

应用研究

MVR 技术在大豆乳清废水处理中的应用研究

时玉强¹,艾淞卉²,鲁绪强¹,马 军¹,刘汝萃¹

(1. 临邑禹王植物蛋白有限公司,山东 临邑 251500; 2. 清华大学 建筑学院,北京 100000)

摘要:研究了 MVR 技术在大豆乳清废水处理中的应用。通过单因素试验及对大豆乳清废水的分析,基于保证乳清蛋白活性的目的得到 MVR 处理大豆乳清废水最佳工艺条件为:压缩机频率 100 Hz,加热温度 65 ℃。在最佳条件下回收 1 t 大豆乳清废水用电 13 kW·h。

关键词: MVR;大豆乳清废水;乳清蛋白

中图分类号:TQ645;TQ647

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2018)03-0152-05

Application of MVR technology in treatment of soybean whey waste water

SHI Yuqiang¹, AI Songhui², LU Xuqiang¹, MA Jun¹, LIU Rucui¹

(1. Linyi Yuwang Plant Protein Industry Co., Ltd., Linyi 251500, Shandong, China;

2. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100000, China)

Abstract: The application of MVR technology in treatment of soybean whey waste water was studied. Through single factor experiment and analysis of soybean whey waste water, the optimal process conditions were determined on the purpose of ensuring the activity of active substances in soybean whey waste water as follows: compressor frequency 100 Hz and heating temperature 65 ℃. Under these conditions, recycling 1 t of soybean whey waste water consumed 13 kW·h of electric energy.

Key words: MVR; soybean whey waste water; whey protein

目前大规模工业化生产的大豆分离蛋白的主流生产工艺是碱溶酸沉法,该方法生产过程每生产 1 t 大豆分离蛋白会排放 30~50 m³ 的乳清废水^[1]。大豆乳清废水含有大量的乳清蛋白、灰分、低聚糖,其中乳清蛋白主要由 2S 和 7S 组分组成,主要包括胰蛋白酶抑制剂(其中代表性的有两种,即 Ku-Nitz 抑制剂和 Bowman-Birk 抑制剂)、大豆血球凝集素、脂肪氧化酶、 β -淀粉酶、细胞色素 C 等多种生理活性物质^[2-4]。大豆低聚糖主要是蔗糖、棉子糖和水苏糖。

大豆分离蛋白废水量大,处理困难,耗费水资源多成为制约大豆分离蛋白发展的最大瓶颈问题。如何解决大豆乳清废水成为当前大豆分离蛋白工业急需解决的问题。而大豆乳清废水中固形物含量很低,水分含量达到 97% 以上,对大豆乳清蛋白及低

聚糖等的分离难度较大,因此需要对大豆乳清废水进行浓缩,同时提高有益成分的浓度,便于进一步分离和提纯。现有常用的浓缩方法包括:沉淀法、吸附法、超滤膜法、透析法、蒸馏法以及冰冻干燥法等。其中,沉淀法、吸附法以及透析法都需要在溶液中加入相应试剂,以分离溶质与溶剂,这些方法在物料纯度要求较高以及具有食品安全要求的工业领域中很难得以推广应用;超滤膜法存在膜易堵,清洗困难,投资高等缺点;蒸馏法与冰冻干燥法由于操作相对简单,且对溶质本身的物理化学性质影响较小,因此在食品工业中应用较为广泛,但这两种浓缩方法能耗均较大。

机械蒸汽再压缩(Mechanical vapor recompression,简称 MVR)技术是一种高效节能的蒸发系统。MVR 技术在化工蒸发浓缩精馏^[5]过程、乳制品及果汁浓缩^[6]、食品发酵液处理^[7]、海水淡化行业^[8]以及废水处理^[9]等领域中得以广泛应用。本研究结合乳清蛋白中活性物质回收的需要,应用 MVR 技术对大豆乳清废水进行回收利用,实现水资源再利用,同时保证蛋白类活性物质便于进一步分离提纯。

