

微切变—助剂互作技术辅助提取柑橘皮 香精油的工艺优化

Optimization on extraction of essential oil from citrus peel by
press-shear assisted interaction technology

吴菲菲^{1,2,3} 赵良忠¹ 李化强^{1,2,3}

WU Fei-fei^{1,2,3} ZHAO Liang-zhong¹ LI Hua-qiang^{1,2,3}

徐永平^{2,3} 李晓宇² 李淑英³

XU Yong-ping^{2,3} LI Xiao-yu² LI Shu-ying³

(1. 邵阳学院生物与化学工程系, 湖南 邵阳 422000; 2. 大连理工大学生命科学与生物技术学院,
辽宁 大连 116024; 3. 大连赛姆生物工程技术有限公司博士后科研工作站, 辽宁 大连 116620)

(1. Department of Biology and Chemistry Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China;
2. School of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;
3. Postdoctoral Research Stations of Dalian SEM Bio-Engineering Technology Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116620, China)

摘要:以柑橘皮为主要原料,氯化钾为助剂,通过微切变—助剂互作技术处理,并采用单因素试验和正交试验,以柑橘皮中香精油提取得率为考察指标,对助剂添加量、研磨时间、球磨机研磨珠粒数和料液比等因素进行研究,优化柑橘皮香精油提取的最佳工艺条件。结果表明:助剂添加量 3% (m/m), 研磨时间 40 min, 研磨珠粒数 10 粒, 料液比为 1:40 (m/V), 该工艺条件下香精油提取得率最高, 为 1.73%, 比传统热回流法提高了 29.10%, 且大大缩短提取周期, 该生产工艺简单, 便于大规模生产。

关键词:柑橘皮; 微切变—助剂互作技术; 香精油; 氯化钾

Abstract: The extraction conditions were studied for essential oil from citrus peel using press-shear assisted interaction technology (PAI). Taking the citrus peel as main raw materials, potassium chloride as adjuvant, petroleum ether as the organic solvent, the optimum extraction parameters of essential oil from citrus peel were investigated using the ratio of material to solvent, grinding time, milling ball number and the dosage of potassium chloride in one-factor experiment and orthogonal design. The results showed that the highest extraction efficiency of essential oil was up to 1.73% when the

dosage of potassium chloride was 3% (m/m), milling ball number was 10, the ratio of material to solvent was 1:40 (m/V) and grinding time was 40 min. Under the optimum conditions, the extraction yield of essential oil was higher than traditional heat reflux extraction method of 29.10%, and the extraction duration was shortened. The present results suggest that PAI exerts a new idea and solution to the extraction of essential oil from citrus peel.

Keywords: citrus peel; press-shear assisted interaction technology (PAI); essential oil; potassium chloride

中国是柑橘生产大国,总产量占世界产量的 10% 左右,仅次于巴西和美国。目前中国柑橘生产以榨汁为主,每年产生的柑橘皮渣可达 1 000 多万 t^[1]。除了少数作为饲料和中药配方之外,约 99% 的柑橘皮渣被丢弃,既造成了资源的浪费,也对环境造成污染^[2-4]。从废弃的柑橘皮渣中提取香精油、果胶、黄酮、膳食纤维等天然食品添加剂,既可以提高柑橘皮渣的资源利用率,带来巨大的经济效益,又可避免环境污染,保护生态。

提取香精油是合理利用皮渣的重要途径之一^[5-6]。针对柑橘皮渣的综合利用问题,国内外进行了大量的研究和探索。香精油是一种以柠檬烯为主要成分的混合物,由萜烯类、醇类、酯类和醛类组成,主要有香叶烯、松油醇、柠檬醛、石竹烯等^[6]。目前,全世界 60%~70% 左右的柑橘香精油被投入到食品产业中,其余则用于化工产品或直接作为香料使用。香精油还具有抑菌、抗氧化等生物功能,可开发为天然

基金项目:湖南省科技厅重点项目(编号:2015CK3031);湖南省教育厅一般研究项目(编号:14C1022);湖南省科技厅项目(编号:2014FJ4253)

