

高压射流磨振荡反应腔 CFD 模拟及结构优化

CFD simulation and structure optimization of the industry-scale microfluidization interactive chamber

梅立仁^{1,2,3} 许克平¹ 艾凡荣³ 戴涛涛^{1,2} 陈 军^{1,2}

MEI Liren^{1,2,3} XU Keping¹ AI Fanrong³ DAI Taotao^{1,2} CHEN Jun^{1,2}

(1. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西 南昌 330047; 2. 江西南南大国

创院食品科技有限公司, 江西 南昌 330047; 3. 南昌大学先进制造学院, 江西 南昌 330031)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 3. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

摘要: **目的:** 解决工业级高压射流磨 (industry-scale microfluidizer, ISM) 在实际应用中存在的进料要求高、处理量小、处理效果不佳问题。**方法:** 结合 CFD-PBM 模拟和乳液制备试验对 4 种振荡反应腔进行选优, 再通过尺寸优化获得最终腔型。**结果:** 4 种反应腔相比于原反应腔都拥有更大的孔径和流量; 粒径细化效果为 T 字撞击型 > T 字—二次撞击型 > 十字撞击型 > 二分管型 4 种反应腔的分流管区均主要存在剪切作用力, 撞击管区主要存在撞击作用力, 射流管区主要存在剪切作用力和空穴作用力, 以上 3 个区域均存在强湍流。对 T 字撞击型反应腔进行尺寸优化, 得到最终的反应腔模型, 其最小管径为 0.7 mm, 在 120 MPa 下流量可达 878 L/h。优化所得腔型制备的乳液粒径为 249 nm, 与模拟粒径结果吻合良好。**结论:** T 字撞击型反应腔更具粒径细化优势, 撞击作用力是粒径细化的主要因素。

关键词: 工业级高压射流磨; 振荡反应腔; CFD-PBM; 数值模拟; 模型优化

Abstract: Objective: Solving the problems of high feed requirement, low flow rate and poor treatment effect of industrial-scale microfluidizer (ISM) in practical application.

Methods: Combining CFD-PBM simulation and emulsion preparation test, four kinds of interactive chambers were optimized, and the final shape was obtained by size optimization.

Results: Four kinds of interactive chambers had larger flow rate and hole diameter than the original interactive chamber. The

effect of particle size reduction was T-impact type > T double impact type > cross impact type > two shunt type. Shear force mainly existed in the shunt zone, impact force mainly existed in the impact zone, shear force and cavitation force mainly existed in the jet zone. Turbulent motion existed in the above three zones. The geometric parameters of T-shaped impact reaction chamber were optimized to obtain the final reaction chamber model. The minimum hole diameter was 0.7 mm, and the flow rate was 878 L/h at 120 MPa. The emulsion partical size prepared by the optimized chamber was 249 nm, which was in good agreement with the simulation results. **Conclusion:** T-impact type interactive chamber has the advantage of particle size reduction, and the impact force is the main factor.

Keywords: industry-scale microfluidizer; interactive chamber; CFD-PBM; numerical simulation; model optimization

动态高压微射流技术 (dynamic high-pressure microfluidization, DHPM) 起始于 20 世纪 90 年代末, 是在高压均质技术 (high pressure homogenization, HPH) 的基础上开发出的一种新型细化均质技术^[1-2]。在食品行业中已被广泛应用于载体体系制备、食品生物大分子改性、食品加工以及辅助杀菌等方面^[3-5]。但是, DHPM 设备的振荡反应腔尺寸通常较小 (<300 μm), 在处理纤维素含量高、黏度大的物料时易发生堵塞, 最为关键的是其处理量小, 使得 DHPM 在食品行业的进一步应用受限。

工业级高压射流磨 (industry-scale microfluidizer, ISM) 主要由电气控制部件、三柱塞往复增压泵和振荡反应腔 3 个部分组成^[6], 如图 1 所示。其工作原理是将经增压泵升至高压的含有固体颗粒的多相流体物料输入到振荡反应腔中, 物料在特殊设计的微孔道结构中经历强烈的高速剪切、射流撞击、空穴效应等作用, 实现对多相

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 32160572)

作者简介: 梅立仁, 男, 南昌大学在读硕士研究生。

通信作者: 陈军 (1986—), 男, 南昌大学研究员, 博士。

E-mail: chen-jun1986@hotmail.com

收稿日期: 2023-10-20 **改回日期:** 2023-12-29

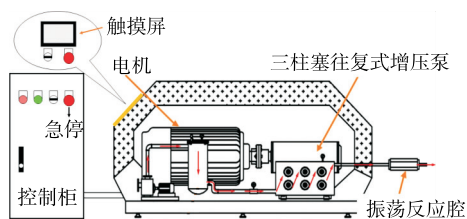


图 1 工业级高压射流磨设备示意图

Figure 1 Schematic diagram of industry-scale microfluidizer

流体高效的粉碎、均质和乳化。与传统的 DHPM 设备相比,ISM 具有更大的反应腔孔道(300~500 μm)、更广的粒径要求(最大处理粒径达 80 目)、更大的物料处理量(500 L/h)^[7]。

ISM 在食品超微粉碎加工方面具有巨大的应用潜力,可用于各种食品原料的大批量生产加工,制备全组分饮品。与 DHPM 相比,现有的 ISM 技术具有更大的处理量和更低的进料要求,但在实际工业生产中仍然会遇到处理量不足和进料要求限制。此外,ISM 对一些膳食纤维流体物料粉碎效果较差,进而阻碍其在工业化生产中的应用^[8-10]。振荡反应腔是 ISM 设备的核心元件,改造振荡反应腔是改进 ISM 设备最为有效的方法之一。

研究拟设计不同类型且孔道更大的 ISM 振荡反应腔,采用数值模拟与实验验证相结合的方法对新型振荡反应腔进行分析,探讨不同类型振荡反应腔的主要作用力和作用区域,并对选择出的最优腔型进行尺寸优化,以期设计出处理量更高、允许进料粒径范围更大、工作性能更好的新型振荡反应腔。

1 材料与方 法

1.1 材料与设备

葵花籽油:市售;

乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI):美国 Hilmar Ingredients 公司;

高速分散机:T 25 型,德国 IKA 公司;

流变分析仪:MCR 302 型,奥地利 Anton Paar 公司;

激光衍射粒度分析仪:Mastersizer 3000 型,英国 Malvern 公司;

界面流变测量仪:OCA 25 型,德国 Dataphysics 公司。

1.2 不同类型振荡反应腔设计

1.2.1 二分管型反应腔 基于惯性和黏性剪切是液滴破碎主要因素而射流撞击作用只起到辅助作用的观点^[11],设计了二分管型反应腔,该腔型只存在惯性力和黏性剪切力。设计分流管长为 4.5 mm;分流管径 0.7 mm。模型如图 2 所示。

