

壳聚糖溶液水力空化泡动力学的数值模拟

黄永春, 袁媛, 吴宇, 任仙娥, 高海芳

(广西科技大学生物与化学工程学院, 广西柳州 545006)

摘要: 本文基于 Gilmore 空泡动力学模型, 采用四阶 Rung-Kutta 法, 对孔板空化器中壳聚糖溶液水力空化泡的动力学特性进行了数值模拟。考察了壳聚糖溶液浓度、溶液温度、孔板下游管道直径、孔板喉部直径、孔板入口压力、出口压力及空化泡初始半径对壳聚糖溶液中空化泡运动的影响。模拟结果显示, 对单个空泡而言, 壳聚糖溶液浓度越高, 空化产生的空化效应强度越弱, 当浓度达到 1% 时, R_{max}/R_0 只有 8; 溶液的温度越高, 空化的强度越大, 当温度达到 60 °C 时, R_{max}/R_0 达到 215; 孔板下游管道直径越长, 产生空化效应越强, 当下游管道直径为 100 mm 时, R_{max}/R_0 达到 335; 孔板喉部直径越小, 空化效应越显著, 当喉部直径为 2 mm 时, R_{max}/R_0 为 290; 孔板压力范围为 0.1~0.5 MPa 之间, 入口压力高, 出口压力越低, 空化效应越好; 初始半径较小的空化泡对空化作用的贡献更大, 当初始半径为 5 μm 时, R_{max}/R_0 为 275。

关键词: 壳聚糖; 水力; 空化泡; 动力学; 数值模拟

文章编号: 1673-9078(2014)5-150-155

Numerical Simulation of Hydrodynamic Cavitation Bubble Dynamics in Chitosan Solution

HUANG Yong-chun, YUAN Yuan, WU Yu, REN Xian-e, GAO Hai-fang

(School of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Based on equation of Gilmore, the dynamics of cavitation bubble in chitosan solution was investigated with the cavitation reactor of orifice. By numerical simulation the effect of solution concentration, solution temperature, pipeline diameter of downstream, gular diameter, inlet pressure, outlet pressure and initial bubble radius on the motion of cavitation bubble were discussed. The results showed that with the increase of concentration, the amplitude of cavitation bubble decreased, and R_{max}/R_0 was only 8 when the concentration was 1%. The amplitude of cavitation bubble increased when increasing of temperature and pipeline diameter of downstream, R_{max}/R_0 reached 215 at 60 °C and 335 with 100 mm pipeline diameter, respectively. Moreover, with the decreasing of gular diameter, the amplitude of cavitation bubble increased, while the gular diameter was 2 mm, and R_{max}/R_0 was 290. It was found that with higher inlet pressure and lower outlet pressure the amplitude of cavitation bubble increased. The investigation also indicated that smaller initial bubble radius improved the effect of cavitation in chitosan solution, and R_{max}/R_0 was 275 with radius of 5 μm .

Key words: chitosan; hydrodynamic; cavitation bubble; dynamics; numerical simulation

壳聚糖 (Chitosan) 是甲壳素 (Chitin) 脱乙酰化的产物^[1], 在化工、环保、食品、印染、纺织、医药等领域受到广泛的应用^[2-3]。但一般的壳聚糖分子量都很大, 有紧密的晶体结构, 只能溶于某些酸性介质中, 这使壳聚糖的应用受到了较大的限制, 并且壳聚糖许多优越的功能特性和特殊的生理活性只有当分子量降低到一定程度时才能表现出来, 因此, 壳聚糖降解的研究具有重要的意义。

水力空化是产生空化的一种方法, 当流体流过一

收稿日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31160348)、广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划资助 (桂教人〔2014〕7号)

