

自吸式生物反应器放大方法研究进展

Research process on scale-up factors and methods of self-inducing bioreactor

姜开维¹ 骆海燕¹ 窦冰然² 洪厚胜^{1,3}

JIANG Kai-wei¹ LUO Hai-yan¹ DOU Bing-ran² HONG Hou-sheng^{1,3}

(1. 南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京工业大学化学与分子工程学院, 江苏 南京 211816; 3. 南京汇科生物工程设备有限公司, 江苏 南京 210009)

(1. College of Life Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;
2. College of Chemistry and Molecular Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;
3. Nanjing Highke Bioengineering Equipment Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210009, China)

摘要:自吸式反应器具有操作简单、传质性能好等优点,特别是不需要空气压缩机等附件,节省了供气机械的投资和运行,在化学工程、环境工程、生化工程中得到了越来越广泛的应用。自吸式反应器内涉及气液两相体系,这种两相流体流动过程中的混合、传热和传质等过程非常复杂,仍有大量问题需要理论解释。文章对自吸式生物反应器的临界转速、吸气速率、功率、气含率和传质系数的理论模型,以及经验公式进行综述,并对其 CFD 模拟研究进展做出概括,对于自吸式反应器的放大应用有一定的参考价值。

关键词:自吸;生物反应器;放大;吸气速率;计算流体力学

Abstract: Gas-inducing reactor is a sort of gas-liquid reactor operated easily and has been widely applied in many chemical industries, environmental engineering and biotechnological engineering for its predominant mass transfer performance and the low power consumption and cost due to the absent of external compressor. In the gas-inducing reactor involving gas-liquid two-phase flow system, the mixing, mass transfer and heat transfer processes are very complicated. Many problems need to be solved in theory. The critical impeller speed for the onset of gas induction, rate of gas induction, power consumption, gas holdup and mass-transfer coefficient of the self-inducing reactor are discussed, and research process on the CFD simulation of self-inducing reactor is also discussed, these are useful for the scale-up of self-inducing reactor.

Keywords: self-inducing; bioreactor; scale-up; gas inducing rate; computational fluid dynamics

自吸式生物反应器是不需要气体输送机械而能自行吸入外界气体进行气液接触的一种反应器^[1],它靠一种经过特殊设计的空心涡轮搅拌器,能够在进行物料混合的同时不断吸收外界的气体,达到气液反应的目的。自吸式反应器在多相流反应器中占有特别重要的地位,尤其适合于高压、有腐蚀性以及反应气体有毒的情况。

反应器内的多相流体系是一个复杂的体系,自吸式反应器作为传统的多相流反应器,其优化和放大一直是研究的热点。在反应器放大过程中,质量传递、动量传递和热量传递是反应器放大的核心问题,传递过程主要依赖于对流和扩散两个因素,它受系统规模的影响最大。但从理论上讲,反应容器的规模及形状与细胞反应速率的关系并不大,因此可以做到尽可能高地保持细胞的生长速率以及产物的生成速率,以便增加产量将投入产出比最大化,这就是生物反应器放大的目的^[2]。

自吸式反应器的放大重点是研究其吸气性能、气液分散性能和传质性能与转子、罐体的结构参数等的关系,这种相互作用的关系指明了反应器放大过程中流动与传质现象的理论研究方向。评价放大效果的性能参数主要有临界转速与吸气速率、功率、气含率和传氧速率,对于这些参数的理论研究和模拟研究,在放大过程中起到重要作用。

1 自吸反应器性能参数的研究进展

放大是否达到要求,要用性能参数来评价,因此对性能参数的研究是必须面对的课题。

1.1 临界转速与吸气速率

1.1.1 临界转速 在自吸式生物反应器中,当自吸转子静止时,反应器中的液面与进气管中的液面处于同一高度。当转子开始转动,进气管中的液面会逐渐下降。随着转速增大,当液面下降到叶轮的开口处、气体开始吸入时的转速称为临界转速。设备正常运行时转子转速都比临界转速高。

基金项目:国家高技术研究发展(863)重点项目(编号:2012AA021201)

