

磁场下电解质流体对马铃薯片品质的影响^{*}

金亚美¹ 杨 哪¹ 段 翔¹ 金征宇² 徐学明²

(1. 江南大学食品学院, 无锡 214122; 2. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 无锡 214122)

摘要: 为提升马铃薯片品质, 采用含不同质量分数氯化钙、葡萄糖酸锌、抗坏血酸的溶液流体处理垂直磁场下的马铃薯片, 结果表明, 马铃薯片置于磁感应强度 1 500 Gs 环境下利于溶质的渗透, 流速为 0.05 m/s 处理马铃薯片品质改善显著, 若电解质流体流速过高则会干扰溶质的渗透。空白样即未施加磁场的情况下, 产品品质均无任何改善。该技术可实现对马铃薯片的品质提升, 包括微量元素的营养强化和保脆处理, 且弱电解质即抗坏血酸在流场中也受垂直磁场的影响并富集于马铃薯片组织表面从而使其具有抑制褐变的效果。

关键词: 马铃薯 抗褐变 流体电解质 垂直磁场 矿物质强化

中图分类号: TS255.54 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)02-0234-06

Quality Improvement of Potato Slice by Flowing Electrolyte under Magnetic Field

Jin Yamei¹ Yang Na¹ Duan Xiang¹ Jin Zhengyu² Xu Xueming²

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. State Key Lab of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The Hall effect in a flowing electrolyte demonstrates the impact of a perpendicular magnetic field on positive and negative ion moving path in a velocity field, of which the essence is the application of Lorentz force in solution fluid. Potato slices were treated under a perpendicular magnetic field with impregnation solution fluid containing different concentration of calcium chloride, zinc gluconate and ascorbic acid. The results showed that a center magnetic flux density of 1 500 Gs promoted the permeation of the target solute, and higher velocity of flowing electrolyte declined the effect of penetration for charged ions. The quality of potato slice was significantly improved at 0.05 m/s velocity treatment. In contrast, the quality of the control group was not changed. This method can also be used to achieve the fortification of minerals, keep crispness and prevent browning of other agricultural products.

Key words: Potatoes Anti-browning Flowing electrolyte Perpendicular magnetic field Mineral fortification

引言

膳食健康日益受到人们关注, 营养强化食品是功能性食品开发的主要热点之一。商业化的方便果蔬片近年来发展迅速^[1-2]。目前关于果蔬的功能性开发研究多集中在微量元素强化、色素着色、抗氧化

褐变和益生菌加强方面^[3-5]。植物原料具有一定的孔隙率故在浸渍过程中溶质会向组织内部渗透扩散, 细胞内水分溢出, 细胞膜通透性增加。所以, 对于多孔状食品材料的功能性改善多采用浸渍处理的加工手段实现, 包括营养强化和抗褐变: Gras 等^[6]进行了真空浸渍对鲜切蔬菜的钙元素强化效果的考

收稿日期: 2014-01-16 修回日期: 2014-02-24

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD37B01)和农业部公益性行业(农业)科研专项资助项目(201303070-02)

作者简介: 金亚美, 博士生, 主要从事食品浸渍技术开发研究, E-mail: yameiking123@126.com

通讯作者: 徐学明, 教授, 博士生导师, 主要从事食品组分与物性研究, E-mail: xmxu@jiangnan.edu.cn

察;Lin等^[7]等采用真空浸渍手段对鲜切梨片进行了维生素E和蜂蜜的加强;Perez等^[1]也采用真空浸渍的方法对鲜切梨片进行了抗褐变剂的渗透处理;徐珠洁等^[8]对苹果中钙和锌元素的真空浸渍强化进行了研究。金属电解质和有机酸溶液中含有大量的阴阳离子,运动的带电离子在垂直磁场下受到洛伦兹力影响,其运动轨迹发生偏移。有研究报道电解质流体在垂直磁场下的霍尔效应并采用特制的仪器在流体两侧检测到有微小的电势差,说明了氯离子和钠离子的分离^[9]。利用该原理对电解质溶液中的各类运动离子施加垂直磁场,可完成特定的电化学反应,如金属表面的离子沉积^[10]和目标离子分离^[11]。Greenblatt等^[12]对通电平行板间的电解质溶液中的运动离子在磁场下的迁徙轨迹改变作了描述,包括施加不同方向的周期恒稳磁场。Gad-el-Hak^[13]也对垂直磁场中流体内的正负离子运动做了研究,磁场若与离子运动轨迹平行则不会对其产生影响。针对上述原理的应用拓展,本文采用流动的复合电解质溶液经过垂直磁场区域,考察葡萄糖酸锌、氯化钙、抗坏血酸混合液对马铃薯片进行的矿物质强化和硬度改善及表面褐变抑制效果,以完成溶质对马铃薯片的浸渍处理并达到改善品质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验装置