作者简介: 黄永春 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物资源化工

个收缩装置 (如几何孔板、文丘里管等) 时产生压降, 当压力降至蒸汽压甚至负压时, 溶解在流体中的气体会释放出来, 同时流体汽化而产生大量空化泡, 空泡在随流体进一步流动的过程中, 遇到周围的压力增大时, 体积将急剧缩小直至溃灭, 这个过程产生水力“空化效应”^[4]。研究表明空化泡溃灭时, 会产生瞬时的高温、高压及强烈的冲击波和微射流, 从而将产生复杂物理、化学效应。其过程能产生极大的能量, 这部分能量具有很大的利用潜能, 如现今已经被应用于空化清洗、污水处理、及化工、传热过程的强化作用等。水力空化与超声空化对过程强化的原理是相同的, 区别在于形成空泡的手段上, 而水力空化的能量利用率明显高于超声空化^[5], 且水力空化可以通过简单的水

力条件形成,空泡和液体一起作整体运动,可在大范围内形成一个比较均匀的空化强化场,其具有简便易行、能耗低、效率高等特点。水力空化降解废水中的有机物已有报道^[6];本课题组研究表明,水力空化对壳糖具有很好的降解作用^[7]。

为了对壳聚糖溶液中水力空化泡的动力学及其影响因素有进一步的了解,本文基于 Gilmore 方程,采用四阶 Rung-Kutta 法,对孔板空化器中壳聚糖溶液水力空化泡的动力学进行了数值模拟,为壳聚糖水力空化降解机理及降解条件优化的研究提供依据。

1 模型及求解

1.1 孔板模型

图 1 为孔板空化器的结构示意图,管道和孔板孔洞截面都是圆形结构的,入口管道直径为 $d_1=25\text{ mm}$,喉部直径 $d_0=2\sim 10\text{ mm}$,出口管道直径 $d_2=25\text{ mm}$ 。L 为孔板下游压力恢复段的长度。

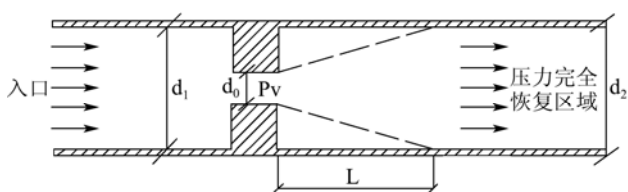


图 1 孔板空化器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of orifice cavitation reactor

1.2 Gilmore 方程

液体性质如粘度、表面张力和可压缩性对空泡动力学行为有很重要的影响^[8]。相对于 Rayleigh、Rayleigh-Plesset 方程,考虑了实际液体粘性、表面张力和可压缩性的 Gilmore 方程与实际更接近,结果精度更高,能更加真实的反应空泡的演变情况^[9]。因此本文基于 Gilmore 方程模拟壳聚糖溶液中水力空化泡半径的变化规律。Gilmore 方程如下^[10]:

$$\left(1 + \frac{1}{c} \frac{dR}{dt}\right) R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{3c} \frac{dR}{dt}\right) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \left(1 + \frac{1}{c} \frac{dR}{dt}\right) H + \frac{R}{c} \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dR}{dt}\right) \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

$$H = \int_{P_t}^{P_R} \left(\frac{P_R + B}{P_t + B}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{dP}{\rho_l} = \frac{n(P_t + B)}{(n-1)\rho_l} \left[\left(\frac{P_R + B}{P_t + B}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right] \quad (2)$$

$$c = c_\infty \left(\frac{P_R + B}{P_t + B}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

$$P_R = P_i - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \quad (4)$$

$$P_t = \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R}\right) \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} \quad (5)$$

注: $R=R_0$ -任意时刻的空化泡半径; c -液体中的局部声速; H -液体在空化泡壁上的焓值; c_∞ -未受扰动液体中声速,取 1480 m/s ; B 和 n -常数,取决于液体种类,本文中 $B=3\times 10^8$, $n=7$ ^[11]; ρ_l -壳聚糖溶液密度; P_t -空泡内压力; P_t -孔板下游液体恢复压力; P_R -空化泡壁上的液体压力; P_0 -环境压力,取为 $1.01325\times 10^5\text{ Pa}$; R_0 -空化泡初始半径; γ -气体绝热指数,取 $\gamma=1.4$ ^[12]; σ -表面张力系数。

