

技术专论

超高压对低密度聚乙烯与乙醇相互作用的影响

程欣^{1,2}, 唐亚丽^{1,2,3}, 王淑娟^{1,2}, 卢立新^{1,2,3}, 方艳¹(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122;
3. 中国包装总公司食品包装技术与安全重点实验室, 无锡 214122)

摘要:目的 研究超高压对薄膜结构及性能的影响,以及超高压作用下薄膜与食品模拟物的相互作用。
方法 选择低密度聚乙烯包装袋为研究对象,以体积分数为10%和95%的乙醇作为低密度聚乙烯包装内的食品模拟物。在超高压装置中,分别进行压力为200,300,400 MPa,保压时间为5,15 min,介质温度为20,60℃的处理,放置7,14,21 d后检测膜的结构和性能变化,以及内容物的不挥发物总量变化。**结果** 压力和温度的提高会使链段运动增强,导致低密度聚乙烯薄膜的结晶度变大,同时拉伸强度也变大,但并不显著;压力与氧气透过率的变化成反比,体积分数为95%的乙醇溶液内容物的低密度聚乙烯,其氧气透过率低于体积分数为10%的;内容物的含量对不挥发物总量也会产生较为显著的影响,含量越大,不挥发物的总量越低,迁移量越小。**结论** 压力、温度和内容物含量的变化都会对低密度聚乙烯和乙醇的相互作用产生影响。

关键词: 低密度聚乙烯薄膜; 乙醇; 结晶度; 拉伸强度; 氧气透过率; 不挥发物总量**中图分类号:** TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)09-0054-06

Effect of Ultra High Pressure on the Interaction between LDPE and Ethanol

CHENG Xin^{1,2}, TANG Ya-li^{1,2,3}, WANG Shu-juan^{1,2}, LU Li-xin^{1,2,3}, FANG Yan¹

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced of Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China; 3. Key Laboratory of Food Packaging Techniques & Safety of China National Packaging Corporation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the effects of ultra high pressure on the structure and properties of the film, as well as the interaction between the film and the food simulant under high pressure processing. LDPE packaging bags were selected as the study object, and the 10% and 95% ethanol were chosen as food simulants in the LDPE packages. In a ultra high pressure device, pressure of 200, 300, 400 MPa was applied respectively for 5 and 15 min, and the medium temperature was 20 and 60℃, the changes in the structure and properties of the film as well as the total amount of nonvolatile food simulant after storing under these conditions for 7, 14 and 21 days were determined. The increase of pressure and temperature could enhance the segment motion, leading to increased degree of crystallinity of LDPE film. Meanwhile, the tensile strength was also enhanced, but the change was not significant. With the increasing pressure, the oxygen transmission rate decreased. For LDPE package containing 95% ethanol solution, the oxygen transmission rate was lower than that containing 95% ethanol solution. The concentration of food simulant also significantly affected the total amount of nonvolatile matter. The higher the concentration, the lower the total amount of nonvolatile matter and the smaller the migration. Pressure, temperature and content of food simulant all influenced the interaction between LDPE and ethanol.

KEY WORDS: LDPE; ethanol; crystallinity; tensile strength; oxygen transmission rate; total amount of nonvolatile matter

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(31101376)

