

# 静态螺旋切割器内气液两相流动与压降特性 数值研究

Computational fluid dynamic simulation flow field and pressure drop characteristics of the gas-liquid two phase flow in a static spiral cutter

徐臻伟<sup>1,2</sup> 崔政伟<sup>1,2</sup> 袁方洋<sup>1,2</sup> 吴 璨<sup>1,2</sup>

XU Zhen-wei<sup>1,2</sup> CUI Zheng-wei<sup>1,2</sup> YUAN Fang-yang<sup>1,2</sup> WU Can<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122)  
(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**采用 ANSYS Fluent 对具有特殊螺旋结构的静态螺旋切割器内部氧气-水两相流动进行数值模拟, 分析不同雷诺数下静态螺旋切割器内部流场的流动与压降规律。结果表明, 随着雷诺数的增加, 气液两相通过螺旋切割器的压降呈明显上升趋势; 两相流在螺旋切割器中的压力降比水平圆管高, 当雷诺数  $Re$  从 800 增大至 26 000 时, 对应的静态螺旋切割器中压降与水平圆直管内压降的比值  $Z$  从 130 增大到 260。

**关键词:**静态螺旋切割器; 气液两相流动; 压降特性; 数值模拟

**Abstract:** The internal oxygen-water two-phase flow in a static spiral cutter with special spiral structure was simulated employing ANSYS Fluent. The flow field and pressure drop characteristics inside the static spiral cutter was analyzed under different Reynolds numbers. The pressure dropping of gas-liquid two phase flow in the helical of cutter mixer showed an increase trend obviously with the increase of Reynolds number. The pressure dropping in the helical was larger than that in the horizontal circular straight tube. When Reynolds number changed from 800 to 26 000, the ratio of pressure of the spiral cutter to horizontal circular straight tube increased from 150 to 260.

**Keywords:** static spiral cutter; gas-liquid two-phase flow; pressure dropping; numerical simulation

静态混合器在液体食品工业上具有广泛的应用<sup>[1]</sup>, 如果汁、啤酒、葡萄酒及富氧水的制备等, 其主要是运用了静态混合器对气相和液相具有良好混合功能的特性。静态螺旋切割器是一种基于静态混合器发展演变的在特定使用条件下具有更优性能的一种新型气液混合装置, 与传统静态混合器相比, 静态螺旋切割器具有更好的混合、反应、分散、传质和传热功能<sup>[2-4]</sup>, 并且在特定使用情况下性能更加优越。静态螺旋切割器作为一种新型的微纳米气泡发生装置<sup>[5]</sup> 也具备着良好性能, 在现有的微纳米气泡发生技术中应用较广的是溶气释气法和剪切空气法<sup>[6-7]</sup>。静态螺旋切割器可视为一种基于剪切气泡的气泡发生装置, 其内部芯体是由若干薄片进行模块化堆积组装而成, 具有多变性与易拆重组性, 可以根据生产的实际需要改变芯体的形状, 这种设计灵活性强, 更能优化其性能。

在评价静态混合器时, 压降是决定其传质传热效果的主要参数之一, 通过观测压降的大小可以判断出能耗的高低。目前在对静态混合器中气液两相流压降的计算大多采用以试验为基础的经验式或半经验式<sup>[8]</sup>。Muddle 等<sup>[9]</sup> 在层流状态下对旋流静态混合器的流动情况进行了研究, 通过数值模拟得到了压力降因子公式; Etchells 等<sup>[10]</sup> 详细介绍了 Kenics 等系列静态混合器设备的结构和工作原理, 并通过试验总结了压力降的计算公式; 其他学者<sup>[11-13]</sup> 也对静态混合器中流场的分析做了相关模拟研究。

本研究在前人对不同种类的静态混合器研究方法的基础上, 使用流体力学计算软件 ANSYS Fluent 对新型的静态螺旋切割器内部氧气-水两相流动进行了数值计算, 分析不同雷诺数下静态螺旋切割器内部流场的流动与压降规律, 旨在探究其流动和压降特性, 并为工程应用中静态螺旋切割器的选用提供参考。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:216061097); 江苏省研究生科研创新计划(编号:KYCX17\_1474)

