

高压脉冲电场对果蔬生物力学性质的影响

吴亚丽, 郭玉明*

(山西农业大学工程技术学院, 太谷 030801)

摘要: 高压脉冲电场预处理果蔬, 使其组织细胞在产生可逆击穿下, 进行真空冷冻干燥加工, 可大大地提高脱水速率和降低冻干能耗。但认识其作用机理和优化工艺参数, 需要进一步研究高压脉冲电场对果蔬材料生物力学性质的影响。该文研究了高压脉冲电场处理胡萝卜、白萝卜和苹果对其生物力学性质的影响, 通过测定其剪切强度、弹性模量、材料硬度值和压缩屈服极限, 并与对照组进行比较, 结果表明预处理后材料的剪切强度、弹性模量及屈服极限均比对照组降低, 胡萝卜的硬度值比对照组降低, 而白萝卜和苹果的硬度值则高于对照组。运用 SAS 软件对试验数据进行多元回归分析获得了高压脉冲电场预处理果蔬的工艺参数以及相关寻优模型, 为高压脉冲电场预处理工艺的确定提供参考。

关键词: 剪切强度, 弹性模量, 工艺, 高压脉冲电场, 果蔬, 硬度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.11.062

中图分类号: Q66, S125

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-11-0336-05

吴亚丽, 郭玉明. 高压脉冲电场对果蔬生物力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 336-340.

Wu Yali, Guo Yuming. Effect of high pulsed electric field on biomechanical properties of fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 336-340. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 有关高压电场预处理水果、蔬菜方面的研究大多集中在高压静电场对果蔬生物效应的影响方面, 涉及到种子萌发、幼苗生长、作物产量、果蔬保鲜、微生物发酵、食品消毒等方面。对此, 国内外研究取得了一定的进展。如方胜等^[1]的研究表明在一定条件下高压静电场能有效抑制番茄的呼吸作用, 保持硬度。张全国等^[2]发现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。徐树来^[3]对高压静电场处理后蒜薹的力学性能做了研究, 通过测定其力学特性, 发现其力学特性与新鲜样品(对照)基本一致。Dan Yang 等^[4]运用了 100 kV/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。Wang Jie 等^[5]研究了高压静电场对采后草莓质量的影响, 发现电场处理后的草莓在贮藏过程中呼吸作用降低, 2 种酶的活性及水果的硬度均降低缓慢。Bajgai T R 等^[6]研究了强度为 430 kV/m 的交流电和直流电对 Emblic (富含维生素 C 的水果) 处理 2 h 后的影响, 结果表明, 交流电场可以延长该水果的货架期, 并且电场处理后的水果要比未处理水果新鲜, 最大程度保留了营养

价值。可看出研究都是探讨高压静电场预处理果蔬对贮藏保鲜的作用, 包括对色泽、硬度、腐烂率、失水率等的影响, 但对高压电场处理后果蔬材料的生物力学性质的影响及相关研究很少, 针对高压矩形脉冲电场作用果蔬的研究就更少。但相关研究表明高压矩形波脉冲电场作用果蔬可有效地击穿果蔬组织细胞, 对干燥加工、提高干燥速率很有意义。近几年, 我们在高压矩形脉冲电场预处理果蔬对真空冷冻干燥脱水特性的研究方面进行了较为系统的研究^[7-12], 包括高压矩形脉冲电场预处理果蔬的作用机理对果蔬组织细胞可逆击穿下的工艺参数优化、对果蔬品质的影响、对真空冷冻干燥速率的影响等方面取得了进展, 但对于认识高压矩形脉冲电场作用果蔬细胞破坏的机理、解释对果蔬品质的影响以及指导在真空冷冻干燥预处理工艺中选择合理参数等都需要研究高压矩形脉冲电场作用果蔬时对果蔬材料生物力学性质的影响^[13]。鉴于此, 本文对高压脉冲电场预处理苹果、白萝卜、胡萝卜进行了剪切、压缩、硬度等相关生物力学性质测定试验及比较研究, 并在试验数据处理基础上进行了相关影响机理分析。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器设备

