

# 中压电场处理下苹果流变及质地特性的关联规律

李星恕<sup>1,2</sup>, 王 玮<sup>1</sup>, 王润泽<sup>1</sup>, 张重阳<sup>1</sup>, 刘家凯<sup>2</sup>, 熊秀芳<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100; 2. 陕西省农业装备工程技术研究中心, 杨凌 712100)

**摘 要:** 为了明确中压电场处理对苹果流变及质地特性之间关联的影响, 该研究检测了中压电场不同电场强度 (15~90 V/cm) 和温度 (30~70 °C) 处理后苹果的蠕变特性、动态黏弹性及全质构 TPA (texture profile analysis) 质地特性。结果表明: 与相同温度下的水浴处理相比, 中压电场处理能使苹果实现快速软化, 硬度、脆度和咀嚼性随着电场强度及温度的升高线性下降; 随着电场处理温度及电场强度的增大, 苹果黏弹性均下降, 且弹性损失大于黏性损失, 但其力学性质仍以弹性特征为主; 初始弹性模量  $E_0$ 、损耗模量  $G''$ 、延迟时间  $T_1$  可以作为流变特性的指标来分析其与质地特性的关系; 硬度、脆度及咀嚼性与黏弹性因子呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 回复性、内聚性与黏弹性无显著相关关系。45 V/cm 及以下场强处理条件下电场的影响随温度的变化不大; 而大于 45 V/cm 场强时, 即使作用时间较短, 也能够较低温度下对苹果质地及黏弹性造成较大影响, 硬度降低, 内聚性无显著性差异, 表明短时间的较高场强处理适合罐头等深加工产品的预处理。研究结果可为中压电场预处理果蔬工艺条件改进提供理论支撑。

**关键词:** 电场; 苹果; 蠕变; 动态黏弹性; 质地特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307189

中图分类号: TS213.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0253-10

李星恕, 王玮, 王润泽, 等. 中压电场处理下苹果流变及质地特性的关联规律[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 253-262. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307189 <http://www.tcsae.org>

LI Xingshu, WANG wei, WANG Runze, et al. Correlation between the rheological and textural properties of apple tissue under moderate electric field treatment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 253-262. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307189 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

苹果是世界上产量最高的水果之一, 为增加苹果的经济效益, 减少浪费, 苹果常被深加工成果干脆片、果汁、罐头等多种产品。苹果的深加工工艺包括干燥、浸渍、压榨等, 这些工艺本质上均要求加速苹果组织内外传质的交换速率<sup>[1]</sup>。在实际生产中, 为了节省时间、减少能耗、降低成本, 苹果深加工之前需要对其进行预处理, 用以改变细胞结构, 加速内外传质交流。现有的果蔬预处理方法有很多, 但是各有利弊。中压电场 (moderate electric field, MEF) 处理近年来在果蔬预处理领域备受关注<sup>[2]</sup>, 具有试验条件可控、加热均匀、加热速率高等优点, 是一种有效加速细胞结构破损的果蔬深加工预处理方法<sup>[3]</sup>。现有研究表明, 中压电场预处理能够显著提高苹果<sup>[4]</sup>、菠萝<sup>[5]</sup>、胡萝卜<sup>[6]</sup>的出汁率, 且保证了果汁的品质; 相比传统的热处理, 加速了土豆<sup>[7]</sup>质地的软化, 缩短了红甜菜<sup>[8]</sup>等蔬菜的深加工时间。究其原因, 主要是中压电场兼具电、热及其协同效应, 同时作用于组织细胞, 从而更易损伤果蔬细胞组织<sup>[9]</sup>。因此, 通过控制中压电场电、热可以改变预处理果蔬的结构功

能, 满足不同深加工产品的工艺需求。

有学者提出, 果蔬的流变特性与其果肉组织的结构功能密切相关, 能够反映其在细胞水平上发生的变化。果蔬组织是典型的黏弹性体, 通常通过压缩和扭转的方式研究其流变特性。蠕变变形 (或应力松弛) 和动态黏弹性是通过压缩和扭转试验在线性范围内研究黏弹性体动态流变特性的常用方法<sup>[10]</sup>。这些方法已经被用来判断葡萄糖渗透脱水<sup>[11]</sup>及 UV 光照射后<sup>[12]</sup>苹果组织的黏弹性等流变特性的变化。

感官品质是苹果深加工产品如罐头<sup>[13]</sup>等的市场认可度和消费者接受度的重要参考指标<sup>[14]</sup>。预处理后果蔬硬度等 TPA (texture profile analysis, TPA) 质地特性的变化会直接影响果蔬深加工产品的最终感官品质<sup>[15-16]</sup>。热预处理后胡萝卜质地软化, 硬度与内聚性降低, 导致深加工产品口感绵软<sup>[14]</sup>; 高压均质预处理后果蔬质地变化与深加工产品的口感变化高度相关<sup>[17]</sup>。上述果蔬预处理后质地特性发生变化的原因是果蔬组织细胞、分子等不同层次的结构之间产生理化反应的结果, 但这些反应之间相互影响, 导致难以解释果蔬产品的质地及感官品质的变化原因<sup>[18]</sup>。因此, 有学者采用流变特性作为评价果蔬结构变化的常用指标, 用来解释果蔬产品质地特性的变化<sup>[19]</sup>。如用流变特性评价和解释焯水后的胡萝卜<sup>[14]</sup>、抗坏血酸过氧化氢和紫外光联合处理后的梨<sup>[20]</sup>的质地特性变化。因此, 研究果蔬的流变特性及其质地特性之间

收稿日期: 2023-07-19 修订日期: 2024-09-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (317972209)

作者简介: 李星恕, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工新技术及装备研发研究, Email: [xingshu-li@nwsuaf.edu.cn](mailto:xingshu-li@nwsuaf.edu.cn)

的关联关系,可以定量解释预处理方法对苹果组织结构功能及其产品感官品质的影响,进而可为改进果蔬产品如罐头<sup>[13]</sup>的深加工工艺提供依据<sup>[21]</sup>。但迄今为止,中压电场处理条件如电场强度、温度等参数对苹果微观结构、流变特性及质地特性的影响及关联关系报道不多。

为了明确中压电场处理对苹果流变特性及质地特性之间关联关系的影响,本文检测中压电场处理苹果的蠕变特性、动态黏弹特性及 TPA 质地特性,研究中压电场场强和温度对苹果流变特性及质地特性的影响,阐明流变特性参数与质地特性参数之间的关联规律,解释处理方法对苹果组织结构与产品感官品质的影响,以期为中压电场预处理果蔬工艺条件改进提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用新鲜成熟、外表无损伤的陕西洛川产红富士苹果,果径为 $(85\pm 5)$  mm,初始湿基含水率为 $85\%\pm 2\%$ 。统一购回后放置在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱内贮藏以供试验使用。试验前取出,清洗后在室温条件下平衡 $24\text{ h}$ 至室温( $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。在苹果赤道位置,取直径 $25\text{ mm}$ 、高度 $15\text{ mm}$ 的不带果皮的圆柱形苹果块试样,取样方法详见文献<sup>[22]</sup>。取样后立即进行水浴及中压电场处理。

### 1.2 样品处理

#### 1.2.1 水浴处理

水浴处理时,将苹果试样用保鲜袋包裹,排出袋内空气后放入低温恒温槽(DC型,北京中兴伟业仪器有限公司)中,将样品分别加热至 $30$ 、 $40$ 、 $50$ 、 $60$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过 T 型极细热电偶每间隔 $1\text{ s}$ 检测一次试样中心温度,记录水浴加热历程,并保存数据至 PC 机。

