric properties was analyzed. The theory of electromagnetic field was used to analyze the influence mechanism. The results showed that equivalent capacitance and equivalent impedance of apple were both decreased when the pulse voltage and the pulse frequency increased. The parameters of high-voltage pulsed electric field had a certain effect on dielectric properties. The obtained conclusion could provide reference for further research on the effect of electrical parameters on dielectric properties for different fruits and vegetables, and also parameters optimization of high voltage pulse electric field pretreatment.

Key words: Apple High-voltage pulsed electric field Dielectric properties Influence rule Mechanism analysis

引言

经高压脉冲电场预处理后的干燥脱水技术可增大果蔬的细胞孔隙,显著缩短复水时间,提高果蔬的复水系数,尤其可以提高果蔬物料的干燥速率和渗透速率,降低脱水干燥能耗,同时提高果蔬脱水后的品质^[1-4]。近几年,学者们对高压脉冲电场预处理对果蔬真空冷冻干燥脱水的影响进行了较为系统的研究分析^[5-7]。在探索低能耗冷冻干燥加工工艺过程控制参数优化中需研究电场参数对果蔬介电特性

的影响,为此本文进行高压脉冲电场参数对果蔬介电特性的影响试验研究,在此基础上运用电磁理论进行相关影响机理分析。

1 试验

1.1 试验装置与方法

1.1.1 材料与仪器设备

选取太谷本地新鲜成熟、无机械损伤红富士苹果为试材。所用设备有:3532-50型LCR测试仪;美国BTX公司ECM830高压脉冲电场发生器,其脉

收稿日期:2013-06-25 修回日期:2013-07-10

*国家自然科学基金资助项目(30771242,31171450)

作者简介:马飞宇,硕士生,主要从事生物物料电磁特性研究,E-mail:mafeiyu624@163.com

通讯作者:郭玉明,教授,博士生导师,主要从事农业生物力学与物料机械特性研究,E-mail:guoyuming99@sina.com

冲电压幅值、脉冲宽度和重复频率均可调节;电热恒温鼓风干燥箱(设定温度 80°C)。

1.1.2 试验方法与步骤

(1) 试验样品制作

取新鲜苹果洗净去皮,切成 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的片状样本,用聚乙烯薄膜密封保存待测。

(2) 高压脉冲电场预处理

用ECM830型高压矩形脉冲电场发生器对苹果样本进行处理,将样本置于电极为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的方形不锈钢平板间受脉冲电场作用。高压脉冲波形为单极矩形波,各工作参数的调节范围为:脉冲电压 $5 \sim 3\,000\text{ V}$,脉冲宽度 $10\ \mu\text{s} \sim 10\text{ s}$,脉冲间隔

$100\text{ ms} \sim 10\text{ s}$,脉冲个数 $1 \sim 99$ 。

(3) 介电特性的测定

LCR测试仪的测试电压为 1 V ,测试频率范围为 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6\text{ Hz}$,选择60个频率测试点对苹果进行介电特性的测定,选取部分频率测试点下苹果的电学参数进行观察与分析,发现高压脉冲电场预处理对苹果介电特性的影响存在一定规律。

1.2 试验结果与分析

1.2.1 脉冲电压与介电特性的关系

对苹果分别施加脉冲电压为 150 、 300 、 450 、 600 、 750 和 900 V 的电场后,对苹果的介电特性进行测量,测量结果如图1所示。

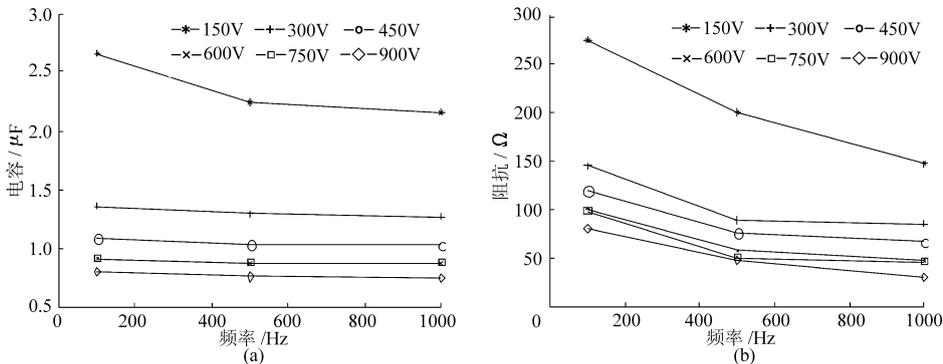


图1 不同脉冲电压苹果介电特性随测试频率变化规律

Fig. 1 Dielectric properties changing with electric field frequency under different pulse voltages