收稿日期:2017-06-28;修回日期:2017-12-14

作者简介:时玉强(1982),男,工程师,硕士,主要从事大豆精深加工(E-mail) shiyuqiang@yuwangcn.com。

通信作者:马 军,工程师(E-mail) 1399525908@qq.com。

1 材料与方法

1.1 实验材料

大豆乳清废水(固形物含量 2.5%,粗蛋白质含量(干基)20%,pH 4.6 ± 0.1),临邑禹王植物蛋白有限公司。食品用液体氢氧化钠。

Kjeltec 8200 凯氏定氮仪;AL204 - 2C 电子天平;MVR 中试系统,德州清大禹王能源技术研究院有限公司。MVR 中试系统原理:换热器内稀溶液被高温热源加热,产生的水蒸气被压缩机吸入,经过升温加压后变成高温高压水蒸气,再次返回换热器中,作为高温热源加热稀溶液,稀溶液受热将水蒸气分离出来,由此便可实现溶液的浓缩,高温水蒸气与稀溶液换热后变成冷凝水排出系统,完成系统循环。MVR 中试系统示意图如图 1 所示。

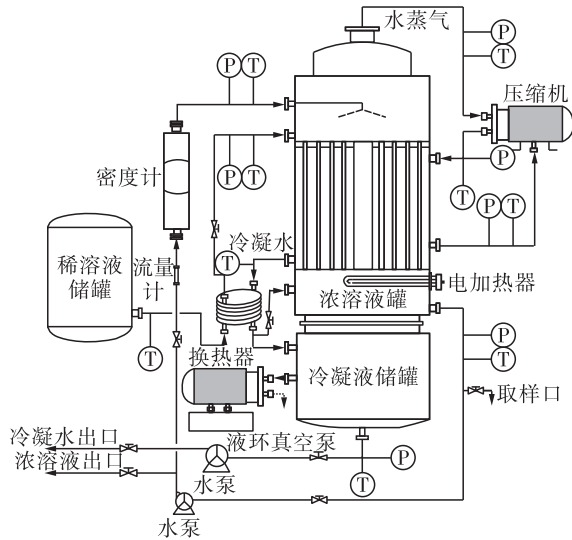


图 1 MVR 中试系统示意图

该系统的处理量为 50 kg,其中压缩机型号为 RVC-1 罗茨式压缩机;换热器面积为 3.3 m^2 ;电加热器功率为 3 kW;真空泵、循环泵均为 2BV2060 液环式真空泵。

1.2 实验方法

具体操作方法为:①接通电源,开启真空泵,打开进料阀,将 50 kg 大豆乳清废水通过进料口吸入至蒸发罐中。②进料完毕后,关闭进料阀,开启电加热器,通过控制面板设定加热温度;待控制面板显示的系统各参数稳定后,关闭真空泵。③开启溶液循环泵及压缩机,开始溶液循环喷淋,实现溶液浓缩。

本研究在一定的进料量、pH 下,分析了压缩机频率、加热温度对大豆乳清废水浓缩处理系统的影响,并对最佳压缩机频率和加热温度下的系统处理能力进行了分析。

2 结果与分析

2.1 压缩机频率对乳清蛋白回收系统的影响

通过预处理调节大豆乳清废水的蛋白质含量为

1%,pH 7.3 ± 0.1 ,控制加热温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,溶液流量为 0.39 kg/s ,为保证进口溶液浓度不变,将冷凝液罐与浓溶液罐之间的连接管打开,使蒸发出的冷凝液迅速返回浓溶液中,再将稀释后的溶液循环喷淋,以保证溶液进口浓度近似不变。调节压缩机频率,待系统参数稳定后进行记录,进而得到不同压缩机频率下对应的系统稳态运行工况。