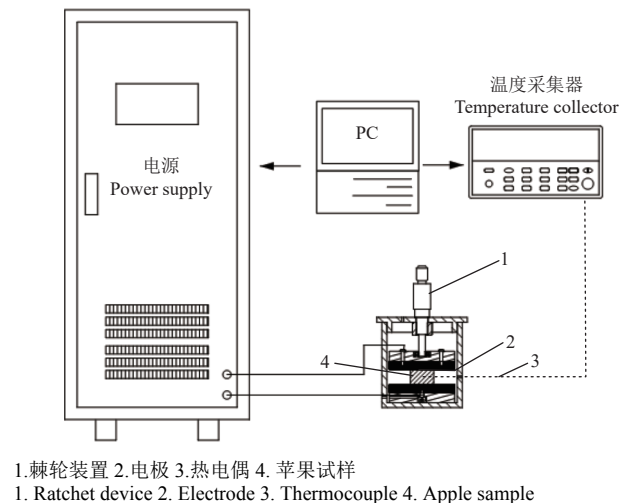
在水浴加热过程中,圆柱形试样表面的温度高于中心的温度,且试样表面承受高温的时间较长。因此,为尽可能的消除表面与中心的温度差异对试样微观结构与待检测特性的影响,水浴处理后将试样取出后迅速冷却至室温( $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ )并进行二次制样,用于后续的 TPA 质地特性检测、蠕变特性试验、动态黏弹性试验及显微结构观察。检测环境为室温( $21\pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 $45\%\pm 1\%$ 。二次制样后的试样尺寸为直径 $15\text{ mm}$ 、高度 $10\text{ mm}$ ;动态黏弹性试验二次制样尺寸为直径 $20\text{ mm}$ 、高度 $6\text{ mm}$ <sup>[23]</sup>。

#### 1.2.2 中压电场处理

中压电场处理系统主要包括正弦交流电源(AY50/10K-31 010,西安奥盈电气设备有限责任公司)、温度采集器(34970A型,美国 Agilent 公司)、PC 机和试样处理室,如图 1 所示。处理槽由内径 $70\text{ mm}$ 、壁厚 $5\text{ mm}$ 的有机玻璃圆管制成,高度 $80\text{ mm}$ ;底座上表面安装有下电极,上电极通过有机玻璃板与棘轮测力装置连接。电极材料为钛钢,直径为 $50\text{ mm}$ 、厚度 $0.5\text{ mm}$ 。

中压电场处理时,将制样后的圆柱状苹果试样放置于上、下电极中央,固定好试样处理室上盖,当上电极板距离苹果试样较远时,旋转棘轮测力装置,上电极板

缓慢下降,当上电极板与苹果试样上表面接触并达到 $0.1\text{ N}$ 的力时,棘轮测力装置自动锁死,确保电极板与苹果试样充分接触且接触力大小相同,保证电场处理效果。用直径 $0.5\text{ mm}$ 的电绝缘 T 型极细热电偶(WRCK-191,上海沃蓝仪表有限公司)检测苹果试样的中心温度,插入深度为 $12.5\text{ mm}$ 。温度采集器每间隔 $1\text{ s}$ 获取试样处理室苹果试样中心的温度并保存至 PC 机。通过 PC 机自编的 MATLAB 程序控制电源输出正弦交流电压,频率为 $50\text{ Hz}$ 。



1. 棘轮装置 2. 电极 3. 热电偶 4. 苹果试样  
1. Ratchet device 2. Electrode 3. Thermocouple 4. Apple sample

图 1 中压电场处理系统

Fig.1 Moderate electrical field processing system

为分析和比较在场强存在时温度对苹果组织的影响,在电场强度 $45\text{ V/cm}$ 条件下,将不同样品加热至 $30$ 、 $40$ 、 $50$ 、 $60$ 、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并以相同温度下水浴处理为对照。之所以选择 $45\text{ V/cm}$ 的电场强度,是因为预试验结果表明,低于这个电场强度时,与同温度下水浴处理的苹果组织之间的差异较小;而大于 $50\text{ V/cm}$ 时,即使在低温下电场强度也会对苹果组织造成较大损伤<sup>[24]</sup>。

为研究场强对苹果细胞组织的影响,采用 $15$ 、 $30$ 、 $45$ 、 $60$ 、 $75$ 和 $90\text{ V/cm}$ 的电场强度将苹果试样加热至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。之所以选择 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度,是因为当电场处理温度低于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热效应对苹果组织的影响不显著,高于 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度会使得苹果组织发生破裂<sup>[25]</sup>。

中压电场具有显著的欧姆加热效应,为明确电场对苹果试样的作用,需确保电场处理与水浴处理加热历程相同。电场处理时,根据水浴处理温升曲线,PC 机通过温度比较法连续控制电源通断,实现与水浴加热历程的匹配。MEF 处理后将苹果试样迅速从处理室取出,装入防水袋在水浴中冷却至室温。为了比较中压电场与水浴处理试样的异同,必须保证两种处理的试验样品尺寸一致,所以 MEF 处理的苹果试样也需二次制样,二次制样尺寸与水浴处理一致。中压电场处理试样二次制样后进行 TPA 质地特性检测、蠕变特性试验、动态黏弹性试验及显微结构观察。

### 1.3 试验方法

两种处理后的苹果试样分别用于 TPA 质地特性检测、蠕变试验、动态黏弹性试验及显微结构观察。以未处理

试样（新鲜试样）作为对照。每个试验相同条件下重复 6 次。

### 1.3.1 TPA 质地特性检测

采用质构仪（TA.XCT-18，上海保圣实业发展有限公司）对重新制样后的圆柱形苹果试样进行 TPA 试验，数据由设备自带的采集软件获得并保存至 PC 机。试验时采用直径为 36 mm 的 TA 型圆柱探头，压缩变形量为 40%，测试时间为 10 s，测试前速度为 2 mm/s，测试速度和测试后速度均为 1 mm/s，通过计算得到硬度、脆度、咀嚼性、内聚性及回复性 5 项质地属性<sup>[26]</sup>。

### 1.3.2 蠕变试验

采用电子万能试验机（DDL10 型，长春机械科学研究院有限公司）进行蠕变试验。加载载荷为 10 N<sup>[27]</sup>，持续时间为 200 s，加载速度为 0.8 N/s<sup>[27]</sup>。记录力随时间的变化并存储在计算机中。

采用四元件伯格斯模型表征苹果试样的蠕变特性<sup>[27]</sup>，该模型的方程为

$$\epsilon(t) = \sigma/E_0 + [\sigma(1 - e^{-t/T_1})]/E_1 + (\sigma \cdot t)/\eta_0 \quad (1)$$

式中  $\epsilon(t)$  为  $t$  时刻的应变值，%； $\sigma$  为施加的初始应力，Pa； $E_0$  为瞬时弹性模量，Pa； $E_1$  为延迟弹性模量，Pa； $\eta_0$  为黏性系数，Pa·s； $T_1$  为延迟时间，s。

苹果的黏性系数  $\eta_1$  采用式（2）计算。

$$\eta_1 = E_1 \cdot T_1 \quad (2)$$

### 1.3.3 动态黏弹性试验

采用应变控制型流变仪（AR-1000ex，美国 TA）在可控应变模式下进行动态黏弹性试验<sup>[11]</sup>。平行板直径为 40 mm，平板转子温度为 21 °C，应变值为 0.03%。预实验结果表明，该应变值可以确保所有样品的黏弹性在线性范围内获得，与渗透脱水后苹果<sup>[11]</sup>的应变值选择相似。

在 0.2~20 rad/s 的频率范围内进行频率扫描，记录储能模量  $G'$ 、损耗模量  $G''$  随扫描频率的变化并存储在计算机中。采用式（3）计算阻尼因子  $\tan\delta$ 。

$$\tan\delta = G''/G' \quad (3)$$

采用式（4）线性回归拟合黏弹性数据。

$$\lg(G') = n \lg(\omega) + k \quad (4)$$

式中  $n$  为回归方程的斜率，代表了组织的储能模量变化的难易程度， $n$  越大表示越易变化，反之越难变化<sup>[28]</sup>； $k$  为 1 rad/s 时储能模量的对数值；

### 1.3.4 苹果组织微观结构观察

采用扫描电子显微镜对苹果试样进行微观结构观察。具体方法见文献<sup>[22]</sup>。

## 1.4 数据分析

采用 Origin 软件（2021b，Origin Lab）进行制图及数据分析。用 Duncan 多重均值比较检验（ $P < 0.05$ ）、ANOVA 单因素方差分析、Pearson 相关系数及主成分分析法（Principal Component Analysis, PCA）对数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 加热历程匹配

图 2 为中压电场场强为 45 V/cm 时，将苹果试样分别加热至 30、40、50、60 和 70 °C 过程中，中压电场与水浴处理的温度匹配历程。由图 2 可知，苹果试样在 45 V/cm 的电场强度下处理至不同温度与水浴加热历程相似，且差异很小，温差小于  $\pm 1.5$  °C，可以认为两者加热历程一致。其他电场条件处理也可以保证与水浴处理具有相同的加热历程，具体略。