作者简介:吴菲菲,女,邵阳学院讲师,硕士生导师,博士。

通讯作者:李化强(1984—),男,邵阳学院讲师,硕士生导师,博士。

E-mail: biohqff@163.com

收稿日期:2015-11-10

防腐剂^[7],也可用于衣蛾等的驱虫剂,价格适宜,并且对环境无污染,有很好的开发前景^[8]。

目前,柑橘皮中香精油的提取方法主要有水蒸汽蒸馏法、压榨法、溶剂浸提法和超临界 CO₂ 提取法,但是这些方法存在着一定的弊端,如成本比较高、提取周期长、溶剂用量大等^[9]。微切变—助剂互作技术是机械化学领域的一项新应用,其利用高能机械力研磨产生的机械化学效应,将动物或植物性固体原料与化学助剂共同研磨,选用水或少量有机溶剂提取其中活性成分^[10]。该技术的基本原理是在粉碎过程中通过挤压、碰撞、剪切和摩擦等作用方式,对固体原料的颗粒团施加高能机械力作用,诱使其细胞壁破壁,细胞表面产生切面,活性成分与化学助剂之间发生相互吸附或作用,改变活性成分的微观性能,增大比表面积,增加表面能、吸附性和极性,从而改善其在水或少量有机溶剂中的溶解性^[11]。此外,高能机械力还可激活其化学活性,使需在高温下进行的提取反应也能在较低温度下进行^[12],因此该技术具有提取活性成分含量高、种类多、成本低、易操作等特点。国内外研究^{[13-17,19][18] 12-13}结果表明,高强度的研磨不仅可以破碎原料细胞使其活性成分暴露出来,而且还能促进活性成分与助剂接触、反应,从而改变活性成分的溶解性。Korolev 等^[13]将助剂碳酸钠与西伯利亚冷杉松针在高能行星磨(AGO-2 型)中共同研磨,用水作为溶剂提取三萜酸,结果发现其提取率比常规方法提高了 35.9%;Lomovsky 等^[14]将助剂蔗糖与伪泥胡菜共同研磨,用水提取活性成分,发现植物甾类固醇的提取率比常规方法提高了 103.7%。近年来,本研究团队运用微切变—助剂互作技术辅助提取穿心莲中的穿心莲内酯^[11]、刺五加中的异秦吡啶、刺五加苷 B 和总黄酮^[15-17]、辣椒中的辣椒红色素和辣椒碱^{[18] 25-88 [19]}等活性成分,比常规方法显著地提高了目标活性成分的产量和溶解性,但尚未见此方法应用于提取柑橘皮香精油的相关报道。因此,本研究拟以氯化钾为助剂的微切变—助剂互作技术辅助提取柑橘皮香精油,并优化其提取工艺参数,旨在为柑橘皮香精油的提取工艺提供新的思路,为柑橘皮的综合利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

柑橘皮:雪峰蜜橘,湖南邵阳本地市售的柑橘,选择新鲜无霉变的柑橘皮,用流动水漂洗干净,捞起沥干,摊放在阴凉、通风的干燥处晒干备用;

氯化钾、石油醚、异丙醇、盐酸:分析纯,湖南汇虹试剂有限公司;

溴化钾、溴酸钾:优级纯,天津市凯信化学工业有限公司;

甲基橙:分析纯,上海纪宁生物科技有限公司。

1.2 主要仪器设备

电热恒温鼓风干燥箱:202-1A 型,常州迈科诺仪器有限公司;

中药粉碎机:FW177 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

行星式球磨机:XQM-0.4L 型,长沙米琪仪器设备有限公司;

标准分样筛:60 目,河南新乡康达新机械有限公司;

电子天平:YDB5002 型,日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 微切变—助剂互作技术辅助提取 选取一定量的柑橘皮,在 60 °C 下于恒温鼓风干燥箱内干燥 2~3 h,然后将干燥的橘皮在 FW177 小型中药粉碎机中研磨粉碎(2 min)至 60 目,制备成柑橘皮粉(粗粉),备用。称取 200 g 粗粉与一定量助剂氯化钾混合,混匀后于行星式球磨机中共同研磨制备柑橘皮微切助粉,备用。精确称取 5.0 g 柑橘皮微切助粉,加入一定量石油醚,在室温(20±3) °C 下搅拌提取,然后在密封容器内浸渍 3~12 h,放出浸提液,同时轻轻压出原料中的浸液,用这些浸液再浸渍新的原料。如此反复进行 3 次,最后得到较浓的带有原料香精油的石油醚浸提液。因石油醚的沸点比较低(40~80 °C),而香精油沸点高(200 °C 左右),故在 90 °C 条件下蒸馏回收石油醚,浓缩得到香精油。