(a) 电压电容特性 (b) 电压阻抗特性

图1a表明,相同测试条件下,脉冲电压越大,苹果的等效电容越小;各脉冲电压组的等效电容变化趋势基本相同,均随着测试频率的增加而减小。图1b表明,同一测试条件下,脉冲电压越大,苹果的等效阻抗越小;各脉冲电压组的苹果等效阻抗均随测试频率的增加,整体呈下降趋势。在测试频率 $100 \sim 500\text{ Hz}$ 范围内,图1b中各脉冲电压下苹果等

效阻抗的减小趋势较图1a中各脉冲电压下苹果等效电容的减小趋势显著,因此,苹果的等效阻抗对高压脉冲电场的敏感性高于等效电容。

1.2.2 脉冲频率与介电特性的关系

对苹果分别施加脉冲频率为 10 、 15 、 45 、 60 、 90 和 180 Hz 的电场后,对苹果的介电特性进行测量,测量结果如图2所示。

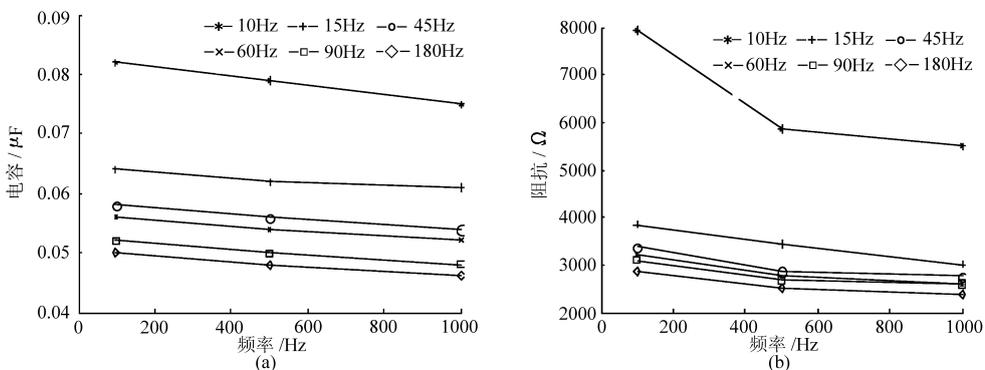


图2 不同脉冲频率下苹果介电特性随测试频率变化规律

Fig. 2 Dielectric properties changing with electric field frequency under different pulse frequencies

(a) 频率电容特性 (b) 频率阻抗特性

图2所示,同一测试条件下,脉冲频率越大,苹果的等效电容、等效阻抗越小;各脉冲频率组的等效电容、等效阻抗变化趋势基本相同,均随脉冲频率的

增大呈减小趋势,且苹果的等效阻抗对高压脉冲电场的敏感性高于等效电容。

2 机理分析与讨论

高压脉冲电场作用于果蔬,不断变化的脉冲电场产生磁场,磁场对生物作用机理的研究尚处于假设阶段,但从物质的基本物理性质考虑,构成生物体的分子或原子及其更为基本的物理单元都具有磁性和极性^[8]。因此,外加电磁场必然会对生物产生影响或作用,且不同强度的外加电磁场对生物的影响程度对于果蔬物料介电特性的影响有较多因素,在此主要考虑电场频率和电压。

2.1 脉冲电压

果蔬介质由分子组成,且是一个带电粒子系统,其内部存在不规则而迅速变化的微观电场,分子对外表现为电中性,在热平衡时各分子内部的粒子运动一般没有确定的关联,因此,无外电场作用时介质内部一般不出现宏观的电荷电流分布,其内部的宏观电磁场为零;若施加外电场,介质中的带电粒子受场的作用,正负电荷发生相对位移,发生极化现象。果蔬经过高压脉冲电场作用,置于电场的果蔬介质有极分子将形成定向极化,即由杂乱排列变为定向排列,此过程产生束缚电荷^[9],介质中电场就是通过束缚电荷激发的。可表示为

$$D = \varepsilon E \quad (1)$$

式中, D 为在高斯定理中将通过任意闭合曲面的电位移量,定义为该闭合面所包围的自由电荷的代数和; ε 为介质的电容; E 的源是总电荷分布,它是介质中的总宏观电场强度。即当果蔬施加高压脉冲电场时,果蔬介质中的电荷受到电场脉冲强度的作用,介质的电容随着脉冲电压的增大而减小。