1.2.2 T 字撞击型反应腔 基于撞击作用是液滴破碎主要因素的观点^[12],设计 T 字撞击型反应腔。其分流管、

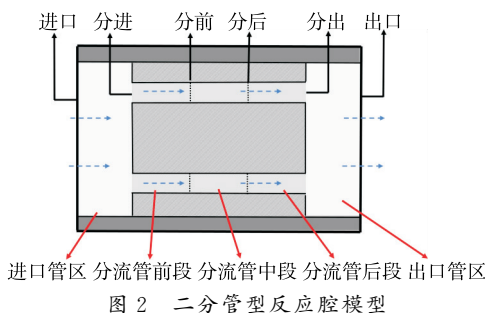


图 2 二分管型反应腔模型

Figure 2 Model diagram of two shunt type interactive chamber

撞击管和射流管径分别为 1.0,1.1,1.0 mm;其分流管、撞击管和射流管长分别为 1.2,2.3,2.3 mm。模型如图 3 所示。

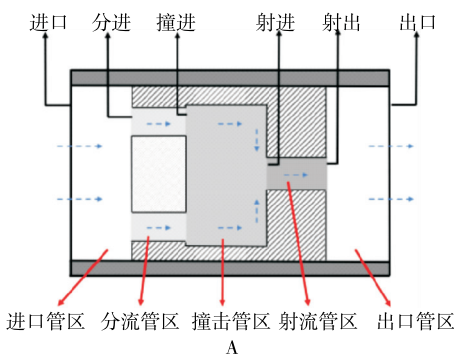


图 3 T 字撞击型反应腔模型

Figure 3 Model diagram of T-impact type interactive chamber

1.2.3 十字撞击型反应腔 基于“十”字型管道作用力最强的观点^[13],耦合两个 T 字撞击型反应腔得到十字撞击型反应腔。其分流管径为 0.7 mm,模型如图 4 所示。

1.2.4 T 字一二次撞击型反应腔 增加流体在反应腔中受到各种作用力的次数可能是提高反应腔效果的有效途径,基于此构造 T 字一二次撞击型反应腔,模型如图 5 所示。

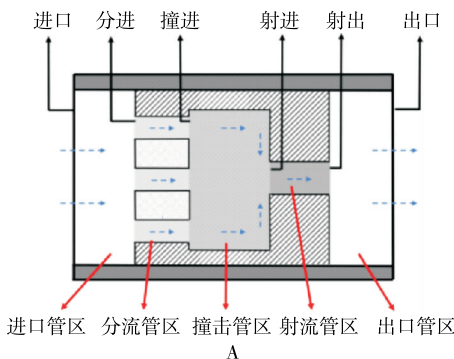


图 4 十字撞击型反应腔模型

Figure 4 Model diagram of cross impact type interactive chamber

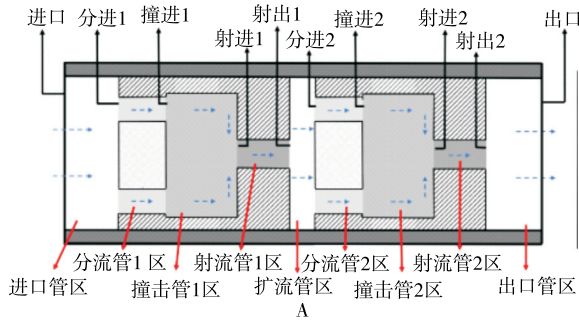


图 5 T 字—二次撞击型反应腔模型

Figure 5 Model diagram of T double impact type interactive chamber

1.3 粗乳液的制备及性质测定

1.3.1 粗乳液制备 参考 Li 等^[14]的方法并修改:向质量分数为 1% 的 WPI 溶液中加入体积分数为 5% 的葵花籽油,经高速分散机 23 000 r/min 处理 2 min。

1.3.2 粗乳液性质测定

(1) 黏度:根据梁亚桢^[15]的方法,在流变仪配备的圆筒(CC27)中缓慢加入 16 mL 样品,固定温度 25 °C、剪切速率 100 s⁻¹,分别测定粗乳液、葵花籽油和 WPI 溶液的表现黏度。

(2) 粒径:参考 Wang 等^[16]的方法并修改:粗乳液和分散剂折射率设置为 1.52 和 1.33,吸收率为 0.01,遮光率范围为 3%~8%。每个样品重复测定 3 次。

(3) 界面张力:采用界面流变测量仪测定。葵花籽油(经分子筛吸附剂纯化处理)作为油相,WPI 溶液为水相^[17]。将 WPI 溶液加入注射器,注射器针头插入装有葵花籽油的玻璃槽中,注射形成足够大、不滴落且无气泡的液滴,持续静置并采集液滴图像 120 min^[18]。

1.4 振荡反应腔数值模拟计算

1.4.1 反应腔建模 采用 ANSYS Workbench 中内置的 DM(ANSYS design modeler)模块进行建模。因流场的对称性,只需求解半个计算域,如图 6 所示。计算域设置为 Fluid。

1.4.2 网格划分与湍流模型 采用 Gambit 网格划分软件。因计算域的规则性,选择六面体网格。以二分管型为例,网格数量为 70 万,网格细节见图 7。研究涉及管内高速流动,包含高剪切、射流撞击等复杂流态,选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

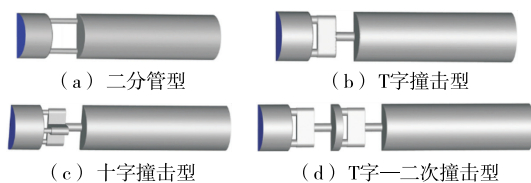


图 6 4 种反应腔模型

Figure 6 Model diagram of four interactive chambers



图 7 二分管型反应腔三维网格

Figure 7 Three dimensional mesh diagram of two shunt type interactive chamber

1.4.3 多相流模型

(1) 模型选择:群体平衡模型(population balance model,PBM)可以模拟气泡、液体和固体颗粒的输送、破碎等复杂问题^[19-20]。

(2) 模型参数设置:粒径和界面张力由 1.3.2 得到。指定颗粒组数为 11,最大粒径为 128 μm,最小粒径为 0.01 μm。

1.4.4 材料属性 连续相(WPI 溶液)和离散相(葵花籽油)的材料参数见表 1。粗乳液平均粒径($D_{[3,2]}$)为 7.5 μm,即离散相的进口粒径。

表 1 两相材料的物理性质

Table 1 Physical properties of two phase materials

| 材料 | 密度/ (kg · m ⁻³) | 黏度/ (Pa · s) | 界面张力/ (N · m ⁻¹) | 两相比 例/% |
|--------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------|
| WPI 溶液 | 998.2 | 9.92 × 10 ⁻⁴ | 0.027 | 95 |
| 葵花籽油 | 902.315 | 5.54 × 10 ⁻² | 0.027 | 5 |