通过调整压缩机频率,分析了过程中的吸气流量、吸排气压力、吸排气温度、换热量、压缩机功率、传热温差与传热系数的变化,结果如图 2 ~ 图 6 所示。

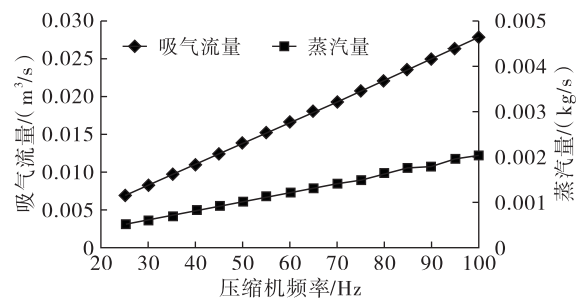


图 2 吸气流量 - 压缩机频率关系曲线

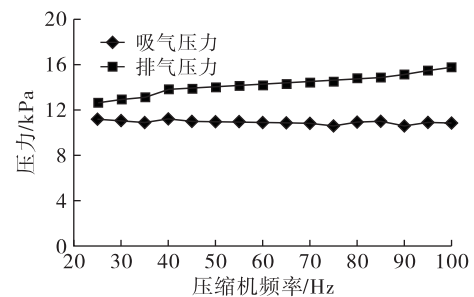


图 3 吸排气压力 - 压缩机频率关系曲线

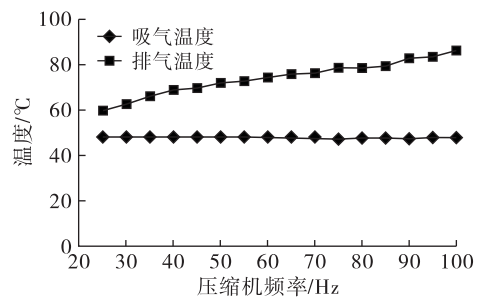


图 4 吸排气温度 - 压缩机频率关系曲线

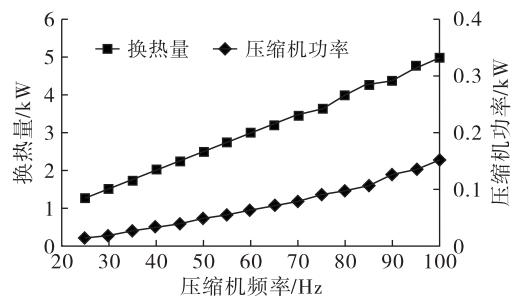


图 5 换热量与压缩机功率 - 压缩机频率关系曲线

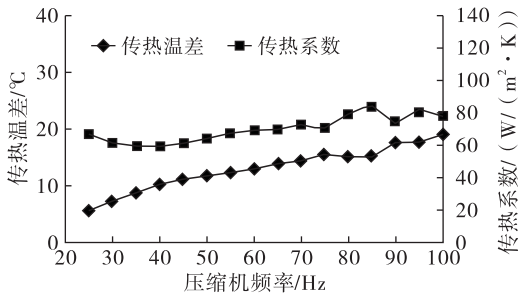


图6 传热温差与传热系数-压缩机频率关系曲线

由图2可知,压缩机频率升高,吸气流量增大,受电加热器控制,吸气密度不变,蒸汽量增大,线性关系明显。

由图3、图4可知,压缩机频率升高,吸气流量增大,受电加热器控制,吸气温度不变,吸气压力不变,由于吸气流量增大,导致压缩机排气压力增大,排气温度上升明显。

由图5、图6可知,压缩机频率升高,蒸汽量增大,换热量与压缩机耗电量均随之增大,由于排气压力、排气温度升高,换热器内传热温差增大,温差的增大利于传热传质的运行,同时传热系数也有所提高。