1.3 湍流模型

对于孔板空化流动,如果不考虑液体的湍流作用,可认为孔板下游液体压力恢复是线性的,即:

$$P_t = P_v + \frac{P_2 - P_v}{\tau} \times t \quad (6)$$

式中 P_2 为液体最终的恢复压力, τ 为压力恢复所需时间,可通过牛顿方程求出:

$$\tau = \frac{L}{(v_1 + v_2)/2} \quad (7)$$

式中 v_1 和 v_2 分别为液体在孔板处和管道中的流速,孔板下游液体压力恢复区域长度 L 由下式计算^[13]:

$$L = 8d_p \quad (8)$$

孔板流速通过下式计算:

$$C_i = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho_l v_0^2} \quad (9)$$

式中 C_i 为空化数。根据体积流量相等,可求出管道流速 v_p :

$$v_p = \left(d_0/d_p\right)^2 v_0 = \beta^2 v_0 \quad (10)$$

式中 β 为孔径与管道直径的比值。

对于通过孔板的高雷诺数流动,漩涡的形成会引起速度波动,从而导致压力波动,孔板下游压力的恢复不再是线性变化,空化泡的动力学特性将同时受到平均流动和瞬时湍流速度脉动的影响,本文假设湍流脉动速度呈正弦规律变化,则孔板下游任意点在 t 时刻的瞬时速度可表示为^[13]:

$$v_{tn} = v_t + \bar{v}' \sin(2\pi f_T t) \quad (11)$$

式中 v_t 为平均流速,通过列出孔板下游任意一点与压力完全恢复点之间的伯努利方程,借助方程 (9) 可求出该点的 v_t 值。 \bar{v}' 和 f_T 分别为平均湍流脉动速度和湍流速度脉动频率,可通过下式求出^[14]:

$$P_m = (\bar{v}')^3 / l \quad (12)$$

$$f_T = \bar{v}' / l \quad (13)$$

式中 l 为湍流尺度, 取为孔板位置和压力完全恢复位置的平均值, 即

$$l = (0.07d_0 + 0.07d_p) / 2$$

P_m 为单位液体质量的能量耗散率:

$$P_m = (\Delta P \times Q) / M_1 \quad (14)$$

其中 $Q = v_p \pi d_p^2 / 4$ 为体积流量, $M_1 = \rho_1 L \pi d_p^2 / 4$ 为孔板下游压力恢复区域内液体的总质量, ΔP 为压力损失, 由下面的式子所示:

$$\Delta P = (P_v - P_2) + \rho_1 v_0^2 / 2 - \rho_1 v_p^2 / 2 \quad (15)$$

通过方程 (12~15) 即可求出 \bar{v}' 和 f_t 的值, 进而知道孔板下游任意一点的瞬时速度随时间的变化关系。利用该瞬时速度, 通过如下形式的伯努利方程, 可求出孔板下游任意点的 t 时刻的瞬时静压^[14]:

$$P_t = P_v + \rho_1 v_0^2 / 2 - \rho_1 v_{tn}^2 / 2 - \Delta P \quad (16)$$

1.4 数值求解方法与初始条件

将方程 (6) 或者 (16) 所示的孔板下游恢复压力 P_t 代入方程 (2) 和 (3) 中, 并将方程 (1) 所示的二阶微分方程转化为一阶微分方程组, 然后利用四阶 Rung-Kutta 法对方程组进行求解, 即可求出 R 随 t 的变化关系。计算初始条件为: $t=0$ 时 $R=R_0, dR/dt=0, v=v_0$ 。