1.3.2 单因素试验设计

(1) 氯化钾添加量对柑橘皮香精油提取得率的影响:设定料液比 1:30(*m/V*)、研磨时间 30 min、球磨研磨珠 4 粒的条件下,分别控制氯化钾添加量(占总物料干重, *m/m*) 为 1%,2%,3%,4%,5% 提取香精油,考察助剂氯化钾添加量对柑橘皮香精油提取得率的影响。

(2) 研磨时间对柑橘皮香精油提取得率的影响:设定料液比 1:30(*m/V*),助剂添加量 2%,球磨研磨珠 4 粒的条件下,分别控制研磨时间为 10,20,30,40,50 min 提取香精油,考察研磨时间对柑橘皮香精油提取得率的影响。

(3) 研磨珠粒数对柑橘皮香精油提取得率的影响:设定料液比 1:30(*m/V*),助剂添加量 2%,研磨时间 40 min 的条件下,分别控制研磨珠为 2,4,6,8,10 粒提取香精油,考察球磨研磨珠粒数对柑橘皮香精油提取得率的影响。

(4) 料液比对柑橘皮香精油提取得率的影响:设定助剂添加量 2%,研磨时间 40 min,球磨研磨珠 8 粒的条件下,分别控制料液比为 1:10,1:20,1:30,1:40,1:50(*m/V*) 提取香精油,考察料液比对柑橘皮香精油提取得率的影响。

1.3.3 正交试验设计 基于单因素试验结果,确定正交试验需考察 4 个因素的 3 个水平,并按照正交试验表 L₉(3⁴) 进行试验设计,每个因素水平组合进行 3 次平行试验,优化出提取香精油的最佳工艺条件。并在该最佳工艺条件下,对以氯化钾为助剂的微切变—助剂互作技术辅助提取柑橘皮香精油进行 3 次平行验证实验。

1.3.4 热回流提取 精确称量柑橘皮粗粉 5.0 g,装入 150 mL 圆底烧瓶中,加入 80 mL 水,连接好蒸馏装置,加热蒸馏 2 h,以使香精油被充分蒸馏出来,期间需往圆底烧瓶中添加适量水,以防止蒸干。由于香精油不能溶于水,因此蒸馏出来的香精油与水分层,再利用分液漏斗将其分离,测定香精油的含量。

1.3.5 香精油含量的测定 采用蒸馏滴定法^[20],样品中香精油的含量按式(1)计算:

$$W = \frac{(V_1 - V_0) \times c \times 0.0032 \times 1000}{0.099 \times m}, \quad (1)$$

式中:

W ——待测样品香精油的含量, g/kg;

V_1 ——溴化钾—溴酸钾标准溶液滴定所消耗的体积, mL;

V_0 ——空白试验滴定所消耗溴化钾—溴酸钾标准溶液的体积, mL;

c ——用于滴定的溴化钾—溴酸钾标准溶液浓度, 该试验中为 0.024 8 mol/L;

m ——被滴定样品的总质量, g。

其中每滴定消耗掉 1 mL 溴化钾—溴酸钾标准溶液 (0.099 mol/L) 相当于 0.003 2 g 香精油。

1.3.6 香精油提取得率的测定 香精油提取得率按式(2)计算:

$$R = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R ——香精油提取得率, %;

m_1 ——香精油质量, g;

m_2 ——柑橘皮粉质量, g。

1.3.7 数据分析 所有试验数据平行测定 3 次, 结果用平均值士标准偏差 ($\bar{X} \pm SE$) 来表示, 利用 Origin7.5 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 助剂氯化钾添加量对香精油提取得率的影响 由图 1 可知, 助剂氯化钾添加量在 1%~5% 时, 香精油提取得率随助剂添加量的增加而呈现增加的趋势。氯化钾是中性盐, 不影响香精油的结构, 研磨时添加氯化钾可使研磨更彻底, 内外渗透压差使香精油更容易渗出。但当氯化钾添加量太高时, 可能对细胞有损害作用而导致细胞结构的改变, 使细胞“抱团”, 反而使香精油的提取得率降低。试验结果发现当助剂氯化钾添加量为 2% 时, 香精油提取得率最高可达 1.67%, 故选择 2% 助剂添加量进行后续试验。

