

高压脉冲电场对马铃薯压缩力学性质及变形过程影响*

武新慧 郭玉明

(山西农业大学工学院, 太谷 030801)

摘要: 以马铃薯为研究对象,采用细观图像分析与力学性质测试组合系统,研究了马铃薯压缩微观结构变形、宏观力学性质、变形破坏过程,运用SAS软件对试验数据进行了处理与分析,得到了马铃薯屈服强度与高压脉冲电场参数的拟合方程以及最优参数。

关键词: 马铃薯 高压脉冲电场 细观图像分析 压缩力学性质 变形过程

中图分类号: Q66; S532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0181-05

Effect of High Pulsed Electrical Filed on Properties of Compressive Mechanical and Deformation Process of Potato

Wu Xinhui Guo Yuming

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

Abstract: Potato was chosen as the subject of the compression experiment, and the microstructure deformation, microscopic mechanical properties, deformation and failure process were gained by the system of microscopic image and mechanical test. The fitting equation and the optimal parameters of yield strength and PEF parameter were analyzed and further optimized by SAS software. The result could provide a theoretical basis for optimizing the technologic parameter of freeze-drying and the design of processing equipment.

Key words: Potato High pulsed electrical field Microscopic image analysis Properties of compressive mechanical Deformation process

引言

高压脉冲电场预处理技术可以实现果蔬细胞的可逆击穿^[1-2],因此可以在保证果蔬干燥品质的同时,降低冻干能耗,缩短冻干时间^[3-4]。高压脉冲电场预处理对果蔬压缩变形破坏过程的试验研究可为高压脉冲电场预处理在果蔬干燥方面的应用提供理性支持。

国内外学者在果蔬的压缩变形研究上进行了许多有益的探索。Bazhal等^[5]研究了经高压脉冲电场预处理后,苹果的压缩力学性质。Kamst等^[6]进行了稻米的应力松弛试验,研究了温度、压缩速度和含

水率对弹性模量的影响。程绪铎等^[7]研究了压缩速度与压缩方位对大豆籽粒压缩特性的影响。但在农产品加工新技术新装备研发应用中,需要对加工物料的力学性质进行深入的研究,为此有的学者运用了细观图像分析方法。吴亚丽^[8]用扫描电子显微镜获得了苹果的细观结构图像,研究了高压脉冲电场处理后果蔬细观结构的变化情况。段传人等^[9]对不同品种水稻茎秆的力学特性进行了测试,然后结合水稻茎秆显微照片,研究了水稻茎秆细观结构和力学性能的关系。

本文运用微观图像分析与力学测试组合分析测试系统,研究马铃薯压缩力学性质及变形破坏过程。

收稿日期: 2013-06-25 修回日期: 2013-07-11

* 国家自然科学基金资助项目(30771242,31171450)

作者简介: 武新慧,硕士生,主要从事农业生物力学研究,E-mail: wuxinhui0321@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

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

1.1.1 力学测试系统

选取太谷本地产的新鲜马铃薯为研究对象。利用 5544 型电子万能材料试验机(美国 INSTRON 公司)对马铃薯进行压缩试验。该试验机的最大载荷为 2 kN,可以满足生物材料力学测试要求,压头直径为 15 mm,压缩速度为 2 mm/min,计算机自动完成数据采集。

1.1.2 图像采集系统

利用 CMM-15E 型电子显微镜(上海光学仪器厂)采集细观动态图像,图像以 320 × 240 分辨率、24 帧/s 自动存储于计算机中。

1.1.3 高压脉冲电场

选用 ECM830 高压脉冲电场发生器(美国 BTX 公司)对马铃薯样本进行预处理。脉冲波形为矩形波,处理室为方形,电极为 20 mm × 20 mm 方形不锈钢板。脉冲强度调节范围为 5 ~ 3 000 V/cm,作用时间范围为 10 ~ 200 μs,脉冲个数调节范围为 1 ~ 99 个。

1.2 试验方法

选取成熟、完整、新鲜的马铃薯,去皮后切成 10 mm × 10 mm × 15 mm 矩形样本。为防止样本褐变,将已切好样本和待切样本均用聚乙烯薄膜密封保存。用高压脉冲电场对样本进行预处理,之后用电子万能材料试验机进行压缩试验,同时用电子显微镜采集动态图像(图 1)。当图像中所有细胞出现明显的细胞渗水现象时(图 2),认为马铃薯样品屈服,记录该时刻的载荷,计算屈服强度。