**作者简介:**徐臻伟, 男, 江南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**崔政伟(1963—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: cuizhengwei@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:**2017-12-15

## 1 静态螺旋切割器的结构和工作原理

静态螺旋切割器内部芯腔由厚度为 0.8 mm 切割叶片按照螺旋线方程通过轴一片片串起叠加形成,芯体直径 25 mm,总长 280 mm,形成空间螺旋面,螺旋表面呈阶梯状。由于切割叶片形状类似十字,因此又将整个腔体分成 4 个小的切割空间。切割腔采用变螺距设计,即由流体入口的大螺距过渡到流体出口的小螺距,芯腔是由切割片螺旋叠加形成。图 1 为静态螺旋切割器整体装置的结构示意图,主要由外管道和腔芯两部分组成。

其中,螺旋线方程:

$$\begin{cases} x = R \times \cos\theta \\ y = R \times \sin\theta \\ z = l \times \sqrt{\frac{\theta}{2\pi}} \end{cases} \quad (1)$$

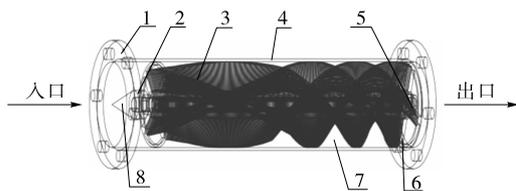
式中:

$\theta$ ——螺旋叶片组件上任一点的扭转角度(弧度),  $\theta \in [0, 2\pi]$ ;

$R$ ——芯体半径, mm;

$l$ ——芯体总长, mm。

氧气和水在管道内在一定压力作用下从导流锥一侧流入,由于流道是由离散化切割叶片叠加旋转形成,表面呈阶梯状,所以气液两相流在一定流速和压力下经过流道时,会受到强力剪切,同时在切割腔里也会形成旋流场,气液两相流在切割腔内螺旋流动,在螺旋叶片组件的作用下,氧气大气泡破碎成小气泡,从而扩大了传递界面,有效提高了氧的传质效率。



1. 连接法兰 2. 固定环 3. 空间螺旋切割面 4. 管道 5. 锁紧螺母 6. 轴 7. 切割腔 8. 导流锥

图 1 静态螺旋切割器结构示意图

Figure 1 Sketch map of the spiral cutting device

## 2 理论模型及数值方法

### 2.1 多相流模型选择

对两相流中各相的数值模拟通常有 2 种处理方法<sup>[14]</sup>: 欧拉方法和拉格朗日方法。在 Fluent 中,共有 3 种不同的欧拉多相流模型可供选择。本试验中气液混合的次相体积分数为 6%,氧气经过切割破碎后变成小量级气泡分散在连续的液相中,在静态螺旋切割器中充满着单相或两相混合物,由于含气率较低,所以可以忽略两相之间的速度差和温度差以及气体的可压缩性对混合流体总体积的影响,即气液两相在流动空间内具有连续的动量分布,因此选用流体体积 (VOF) 模型<sup>[15]</sup>。

### 2.2 控制方程

螺旋切割器气液两相流体介质为氧气和水,在模拟中选

用 VOF 模型,因为内部流道为变螺距的螺旋流道,气液两相流在流道内发生旋转流动,从入口端到出口端流线弯曲变化程度较大,标准  $k-\epsilon$  模型对于该类流场流动问题的分析并不合适<sup>[16]</sup>,因此对湍流的数值计算模拟选用 Realizable  $k-\epsilon$  模型。

### 2.3 网格划分与无关性验证

由于切割叶片将芯腔划分为 4 个旋转对称的独立流道,为了简化模型,只取其中一个流道进行仿真。在进行模拟之前,使用 Workbench 中的 Mesh 模块对螺旋切割器结构进行网格划分。整体采用四面体非结构化网格结构,网格边长为 0.4 mm,网格节点数量为 240 万个,同时划分网格尺寸分别为 0.20, 0.24, 0.30, 0.34 mm,并分别计算这 5 种网格在其他条件一致的情况下压力的变化(表 1)。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Verification of grid independence