作者简介: 程欣(1990—),女,辽宁锦州人,江南大学硕士生,主攻食品包装技术。

通讯作者: 唐亚丽(1982—),女,河北张家口人,博士,江南大学副教授,主要研究方向为食品包装。

超高压处理技术(HPP),又称高静压处理技术,一般是指将柔性容器内的物品,置于以水或其他液体作为传压介质的压力体系中,采用100~1000 MPa的压力处理食品,使细胞形态、离子键和疏水键等非共价键等发生改变,以达到杀菌、钝化、灭酶、保鲜和物料改性的目的^[1-4]。超高压处理技术被认为是较新的食品保藏方法,不仅能使微生物失活,延长食品货架期,而且能更好地保证良好的食品风味和营养^[5-8]。超高压处理技术被认为是食品加工和保鲜新技术中最有潜力的一种。目前,果汁、肉类、鳄梨酱、米饭、酸奶、蔬菜和水产品等已经应用超高压技术进行生产^[9]。食品包装材料与食品直接接触,与外界环境形成屏障对食品起到保护作用,包装是否完整、性能是否优越决定着食品的最终质量^[10]。由于在超高压处理过程中会导致体积和温度的变化,可能会使外包装材料的结构和性质发生一定的变化,也会对包装材料与其内容物之间的吸收和迁移等作用产生影响^[11-13],从而影响食品的货架期,因此,研究超高压作用下包装材料和内容物的相互作用具有重要意义。在此,重点讨论体积分数为10%和95%的乙醇作为食品模拟物时,低密度聚乙烯(LDPE)膜在不同超高压操作条件下性能的变化,以及与内容物的相互影响。测定在一定的贮藏周期内,经过超高压处理后的LDPE包装袋中食品模拟物的变化规律,以及食品模拟物对包装材料性能的影响规律,对于正确指导超高压杀菌包装薄膜的选用,确保食品安全流通,具有十分重要的意义。

1 实验

1.1 材料与仪器

材料与仪器:低密度聚乙烯(LDPE)膜,食品级,江苏瑞盛塑料有限公司;无水乙醇,分析纯AR,国药集团化学试剂有限公司;HPP 600 MPa/5 L超高压处理装置,包头科发高压科技有限责任公司;PC型智能拉力机,济南兰光机电技术有限公司;水蒸气透过率测试系统W3/060,济南兰光机电技术有限公司;BTY-B1透气性测试仪,济南兰光机电技术有限公司;Pyris 1 DSC,美国PerkinElmer公司。

1.2 试验方法

对LDPE薄膜在处理前进行结晶度、拉伸强度和透氧量的测量^[14],然后将聚合物包装薄膜制袋,在室温

条件下不装入和分别装入体积分数为10%和95%的乙醇溶液。部分不经过超高压处理的包装袋分别装入体积分数为10%和95%的乙醇溶液,作为对照组。将试样放入超高压装置中分别进行压为200,300,400 MPa,保压时间为5,15 min,介质温度为20,60 ℃的处理。所有试样分别放置在空气中7,14,21 d后进行检测,每个试样重复测量5次,取平均值。

1) 包装材料力学性能测定。在室温下,将没有经过超高压处理和经过不同超高压操作条件处理的试样进行力学性能测试。厚度测试按照GB 6672—2001进行测试;拉伸强度测试按照GB 13022—1991进行测试。

2) 包装材料阻隔性能测定。透气率按照GB 1037—1988进行测定,测定条件为温度22 ℃、相对湿度50%。

3) 不挥发物总量检测。根据实验方案,参照GB/T 5009.60—2003《食品包装用聚乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯成型品卫生标准的分析方法》,将贮藏一定周期试样内的食品模拟物提取一定量,在水浴锅上蒸干后置于恒温干燥箱烘干至恒重后称量。

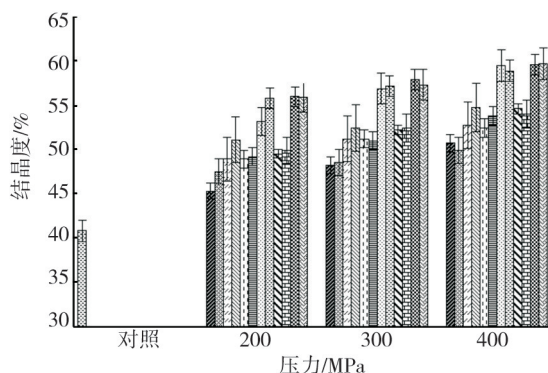
4) 统计分析。采用SPSS 21.0软件进行数据分析,实验结果采用表格形式或图的变化趋势来表示,当 $P<0.05$ 时差异显著。