1.4.5 边界条件和离散算法 选择压力入口,其值为 60 MPa。离散相体积分数为 5%,离散相初始粒径为粗乳液 $D_{[3,2]}$ 值。出口为常压。连续性方程收敛值设置为 10⁻⁴。采用 SIMPLEC 算法并选用一阶迎风格式。

1.5 反应腔部件制作及试验

1.5.1 反应腔部件制作 选用 304 不锈钢材料,由江西佳时特精密机械有限责任公司制造,尺寸偏差 ±0.05 mm。

1.5.2 乳液制备试验

(1) 不同类型反应腔制备乳液:使用 4 种腔型对粗乳液进行 ISM 处理,处理压力为 60 MPa,得到 4 种待测样品。

(2) 乳液粒径测定:对 4 种待测样品进行粒径测定,方法同 1.3.2。

1.5.3 尺寸优化模拟和试验

(1) 模型优化设计:对细化效果最好的反应腔——T 字撞击型进行尺寸优化,反应腔物理模型如图 8 所示。从左到右,分别对分流管径、分流管长、撞击管径、撞击管长、射流管径和射流管长进行模拟优化。

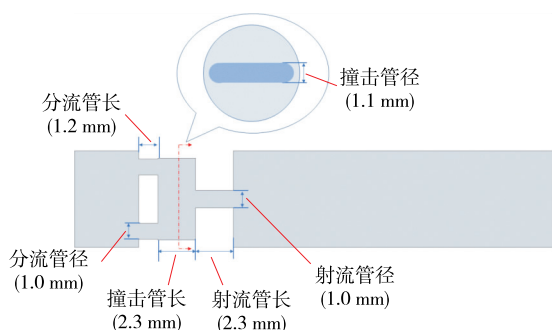


图 8 T 字撞击型反应腔结构示意图

Figure 8 Structure diagram of T-impact type interactive chamber

(2) Fluent 数值模拟:对不同尺寸的 T 字撞击型反应腔进行建模、网格划分和 CFD-PBM 耦合模拟。

(3) 尺寸优化模拟:不同结构参数的尺寸大小和命名见表 2。

1.6 数据处理

所有试验(乳液制备与测定)平行 3 次,结果以平均值±标准差表示。使用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2021 进行数据分析和图表绘制。

表 2 T 字撞击型反应腔不同结构参数尺寸

Table 2 Different structural parameters of T-impact type interactive chamber

| 反应腔结构参数 | 尺寸/mm | 命名 | 反应腔结构参数 | 尺寸/mm | 命名 |
|---------|-------|--------|---------|--------|--------|
| 分流管径 | 0.7 | SR-0.7 | 撞击管长 | 0.6 | IL-0.6 |
| | 1.0 | SR-1.0 | | 1.2 | IL-1.2 |
| | 1.4 | SR-1.4 | | 2.3 | IL-2.3 |
| 分流管长 | 0.0 | SL-0.0 | 3.4 | IL-3.4 | |
| | 0.6 | SL-0.6 | 4.5 | IL-4.5 | |
| | 1.2 | SL-1.2 | 射流管径 | 0.7 | JR-0.7 |
| | 3.0 | SL-3.0 | | 1.1 | JR-1.1 |
| 撞击管径 | 0.7 | IR-0.7 | 1.4 | JR-1.4 | |
| | 1.1 | IR-1.1 | 3.8 | JR-3.8 | |
| | 1.4 | IR-1.4 | 射流管长 | 1.2 | JL-1.2 |
| | | | 2.3 | JL-2.3 | |
| | | | 3.4 | JL-3.4 | |
| | | | 4.5 | JL-4.5 | |

2 结果与分析

2.1 4 种振荡反应腔试验与模拟

2.1.1 4 种振荡反应腔与原反应腔对比 不同腔型结构参数和流量见表 3。4 种振荡反应腔的最小孔径为原腔的 2~3 倍,有效增大进料粒径范围。二分管型、T 字撞击型、十字撞击型和 T 字—二次撞击型反应腔的流量

表 3 不同类型反应腔的管径和流量

Table 3 Diameter and flow rate of different types of interactive chambers

| 反应腔类型 | 不同区域管道直径/mm | | | 120 MPa 下反应腔流量/(L·h ⁻¹) |
|-----------|-------------|-----|-----|-------------------------------------|
| | 分流管 | 撞击管 | 射流管 | |
| 原反应腔 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 360 |
| 二分管型 | 0.7 | — | — | 760 |
| T 字撞击型 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 900 |
| 十字撞击型 | 0.7 | 1.1 | 1.0 | 931 |
| T 字—二次撞击型 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 628 |

分别为原腔的 2.1,2.5,2.6,1.7 倍,有效增大了 ISM 设备的处理量。

2.1.2 不同类型振荡反应腔对乳液粒径的影响 如表 4 所示,乳液平均粒径($D_{[3,2]}$)的模拟和试验值吻合良好。乳液粒径细化效果为 T 字撞击型>T 字—二次撞击型>十字撞击型>二分管型。图 2~图 5 分别标出了 4 种腔型内不同截面位置的简称以及区域名称。

由图 9 可知,二分管型腔体在分流管内产生明显的液滴破碎,分流管前段(见图 2)提供最大粒径差,7.08 μm 减小到 2.41 μm 。T 字撞击型、十字撞击型和 T 字—二次撞击型腔体具有类似的粒径降低规律,分流管和撞击管均具有明显的破碎液滴作用,而射流管的效果非常微弱。该对比分析可推断:分流管前段效果明显,当分流管与撞击管组合时会表现出更强的粒径细化效果,而射流管作用非常微弱。对比 T 字撞击型和 T 字—二次撞击型可知,第二个 T 字结构的引入并不会带来细化效果的提升,反而会降低流量(见表 3)。

2.1.3 速度场分析 流体速度是剪切力和撞击力大小的直观表现^[21]。由图 10 可知,最大速度为二分管型>T 字撞击型=十字撞击型>T 字—二次撞击型。

由图 11,图 12 可知,二分管型腔内速度分布最为平滑,不存在撞击点(或称驻点),而其他 3 种腔内均存在速度突变为零的撞击点,因此二分管型腔只提供剪切力,而其他腔体还提供撞击力。图 12(a)表明剪切力在整个分流管内变化较小,但是液滴在分流管中、后段粒径降低效果减弱(见图 9),说明剪切力的细化效果随粒径减小而大