2.1.2 研磨时间对香精油提取得率的影响 由图 2 可知, 研

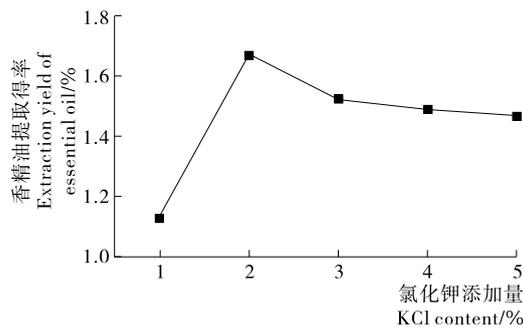


图 1 助剂氯化钾添加量对香精油提取得率的影响

Figure 1 Effect of KCl content on the extraction yield of essential oil ($n=3$)

磨时间在 10~40 min 时, 香精油提取得率随研磨时间的延长而呈现增加的趋势。研磨时间直接影响了柑橘皮的粉碎程度, 柑橘皮的粉碎度跟香精油提取得率直接相关, 研磨时间越长, 柑橘皮粉末颗粒粒径越小, 香精油越容易被提取出来。这是因为颗粒越小, 总表面积越大, 与溶剂接触的面积就越大, 从橘皮内部扩散出来所需经过的路径就越短, 故香精油越容易渗出。但是当粉碎度达到一定程度时, 提取得率不再增加, 反而呈现稍微下降的趋势, 这可能是因为颗粒太小时, 会部分粘连成团, 有机溶剂不易与其内部接触, 因此降低了香精油的提取得率。由图 2 还可以看出, 当研磨时间为 40 min 时, 香精油提取得率最高, 故选择研磨时间 40 min 进行后续试验。

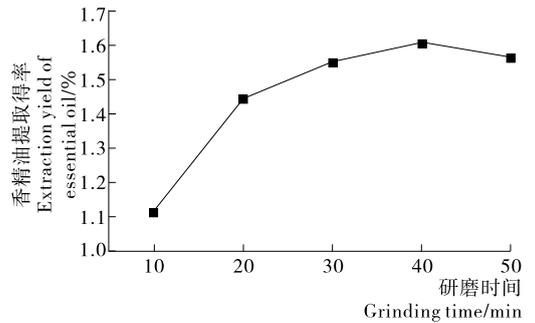


图 2 研磨时间对香精油提取得率的影响

Figure 2 Effect of grinding time on the extraction yield of essential oil ($n=3$)

2.1.3 球磨研磨珠粒数对香精油提取得率的影响 由图 3 可知, 球磨研磨珠粒数在 2~10 时, 香精油提取得率随研磨珠粒数的增加而呈现增加的趋势。研磨珠粒数直接影响了柑橘皮的粉碎程度, 这是由于研磨珠粒数越多, 研磨珠和柑橘皮粉末之间通过碰撞、挤压、冲击、剪切等作用方式, 对柑橘皮粉末施加高能机械力, 从而使柑橘皮粉末颗粒粒径越小, 香精油越容易被提取出来。但是当研磨珠粒数增加到 8 粒以上时, 香精油提取得率不再增加, 反而呈略微下降的趋势, 可能是行星式球磨机内研磨罐的空间一定, 过多的研磨珠与柑橘皮粉末间的机械力作用不充分, 因此降低了香精油的提取得率。当球磨研磨珠粒数为 8 粒时, 香精油提取得率最高, 故选择研磨珠粒数为 8 粒进行后续试验。