细胞膜是电磁场与细胞作用的初始位点,随后触发的一切反应都由细胞膜介导^[10]。同时由于细胞内外介电特性的差别,细胞膜成为外加电磁场的主要作用点,细胞内外离子的运动产生强电场,引起电荷分离,当施加脉冲电场时,细胞内离子运动的剧烈程度明显增强,随后减弱,若脉冲作用的时间足够长,细胞内离子运动的剧烈状态刚好恢复到初始状态时,下一个脉冲电场又作用到细胞,再次引起离子的剧烈运动,经过一段时间后,细胞内的离子不停的运动、缓冲,导致离子通道构象发生变化,细胞膜两端积累的电荷使跨膜电压提高,从而加强了电荷引力对细胞膜的挤压作用^[11],当施加脉冲电场的脉冲电压大于细胞膜的跨膜电压时,细胞膜变为无序状态,膜被破坏^[12],形成隙孔,此时细胞膜通透性增加,电解质外渗,质体外的导电性增加,从而使细胞膜阻抗下降,果蔬介质的等效阻抗下降。

试验中高压脉冲电场发生器两平板间的电容计

算公式为

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \varepsilon C_0 \quad (2)$$

式中 S ——平行板面积

ε_0 ——真空介电常数

C_0 ——电极测量池系数

d ——两平板间距

充满介质的理想平行板电导率计算公式为

$$\sigma = GU \frac{\varepsilon_0}{C_0} \quad (3)$$

式中 σ ——电导率 G ——电导

U ——高压脉冲电场发生器两平板间电压

当果蔬施加的脉冲电压增大时,果蔬介质的电导及电导率也随之增加,而电导率是反应介质传导电流的能力,电导率越大则导电性能越强,反之越小,因此,在脉冲电压的作用下,果蔬介质间的导电性增加,等效阻抗下降。

2.2 脉冲频率

高压脉冲电场作用果蔬时,在脉冲频率的作用下,置于电磁场中的果蔬细胞介质的带电粒子沿电场方向产生偶极矩,形成偶极子,此过程称为极化现象^[13]。极化发生过程中,细胞中的偶极子会随着脉冲电场的转动而取向,这样电磁场和偶极子相互作用,能量就在电磁场与电荷之间转移,而在转移过程中能量是守恒的。

设脉冲电场作用于果蔬介质空间某区域 V ,以 f 表示电场对果蔬介质中电荷作用力密度, v 表示电荷运动速度, ω 表示电场力所做的功,则电场对电荷系统所作用的功率可表示为

$$\int_{\infty} f v dV = - \frac{d}{dt} \int_{\infty} \omega dV \quad (4)$$

式(4)表示电场对电荷所作的总功率等于电场的总能量减小率。即当高压脉冲电场作用于果蔬介质时,随着脉冲频率的增大,电磁场使介质中的偶极子发生转向,由于果蔬介质的黏滞性,偶极子无法赶上频率较高的电场,电场能量就会被吸收,从而导致电场对电荷所做的功转化为电场能量的损耗,电场总能量减小,发生松弛损耗^[14],这样果蔬细胞介质存储能量降低,等效电容减小,且等效电容随脉冲频率的增大而减小。

交变电场作用下,由于外加电场频率不同,细胞结构、所处温度不同,果蔬介质在电场作用下介电行为也不同。高压脉冲电场作用果蔬细胞时,细胞内离子运动的剧烈程度在脉冲电场作用的瞬间明显增强,随后减弱。经一段时间,果蔬细胞内的离子不断加速,使其速度增大^[15]。对于带电粒子系统,把电

磁作用力应用到某粒子上,得到一个带电粒子受电磁场的作用力——洛伦磁力,由于速度的增大,经脉冲电场处理果蔬介质细胞中的粒子所受的洛伦磁力随着脉冲频率的增大而增大,磁通密度增大。当磁场发生变化时,果蔬介质内形成的闭合线圈中有感应电流通过,由于电流之间的相互作用力是通过磁场传递,即磁通密度的变化影响通过果蔬介质生物细胞内部结构的电流。高压脉冲电磁波作用下感应电流密度 J 可表示为

$$J = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)E = j\omega\epsilon_c E \quad (5)$$

式中, ϵ_r 为果蔬相对介电常数(为脉冲频率的函数), ϵ_c 为等效复介电常数^[16], j 表示生物细胞内自由电荷的电流密度。由式(5)可知, $j\omega\epsilon_c$ 的模值随脉冲频率的增大而增大,在 E 幅值一定的情况下, J 幅值随

