

适用于高黏度非牛顿流体的骨素调配反应罐的研制

Design of mixing reaction tank of suitable for high viscosity non-Newtonian fluid ossein

韩东 贾伟 张春晖

HAN Dong JIA Wei ZHANG Chun-hui

(中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

摘要:针对常规调配反应罐中物料混合不均匀、溶解效率低、反应温度不易控制、香味损失等问题,设计开发一种适用于高黏度非牛顿流体的骨素调配反应装置,该装置由罐体、立式复合搅拌装置、底部乳化搅拌装置、反应挥发物收集回流装置以及投料装置组成。该装置非常适合于高黏度非牛顿流体物料的调配、混合、反应,能够实现多功能操作、大大节省能源,同时提高反应的可控程度、降低劳动强度和投资成本,对挥发性风味物质进行调制和回收,实现香气的固化和再利用。

关键词:高黏度;非牛顿流体;骨素;调配反应罐

Abstract: In order to solve the problems of the material of mixed unevenness, low dissolved efficiency, uncontrollable reaction temperature and aroma loss in the conventional mixing reaction tank, a kind of mixing reaction equipment was designed and developed for high viscosity non-Newtonian fluid to blend, mix and react, and able to achieve multifunctional operation with energy saving. Moreover, it helped to increase the degree of controllability of reactions and reduce labor intensity and the investment costs. Additionally, the modulating and recycling of the volatile flavor compounds was also achieved.

Keywords: high viscosity; non-Newtonian fluid; ossein; mixing reaction tank

非牛顿流体是指其所受剪应力与剪切应变速率不能始终成线性关系的流体^[1],普遍存在于化工、食品及生物医学等领域^[2],涉及许多工业过程(包括高分子发酵产物和农产品天然产物提取)的工艺、设备、效率和产品质量。黏度是流体的主要物理性质之一,也是很多高分子发酵产物和农产品天然活性物质提取、加工处理过程中的一个重要参数,反映了非牛顿流体的基本特征。骨素是指以畜禽骨、鱼骨为原料,采用分离提取技术,经脱脂、浓缩或不浓缩等处理,获取胶原蛋白、矿物质等成分,得到产品,即去脂的可食性骨抽提物,其主要应用于肉制品加工、方便面(调味包),以及咸味香精基料中。骨素^[3]是典型的高黏度非牛顿流体,在互相分散、混合及气体吸收等过程中,往往要采用搅拌操作才能得到更好的效果^[4]。搅拌操作作为一种重要的工艺过程而被广泛应用,而大多数的搅拌操作均系机械搅拌。然而对高黏度非牛顿型,一般的机械搅拌^[5]往往达不到理想的搅拌效果。

中国骨素生产厂家使用的美拉德反应罐^[6]一般只采用刮板搅拌形式,此种搅拌速度慢(24~36 r/min)。若在进行美拉德反应的过程中需要添加干粉类物料时,在这样的搅拌速度下,不能快速地将漂浮在液面上的物料溶解进入反应体系,会影响反应进度。另外,投入的固体物料若比重较大,不能被迅速搅动溶解而沉底,进而影响物料的均一性和口味。固体物料大部分从投料口进入,集中地投入区域,会造成与液相物料过度反应,而其余区域却反应不足。这些情况在实际生产当中大量存在,也成为生产厂家难以解决的实际问题。

中国厂家使用的美拉德反应罐常常需要配合外用设备来实现,例如利用外循环的胶体磨、溶粉机等。而这样操作,又带来物料在管道残留及部分辅料不能快速溶解的问题,达不到预期效果。同时,骨素(脱脂骨提取液)黏附性较大,极易粘附在调配罐内壁、桨叶及转动轴的表面上,导致搅拌釜

基金项目:国家农业科技创新工程

作者简介:韩东,男,中国农业科学院农产品加工研究所读博士研究生。

通信作者:张春晖(1971—),男,中国农业科学院农产品加工研究所研究员。E-mail: dr_zch@163.com

收稿日期:2016-09-06

的混合效果较差,对产品品质有直接影响^[7]。骨素浓缩处理后,呈香风味不足,特征香气不典型,急需进行风味调制。

针对上述问题,本研究设计了一种适用于高黏度非牛顿流体的骨素调配反应装置,以解决常规反应调配罐投料不均匀、溶解效率低、反应温度不易控制、香味损失等问题,从而使其在高黏度流体调配反应方面得到广泛应用,促进反应体系顺利高效地进行,降低了劳动和投资成本。