表 4 不同类型反应腔试验与模拟粒径

Table 4 Experimental and simulated particle size of different interactive chambers

| 反应腔类型 | 试验粒径/ μm | 模拟粒径/ μm | 误差/% |
|-----------|---------------------|---------------------|------|
| 二分管型 | 0.828±0.012 | 0.906 | 8.6 |
| T 字撞击型 | 0.356±0.005 | 0.362 | 1.7 |
| 十字撞击型 | 0.459±0.025 | 0.422 | 8.8 |
| T 字—二次撞击型 | 0.376±0.002 | 0.403 | 6.7 |

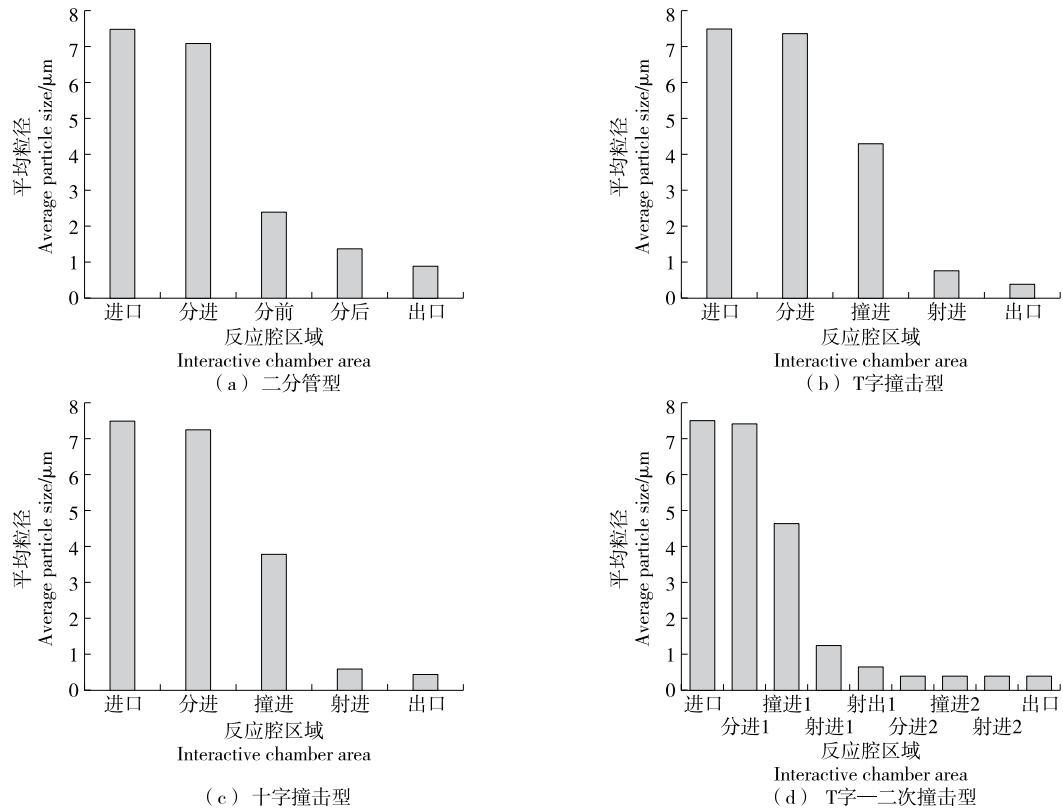


图 9 4 种反应腔不同截面上的平均粒径

Figure 9 Average particle size on different sections of four interactive chambers

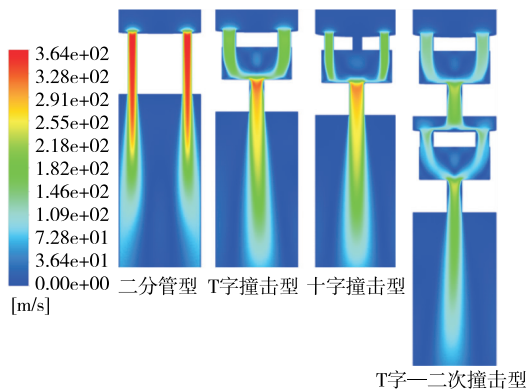
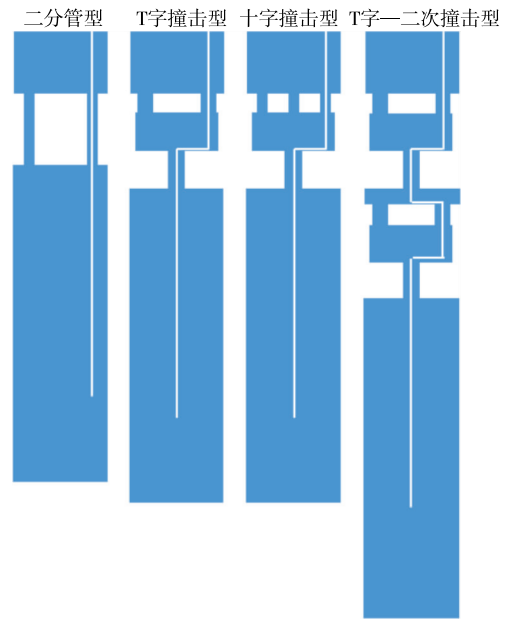


图 10 4 种反应腔速度分布云图

Figure 10 Cloud diagram of velocity distribution in four interactive chambers

幅减弱。对比分析图 9、图 12(b)、图 12(c)和图 12(d)可知:撞击力的引入会进一步明显降低粒径,并且综合效果优于单一的剪切力。因此撞击力也是有效的粒径细化手段,与 Kumar 等^[22]的结论一致。在图 12(b)、图 12(c)中,射流管内存在比分流管更大的流速,但是粒径降低效果非常微弱(见图 9),可能是因为粒径越小,液滴破碎的难度越大^[23]。