作者简介:姜开维(1981—),男,南京工业大学在读硕士研究生。

E-mail: 258494500@qq.com

收稿日期:2015-08-25

Patil 等^[3]研究了气体吸入的临界转速和吸气速率,认为临界转速依赖于单相流体力学,而吸气速率依赖于两相流体力学。在李波等^[4]的研究中,认为当忽略摩擦损耗时,自吸叶轮旋转产生的压差克服液阻降时,气体才开始吸入,压差的计算公式见式(1):

$$\Delta P = \rho_L gh \quad (1)$$

式中:

Δp ——驱动气体流动的压差, Pa;

ρ_L ——液体的密度, kg/m³;

h ——叶轮浸没深度, m。

Abbot 等^[5]定义了压力系数,表示动压头与静压头的比值,它是自吸式生物反应器的一个重要参数。压力系数 C_p 的计算公式见式(2):

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_L V_{np}^2} = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_L (\pi ND)^2} \quad (2)$$

式中:

C_p ——压力系数;

V_{np} ——自吸管中的流速, m/s;

N ——叶轮转速, r/min;

D ——叶轮直径, m。

把式(1)代入式(2)中,可以得到临界转速与压力系数的关系式:

$$N_c = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{2gh}{C_p}} \quad (3)$$

式中:

N_c ——临界转速, r/min。

式(3)表示在不考虑摩擦损耗的情况下,临界转速与反应器的转子直径、液位高度、压力系数等因素有关。

Wang 等^[6]研究了管式自吸浆,在管的根部开了一个小孔使液相流入,并与不开小孔时的数据对比,导出临界转速公式见式(4):

$$N_c = \frac{\sqrt{2gh}}{\pi DK} \quad (4)$$

式中:

K ——动压头影响因数。

White 等^[7]提出了如式(5)的经验式来预测临界转速。

$$\frac{N_c^2 D^2}{gh} = C \quad (5)$$

式中:

C ——系统的经验常数,常取值为 0.23。

Sawant 等^[8]考虑了液体黏度的影响,并对式(5)进行了修正,得式(6):

$$\frac{N_c^2 D^2}{gh} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.11} = C \quad (6)$$

式中:

μ_w ——水的黏度, Pa·s;

μ ——实际流体的黏度, Pa·s。

Deshmukh 等^[9]认为气体流动过程也是产生阻力损失的过程,提出如式(7)的关系式:

$$N_c = \sqrt{\frac{gh}{2[\pi R(1-K_0)](C_p-1)}} \quad (7)$$

式中:

K_0 ——叶片滑动系数;

R ——叶轮半径, m。

Westhuizen 等^[10]研究了矿物浮选室的固—液—气三相流动情况,获得的临界转速公式见式(8):

$$N_c = s \cdot d_p^{0.20} \cdot B^{0.13} \cdot v^{0.10} \cdot g^{0.45} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^{0.45} \cdot T^{-0.85} \quad (8)$$

式中:

s ——修正参数;

d_p ——固体颗粒的尺寸, μm ;

B ——固液质量比;

v ——流体动力黏度, m²/s;

ρ_s ——固体密度, kg/m³;

T ——容器直径, m。

在理论上探索临界转速需要考虑很多因素,要根据不同的反应器具体研究,其表达式一般是多因素的连乘积。

1.1.2 吸气速率 吸气速率的大小主要受到两个因素影响:叶轮旋转时产生的压差推动力和叶轮分散气体的能力。

Martin 等^[11]测量了管式自吸转子的局部压差,导出的关系式见式(9):

$$Q = C_0 A_0 K_1 \sqrt{2g(-h_s)(\rho_L/\rho_G)} - 0.00085 K_1 \quad (9)$$

式中:

C_0 ——孔流系数;

A_0 ——孔口面积, m²;

h_s ——孔口外侧静压头, m;

K_1 ——试验常数;

0.00085——体积流量系数, m³/s;

ρ_G ——气体的密度, kg/m³。

Ashwin 等^[12]从最大可得吸气速率角度给出了一个经验式见式(10):

$$(Q_G/V_L)_{\max} = (2.36 \times 10^{-4}) N^{1.53} (D/T)^{1.83} n_p^{0.26} \quad (10)$$