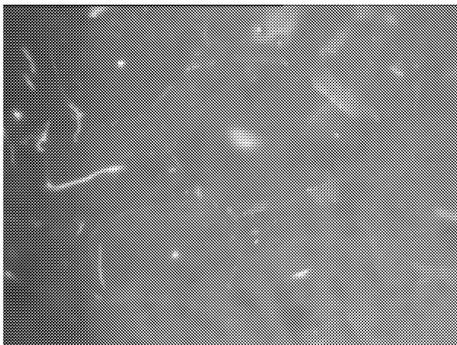


图 1 马铃薯屈服前细观结构

Fig.1 Microstructure before potato yield

试验结束后,计算机中自动生成压缩载荷-压缩位移曲线(如图 3)。

1.3 试验设计

为得到高压脉冲电场预处理果蔬的最优参数组合,选取脉冲强度、脉冲时间和脉冲个数 3 个因子对

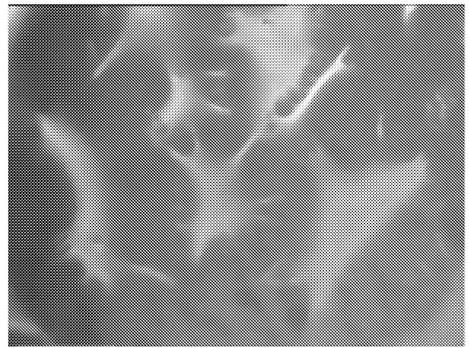


图 2 马铃薯渗水(屈服)时的细观结构

Fig.2 Micromechanism when the potato yield

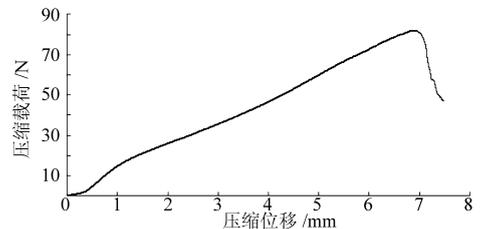


图 3 马铃薯压缩载荷-压缩位移曲线

Fig.3 Compressive load - compressive displacement curve of potato sample

试样进行预处理,然后用力学测试系统测其屈服强度,用图像采集系统采集动态图像。

为提高估计精度和数值计算稳定性,试验设计方案选取中心组合正交旋转设计,可同时满足正交性和可旋转性^[10]。

试验因子水平和设计编码如表 1 所示。运用 SAS 软件的 ADX 界面为试验执行一个中心组合正交旋转设计,设计方案如表 2 所示,其中 $x_1 \sim x_3$ 表示各因素真实值, $X_1 \sim X_3$ 表示编码值。

表 1 试验因子水平

Tab.1 Coding values and levels of test factors

编码	因素		
	脉冲强度 $x_1/V \cdot cm^{-1}$	脉冲时间 $x_2/\mu s$	脉冲个数 $x_3/个$
-1.682	5	10	1
-1	410	50	20
0	1 000	105	50
1	1 595	160	80
1.682	2 000	200	99

2 试验数据处理及分析

2.1 回归模型的建立

利用 SAS 软件的 rsreg 过程对试验结果进行回归分析,结果如表 3 ~ 5 所示。

由表 3 可知,在 0.05 水平上 X_1 、 X_3 、 X_1^2 和 X_3^2 的系数显著,其余不显著。由表 4 可知马铃薯屈服强度线性项的 P 值和决定系数分别小于 0.000 1 和 0.630 5,显著且具有解释变异 63.05% 的能力,交