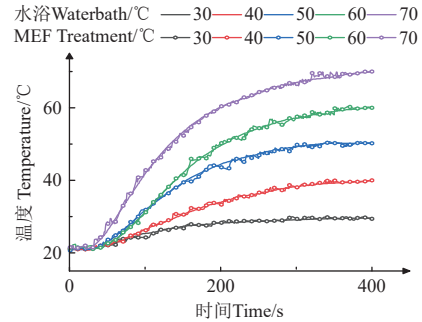


图 2 水浴处理和中压电场处理苹果试样加热历程

Fig.2 Temperature histories during water bath and moderate electric field (MEF) treatment at different electric field intensity

### 2.2 中压电场处理对苹果质地特性的影响

不同条件处理后苹果试样质地特性参数如表 1 所示。由表 1 可知，未处理苹果试样的硬度、脆度及咀嚼性最大，水浴处理次之，电场处理最小。两种处理温度相同时，45 V/cm 电场处理后苹果的硬度显著低于水浴处理（ $P < 0.05$ ），温度高于 30 °C 时，电场处理后脆度显著低于水浴处理（ $P < 0.05$ ）。在 45 V/cm 的电场处理下，随着处理温度的升高，硬度、脆度、咀嚼性均值降低，但 40~60 °C 处理时，三种参数无显著性差异（ $P > 0.05$ ），表明虽然电场作用时间延长，但在 45 V/cm 场强条件下电场的影响随温度的变化不大。随着电场强度增大，即使作用时间短，40 °C 处理时的硬度、脆度及咀嚼性也显著减小，表明大于 45 V/cm 的电场强度能够在较低温度下对苹果组织的质地特性产生较大影响，电场的存在加速了苹果的软化；但回复性及内聚性无明显规律。

### 2.3 中压电场处理对苹果蠕变特性的影响

图 3 为中压电场不同条件处理下苹果试样的蠕变变形曲线图。在 200 s 的加载时间下，所有条件处理下的苹果试样均进入稳定蠕变阶段，可以实现蠕变现象的观测。图 3a 为在 45 V/cm 的电场强度下将苹果试样处理至不同温度时的蠕变变形曲线图，与未处理及水浴处理后的苹果试样进行对照。由图 3a 可知，变形曲线大致分为两组，未处理与低于 70 °C 水浴处理一组，电场处理一组与水浴处理 70 °C 一组，在相同载荷下曲线形状相似。未处理和低于 70 °C 水浴处理组在曲线初始蠕变速率大，发生快速蠕变，随着时间的延长，曲线渐变平缓，进入稳定蠕变阶段。电场处理与水浴处理 70 °C 后，快速蠕变的时间变长，随着加载时间的增加，蠕变速率逐渐减缓，变形量与加载时间逐渐成线性关系。苹果组织的蠕变变



形量是黏弹性变形叠加而成，表明处理前后的苹果均具有显著黏弹性特征。

表 1 苹果试样质地特性参数  
Table 1 Texture characteristic parameters of apple sample

方法 Method	电场强度 Electric field strengths/(V·cm <sup>-1</sup> )	温度 Temperature/°C	硬度 Hardness/N	脆度 Brittleness/N	咀嚼性 Chewiness/N	内聚性 Cohesiveness	回复性 Resilience
未处理 Untreated	0	0	154.14±2.41 <sup>a</sup>	154.13±2.50 <sup>a</sup>	51.22±2.72 <sup>a</sup>	0.51±0.09 <sup>a</sup>	0.32±0.08 <sup>a</sup>
水浴 Water bath	0	30	70.21±4.21 <sup>b</sup>	69.14±4.94 <sup>b</sup>	12.21±2.42 <sup>bc</sup>	0.31±0.02 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>b</sup>
		40	67.24±6.62 <sup>b</sup>	67.25±7.12 <sup>b</sup>	20.21±1.91 <sup>b</sup>	0.42±0.02 <sup>a</sup>	0.25±0.05 <sup>b</sup>
		50	63.51±5.21 <sup>bc</sup>	63.54±5.21 <sup>bc</sup>	14.25±1.72 <sup>bc</sup>	0.32±0.05 <sup>b</sup>	0.21±0.02 <sup>b</sup>
		60	58.17±5.51 <sup>c</sup>	57.24±5.62 <sup>c</sup>	8.24±0.72 <sup>c</sup>	0.29±0.02 <sup>b</sup>	0.11±0.01 <sup>b</sup>
		70	42.14±2.91 <sup>d</sup>	42.14±2.92 <sup>d</sup>	5.44±0.62 <sup>c</sup>	0.35±0.02 <sup>b</sup>	0.25±0.02 <sup>b</sup>
中压电场 MEF	45	30(37.26%)	59.25±4.61 <sup>c</sup>	58.51±4.61 <sup>bc</sup>	14.51±2.41 <sup>b</sup>	0.41±0.05 <sup>a</sup>	0.34±0.04 <sup>a</sup>
		40(41.21%)	57.24±5.15 <sup>cd</sup>	57.24±5.34 <sup>cd</sup>	12.55±1.25 <sup>bc</sup>	0.32±0.04 <sup>b</sup>	0.31±0.06 <sup>a</sup>
		50(53.38%)	52.54±4.21 <sup>d</sup>	53.52±4.25 <sup>d</sup>	10.24±1.11 <sup>c</sup>	0.40±0.04 <sup>a</sup>	0.32±0.05 <sup>a</sup>
		60(56.84%)	42.21±3.41 <sup>d</sup>	42.54±3.42 <sup>d</sup>	10.12±1.43 <sup>c</sup>	0.35±0.06 <sup>b</sup>	0.32±0.05 <sup>a</sup>
		70(59.84%)	32.75±3.01 <sup>e</sup>	32.74±3.12 <sup>e</sup>	5.56±0.95 <sup>c</sup>	0.42±0.03 <sup>a</sup>	0.34±0.03 <sup>a</sup>
	40	15(49.25%)	69.21±3.14 <sup>b</sup>	68.94±2.62 <sup>b</sup>	13.51±1.22 <sup>bc</sup>	0.24±0.03 <sup>b</sup>	0.15±0.02 <sup>b</sup>
		30(44.84%)	64.44±4.91 <sup>bc</sup>	63.52±5.51 <sup>bc</sup>	11.83±1.55 <sup>bc</sup>	0.25±0.01 <sup>b</sup>	0.24±0.02 <sup>b</sup>
		60(16.24%)	48.24±3.11 <sup>d</sup>	48.84±3.44 <sup>d</sup>	6.21±0.72 <sup>c</sup>	0.35±0.04 <sup>b</sup>	0.31±0.05 <sup>a</sup>
		75(11.24%)	40.31±3.71 <sup>de</sup>	9.47±4.04 <sup>de</sup>	5.21±0.71 <sup>c</sup>	0.36±0.04 <sup>b</sup>	0.26±0.03 <sup>b</sup>
		90(6.28%)	38.17±3.12 <sup>e</sup>	38.11±3.12 <sup>e</sup>	7.11±0.92 <sup>c</sup>	0.32±0.03 <sup>b</sup>	0.21±0.03 <sup>b</sup>

注：不同字母表示处理间差异显著， $P<0.05$ 。0 中的值表示通电时间占总时间的百分比，该百分比是通过通电和断电时间计算得出。下同。  
Note: Different letters indicate significant differences between treatments,  $P<0.05$ . The same as. The value in ( ) represents the percentage of electrical action time to total time, which was calculated by power on and off time

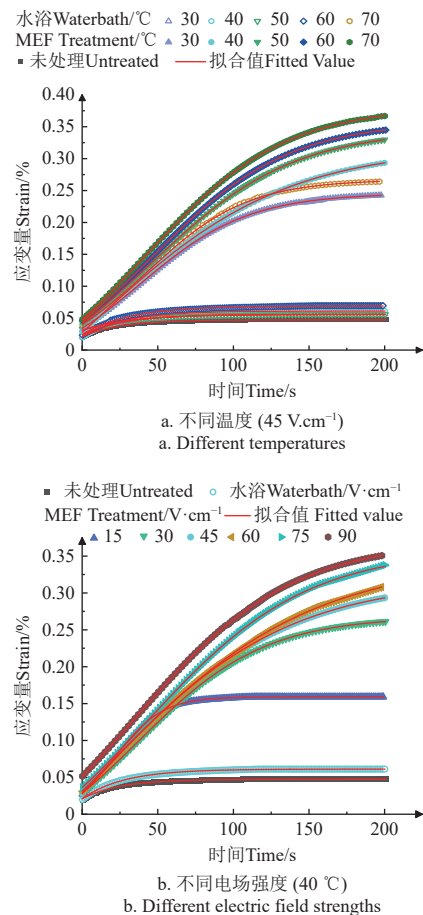


图 3 不同条件处理下苹果试样蠕变曲线

Fig.3 Creep curves of apple samples under different conditions

未处理及水浴处理后苹果试样的应变值随着加载时间先增大后趋于平缓，且随着温度升高其平衡值总体呈上升趋势；但电场处理后苹果的应变值在 160 s 的加载时间内一直快速增大，160 s 后趋于平缓，且温度越高，

