

组合转子管式光生物反应器气液两相流混合特性模拟研究

郑 麟 关昌峰* 阎 华 杨卫民

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 通过 Fluent 流场分析软件对组合转子管式光生物反应器气液两相流混合特性进行模拟。以欧拉多相流模型、 $k-\varepsilon$ 湍流模型为依据, 分别对无内置转子光管、内置两叶片转子管、内置翼片转子管在多种倾斜角度下的速度云图、旋流数、气含率、气相速度、湍动能进行分析。结果表明: 内置组合转子能够提高流体湍动程度, 促进流体混合传质; 翼片转子由于其特殊的结构能够显著增加管式光生物反应器中的气含率, 提高气液两相间传质效果, 传质效果相较于两叶片转子管和光管分别提高 53.7% 和 26.5%; 随着管路倾角由 0° 增大至 90° , 流体平均湍动能逐渐增加, 内置组合转子后平均湍动能增加更加明显, 与两叶片转子相比, 翼片转子在 0° 和 30° 情况下混合传质效果更好。

关键词: 管式光生物反应器; 组合转子; 气液两相流; 数值模拟

中图分类号: Q819 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.03.002

引 言

随着对能源需求的不断增加以及传统能源的日渐枯竭, 寻找新能源成为人们迫切需要解决的问题。在众多的可再生新能源中, 生物柴油由于其良好的燃料性能和环保可再生的特性, 被认为是最理想的传统能源替代品。微藻是制备生物柴油的优良原料, 具有生长周期短、含油量高等特点^[1]。此外, 微藻在食品医药、环境监测、基因工程等方面都有很广泛的应用, 商业价值极高, 而对微藻进行规模化、工业化培养是实现其价值的基础。

管式光生物反应器(T-PBR)是一种可用于微藻光合培养的装置, 具有比表面积大、单位产量高、封闭抗污染等优点^[2]。但由于反应器自身结构细长, 易导致混合传质效果不佳、溶氧积累严重等问题, 不利于微藻的生长而且清洗较为困难^[3]。针对这些问题, 本课题组提出了在管式光生物反应器中安装组合转子的方法^[4], 用于提高其混合传质效果并减少微藻附壁生长, 降低清洗难度。黄新雪^[5]探究了

转子导程、液速、气速等变量对组合转子管式光生物反应器内气液两相流混合状况的影响。在管式光生物反应器中, 微藻生长所需的碳源主要由通入的空气或 CO_2 提供。反应器内部在组合转子作用下, 形成由气、液两种流体组成的复杂流场环境, 因此提高气液混合能力对于微藻吸收所需碳源具有重要意义^[6]。本文利用 Fluent 流场分析软件对组合转子管式光生物反应器中气液两相流混合特性进行模拟, 特别是探究了一种新型翼片转子的混合性能以及不同倾角条件下两相流流体的混合状态, 以寻求更好的促进气液两相流混合的方法。

1 模型的建立

1.1 组合转子结构及转速测量

选定的组合转子结构如图 1 所示。图 1(a) 为两叶片转子, 它主要由内部中空的转轴及对称的叶片组成, 叶片与转轴呈螺旋状扭曲排布。中空转轴两端分别设有凸台和凹台, 用于相邻转子间的连接与配合, 使转子在转动时保持同轴, 减少磨损。在每个叶片的迎水侧还设有导流槽, 导流槽沿轴向逐渐收窄, 用于降低转子对流体的阻力。图 1(b) 为翼片转子, 相较于两叶片转子, 其在叶片外缘背水侧设有呈一定角度且与空心转轴同心的弧形折边翼片。

组合转子的转速是建立模型的关键参数, 转速的快慢影响着转子对流体的扰动程度。本课题组在

收稿日期: 2017-12-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0302000)

第一作者: 男, 1992 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: Gcf@mail.buct.edu.cn