式中:

Q_G ——吸气速率, m³/h;

V_L ——容器装液量, m³;

D/T ——容器高径比;

n_p ——叶片的数量。

Evans 等^[13]认为在气体吸入过程中,叶轮旋转产生的压差与气流从入口到叶轮开孔过程中压降相等,得到了吸气速率的预测模型见式(11):

$$Q = C_0 A_0 \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G} \{C_p(\theta) [2\pi NR(1-K)]^2 - 2gS\}} \quad (11)$$

式中:

$C_p(\theta)$ ——局部压力系数;

K ——叶轮和流体的滑动系数;

S ——浸没深度, m。

式(11)可以预测不同操作条件下的吸气速率,但结果有所偏高,因为当气体吸入以后,转子周围区域形成气液混合相,其密度值实际比纯水的 ρ_L 要低。通过转速 N 预测气体吸入速率,在转速较大时准确性较高,转速较小时准确性相对降低。模型的修正主要有吸气管中的摩擦压降,气泡形成过程中动能消耗压降,克服表面张力的压降等。模型的改进一般用到 CFD 技术。

Deshmukh 等^[9]使用空气与水的平均密度 ($\epsilon_L \rho_L + \epsilon_G \rho_G$),将式(11)进行修正,得到叶片式自吸转子在高转速时的吸气速率关系见式(12):

$$Q_G = C_O A_O \sqrt{(\frac{\rho_L \epsilon_L}{\rho_G} + \epsilon_G) \{C_P [2\pi r N (1 - K)]^2\} - \frac{2\rho_L g h}{\rho_G}} \quad (12)$$

式中:

ϵ_L ——气液混合物中液体所占的体积百分数;

ϵ_G ——气液混合物中气体所占的体积百分数。

对吸气速率的研究也是具体设备具体分析,所以得出的公式只有参考性没有通用性。计算流体力学(CFD)技术的发展,加快了反应器放大的应用研究进程。CFD 技术获得数据又多又快,使大部分的研发工作转入模拟计算方向。

Achouri 等^[14]利用 CFD 技术获得了叶片倾斜角变化对吸气速率影响的数据,发现随着叶片角度的增大吸气速率也增大。Murthy 等^[15-16]利用 CFD 技术预测了吸气速率的数值模型,实验验证了该模型,取得了较好的效果。Wang Zhenyuan 等^[6]利用 CFD 技术发现当管式自吸浆的进气孔直径为管臂直径一半时能得到最小的临界转速和最大的气含率。Fonte 等^[17]模拟自吸浆在单相流体中的压力差并以此估计其在两相流体中的压差关系,从而获得了较接近的吸气速率。

吸气速率的放大可以先通过 CFD 技术获得满意的结果,再来寻求理论解释。

1.2 功率特性

功率是反应器放大的决定因素之一,它与叶轮转速、叶轮结构、液面高度等直接相关。功率除摩擦损失外,主要用于总流场产生、气体分散、颗粒悬浮、传质传热和混合等^[3]。功率占工业生产成本的比例很大,所以设计的额定功率越小越好。

张庆文等^[18]将吸气时的功率消耗与不吸气时的功率消耗及其它影响因素进行了无因次分析,拟合试验数据得到如式(13)的方程。

$$\frac{P_G}{P_L} = 0.963e^{-13.75(\frac{Q}{ND^3})} \quad (13)$$

式中:

P_G ——通气时的功率, W;

P_L ——不通气时的功率, W;

Q ——空气流速, m^3/h 。

与试验结果进行比较,发现平均偏差为 4.76%,在工程设计允许的范围之内。

Joshi 等^[19]通过研究空心管叶轮自吸反应器得到功率消耗预测的经验关系式见式(14):

$$P_G = C (P_L^2 ND^3 / Q_G^{0.56})^{0.45} \quad (14)$$

式(14)是通过修正机械搅拌反应器得到的。但是自吸式叶轮的转速(功率消耗)与吸气速率、叶轮外观设计等参数密切相关,不能独立发生变化。

Bacziewicz 等^[12]也通过研究空心管叶轮,提出气体吸入时的功率消耗经验公式为:

$$P_G / V_L = 0.62 N^{3.44} (Q_G / V_L)^{-0.31} (d/D)^{4.48} n_p^{1.07} \quad (15)$$