对应的应变值越大。

图 3b 为在 40 °C 温度下将苹果试样处理至不同电场强度的蠕变变形曲线图，以未处理及水浴 40 °C 处理后的苹果试样作为对照。在图 3b 也能观察到类似的分组现象，随着电场强度增大，苹果试样的蠕变曲线呈现出应变值持续增大，渐趋平缓的形状。但低于 45 V/cm 电场强度处理后苹果试样的蠕变曲线能更快的进入稳定蠕变阶段；电场处理后，弹性变形的时间变长，进入稳定蠕变的时间变长，随着变形的进行，蠕变速率减缓，曲线趋向于平缓。

采用四元件伯格斯模型对变形曲线进行拟合后得到的蠕变特性参数见表 2。

蠕变由表 2 可知，未处理苹果试样的  $E_0$ 、 $\eta_0$  最大， $T_1$  最小；水浴 70 °C 处理后苹果试样的  $E_0$ 、 $\eta_0$  与未处理及其他水浴处理存在显著性差异 ( $P<0.05$ )；45 V/cm 电场处理下， $E_0$ 、 $\eta_0$  的均值随着温度的升高而降低， $E_1$ 、 $\eta_1$  呈上升趋势；两种处理温度相同时，电场处理苹果试样的  $E_0$ 、 $\eta_0$  均值均低于水浴处理， $E_0$ 、 $\eta_0$  存在显著性差异 ( $P<0.05$ )；40~60 °C 电场处理后  $E_0$ 、 $\eta_0$  无显著性差异； $T_1$  随着处理温度的增加而增大，电场处理后苹果试样的  $T_1$  与相同温度水浴处理后的苹果试样存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

苹果试样在 40 °C 下处理至不同电场强度时，45 V/cm 以下场强处理与 60 V/cm 及以上场强处理后  $E_0$ 、 $T_1$ 、 $\eta_0$  存在显著性差异。随着电场强度的增加， $E_0$ 、 $\eta_0$  均值降低， $T_1$  均值增大， $\eta_1$ 、 $E_1$  呈上升趋势。

$E_0$  代表了快速蠕变阶段果肉弹性变化，表征了果肉组织抗变形能力的优劣， $\eta_0$  代表了快速蠕变阶段苹果组织的黏滞阻力<sup>[29]</sup>。电场处理后，苹果抵抗变形的能力减弱，快速蠕变阶段应变值持续增大，弹性降低，黏滞阻力减小，达到平衡的时间增加； $E_1$  代表了苹果果肉在稳定蠕变过程中弹性变化的快慢程度， $\eta_1$  代表了稳定蠕变

阶段的黏滞阻力的变化<sup>[29]</sup>，电场处理后，由于结构被破坏，在初始阶段，弹性变形速率加剧，弹性变形量增加， $E_0$  急剧降低，而  $E_1$  受到  $\eta_1$  的制约<sup>[27]</sup>，加载后不会立即变化，而是随着蠕变时间的增加缓慢产生变化。在进入

稳定蠕变阶段后，黏滞阻力增大，黏性变形量进一步叠加，使得果肉蠕变速率降低，逐渐趋于平衡，但由于细胞结构被破坏，进入稳定蠕变阶段后，其应变量随时间的线性变形速率增大，故电场处理后其  $E_1$ 、 $\eta_1$  增大。

表 2 苹果试样蠕变特性参数  
Table 2 Creep characteristic parameters of apple sample

方法 Method	电场强度 Electric field strengths/(V·cm <sup>-1</sup> )	温度 Temperature /°C	瞬时弹性模量 Instant elastic Modulus $E_0$ /MPa	延迟弹性模量 Delayed elasticity Modulus $E_1$ /MPa	延迟时间 Delay time $T_1$ /s	黏性系数 Viscosity factor $\eta_0$ /MPa·s	黏性系数 Viscosity factor $\eta_1$ /MPa·s
未处理 Untreated	0	0	3.24±0.33 <sup>a</sup>	1.91±0.18 <sup>c</sup>	16.21±1.34 <sup>de</sup>	647.23±88.24 <sup>a</sup>	30.6±2.84 <sup>d</sup>
水浴 Water bath	0	30	3.17±0.35 <sup>a</sup>	1.62±0.21 <sup>c</sup>	21.94±3.64 <sup>d</sup>	580.21±66.27 <sup>a</sup>	35.54±7.24 <sup>d</sup>
		40	2.98±0.31 <sup>a</sup>	1.65±0.19 <sup>c</sup>	28.44±3.01 <sup>c</sup>	484.24±50.12 <sup>ab</sup>	46.92±5.85 <sup>cd</sup>
		50	2.66±0.22 <sup>ab</sup>	1.76±0.21 <sup>c</sup>	35.41±4.32 <sup>c</sup>	398.26±31.25 <sup>b</sup>	61.61±5.28 <sup>c</sup>
		60	2.40±0.19 <sup>b</sup>	1.86±0.24 <sup>c</sup>	40.52±3.94 <sup>bc</sup>	298.41±25.89 <sup>b</sup>	75.36±6.51 <sup>c</sup>
		70	1.94±0.41 <sup>c</sup>	2.01±0.35 <sup>b</sup>	86.31±7.52 <sup>b</sup>	69.22±7.21 <sup>c</sup>	172.61±16.51 <sup>b</sup>
中压电场 MEF	45	30(37.26%)	2.98±0.52 <sup>b</sup>	1.98±0.14 <sup>bc</sup>	54.41±6.98 <sup>c</sup>	39.22±1.82 <sup>c</sup>	108.47±9.88 <sup>c</sup>
		40(41.21%)	2.59±0.53 <sup>bc</sup>	2.21±0.22 <sup>ab</sup>	86.51±2.54 <sup>b</sup>	23.67±1.91 <sup>cd</sup>	190.9±12.52 <sup>b</sup>
		50(53.38%)	2.01±0.25 <sup>c</sup>	2.58±0.26 <sup>a</sup>	111.2±5.54 <sup>b</sup>	15.45±0.42 <sup>d</sup>	287.5±19.27 <sup>ab</sup>
		60(56.84%)	1.95±0.17 <sup>c</sup>	2.65±0.28 <sup>a</sup>	134.2±23.11 <sup>a</sup>	13.62±0.88 <sup>d</sup>	356.2±36.89 <sup>a</sup>
		70(59.84%)	1.33±0.12 <sup>d</sup>	2.68±0.31 <sup>a</sup>	141.24±16.71 <sup>a</sup>	11.22±0.89 <sup>d</sup>	379.2±41.21 <sup>a</sup>
	45	15(49.25%)	2.88±0.33 <sup>ab</sup>	1.83±0.31 <sup>c</sup>	58.28±4.98 <sup>bc</sup>	44.92±3.18 <sup>bc</sup>	106.7±9.88 <sup>c</sup>
		30(44.84%)	2.74±0.41 <sup>b</sup>	1.91±0.32 <sup>b</sup>	60.12±5.41 <sup>bc</sup>	38.45±3.78 <sup>c</sup>	110.11±8.91 <sup>c</sup>
		60(16.24%)	2.31±0.34 <sup>c</sup>	2.23±0.17 <sup>a</sup>	96.21±8.59 <sup>a</sup>	19.28±2.45 <sup>d</sup>	211.21±12.84 <sup>b</sup>
		75(11.24%)	2.01±0.21 <sup>c</sup>	2.48±0.21 <sup>a</sup>	104.11±14.31 <sup>a</sup>	17.42±3.89 <sup>d</sup>	257.92±18.21 <sup>a</sup>
		90(6.28%)	1.99±0.15 <sup>cd</sup>	2.55±0.19 <sup>a</sup>	128.12±17.22 <sup>a</sup>	16.41±1.99 <sup>d</sup>	326.41±28.11 <sup>a</sup>

随着电场强度和温度的升高， $E_1$  增加，说明其结构损伤加剧，恢复缓慢<sup>[29]</sup>。未处理及水浴 60 °C 以下处理后苹果试样黏弹性损失小，弹性变形速率较低，黏性阻力大，故在较短的时间内就达到了平衡。