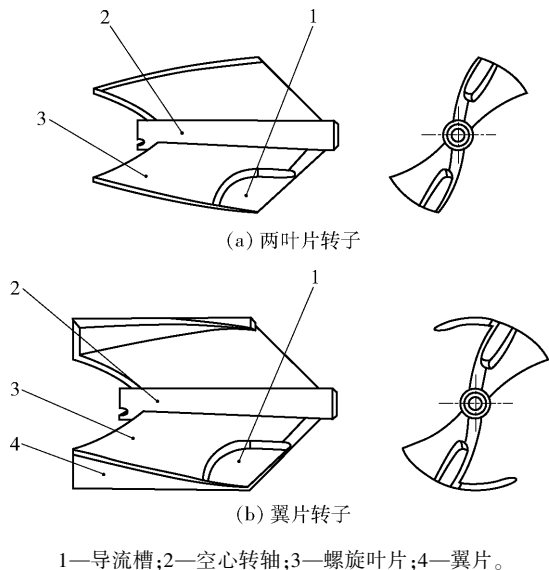


图1 组合转子结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the combined rotors

前期的实验及研究中发现,由于转子结构的低流阻特性,流体在流经转子串时动能损失较小,组合转子串在转动时几乎保持同步的转动状态^[7]。因此,本文假设转子串中同种转子的转速相同。该假设大大简化了模拟难度,也为实验测量转子转速提供方便。

根据上述假设,对某一类型单个转子进行转速测量,测量的结果即可代表该类型转子串的转速。实验时,在被测量转子的叶片上粘贴反光贴纸,置于管路中,液体流速设置为 0.5 m/s,气体流速设置为 0.3 m/s,通过光电转速测量装置进行实时测量,每类转子转速测量 5 次,取平均值,即为该类转子的转速。测量结果为:两叶片转子转速 12.23 rad/s,翼片转子转速 7.87 rad/s。

1.2 计算数值模型

1.2.1 物理模型

采用 Solidworks 软件建立带有转子串的管路模型,如图 2 所示。管路总长 500 mm,主管路直径 24 mm,气相入口直径 6 mm,单一转子最大外径 22 mm,长 27.5 mm;选用 14 个转子组成转子串,转子串起始端距管路入口端 57.5 mm。考虑到计算时间与计算机内存的限制,对转子串实际结构进行简化,忽略对流场分布影响较小的柔性轴、限位件、两端挂件等辅助装置,将中空转轴简化为实心轴并使各转子前后连接形成一个整体。

1.2.2 网格划分

将建好的物理模型导入 ICEM 软件进行网格划分处理。经过网格独立性验证(图 3)证明:当最大

网格设置为 1 mm 时,模型特征值受网格尺寸变化的影响已经很小,满足计算精度要求并且在计算机内存限制范围之内。为突出模拟研究重点,减少非气液两相对模拟的影响,将转子串的实体部分掏空,仅考虑其转子面的旋转运动;对管路近壁面处的网格进行细分加密,突出探究在组合转子作用下流场对流体边界层的影响^[8]。经过计算,未安装组合转子的对照光管的网格数为 395 060,两种安装组合转子管路光管的网格数在 3 100 000 ~ 3 200 000。