选取太谷本地产的胡萝卜、白萝卜和富士苹果为试验材料。采用美国 BTX 公司 ECM830 高压脉冲电场发生器, 其脉冲宽度、重复频率和脉冲的电压幅度均可调节, 脉冲波形为矩形波; 处理室形状为方形, 电极为 20 mm × 20 mm 方形, 电极间距可调; CMT6104 微机控制电子万能材料试验机和 Instron 材料性能试验系统, 测试时实现计算机自动控制和数据自动采集; DHG-9023A 型电热恒温鼓风干燥箱, 温度调节范围为 50~200℃; MP2002

收稿时间: 2009-04-18 修订时间: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(30771242); 山西省财政支持农业科技成果转化资金项目

作者简介: 吴亚丽(1984-), 女, 河南南阳人, 博士生, 研究方向为农业生物力学与物料机械特性。太谷 山西农业大学工程技术学院, 030801。

Email: sxauwyl@126.com

*通信作者: 郭玉明(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会高级会员(E041200306S), 主要从事农业生物力学与物料机械特性方面的研究。太谷 山西农业大学工程技术学院, 030801。

Email: guoyuming99@sina.com

电子天平，量程为 0~200 g，精度为 1%。

1.2 试验方法

1) 试样制作

取新鲜的胡萝卜、白萝卜、苹果，洗净去皮，切成长×宽×高=17 mm×17 mm×10 mm 的方块，每组取 6 个样本。放入无损塑料袋内密封，随即进行测定。

2) 高压脉冲电场处理

选取脉冲强度、作用时间和脉冲个数 3 个预处理参数，按照试验设计要求进行处理，处理与未处理样本同时进力学性质测定试验，另取样本用鼓风干燥箱测出含水率。

3) 生物力学性质测量

试验内容包括剪切、硬度、压缩 3 种力学试验。其中剪切试验的加载速度为 70 mm/min，通过计算机自动输出最大剪切载荷；硬度试验以 10 mm/min 的试验速度使硬度计缓慢压入试样 8 mm，压头形状及压入果蔬的深度均以果蔬硬度试验标准而定。试验结束后计算机自动输出试验过程中的最大载荷；压缩试验的加载速度为 10 mm/min，在试验过程中观察试样的变化，记录当试件被压渗出水分时的载荷 F_1 ，此时认为材料屈服。以上均可通过计算机自动采集数据直接得到力-变形曲线。试验重复 6 次，结果取平均值，以未处理为对照组。

1.3 试验设计

课题前期研究表明，在脉冲强度为 2 000 ~ 3 000 V/cm 时，由于脉冲强度过大，果蔬表层出现灼伤等明显电击穿现象，造成果蔬品质的损坏，所以本文只列出了脉冲强度在 5~2 000 V/cm 范围内的相关力学性质测试结果。由于脉冲强度的参数范围 (5~2 000 V/cm)

比较大，为了使试验结果不产生较大偏差，试验按照脉冲强度分 2 段区域进行，即试验 1 和试验 2，其具体参数选择范围见表 1。

表 1 试验因素选定范围

试验分类	试验 1	试验 2
脉冲强度/(V·cm ⁻¹)	5~1 000	1 000~2 000
作用时间/ μ s	10~200	10~150
脉冲个数	1~99	1~99

针对 ECM830 高压脉冲电场发生器，高压脉冲电场预处理的工艺参数采用 3 因素 5 水平二次正交旋转组合试验设计。因素水平及其编码见表 2 所示。

表 2 试验因子及水平编码表

水平及变量名称	试验 1			试验 2		
	脉冲强度 $X_1/(V \cdot cm^{-1})$	作用时间 $X_2/\mu s$	脉冲个数 $X_3/个$	脉冲强度 $X_1/(V \cdot cm^{-1})$	作用时间 $X_2/\mu s$	脉冲个数 $X_3/个$
自变量水平	-1.682	5	10	1	10	1
	-1	205	50	20	38	20
	0	500	105	50	80	50
	1	800	160	79	122	79
	1.682	1 000	200	99	150	99

2 试验结果

鼓风干燥箱测得胡萝卜、白萝卜、苹果的初始含水率分别为 87.77%、95.34%、83.95%。试验结果见表 3、表 4。

表 3 3 种果蔬生物力学性质试验值 (试验 1 水平与参数范围)

Table 3 Experimental value for biomechanical properties of three kinds of fruit-vegetable in test 1