新鲜马铃薯购于当地市场,将原料削皮后切成尺寸60 mm×30 mm×4 mm(长×宽×厚)的块状,即两侧表面积合计为36 cm²。以葡萄糖酸锌、氯化钙和抗坏血酸作为复合浸渍液溶质,在流动状态下完成对马铃薯片的浸渍。采用自行研制的浸渍试验装置进行研究^[14]。原理如图1所示(图中 B 表示磁感应强度, v 表示浸渍液流速),恒稳磁场区域由2块尺寸为100 mm×100 mm×15 mm的钕硼铁磁钢产生,中心磁感应强度可通过调节磁钢间距来调整,范围200~3 000 Gs,采用上海亨通HT108特斯拉计进行磁感应强度检测。气动隔膜泵使复合浸渍溶液在管路中循环流动。原理是流体中的正负离子在经过垂直磁场区域时受洛伦兹力影响其大量离子向某一方向偏移,进而加强向多孔状样品组织的渗透作用。

1.2 试验方法

1.2.1 样品处理方法

马铃薯片于90℃中热烫3 min,迅速冷却后将一片样品装入网框中固定,置于管道腔体内,保证马铃薯片的长宽面平行于磁力线方向,其中流速场 v 和磁场 B 垂直,如图1所示。将配置好的复合浸渍液灌入整个回路体系,开启隔膜泵使溶液流动,流速

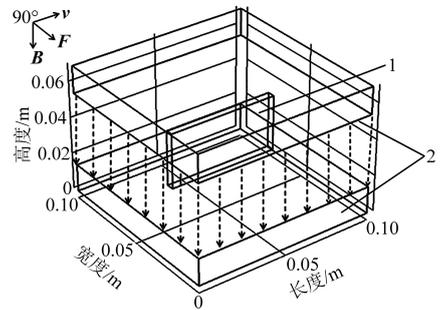


图1 样品在磁场中的位置示意

Fig. 1 Location of sample in magnetic field

1. 钕硼铁磁钢 2. 马铃薯片

可通过调压阀调节。马铃薯片样品在垂直磁场区域中,于不同质量分数的复合浸渍液(配比编号见表1)和不同流速(0.05、0.10、0.15、0.20 m/s)、不同时间(0、10、20、30、40、50、60 min)下处理,其中处理时间达半程后磁场方向调换,完成后马铃薯片采用聚乙烯高温蒸煮袋进行真空包装,于90℃灭菌8 min,然后迅速冷却到38℃,进行钙、锌含量及硬度测定,其中空白组不施加恒稳磁场作为对照。同时,为考察该方法的抗褐变效果,将另一部分样品于20℃下保藏7 d,每天测量褐变强度和色差 L 值。

表1 复合浸渍液质量分数配比

Tab. 1 Characterization of impregnation solutions

参数	编号			
	1	2	3	4
葡萄糖酸锌质量分数/%	0.6	0.9	1.2	1.5
氯化钙质量分数/%	0.2	0.4	0.6	0.8
抗坏血酸质量分数/%	0.4	0.6	0.8	1.0

1.2.2 微量元素含量测定

参照GB/T 5009.92—2003和GB/T 5009.14—2003,样品消化后采用火焰原子吸收分光光度计分别于422.7 nm和213.8 nm处测定钙、锌含量(质量比),单位为mg/kg^[8]。

1.2.3 质构测定

采用物性分析仪(TA.XTPlus, SMS, 英国),在压缩模式下测定力的大小(单位:N)。安装的探头为Craft Knife Blade。设定测量参数:目标模式strain,压缩程度60%,压缩速度10 mm/s。规定压力最大峰的峰值为硬度,单位为g。

1.2.4 褐变强度测定

采用北京普析TU1900型分光光度计法进行测定^[15]。取2 g样品,加入5 mL 95%乙醇提取,碾磨成匀浆,于5 000 r/min下离心30 min,取上清液在420 nm下测定OD值,每次测定重复3次。