1 高黏度非牛顿流体骨素调配反应罐总体设计

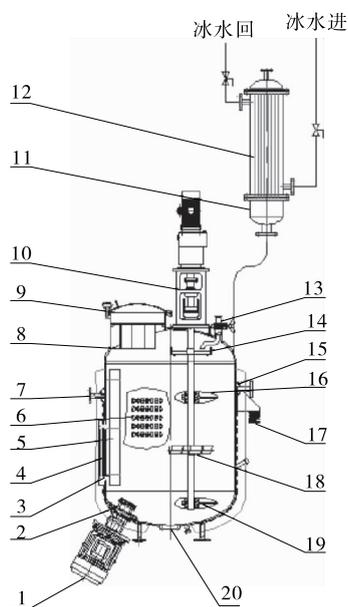
1.1 结构组成

高黏度非牛顿流体骨素调配反应罐主要包括反应罐体(内胆、蜂窝夹套、保温层、无滞留底阀)、复合搅拌装置(立式搅拌轴、联轴器、螺旋推进桨叶、涡轮式斜叶桨、涡流挡板)、乳化搅拌装置、挥发香气冷凝回收器以及投料装置。

图1为反应罐的结构示意图。

1.2 工作原理

该反应罐体内胆设置有投料口、搅拌电机、进料口、排气口、筒体观察视镜口、视灯及视镜等。内胆底部设置有无滞留底阀,防止物料积存,内胆均布有与罐体轴线平行的挡流板,其罐内壁有间隙无死角,方便清洗,投料口设有防掉落装置^[8],既能保护操作人员的安全又可防止大块的异物掉落罐内;同时,罐体还设置有中间层夹套、最外层保温层及保温层



1. 乳化搅拌器 2. 乳化头 3. 挡板连接板 4. 罐体视镜 5. 涡流挡板 6. 凹凸点夹套 7. 媒介进口 8. 防掉落网 9. 投料口 10. 双速电机减速器 11. 挥发物收集器 12. 冷凝管 13. 液体进料口 14. 料液分布盘 15. 媒介分布器 16. 上部螺旋推进桨叶 17. 称重传感器 18. 涡轮式斜叶搅拌 19. 下部螺旋推进桨叶 20. 无滞留底阀

图1 高黏度非牛顿流体骨素调配反应罐的结构示意图

Figure 1 Structural diagram of high viscosity non-Newtonian fluid ossein reaction tank

外包,蜂窝夹套与内胆多点焊接,间隙小于1 cm,夹套媒介进出口设置有分布器。

搅拌装置位于罐体偏离轴线位置,主要由搅拌轴、螺旋推进搅拌器、涡轮式斜叶搅拌桨、联轴器和双速电机减速器组成,螺旋推进式搅拌桨^[9]分别位于第一层和第三层,涡轮式斜叶搅拌桨位于第二层,搅拌轴底部通过搅拌轴支座与罐底封头焊接,搅拌轴通过机械密封与罐体内胆上封头进行密封,以促进料液迅速融合,提高其溶解性和均一性。

乳化搅拌装置安装在罐底封头,乳化搅拌安装法兰与焊接在罐底部法兰连接,乳化搅拌与罐体轴线夹角为30~35°,乳化搅拌轴通过机械密封与罐体内胆下封头进行密封,可将加入的辅料均匀分散^[10],并使料液充分混合。

反应挥发物收集回流装置通过管道与罐顶的排气口连接,反应挥发物收集回流装置的媒介进出口安装有冰水进出口,顶部设置有排空口。在加热作用下,罐内调配反应会产生挥发性的香味物质,顺着管道进入回流装置内部,并在冷凝管中冷却,重新回流到调配反应罐中,降低了风味物质的损失。

2 黏度非牛顿流体骨素调配反应罐主要部件的设计

2.1 罐体与蜂窝夹套设计

2.1.1 罐体基本参数条件

- (1) 工作压力:内筒为常压,夹套为0.3 MPa。
- (2) 工作温度:内筒为20~100 °C,夹套为20~133 °C。
- (3) 公称直径:内筒为1 200 mm,夹套为1 300 mm。
- (4) 工作介质:内筒为高黏度流体食品,夹套为蒸汽、饱和和水蒸气。
- (5) 操作容积:1 500 L。