式中:

d ——叶轮直径, m。

由于以上都是经验性公式,使用时需要对某些参数做一定的修正。

对功率消耗理论研究较少,研究的主要模式依然采用 CFD 预测,再实验验证得出结果,这种手段对研究自吸反应器的基础理论及其改形放大有着巨大的促进作用。

张少坤等^[20]利用 CFD 预测了桨叶位置,流场分布和功率消耗,结果与试验值很接近。Barailler 等^[21]用 CFD 预测了转子在反应器中的功率消耗,经实验验证,两者很接近。

1.3 气含率

气含率是指反应器内气液或气液固混合相中气相所占的体积分率,是反应器最基本的流体动力学参数^[22]。由于气泡的运动使液体中能量的分散情况发生变化,因此气含率对液相速度场与湍流强度的影响都比较大。气含率是气相平均停留时间的函数,与平均气泡直径共同决定传质总面积,进而影响着传质和宏观反应速率,直接影响到所选反应器的尺寸。研究气含率具有重要的工程应用价值,反应器内各处的气含率是不同的,可分为总体气含率、局部气含率和点气含率^[23]。

气含率测定方法很多,如体积法(又称床层膨胀法)、重量法(主要是压差法)、电化学法、光学法(有激光法、射线法、光纤探针法、照相法)四大类^[24-28],目前测定自吸式反应器的整体气含率较普遍使用的是静压差法。

Patwardhan 等^[29]通过对 4 种不同形式叶轮的研究发现气含率与吸气速率和叶轮的分散能力密切相关。较低的叶轮安装高度,气液分散良好,气体可以再循环,延长了气泡的停留时间,气含率较高。Saravanan 等^[30]研究了多层转子系统的气含率。发现,转子的吸气速率随着叶片数的增加而降低,当叶片数多于六片时,气含率反而降低。转子的厚度对气含率没有明显的影响。随着相邻叶轮间距离的增大,气含率下降。

Chen 等^[24]将气含率与单位体积的功耗以及气含率的其它影响因素进行关联,得到:

$$\epsilon = 0.053 \left(\frac{P}{V}\right)^{0.84} \left(\frac{h_s}{d_0}\right)^{-2.75} \quad (16)$$

式中:

ϵ ——整体气含率;

P ——功率消耗, W;

V ——吸气后混合流体体积, m^3 ;

h_s ——吸气后液面高度, m;

d_0 ——反应器的直径, m。

气含率是反映自吸式生物反应器传递性能的一个重要参数, 准确的气含率预测模型有助于更好地对反应器进行放大。

1.4 气液传质系数

气液传质系数是传质快慢的主要标志, 预测影响气液相间传质系数的主要因素以及其间的定量关系, 寻出其规律性, 从而对现有过程及设备的分析和改进、适宜操作条件的选择、新型高效设备的开发等作出指导。

气液传质系数与各参数的关系式可通过因次分析得到, 也可利用化工传质研究的方法通过物料衡算法建立反应器上的传质数学模型^[31]。Kasundra等^[32]系统研究了45°空心下压折叶桨式涡轮(PBDD45)、60°空心下压折叶桨式涡轮(PBTD60)、双圆盘自吸式涡轮以及改进的双圆盘自吸式涡轮4种不同类型的自吸式叶轮的气液传质性能。发现当叶轮转速大于临界转速时, $K_L a$ 随转速的增大而增大, 随叶轮淹没深度的增加而减小; 功率消耗相同的情况下, 双圆盘自吸式涡轮桨气液分散性能较好, 产生的气泡直径小, $K_L a$ 大于PBTD叶轮。进一步研究得到了容积氧传质系数与功率消耗的关联式见式(17):

$$k_L a = A \left(\frac{P_G}{V} - \frac{P_0}{V} \right)^{0.8} \quad (17)$$

式中:

$K_L a$ ——气液传质系数, s^{-1} ;

P_0 ——叶轮处于临界转速时功率消耗, W;

V ——反应器内流体体积, m^3 ;

A ——经验常数, 取决于叶轮设计。PBDD45、PBTD60、双圆盘自吸式涡轮、改进的双圆盘自吸式涡轮 A 值分别为 0.030 7, 0.038 4, 0.073 7, 0.077 2。

气液传质非常迅速和直接, 因此气液传质的测量非常困难。传质系数 $K_L a$ 可以通过化学方法或物理方法测得。化学法通过某一恒定浓度的溶解气体的化学反应测得, 主要有亚硫酸盐氧化法和氢氧化钠水溶液吸收二氧化碳法, 属于稳态法。亚硫酸钠溶液或氢氧化钠溶液与反应器内的液相流体往往在物理性质上有很大差别, 其中化学反应也加速了物理吸收速率, 用化学法测定的 $K_L a$ 值与实际值有较大差别。物理方法通过测量溶解气体的浓度的变化得到 $K_L a$ 值, 为非稳态的动态方法。

氮气驱赶法是广泛用来测量 $K_L a$ 的物理方法之一。测定时先向反应器内通入氮气把液相流体中的溶解氧挤出, 然后把氮气换为空气, 再由溶氧电极记录液体中溶解氧浓度随时间的变化。使用这种方法时, 体系中的液相处于全混流状态, 所有气泡在任何时刻的 $K_L a$ 和界面气相浓度相同, 氧吸收的速率方程可表示为:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L a (C_g^* - C_L) \quad (18)$$

积分得到容积氧传质系数 $K_L a$:

$$K_L a = - \frac{1}{t - t_0} \ln \left(\frac{C_g^* - C_L}{C_g^* - C_{L0}} \right) \quad (19)$$

式中:

C_g^* ——平衡时气相中氧的浓度, mg/L;

C_L —— t 时刻水相中氧的浓度, mg/L;

C_{L0} ——水相中初始氧的浓度, mg/L;

t_0 ——试验开始的时刻, s;

t ——试验结束的時刻, s。

Poncina等^[33]把 $K_L a$ 看成弗汝德数的函数, 提出如式(20)的表达式。

$$K_L a = \frac{0.065 (Fr^* - Fr_c^*)^{1.1}}{1 + 0.132 (Fr^* - Fr_c^*)^{1.1}} \quad (20)$$

式中:

Fr^* ——修正的弗汝德数;

Fr_c^* ——修正的临界弗汝德数。

Yu He-sheng等^[34]考虑了吸气速率、桨叶深度与桨叶半径等因素, 提出如式(21)的表达式。

$$K_L a = 1.212 \left(\frac{P}{V_L} \right)^{0.0816} U_G^{0.692} \left(\frac{S}{d_T} \right)^{-0.390} \quad (21)$$

式中:

U_G ——气相表观流速, m/s;

d_T ——容器直径, m。

Ryma等^[35]将叶片式自吸泵改造成盒式, 代入式(21)得出了更好的结果。

Ye Qin等^[36]综述了自吸反应器原理的研究进展, 也可以作为自吸反应器的放大原理来参考。

在具体的反应器开发中, 以上5个性能参数一定以套餐形式出现, 但通常不能面面俱到, 只能根据生产条件优先保证一部分参数而牺牲另一部分。

2 自吸反应器的外观放大

放大效果的直观表现为反应器内部核心部件和整体的外观设计。

Mikkel等^[37]利用旋转喷射混合器来替代产生全局流场的搅拌桨。外置串联安装的离心泵从反应器顶部向混合器输入流体使其从4个喷射臂中流出, 同时把流体从反应器底部抽出, 这样就形成了一个外部循环, 混合器的射速可用泵的功率来调节。这种循环模式可以保持放大过程的湍流效果, 达到传质要求。这种混合器因能替代搅拌桨而节约了电能, 且适用于大型气态反应器及高黏度流体。