1.2.5 色差测定

日本柯尼卡CR-400型色差计测定马铃薯样

品的色差。采用 CIE LAB 表色系统分析, L^* 为明度指数, $L^* = 0$ 表示黑色, $L^* = 100$ 表示白色。

2 结果与分析

2.1 磁场影响

电解质液体中含有大量 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 H^+ 、 Cl^- 、 $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6^+$ 、 $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_7^+$ 等正负离子, 流动状态下在垂直磁场中受到洛伦兹力作用, 运动轨迹发生偏移, 而不同电性的离子受力方向可根据左手定则进行判断。John 等针对流动食盐水在垂直磁场下其正负离子发生偏移, 导致 Na^+ 和 Cl^- 分离, 发现不同的磁感应强度、流速和间距对氯化钠流体两端的电压都有影响^[9]。不同磁感应强度和不同流速下, 经过配方(表 1 中编号)2 溶液处理后的马铃薯片中钙含量变化(图 2)可以看出, 流速为 0.05 m/s 处理马铃薯片钙离子含量都高于 0.20 m/s 下的样品, 说明流速过高则不利于钙离子向多孔状组织的渗透, 可能是因为较高的流速易出现湍流中的大量微小漩涡而干扰带电离子的偏移轨迹。搅动的溶液可导致离子渗透效果减弱, 这样的情况出现于腌渍品行业, 即腌制时需要将蔬菜在腌渍液中进行长时间静置, 若高频次的翻缸或搅动腌渍液则不利于盐分的扩散。随磁感应强度的增强, 马铃薯片中钙离子含量先增加后减小。在 1 500 Gs 下马铃薯片的钙含量最大, 在 0.05 m/s 和 0.20 m/s 流速下分别为 337.5 mg/kg 和 107.5 mg/kg, 说明此磁感应强度最适于实现离子向多孔状组织的渗透, 故后期试验均采用 1 500 Gs 磁感应强度进行样品处理。

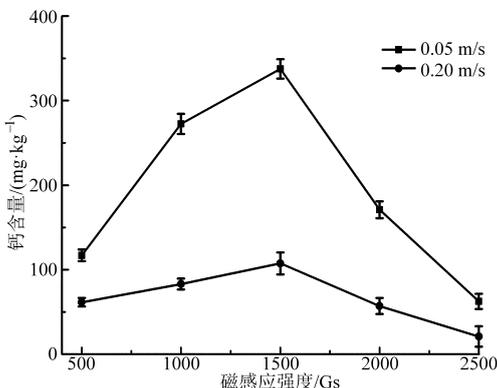


图 2 磁场对马铃薯片钙含量的影响

Fig.2 Calcium content in potato slice by using magnetic field

根据带电运动离子在垂直磁场下的受力公式 $F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ (其中 q 为离子带电量, \mathbf{v} 为离子运动速度, \mathbf{B} 为磁感应强度, 离子偏移半径为 $R = \frac{m\mathbf{v}}{q\mathbf{B}}$, m 为离子质量) 可知^[16], 因为离子的种类确定即核质比一定, 磁场 \mathbf{B} 越大则偏移半径越小, 且流动电解液

中的离子运动方向不一定完全垂直于磁场, 则离子运动的 \mathbf{v} 与 \mathbf{B} 存在一定夹角 θ , 理论上离子可能作等距螺旋运动, 螺距 $h = \frac{2\pi m\mathbf{v}\cos\theta}{q\mathbf{B}}$, 磁场 \mathbf{B} 越大则螺

距越小, 说明离子的有效偏移距离减小, 渗透效果会呈现减弱趋势^[17]。图 3 则示意了在垂直磁场下流动电解质中正负离子向多孔状组织渗透的情况, 即对流体施加不同方向的磁场使得正负离子的分离位置不一样, 此原理在电化学中可控制电解液正负离子在金属表面的沉积和溶解^[18]。

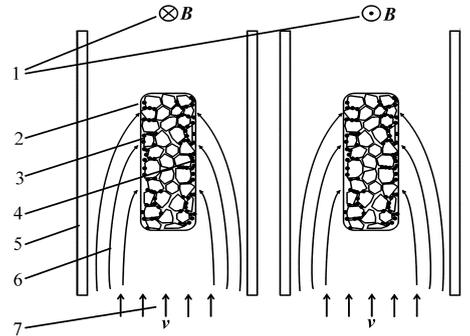


图 3 流体电解质中带电离子在磁场下的偏转

Fig.3 Influence of magnetic field on movement of charged ions in flowing electrolyte