网格边长/mm	网格数量	压力损失 $\Delta P$ /Pa	$\Delta P$ 相对变化率/%
0.20	$1.845 \times 10^7$	95.0	—
0.24	$1.074 \times 10^7$	92.1	3.1
0.30	$5.520 \times 10^6$	89.0	3.4
0.34	$3.850 \times 10^6$	85.2	4.2
0.40	$2.400 \times 10^6$	82.0	3.7

由表 1 可看出,随着网格尺寸的增大,进出口压力损失的相对变化率均小于 5%,认为已经达到网格无关性要求。

### 2.4 物性参数

在不考虑温度压力变化的情况下,气液两相流体的物理参数设定为:操作温度 20 °C,操作压力为标准大气压,氧气密度  $\rho_0 = 1.299 \text{ kg/m}^3$ ,氧气黏度  $\mu_0 = 1.919 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;水密度  $\rho_1 = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,水黏度  $\mu_1 = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

### 2.5 初始条件与边界条件

进口边界条件为速度入口条件,水的流量为 0.7 m<sup>3</sup>/h,氧气的流量为 0.8 L/min,折算速度为 0.72 m/s,出口边界条件采用自由出流边界条件。壁面采用无滑移边界条件,采用标准壁面函数法处理边界湍流。

### 2.6 离散格式、算法及控制

本模拟采用 Fluent 软件,采用 SIMPLE 算法耦合压力场和速度场。求解器中压力项采用 PRESTO! 算法,主要参数动量、体积分数和湍动能均采用二阶迎风离散格式,其他为默认值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 螺旋切割器内的速度分布

图 2 为在水流量 0.7 m<sup>3</sup>/h,氧气流量 0.8 L/min 条件下气液两相的速度迹线图,可看出气液两相在流道内螺旋流动的轨迹,图 3 为切割器经向等值切面的速度云图。图 4 为距离进口端 240 mm 处的截面图,在上面取线 1 和线 2,分别得到在这两条线上的速度数值见图 5、6。

在进入静态螺旋切割器时,氧气速度高于水的速度,两

相进入管道后,在速度差的影响下,随着氧气和水的混合,气相速度降低,液相速度增加,由于黏性阻力的作用,流体在管道中靠近管道壁面的速度会低于管道内部的速度。随着静态螺旋切割器从入口到出口的螺距越来越小,在管道中产生的离心力将会越来越大。在离心力和壁面对流体阻流的共同作用下,两相流轴向的速度在径向截面上的分布会变得不均匀,由图 5 可看出,在内侧壁面附近的速度下降,而靠近外侧壁面的速度增加,其轴向速度最大值逐渐向流道的外侧壁面靠近。

由图 3 可看出,速度在沿着切割器旋转方向上随着螺距的减小而变得越来越大,由图 6 可得出,速度在内侧螺旋面附近越来越大,其原因是伴随着螺距变小,流体在流道中受到外侧螺旋面的阻力越来越大,将流体向内侧螺旋面挤压,从而使得速度增加。

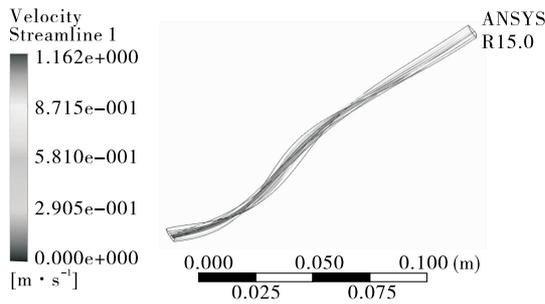


图 2 螺旋切割器内单流道的速度迹线图

Figure 2 Path lines of single flow channel's velocity

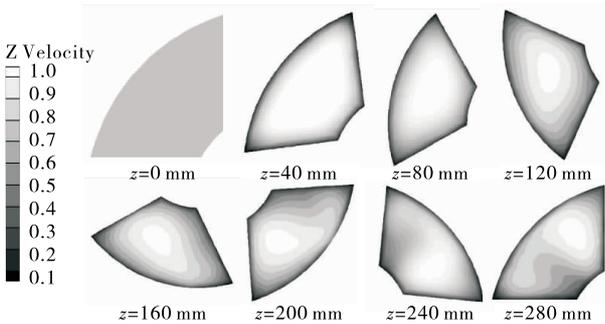


图 3 螺旋切割器内单流道径向截面速度沿轴线变化云图

Figure 3 The contours of single flow channel's velocity along the axis of spiral cutter