2 结果与分析

2.1 超高压处理对包装材料结构的影响

未经过超高压处理和经过不同超高压操作条件处理的LDPE包装试样结晶度变化见图1。从图1可以看出,不同超高压操作条件处理的LDPE结晶度,相对于未经过超高压处理的试样结晶度发生了明显变化。随着压力从200 MPa上升到400 MPa,结晶度呈现出增长的趋势($P<0.05$);温度的变化对试样结晶度的影响十分显著($P<0.05$),当温度从20 ℃升高至60 ℃时,结晶度变化比较明显。这是因为压力和温度升高会使半结晶型热塑性聚合物包装材料的非结晶区发生变化;乙醇含量的变化对LDPE结晶度并未产生显著影响,因乙醇和LDPE的极性不同,并未起到增塑等作用;压力升高也会导致升温,温度变大非结晶区的链段运动增强,卸压后链段运动减弱,导致分子链排列紧密使薄膜形成结晶状态。薄膜的结晶有助于提高薄膜的阻隔性,降低渗透性。Yoo等^[15]研究表明,聚合物的结晶度与压力、温度呈正相关。食品模

拟物和保压时间对材料的结晶性能有影响,但并不显著($P>0.05$)。该实验结论与张萍等^[16]人的研究结果半结晶热塑性聚合膜都有一定的结晶和非结晶区,这些膜在高压处理后结晶度随其内部分子结构的不同而有不同程度的提高相一致。



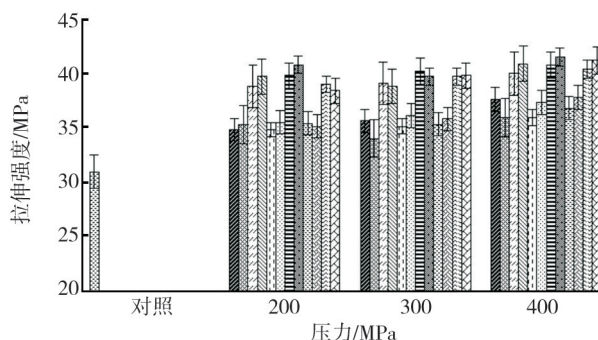
注:第1个柱形为对照组。200,300,400 MPa中柱形从左到右依次表示无内容物,5 min,20 °C;无内容物,15 min,20 °C;无内容物,5 min,60 °C;无内容物,15 min,60 °C;乙醇(10%),5 min,20 °C;乙醇(20%),15 min,20 °C;乙醇(10%),5 min,60 °C;乙醇(10%),15 min,60 °C;乙醇(95%),5 min,20 °C;乙醇(95%),15 min,20 °C;乙醇(95%),5 min,60 °C;乙醇(95%),15 min,60 °C。

图1 不同超高压操作条件下LDPE结晶度变化

Fig.1 The change of crystallinity of LDPE under different ultra high pressure processing conditions

2.2 超高压处理对包装材料拉伸性能的影响

超高压条件和内容物对LDPE拉伸强度的影响见图2。经过超高压处理后薄膜的拉伸强度随着压力的增加有上升的趋势,但变化并不显著($P>0.05$),且保压时间并未对LDPE的拉伸强度产生规律性的影响,这与唐亚丽^[17]和Cancer等^[18]人的研究结果相一致。同时,乙醇含量的变化对材料拉伸性能并未产生显著的影响。在超高压处理过程中,由于内容物和薄膜之间存在极性与非极性差异,因而可能会影响薄膜的拉伸强度。而LDPE为非极性,对乙醇的吸附能力不强,乙醇模拟物对材料的拉伸性能并未产生显著影响;当温度变化时,薄膜的拉伸性能发生比较明显的变化,温度升高分子热运动增强有利于分子的取向,使薄膜的结晶度变大。结晶性塑料膜由于晶区范围变大的增强作用,分子间作用力增强,从而增强了对外力拉伸破坏的抵抗力。结晶度越高拉伸强度往往越好,但也取决于材料本身的性质、材料不同方向受力情况和热运动情况的不同,取向度会随着材料本身的性能而发生相应的改变。