1. 垂直磁场
2. 马铃薯片
3. 阴离子
4. 阳离子
5. 管道
6. 带电离子运动轨迹
7. 浸渍液流体

2.2 矿物质强化效果

图 4a 和图 4c 为不同配比浸渍液于流速 0.15 m/s 下对马铃薯片的钙离子和锌离子的影响。可以看出随着浓度的提高马铃薯片中的钙和锌含量也呈现升高趋势。而随着处理时间的延长样品的钙和锌含量也逐渐提高且增加趋势逐渐变缓, 分别于 10 min 和 60 min 时, 经配方 1、2、3、4 处理马铃薯片中钙含量分别为 93 mg/kg 和 287.5 mg/kg, 83 mg/kg 和 302 mg/kg, 88 mg/kg 和 322.5 mg/kg, 98.5 mg/kg 和 337.5 mg/kg, 锌含量分别为 62.5 mg/kg 和 312 mg/kg, 38 mg/kg 和 331 mg/kg, 84 mg/kg 和 348 mg/kg, 82 mg/kg 和 384 mg/kg, 整体含量平均提高了 245.5% 和 463.2%。其中空白样为经过配方 4 处理的样品, 但未施加磁场, 可以看出其钙和锌含量均无大的变化, 说明磁场通过改变带电离子的运动轨迹后, 造成离子向特定方向的大规模迁徙从而而加快对多孔状组织的渗透和扩散。图 4b 和图 4d 为不同流速下, 通过配方 2 的浸渍液流体处理后, 马铃薯片的钙离子和锌离子的变化情况, 同样可以看出在相同流速下, 随着处理时间的延长样品的钙和锌含量也逐渐提高且增加趋势逐渐变缓, 而流速过高则样品中钙离子和锌离子含量呈现降低的趋势。流速分别为 0.05 m/s 和 0.20 m/s 的配方 2 溶液, 在处理

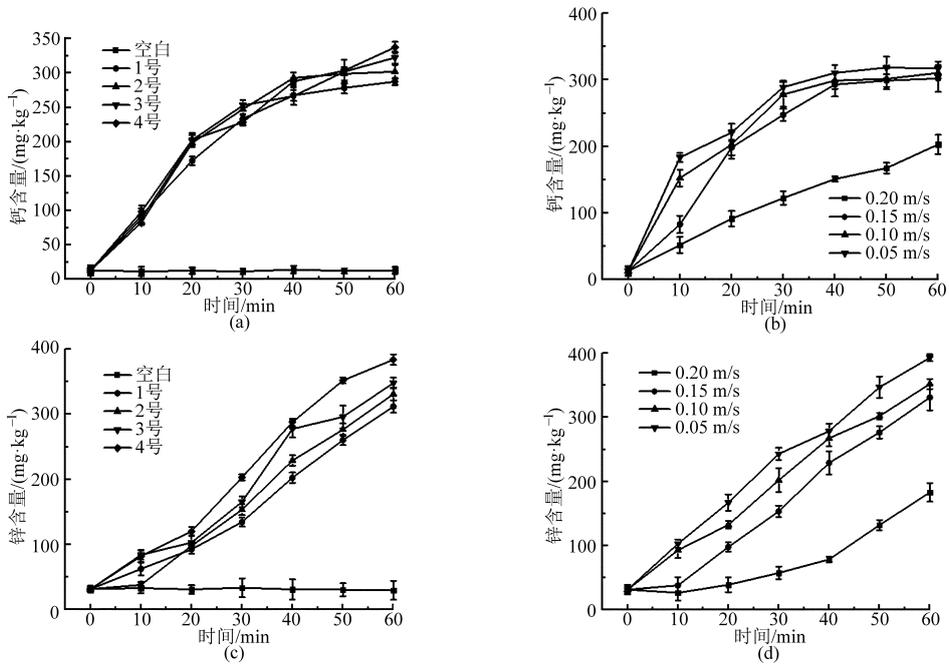


图 4 钙和锌离子在马铃薯中的含量

Fig. 4 Calcium and zinc contents in potato slice under different treatment conditions