序号	X_1	X_2	X_3	剪切强度 $S/(10^{-3} MPa)$			硬度值 $V/(10^{-3} MPa)$			弹性模量 $E/(10^{-3} MPa)$			屈服极限 $Y/(10^{-3} MPa)$		
				胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果
1	1	1	1	293	208	54	725	783	150	465	382	278	17	10	8
2	1	1	-1	383	230	88	774	1 097	215	488	342	293	18	10	9
3	1	-1	1	373	212	73	889	964	197	651	316	259	19	7	6
4	1	-1	-1	433	242	100	926	899	286	750	541	539	20	12	16
5	-1	1	1	432	212	45	1 273	1 006	369	1 791	1 685	856	55	28	24
6	-1	1	-1	460	255	67	1 218	996	392	1 255	1 749	736	47	32	19
7	-1	-1	1	366	216	43	1 222	830	362	2 005	1 264	974	97	25	34
8	-1	-1	-1	390	218	72	973	951	426	1 953	1 322	2 003	106	54	36
9	γ	0	0	312	217	110	929	1 163	186	598	375	242	18	12	8
10	$-\gamma$	0	0	402	219	54	1 619	964	485	1 073	2 086	1 293	91	47	18
11	0	γ	0	274	230	37	1 186	1 126	309	615	340	381	26	9	12
12	0	$-\gamma$	0	417	234	82	1 544	892	379	1 096	1 577	787	123	26	21
13	0	0	γ	306	224	43	1 413	1 085	228	537	396	303	31	12	10
14	0	0	$-\gamma$	389	242	108	1 052	766	442	2 348	1 597	2 120	118	47	48
15	0	0	0	406	221	56	897	947	276	945	423	441	49	11	16
16	0	0	0	348	211	55	868	951	293	1 027	456	456	42	16	22
17	0	0	0	423	229	67	810	1 052	313	1 008	482	433	32	11	9
18	0	0	0	436	216	46	884	837	281	997	453	435	43	9	8
19	0	0	0	456	237	35	814	974	307	991	482	441	32	10	6
20	0	0	0	449	230	58	888	1 087	283	982	514	450	20	10	9
21	0	0	0	464	226	68	849	1 071	317	965	470	442	37	12	9
22	0	0	0	400	219	53	832	1 155	315	972	470	450	26	12	16
23	0	0	0	419	235	45	829	1 094	299	1 008	511	457	43	11	12
对照				475	263	165	2 062	750	467	2 524	2 559	2 228	140	57	66

注： $\gamma=1.682$ 。

表4 3种果蔬生物力学性质试验值(试验2水平与参数范围)

Table 4 Experimental value for biomechanical properties of three kinds of fruit-vegetable in test 2

序号	X ₁	X ₂	X ₃	剪切强度 S/(10 ⁻³ MPa)			硬度值 V/(10 ⁻³ MPa)			弹性模量 E/(10 ⁻³ MPa)			屈服极限 Y/(10 ⁻³ MPa)		
				胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果	胡萝卜	白萝卜	苹果
1	1	1	1	281	235	40	1257	790	254	285	312	308	14	5	10
2	1	1	-1	290	239	77	1148	961	377	381	358	403	15	7	9
3	1	-1	1	325	243	30	1228	1030	423	286	398	538	15	5	8
4	1	-1	-1	295	243	54	1582	1044	484	423	438	344	17	10	8
5	-1	1	1	303	238	32	1175	974	473	752	330	283	13	8	8
6	-1	1	-1	331	247	70	1351	1121	477	718	391	312	17	9	7
7	-1	-1	1	412	238	39	1365	942	546	814	287	401	24	5	10
8	-1	-1	-1	423	251	43	1413	1007	589	662	277	301	31	9	8
9	γ	0	0	320	211	36	1071	870	431	454	292	411	19	8	8
10	-γ	0	0	355	247	41	1289	1280	387	351	227	201	12	6	6
11	0	γ	0	359	231	109	1535	1041	353	652	191	280	13	4	11
12	0	-γ	0	428	239	105	1560	1270	386	304	302	577	14	10	20
13	0	0	γ	329	212	53	1309	1141	341	388	268	235	16	7	8
14	0	0	-γ	429	212	129	1105	820	520	2033	1913	1007	98	28	22
15	0	0	0	320	250	102	986	981	377	332	386	255	7	8	11
16	0	0	0	333	234	101	992	1186	367	406	375	243	10	8	8
17	0	0	0	326	229	94	1003	992	386	386	356	234	9	8	7
18	0	0	0	321	216	91	995	1150	394	378	385	231	11	7	9
19	0	0	0	312	219	111	985	990	405	355	405	250	10	12	7
20	0	0	0	328	226	89	1067	994	385	349	391	265	7	8	5
21	0	0	0	316	230	123	1074	992	386	343	379	230	9	8	7
22	0	0	0	321	223	114	1126	987	384	347	377	261	10	6	7
23	0	0	0	324	223	99	1070	1065	376	390	392	237	10	8	9
	对照			477	260	138	2028	737	468	2583	2591	2167	129	56	60