Scargiali等^[38]以90 L的反应器为研究对象, 将外观高径比设计为5.2, 内部按照放大样式安装了5层搅拌桨和1层底部自吸转子, 然后通过4种动力学模型(氮气驱赶法、纯氧驱赶法、纯氧解吸法和纯氧无空气纯水法)来寻找合适的传质系数。

张志强^[39]设计的自吸式转子是中空六叶轮, 转子外围配有定子起到气体分布的作用。与传统反应器的椭圆底不同, 这种设计要求反应器是平板式底部。通过放大转子与定子的尺寸并增加转子转速, 将发酵罐体积整体放大到了50 t规模。

张超^[40]设计了大型搅拌槽($\Phi 14 \text{ m} \times 19 \text{ m}$), 为获得较好的混合效果, 使用了5层桨结构, 并用CFD技术找到了功耗

最小而流场分布较好的组合,这个结果为反应器放大提供了较好的参考。

因为实验室不能生产大型设备并验证其实用性,但用 CFD 技术却很容易完成大型反应器的设计,所以 CFD 成了反应器外观放大研究的必备技术。

3 结语

气体自吸式反应器具有诸多独特的优点,是一种高效节能的反应器,随着设计和放大技术的不断完善,在要求建设环境友好型,资源节约性社会的今天,必将有广阔的应用前景。然而对于自吸式生物反应器的放大仍有许多问题亟待解决,如比较通用的自吸式生物反应器各性质参数理论预测模型,以及能准确模拟自吸式生物反应器各种流场性质参数 CFD 数值模型。通过对影响自吸式反应器性能特性参数的不断深入研究分析,最终从理论上找到一种适合自吸式反应器的放大方法。为增进对反应器中流动、传递和吸气过程机理的认识,探索该类反应器的设计和放大的理论依据,需要做更多的理论和试验研究。

参考文献

- [1] 颜旭,顾承真,闵兆升,等. 双层桨自吸式反应器结构和性能参数的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 238-241.
- [2] 银剑中,程绍杰,贾凌云,等. 生物反应器放大因素与方法研究[J]. 化工装备技术, 2009, 30(1): 22-27.
- [3] Patil S S, Mundale V D, Joshi J B. Mechanism of gas induction in a self-inducing impeller[J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2005, 44(5): 1 322-1 328.
- [4] 李波,张庆文,洪厚胜. 气体自吸式反应器的研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(11): 1 728-1 735.
- [5] Abbott I H, Doenhoff A V. Theory of wing sections; Including a summary of airfoil data[M]. vol. II. New York: Dover, 1959: 111-123.
- [6] Wang Zhen-yuan, Xu Peng, Li Xue-hua, et al. Impact of liquid driving flow on the performance of a gas-inducing impeller[J]. Chemical Engineering and Processing, 2013, 69(3): 63-69.
- [7] White D A, de Villiers J U. Rate of induced aeration in agitated vessels[J]. Chemical Engineering Journal, 1977, 14(2): 113-118.
- [8] Sawant S B, Joshi J B. Critical impeller speed for onset of gas induction in gas inducing types of agitated contactors[J]. Chemical Engineering Journal, 1979, 18(1): 87-91.
- [9] Deshmukh N A, Patil S S, Joshi J B. Gas induction characteristics of hollow self-inducing impeller[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84(2): 124-132.
- [10] Westhuizen A P V D, Deglon D A. Solids suspension in a pilot-scale mechanical flotation cell: A critical impeller speed correlation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(8): 621-629.
- [11] Martin G Q, Shell D C. Gas-inducing agitator[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1972, 11(3): 397-404.
- [12] Ashwin W Patwardhan, Jyeshtharaj B Joshi. Design of gas-inducing reactors[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1999(38): 49-80.
- [13] Evans G M, Rielly C D, Davidson J F, et al. Fundamental study of gas-inducing impeller design[J]. Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 1990, 4(121): 137-152.
- [14] Achouri R, Mokni I, Mhiri H, et al. A 3D CFD simulation of a self inducing Pitched Blade Turbine Downflow[J]. Energy Conversion and Management, 2012, 64(12): 633-641.
- [15] Murthy B N, Kasundra R B, Joshi J B. Hollow self-inducing impellers for gas-liquid-solid dispersion: Experimental and computational study[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 141(1): 332-345.
- [16] Murthy B N, Deshmukh N A, Patwardhan A W, et al. Hollow self-inducing impellers: Flow visualization and CFD simulation[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(14): 3 839-3 848.
- [17] Fonte C P, Pinho B S, Santos-M V. Prediction of the induced gas flow rate from a self-inducing impeller with CFD[J]. Chemical Engineering & Technology, 2014, 37(4): 571-579.
- [18] 张庆文,刘永奎,石东升,等. 自吸式反应器特性参数的实验研究[J]. 化学工程, 2011, 39(12): 77-80.
- [19] Joshi J B, Sharma M M. Mass transfer and hydrodynamic characteristics of gas inducing type of agitated contactors[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1977, 55(6): 683-695.
- [20] 张少坤,尹侠. 双层桨搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 71-73.
- [21] Barailler F, Heniche M, Tanguy P A. CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(9): 2 888-2 894.
- [22] 温佳文,石东升,宋晓丽,等. 自吸式反应器功率消耗与气含率的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 241-244.
- [23] 鞠凡,程振民,陈建华,等. 双层桨结构自吸式反应器的气含率[J]. 华东理工大学学报:自然科学版, 2009, 35(5): 667-672.
- [24] Jyh-Chen, Yung-Chien Hsu, Chih-Chu Lin, et al. Application of gas-inducing reactor to obtain high oxygen dissolution in aeration process[J]. Water Research, 2003, 37(12): 2 919-2 928.
- [25] Gavrilescu M, Toduse R Z. Concentric-tube airlift bioreactors Part I: Effects of geometry on gas holdup[J]. Bioprocess Engineering, 1998, 19(11): 37-42.
- [26] Becker S, Sokolichin A, Eigenberger G. Gas-liquid flow in bubble columns and loop reactors; Part II. Comparison of detailed experiments and flow simulations[J]. Chemical Engineering Science, 1994, 49(24): 5 747-5 762.
- [27] Veera U P, Patwardhan A W, Joshi J B. Measurement of gas hold-up profiles in stirred tank reactors by gamma ray attenuation technique[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2001, 79(6): 684-688.
- [28] Vial C, Poncin S, Wild G, et al. Experimental and theoretical analysis of hydrodynamics in the riser of an external loop airlift reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(22/23): 4 745-4 762.