1.5 模拟对象

本文以粘均分子量为 400 KDa 的壳聚糖溶液为模拟对象。

2 结果与讨论

2.1 壳聚糖溶液浓度的影响

壳聚糖溶液温度 T 取 30 °C, 环境压力 P_0 取 0.1 MPa, 孔板入口压力 P_1 取 0.5 MPa, 出口压力 P_2 取 0.1 MPa, 空化泡初始半径 $R_0=5 \mu\text{m}$, 喉部直径 d_0 取 6 mm, 上游管道直径 d_1 取 25 mm, 下游管道直径 d_2 取 25 mm, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2} \text{N/m}$, 取 $k=1.33$ 。讨论壳聚糖溶液的浓度 c 分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%, 溶液的粘度 μ 、密度 ρ_L 、蒸汽压 P_v 随溶液浓度的变化对应的参数值见表 1 (数据引自文献[15], 部分数据根据其拟合得到)。采用方程 (1) 对壳聚糖溶液

中空化泡的运动进行数值模拟, 模拟得到空化泡半径随时间的变化关系图, 结果如图 1 所示。

表 1 壳聚糖溶液不同浓度对应的 μ 、 ρ_L 、 P_v 值 ($T=30 \text{ }^\circ\text{C}$)

Table 1 The values of parameter of μ , ρ_L , P_v in chitosan solution

varying with concentration of solution			
$c/\%$	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	P_v/Pa
0.2	0.37	997.68	4242.50
0.4	0.41	999.68	4242.25
0.6	0.55	1001.68	4242.03
0.8	1.74	1003.68	4241.95
1.0	1.92	1005.68	4241.86

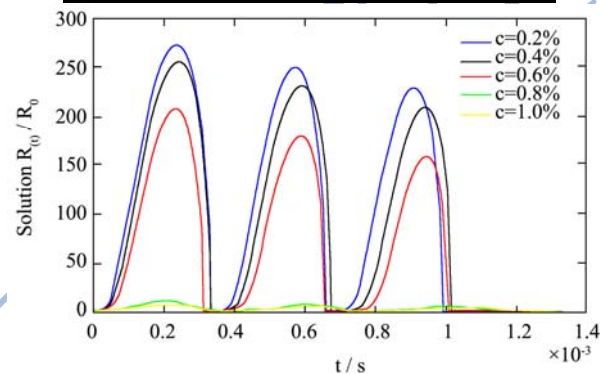


图 1 溶液浓度对空化泡运动的影响

Fig.1 Effect of concentration on the kinetic process of cavitation bubble

由图 1 中数据可以看出, 其它条件不变时, 壳聚糖浓度越大, 空化泡的运动的振幅越小, 气泡达到最大半径时 (R_{max}) 与初始半径 (R_0) 之比 R_{max}/R_0 越小。当壳聚糖溶液浓度为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 时, 空化泡的 R_{max}/R_0 分别为 275、255、210、12.5、8。由表 1 可以看出溶液浓度越大, 溶液的粘度越大, 空化越困难, 空泡膨胀所需克服的液体分子间力越大, 因而空化泡振幅减小; 另外, 浓度增大, 空化泡内蒸汽压力减小, 空化泡的振幅也逐渐减小。因此, 壳聚糖溶液浓度越低, 空化越容易, 空化越剧烈, 效果越好。

2.2 溶液温度的影响

壳聚糖溶液模拟体系中的 P_0 、 P_1 、 P_2 、 R_0 、 d_0 、 d_1 、 d_2 和 2.1 相同, 壳聚糖溶液浓度 c 为 1%, 相对应的 ρ_L 取 1005.68 kg/m^3 , 气泡内蒸汽压 P_v 取 4241.86 Pa, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2} \text{N/m}$, 取 $k=1.33$ 。讨论当溶液温度 T 分别为 30 °C、40 °C、50 °C、60 °C 时, 粘度 μ 对应为 1.92 Pa·s、1.28 Pa·s、0.87 Pa·s、0.58 Pa·s^[15], 采用方程 (1) 对壳聚糖溶液中空化泡的运动进行数值模拟, 模拟结果如图 2 所示。