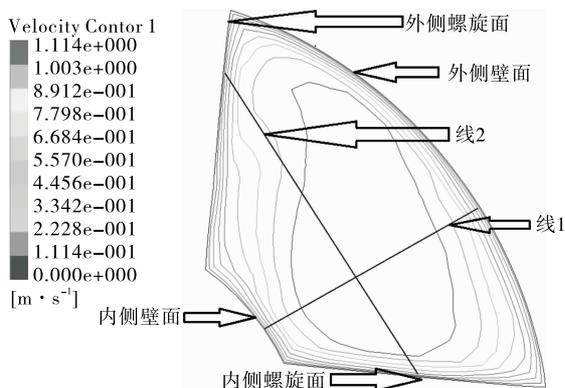


图 4  $z = 240$  mm 处的截面图

Figure 4 The sectional view of  $z = 240$  mm

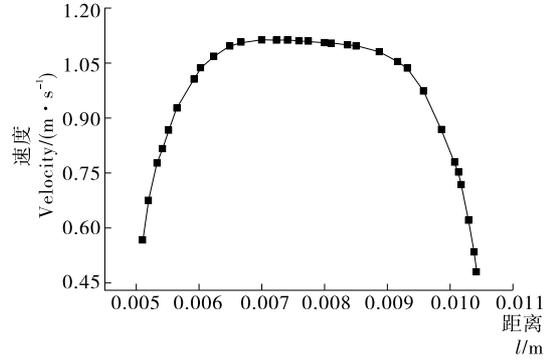


图 5 线 1 上的速度数值图

Figure 5 The velocity magnitude of line 1

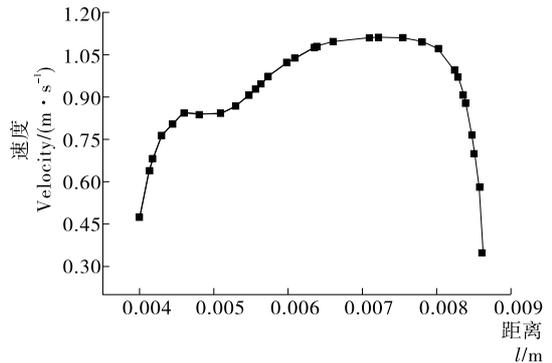


图 6 线 2 上的速度数值图

Figure 6 The velocity magnitude of line 2

### 3.2 螺旋切割器内的压降特性

雷诺数是流体力学中的一个无量纲数,其公式为:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}, \quad (2)$$

式中:

$Re$ ——雷诺数;

$\rho$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$u$ ——流体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$L$ ——特征长度,  $\text{m}$ ;

$\mu$ ——动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

本试验所算雷诺数中黏度、密度为水的参数。

对于常见管道流动,压力降有 2 种表示方法,一种表示为达西公式<sup>[17]</sup>:

$$\Delta P_{sm} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_m u_m^2}{2}, \quad (3)$$

式中:

$\Delta P_{sm}$ ——混合管的压降,  $\text{Pa}$ ;

$\lambda$ ——摩擦因子;

$l$ ——特征长度,  $\text{m}$ ;

$d$ ——管道直径,  $\text{m}$ ;

$\rho_m$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$u_m$ ——流动速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

另一种表示为 Z 因子表达式:

$$Z = \Delta P_{sm} / \Delta P_0, \quad (4)$$

式中:

Z——流体经过混合器所产生的压降与水平圆直管压降的比值；

$\Delta P_{sm}$ ——混合器压降, Pa;