- [29] Patwardhan A W, Joshi J B. Hydrodynamics of a stirred vessel equipped with a gas-inducing impeller[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36(9): 3 904-3 914.
- [30] Saravanan K, Joshi J B. Fractional gas hold-up in gas inducing type of mechanically agitated contactors[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1996, 74(1): 16-30.
- [31] 郭建维, 崔英德. 生化反应器的传质性能[J]. *食品与机械*, 2001(4): 33-34.
- [32] Kasundra R B, Kulkarni A V, Joshi J B. Hydrodynamic and mass transfer characteristics of single and multiple impeller hollow self-inducing reactors[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(8): 2 829-2 841.
- [33] Poncina S, Nguyena C, Midouxa N, et al. Hydrodynamics and volumetric gas-liquid mass transfer coefficient of a stirred vessel equipped with a gas-inducing impeller[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002(57): 3 299-3 306.
- [34] Yu He-sheng, Tan Zhong-chao. New correlations of volumetric liquid-phase mass transfer coefficients in gas-inducing agitated tank reactors[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2012, 10(1): 1-20.
- [35] Ryma A, Sonia B H, Hatem D, et al. Volumetric mass transfer coefficient and hydrodynamic study of a new self-inducing turbine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 71(7): 69-75.
- [36] Ye Qin, Li Zhi-min, Wu Hui. Principle and performance of gas self-inducing reactors and applications to biotechnology[J]. *Advances In Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2015, 152: 1-33.
- [37] Mikkel N, Marie V, Alvin W, et al. Mixing by rotary jet heads: Indications of the benefits of head rotation under turbulent and transitional flow conditions[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(12): 1 454-1 461.
- [38] Scargiali F, Russo R, Grisafi F, et al. Mass transfer and hydrodynamic characteristics of a high aspect ratio self-ingesting reactor for gas-liquid operations[J]. *Chemical Engineering Science: Journal Internat*, 2007, 62(5): 1 376-1 387.
- [39] 张志强. 自吸式反应器的流体力学特性数值分析及放大[D]. 南京: 南京工业大学, 2015: 75-80.
- [40] 张超. 种分槽高性能 HSG/HQG 搅拌装置的研发[J]. *轻金属*, 2014(5): 20-24.