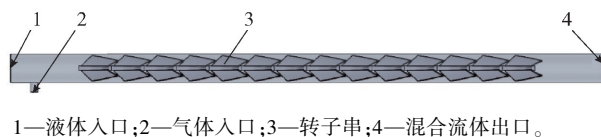


图2 管路模型示意图

Fig. 2 Model of the T-PBR

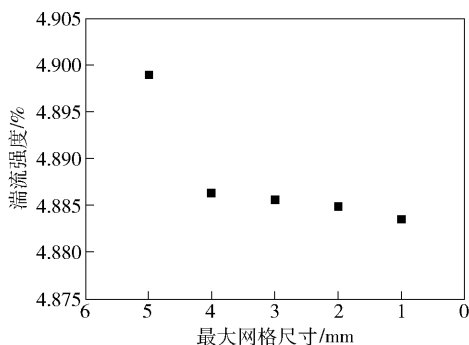


图3 网格独立性验证

Fig. 3 Verification of grid independence

2 边界条件的选择

由于本文模拟中涉及相的混合和分离,考虑到计算精度,选择欧拉(Eulerian)多相流模型,黏性模型选择 $k-\varepsilon$ 标准湍流模型,标准壁面函数,其余模型默认关闭^[9]。由于藻液密度与水接近,故将液相流体设为水,气相流体设为空气。液相和气相入口设置为速度入口,混合流体出口设置为压力出口。设置液相流速为 0.5 m/s,气相流速为 0.3 m/s,无内置转子光管气泡直径设为 5 mm,两种内置转子管气泡直径设为 3.35 mm^[10],转子壁面设置为绕中心轴旋转,转速依据测量结果设置。求解方法选择适用于多相流模型的 Phase Coupled SIMPLE 算法,除体积分数设置为 QUICK 外,其余参数均设为二阶迎风格式。

迭代次数初步设为 2 000 步,当管路进出口质量流量差值在 0.1% 以下,各项残差曲线处在 10^{-4} 以下且不再大幅波动时,可认为求解收敛。

3 结果与讨论

3.1 模拟方法的验证

如图 4 所示,对两叶片转子管液相轴向速度模拟结果和文献中 PIV 实验结果^[11]进行比较。可以看出,管路中心和管壁处流体的速度较低,而在管路中心两侧的流体速度会随着转子的排布产生周期性的波动。此数值模拟结果与 PIV 实验结果吻合。

如图 5 所示,对两叶片转子管气相分布模拟结果和气液两相流可视化实验结果^[5]进行比较。可以看出,气相流体被转子切割,增加了流体的湍动程度。此数值模拟结果与可视化实验结果吻合。

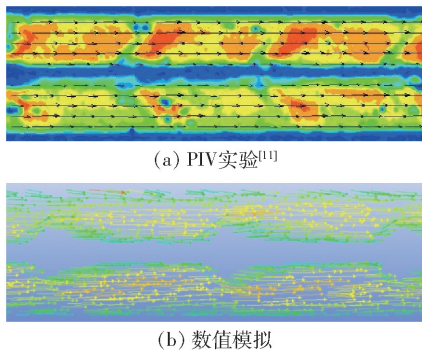


图 4 两叶片转子管液相轴向速度分布实验与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated results of axial velocity distribution in the liquid phase of the tube with two blade rotors

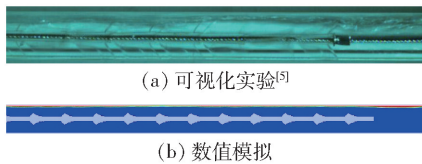


图 5 两叶片转子管气相分布实验与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated results of the gas phase distribution of the tube with two blade rotors

两组模拟结果与文献中实验结果相吻合,证明了该模拟方法的可靠性。

3.2 不同种类转子的气液两相流特性

对两叶片转子管、翼片转子管、无内置转子光管在水平放置时的速度、旋流数、气含率等特性参数进行分析。

管路的截面速度分布如图 6 所示。将 3 根管分别截取距管路入口处 240 mm 的管程中部与距管路入口处 460 mm 的管程尾部进行比较。对比图 6

(a)、(c)、(e)和图 6(b)、(d)、(f),相较于无内置光管,内置转子后流体的流速更快,高速流体更加接近管壁,有利于破坏层流边界层,促进混合传质,翼片转子对流场的扰动作用优于两叶片转子。这是因为转子旋转对流体产生扰动,部分流体产生了径向以及周向速度分量,这部分流体又对原轴向流动流体产生冲击,使得流体流速分布更加均匀,而翼片转子的结构比两叶片转子对流体的裹挟能力更强,产生的扰动更大。对比图 6(a)和(b)、(c)和(d)、(e)和(f)可知,转子管在管程中部流体受到转子持续作用,流体流速快,速度梯度明显,在管程尾部,由于脱离转子作用,流体流速降低,旋流效果减弱,无内置转子光管在管程中、尾部并无明显变化。这是因为管程中部转子对流体产生持续扰动,使得流体流速分布均匀,而在管路尾部没有转子,失去转子提供的径向及周向动力,流向趋于一致,流体间扰动减弱。