$\Delta P_0$ ——水平圆直管压降, Pa。

图7所示以螺旋切割器为研究对象,得到切割器轴截面平均压力沿轴线的变化结果,截面压力云图见图8。

在保持氧气含量不变的情况下,通过改变入口速度来改变雷诺数,等距离检测7个截面上的平均压力,不同雷诺数下切割器内各截面压降沿轴线方向的变化见图9。

为研究螺旋切割器内气液两相流压力的分布情况,在  $Re=5\ 800$  时考察了在  $z=0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280$  mm 经向等值切面的压力,见图7。从图7可以看出,装置内压力从入口到出口逐渐减小,根据伯努利方程可知,此时流体的静压转化为动压,表现为速度增加,静压下降。在螺旋管道中,螺旋叶片组件对气液两相流体会产生强制扰流作用,使气液两相在管道流动过程中旋转流动,湍流程度加强,从而致使装置内部出现明显的压力降。由图8可看出,当气液两相流发生旋转流动时,其径向截面上也存在一定的压力梯度,且越接近出口的截面压力梯度越大。

在研究不同  $Re$  下压降变化时,考察了  $z=0, 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280$  mm 经向等值切面的压力。由图9可看出,随着  $Re$  的增大,螺旋切割器内的总压降增加,在低  $Re$  的管道中,压降变化较为舒缓,在高  $Re$  的管道中,靠近出入口的压降变化较明显。

### 3.3 气液两相流在螺旋切割器与水平圆直管中的压降对比

为了进一步研究静态螺旋切割器中压降的变化,分别计算了不同雷诺数下的  $Z$  因子。图10显示了当气体体积分数约为6%时, $Z$ 因子在不同雷诺数下的结果。通过比较,可以看出,气液两相流通过静态螺旋切割器的压降比水平圆管要大得多。 $Z$ 因子随雷诺数的增大而增大。在含气率范围内,当  $Re=800\sim 6\ 600$  时, $Z$ 因子的增大幅度较低,约为150;当  $Re=6\ 600\sim 13\ 000$  时, $Z$ 因子增大幅度较大,达到220左右;当  $Re=13\ 000\sim 26\ 000$  时, $Z$ 因子增大幅度减缓,此时螺旋切割器内压降是水平圆直管的260倍左右。

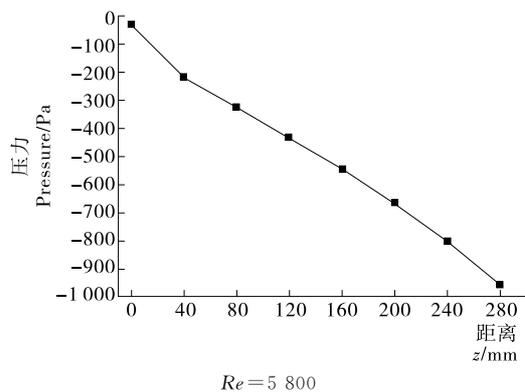


图7 螺旋切割器内截面平均压力沿轴线变化图

Figure 7 Average pressure along the axis of spiral cutter

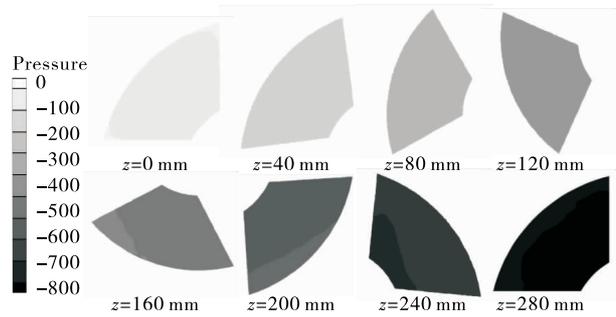


图8 螺旋切割器内单流道截面压力沿轴线变化云图

Figure 8 The contours of single flow channels pressure along the axis of spiral cutter