在试验过程中,经高压脉冲电场处理后,试样有明显的发热、渗水增多、质构变软等现象,并伴有颜色的变化。作用时间越长,脉冲强度越大,这种现象愈明显。表明经高压矩形脉冲电场预处理的果蔬材料性质发生了明显变化。

由表3和表4所示结果可知,在预处理范围内,与对照组比较,胡萝卜的剪切强度平均降低了22.48%;硬度值平均降低了42.69%;弹性模量平均降低了48.44%;屈服极限平均降低了51.67%。白萝卜的剪切强度平均降低了11.47%;硬度值平均增加了37.59%;弹性模量平均降低了55.79%;屈服极限平均降低了48.67%。苹果的剪切强度平均降低了47.52%;硬度值在试验2范围内有所增大,最大增大了25.99%;弹性模量平均降低了47.19%;屈服极

限平均降低了57.94%。从试验数据结果总体上看,预处理后胡萝卜、白萝卜、苹果的剪切强度、弹性模量及屈服极限均比对照组降低,胡萝卜的硬度值比对照组降低,而白萝卜和苹果的硬度值则高于对照组。可见预处理后果蔬材料的相关力学性质与未处理相比有减小的趋势。

3 试验数据处理与参数优化

3.1 模型的建立与分析

利用SAS统计软件对试验结果进行回归分析,分别建立剪切强度 S 、硬度值 V 、弹性模量 E 及屈服极限 Y 的三元二次回归模型,并进行回归检验。再根据回归方程进行模拟寻优,从回归模型中推导、筛选出最佳的参数组合,得到的分析结果见表5。

表5 数学模型及模拟寻优结果

Table 5 Mathematical model and optimum results

名称	P值	自变量重要性	优化结果	二次回归模型
苹果剪切试验	0.0004 (**)	$X_3 > X_1 > X_2$	$S_{\text{苹果max}} = 114 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ (875 V/cm, 80 μs, 21个)	$S_{\text{苹果}} = 105.7420 - 0.0256x_1 - 0.0915x_2 - 1.2216x_3 + 0.0001x_1^2 - 0.0002x_1x_2 + 0.0003x_2^2 - 0.0001x_1x_3 - 0.00004x_2x_3 + 0.0075x_3^2$
试验1范围内	<0.0001 (**)	$X_1 > X_3 > X_2$	$V_{\text{苹果max}} = 470 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ (36 V/cm, 98 μs, 33个)	$V_{\text{苹果}} = 578.4940 - 0.2332x_1 - 0.7802x_2 - 2.0177x_3 + 0.00006x_1^2 - 0.0007x_1x_2 + 0.0025x_2^2 - 0.0009x_1x_3 + 0.0050x_2x_3 + 0.0048x_3^2$
苹果压缩试验	0.0002 (**)	$X_3 > X_1 > X_2$	$E_{\text{苹果max}} = 2049 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ (255 V/cm, 68 μs, 12个)	$E_{\text{苹果}} = 4169.8949 - 3.5675x_1 - 14.2167x_2 - 54.2938x_3 + 0.0010x_1^2 + 0.0088x_1x_2 + 0.0064x_2^2 + 0.0090x_1x_3 + 0.1093x_2x_3 + 0.2793x_3^2$