(上接第 120 页)

- [8] 马涛, 李海峰, 张海红. 樱桃番茄采后品质变化的介电特性研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(21): 107-111.
- [9] Nelson S O, Forbea W R, Lawrence K C. Peanittivities of fresh fruits and vegetables firm 0.2 to 20 GHz[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1994, 29(2): 81-83.
- [10] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 286-288.
- [11] 马雪莲. 采后灵武长枣电学特性和生理特性关系的研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2015: 10-14.
- [12] 王慧倩, 张海红, 周世平, 等. 基于介电特性的枣果品种识别研究[J]. *食品科技*, 2014, 39(7): 304-308.
- [13] Soltani M, Alimardani R, Omid M. Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105: 625-631.
- [14] 周世平. 灵武长枣贮藏过程中介电特性与品质变化的相关性研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2014: 9-14.
- [15] 许铭强, 陈恺, 张艳艳, 等. 干制温度对枣果实质构性能的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 59-70.
- [16] 谭谊谈, 曾凯芳. 鲜切果蔬酶促褐变关键酶研究进展[J]. *食品科学*, 2011(17): 376-379.
- [17] 任雪梅, 王文特, 田洪芸, 等. 比色法测定鸭油中的丙二醛[J]. *山东农业科学*, 2014, 46(1): 117-119.
- [18] 赵梅霞, 闫师杰, 肖丽霞, 等. 红外 CO₂ 分析仪测定果实呼吸强度参数初探[J]. *现代仪器*, 2005(2): 30-32.
- [19] 颜敏华, 吴小华, 李国峰, 等. 灵武长枣呼吸特性研究[J]. *保鲜与加工*, 2008(3): 28-30.
- [20] 郭晓丹, 张海红, 周世平, 等. “灵武长枣”的介电特性和内在品质的关系[J]. *北方园艺*, 2014(11): 1-6.

(上接第 182 页)

- [14] 祝银银, 张慧, 徐聚, 等. 热烫对真空油炸豌豆品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2013(4): 375-380.
- [15] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 30-31.
- [16] 张慧君, 宋春丽, 李文娟, 等. 微波钝化马齿苋过氧化物酶活力的研究[J]. *食品与机械*, 2012, 28(3): 199-202.
- [17] 彭丹, 邓洁红, 谭兴和, 等. 速冻花椰菜漂烫工艺的研究[J]. *现代食品科技*, 2010, 26(4): 377-379, 341.
- [18] 郭楠. 漂烫、预油炸对速冻马铃薯薯条品质影响的研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014: 33-34.
- [19] 汪兰, 邓乾春, 张芸, 等. 银杏淀粉颗粒结构及物化特性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 22(4): 66-69.
- [20] 魏显华, 党斌. 马铃薯淀粉糊化工艺研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(12): 6 512-6 514.
- [21] 饶先军, 汪立成, 刘春梅, 等. 预糊化替代复合磷酸盐在油炸蚕豆中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012(21): 242-245.
- [22] Shyu S L, Hau L B, Hwang L S. Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips[J]. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2005, 85(11): 1 903-1 908.
- [23] Bunge A, Moyano P, Rioseco V. NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes[J]. *Food Research Internat*, 2003, 36(2): 161-166.
- [24] Graham-Acquaah S, Ayernor G S, Bediako-Amoa B, et al. Effect of blanching and frying on textural profile and appearance of yam (*Dioscorea rotundata*) french fries[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(1): 19-29.
- [25] Agblor A, Scanlon M G. Processing conditions influencing the physical properties of French fried potatoes[J]. *Potato Research*, 2000, 43(2): 163-177.