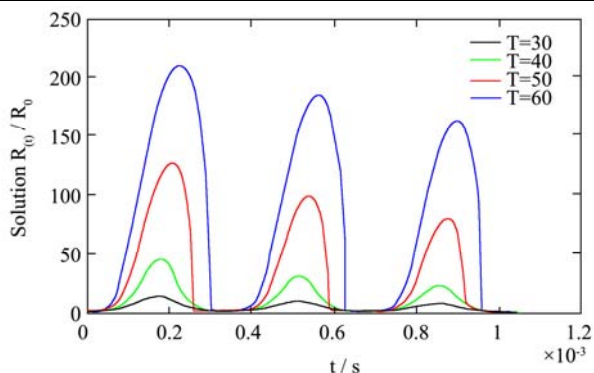


图2 溶液温度对空化泡运动的影响

Fig.2 Effect of temperature on the kinetic process of cavitation bubble

由图2的数据可以看出,其他条件不变时,壳聚糖溶液的温度越高, R_{max}/R_0 越大,当温度分别为 30 °C、40 °C、50 °C、60 °C 时, R_{max}/R_0 分别为 8、45、128、215。这主要是因为温度的改变影响了粘度的大小。温度升高,溶液的粘度变小,空泡膨胀所克服的液体分子间力变小,空化容易发生,空化泡的振幅增大。此外,温度的改变也影响空化泡蒸汽压的大小,温度越高,空化泡蒸汽压力越大,空化泡的振幅也逐渐增大。因此,溶液温度越高,空化强度越大,效果越好。

2.3 孔板下游管道直径的影响

壳聚糖溶液模拟体系中的温度 T 、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 R_0 、 d_0 、 d_1 和 2.1 相同,壳聚糖溶液浓度 c 为 0.2%, 相对应的 μ 取 0.37 Pa·s, ρ_L 取 997.68 kg/m³, 气泡内压 P_v 取 4242.5 Pa, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2}$ N/m, 取 $k=1.33$ 。讨论下游管道直径 d_2 分别为 25 mm、50 mm、75 mm、100 mm, 模拟结果如图3所示。

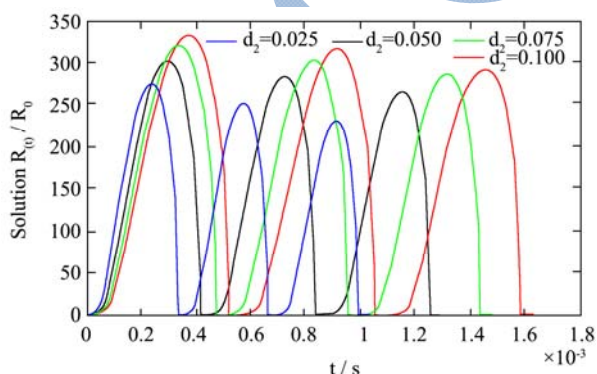


图3 孔板下游管道直径对空化泡运动的影响

Fig.3 Effect of pipeline diameter of downstream on the kinetic process of cavitation bubble

由图3中数据可以看出,在其他条件不变时,孔板下游管道直径 d_2 越长, R_{max}/R_0 越大,同时气泡振动的周期变长。当下游管道直径 d_2 分别为 25 mm、50

mm、75 mm、100 mm, R_{max}/R_0 分别为 270、300、325、335。这主要是有两方面因素造成的,首先, d_2 的增大,使得湍流尺度增大,湍流频率减小,因此空化泡可以生长的更大;另一方面 d_2 增大,孔板下游液体压力恢复区域长度 L 值增大,压力恢复时间延长,使得驱动空化泡运动的平均压力梯度降低,而此时湍流压力将作为空化泡运动的主要驱动力^[16]。因此,下游管道直径越大,空化强度越高。

2.4 喉部直径的影响

壳聚糖溶液模拟体系中的温度 T 、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 R_0 、 d_1 、 d_2 、 L 和 2.1 相同,壳聚糖溶液浓度 c 以及相对应的 μ 、 ρ_L 、 P_v 与 2.3 相同,表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2}$ N/m, 取 $k=1.33$ 。讨论孔板喉部直径 d_0 分别为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm。模拟结果如图4所示。