注:柱形含义同图1。

图2 不同超高压操作条件和内容物变化对LDPE拉伸强度的影响

Fig.2 Effect of different ultra high pressure processing conditions and food simulant contents on the tensile strength of LDPE

2.3 超高压处理对包装材料透氧性能的影响

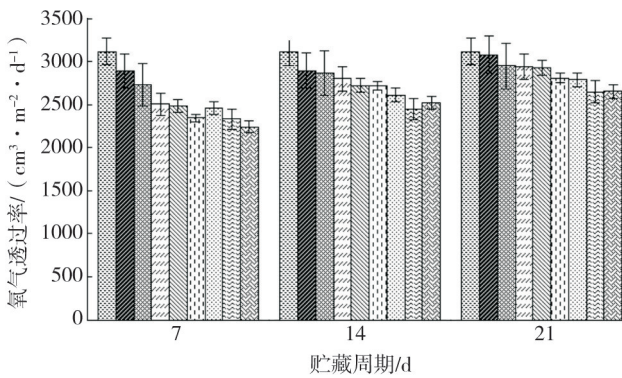
食品的贮藏与空气有着密切关系,空气中的氧气可以使食物氧化变质,致使细菌滋生,有利于需氧微生物的繁殖,会加速食品的腐败变质,缩短食品保质期。食品包装必须有较好的氧气阻隔性,以维持包装内部较低的氧气含量。塑料薄膜的氧气透过率一方面与材料本身有关,另一方面也与环境因素有较大关系。

超高压条件和乙醇含量对氧气透过率的影响见图3。由图3可见,体积分数为95%的乙醇溶液内容物的低密度聚乙烯,其氧气透过率低于体积分数为10%的乙醇溶液内容物的低密度聚乙烯,这是因为不同含量乙醇溶液的扩散渗透能力不同。

图4表明,当内容物含量和保压时间一定时,氧气透过率与压力和温度的变化相反。经过超高压处理后,压力和温度都会对食品模拟物的渗透速率和扩散产生相应的影响,压力增加会导致升温,温度升高会使分子的运动增强,加速了物质的扩散作用,含量越大扩散能力越强,越容易阻塞在聚合物分子的缝隙处,因而对于外界气体的阻隔性能越强。而随着贮藏周期的增加,这种扩散能力逐渐减弱,使得聚合物包装材料的氧气透过能力变大。经过超高压处理之后,试样氧气透过率增大的速率要低于没有经过超高压处理的试样。

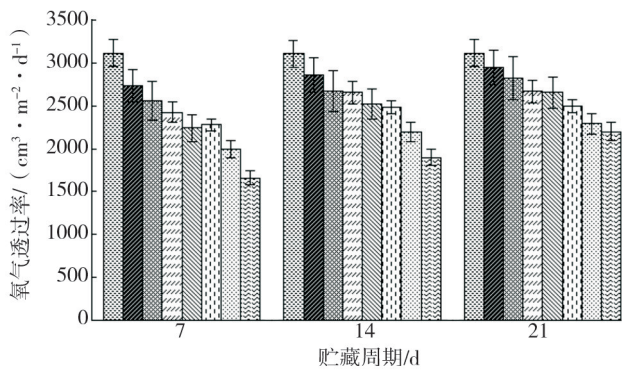
2.4 超高压处理对不挥发物总量的影响

超高压条件、乙醇含量和温度对不挥发物总量的影响见图5。从图5可以看出,在贮藏一定周期后,不挥发物的总量随着贮藏周期的延长,迁移量逐渐增



注:7,14,21 d贮藏周期内柱形图从左到右依次表示0.1 MPa,无内容物;0.1 MPa,乙醇(10%);0.1 MPa,乙醇(95%);400MPa,20 °C,5 min,无内容物;400 MPa,20 °C,15 min,无内容物;400 MPa,20 °C,5 min,乙醇(10%);400 MPa,20 °C,15 min,乙醇(10%);400 MPa,20 °C,5 min,乙醇(95%);400 MPa,20 °C,15 min,乙醇(95%)。