2.1.2 内胆圆筒(外压筒体)的计算 可以通过逆推的方法内胆圆筒厚度进行计算校核:

$$\frac{L}{D_0} = \frac{1\ 000}{1\ 200} = 0.83. \quad (1)$$

假设反应罐筒体厚度 $\delta_n = 8$ mm,有效厚度 $\delta_e = \delta - C_1 - C_2 = 8 - 1 - 0.4 = 6.6$ mm。

由于

$$\frac{D_0}{\delta_e} = \frac{1\ 000}{6.6} = 181.8, \quad (2)$$

$$[\rho] = \frac{B}{D_0}, \quad (3)$$

式中:

L ——圆筒计算长度,mm;

D_0 ——圆筒外直径,mm;

A ——系数;

B ——系数;

δ_e ——筒体的有效厚度,mm;

C_1 ——钢材厚度负偏差,mm;

C_2 ——腐蚀余量,mm;

δ_n ——筒体的名义厚度, mm;

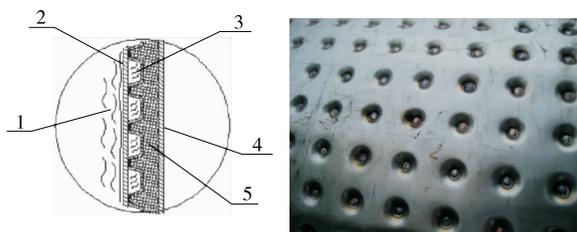
$[\rho]$ ——许用应力, MPa。

查询 GB 150—2011 可得 $A=9 \times 10^{-4}$, $B=110$ MPa。

许用应力计算 $[\rho] = \frac{110}{181.8} = 0.61 \geq 0.5$ 所以满足设计

要求, 取名义厚度 $\delta_n = 8$ mm。

2.1.3 蜂窝夹套设计 由图 2 可知, 夹套与筒体通过夹套上压制的圆形排列带直边孔焊接成的蜂窝状结构, 使筒体和夹套的强度和刚度得到加强, 解决大型罐承受内压和外压的壁厚问题。蜂窝夹套为整块板式, 与筒体焊接时, 避免筒体的纵向、环向焊缝, 解决了液体可能从筒体焊缝往罐内渗透的问题, 提高使用安全性。同时, 也降低了对筒体纵、环向焊缝探伤的要求, 减少探伤费用。



(a) 蜂窝夹套剖面图

(b) 蜂窝夹套实物图

1. 内部物料湍流层
2. 内部物料滞留层
3. 介质通道
4. 外包
5. 保温层

图 2 蜂窝夹套结构示意图

Figure 2 Structural diagram of dimple Jackets

2.2 搅拌系统设计

图 3 为搅拌桨叶及涡流挡板正视图, 在较高黏度、水分含量较小、流动性差的物料体系中, 为了避免夹生和成团不均匀现象发生, 进而要求较高的搅拌溶解效率, 因此针对桨叶角度和桨叶的造型进行了模拟设计, 并且进行了验证实验。

推进式搅拌可以产生大循环量的流动, 而且能够使固体的悬浮颗粒吸入溶解, 但是其湍流程度差。结果, 会造成溶解和传热不彻底, 损耗大量能量。为了阻止螺旋桨式搅拌器造成液体随罐的圆周运动, 增加设计涡流挡板(图 3), 会在涡流挡板后形成漩涡, 而这些漩涡随主体流遍反应釜, 提高混合和传热效果, 而它对径向和轴向的流动没有影响, 但搅拌功率却成倍增加, 保障工艺的理想实现。

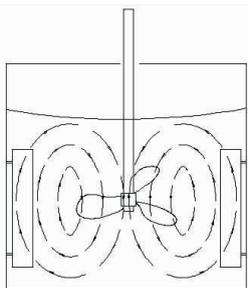


图 3 搅拌桨叶及涡流挡板正视图

Figure 3 Front view of mixing blade and eddy current damper

2.2.1 复合搅拌的设计 根据高黏度牛顿流体的特点设计了三层不同功能的特殊搅拌桨, 搅拌装置正视图见图 4。

第一层浆叶针对液体表面加入的粉、盐等物料的难溶性, 设计能将物料及时从四周迅速集中到中心, 并能及时将表层物料送到第二层浆叶, 进行湍流乳化的浆叶形式, 避免物料在表层停留时间过长造成的夹生、成团、乱流等弊端, 同时避免空气进入液体, 从起点为最终优质的产品打下基础。