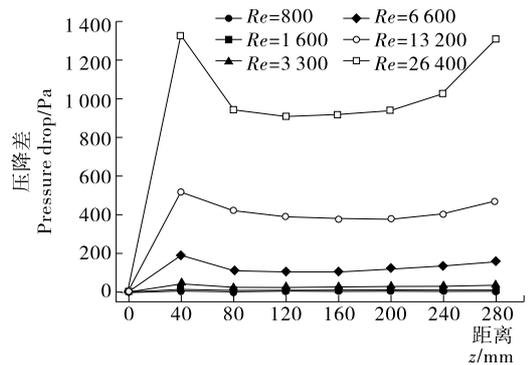


图9 不同  $Re$  下螺旋切割器内截面的压降沿轴线变化图

Figure 9 Pressure distribution along the axis of spiral cutter under different  $Re$

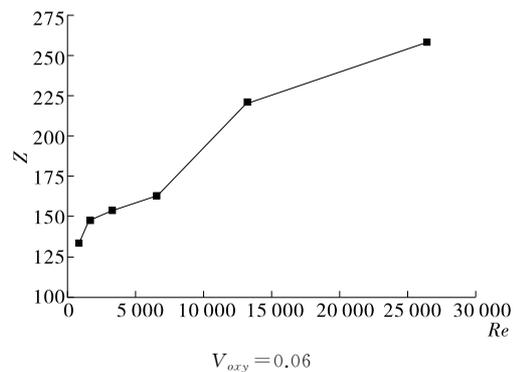


图10  $Z$ 因子随雷诺数的变化

Figure 10  $Z$  factor- $Re$  curve

## 4 结论

本研究采用 ANSYS Fluent 对一种具有特殊螺旋结构的静态螺旋切割器内气液两相流动进行仿真计算,分析该设备的内部流场的流动与压降规律,为评价该设备的性能提供依据。螺旋切割器内轴线方向速度分布显示,该设备对气液两相流在管道中的流动混合具有促进作用,且这样的促进作用是由螺距的变化所决定的,由管道入口的大螺距过渡到出口的小螺距时促进效果逐渐加强。当雷诺数  $>13\ 200$  时,两相流在管道中压降显著增大,说明此时管道对两相流的流动作用开始加强。通过计算两相流动的  $Z$  因子,发现  $Z$  因子随  $Re$  的增加而增大;在  $Re$  处于  $15\ 000$  左右时, $Z$  因子的增

(下转第 165 页)

表4 化合物Ⅲ的核磁数据

Table 4 <sup>13</sup>C-NMR date of compound Ⅲ

碳位	δ	碳位	δ
C-1	151.08	C-13	134.13
C-2	139.49	C-14	140.52
C-3	151.31	C-15	120.96
C-4	110.70	C-16	122.65
C-5	137.21	C-17	12.40
C-6	34.75	C-18	21.07
C-7	39.50	(OCH <sub>3</sub> )C-1	59.95
C-8	32.93	(OCH <sub>3</sub> )C-2	60.28
C-9	38.29	(OCH <sub>3</sub> )C-3	55.62
C-10	133.48	(OCH <sub>3</sub> )C-14	58.81
C-11	102.64	OCH <sub>2</sub> O	100.66
C-12	148.23		

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 2015年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 66-67.

[2] 孙昌波, 王森, 丁向阳, 等. 五味子在食品工业中的应用及其开发前景[J]. 食品与机械, 2003(6): 9-10.

[3] 胥春霞, 刘嫚, 陈东林, 等. 北五味子化学成分的研究[J]. 中成药, 2017, 39(3): 547-550.

[4] 高春花, 钟海雁, 孙昌波. 五味子木脂素提取分离纯化和含量测定的研究进展[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 151-155.

[5] 孟宪军, 滕娜, 商红军, 等. 五味子乙素-阿霉素脂质体的抗肿瘤作用研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(2): 29-31.

[6] 孟宪军, 李元魁, 李斌, 等. 超声波辅助提取北五味子藤茎总三萜的工艺研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 105-108.

[7] 张守勤, 刘长姣, 王长征, 等. 五味子有效成分提取分离方法的研究进展[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(10): 2 581-2 583.

[8] 李洪洋, 文连奎. 大孔树脂分离纯化五味子醇甲的研究[J]. 食品与机械, 2011, 27(3): 56-58.

[9] 赵洪庆, 韩远山, 柳卓, 等. 焦虑性抑郁模型大鼠脑区单胺递质含量与神经因子表达的变化[J]. 中国实验动物学报, 2017, 25(4): 373-379.