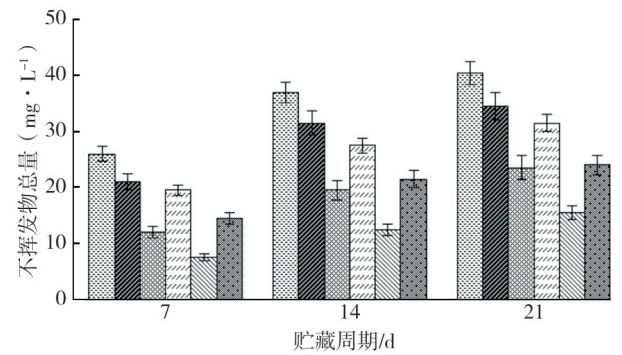
图3 超高压条件和乙醇含量变化对氧气透过率的影响
Fig.3 Effect of ultra high pressure and ethanol concentration on the oxygen transmission rate



注:7,14,21 d贮藏周期内柱形图从左到右依次表示0.1 MPa,无内容物;0.1 MPa,乙醇(95%);200 MPa,20 °C,乙醇(95%);300 MPa,20 °C,乙醇(95%);400 MPa,20 °C,乙醇(95%);200 MPa,60 °C,乙醇(95%);300 MPa,60 °C,乙醇(95%);400 MPa,60 °C,乙醇(95%)。

图4 超高压条件对氧气透过率的影响
Fig.4 Effect of different ultra high pressure processing conditions on the oxygen transmission rate

大,到后期有逐渐放缓的趋势。相对于对照组(0.1 MPa),经过超高压处理后试样的不挥发物总量明显下降,说明压力会导致薄膜的结晶度提高,对乙醇迁移速率起到了明显的抑制作用。超高压会引起薄膜结构的变化,其内容物和温度对薄膜的吸附性有重要影响,薄膜结构的改变会影响薄膜的吸附性^[19-20]。内容物的含量对不挥发物总量产生较为显著的影响($P<0.05$),含量越大不挥发物的总量越低,材料向内容物中的迁移量越小;温度对不挥发物总量的影响也十分

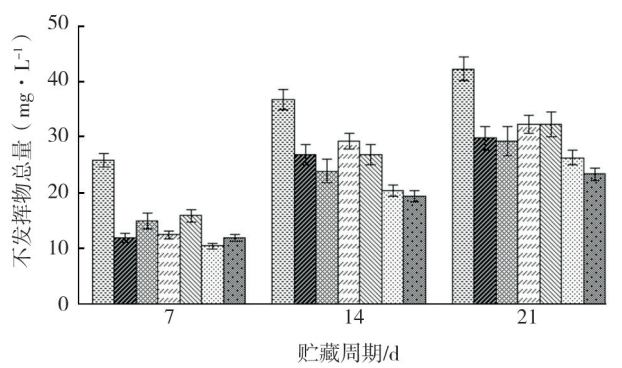


注:7,14,21 d贮藏周期内柱形图从左到右依次表示乙醇(10%),20 °C,0.1 MPa;乙醇(95%),20 °C,0.1 MPa;乙醇(10%),20 °C,400 MPa,15 min;乙醇(10%),60 °C,400 MPa,15 min;乙醇(95%),20 °C,400 MPa,15 min;乙醇(95%),60 °C,400 MPa,15 min。