2.4 中压电场处理对苹果动态黏弹性的影响

不同条件处理下苹果试样动态黏弹特性频率扫描曲线如图 4 所示。图 4a 为在 45 V/cm 的电场强度下将苹果试样处理至不同温度时的频率扫描曲线，与未处理及水浴处理后的苹果试样进行对照。由图 4a 可知，不同条件处理后苹果试样储能模量均随频率的增大而线性增大；未处理苹果试样的储能模量最大，水浴次之，电场处理较小；水浴 70 °C 处理分布位置与电场处理相近；温度相同时，电场处理试样的储能模量比水浴处理小 ( $P<0.05$ )；45 V/cm 条件下 30~60 °C 处理时储能模量频率扫描曲线几乎重合。图 4b 为在 40 °C 温度下将苹果试样处理至不同电场强度的频率扫描曲线，以未处理及水浴 40 °C 处理后的苹果试样作为对照。在图 3b 中也可观察到类似的分布情况，15 V/cm 电场强度处理后苹果试样的曲线分布接近水浴处理；且随着电场强度增大，同一频率下的储能模量减小。

为了定量分析不同处理条件对苹果试样储能模量及损耗模量的影响，选择 10 rad/s 扫描频率下获得的数据进行分析，与 MARTINEZ 等<sup>[11]</sup> 关于葡萄糖渗透脱水后苹果组织的选择一致。

扫描频率 10 rad/s 下测得的储能模量  $G'$ 、损耗模量  $G''$ 、阻尼因子  $\tan\delta$  以及采用式 (4) 拟合得到的值如表 3 所示。由表 3 可知，未处理苹果试样的  $G'$ 、 $G''$  最大，水浴处理次之，电场处理最小。随着处理温度的升高， $G'$ 、 $G''$  下降；温度相同时，45 V/cm 电场处理后苹果试样的  $G'$ 、 $G''$  均值

低于水浴处理，尤其是低温时两者的黏弹性之间差异更大；表明 45 V/cm 电场在低温时影响更大，占据主导作用。

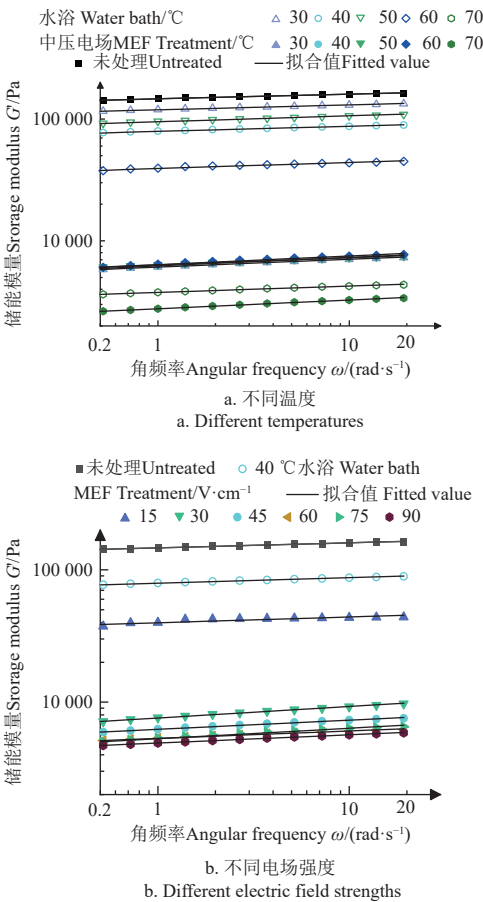


图 4 不同条件处理下苹果试样动态黏弹性频率扫描曲线  
Fig.4 Dynamic viscoelasticity with frequency for apple samples under different conditions

表 3 苹果试样动态黏弹特性参数及拟合值  
Table 3 Dynamic viscoelasticity of apple sample and the fitting values

方法 Method	电场强度 Electric field strengths /45 V·cm <sup>-1</sup>	温度 Temperature /℃	储能模量 Storage modulus G' /KPa	损耗模量 Loss modulus G'' / KPa	阻尼因子 Damping factor tanδ	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
未处理 Untreated	0	0	160.25±14.21 <sup>a</sup>	9.92±0.22 <sup>a</sup>	0.06±0.00 <sup>b</sup>	0.04	5.17	0.99
水浴 Water bath	0	30	130.41±12.51 <sup>ab</sup>	8.41±0.53 <sup>ab</sup>	0.06±0.01 <sup>b</sup>	0.04	5.08	0.99
		40	87.62±4.51 <sup>c</sup>	8.19±0.52 <sup>ab</sup>	0.05±0.01 <sup>b</sup>	0.04	4.89	0.98
		50	106.31±10.11 <sup>b</sup>	6.42±0.61 <sup>b</sup>	0.06±0.01 <sup>b</sup>	0.05	4.98	0.98
		60	44.25±1.21 <sup>bc</sup>	3.18±0.32 <sup>c</sup>	0.07±0.01 <sup>b</sup>	0.05	4.59	0.97
		70	4.26±0.21 <sup>d</sup>	0.62±0.03 <sup>d</sup>	0.14±0.00 <sup>a</sup>	0.05	3.58	0.98
中压电场 MEF	45	30(37.26%)	9.61±0.51 <sup>d</sup>	1.12±0.06 <sup>d</sup>	0.11±0.02 <sup>bc</sup>	0.06	3.78	0.99
		40(41.21%)	7.39±0.52 <sup>d</sup>	0.92±0.08 <sup>d</sup>	0.12±0.00 <sup>bc</sup>	0.07	3.79	0.99
		50(53.38%)	7.24±0.65 <sup>d</sup>	0.87±0.06 <sup>de</sup>	0.12±0.00 <sup>bc</sup>	0.06	3.81	0.98
		60(56.84%)	7.13±0.71 <sup>de</sup>	0.81±0.09 <sup>de</sup>	0.12±0.00 <sup>b</sup>	0.07	3.80	0.97
		70(59.84%)	3.23±0.61 <sup>e</sup>	0.52±0.084 <sup>e</sup>	0.16±0.00 <sup>a</sup>	0.07	3.44	0.99
		15(49.25%)	40.32±2.12 <sup>c</sup>	3.25±0.02 <sup>bc</sup>	0.09±0.00 <sup>c</sup>	0.04	4.61	0.91
		30(44.84%)	10.25±0.72 <sup>d</sup>	1.01±0.04 <sup>c</sup>	0.09±0.00 <sup>c</sup>	0.08	3.88	0.98
		60(16.24%)	6.11±0.32 <sup>de</sup>	0.61±0.05 <sup>de</sup>	0.11±0.00 <sup>b</sup>	0.05	3.73	0.98
		75(11.24%)	6.34±0.43 <sup>e</sup>	0.72±0.04 <sup>e</sup>	0.13±0.03 <sup>a</sup>	0.08	3.72	0.99
		90(6.28%)	5.72±0.35 <sup>e</sup>	0.65±0.04 <sup>c</sup>	0.12±0.00 <sup>b</sup>	0.06	3.69	0.99

注：*n* 为回归方程的斜率，*k* 为 1 rad/s 时储能模量的对数值，具体释义见式 4。  
Note: *n* represents the slope of the regression equation, *k* represents the relative value of the storage modulus at 1 rad/s,the specific definition can be found in equation 4.