2.1.4 湍流动能场分析 图13表明,湍流动能场的强度



白线为物理量提取区域

图 11 轴线物理量取值区域

Figure 11 Axis physical quantity value area

在总体上是 T 字撞击型>十字撞击型>T 字一二次撞击型>二分管型,与 2.1.2 中的粒径细化效果排序略有不同

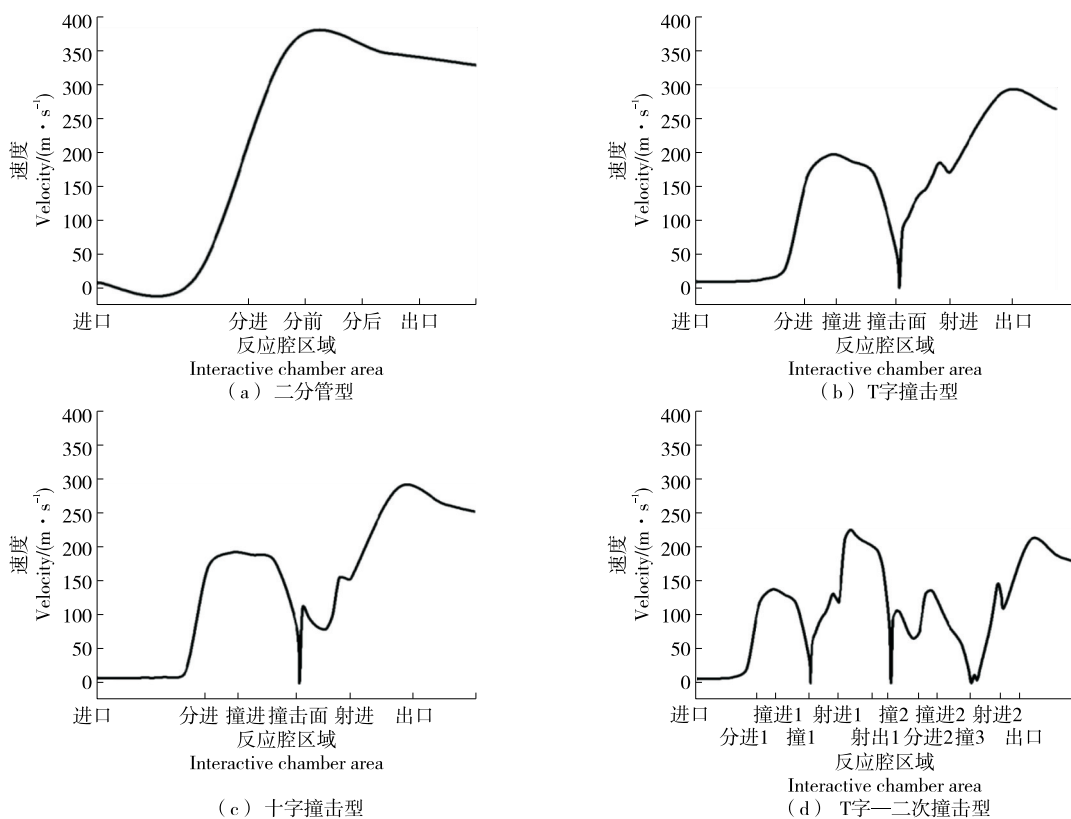


图 12 4 种反应腔轴线速度分布图

Figure 12 Axis velocity distribution of four interactive chambers

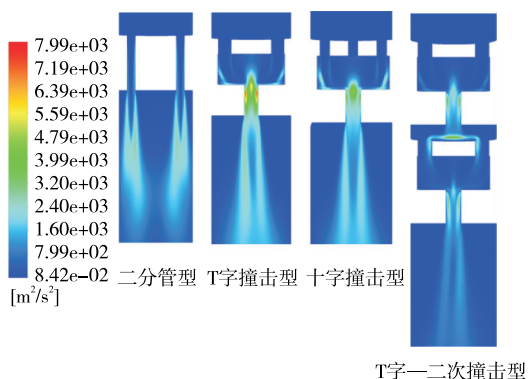


图 13 4 种反应腔湍流动能分布云图

Figure 13 Cloud diagram of turbulent kinetic energy distribution in four interactive chambers

同。图 14 表明,相对撞击管区和射流管区湍动能在分流管内较小,因为分流管相对狭窄湍流难以充分发展^[24],而撞击管区的撞击作用产生了高湍流区域^[25]并保持到射流管区,且射流管区管径相对较大湍流在此区域得到了充分的发展^[19]。因此,撞击管和射流管的引入会给湍流带来充分的发展空间,有利于液滴的破碎。

2.1.5 空化模型和压力场分析 空化气泡破裂时会释放巨大能量因而具有破碎液滴的作用^[26]。气体含量越高、

最大气相体积分数越大的区域空化数越高,空化强度越大^[27]。图 15 表明,气体主要存在于近壁区域。图 16 表明,最大体积分数排序为 T 字撞击型>T 字—二次撞击型>十字撞击型>二分管型,这也可能是 T 字撞击型反应腔的乳液粒径细化效果最好的又一重要原因。图 17 展示了 4 种反应腔中的压力分布(沿图 11 白线)。对比图 15 和图 17 可知,负压区域具有强烈的空化作用。

2.2 T 字撞击型反应腔孔道尺寸优化及模拟分析

2.2.1 孔道尺寸优化分析 图 18(a)表明,分流管径从 1.4 mm 减小至 1.0 mm 时,粒径减小显著,而继续减小至 0.7 mm 时,粒径减小程度下降。在一定范围内,减小分流管径能有效提高粒径细化效果。SR-0.7、SR-1.0、SR-1.4 的出口乳液平均粒径分别为 0.33、0.36、0.76 μm。选择 SR-0.7 进行下一步尺寸优化。

图 18(b)中,SL-0.0 表示不存在分流管(或称分流管长度为 0),此时粒径细化效果最差,应当避免该结构的缺失。分流管越长,乳液在分流管内被细化的效果越好,但在经过撞击管区后,不同分流管长的粒径细化效果差异被抹平,最终在经过射流管区后已无明显差异。分流管长度与其粒径细化效果呈正相关,但撞击管的引入会使得该区别没有实际意义,这也进一步说明撞击作用是高效的。选择 SL-1.2 进行下一步尺寸优化。