第二层浆叶根据第一层的浆叶, 设置在混有大量粉料的未充分溶解的流体集中经过的层面, 考虑到迅速溶解和乳化的需求, 浆叶设计成特殊的圆盘式, 6 个不同角度的浆叶板, 能将粉、盐、油等添加剂在该层面做强烈的湍流、剪切、混合、乳化, 迅速形成分散均匀、细腻、稳定的状态。为了产品的均一性, 同时为了确保高效的热传递, 节约能源, 并消除流动中的死角, 避免结焦, 将第三层的浆叶设计成能具有强大推力的形式, 配合经过精心验证的导流板, 把液体快速的分布开, 从椭圆底部能迅速分散, 均匀的沿着槽壁向上流动, 进入第一层浆叶的流动轨迹中去, 参加下个流程的溶解和乳化。

复合搅拌理论参数: $d/B=1$, $Z \geq 3$, 外缘圆周速率 $5 \sim 25$ m/s, 转速 $60 \sim 1\,000$ r/min(适应较低黏度)。其中, d 为搅拌器直径, mm; B 为搅拌器宽度, mm; Z 为搅拌桨叶数。

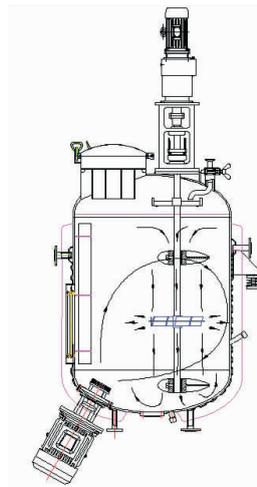


图 4 搅拌装置正视图

Figure 4 Front view of agitation equipment

2.2.2 乳化搅拌系统设计 当物料乳化时被吸入定转子腔体内, 在定转子^[11]较小的齿隙区域, 转子区域的周向速度较高, 而定子区域的周向速度非常小, 这样在定转子齿隙区域内形成较大的速度梯度, 从而在该区域产生较大的剪切应力(图 5)。物料经过定转子间的高速剪切后, 在离心力的作用下通过定转子的齿槽, 在径向上产生了一定的速度梯度, 使物料在径向上受到强烈的剪切和研磨作用。随着转子的转速升高, 定子齿槽内的流速也随之增加, 在此区域的回流现象也得到增强。定转子结构可以加强剪切效应, 同时对物料产生多循环的剪切作用, 使物料达到均质乳化的目的。定转子间存在较大的剪切率, 特别是定转子齿隙间, 随着转速的提高, 剪切率也逐步地随之增加。

乳化搅拌机超高的转速和剪切率^[12]能获得超细微的悬浮液,具有最好几何学形状的精密二级定转子分散头设计(图6)。定转子的间距范围0.25~1.00 mm,转子最高转速高达10 500 r/min,线速度高达40 m/s,剪切速率达到100 000 s⁻¹,高的转子转速,低的定转子间距,使定转子间的剪切作用加强,从而使水珠以较小的微粒分散到油中,形成比较稳定的乳化液。

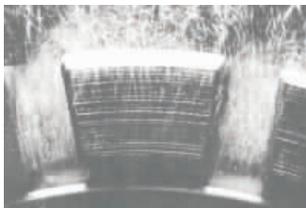


图5 强紊流示意图

Figure 5 Diagram of the strong turbulence flow

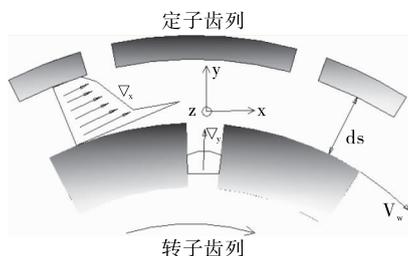


图6 高剪切分散示意图

Figure 6 Diagram of high shear dispersion

乳化搅拌理论参数: $d:L:B=20:5:4$, $Z \geq 6$, 外缘圆周速率3~8 m/s, 转速200~3 000 r/min(适应各种黏度)。其中, d 为搅拌机直径,mm; B 为搅拌机宽度,mm; Z 为搅拌桨叶数; L 为单叶片长度,mm。

2.3 冷凝系统设计

冷凝系统主要是为了防止在调配反应过程中的水蒸气带有挥发性香味物质向外散逸,通过冷凝的方法将其回流。其中,列管式冷凝器设计尤为重要,它能有效提高反应物的出品品质和风味,并大大降低传统操作方式的能源消耗。若将50~80 kg/h的水蒸气冷凝,温度由100℃冷却至62℃凝结,冷水的进出温度分别为30℃和50℃,设计合适的列管式冷凝器(忽略管壁热阻和热损失),列管式冷凝器传热面积计算:

(1) 热负荷的计算:

$$Q_1 = \gamma \times Q_m, \quad (4)$$

$$Q_2 = C \times m \times \Delta t_2, \quad (5)$$

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (6)$$

式中:

Q_1 ——所需要冷凝蒸气的汽化潜热,kW;

Q_2 ——冷凝后液体降温所释放出的热量,kW;

Q ——二者的合计总热量,kW;

γ ——水蒸气的汽化潜热值,kJ/kg;

Q_m ——冷凝液的流量,kg/s;

C ——冷凝液的比热容,kW/(kg·℃)

m ——冷凝液的质量,kg;

Δt_2 ——冷凝液凝结温度差,℃。

代入数据求得: Q_1, Q_2, Q 分别为8.642, 0.608, 9.250 kW。

(2) 水蒸气和冷凝液的平均温度和平均温差。暂时按单壳程进行计算。逆流时平均温差为:

$$\Delta t_m' = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{(100 - 62) - (50 - 30)}{\ln \frac{100 - 62}{50 - 30}} = \frac{18}{\ln 1.9} =$$

$$28.04 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

而

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{50 - 30}{100 - 30} = 0.29, \quad (8)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{100 - 62}{50 - 30} = 1.9, \quad (9)$$

查换热器设计手册^[13],得 $\varphi_{\Delta t} = 0.92$ 。

所以

$$\Delta t_m = \varphi_{\Delta t} \Delta t_m' = 0.92 \times 28.04 = 25.8 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

式中:

T_1 ——冷凝液的温度,℃;

T_2 ——冷凝液凝结温度,℃;

t_1 ——冷水进口温度,℃;

P ——冷流体的温升和两流体的最初温度差的比值;

R ——热流体的温冷和冷流体温升的比值;

$\Delta t_m'$ ——逆流时平均温度差,℃;

Δt_m ——校正后平均温度差,℃;

t_2 ——冷水出口温度,℃;

$\varphi_{\Delta t}$ ——温度差校正系数。

(3) 初选冷凝器规格。根据流体的情况,假设 $k = 120 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,故

$$S = \frac{Q}{k \times \Delta t_m} = \frac{9\ 250}{120 \times 25.8} = 2.99 \text{ m}^2, \quad (11)$$

式中:

S ——面积,m²。

3 高黏度非牛顿流体骨素调配反应罐工作流程设计

首先向罐体内注入所需加工的液相物料,当液位超过上部螺旋推进桨叶,开启双速电机减速器,带动搅拌桨叶转动使物料在罐体内部随搅拌旋转,当流动的物料碰到涡流挡板时,又形成小的混流紊流,可以充分将物料混匀。而涡流挡板通过挡板连接板与罐体内壁焊接,而且之间面积很小方便清洗,不留死角。搅拌开启稳定后,再开动乳化搅拌机,乳化头快速搅拌可以将罐体底部的物料形成旋流循环,与立式搅拌形成的涡流循环交叉碰撞。乳化搅拌机安装于罐体轴线夹角为30°的椭圆封底,使用变频调速电机,转速范围0~3 600 r/min,可以使物料形成比较稳定的乳化液。

此时开启媒介进口,热媒介通过媒介分布器进入到凹凸

点夹套中,由于其容积小,凹凸点多,媒介会具有很高的雷诺准数,湍流程度很高,流速很快,迅速的可以将内部的物料加热或降温。

打开投料口,将所需加入的固体物料匀速分散投入,防掉落网能够防止包装袋掉入罐内。此时,上部螺旋推进桨叶旋转直径为筒体内径 $1/3$,桨叶为圆弧叶片形状,距离最高液面为 15 cm ;当搅拌开动时螺旋推进桨叶转动,使液面形成漩涡,此时投入的固体物料随漩涡迅速进入到液体内部。轴中部搅拌为开启涡轮式斜叶搅拌,旋转直径为筒体内径 $1/3$,直桨叶与轴夹角为 45° ,距离为液体高度的中心部位;搅拌开动时高速旋转直叶片边有很高的线速度,形成的剪切力及小空穴可以分散进入到液体中部的固体物料,加速溶解,由于与轴有夹角具备一定推进力,使分散后物料也随轴流方向传递至第三层搅拌。下部搅拌为螺旋推进形式桨叶,旋转直径为筒体内径 $1/3$,桨叶为圆弧叶片形状,距罐底一般为 $10\sim 15\text{ cm}$;当搅拌开动时,桨叶上下形成较大的压差,可以快速的将二层传递下来固液混合物加速撞击至罐底部,进而再次进行分散搅拌,另外还可以避免投入的较重物料沉积。由于一般罐底为椭圆弧状,罐底部流体为圆弧形,以罐体内轴为中心与底部搅拌的漩涡形成大的内部环流,加入到罐内的物料处于强制运动和扩散中,促进反应和溶解。