在 40 ℃ 处理下，随着电场强度的增加，苹果试样的  $G'$ 、 $G''$  均值整体呈降低趋势。 $G'$  表明了黏弹性材料在形变过程中由于弹性形变而储存的模量， $G''$  则表示了由于黏性变形而损失的能量<sup>[30]</sup>，不同条件处理后苹果试样的  $G'$  均大于  $G''$ ，说明中压电场处理没有改变苹果组织以弹性为主导的力学性质<sup>[30]</sup>。

未处理与 70 ℃ 及以下水浴处理后，苹果试样的阻尼因子  $\tan\delta$  无显著性差异 ( $P>0.05$ )；电场低于 70 ℃ 处理时，苹果试样的阻尼因子  $\tan\delta$  无显著性差异 ( $P>0.05$ )；两种处理下，70 ℃ 与低于 70 ℃ 处理后阻尼因子  $\tan\delta$  均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。随着电场强

度及温度的升高， $\tan\delta$  均值及  $n$  值呈上升趋势，表明电场作用显著影响了苹果组织黏弹性，且弹性损失大于黏性损失，即果蔬组织的刚度减小<sup>[31]</sup>。

2.5 相关性分析

(1) 流变特性参数相关性分析

为明确中压电场处理后苹果试样流变特性参数与质地参数之间的关联性，须采用主成分分析法分析两者之间的相关关系。由于蠕变及动态黏弹性试验获得的参数对苹果试样流变特性的表征存在重复，因此在主成分分析之前，基于 pearson 相关系数法简化上述流变特性参数，它们之间的相关系数如表 4 所示。

表 4 流变特性参数 pearson 相关系数  
Table 4 Pearson correlation coefficient of rheological parameters

指标 Index	$E_0$	$\eta_0$	$E_1$	$\eta_1$	$T_1$	$G'$	$G''$
黏性系数 Viscosity factor $\eta_0$	0.65	1					
延迟弹性模量 Delayed elasticity modulus $E_1$	-0.78	-0.52*	1				
黏性系数 Viscosity factor $\eta_1$	-0.91*	-0.73	0.88*	1			
延迟时间 Delay time $T_1$	-0.89*	-0.81*	0.79*	0.98*	1		
损耗模量 Loss modulus $G''$	0.71*	0.94*	-0.51*	-0.73	-0.79*	1	
储能模量 Storage modulus $G'$	0.69*	0.96*	-0.52*	-0.73	-0.79	0.99*	1
阻尼因子 Damping factor $\tan\delta$	-0.73*	-0.85*	0.74*	-0.85	0.88*	-0.79*	-0.83*

注：\*表示差异显著， $P<0.05$ 。  
Note: \*Means significant difference,  $P<0.05$

结果表明， $E_0$  与  $G'$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，表征了苹果组织在处理过程中弹性的变化，可作为弹性因子。 $\eta_0$  与  $G''$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，表征了处理过程中黏性的变化，可作为黏性因子。 $\tan\delta$  与  $T_1$  呈显著正相关 ( $P<0.05$ )，相关系数为 0.88，可作为衡量处理过程中黏弹性变化比例的指标， $\eta_1$ 、 $E_1$  与  $T_1$  呈显著正相关。因此，选择  $E_0$ 、 $G''$ 、 $T_1$  作为苹果组织 PCA 分析的流变特性指标。

为探究  $E_0$ 、 $G''$ 、 $T_1$  值与质地特性参数是否适合进行主成分分析，对其进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 值及 Bartlett 球形检验。结果表明，KMO 值大于 0.8，巴特利

特球形检验显著性低于 0.05，故适合进行主成分分析<sup>[32]</sup>。

(2) 质地与流变特性参数 PCA 分析

图 5a 为在 45 V/cm 的电场强度下将苹果试样处理至不同温度后流变与质地特性参数的空间关系，与未处理及水浴处理后的苹果试样进行对照。第一主成分和第二主成分主分别解释了数据总方差的 63.7% 和 28.3%。硬度与脆度、咀嚼性呈正相关 ( $r>0.97$ )，回复性与内聚性呈正相关 ( $r=0.76$ )；硬度与  $E_0$ 、 $G''$  呈正相关 ( $r>0.82$ )，与  $T_1$  呈负相关；内聚性、回复性与黏弹性因子无显著相关关系。未处理试样在 PC1 和 PC2 轴上呈正向载荷，水浴处理试样在 PC2 轴上呈负向载荷，电场处理



组试样在 PC2 轴呈正向载荷。随着温度的升高, 水浴与中压电场处理试样沿 PC1 轴从正向向负向迁移, 水浴组的变化趋势在 70 时接近中压电场处理组。不同温度处理下, 苹果的硬度、脆度及咀嚼性与黏弹性呈正相关, 与延迟时间呈负相关, 随着处理温度的升高, 黏弹性降低, 硬度、脆度降低, 苹果质地软化。

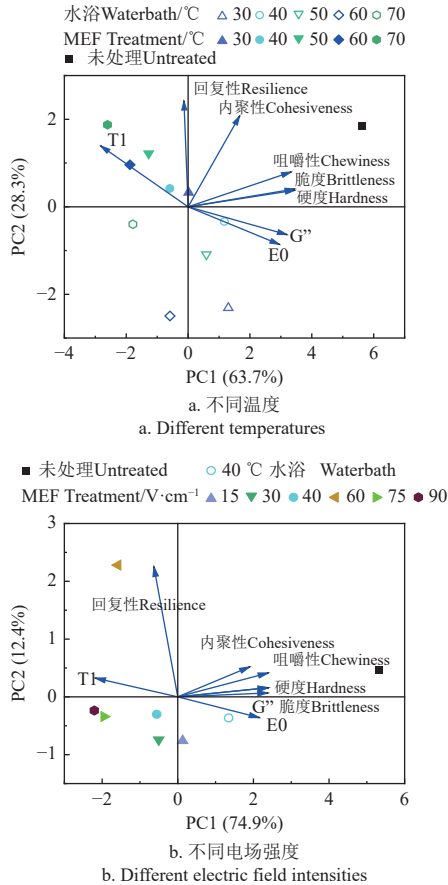


图 5 苹果试样质地与流变特性参数的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of texture and rheological parameters of apple samples

图 5b 为在 40 °C 温度下将苹果试样处理至不同电场强度后流变及质地特性参数的空间关系图, 以未处理及水浴 40 °C 处理后的苹果试样作为对照。由图中可知, 第一主成分和第二主成分分别解释了数据总方差的 74.9% 和 12.4%。硬度与脆度、咀嚼性呈正相关 ( $r>0.98$ ); 硬度与  $E_0$ 、 $G''$  呈正相关 ( $r>0.91$ ), 与  $T_1$  呈显著负相关 ( $r>-0.81$ ); 回复性与黏弹性因子无显著相关关系; 内聚性与  $G''$  呈正相关 ( $r=0.79$ ), 与其他黏弹性参数无显著性相关关系。所有试样可以分为三类: 未处理苹果试样在 PC1 与 PC2 轴上呈正向载荷, 硬度、脆度及咀嚼性最大; 水浴组与 15 V/cm 试样在 PC1 轴上呈正向载荷, 在 PC2 轴上呈负向载荷, 30~90 V/cm 电场强度处理苹果试样沿 PC1 轴呈负向载荷。不同电场强度处理下, 苹果的硬度、脆度及咀嚼性与黏弹性呈正相关, 与延迟时间呈负相关。

## 2.6 显微结构观察

为了明确电场强度和温度对苹果组织微观结构的影

响, 分别观察了不同电场强度处理苹果试样至 40 °C 时以及采用 45 V/cm 电场强度处理苹果试样至不同温度时的细胞微观结构, 以新鲜组织和相同温度下的水浴处理作为对照。观察结果分别如图 6 所示。

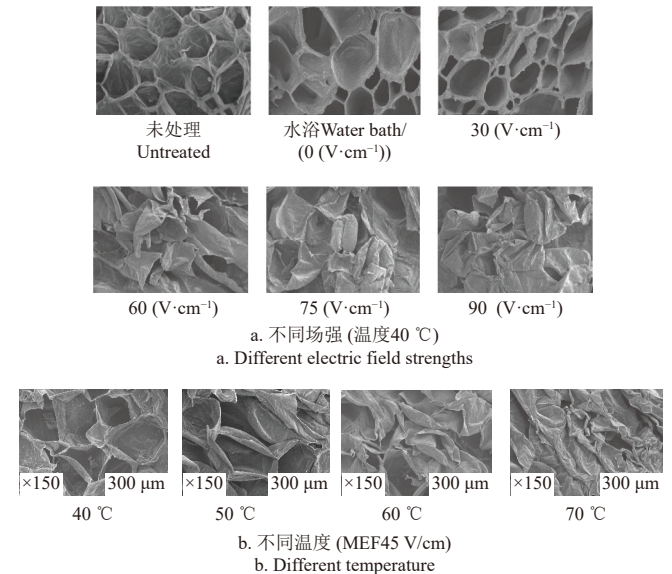


图 6 不同场强处理苹果试样的细胞结构 ( $\times 150$ )

Fig.6 Cell structure of apple samples treated with different electric field strengths ( $\times 150$ )