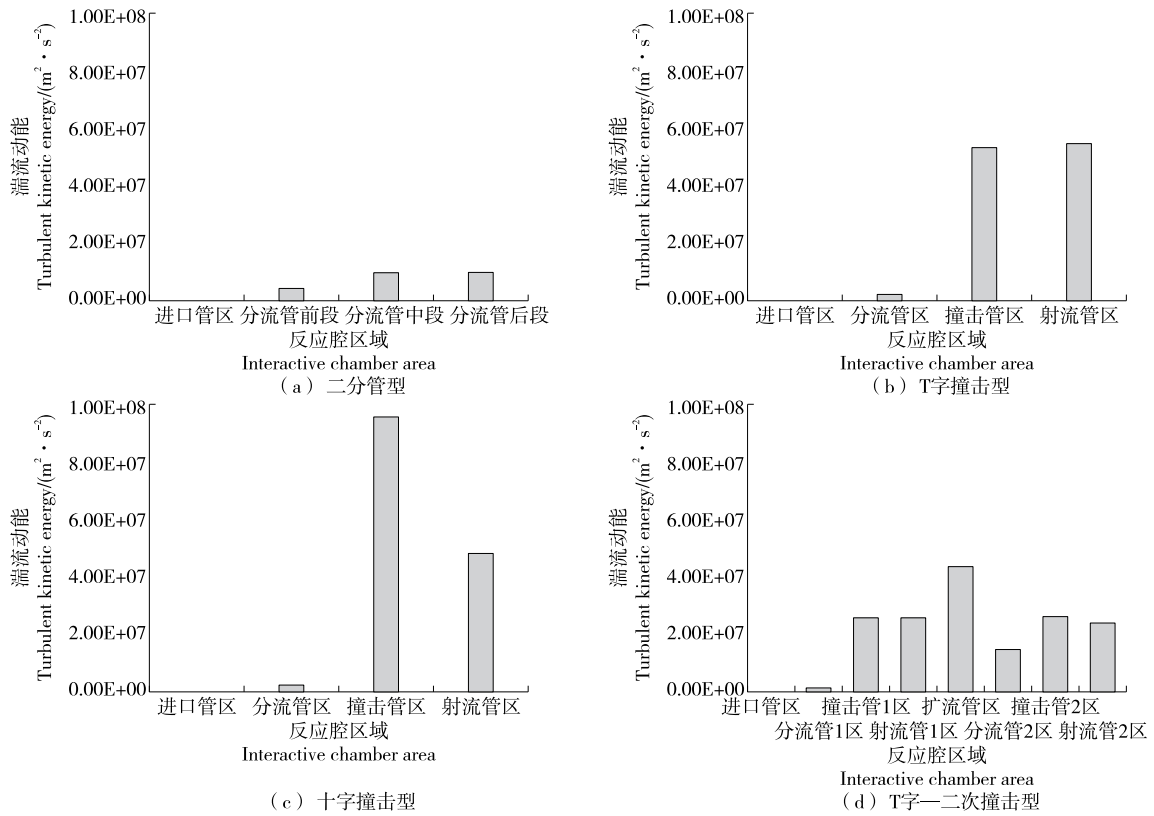


图 14 4 种反应腔不同区域湍流动能

Figure 14 Turbulent kinetic energy in different areas of four interactive chambers

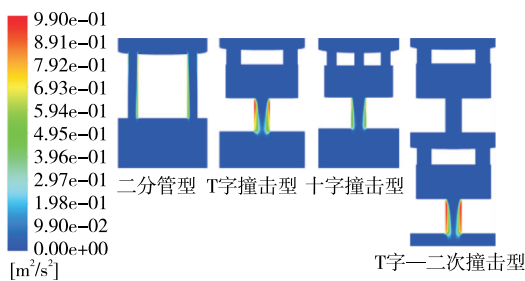


图 15 4 种反应腔气相体积分数云图

Figure 15 Cloud diagram of air phase volume fraction in four interactive chambers

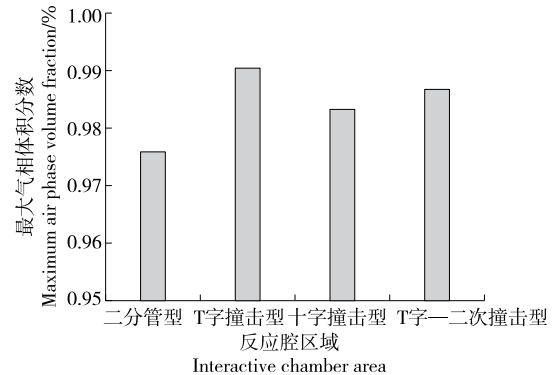


图 16 4 种反应腔的最大气相体积分数

Figure 16 Maximum air phase volume fraction of the four interactive chambers

图 18(c)表明,增大撞击管径能略微提升撞击管的细化效果。选择 IR-1.4 进行下一步尺寸优化。

图 18(d)表明,按照撞击管从短到长排序,出口乳液平均粒径分别为 0.41,0.37,0.33,0.33,0.32 μm。当撞击管长延长到 2.3 mm 后,乳液平均粒径已无明显变化。选择 IL-2.3 进行下一步尺寸优化。

图 18(e)表明,射流管径的增大能小幅度提高各区域的细化效果,按射流管径从小到大排序,出口乳液平均粒径分别为 0.44,0.33,0.24,0.23 μm。选择 JR-1.4 进行下一步的尺寸优化。

图18(f)表明,射流管长对粒径细化效果没有影响。

以 JL-2.3 作为最终优化所得。

2.2.2 最终反应腔模拟与分析 表 5 表明 T 字撞击型反应腔优化前(SR-1.0)和优化后(JL-2.3)乳液制备试验和模拟粒径结果误差小于 5%。反应腔优化后,其制备的乳液粒径从 0.356 μm 降低到 0.249 μm,减小了 30.06%。JL-2.3T 字撞击型反应腔最小管径(分流管径)为 0.7 mm,120 MPa 下流量为 878 L/h。相比于原反应腔,优化后的反应腔可允许进料粒径范围和设备处理量均有了明显提高。