表 2 中心组合正交旋转设计

Tab.2 Orthogonal and rotatable central composite design

试验序号	X_1	X_2	X_3	屈服强度 Y/Pa
1	-1	-1	-1	1.3596×10^5
2	-1	-1	1	1.2388×10^5
3	-1	1	-1	1.2376×10^5
4	-1	1	1	9.3021×10^4
5	1	-1	-1	8.7306×10^4
6	1	-1	1	7.8094×10^4
7	1	1	-1	7.4663×10^4
8	1	1	1	8.2819×10^4
9	-1.682	0	0	1.2899×10^5
10	1.682	0	0	7.6047×10^4
11	0	-1.682	0	8.0899×10^4
12	0	1.682	0	7.5072×10^4
13	0	0	-1.682	1.2831×10^5
14	0	0	1.682	8.1673×10^4
15	0	0	0	1.0089×10^5
16	0	0	0	8.8521×10^4
17	0	0	0	8.2773×10^4
18	0	0	0	7.9464×10^4
19	0	0	0	7.8992×10^4
20	0	0	0	8.3721×10^4
21	0	0	0	9.2066×10^4
22	0	0	0	7.5598×10^4
23	0	0	0	7.9374×10^4

表 3 响应面模型回归参数的估计和检验

Tab.3 Parameter estimates of regression and test of response-surface

回归变量	回归参数	t 值	$P_r > t $	编码参数
截距	20.484 4	9.54	<0.001	8.449 505
X_1	-0.009 9	-5.12	0.000 2	-2.982 093
X_2	-0.010 5	-0.50	0.627 6	-0.753 730
X_3	-0.152 8	-3.87	0.001 9	-1.464 764
X_1^2	2.029×10^{-6}	3.12	0.008 2	2.019 272
$X_1 X_2$	1.345×10^{-5}	1.36	0.197 1	1.274 846
X_2^2	-5.012×10^{-5}	-0.69	0.501 3	-0.452 356
$X_3 X_1$	3.009×10^{-5}	1.63	0.1269	1.470 719
$X_3 X_2$	-7.79×10^{-6}	-0.04	0.9693	-0.036 272
X_3^2	9.36×10^{-4}	3.49	0.0040	2.247 083

表 4 响应面模型回归分项检验

Tab.4 Itemized test of response-surface

回归项	平方和	R^2	F	$P_r > F$
线性项	56.769 3	0.630 5	22.75	<0.000 1
平方项	18.704 6	0.207 7	7.49	0.003 7
交叉项	3.752 0	0.041 7	1.50	0.260 1
总模型	79.225 8	0.879 9	10.58	0.000 1
失拟	5.748 4	1.149 7	1.82	0.216 1

叉项和平方项的显著性水平分别达 0.003 7 和 0.260 1,说明回归主要是线性关系和交互,总模型

的显著性 P 值达 0.000 1,决定系数为 0.879 9,说明屈服强度的响应面模型显著且具有较高的拟合精度,回归有效,模型可用。失拟的 P 值为 0.216 1,说明失拟不显著,中心点拟合较好^[11]。响应面方程为 $Y = 20.4844 - 0.0099X_1 - 0.0105X_2 - 0.1528X_3 + 2.029 \times 10^{-6}X_1^2 - 5.012 \times 10^{-5}X_2^2 + 9.36 \times 10^{-4}X_3^2 + 1.345 \times 10^{-5}X_1X_2 + 3.009 \times 10^{-5}X_1X_3 - 7.79 \times 10^{-6}X_2X_3$

表 5 为马铃薯屈服极限的响应面因子效应检验,3 个因子的 P 值分别为 0.000 1、0.293 2、0.003 1,按 P 值排序分别为 X_1 、 X_3 和 X_2 ,3 个因子对屈服强度的影响均显著,脉冲强度影响最大,其次是脉冲个数和脉冲时间。

表 5 响应面因子效应检验

Tab.5 Factorial effect test of response-surface

因子	平方和	均方	F	$P_r > F$
X_1	54.897 0	13.724 3	16.50	<0.000 1
X_2	4.604 6	1.151 1	1.38	0.293 2
X_3	23.361 2	5.840 3	7.02	0.003 1

2.2 回归模型的寻优

由表 6 响应面的典型分析可知,特征值有正有负,故响应面是鞍面;稳定点是鞍点,故不是最佳处理点。自稳定点可引出 3 个主轴,分别与特征值相对应,主轴方向由与特征值对应的特征向量决定,与最大特征值 0.692 7 对应的主轴方向是响应值增大最快的方向,与最小特征值 -0.252 7 对应的主轴方向是响应值减小最快的方向。由以上分析可知,该点不是最佳处理,需要用响应面岭脊分析方法寻找最佳处理点。