接上页

名称	P 值	自变量重要性	优化结果	二次回归模型
试验 1 范围内	苹果压缩屈服试验	0.0177 (*)	$X_3 > X_1 > X_2$ $Y_{\text{苹果 max}}=40 \times 10^{-3}$ MPa (382 V/cm、70 μ s、6 个)	$Y_{\text{苹果}} = 71.2761 - 0.0327x_1 - 0.3007x_2 - 0.8854x_3 + 0.000002x_1^2 + 0.0002x_1x_2 + 0.0004x_2^2 - 0.0002x_1x_3 + 0.0012x_2x_3 + 0.0068x_3^2$
	胡萝卜硬度试验	0.0138 (*)	$X_1 > X_2 > X_3$ $V_{\text{胡萝卜 max}}=1486 \times 10^{-3}$ MPa (61 V/cm、134 μ s、67 个)	$V_{\text{胡萝卜}} = 1541.6731 - 0.8272x_1 - 5.5793x_2 - 1.4380x_3 + 0.0010x_1^2 - 0.0047x_1x_2 + 0.0376x_2^2 - 0.0056x_1x_3 - 0.0163x_2x_3 + 0.0811x_3^2$
	胡萝卜压缩试验	0.0477 (*)	$X_1 > X_3 > X_2$ $E_{\text{胡萝卜 max}}=1963 \times 10^{-3}$ MPa (329 V/cm、73 μ s、7 个)	$E_{\text{胡萝卜}} = 2813.5117 - 0.9131x_1 - 5.1704x_2 - 27.3180x_3 - 0.0003x_1^2 + 0.0035x_1x_2 - 0.0076x_2^2 - 0.0095x_1x_3 + 0.0432x_2x_3 + 0.2130x_3^2$
	胡萝卜压缩屈服试验	0.0037 (**)	$X_1 > X_2 > X_3$ $Y_{\text{胡萝卜 max}}=129 \times 10^{-3}$ MPa (202 V/cm、34 μ s、36 个)	$Y_{\text{胡萝卜}} = 244.5145 - 0.1882x_1 - 1.3978x_2 - 1.5186x_3 + 0.00002x_1^2 + 0.0007x_1x_2 + 0.0029x_2^2 + 0.000002x_1x_3 + 0.0012x_2x_3 + 0.0103x_3^2$
	白萝卜压缩试验	0.0006 (**)	$X_1 > X_3 > X_2$ $E_{\text{白萝卜 max}}=2090 \times 10^{-3}$ MPa (13 V/cm、115 μ s、42 个)	$E_{\text{白萝卜}} = 3170.8444 - 3.7337x_1 - 8.4187x_2 - 25.0108x_3 + 0.0027x_1^2 - 0.0074x_1x_2 + 0.0447x_2^2 - 0.0007x_1x_3 + 0.0180x_2x_3 + 0.1785x_3^2$
白萝卜压缩屈服试验	<0.0001 (**)	$X_1 > X_3 > X_2$ $Y_{\text{白萝卜 max}}=57 \times 10^{-3}$ MPa (127 V/cm、77 μ s、21 个)	$Y_{\text{白萝卜}} = 116.2204 - 0.1392x_1 - 0.3406x_2 - 1.3242x_3 + 0.00006x_1^2 + 0.0002x_1x_2 + 0.0004x_2^2 + 0.0004x_1x_3 + 0.0023x_2x_3 + 0.0064x_3^2$	
试验 2 范围内	胡萝卜剪切试验	0.0100 (**)	$X_2 > X_1 > X_3$ $S_{\text{胡萝卜 max}}=440 \times 10^{-3}$ MPa (1261 V/cm、19 μ s、43 个)	$S_{\text{胡萝卜}} = 759.4813 - 0.1387x_1 - 4.1669x_2 - 2.6409x_3 - 0.00004x_1^2 + 0.0015x_1x_2 + 0.0095x_2^2 + 0.0009x_1x_3 - 0.0056x_2x_3 + 0.0131x_3^2$
	苹果剪切试验	0.0013 (**)	$X_1 > X_3 > X_2$ $S_{\text{苹果 max}}=116 \times 10^{-3}$ MPa (1 529 V/cm、130 μ s、16 个)	$S_{\text{苹果}} = -682.6792 + 0.9809x_1 + 0.5715x_2 + 1.4329x_3 - 0.0003x_1^2 + 0.0001x_1x_2 - 0.0027x_2^2 - 0.0003x_1x_3 - 0.0048x_2x_3 - 0.0122x_3^2$
	胡萝卜硬度试验	0.0010 (**)	$X_2 > X_3 > X_1$ $V_{\text{胡萝卜 max}}=1633 \times 10^{-3}$ MPa (1 499 V/cm、11 μ s、42 个)	$V_{\text{胡萝卜}} = 3297.5985 - 1.6116x_1 - 17.0414x_2 - 9.3246x_3 + 0.0005x_1^2 - 0.0016x_1x_2 + 0.1028x_2^2 - 0.0004x_1x_3 + 0.0342x_2x_3 + 0.0689x_3^2$
	胡萝卜压缩屈服试验	0.0337 (*)	$X_3 > X_2 > X_1$ $Y_{\text{胡萝卜 max}}=68 \times 10^{-3}$ MPa (1 475 V/cm、76 μ s、1 个)	$Y_{\text{胡萝卜}} = 104.0155 - 0.0163x_1 - 0.3058x_2 - 2.2571x_3 - 0.000004x_1^2 + 0.0002x_1x_2 - 0.0006x_2^2 + 0.0001x_1x_3 + 0.0004x_2x_3 + 0.0167x_3^2$
	白萝卜压缩屈服试验	0.0343 (*)	$X_3 > X_2 > X_1$ $Y_{\text{白萝卜 max}}=21 \times 10^{-3}$ MPa (1 515 V/cm、71 μ s、1 个)	$Y_{\text{白萝卜}} = -16.3547 + 0.0440x_1 + 0.1466x_2 - 0.4238x_3 - 0.00001x_1^2 - 0.00006x_1x_2 - 0.0007x_2^2 - 0.00003x_1x_3 + 0.0006x_2x_3 + 0.0030x_3^2$