- (a) 不同配方对钙离子含量的影响
- (b) 不同流速对钙离子含量的影响
- (c) 不同配方对锌离子含量的影响
- (d) 不同流速对锌离子含量的影响

相同时间 60 min 后, 马铃薯片的钙含量分别为 317 mg/kg 和 203 mg/kg, 降低 35.9%, 而锌含量为 393 mg/kg 和 183 mg/kg, 降低 53.4%, 这可能是溶液流速越大则出现的微漩涡越多, 干扰了溶质向中

间马铃薯片的扩散渗透。

2.3 抗褐变效果

图 5a 和图 5c 为不同配方的浸渍液于流速 0.15 m/s 处理马铃薯片后, 对其抗褐变效果的影响。

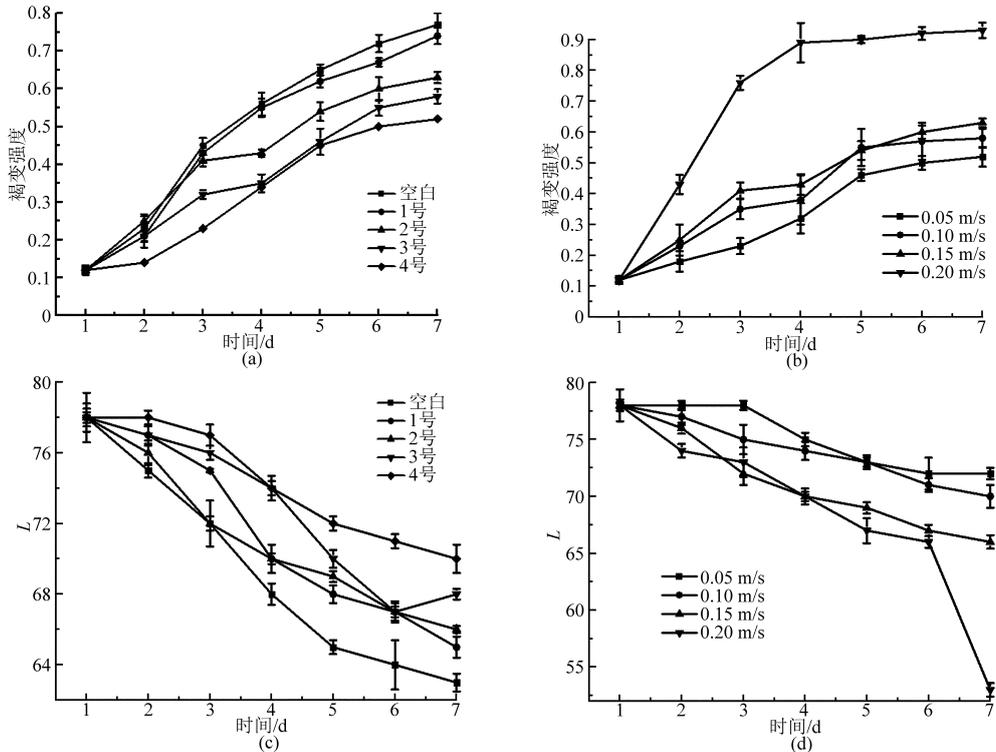


图 5 磁场下流动电解质对马铃薯抗褐变的影响

Fig. 5 Effect of flowing electrolyte on anti-browning of potato slice under different treatment conditions

- (a) 不同配方对马铃薯褐变强度的影响
- (b) 不同流速对马铃薯褐变强度的影响
- (c) 不同配方对马铃薯 L 值的影响
- (d) 不同流速对马铃薯 L 值的影响

可以看出随着处理溶液浓度的提高马铃薯片在存放期间的 L 值呈现下降的趋势,褐变强度呈现上升趋势,空白样代表样品经过流动的配方 4 溶液且在不施加磁场下的褐变效果对比。相同时间处理时,溶液浓度越高对马铃薯片的褐变抑制效果越佳,这是由于抗坏血酸的渗入引起,而不施加磁场的空白样褐变更为显著。这是因为抗坏血酸在水中呈现酸性,电离出的部分 H^+ 离子和 $C_6H_{11}O_7^-$ 在一定运动速率下受到垂直磁场的洛伦兹力影响也向中间的马铃薯样品表面渗透。在储藏 7 d 后,空白对照样和经过配方 4 处理的样品其 L 值分别为 48 和 70,褐变强度分别为 0.77 和 0.52。表明磁场对流动溶液中的弱电解质即抗坏血酸也可使其离子运动轨迹发生偏移从而完成对多孔状组织的渗透扩散。图 5b 和图 5d 为不同流速下通过配方 2 处理后,马铃薯片的褐变抑制效果变化,同样可以看出在相同流速处理下,随着储藏时间的延长马铃薯片的 L 值也呈现下降的趋势,褐变强度则呈现上升趋势,但随着流速的降低,马铃薯片的抗褐变效果会提高。于 0.05 m/s 和 0.20 m/s 流速处理下的样品,经过储藏 7 d 后,其 L 值分别为 72 和 53,褐变强度则为 0.52 和 0.93,这也是因为低流速下流体中漩涡数量相对较小,利于弱电解质中的离子向马铃薯片组织渗透而提高褐变抑制效果。