综上所述,提高压缩机的频率能够有效地提高排气压力和排气温度,从而提高传热温差及传热系数,进而提高了传热效率,降低热损失,提高处理能力和效率。

2.2 加热温度对大豆乳清废水回收系统的影响

通过预处理调节大豆乳清废水的蛋白质含量为1%, pH 7.3 ± 0.1, 控制溶液流量为0.39 kg/s, 压缩机频率控制在100 Hz, 为保证进口溶液浓度不变, 将冷凝液罐与浓溶液罐之间的连接管打开, 使蒸发出的冷凝液迅速返回浓溶液中, 再将稀释后的溶液循环喷淋, 以保证溶液进口浓度近似不变。调节电加热器的温度, 使溶液温度即压缩机的加热温度发生变化, 待系统参数稳定后进行记录, 进而得到不同加热温度下对应的系统稳态运行工况。

通过调整加热温度, 分析了过程中的吸气流量、乳清蛋白含量、吸排气压力、排气温度、冷凝水温度、换热量、压缩机功率、传热温差与传热系数的变化, 结果如图7~图12所示。

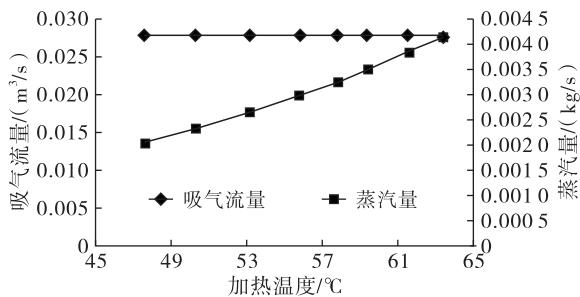


图7 吸气流量-加热温度关系曲线

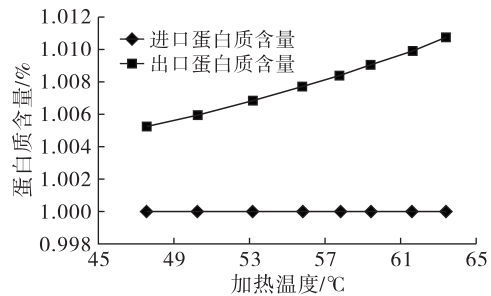


图8 蛋白质含量-加热温度关系曲线

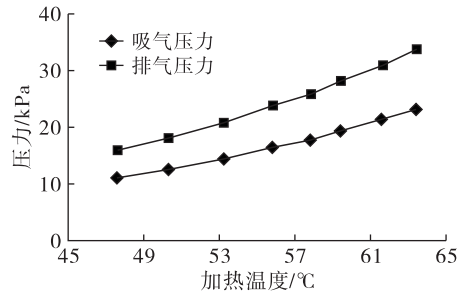


图9 吸排气压力-加热温度关系曲线

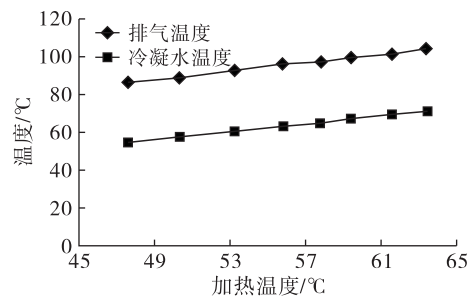


图10 排气温度与冷凝水温度-加热温度关系曲线

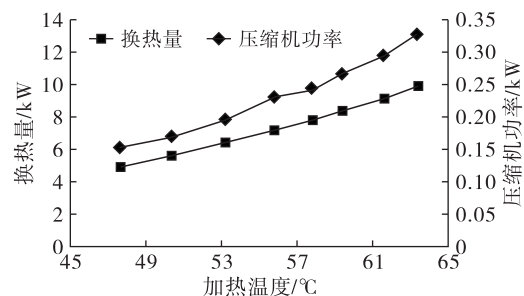


图11 换热量与压缩机功率-加热温度关系曲线