脉冲频率增大而增大,当脉冲频率增大到一定值时,由于果蔬介质的电阻是有限的正值,会以热能的形式消散介质内部功率,导致果蔬介质等效阻抗减小,果蔬介电常数减小。

3 结 论

(1) 反映苹果介电特性的等效电容、等效阻抗均随脉冲电压、脉冲频率的增大而减小。

(2) 相同的脉冲电压、脉冲频率条件下,苹果的等效电容、等效阻抗均随测试频率的增大而减小。

(3) 测试频率在 100 ~ 500 Hz 时,苹果的等效阻抗对高压脉冲电场预处理试验的敏感性高于等效电容。

参 考 文 献

- 1 Wang Ying, Guo Yuming. Effect of high pulsed electric field pretreatment on dielectric constant of apples[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(3): 1 170 ~ 1 174.
- 2 Nabil G, Fatine M, Nikolai L, et al. Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 266 ~ 272.
- 3 Alexander A, Volker H, Dietrich K. Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2000, 1(2): 135 ~ 149.
- 4 Dietrich K, Alexander A, Mohamed N E. Processing concepts based on high intensity electric field pulses[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2001, 12(3 ~ 4): 129 ~ 135.
- 5 郭玉明,姚智华,崔清亮,等. 真空冷冻干燥过程参数对升华干燥能耗影响的组合试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 180 ~ 184.
Guo Yuming, Yao Zhihua, Cui Qingliang, et al. Combined experimental study on the effects of the operational parameters on energy consumption of sublimation-drying during vacuum freeze-drying[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 180 ~ 184. (in Chinese)
- 6 刘振宇,郭玉明,崔清亮. 高压矩形脉冲电场对果蔬干燥速率的影响[J]. *农机化研究*, 2010, 32(5): 146 ~ 150.
Liu Zhenyu, Guo Yuming, Cui Qingliang. The effect of rectangular high-pulsed electric field on drying rate of fruits and vegetables[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(5): 146 ~ 150. (in Chinese)
- 7 崔清亮,郭玉明,郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 91 ~ 96.
Cui Qingliang, Guo Yuming, Zheng Decong. Design and test of on-line measurement system for the moisture content of the freeze-drying materials[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 91 ~ 96. (in Chinese)
- 8 朱杰. 磁场的生物学效应及其机理的研究[J]. *生物磁学*, 2005, 5(1): 26 ~ 29.
Zhu Jie. Study on the biological effect of magnetic fields and its possible mechanisms. [J]. *Biomagnetism*, 2005, 5(1): 26 ~ 29. (in Chinese)
- 9 胡海根. 基于电场理论水果电无损检测机理的研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2005.
Hu Haigen. Research on nondestructive inspection mechanism of fruit's dielectric property based on electric field theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2005. (in Chinese)
- 10 李滚,庞小峰. 电磁场曝露对生物组织电磁特性的影响[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2011, 38(7): 604 ~ 610.
Li Gun, Pang Xiaofeng. Effects of electromagnetic field exposure on electromagnetic properties of biological tissues[J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2011, 38(7): 604 ~ 610. (in Chinese)
- 11 Long W, Yukiharu O, Akio T. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(2): 274 ~ 280.
- 12 Asami K. Effects of membrane disruption on dielectric properties of biological cells[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(21): 4 656 ~ 4 663.
- 13 肖华娟,严萍,牟群. 强脉冲电场致细胞膜电穿孔的实验研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2005, 22(4): 462 ~ 466.
Xiao Huajuan, Yan Ping, Mou Qun. The experimental study of electroporation of cell membrane induced by pulsed electric field of high intensity[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 22(4): 462 ~ 466. (in Chinese)

服强度分别为 6.9467×10^4 Pa、 6.7520×10^4 Pa、 7.0295×10^4 Pa, 平均值为 6.9094×10^4 Pa, 数据与模型的预测值较为接近, 因此试验所得数学模型和最佳工艺参数组合可用于指导马铃薯的真空冷冻干燥生产工艺。

3 结论

(1) 利用中心组合正交旋转设计试验方案, 获得了脉冲强度、脉冲时间、脉冲个数 3 个因子对马铃薯屈服强度的响应模型。模型的显著性 P 值达

0.000 1, 决定系数为 0.879 9, 屈服强度的响应面模型极其显著且具有较高的拟合精度。

(2) 利用 SAS 软件对模型作了岭脊分析, 结果表明试验处理的最佳参数组合为: 脉冲强度 1 282 V/cm, 脉冲时间 194 μ s, 脉冲个数 59 个。