2.4 质构影响

针对植物性原料的浸渍加工方法如各类盐渍、

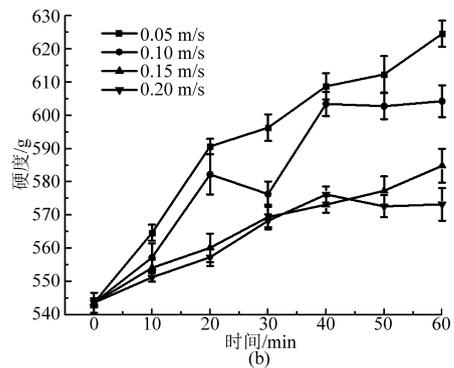
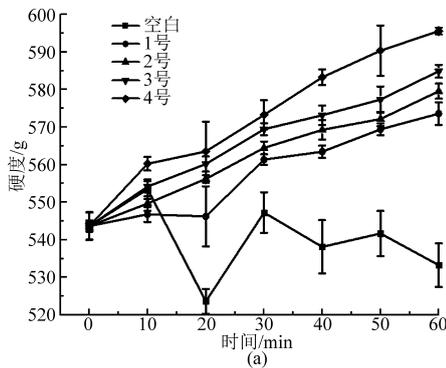


图 6 磁场下流动电解质对马铃薯硬度的影响

Fig. 6 Effect of flowing electrolyte on potato slice firmness under different treatment conditions

(a) 不同配方对马铃薯硬度的影响 (b) 不同流速对马铃薯硬度的影响

3 结束语

洛伦兹力既适用于宏观电荷,也适用于微观的带电粒子。在磁流体力学中通常由电场来驱动带电离子^[20]。本研究采用流速场替代电场,使浸渍液中的正负离子进入磁场中,进而对其中的马铃薯片进行浸渍,完成了马铃薯片的钙和锌离子强化和保脆

糖渍、酸渍,前期产品通常会经历热烫工艺,为了护色则需辅助调节酸度,故容易造成组织中的果胶类物质水解成可溶性果胶或果胶酸而失去粘接支撑作用,则组织质地变软。图 6a 为在不同配方及流速为 0.15 m/s 影响下,马铃薯片的硬度变化,空白代表在不施加磁场时,样品经过流动的配方 2 溶液处理后的硬度变化情况。可以看出随着处理时间的延长,马铃薯片的硬度呈现上升趋势,也表明组织表面钙离子渗入量增加。而随着溶液钙离子浓度的增加马铃薯片的硬度也增加。空白样的变化趋势表明在无垂直磁场影响的流动钙盐体系下其离子短期内并不会渗入马铃薯片的组织中,处理 60 min 后马铃薯片的硬度最高,配方 1、2、3、4 的硬度分别为 573.56、579.54、584.85、595.56 g,而空白样为 533.24 g。图 6b 为不同流速下配方 2 处理时,流体对马铃薯片的硬度影响,同样可以看出在相同流速下,处理时间越长则硬度越高,而流速越低马铃薯片的保脆效果就越好,说明相对较低的流速即 0.05 m/s 适合钙离子的渗入。于 0.05 m/s 和 0.20 m/s 流速下处理的样品最高硬度为 624.56 g 和 573.24 g。磁流体力学即通过施加磁场对运动的带电离子轨迹做出调整,从而造成离子的大规模定向迁徙,而周期性的洛伦兹力也可实现运动离子的分离,其应用领域广泛^[19]。

处理,同时配方中流动的弱电解质抗坏血酸在垂直磁场影响下也使产品具有一定的抗褐变效果。磁感应强度和电解质流动速率对正负离子向马铃薯片组织的渗入具有最佳的量效关系。磁场下流体湍流则不利于溶质向马铃薯片渗透。该技术同样适用于对其他植物性原料的浸渍加工和功能性开发。