图5 超高压条件、乙醇含量和温度对不挥发物总量的影响
Fig.5 Effect of ethanol concentration and temperature on the amount of nonvolatile matter under different ultra high pressure

显著,温度升高会增强分子的流动性,加速物质在膜之间的扩散速度,迁移速度明显变大^[21]。

内容物为乙醇(10%),20 °C时超高压条件对不挥发物总量的影响见图6。从图6可以看出,随着压力增加,不挥发物的总量有所下降,这也说明压力对内容物和材料的迁移起到一定的抑制作用,压力越大,不挥发物总量越低。这是由于压力会引起薄膜结构的变化,结晶度提高,内容物迁移性能降低。



注:7,14,21 d贮藏周期内柱形图从左到右依次表示对照组;200 MPa,5 min;200 MPa,15 min;300 MPa,5 min;300 MPa,15 min;400 MPa,5 min;400 MPa,15 min。

图6 内容物为乙醇(10%)、20 °C时超高压条件对不挥发物总量的影响
Fig.6 The change of non-volatile matter amount under different ultra high pressure processing conditions (10% ethanol and 20 °C)

3 结语

1) 当乙醇含量和保压时间一定时,温度和压力越大,结晶度呈现出增长趋势。压力和温度升高,会使半结晶型热塑性聚合物包装材料的非结晶区发生变化。压力和温度升高使非结晶区的链段运动增强,压力释放之后,链段运动减弱,分子链排列紧密使聚合物包装材料形成结晶状态,而薄膜的结晶有助于提高薄膜的阻隔性,降低渗透性。

2) LDPE的拉伸强度随着压力的变化并不显著,但是温度对于拉伸强度有着较为显著的影响。温度升高使分子热运动增强,有利于分子的取向,使薄膜的结晶度变大,增强了对外力拉伸破坏的抵抗力。同时,内容物含量的变化并未起到显著的影响作用。

3) 氧气透过率随着压力、温度和乙醇含量的变化而变化,并与压力和温度变化成反比。压力的增加改变了材料的结构和性能,使得材料性能更加优化。而内容物含量越大,渗透扩散能力越强,越容易阻塞在材料的缝隙中,降低了氧气透过率。

4) 不挥发物总量的变化与压力、温度、内容物含量相关。压力会影响薄膜的结构性能,温度会使分子的扩散运动加快。

5) 总体而言,温度对LDPE和乙醇溶液的相互作用影响最大;压力会改变聚合物包装材料的结构和性能,对LDPE和乙醇溶液的相互作用也有较为显著的影响;内容物含量的变化主要对聚合物包装材料的迁移作用产生影响;保压时间并未产生规律性的影响。

综上所述,进行食品加工选择超高压处理时,应该全面考虑不同的食品组分、贮藏环境和不同包装膜之间的相互作用,应根据不同的食品性质来选择相应的包装。关于超高压处理后食品组分与包装材料相互影响的研究还不够完善,得到有效的标准来评估食品的质量安全及货架期的研究还需要进一步实验。

参考文献:

- [1] 薛路舟,陈淑花,夏远景,等.超高压处理对生物大分子的影响研究进展[J].食品工程,2009(1):19—22.
XUE Lu-zhou, CHEN Shu-hua, XIA Yuan-jing, et al. Advances of Effect on Ultra-high Pressure Treatment on Biomacromolecules[J]. Food Engineering, 2009(1): 19—22.
- [2] 杨小兰,袁娅,郭晓辉,等.超高压处理对不同品种猕猴桃浆多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2013,34(1):73—77.
YANG Xiao-lan, YUAN Ya, GUO Xiao-hui, et al. Effect of Ultra High Pressure (UHP) on Polyphenol Content and Antioxidant Activity in Kiwifruit Juice from Different Cultivars [J]. Food Science, 2013, 34(1): 73—77.
- [3] 向晨茜.超高压处理对鲜榨橙汁品质影响研究[D].重庆:西南大学,2012.
XIANG Chen-xi. The Effect of Ultra High Pressure on the Quality of Fresh Orange Juice[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [4] 魏炜,王华.超高压处理对甜橙果肉品质的影响[J].食品科学,2014,35(3):66—70.
WEI Wei, WANG Hua. Effect of Ultra High Pressure on Quality of Sweet Orange Pulp[J]. Food Science, 2014, 35(3): 66—70.
- [5] PERERA N, GAMAGE T V, WAKE LING L, et al. Color and Texture of Apples High Pressure Processed in Pineapple Juice [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(1): 39—46.
- [6] OEY I, VANDER PLANCKEN I, VAN LOEY A, et al. Does High Pressure Processing Influence Nutritional aspects of Plant Based Food Systems[J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19(6): 300—308.
- [7] 徐绍虎,崔爽.无菌包装食品冷杀菌技术研究进展[J].包装工程,2010,31(15):113—116.
XU Shao-hu, CUI Shuang. Research Progress in Cold Sterilization Technique for Aseptic Packaging Foods[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 113—116.
- [8] 揭广川,赵伟,杨瑞金,等.超高压加工生鲜牡蛎的研究[J].食品工业科技,2011,32(1):71—74.
JIE Guang-chuan, ZHAO Wei, YANG Rui-jin, et al. Study on the Ultra High Pressure Processing of Fresh Oyster[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(1): 71—74.
- [9] 巩雪,常江,李丹婷.超高压保鲜包装技术的研究进展[J].包装工程,2014,35(3):97—111.
GONG Xue, CHANG Jiang, LI Dan-ting. Development of Ultra High Pressure Fresh-keeping Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 97—111.
- [10] 唐亚丽,赵伟,卢立新.超高压作用下的食品包装问题[J].食品研究与开发,2011,32(12):193—196.
TANG Ya-li, ZHAO Wei, LU Li-xin. Food Packaging under High Pressure[J]. Food Research and Development, 2011, 32(12): 193—196.
- [11] CANER C, HERNANDEZ R J, PASCALL M A, et al. The Effect of High-pressure Food Processing on the Sorption Behaviour of Selected Packaging Materials[J]. Packaging Technology and Science, 2004(17): 139—153.
- [12] 王建清,邱桂斌,梁国权.微波处理对塑料薄膜包装材料阻隔性能影响的研究[J].包装工程,2004,25(2):7—17.
WANG Jian-qing, QIU Gui-bin, LIANG Guo-quan. Study of the Inference of Microwave Treatment to Barrier Performance