(3) 利用 SAS 软件对模型作了响应面图形分析, 分析结果表明用较长的脉冲时间、较大的脉冲强度、较多的脉冲个数对马铃薯样品进行预处理, 测得的屈服极限比较低, 最低屈服极限为 6.79×10^4 Pa, 这个趋势与岭脊分析的结果一致。

参 考 文 献

- 刘振宇, 郭玉明, 崔清亮. 高压矩形脉冲电场对果蔬干燥速率的影响[J]. 农机化研究, 2010, 32(5): 146 ~ 151.
Liu Zhenyu, Guo Yuming, Cui Qingliang. The effect of rectangular high-pulsed electric field on drying rate of fruits and vegetables [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 146 ~ 151. (in Chinese)
- 刘振宇, 郭玉明. 高压矩形脉冲电场果蔬预处理微观结构变形机理的研究[J]. 农产品加工, 2009(10): 22 ~ 25.
Liu Zhenyu, Guo Yuming. Study on influence of rectangular high-pulsed electric field to fruits and vegetables pre-treatment microscopic structure[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2009(10): 22 ~ 25. (in Chinese)
- 郭玉明, 姚智华, 崔清亮, 等. 真空冷冻干燥过程参数对升华干燥能耗影响的组合试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 180 ~ 184.
Guo Yuming, Yao Zhihua, Cui Qingliang, et al. Combined experimental study on the effects of the operational parameters on energy consumption of sublimation-drying during vacuum freeze-drying[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(4): 180 ~ 184. (in Chinese)
- 王维琴, 盖玲, 王剑平. 高压脉冲电场预处理对甘薯干燥的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 154 ~ 156.
- Bazhal M I, Ngadi M O, Raghavan V G S. Influence of pulsed electroporation on the porous structure of apple tissue[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(1): 51 ~ 57.
- Kamst G F, Bonazzi C, Vasseur J, et al. Effect of deformation rate and moisture content on the mechanical properties of rice grain [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 145 ~ 151.
- 程绪铨, 黄之斌, 唐福元, 等. 压缩速度与压缩方位对大豆籽粒压缩特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(2): 10 ~ 14.
Cheng Xuduo, Huang Zhibin, Tang Fuyuan, et al. Study on influence of compressive velocity and direction on compressive characteristics of soybean particles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(2): 10 ~ 14. (in Chinese)
- 吴亚丽. 高压脉冲电场预处理对果蔬生物力学性质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2012.
Wu Yali. Study effect of high pulsed electric field on biomechanical properties of fruits and vegetables [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 段传人, 王伯初, 王凭青. 水稻茎秆的结构及其性能的相关性[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(11): 38 ~ 40.
Duan Chuanren, Wang Bochun, Wang Pingqing. The relationship between the structure and the property of rice stem[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(11): 38 ~ 40. (in Chinese)
- 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 54 ~ 65.
- 张邦建, 李长文, 梁慧珍. 应用 SAS 软件优化分析影响固态发酵白酒杂醇油的生成因素[J]. 酿酒科技, 2011(5): 46 ~ 49.
Zhang Bangjian, Li Changwen, Liang Huizhen. Application of SAS software to analyze the factors influencing the yield of fusel oil in liquor production by solid fermentation[J]. Liquor-making Science & Technology, 2011(5): 46 ~ 49. (in Chinese)

(上接第 180 页)

- 盛俊杰, 陈花玲, 李博, 等. 频率对 VHB4910 介电弹性体材料介电性能的影响[J]. 功能材料与器件学报, 2011, 17(6): 549 ~ 554.
Sheng Junjie, Chen Hualing, Li Bo. Research of frequency dependence on dielectric properties of VHB4910 dielectric elastomer [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2011, 17(6): 549 ~ 554. (in Chinese)
- 付小芮. 电磁场对生物体细胞影响机理的理论分析及建模[D]. 昆明: 云南师范大学, 2009.
Fu Xiaorui. Biological effects of electromagnetic fields on cells theoretical analysis and model [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2009. (in Chinese)
- 王海彬, 牛中奇. 人体对电磁脉冲吸收剂量的仿真研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 259 ~ 264.
Wang Haibin, Niu Zhongqi. Specific absorption and currents induced in human body for exposure to electromagnetic pulses [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 259 ~ 264. (in Chinese)