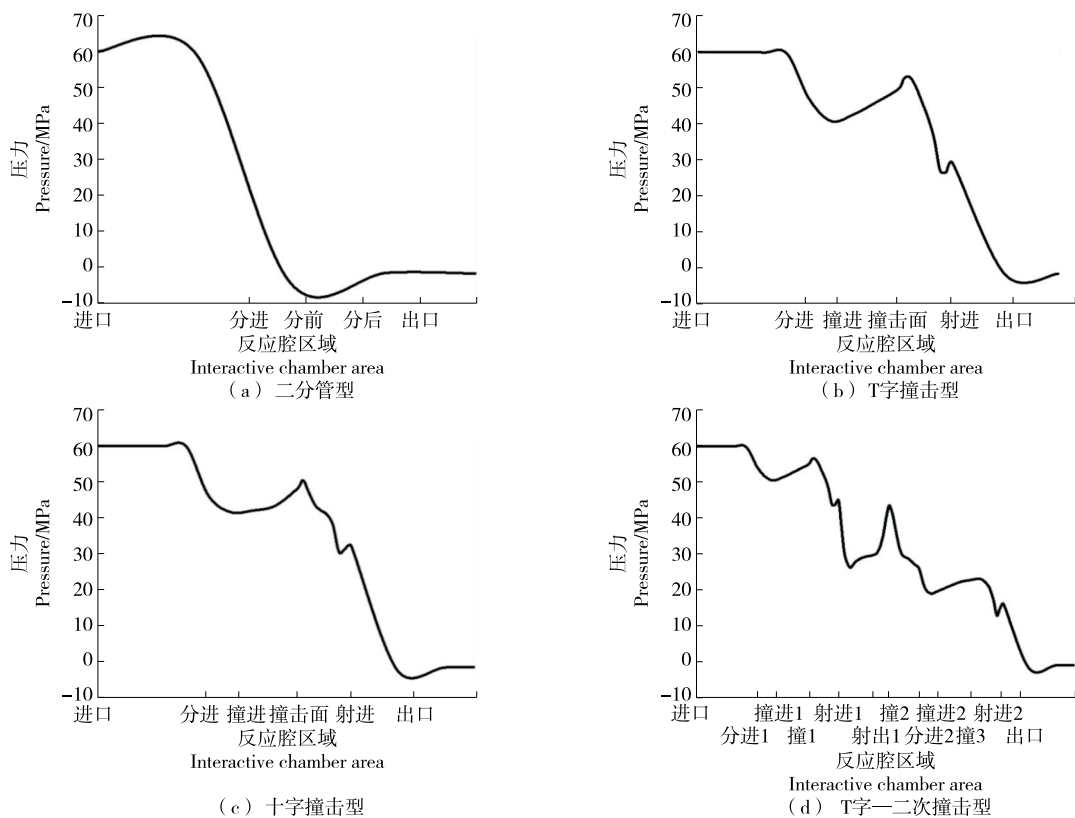


图 17 4 种反应腔不同区域压力变化

Figure 17 Pressure changes in different areas of four interactive chambers

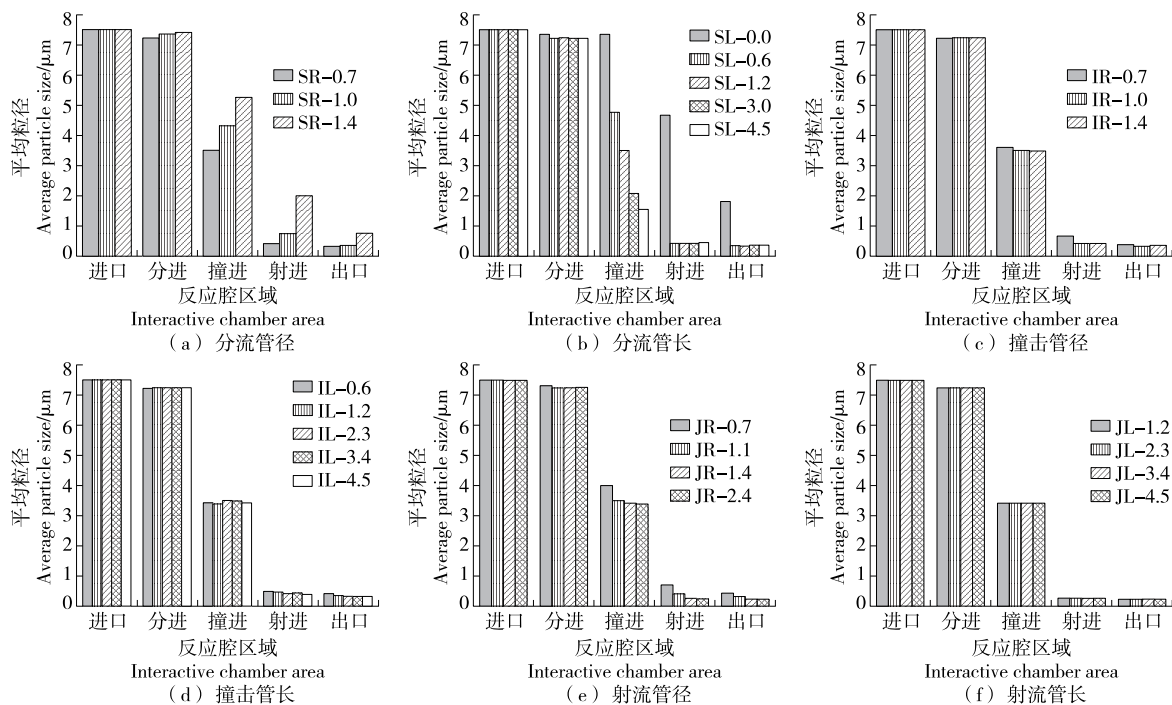


图 18 不同分流管径、分流管长、撞击管径、撞击管长、射流管径、射流管长反应腔内部乳液平均粒径变化

Figure 18 Changes of average particle size of emulsion in interactive chambers with different shunt radius, shunt lengths, impact tube radius, impact tube lengths, jet tube radius, jet tube lengths

表 5 T 字撞击型反应腔尺寸优化前后模拟与试验粒径对比

Table 5 Comparison of simulated and experimental particle sizes of T-impact interactive chamber before and after optimization

| 反应腔类型 | 试验粒径/ μm | 模拟粒径/ μm | 误差/ $\%$ | 120 MPa 下流量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$ |
|--------|---------------------|---------------------|----------|---|
| SR-1.0 | 0.356 ± 0.005 | 0.362 | 1.7 | 900 |
| JL-2.3 | 0.249 ± 0.006 | 0.237 | 4.8 | 878 |

3 结论

分流管是形成高速流体的首要条件,其中存在剪切作用力并对液滴破碎具有明显作用;当引入撞击管和射流管结构时,液滴破碎效率显著提升,并且分流管的优化不再起作用,说明撞击作用力的粒径降低效率更高。对 T 字—二次撞击型结构的分析可知,更多更复杂的作用力形式并不能带来预想中的粒径降低效果,反而会大幅降低流量。而空化作用力并不能起到决定性的作用。

湍流只有在几何区域较大的地方才能充分发展,撞击管和射流管就提供了该条件,充分发展的湍流能够提供更多液滴破碎的能量。对撞击管径、撞击管长和射流管径的增大均会提高粒径细化效果,因为孕育湍流的空间得到增大。

总之,T 字撞击型振荡反应腔具有破碎液滴的结构优势。通过尺寸优化得到最终反应腔模型,其最小管径为 0.7 mm,120 MPa 下流量可达 878 L/h,制备的乳液粒径达 249 nm。

参考文献

[1] 吴佳. DHPM 处理和 Salecan 添加量对低盐条件下肌原纤维蛋白理化特性和结构的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021: 7-8.
WU J. Effects of DHPM treatment and salean addition on the physical and chemical properties and structure of myofibrils protein under low-salt condition [D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 7-8.

[2] OZTURK O K, TURASAN H. Latest developments in the applications of microfluidization to modify the structure of macromolecules leading to improved physicochemical and functional properties [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(16): 4 481-4 503.

[3] HU C, XIONG Z Y, XIONG H G, et al. Effects of dynamic high-pressure microfluidization treatment on the functional and structural properties of potato protein isolate and its complex with chitosan[J]. *Food Research International*, 2021, 140: 109868.

[4] ZHENG J, WANG N, HUANG S, et al. In vitro digestion and structural properties of rice starch modified by high methoxyl

pectin and dynamic high-pressure microfluidization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 274: 118649.

[5] ZHU F. Structure and physicochemical properties of starch affected by dynamic pressure treatments: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116: 639-654.

[6] 牛晓琴. 高压射流磨系统制备全果番茄饮料研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 9-10.
NIU X Q. Study on whole tomato beverage preparation by industryscale microfluidizer system [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 9-10.

[7] LI Y T, CHEN M S, DENG L Z, et al. Whole soybean milk produced by a novel Industry-scale microfluidizer system without soaking and Filtering [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 291: 110228.