[10] WU Dong, XIE He, LU Hai-feng, et al. Sensitive determination of norepinephrine, epinephrine, dopamine and 5-hydroxytryptamine by coupling HPLC with [Ag(HIO<sub>6</sub>)<sub>2</sub>]<sub>5</sub>: luminol chemiluminescence detection[J]. Biomedical Chromatography Bmc, 2016, 30(9): 1 458-1 466.

[11] 程振玉, 杨英杰. 北五味子化学成分系统研究[J]. 吉林化工学院学报, 2013, 30(5): 36-39.

3 结论

本试验研究结果表明,五味子中除了木质素类、萜类等较为复杂的有机物具有较好的活性外,氨基酸和有机酸等较为简单的化合物同样具有较好的活性,这为五味子功能性成分的开发进一步提供了依据,开拓了五味子功能性成分开发的视野。试验还发现,α-氨基-β-羟基丁酸和β-乙氧基氨基丙酸具有助眠效果,但具体是哪一种氨基酸单独作用或者是哪几种氨基酸的协同作用还需要通过细胞试验与动物试验进一步验证。

(上接第92页)

幅减缓,此时螺旋切割器内压降是水平圆直管的225倍左右。本研究探究了螺旋切割器内气液两相流动特性,着重分析了雷诺数对压降的影响规律,但是未得出螺旋切割器内压力降的预测公式,这会在进一步的工作中体现。

参考文献

[1] 孟建军. 静态混合器在啤酒及其他液体食品工业中的应用[J]. 中外酒业·啤酒科技, 2012(3): 43-47.

[2] 刘涛. SK型静态混合器与喷射混合器的CFD模拟研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2009: 3-4.

[3] 王修钢, 郭瓦力, 吴剑华. 静态混合器中液液分散的实验及CFD模拟[J]. 化工学报, 2012(63): 767-768.

[4] 孟辉波, 禹言芳, 王丰, 等. 水平与竖直布置方式下静态混合器内瞬态压力波动混沌特征[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2013(40): 93-93.

[5] 邓超, 杨丽, 陈海军, 等. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究进展[J]. 石油化工, 2014(43): 1 206-1 207.

[6] 刘季霖. 微纳米气泡发生装置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 4-6.

[7] 李恒震. 微纳米气泡特性及其在地下水修复中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2014: 10-13.

[8] 居迎军, 刘晓光, 高永亮, 等. 多相管流摩阻计算方法综述[J]. 中国石油和化工, 2008(10): 55-58.

[9] MUDDE R F, PIJPEN C, BEUGELS R. Simulation of the laminar flow in a primix static mixer[C]//ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference. New York: [s.n.], 2002, 448(2): 67-73.

[10] ETCHELLS A W, MEYER C F. Handbook of industrial mixing: Science and practice[M]. Hoboken: John Wiley Sons Inc, 2004: 426-431.

[11] 翟俊霞, 陈嘉南, 涂善东. 含静态混合元件管内流体速度测量与实验系统[J]. 石油机械, 2003, 31(12): 1-3.

[12] REGNER M, ÖSTERGREN K, TRÄGÅRDH C. Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers: A numerical study[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(18): 6 133-6 141.

[13] REGNER M, ÖSTERGREN K, TRÄGÅRDH C. Influence of viscosity ratio on the mixing process in a static mixer: Numerical study[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(9): 3 030-3 036.

[14] 刘德新. 精馏塔板气液两相流体力学和传质 CFD 模拟与新塔板的开发[D]. 天津: 天津大学, 2008: 23-28.

[15] 张春梅, 孔祥玲, 王宗勇, 等. SMV 静态混合器内气液两相流压降的研究[J]. 当代化工, 2011, 40(5): 490-493.

[16] 杨春玲. 新型离心螺旋曝气设备气液两相流数值模拟及实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011: 27-29.

[17] 孙西欢, 阎庆斌, 武鹏林, 等. 圆管螺旋流起旋器结构参数与阻力研究[J]. 流体机械, 2000, 28(10): 7-9.