从图中可以看出, 未处理苹果组织细胞结构完整; 30 V/cm 时, 细胞结构完整, 少部分细胞出现蜷缩趋势, 与 40 °C 的水浴处理差异不大, 电效应不显著; 45 V/cm 时, 细胞具有完整结构, 在电效应与电热协同效应共同作用下, 部分细胞边缘出现蜷曲; 60~75 V/cm 时, 细胞组织出现大范围的塌陷; 90 V/cm 时, 细胞组织基本完全塌陷, 失去支撑力。大于 60 V/cm 处理下苹果试样细胞破损程度加剧, 表明即使电场作用时间短, 强电在低温下也能使得苹果细胞破壁。电场强度 45 V/cm 时, 随着温度升高 (40~60 °C), 苹果组织细胞会逐渐出现塌陷; 70 °C 时, 细胞严重变形, 失去支撑力。在 45 V/cm 电场强度下, 细胞结构随着温度的升高, 在热效应及电热协同作用下破损加剧, 温度变化影响显著。

## 3 讨论

研究表明, 水浴处理中, 温度是导致果蔬组织破损的主要因素<sup>[9]</sup>。温度诱导细胞膜破损, 致使细胞膨压损失<sup>[23]</sup>, 进而影响果蔬的弹性<sup>[33]</sup>。细胞结构破损后, 内外传质的流动性增强, 影响果蔬的黏性<sup>[24]</sup>。随着水浴处理温度的升高, 苹果组织黏弹性降低。

与相同温度下的水浴处理相比, 45 V/cm 的电场强度造成了细胞膜电渗透性的增加<sup>[34]</sup>而且中压电场的热效应对细胞壁的损伤也较大<sup>[24]</sup>。在该电场强度下加热苹果试样至 30~60 °C 时, 随着电场处理温度的升高, 在电、热的协同作用下, 细胞膜电渗透性加剧, 细胞壁刚度损失从而导致苹果组织的弹性损失更大<sup>[24]</sup>。当处理温度高于 60 °C 处理时, 温度对苹果的影响大于电场, 弹性损

失大于黏性损失,细胞壁刚度变化极大程度的加剧了弹性损失;同时,高温导致中压电场电效应对细胞膜的影响更大<sup>[24]</sup>,在二者的协同效应下,进一步加剧了细胞结构的破损,进而导致苹果的黏弹性损失。

而在 40 °C 条件下,低于 45 V/cm 的电场强度处理后,与同温度下水浴处理差异不大,电效应作用不强,高于 45 V/cm 后,场强的影响大于温度,细胞结构严重受损,细胞失去支撑力,细胞壁及细胞膜失去完整性<sup>[24]</sup>,进而导致黏弹性降低。

相关性结果表明,不同条件处理后苹果质地特性参数硬度、脆度都与黏弹性因子呈正相关,与延迟时间呈负相关,说明了预处理后苹果的黏弹性直接影响了果肉品质。不同条件处理后咀嚼性与黏弹性呈正相关,表明了黏弹性参数可以很好的解释预处理后苹果果肉的质地变化,与方媛等<sup>[27]</sup>研究结果一致。

45 V/cm 电场强度处理条件下,随着处理温度的升高(30~60 °C),黏弹性损失导致硬脆度均值降低,但是无显著性差异;70 °C 处理后,温度影响变大,弹性损失大于黏性,进而使得其硬脆度显著降低。而在 40 °C 温度下,大于 45 V/cm 电场强度处理后,电效应加剧黏弹性损失,进而导致质地软化。在低温条件下,高于 45 V/cm 的电场强度处理就会造成苹果细胞结构破损,黏弹性降低,回复性与内聚性与未处理苹果无显著性差异,在质地软化的同时具有良好的凝聚性口感,表明短时间的较高场强处理适合罐头等深加工产品的预处理<sup>[35]</sup>。

## 4 结 论

中压电场处理后在电热及其协同效应下苹果组织的质地、流变特性及微观结构产生了改变且相互关联。通过研究得出以下结论:

1) 电场处理没有改变苹果以弹性特征为主导的力学性质,随着处理温度及电场强度的增大,黏弹性因子  $E_0$ 、 $\eta_0$ 、 $G'$ 、 $G''$  显著性降低,苹果组织黏弹性均下降,弹性损失大于黏性。

2) 电场处理后,随着处理温度及电场强度的增大,硬度、脆度及咀嚼性降低,硬度、脆度及咀嚼性与弹性因子  $E_0$ 、 $G'$ 、黏性因子  $\eta_0$ 、 $G''$  呈显著正相关 ( $r > 0.82$ ),内聚性及回复性与黏弹性无显著相关性。

3) 45 V/cm 及以下电场强度处理条件下电场的影响随温度的变化不大,而即使电场作用时间短,大于 45 V/cm 的电场强度就能够在较低温度下对苹果组织的质地及黏弹性造成较大影响。

明确中压电场处理后苹果组织质地及流变特性的关联规律,可以为改进苹果深加工工艺条件提供理论参考。后续研究中需进一步研究中压电场更多条件处理后电热的损伤以及中压电场不同条件处理后对苹果的营养物质等品质指标的影响,并通过压缩等非线性变形试验明确屈服极限等参数,进一步确定适合不同深加工产品的预处理条件。

## [参 考 文 献]

- [1] SIMPSON R, RAMIREZ C, BIRCHMEIER V, et al. Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 166(5): 204-211.
- [2] KUSNADI C, SASTRY S K. Effect of moderate electric fields on salt diffusion into vegetable tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(3): 329-336.
- [3] BROCHIER B, MERCALI G D, MARCZAK L D F. Influence of moderate electric field on inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase and on phenolic compounds of sugarcane juice treated by ohmic heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 74(8): 396-403.
- [4] PRAPORSIC I, LEOVKA N I, GHNIMI S, et al. Ohmically heated, enhanced expression of juice from apple and potato tissues[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2): 199-204.
- [5] MAKROO H A, SRIVASTAVA B, JABEEN A. Influence of mild electric field (MEF) on polyphenol oxidase and quality attributes of pineapple juice during ohmic heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 156: 113021.
- [6] RAYMAN A, BAYSAL T. Yield and quality effects of electroporation and microwave applications on carrot juice production and storage[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(4): 598-605.
- [7] PEREIRA R N, RODRIGUES R M, GENISHEVA Z, et al. Effects of ohmic heating on extraction of food-grade phytochemicals from colored potato[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 74(7): 493-503.
- [8] FARAHNAKY A, AZIZI R, GAVAHIAN M. Accelerated texture softening of some root vegetables by Ohmic heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(2): 275-280.
- [9] 熊秀芳, 李靓, 杨兴胜, 等. 中压电场预处理对苹果组织损伤程度及微观结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 272-279.
- [10] XIONG Xiufang, LI Jing, Yang Xingsheng, et. al. Effect of moderate electric field pretreatment on damage degree and microstructure of apple tissue[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(14): 272-279. (in Chinese with English abstract)
- [11] 沈晓梅, 冉根, 陈家凤, 等. 豆皮果胶类多糖的提取及其在大豆蛋白凝胶类食品的应用[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 295-302.
- [12] SHEN Xiaomei, RAN Gen, CHEN Jiafeng, et. al. Extraction of soybean hull pectin polysaccharide and its applications in soy protein-based gel foods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(19): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- [13] MARTINEZ VY, NIETO A B, CASTRO M A, et al. Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(3): 394-403.
- [14] GOMEZ P L, GARCIA-LOREDO A, SALVATORI D M, et al.