当需要加入流体类物料时,打开液体进料口阀门,液体进入到料液分布盘,由于料液分布盘与搅拌轴连接,在离心力作用下,轴的转动会带动料液分布盘内液体均匀分布在罐内液体表面。

以上所加入的固体和液体物料重量可以通过安装在罐体挂耳下的称重传感器显示出来,而罐体上安装的罐体视镜能够观察到大概液体的容积。

在加热和反应的作用下,罐内液体产生挥发性风味物质会顺着管道进入到挥发物收集器中,当挥发性物质遇到充满冰水的冷凝管的表面后,再流回到罐体内,防止香味严重损失。

当调配和反应过程结束后,关停相关的媒介阀门和搅拌机,待液面稳定后,打开无滞留底阀,将成品排出,这样完成一次提取过程。高黏度非牛顿流体调配反应罐工作流程见图 7。

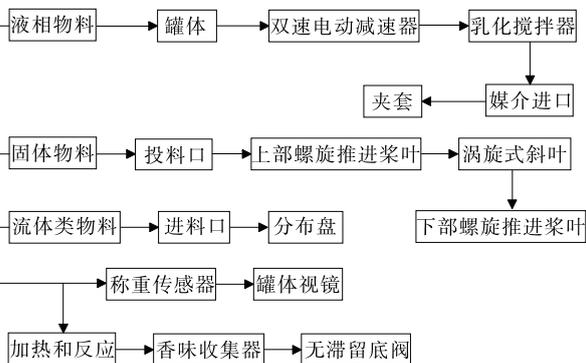


图 7 高黏度非牛顿流体调配反应罐工作流程图

Figure 7 Work flow diagram of high viscosity non-Newtonian fluid mixing reaction tank flow

4 结论

本研究设计的高黏度非牛顿流体骨素调配反应罐适用于黏度高、水分含量较少、流动性差的物料,可以使物料混合均匀,缩短物料的混合时间,增加流体湍流速度,提高物料的溶解性,减少挥发性风味物质的大量散失,同时提高了生产效率,降低了生产成本,可实现标准化、工业化生产。

参考文献

- [1] 彭岩, 吕冰海, 纪宏波, 等. 非牛顿流体材料在工业领域的应用与展望[J]. 轻工机械, 2014, 32(1): 109-114.
- [2] 施庆珊, 王计伟, 欧阳友生, 等. 非牛顿流体粘度测定方法研究进展[J]. 发酵科技通讯, 2011, 40(2): 42-45.
- [3] 赵电波, 陈茜, 白艳红, 等. 骨素的开发利用现状与发展趋势[J]. 肉类工业, 2010(1): 9-12.
- [4] 张少华. 高粘度非牛顿型流体的组合式搅拌机设计[J]. 化工设备设计, 1996, 33(5): 49-51.
- [5] 冯桂江. 机械搅拌反应釜概述[J]. 橡塑技术与装备, 2015(22): 56-57.
- [6] 张春晖. 骨源食品加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 149-151.
- [7] 吴岩. 用于高粘度流体的搅拌釜的模拟及优化[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 1-2.
- [8] 贾伟, 董宪兵, 张春晖, 等. 骨素美拉德反应罐的研制[J]. 轻工机械, 2013(6): 822-824.
- [9] 朱珠, 韩建民, 沈恒冠, 等. 关于一种带双搅拌两层挡板的反应釜的设计[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(11): 68-68.
- [10] 孙红梅, 贾伟, 张春晖, 等. 骨加工多功能反应罐[J]. 轻工机械, 2013, 31(5): 74-76.
- [11] 崔政伟. 定一转子型乳化机的关键结构分析及合理设计[J]. 无锡轻工大学学报: 食品与生物技术, 1998, 17(2): 86-89.
- [12] 陈飞, 肖才榕. 乳化器中搅拌结构及参数对乳化作用的影响[J]. 爆破器材, 2002, 31(4): 33-37.
- [13] 钱颂文. 换热器设计手册[J]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 60.