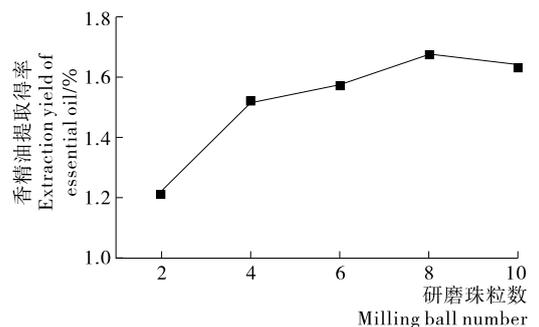


图 3 球磨研磨珠粒数对香精油提取得率的影响

Figure 3 Effect of milling ball number on the extraction yield of essential oil ($n=3$)

2.1.4 料液比对精油提取得率的影响 溶剂量太少不利于精油的析出,加大溶剂用量可以使精油溶解比较充分,提取得率提高,这是由于精油从柑橘皮中溶解出来是一个内外平衡的传质过程。由图4可知,随溶剂用量增加,精油提取得率增加,当料液比大于1:40(m/V)后,精油提取得率增加幅度不明显,考虑后续处理和提取成本,故选择料液比为1:40(m/V)进行后续试验。

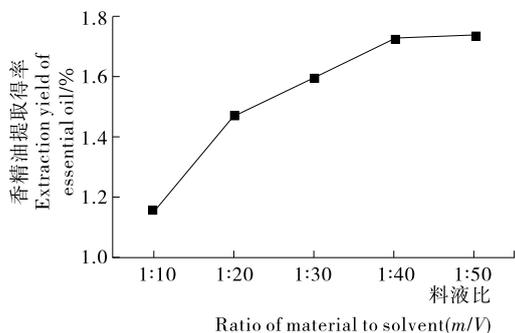


图4 料液比对精油提取得率的影响

Figure 4 Effect of the ratio of material to solvent on the extraction yield of essential oil ($n=3$)

2.2 正交试验结果与分析

基于单因素试验的结果,选取助剂添加量、研磨时间、球磨研磨珠粒数、料液比4个因素的3个水平进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,试验因素与水平设计情况见表1,正交试验结果与分析见表2。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 助剂添加量/%	B 研磨时间/min	C 研磨珠粒数/粒	D 料液比(m/V)
1	1	30	6	1:30
2	2	40	8	1:40
3	3	50	10	1:50

表2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test ($n=3$)

序号	A	B	C	D	精油提取得率/%
1	1	1	1	1	1.58
2	1	2	2	2	1.64
3	1	3	3	3	1.60
4	2	1	2	3	1.62
5	2	2	3	1	1.65
6	2	3	1	2	1.61
7	3	1	3	2	1.71
8	3	2	1	3	1.67
9	3	3	2	1	1.59
k_1	1.60	1.64	1.62	1.61	
k_2	1.63	1.65	1.62	1.65	
k_3	1.66	1.60	1.65	1.63	
R	0.06	0.05	0.03	0.04	

由表2可知,以氯化钾为助剂的微切变—助剂互作技术辅助提取柑橘皮精油的最佳工艺条件为: $A_3B_2C_3D_2$,即氯化钾添加量3%(m/m),球磨研磨珠粒数10粒,料液比1:40(m/V),研磨时间为40 min。各因素对精油提取得率的影响次序为:氯化钾添加量>研磨时间>料液比>研磨珠粒数。

2.3 验证实验

2.3.1 正交试验结果的验证 基于正交试验结果,采用最佳工艺条件,即助剂添加量3%(m/m),球磨研磨珠粒数10粒,料液比1:40(m/V),研磨时间40 min时,对以氯化钾为助剂的微切变—助剂互作技术辅助提取柑橘皮精油进行3次平行验证实验,得率分别为1.72%,1.71%,1.75%,所得精油平均提取得率为1.73%,大于正交试验表中所有因素水平组合的试验结果,表明本试验优化的提取参数较为可靠,重现性好,达到了优化柑橘皮精油提取工艺的目的。