- Viscoelasticity, texture and ultrastructure of cut apple as affected by sequential anti-browning and ultraviolet-C light treatments[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(2): 214-225.
- [13] DOBIAS J, VOLDRICH M, CURDA D. Heating of canned fruits and vegetables: Deaeration and texture changes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77(3): 421-425.
- [14] XU C, YU C, LI Y. Effect of blanching pretreatment on carrot texture attribute, rheological behavior, and cell structure during cooking process[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 48-54.
- [15] 张群, 叶纯, 唐鼎, 等. 预处理方式对提子类葡萄贮藏期间质地的影响[J]. *食品与机械*, 2014, 30(3): 5-6.
- ZHANG Qun, YE Chun, TANG Nai, et. al. Effect on texture of raisin grape stored by different pre-treatment[J]. *Food & Machinery*, 2014, 30(3): 5-6. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄培文, 陈林, 丁婷, 等. 高压均质对油脂预乳化大豆拉丝蛋白素食香肠质地特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 269-276.
- HUANG Peiwen, CHEN Lin, DIN Ting, et. al. Effects of pre-emulsification of oil treated by high pressure homogenization on the texture properties of textured fibril soy protein vegetarian sausages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(19): 269-276. (in Chinese with English abstract)
- [17] OEY I, LILLE M, VAN LOEY A, et al. Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19(6): 320-328.
- [18] ZHAO W, FANG Y, ZHANG Q, et al. Correlation analysis between chemical or texture attributes and stress relaxation properties of 'Fuji' apple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 129(3): 45-51.
- [19] CONTADOR L, SHINYA P, INFANTE R. Texture phenotyping in fresh fleshy fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 193(6): 40-46.
- [20] GARCIA LOREDO A B, GUERRERO S N, ALZAMORA S M. Impact of combined ascorbic acid/CaCl<sub>2</sub>, hydrogen peroxide and ultraviolet light treatments on structure, rheological properties and texture of fresh-cut pear (William var.)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(2): 164-173.
- [21] LEOVKA N I, PRAPORSIC I, GHNIMI S, et al. Temperature enhanced electroporation under the pulsed electric field treatment of food tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(2): 177-184.
- [22] 李星恕, 张博, 靳莉珍, 等. 加热温度对苹果组织中细胞阻抗特性及水分分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 284-290.
- LI Xingshu, ZHANG Bo, JIN Lizhen, et. al. Effect of heating temperature on cell impedance properties and water distribution in apple tissue[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(14): 284-290. (in Chinese with English abstract)
- [23] WU J, GUO K Q. Dynamic viscoelastic behaviour and microstructural changes of Korla pear (*Pyrus bretschneideri* rehderi) under varying turgor levels[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 485-492.
- [24] LIU J, WANG W, QU H, et al. Effect of moderate electric field on rheological properties, cell wall components, and microstructure of apple tissue[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 351: 111516.
- [25] SHYNKARYK M V, JI T, ALVAREZ V B, et al. Ohmic heating of peaches in the wide range of frequencies (50 Hz to 1 MHz)[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(7): E493-E500.
- [26] 潘秀娟, 屠康. 质构仪质地多面分析 (TPA) 方法对苹果采后质地变化的检测[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(3): 166-170.
- PAN Xiujuan, TU Kang. Comparison of texture properties of post-harvested apples using texture profile analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(3): 166-170. (in Chinese with English abstract)
- [27] 方媛, 赵武奇, 张清安. '红富士'苹果蠕变特性与果实品质的相关分析[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(4): 717-716.
- FANG Yuan, ZHAO Wuqi, ZHANG Qingan. Correlation analysis of creep characteristics and fruit quality of 'Red Fuji' apple[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 717-716. (in Chinese with English abstract)
- [28] ANDREA B, NIETO AB, SEBASTIAN VICENTE EF, et al. Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 104-114.
- [29] 王菊霞, 崔清亮, 李红波, 等. 基于流变特性的不同品种苹果果皮质地评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 305-314.
- Wang Juxia, Cui Qingliang, Li Hongbo, et. al. Evaluation on peels texture of different apple cultivars based on rheological properties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(21): 305-314. (in Chinese with English abstract)
- [30] 武新慧, 郭玉明, 冯慧敏. 高压脉冲电场预处理对果蔬动态黏弹特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 8.
- WU Xinhui, GUO Yuming, FENG Huimin. Effect of high pulsed electric field pretreatment on dynamic viscoelasticity of fruits and vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(18): 247-254 (in Chinese with English abstract)
- [31] SALINAS D E, GARVIN A, IBARZ R, et al. Viscoelastic properties and compensation study of apple juice enriched with apple fiber[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151: 111971.
- [32] ABU SABRA M A. An adapted management of early warning signs of relapse questionnaire: Validity and reliability[J]. *Archives of Psychiatric Nursing*, 2023, 45(4): 16-25.

- [33] YASUMASA ANDO, SHOJI HAGIWARA, HIROSHI NABETANI. Thermal inactivation kinetics of pectin methylesterase and the impact of thermal treatment on the texture, electrical impedance characteristics and cell wall structure of Japanese radish (*Raphanus sativus* L. )[J]. Journal of Food Engineering, 2017(199): 9-18.
- [34] SENSOY SK. Extraction using moderate electric fields[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(1): 7-13.
- [35] ENTRENA-BARBERO E, FEIJOO G, GONZALEZ-GARCIA S, et al. Addressing environmental and economic impacts in the sustainable production profile of organic canned pickled mussels[J]. *Cleaner Environmental Systems*, 2023, 11: 100152.

## Correlation between the rheological and textural properties of apple tissue under moderate electric field treatment

LI Xingshu<sup>1,2</sup>, WANG wei<sup>1</sup>, WANG Runze<sup>1</sup>, ZHANG Chongyang<sup>1</sup>, LIU Jiakai<sup>2</sup>, XIONG Xiufang<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Fruits and vegetables pretreatment can often be required for cost saving, due to the high energy consumption in the subsequent deep processing. Among them, the moderate electric field (MEF) can induce both electrical and thermal effects, and then tailor the microstructure of fruits and vegetables. The resulting rheological properties can further change the textural properties. This study aims to clarify the correlation between the rheological and texture properties of apple tissues under the MEF. A systematic investigation was also carried out to determine the creep, dynamic viscoelasticity, and TPA texture properties of apple tissues. An analysis was finally made to explore the effects of electric field strengths (15 ~ 90 V/cm) and temperature (30 ~ 70 °C) on the viscoelasticity and TPA parameters of apple tissues. The results showed that the MEF treatment was performed better to rapidly soften the apple tissues, compared with the water bath treatment at the same temperature. The hardness, brittleness, and chewiness of apple tissues decreased linearly with the increase of the electric field strengths and temperature. There was no variation in the mechanical properties of apples that were dominated by elastic characteristics after MEF treatment. The viscoelasticity of apples decreased with the increase of the temperature and strengths of electric field treatment. Instant elastic modulus ( $E_0$ ) was significantly positively correlated with the storage modulus ( $G'$ ) ( $P < 0.05$ ). The correlation coefficient of 0.69 indicated the variation in the elasticity of apple tissue during pretreatment. Therefore,  $E_0$  and  $G'$  were taken as the elastic factors. The coefficient of viscosity factor ( $\eta_0$ ) was significantly positively correlated with the loss modulus ( $G''$ ) ( $P < 0.05$ ) with a correlation coefficient of 0.94, indicating the variation in the viscosity during pretreatment. Therefore,  $\eta_0$  and  $G''$  were used as the viscosity factors; There was a significant positive correlation between damping factor ( $\tan\delta$ ) and delay time ( $T_1$ ) ( $P < 0.05$ ), where the correlation coefficient was 0.88. As such, the  $\tan\delta$  and  $T_1$  indexes were used to measure the proportion of viscoelastic change in the pretreatment. The parameters  $E_0$ ,  $G''$ , and  $T_1$  were selected as the evaluation indexes for the rheological properties of apple tissues using the Pearson correlation coefficient. The principal component analysis showed that the hardness, brittleness, and Chewiness were significantly positively correlated with the viscoelastic factors ( $P < 0.05$ ), while there was no significant correlation between the resilience, cohesiveness, and viscoelasticity ( $P > 0.05$ ). Especially, the cohesiveness and resilience of apples were closely related to the fracture and deformation caused by nonlinear deformation. There were some differences from the viscoelastic parameter properties in the linear range. It was also observed that there was an intact cell structure of untreated apple tissue. At the electric field strengths of 30 V/cm, the cell structure was complete, and a few cells showed a tendency to curl up, which was little different from that in the water bath treatment at 40 °C, indicating no significant electrical effect. At the electric field strengths of 45 V/cm, the cells also shared a complete structure, and some cells appeared to curl up at the edge under the joint action of the electrical effect and electric heating effect. A large range of cell tissue collapse often occurred at the electric field strengths of 60~75 V/cm. As such, the cell tissue basically collapsed and lost its support at 90 V/cm. When the electric field intensity was 45 V/cm, the apple tissue cells gradually collapsed with the increase in temperature (40~60 °C). Even the cells were severely deformed and lost their support at 70 °C. Under the condition of 45 V/cm and below, there was no variation in the influence of the electric field with temperature. When the field strength was greater than 45 V/cm, even if the action time was short, the texture and viscoelasticity of apples were greatly affected at a lower temperature, where the hardness was reduced. There was no significant difference in the cohesion, indicating a short time of high field strength suitable for the pretreatment of canned products. The finding can provide theoretical support to improve the technological conditions of fruit and vegetable pretreatment by medium voltage electric field.

**Keywords:** electric field; apple; creep; dynamic viscoelasticity; textural properties