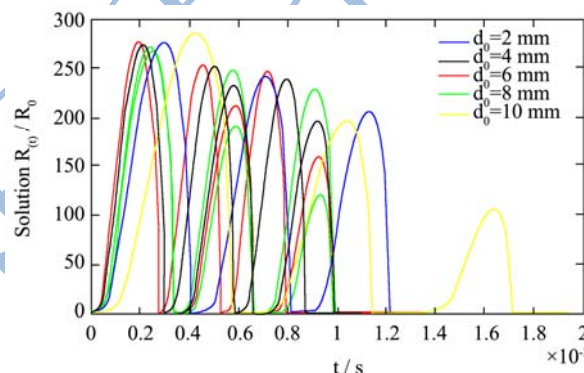


图4 喉部直径对空化泡运动的影响

Fig.4 Effect of gular diameter on the kinetic process of cavitation bubble

由图4中数据可以看出,在其他条件不变时,随着孔板喉部直径的增大, R_{max}/R_0 减小,同时气泡振动的周期变小。当孔板喉部直径为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mm 时, R_{max}/R_0 分别为 290、278、276、275、273。这说明壳聚糖溶液中,孔板喉部直径越小,空化过程中空泡膨胀的幅度越大,空泡溃灭的压力越大,孔板下游湍流强度越强,空化强度越高,空化效应越显著;同样, d_0 越小,孔板下游液体压力恢复区域长度 L 值增大,压力恢复时间延长,使得驱动空化泡运动的平均压力梯度降低,而此时湍流压力将作为空化泡运动的主要驱动力。因此,对于孔板为空化反应器的壳聚糖溶液中,为提高空化效应的强度,在流动阻力损失不太大的情况下,喉部直径应当较小。

2.5 入口压力的影响

壳聚糖溶液模拟体系中的温度 T 、 P_0 、 P_2 、 R_0 、 d_1 、 d_0 、 d_2 、 L 和 2.1 相同,壳聚糖溶液浓度 c 、相对应

的 μ 、 ρ_L 、 P_v 与 2.3 相同, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2}$ N/m, 取 $k=1.33$ 。讨论孔板入口压力 P_1 分别为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa。模拟结果如图 5 所示。

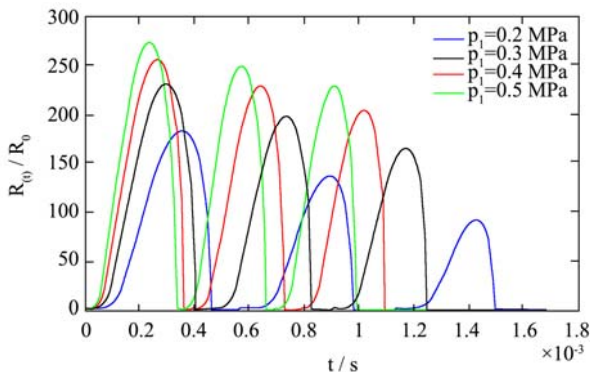


图 5 入口压力对空化泡运动的影响

Fig.5 Effect of inlet pressure on the kinetic process of cavitation bubble

由图 5 中数据可以看出, 其他条件不变时, 孔板入口压力越高, R_{max}/R_0 越大, 同时气泡振动的周期变小。当孔板入口压力为 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa 时, R_{max}/R_0 分别为 180、225、255、275。这是因为壳聚糖溶液中, 入口压力增加, 使得流量增加, 空化数增加, 从而增强了空化程度; 孔板入口压力越高, 空化过程中空泡膨胀的幅度越大, 空泡溃灭的压力越大, 孔板下游湍流强度越强, 空化强度越高, 空化效应越明显。因此, 对于孔板为空化反应器的壳聚糖溶液中, 孔板入口压力越高, 空化的效果越好, 强度越高。