- of the Plastic Film[J]. *Packaging Engineering*, 2004, 25(2): 7—17.
- [13] 彭珍,赵国华.超高压对塑料包装薄膜性能的影响[J].食品与发酵工业,2011,37(3):151—156.
- PENG Zhen, ZHAO Guo-hua. The Influence of Performance of the Plastic Film under HPP[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011, 37(3): 151—156.
- [14] 李慧,王利强,卢立新.微波处理对海藻酸钠可食性包装膜性能的影响[J].包装工程,2009,30(9):10—12.
- LI Hui, WANG Li-qiang, LU Li-xin. Inference of Microwave Treatment on Sodium Alginate Based Edible Packaging Film [J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(9): 10—12.
- [15] YOO S, LEE J, HOLLOMAN C, et al. The Effect of High Pressure Processing on the Morphology of Polyethylene Films Tested by Differential Scanning Calorimetry and x-ray Diffraction and its Influence on the Permeability of the Polymer [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(1): 107—113.
- [16] EHERNSTEIN G W. 聚合物材料结构性能应用[M]. 张萍, 赵树高, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- EHERNSTEIN G W. *Polymeric Materials: Structure-Properties-Applications*[M]. ZHANG Ping, ZHAO Shu-gao, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [17] 唐亚丽,赵伟,卢立新,等.超高压杀菌处理对包装材料稳定性的影响[J].包装工程,2010,31(23):10—12.
- TANG Ya-li, ZHAO Wei, LU Li-xin, et al. Effect of Sterilization Processing under Ultra High Pressure on the Stability of Packaging Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(23): 10—12.
- [18] CANER C, HERNANDEZ R J, PASCALL M A, et al. The Use of Mechanical Analyses, Scanning Electron Microscopy and Ultrasonic Imaging to Study the Effects of High-pressure Processing on Multilayer films[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83(11): 1095—1103.
- [19] PEYCHS B A, MOUTOUNET M, PEYRON S, et al. Factors Determining the Transport Coefficients of Aroma Compounds Through Polyethylene Films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(1): 45—53.
- [20] RIVAS C A, FERNANDEZ G E, NUNEZ M. Volatile Compounds in Dry-cured Serrano Ham Subjected to High Pressure Processing Effect of the Packaging Material[J]. *Meat Science*, 2009, 82(2): 162—169.
- [21] KUBEL J, LUDWIG H, MARX H, et al. Diffusion of Aroma Compounds into Packaging Films Under High Pressure[J]. *Packaging Technology and Science*, 1996, 9: 143—152.
- =====
- (上接第11页)
- Research, 2007, 22(2): 180—186.
- [17] UNGER A, SEXTRO W, ALTHOFF S, et al. Data-driven Modeling of the Ultrasonic Softening Effect for Robust Copper Wire Bonding[C]// *Integrated Power Systems (CIPS)*, 2014 8th International Conference on. VDE, 2014: 1—11.
- [18] 魏建梅,齐秀东,张海娥,等.京白梨果实采后PG,糖苷酶和LOX活性变化及其基因表达特性[J].园艺学报,2012, 39(1): 31—39.
- WEI Jian-mei, QI Xiu-dong, ZHANG Hai-e, et al. The Activity and Gene Expression of Polygalacturonase, Glycosidase and Lipoxigenase in Postharvest 'Jingbaili' Pear Fruit[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(1): 31—39.
- [19] HUANG R H, LIU J H, LU Y M, et al. Effect of Salicylic Acid on the Antioxidant System in the Pulp of 'Cara Cara' Navel Orange[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 47(2): 168—175.
- [20] 陆胜民,席珂芳,张耀洲.梅果采后软化与细胞壁组分及其降解酶活性的变化[J].中国农业科学,2003,36(5): 595—598.
- LU Sheng-min, XI Yu-fang, ZHANG Yao-zhou. Softening of Green Mume Flesh and Changes of Cell Wall Components and Activities of Their Degrading Enzymes during the Postharvest Period[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 595—598.
- [21] DELAIRE O, MARTY K, STONE M B, et al. Phonon Softening and Metallization of a Narrow-gap Semiconductor by Thermal Disorder[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(12): 4725—4730.
- [22] 姜爱丽,胡文忠,田密霞,等.水杨酸处理对采后番茄果实后熟衰老的影响[J].食品与发酵工业,2009(5): 205—209.
- JIANG Ai-li, HU Wen-zhong, TIAN Mi-xia, et al. Effect of Salicylic Acid Treatment on Postharvest Ripening Tomato Aging[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2009(5): 205—209.
- [23] 阎田,沈全光.水杨酸(SA)对果实成熟的影响[J].植物学通报,1998,15(3): 61—64.
- YAN Tian, SHEN Quan-guang. Effects of Salicylic Acid(SA) on Ripening Fruits[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1998, 15(3): 61—64.
- [24] 魏建梅,马锋旺,关军锋,等.京白梨果实后熟软化过程中细胞壁代谢及其调控[J].中国农业科学,2009,42(8): 2987—2996.
- WEI Jian-mei, MA Feng-wang, GUAN Jun-feng, et al. Cell Wall Metabolism and Its Regulation in Harvested *Pyrus ussuriensis* Maxin. cv. Jingbaili Fruit during Ripening[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2987—2996.