注：X₁——脉冲强度，X₂——作用时间，X₃——脉冲个数。

从模型的回归结果可知：大部分模型的线性项和二次项显著，说明响应值的变化复杂，试验因子对响应值的影响不是简单的线性关系；各因素值和响应值之间的关系可以用回归模型来函数化表达。模型的交叉项都不显著，说明试验因子之间不存在交互效应。由于农产品加工领域涉及的物料对象在试验中影响因素的多样性和不确定性，部分模型拟合不恰当（95%置信区间），结果分析中没有考虑。

3.2 验证试验

在力学指标最大时对应的脉冲参数情况下进行试验验证，同一条件下，重复 6 次，结果如下：在试验 1 范围内，得到 $S_{\text{苹果}} = 116 \times 10^{-3}$ MPa, $V_{\text{胡萝卜}} = 1487 \times 10^{-3}$ MPa, $V_{\text{苹果}} = 469 \times 10^{-3}$ MPa, $E_{\text{胡萝卜}} = 1960 \times 10^{-3}$ MPa, $E_{\text{白萝卜}} = 2091 \times 10^{-3}$ MPa, $E_{\text{苹果}} = 2051 \times 10^{-3}$ MPa, $Y_{\text{胡萝卜}} = 130 \times 10^{-3}$ MPa, $Y_{\text{白萝卜}} = 58 \times 10^{-3}$ MPa, $Y_{\text{苹果}} = 40 \times 10^{-3}$ MPa。在试验 2 范围内，得到 $S_{\text{胡萝卜}} = 441 \times 10^{-3}$ MPa, $S_{\text{苹果}} = 116 \times 10^{-3}$ MPa, $V_{\text{胡萝卜}} = 1635 \times 10^{-3}$ MPa, $Y_{\text{胡萝卜}} = 67 \times 10^{-3}$ MPa, $Y_{\text{白萝卜}} = 20 \times 10^{-3}$ MPa。结果与回归模型寻优的理论值基本相符，优化参数是正确的。

4 结论

1) 在试验结果基础上，建立了相应力学指标与脉冲强度、作用时间和脉冲个数的二次回归模型，通过对正交回归模型的模拟寻优，获得最大剪切强度、最大硬度

值、最大弹性模量及最大屈服极限等试验因子对应的模拟结论。

2) 预处理结果与对照组比较，预处理后胡萝卜、白萝卜、苹果的剪切强度、弹性模量及屈服极限均比对照组降低，胡萝卜的硬度值比对照组降低，而白萝卜和苹果的硬度值则高于对照组。可见预处理后果蔬材料的相关力学性质与未处理相比有减小的趋势。

3) 试验结果表明，高压脉冲电场的脉冲强度、脉冲个数和作用时间3个预处理参数对果蔬的剪切强度、抗压强度、硬度及屈服极限等相关生物力学性质的改变均有影响。此外，预处理后果蔬的生物力学性质的改变与物料物性也有关系，其变化的显著程度可能取决于果蔬材料的微观结构。通过研究高压脉冲电场对果蔬生物力学性质的影响，能够认识高压脉冲电场作用对果蔬细胞的破坏机理，解释对果蔬品质的影响关系，指导真空冷冻干燥预处理果蔬加工生产实际中选择合适的工艺参数等提供技术支持。