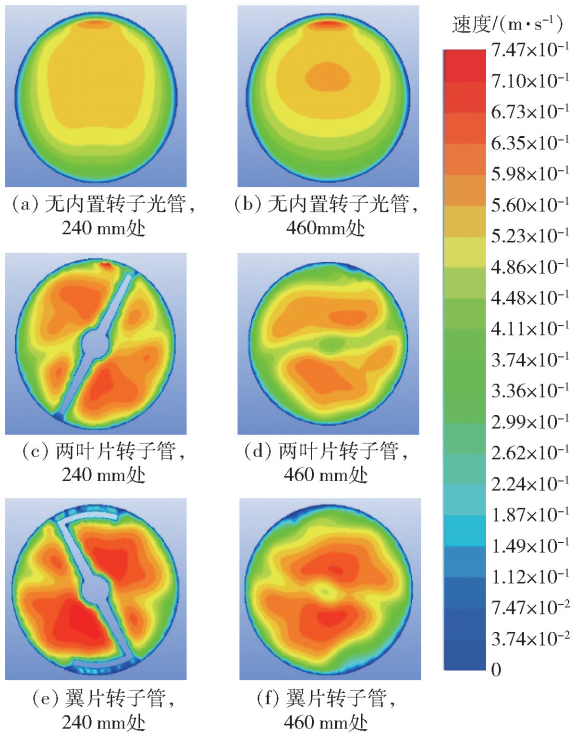


图 6 管路横截面液相速度分布云图

Fig. 6 Liquid velocity diagram of cross section of T-PBRs

流体的径向速度即光照方向速度,是评价管式光生物反应器性能的重要指标,也是评价组合转子优劣的重要依据。沿管路径向方向,光照强度逐渐衰减,管路中心的光照强度低,微藻难以生长。因此需要流体带动微藻在径向上不断循环来保证微藻进行光合作用所需的光照。图 7 为 3 种管路沿管程方

向径向速度变化。从图中可以看出无内置转子光管沿管程方向流体的径向速度变化极小,而两种转子管的径向速度变化大致相同且呈现周期性的剧烈脉动,间接增加了微藻的受光面积,有利于提高微藻对光照的利用,促进微藻的生长。

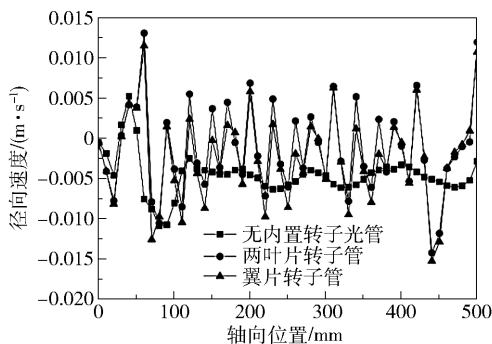


图7 3种管路沿程径向速度变化

Fig.7 Radial velocity for the three types of T-PBRs

通常在探究离心泵、旋流器^[12-13]等强旋转流体流动特性时会用到旋流数,它是用来衡量流体间混合性能的重要参数,用以表征流体在旋转叶片下的旋流强度。旋流数越大则流体的混合能力越强^[14],其表达式为

$$Sn = \frac{\int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} UVr^2 dr d\theta}{D/2 \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} U^2 r dr d\theta} \quad (1)$$