表 6 响应面的典型分析结果

Tab.6 Canonical analysis of response-surface

项目	X_1	X_2	X_3	特征根
第 1 特征根向量	0.675 5	0.123 5	0.727 0	2.927 3
第 2 特征根向量	0.692 7	0.231 6	-0.683 0	1.507 4
第 3 特征根向量	-0.252 7	0.964 9	0.070 9	-0.620 6
未编码驻点	0.666 7	0.102 0	0.108 6	
编码驻点	1.667.514 2	114.686 4	55.320 3	
驻点响应	7.337 5	驻点特征	鞍点	

由表 7、表 8 可知:试验范围内,编码搜索半径 1.0 处获得屈服强度最小响应值 6.874 4,岭脊点坐标 $x_1 = 1.281.9462 \text{ V/cm}$, $x_2 = 194.3870 \mu\text{s}$, $x_3 = 59.1388$ 个。编码搜索半径 1.0 处获得屈服强度最大响应值 1.469 47 Pa,岭脊点坐标 $x_1 = 201.1135 \text{ V/cm}$, $x_2 = 88.3238 \mu\text{s}$, $x_3 = 21.9472$ 个。较小的屈服强度有利于果蔬干燥过程中水分的渗出,因此 SAS 软件

分析出的最佳处理为脉冲强度 1 282 V/cm, 脉冲时间 194 μs, 脉冲个数 59 个。

表 7 响应面的最小岭脊分析结果

Tab.7 Estimated ridge of the minimum response

搜索半径	响应估计	标准误差	$x_1/V \cdot cm^{-1}$	$x_2/\mu s$	$x_3/\text{个}$
0	8.457 0	0.303 9	1 000.000 0	105.000 0	50.000 0
0.1	8.142 4	0.303 8	1 088.324 4	107.202 1	51.973 6
0.2	7.881 6	0.304 5	1 178.549 5	103.669 7	53.648 4
0.3	7.673 3	0.308 5	1 270.026 7	112.618 0	54.970 4
0.4	7.515 7	0.319 5	1 359.649 3	116.820 8	55.904 5
0.5	7.404 2	0.342 9	1 442.292 1	126.823 1	56.574 9
0.6	7.315 1	0.383 4	1 404.440 3	144.587 8	57.260 7
0.7	7.221 2	0.441 6	1 371.784 6	159.214 1	57.811 3
0.8	7.117 1	0.517 9	1 340.538 1	171.828 3	59.286 9
0.9	7.001 7	0.611 7	1 310.735 5	183.411 5	58.724 1
1.0	6.874 4	0.722 3	1 281.946 2	194.387 0	59.138 8

表 8 响应面的最大岭脊分析结果

Tab.8 Estimated ridge of the maximum response

搜索半径	响应估计	标准误差	$x_1/V \cdot cm^{-1}$	$x_2/\mu s$	$x_3/\text{个}$
0	8.457 0	0.303 8	1 000.000 0	105.000 0	50.000 0
0.1	8.826 3	0.303 9	913.660 3	102.974 4	47.779 6
0.2	9.251 1	0.304 6	829.201 0	101.078 1	45.357 4
0.3	9.731 9	0.308 4	746.452 3	99.282 1	42.770 5
0.4	10.269 1	0.319 1	665.229 0	97.566 0	40.049 0
0.5	10.863 3	0.341 2	585.352 5	95.915 2	37.216 8
0.6	11.514 5	0.378 6	506.660 2	94.318 6	34.293 0
0.7	12.223 1	0.433 5	429.007 9	92.767 4	31.293 1
0.8	12.989 3	0.506 6	352.269 5	91.254 8	28.229 1
0.9	13.813 1	0.597 2	276.336 1	89.775 1	25.111 2
1.0	14.694 7	0.705 3	201.113 5	88.323 8	21.947 2