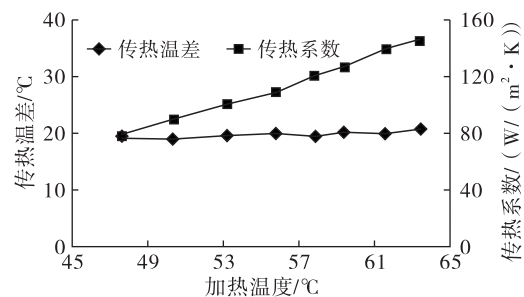


图12 传热温差与传热系数-加热温度关系曲线

由图7、图8可知,随着加热温度升高,吸气密度变大,出口蛋白质含量变大;有利于提高浓缩速

度,增加处理量,分析认为加热温度的提升提高了蒸汽量和内能。

由图9、图10可知,加热温度升高,压缩机的吸气压力升高,排气压力也随之升高,排气温度上升,同时提高排气热能,进而提高热效率。分析认为加热温度提高增加了蒸发量,直接增加了吸气量从而提高了吸气压力,进而引起排气压力的增加,最终提高了排气温度。

由图11、图12可知,随着加热温度升高,压缩机吸气密度增大,蒸汽量变大,换热量增大,压缩机耗电量增大,两侧换热流体温度升高,传热系数有所升高。

综上,加热温度的提高能够有效地提高排气压力和排气温度,从而提高传热温差,增大传热系数,进而提高了换热效率,降低热损失,提高处理能力和效率。由于乳清蛋白中的活性物质主要是胰蛋白酶抑制剂、细胞色素和 β -淀粉酶,考虑到 β -淀粉酶最适温度为 $60 \sim 65^\circ\text{C}$,因此加热温度控制在 65°C [4]。

2.3 最佳控制条件下的乳清蛋白含量变化

通过预处理调节大豆乳清废水的蛋白质含量为1%, pH 7.3 ± 0.1 ,控制压缩机频率在100 Hz,加热温度设定为 65°C ,溶液流量为 0.39 kg/s ,鉴于喷雾要求,大豆蛋白的蛋白质含量一般在10%~11%,因此通过溶液浓缩,使进口溶液蛋白质含量逐渐升高到10%后,开始记录蛋白质含量与对应的系统运行工况。结果如图13~图16所示。