2.3.2 不同提取方法提取柑橘皮精油的效果比较 按照正交试验确定的最佳工艺条件提取柑橘皮精油,与热回流提取进行比较,结果见表3。由表3可知,微切变—助剂互作技术辅助提取精油的得率比热回流法提高了29.10%,室温下操作,提取周期由122 min缩短到62 min,且生产工艺简单,便于大规模生产,具有很好的应用前景。

表3 不同提取方法提取柑橘皮精油的效果比较

Table 3 Effect of essential oil from citrus peel compared by different extraction methods ($n=3$)

提取方法	粉碎时间/min	提取时间/min	提取周期/min	精油提取得率/%
热回流提取	2	120	122	1.34±0.05
微切变—助剂互作技术辅助提取	2+40	20	62	1.73±0.03

3 结论

本试验以氯化钾为助剂通过微切变—助剂互作技术从柑橘皮中提取精油,考察了助剂添加量、研磨时间、球磨研磨珠粒数和料液比4个因素对精油提取得率的影响,正交优化试验结果表明:柑橘皮精油最佳提取工艺条件为助剂添加量3%(m/m),球磨研磨珠粒数10粒,料液比1:40(m/V),研磨时间40 min。该工艺条件下精油提取得率比传统的热回流法提高了29.10%,且大大缩短提取周期,生产工艺简单,便于大规模生产,表明微切变—助剂互作技术是提取柑橘皮精油的一种高效、低成本方法,可为其在柑橘副产物活性成分提取中的应用提供理论依据。后续研究可采用其他提取技术(如 CO_2 超临界流体萃取法、超声波和微波等)与微切变—助剂互作技术进行比较,考察不同技术对柑橘皮精油提取得率的影响,从而寻找到一种低成本、得率高、操作简单、易于规模化提取柑橘皮精油的绿色环保技术。

参考文献

- [1] 单杨. 中国柑橘工业的现状、发展趋势与对策[J]. 中国食品学报, 2008, 8(1): 1-8.

- [2] 方政, 高彦祥. 柑橘加工副产物中有效成分开发利用的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2005(4): 9-13.
- [3] 汪海波, 汪芳安, 潘从道. 柑橘皮果胶的改进提取工艺研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 136-141.
- [4] 王健, 黄国林. 柑橘皮中果胶的萃取方法研究进展[J]. 四川食品与发酵, 2007, 43(4): 12-15.
- [5] 付复华, 李忠海, 单杨, 等. 柑橘皮渣综合利用技术研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 178-184.
- [6] 付复华, 李忠海, 单杨, 等. GC—MS 法分析三种柑橘皮精油成分[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 30-34.
- [7] 方德秋, 肖顺元. 柠檬醛及香精油的抗菌性研究概述[J]. 天然产物研究与开发, 1994, 6(2): 75-78.
- [8] 苏力坦·阿巴拜克力, 古丽加汗·沙吾提, 热孜万·米吉提, 等. 柑皮挥发油对衣蛾驱虫作用的初步研究[J]. 新疆大学学报: 理工版, 2001, 18(1): 105-107.
- [9] 张薇, 李霞, 邓子牛. 柑橘香精油的提取和浓缩方法综述[J]. 作物研究, 2005(5): 432-435.
- [10] Boldyrev V V, Tkáčová K. Mechanochemistry of solids: past, present and prospects[J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 2000, 8(3/4): 121-132.
- [11] 宋春娜, 王洋, 金礼吉, 等. 微切助互作技术辅助提取穿心莲内酯的工艺研究[J]. 时珍国医国药, 2008, 19(11): 2 638-2 641.
- [12] Kaupp G. Organic solid-state reactions with 100% yield[J]. Cheminform, 2005, 36(36): 130-131.
- [13] Korolev K G, Lomovskii O I, Rozhanskaya O A, et al. Mechanochemical preparation of water-soluble forms of triterpene acids[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2003, 39(4): 366-372.
- [14] Lomovsky O, Korolyov K, Kwon Y S. Mechanochemical solubilization and mechanochemically assisted extraction of plant bioactive substances[J]. Science and Technology, 2003, 1(1): 7-20.
- [15] Liu Ying, Jin Li-ji, Li Xiao-yu, et al. Application of mechanochemical pretreatment (MCPT) to aqueous extraction of isofraxidin from *Eleutherococcus senticosus*[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(20): 6 584-6 589.
- [16] Jin Li-ji, Li Hua-qiang, Wu Fei-fei, et al. Application of mechanochemical pretreatment prior to aqueous extraction of eleutheroside B from *Eleutherococcus senticosus*[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(32): 10 695-10 701.
- [17] 刘莹, 金礼吉, 徐永平, 等. 机械化学法辅助提取刺五加总黄酮的工艺研究[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(12): 2 889-2 891.
- [18] 李化强. 微切助技术提取辣椒活性成分及其对蛋鸡影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [19] Li Hua-qiang, Jin Li-ji, Wu Fei-fei, et al. Effect of red pepper (*Capsicum frutescens*) powder or red pepper pigment on the performance and egg yolk color of laying hens[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2012, 25(11): 1 605-1 610.
- [20] 赵其阳, 焦必宁, 付陈梅, 等. 柑桔皮及其果汁中香精油含量的蒸馏滴定方法研究[J]. 中国南方果树, 2006, 35(5): 9-11.