从图 4~6 可以看出, 脉冲时间为 10 μs 时, 较

高的脉冲强度和较高的脉冲个数的组合有较低的屈服强度, 最低屈服强度为 8.44×10^4 Pa。脉冲时间为 105 μs 时, 较高的脉冲强度和较高的脉冲个数的

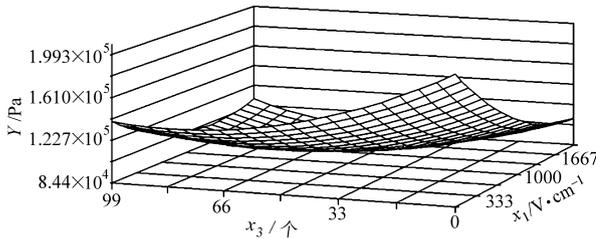


图 4 脉冲时间为 10 μs 时屈服强度对脉冲强度和脉冲个数的响应面及等值线

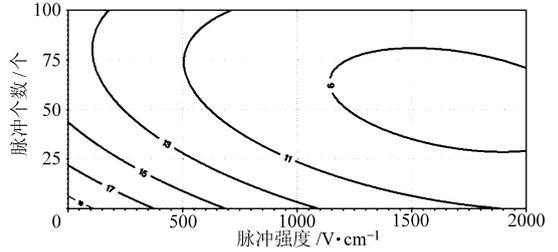


Fig.4 Response surface and isoline of pulse strength and pulse number on yield strength when pulse time is 10 μs

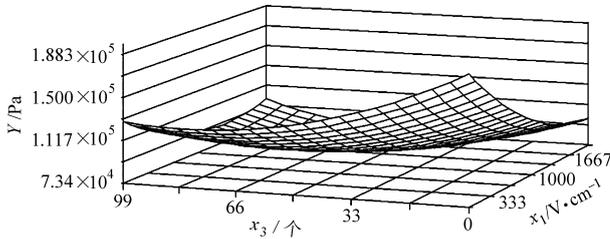


图 5 脉冲时间为 105 μs 时屈服强度对脉冲强度和脉冲个数的响应面及等值线

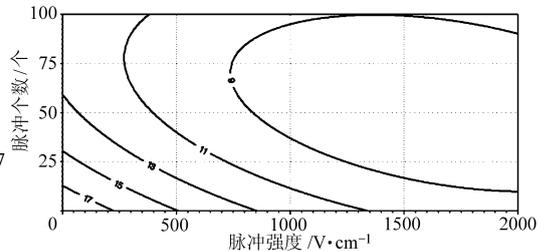


Fig.5 Response surface and isoline of pulse strength and pulse number on yield strength when pulse time is 105 μs

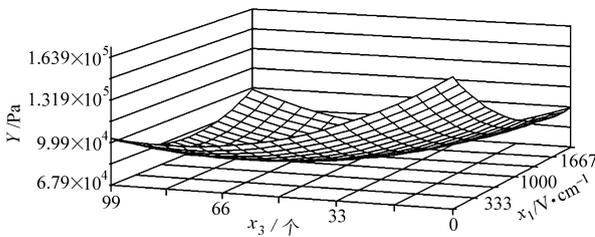


图 6 脉冲时间为 200 μs 时屈服强度对脉冲强度和脉冲个数的响应面及等值线

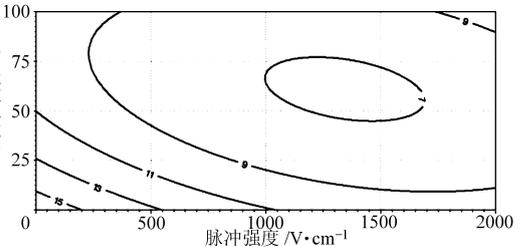


Fig.6 Response surface and isoline of pulse strength and pulse number on yield strength when pulse time is 200 μs

组合有较低的屈服强度, 最低屈服强度为 7.34×10^4 Pa。脉冲时间为 200 μs 时, 较高的脉冲强度和较高的脉冲个数的组合有较低的屈服强度, 最低屈服强度为 6.79×10^4 Pa。综上所述, 脉冲时间较长、脉冲强度较大、脉冲个数较多的处理有较低的

屈服强度, 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。

2.3 验证试验

在脉冲强度为 1 282 V/cm, 脉冲时间为 194 μs, 脉冲个数为 59 个的条件下将试验重复 3 次, 测得屈

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)