其中, U 、 V 分别为流体的平均轴向速度和平均切向速度, D 、 r 、 θ 分别为管路直径、径向距离和角度。

本课题组在之前研究中已经将旋流数用于表征转子作用下流体的旋流强度^[7],故本文也采用此参数。3种管路在沿管程方向上旋流数的变化如图8所示,图中两叶片转子管与翼片转子管在到达转子区域后旋流数迅速提高。在管程中部,两叶片转子的旋流数基本稳定在0.14,而翼片转子旋流数略有下降趋势。在管程尾部,脱离转子区域后两种转子旋流数都有一个阶跃式提高而后逐渐降低。作为对比,无内置转子光管在整个管程中旋流数几乎为零。从式(1)可以看出,旋流数大小受流体轴向以及周向速度的影响。在无内置转子光管以及转子管入口段,由于没有转子扰流作用,流体几乎没有周向速度,以至旋流数几乎为零。当流体流入转子段后,转子的旋转扰动作用使流体迅速产生周向分速度,两叶片转子由于转速较高,流阻较小,旋流数很快达到一个稳定值;翼片转子由于裹挟作用在将气相从管路顶部推入底部的过程中,气相占据了部分液相的

空间,导致液相流体的切向速度降低,使得管路截面平均切向速度与轴向速度的比值减小,最终导致旋流数降低。在管程尾部,由于流体突然失去转子的推动以及束缚,周向与轴向的速度比会突然增大,旋流数迅速提高,而后逐渐降低。

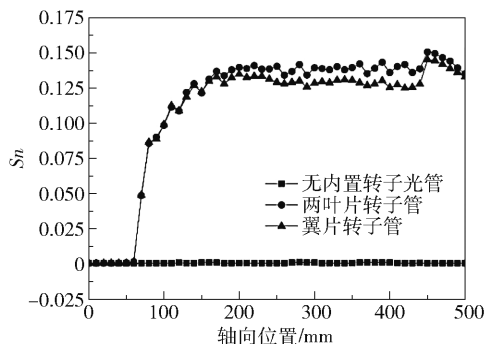


图8 3种管路沿程旋流数变化

Fig.8 Swirl numbers for the three types of T-PBRs

气含率是气相体积占气液混合物总体积的分数,气含率的大小能够反映出气液两相流的混合传质效果^[15]。图9所示为3种管路沿程气含率变化图,从图中可以看出两种转子管气含率都呈现两端高中间低的趋势,翼片转子管气含率总体上高于两叶片转子管,而无内置转子光管在气体入口处气含率有所升高之后趋于平缓,总体上介于翼片转子管和两叶片转子管之间。

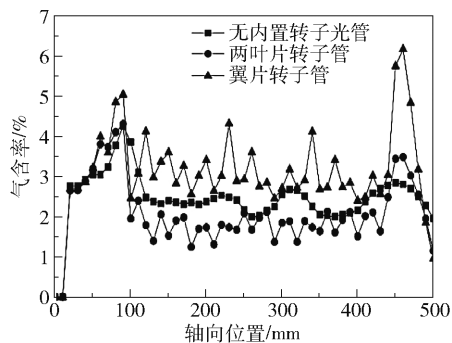


图9 3种管路沿程气含率变化

Fig.9 Gas holdup for the three types of T-PBRs

在气体入口处,气相流动方向垂直于液相流动方向,气相停滞时间较长,气含率迅速升高。当气相流入两叶片转子管的转子段后,转子的旋转推动密度小的气相流动,气相停滞时间减小,气含率反而小于无内置转子光管。翼片转子气相尽管也受到转子旋转的推动,但和两叶片转子相比,翼片转子的转速较慢,同时由于其特有的夹角结构能够在旋转中将浮于液面之上的气相再次带入管路底部,延长气相的停留时间,增大了气液两相的接触面积,提高了气