参 考 文 献

- 1 Perez-Cabrera L, Chafer M, Chiralt A, et al. Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2011, 44(10): 2273 – 2280.
- 2 Hironaka K, Kikuchi M, Koaze H, et al. Ascorbic acid enrichment of whole potato tuber by vacuum-impregnation[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1114 – 1118.
- 3 Vargas M, Chiralt A, Albors A, et al. Effect of chitosan-based edible coatings applied by vacuum impregnation on quality preservation of fresh-cut carrot[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51(2): 263 – 271.
- 4 Krasaekoopt W, Suthanwong B. Vacuum impregnation of probiotics in fruit pieces and their survival during refrigerated storage[J]. *Kasetsart Journal-Natural Science*, 2008, 42: 723 – 731.
- 5 Moraga M J, Moraga G, Fito P J, et al. Effect of vacuum impregnation with calcium lactate on the osmotic dehydration kinetics and quality of osmodehydrated grapefruit[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(3): 372 – 379.
- 6 Gras M L, Vidal D, Betoret N, et al. Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation; interactions with cellular matrix[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2): 279 – 284.
- 7 Lin D S, Leonard S W, Lederer C, et al. Retention of fortified vitamin E and sensory quality of fresh-cut pears by vacuum impregnation with honey[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(7): S553 – S559.
- 8 徐珠洁, 谢晶, 刘世雄. 真空浸渍对苹果强化营养的研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(11): 142 – 146.
Xu Zhujie, Xie Jing, Liu Shixiong. Study on enrichment effect of vacuum impregnation on Fuji apple nutrition[J]. *Food Science*, 2008, 29(11): 142 – 146. (in Chinese)
- 9 Wright J J, Van Der Beken S. The Hall effect in a flowing electrolyte[J]. *American Journal of Physics*, 1972, 40(2): 245 – 247.
- 10 Tacken R A, Janssen L J J. Applications of magnetoelectrolysis[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1995, 25(1): 1 – 5.
- 11 West J, Karamata B, Lillis B, et al. Application of magnetohydrodynamic actuation to continuous flow chemistry[J]. *Lab on a Chip*, 2002, 2(4): 224 – 230.
- 12 Greenblatt D, Wygnanski I J. The control of flow separation by periodic excitation[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2000, 36(7): 487 – 545.
- 13 Gad-el-Hak M. *Flow control: passive, active, and reactive flow management*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- 14 杨哪. 一种基于霍尔效应的食品腌制方法: 中国, 0045627[P]. 2013 – 02 – 27.
- 15 李全宏, 赵雅松, 蔡同一, 等. 鲜切马铃薯褐变抑制效果研究[J]. *食品科学*, 2005, 26(9): 92 – 95.
Li Quanhong, Zhao Yasong, Cai Tongyi, et al. Study on the effect of prevent browning of fresh-cut potato[J]. *Food Science*, 2005, 26(9): 92 – 95. (in Chinese)
- 16 Weier T, Gerbeth G, Mutschke G, et al. Experiments on cylinder wake stabilization in an electrolyte solution by means of electromagnetic forces localized on the cylinder surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 16(1): 84 – 91.
- 17 George A. *Magnetic particle separation: US, H2238 H* [P]. 2010 – 05 – 04.
- 18 Taniguchi T, Sassa K, Yamada T, et al. Control of crystal orientation in zinc electrodeposits by imposition of a high magnetic field[J]. *Materials Transactions*, 2000, 41(8): 981 – 984.
- 19 Weier T, Gerbeth G. Control of separated flows by time periodic Lorentz forces[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2004, 23(6): 835 – 849.
- 20 余云丹, 孙丽侠, 楼俊尉, 等. 磁场下电沉积制备 Co-W 合金镀层[J]. *电镀与环保*, 2012, 32(4): 1 – 3.
Yu Yundan, Sun Lixia, Lou Junwei, et al. Preparation of Co-W alloy coatings by electrodeposition in magnetic field[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2012, 32(4): 1 – 3. (in Chinese)
- 21 杨哪, 金亚美, 马倩, 等. 感应离子电流盐渍腌菜工艺研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 238 – 244.
Yang Na, Jin Yamei, Ma Qian, et al. Vegetable salting process based on inductive ion current[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 238 – 244. (in Chinese)