2.6 出口压力的影响

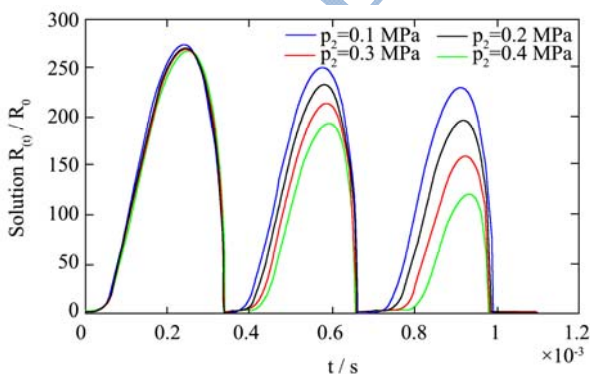


图 6 出口压力对空化泡运动的影响

Fig.6 Effect of outlet pressure on the kinetic process of cavitation bubble

壳聚糖溶液模拟体系中的温度 T 、 P_0 、 P_1 、 R_0 、 d_1 、 d_0 、 d_2 、 L 和 2.1 相同, 壳聚糖溶液浓度 c , 相对应的 μ 、 ρ_L 、 P_v 与 2.3 相同, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2}$ N/m, 取 $k=1.33$ 。讨论孔板出口压力分别为 $P_2=0.1$ MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa, 模拟得到的结果

如图 6 所示。

由图 6 中数据可以看出, 其他条件不变时, 孔板出口压力越高, R_{max}/R_0 越小。当孔板出口压力为 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa 时, R_{max}/R_0 分别为 275、273、271、266。这说明壳聚糖溶液中, 出口压力增加, 使得流量减少, 空化数也随之减少, 从而降低了空化程度。因此, 对于孔板为空化反应器的壳聚糖溶液中, 为提高空化效应的强度, 应当采用较低的出口压力。

2.7 空化泡初始半径的影响

壳聚糖溶液模拟体系中的温度 T 、 P_0 、 P_1 、 P_2 、 d_1 、 d_0 、 d_2 、 L 和 2.1 相同, 壳聚糖溶液浓度 c 、相对应的 μ 、 ρ_L 、 P_v 与 2.3 相同, 表面张力系数取 $\sigma=7.12 \times 10^{-2}$ N/m, 取 $k=1.33$ 。讨论空化泡初始半径 R_0 分别为 5 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm 的情况, 模拟得到的结果如图 7 所示。

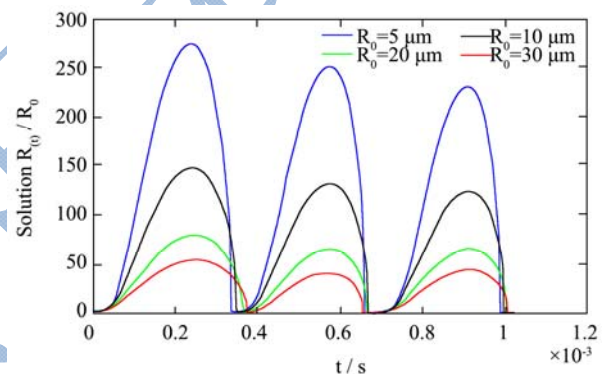


图 7 空泡初始半径对空化泡运动的影响

Fig.7 Effect of initial bubble radius on the kinetic process of cavitation bubble

由图 7 可以看出, 其他条件不变时, 随着空化泡初始半径 R_0 的增大, R_{max}/R_0 减小, 生长和收缩速率变缓。当初始半径 R_0 为 5、10、20、30 μm 时, R_{max}/R_0 分别为 275、145、78、50。这是因为随着初始半径的增加, 空化泡的最大生长率大幅降低, 生长和收缩速率也变缓, 空化强度就相应减小^[16]。因此相对初始半径较大的空化泡, 初始半径较小的空化泡对空化作用的贡献更大一些。