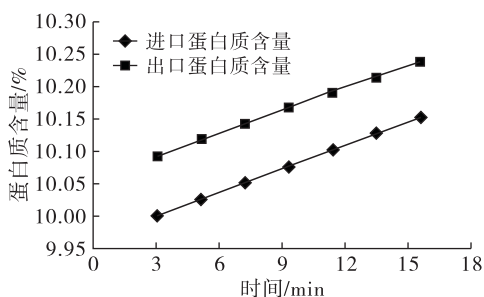


图13 蛋白质含量-时间关系曲线

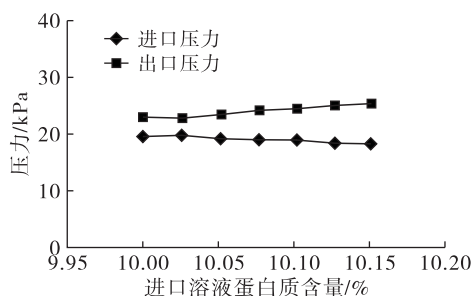


图14 进出口压力-进口溶液蛋白质含量关系曲线

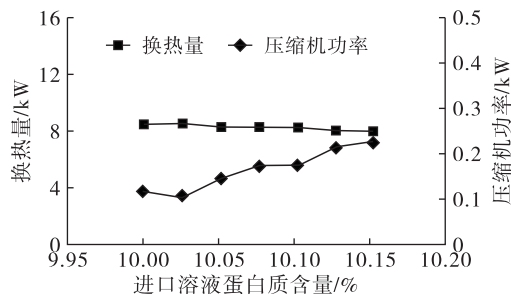


图15 换热量与压缩机功率-进口溶液蛋白质含量关系曲线

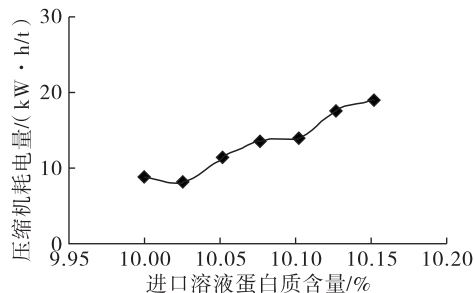


图16 每蒸发1t水的压缩机耗电量-进口溶液蛋白质含量关系曲线

由图13可知,由于浓溶液循环喷淋,因此进口溶液蛋白质含量逐渐升高,蛋白质含量增加呈线性,出口溶液蛋白质含量也逐渐升高,与进口溶液呈现平行关系,说明系统运行平稳,蒸发稳定,蒸发效率不受蛋白质含量变化影响,系统可持续运行。

由图14可知,在实验时间内,溶液蛋白质含量逐渐增加,进口压力下降,出口压力上升,分析认为随着水分的回收,大豆乳清废水蛋白质含量增加,在压缩机频率和加热温度不变的情况下,蒸汽蒸发量减少,真空泵抽真空能力不变,相对系统内空间变大,蒸汽密度降低,从而造成了进口压力降低,而出口压力上升的原因有待进一步分析。

由图15、图16可知,进口溶液蛋白质含量增加,而换热量逐渐降低,压缩机耗电量逐渐升高。分析原因认为,随着蛋白质含量增加,溶液的水汽分压降低,蒸发难度增加,进而需要提供的能耗增加。当前工况下,该系统每蒸发1t水,压缩机平均耗电量约为 $13 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3 结论

通过MVR系统对大豆乳清废水的回收、浓缩研究得到如下结论:

(1)提高压缩机频率,可提高溶液蒸发速率,有效提高换热系数,强化换热。最佳压缩机频率基于设备最高频率为100 Hz。

(2)提高加热温度,可提高溶液蒸发速率,有效提高换热系数,强化换热。综合评估乳清蛋白废水中活性物质的失活温度,最佳加热温度为 65°C 。

(下转第160页)

3 结 论

本研究在单因素实验的基础上,利用 SAS 软件,根据 Box - Behnken 的实验设计原理,利用响应面优化超声波 - 微波协同提取葡萄籽原花青素工艺。通过回归数学模型得到最优工艺条件为:乙醇体积分数 50%,液料比 21:1,超声功率 400 W,超声时间 32 min,微波功率 353 W,微波时间 3.2 min。在最优工艺条件下,原花青素得率为 6.18%,与模型模拟最大值 6.17% 相差很小。

参考文献:

- [1] 赵文娟,宋扬,李文婧,等. 响应面法优化黑果枸杞中原花青素提取工艺[J]. 食品工业科技,2017,38(9):252 - 256,308.
- [2] 朱月,李奋梅,王艳丽,等. 黑果腺肋花楸原花青素的提取及抑菌性研究[J]. 食品工业科技,2017,38(2):302 - 306,341.
- [3] 容晨曦,张秀玲,李铁柱,等. 响应面法优化微波法提取刺玫籽原花青素的工艺[J]. 食品科学,2016,37(18):41 - 46.
- [4] 吴涛,黄云霞,张民. 葡萄籽原花青素的体内降血糖作用研究[J]. 现代食品科技,2016,32(8):42 - 47.
- [5] 韦琴,乐薇,吕凯波,等. 板栗壳原花青素的提取及体外抑菌作用研究[J]. 食品与发酵工业,2016,42(4):214 - 219.
- [6] 李彦,李鑫,刘景玲,等. 鸡血藤原花青素的纯化及活性评价[J]. 食品科学,2016,37(17):45 - 51.
- [7] 陈月英,王彦平,孙瑞琳,等. 葡萄皮渣原花青素酶法提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. 北方园艺,2016(16):129 - 132.