[8] 黄素君. 全谷物饮品的稳定性研究及产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 15-20.
HUANG S Z. Study on stability of whole grain beverage and product development [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 15-20.

[9] 董盼豪. 桑葚酚类物质研究及全组分果汁研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 43-56.
DONG P H. Study on phenolic compounds of mulberry fruit and whole-component juice development [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 43-56.

[10] AUGUSTO P E D, IBARZ A, CRISTIANINI M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of tomato juice: Time-dependent and steady-state shear[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(4): 570-579.

[11] SADEGHPOUR GALOOLYAK S, DABIR B, ZOLFAGHARI M. An innovative numerical approach for simulation of emulsion formation in a microfluidizer [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 487: 169-179.

[12] 刘伟, 李火坤, 刘成梅, 等. 基于 FLUENT 的动态高压微射流内部孔道流场的数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(1): 113-120.
LIU W, LI H K, LIU C M, et al. Numerical simulation of the inner channel flow field of dynamic high-pressure microfluidization based on FLUENT[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(1): 113-120.

[13] 周斌兴, 张裕中. 不同孔型的高压微射流超细粉碎的分析比较[J]. *食品工业科技*, 2008(12): 182-185.
ZHOU B X, ZHANG Y Z. Analysis and comparison of super-fine grinding by different micro-channel flow-fields[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008(12): 182-185.

[14] LI T, ZHANG S L, YI J H, et al. Antioxidant and prooxidant activities of tea polyphenols in oil-in-water emulsions depend on the level used and the location of proteins[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131672.

(下转第 89 页)

- experimental research on transcritical CO₂ single compression cycle with and without internal heat exchanger [J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(2): 137-143.
- [5] 孔海利, 郭宪民, 李添龙, 等. 带回热器的跨临界 CO₂两相流喷射制冷系统性能实验研究[J]. *低温与超导*, 2013, 41(7): 53-57.
- KONG H L, GUO X M, LI T L, et al. Experimental investigation on the performance of the transcritical CO₂ two-phase ejector refrigeration cycle with IHX[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2013, 41(7): 53-57.
- [6] DANIEL S, JORGE P, RODRIGO L, et al. New positions for an internal heat exchanger in a CO₂ supercritical refrigeration plant: Experimental analysis and energetic evaluation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63: 129-139.
- [7] RODRIGO L, CARLOS S K, RAMÓN C, et al. Experimental evaluation of an internal heat exchanger in a CO₂ subcritical refrigeration cycle with gas-cooler [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 31-41.
- [8] 方健珉, 王静, 孙西峰, 等. 回热器对电动汽车跨临界 CO₂制冷系统影响的实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 155-160.
- FANG J M, WANG J, SUN X F, et al. Effect of internal heat exchanger on transcritical CO₂ refrigeration system of electric vehicle[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 155-160.
- [9] 江晨钟, 林晨, 岳宝, 等. 回热对喷射制冷系统性能影响的实验研究[C]// 2020年中国家用电器技术大会. 宁波: 中国家用电器协会, 2020: 1 916-1 920.
- JIANG C Z, LIN C, YUE B, et al. Experimental study on performance of ejector-expansion refrigeration system with internal heat exchanger[C]// 2020 China Household Appliance Technology Conference Proceedings. Ningbo: China Household Electrical Appliances Association, 2020: 1 916-1 920.
- [10] BAI T, YU J L, YAN G. Advanced exergy analyses of an ejector expansion transcritical CO₂ refrigeration system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 850-861.
- [11] CHEN J, HAVTUN H, PALM B. Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system [J]. *Applied Energy*, 2015, 144: 139-151.
- [12] BAI T, YAN G, YU J L. Thermodynamic analyses on an ejector enhanced CO₂ transcritical heat pump cycle with vapor-injection [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 58: 22-34.
- [13] SONG X, LU D X, LEI Q, et al. Energy and exergy analyses of a transcritical CO₂ air conditioning system for an electric bus[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: 116819.
- [14] MOROSUK T, TSATSARONIS G. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids[J]. *Energy*, 2009, 34: 2 248-2 258.
- [15] ZHENG L X, HU Y D, MI C N, et al. Advanced exergy analysis of a CO₂ two-phase ejector[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118247.
- (上接第 81 页)
- [15] 梁亚桢. 全豆豆浆及速溶全豆粉产品研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2020: 17-18.
- LIANG Y Z. Research and development of whole soybean milk and instant whole soymilk powder [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020: 17-18.
- [16] WANG Y, ZHAO J, ZHANG S C, et al. Structural and rheological properties of mung bean protein emulsion as a liquid egg substitute: The effect of pH shifting and calcium [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107485.
- [17] JOSHI M, ADHIKARI B, ALDRED P, et al. Interfacial and emulsifying properties of lentil protein isolate[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(3): 1 343-1 353.
- [18] YU C P, LI S H, SUN S, et al. Modification of emulsifying properties of mussel myofibrillar proteins by high-intensity ultrasonication treatment and the stability of O/W emulsion[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 641: 128511.
- [19] JIANG B, SHI Y B, LIN G M, et al. Nanoemulsion prepared by homogenizer: The CFD model research [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 241: 105-115.
- [20] LI S, YANG R Q, WANG C L, et al. CFD-PBM simulation on bubble size distribution in a gas-liquid-solid flow three-phase flow stirred tank[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(2): 1 934-1 942.
- [21] 王习魁. 高压微射流超细粉碎关键技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 34-35.
- WANG X K. Study on the key technology of ultra-fine grinding based on high-pressure microfluidics [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2005: 34-35.
- [22] KUMAR A, DHIMAN A, SUHAG R, et al. Comprehensive review on potential applications of microfluidization in food processing [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2022, 31(1): 17-36.
- [23] WANG X Y, WANG S S, WANG W J, et al. Comparison of the effects of dynamic high-pressure microfluidization and conventional homogenization on the quality of peach juice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(13): 5 994-6 000.
- [24] KÖHLER K, SCHUCHMANN H P. Homogenisation in the dairy process-conventional processes and novel Techniques[J]. *Procedia Food Science*, 2011, 1: 1 367-1 373.
- [15] STEVENSON M J, CHEN X D. Visualization of the flow patterns in a high-pressure homogenizing valve using a CFD package[J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33(1/2): 151-165.
- [26] GONÇALVES PINHO C R, FRANCI M A, ESTEVES D A P, et al. Avaliação do escoamento de leite desnatado durante homogeneização a alta pressão (HAP) por meio de fluidodinâmica computacional (CFD) [J]. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2011, 14(3): 232-240.
- [27] WANG L L, ZENG Q L, LU C H, et al. A numerical analysis and experimental investigation of three oil grooves sleeve bearing performance[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 71(2): 181-187.