3 结论

3.1 本文以壳聚糖溶液作为介质, 基于 Gilmore 空泡运动方程, 对孔板空化器内空泡演变过程进行了模拟, 讨论了空化泡动力学的影响因素及影响规律, 在模拟所考虑的条件范围内, 得到的结论如下: 壳聚糖溶液浓度越低, 空化越容易, 效果越好; 溶液温度越高, 空化强度越大, 效果越好; 孔板下游管道直径越长,

空化效应相对较强;孔板喉部直径越小,空化效应越显著;孔板入口压力越高,空化效应越明显;孔板出口压力越高,空化效应越弱;初始半径较小的空化泡对空化作用的贡献更大。

3.2 模拟结果为壳聚糖的水力空化降解条件及孔板结构的优化提供了依据。

参考文献

- [1] 蒋挺大.壳聚糖[M].北京:化学工业出版社,2001
JIANG Ting-da. Chitosan [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001
- [2] Harish Prashanth K V, Tharanathan R N. Chitin/chitosan: modifications and their unlimited application potential-an overview [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18: 117-131
- [3] Nongporn Hutadilok, Takako Mochimasu, Hiroki Hisamori, et al. The effect of N-substitution on the hydrolysis of chitosan by endo-chitosanase [J]. Carbohydrate Research, 1995, 268: 143-149
- [4] 魏群,高孟理.水力空化及其研究进展[J].湖南城市学院学报,2004,13:22-25
- [5] Gogate P R, Pandit A B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2005, 12(1-2): 21-27
- [6] Braeutigam P, Wu Z L, Stark A, et al. Degradation of BTEX in aqueous solution by hydrodynamic cavitation [J]. Chemical Engineering Technology, 2009, 32: 745-753
- [7] Y CH Huang, Y Wu, W CH Huang, et al. Degradation of chitosan by hydrodynamic cavitation [J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98: 37-43
- [8] 吴亚丹.文丘里管内及空泡群的演变及其溃灭特性[D].大连理工大学,2009
WU Ya-da. The evolution and breaking characteristics of bubble group in venture tube [D]. Dalian University of Technology, 2009
- [9] 付勇.文丘里管内空泡动力学特性研究[D].大连理工大学,2007
FU Yong. The study of the dynamics for the cavitation bubble in venturi tube [D]. Dalian University of Technology, 2007
- [10] Gilmore F R. The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid [J]. Technical Report, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1952, Caltech AUTHORS: Gilmore_fr_26-4
- [11] 柯乃普R T, 戴利J W, 哈密脱F G,著.水利水电科学研究院译.空化与空蚀[M].北京水利出版社,1981
Knapp R T, Daily J W, Hammity F G. Cavitation and cavitation erosion [M]. Beijing Water conservancy Press, 1981
- [12] 刘亚楠,陈伟中,黄威,等.稳态声空化泡的高精度测量技术[J].科学通报,2005,50:2458-2462
LIU Ya-nan, CHEN Wei-zhong, HUANG Wei, et al. The high precision measurement technology for acoustic cavitation bubble with steady state [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50: 2458-2462
- [13] Moholkar V S, Pandit A B. Bubble behavior in hydrodynamic cavitation: effect of turbulence [J]. AIChE J, 1997, 43: 1641-1648
- [14] Davies J T. Turbulence phenomena [M]. New York: Academic Press, 1972
- [15] 李星科,姜启兴,夏文水.壳聚糖溶液的流变学性质及应用研究[J].食品工业科技,2011,32(2):65-72
LI Xing-ke, JIANG Qi-xing, XIA Wen-shui. Study on rheological properties and application of chitosan solution [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(2): 65-72
- [16] 蔡军,淮秀兰,李勋锋.湍流作用下可压缩液体中空化泡的动力学特性[J].科学通报,2010,10:857-866
CAI Jun, HUAI Xiu-lan, LI Xun-feng. Investigation on cavitation bubble dynamics in compressible liquid under turbulence [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 10: 857-866