(上接第 155 页)

(3) 提高压缩机频率、提高加热温度,均可导致压缩机能耗升高,压缩机频率和加热温度提高与能耗提高呈线性正相关,主要原因是压缩机做功对象质量增加,压力提高。

(4) 对于大豆乳清废水,每蒸发 1 t 水,压缩机平均耗电量为 13 kW · h。

参考文献:

- [1] 刘国庆,朱翠萍. 大孔树脂对大豆乳清废水中异黄酮的吸附特性研究[J]. 离子交换与吸附,2003,19(3):229 - 234.
- [2] SORAGENTINI D A, WAGNER J R. Comparative study of foaming properties of whey and isolate soybean proteins[J]. Food Res Int,2002,35:721 - 729.
- [3] IWABUCHI S, YAMAUCHI F. Electrophoretic analysis of whey proteins present in soybean globulin fractions[J]. J

- [8] 张佳婵,王昌涛,孙宝国,等. 沙棘籽粕原花青素制备、体外抗氧化及细胞活力评价[J]. 食品工业科技,2016,37(23):103 - 108.
- [9] 韦琴,梅辉,乐薇,等. 板栗壳原花青素的含量测定及其纯化工艺研究[J]. 粮食与油脂,2016,29(9):81 - 85.
- [10] 韦琴. 板栗壳中原花青素含量检测方法的比较研究[J]. 食品与机械,2016,32(3):77 - 81.
- [11] 董兴叶,徐振秋,邓辰辰,等. 挤压超声联用提取葡萄籽原花青素工艺优化[J]. 食品研究与开发,2016,37(16):87 - 91.
- [12] 刘晓娜,康健,赵俊岭. 响应面超声波提取黑糯玉米原花青素的工艺研究[J]. 食品工业,2016,37(5):128 - 131.
- [13] 王芳,廖亮,黄瑜,等. 双水相法提取油菜籽粕中原花青素[J]. 食品工业科技,2016,37(24):303 - 308.
- [14] 李春阳,许时婴,王璋. 香草醛 - 盐酸法测定葡萄籽、梗中原花青素含量的研究[J]. 食品科学,2004,25(2):157 - 161.
- [15] 王宗成,龙燕萍,彭延波,等. 响应面优化油茶叶黄酮提取工艺及抑菌活性研究[J]. 中国油脂,2017,42(4):123 - 126, 130.
- [16] 张海容,史振华. 响应面法优化超声波辅助提取沙棘籽粕中黄酮工艺[J]. 中国油脂,2017,42(3):117 - 121.
- [17] 金华,刘志刚,曾晓丹,等. 超声提取葡萄籽原花青素工艺的优化及其抗氧化活性研究[J]. 中国调味品,2014,39(4):102 - 107.
- [18] 姜霞. 葡萄籽中分离提取原花青素的研究[J]. 科技创新与应用,2016(1):34 - 35.

Agric Food Chem,1987,35(2):205 - 209.

- [4] 刘亚伟. 淀粉基食品添加剂[M]. 北京:化学工业出版社,2008:151.
- [5] 孟欣. 蒸汽压缩蒸馏装置压缩机内部流场的分析研究[D]. 河北 唐山:河北联合大学,2014.
- [6] WALMSLEY T G, WALMSLEY M R W, ATKINS M. Improving energy recovery in milk powder production through soft data optimization[J]. Appl Therm Eng, 2013, 61:80 - 87.
- [7] 金世琳. 带有机械再压缩(MVR)的蒸发器[J]. 食品与机械,1990(2):33 - 36.
- [8] HISHAM E. Design of single - effect mechanical vapor compression[J]. Desalination, 2006, 190: 1 - 15.
- [9] LIANG L, HAN D, MA R, et al. Treatment of high - concentration wastewater using double - effect mechanical vapor recompression[J]. Desalination, 2013, 314: 139 - 146.