[参 考 文 献]

[1] 方胜, 李里特. 静电场对番茄保鲜过程的影响[J]. 食品科学, 1997, 18(1): 5-9.
Fang Sheng, Li Lite. Experimental study on preservation performance of tomatoes by electrostatic field[J]. Food Science, 1997, 18(1): 5-9. (in Chinese with English abstract)

- [2] 张全国, 焦有宙, 张泽星, 等. 高压静电预处理技术对番茄保鲜的影响[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(6): 558—562.
Zhang Quanguo, Jiao Youzhou, Zhang Zexing, et al. Experimental study on preservation performance of tomatoes pretreated using electrostatic field[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21(6): 558—562. (in Chinese with English abstract)
- [3] 徐树来, 张守勤. 高压处理蒜薹力学特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 202—205.
Xu Shulai, Zhang Shouqin. Mechanical characteristics of garlic-stem after high pressure processing[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 202—205. (in Chinese with English abstract)
- [4] Dan Yang, Li Lite, Zhang Gang, et al. Effect of short time high voltage electrostatic field treatment on the post harvest physiology of cucumber[J]. Food Science, 2005, 26(10): 240—242.
- [5] Wang Jie, Li Lite, Ye Qing, et al. Effect of high voltage electrostatic fields on post-harvest quality of strawberry fruit[J]. Agricultural Sciences in China, 2005, 4(4): 294—298.
- [6] Bajgai T R, Hashinaga F, Isobe S. Application of high electric field (HEF) on the shelf-life extension of emblic fruit[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(3): 308—313.
- [7] 郭玉明, 姚智华, 崔清亮. 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. 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 with English abstract)
- [8] 刘振宇, 郭玉明. 高压脉冲电场预处理对果蔬脱水特性的影响[J]. 农机化研究, 2008, 31(12): 9—12.
Liu Zhenyu, Guo Yuming. The effect of high pulsed electrical field pretreatment to fruit and vegetable for dehydration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 12: 9—12. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘振宇, 郭玉明. 应用BP神经网络预测高压脉冲电场对果蔬干燥速率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 235—239.
Liu Zhenyu, Guo Yuming. BP neural network prediction of the effects of drying rate of fruits and vegetables pretreated by high-pulsed electric field[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 235—239. (in Chinese with English abstract)
- [10] Bazhal M I, Ngadi M O, Raghavan G S V, et al. Textural changes in apple tissue during pulsed electric field treatment [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 249—253.
- [11] 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.
Wang Weiqin, Gai Ling, Wang Jianping. The effect of high pulsed electrical field pretreatment to sweet potato for dehydration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 154—156. (in Chinese with English abstract)
- [12] Lebovka Nikolai I, Shynkaryk Nikolai V, Vorobiev Eugene. Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 606—613.
- [13] 曾新安, 陈勇. 脉冲电场非热灭菌技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 293—312.
Zeng Xin'an, Chen Yong. Technology of non-thermal sterilization by pulsed electric fields[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005: 293—312. (in Chinese)

Effect of high pulsed electric field on biomechanical properties of fruits and vegetables

Wu Yali, Guo Yuming^{*}

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

Abstract: In order to study the pre-processing of fruits and vegetables attacked by high pulsed electric field (HPEF) to a degree that the tissue cells are broken down reversibly, it is needed to further study the effects of the HPEF processing parameters on the biomechanical properties of fruits and vegetables in relative to the vacuum freeze-drying rate and energy consumption. The influential mechanism of HPEF on the biomechanical properties of carrots, white radishes and apples was investigated. Shear strength, elastic moduli, firmness and compression yield strength were selected as the material properties to evaluate effects of HPEF treatment. Test results showed that: the shear strength, compression yield strength and elastic moduli of the materials were lower than those of the control groups; the firmness of carrots was lower, while the firmness of the white radishes and apples was higher than that of the control groups. According to the multiple regression analysis with SAS software, the processing parameters of HPEF were determined and mathematical model was established, which provided technical supports for vacuum freeze-drying practice.

Key words: shear strength, elastic moduli, technology, high pulsed electric field, fruits and vegetables, firmness