(上接第 116 页)

下普通 PID 和模糊 PID 的控制效果, 在两者控制作用下, 堵头偏转趋势大致相同, 均近似一个完整周期正弦变化图, 但 PID 控制下, 堵头峰值偏转角达到了 $0.007\ 2\ \text{rad}$, 而模糊 PID 峰值偏转角为 $0.005\ 9\ \text{rad}$ 。这是由于非线性扰动作用下, 模糊 PID 能根据外界负载变化情况动态修正 PID 控制参数 k_p 、 k_i 、 k_d , 从而达到了更好的控制效果。

5 结论

(1) 通过对高压灭菌装置同步系统各个液压元件分析, 建立了高压灭菌装置同步系统的整体数学模型, 为研究其控制策略提供了理论依据。

(2) 考虑到外界负载复杂变化情况下, 提出了同步系统的控制策略, 对堵头水平移动采取了 PID 控制方法, 对堵头的偏转运动采取了模糊 PID 控制方法。通过仿真验证该控制方法的有效性, 仿真结果表明: 该控制方法完全满足堵头的水平移动和纠偏要求, 且模糊 PID 纠偏方法比普通 PID 纠偏精度要高。

参考文献

- [1] 彭静, 袁龙, 卢立新, 等. 软包装太湖白虾超高压杀菌效果及动力学研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(3): 24-27.
- [2] 田海娟. 超高压灭菌技术在紫苏豆酱中的应用[J]. 中国调味品, 2013, 38(3): 80-83.
- [3] 陈扬易, 谢晶, 钟小凡, 等. 超高压处理技术在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 266-269.
- [4] 黄志建, 姜维, 费望龙. 液压同步控制在摊铺机液压系统中的应用[J]. 液压与气动, 2012(9): 89-91.
- [5] 朱传敏, 于立, 周贤德. 同等方式的比例同步控制系统设计[J]. 现代制造工程, 2012(1): 112-116.
- [6] 王国政, 王国涛. 隧道掘进机刀具破岩综合试验台电气系统的研制[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 279-284.
- [7] 邹学新, 廖金军, 李欣. 液压系统流—压互补同步回路仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2013(6): 26-30.
- [8] 陈红锋. 几种液压同步回路的设计应用[J]. 机械工程师, 2013(3): 125-127.
- [9] 于勇, 潘芳, 苏光明, 等. 超高压技术在粮食产品加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 248-253.
- [10] 阳立业. 基于遗传 PID 的巨型模锻液压机同步系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 28-44.
- [11] 方桂花, 李晓燕, 李斌. 超高压灭菌设备液压同步系统仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 218-220.
- [12] 陈晋市, 刘昕晖, 王同建. 平衡阀对起重机起升系统抖动现象的影响因素[J]. 中国工程机械学报, 2010(1): 158-163.
- [13] 赵斌. 基于电液比例技术的液压同步控制系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007: 10-30.
- [14] 李俊, 李运堂. 四旋翼飞行器的动力学建模及 PID 控制[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2012(1): 58-61.
- [15] 虞朝永. 大型船舶蔬菜储藏仓库自动控制系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 128-131.