液传质效率。3 种管路的平均气含率见表 1,翼片转子管平均气含率相较于两叶片转子管和无内置转子光管分别提高了 53. 7% 和 26. 5%。

表 1 3 种管路平均气含率

Table 1 The average gas holdup for the three types of T-PBRs

管路类别	平均气含率/%
无内置转子光管	2. 57
两叶片转子管	2. 20
翼片转子管	3. 21

3. 3 不同倾角条件下气液两相流特性

前人实验发现,在水平放置的管式光生物反应器气液两相流混合过程中,气相由于自身密度小,很快积聚到管路顶部,导致气液相间接触面积减小,不利于混合传质^[11]。如果将管式光生物反应器倾斜或竖直放置,放置方案如图 10 所示,在组合转子作用下,气相更加分散,相间接触面积加大,更有利于混合传质,且能够减小微藻的附壁生长。3 种管路不同倾角下气相分布如图 11 所示。从图中可以看出,管路倾角越大,气相上浮至管壁所需长度越长。当管路垂直放置时,气相只沿管路轴向运动,不会积聚在管壁,这种现象在两种内置转子管中尤其明显。下文通过管路气相速度分布和流体平均湍动能两个参数分析管式光生物反应器不同倾角条件下气液两相流特性。

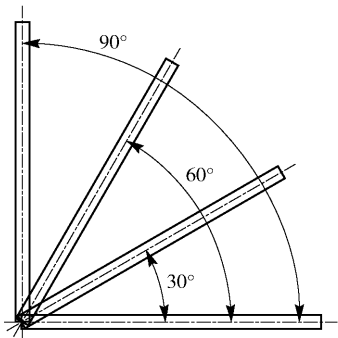


图 10 管路放置倾角示意图
Fig. 10 Dip angle diagram of the T-PBRs

陈智杰等^[16]研究表明在气液两相流中,提高气速有利于促进气液混合。图 12(a)所示为无内置转子光管不同倾角条件下的沿程气速变化图。从图中可以看出 0°、30°、60° 3 种倾角条件下,气速均是先迅速增加达到峰值,而后又迅速降低,逐渐稳定。倾角越大,气速峰值越高,达到峰值所需的距离越长。在 90°倾角下,气速沿管程缓慢增加,逐渐稳定。这

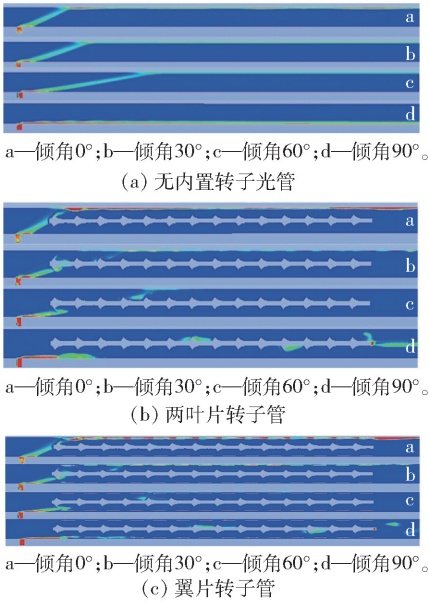


图 11 3 种管路不同倾角条件下气相沿程分布云图
Fig. 11 Gas phase distribution for the three types of T-PBRs with different dip angles

种曲线走势与图 11(a)的气相分布云图相呼应。这是因为 0°、30°、60° 3 种倾角条件下,气相进入管路后受到竖直向上的浮力和沿管程方向的液相推动,气速提高极快,当气相达到管路顶壁时,与管程方向垂直的浮力分量不再给气相提供动力,同时管壁也会阻碍气相的流动速度,导致气速迅速降低。90°倾角时气相受到的浮力与液相推动力方向一致,但由于缺少径向搅动,导致气相全程附管壁上升,阻碍了气相流动速度的提高。

图 12(b)、(c)分别为两叶片转子管和翼片转子管不同倾角条件下的沿程气速变化图。4 种倾角的沿程气速走势与图 12(a)无内置转子管相同,但由于转子的扰流推动作用,气速整体提高。特别是 90°倾角下,转子的转动使气相在管路中均匀分布,消除了管壁的阻碍作用,更加显著地提高了气速。翼片转子由于旋转速度低于两叶片转子,气体推动作用弱于两叶片转子,因此 4 种倾角下的气速都略低于两叶片转子。

湍动能 K 是衡量湍流混合能力的重要指标,湍动能越大,表明引起的物质与能量交换越剧烈^[17],从而能够更好地促进微藻对营养的吸收和生长。湍动能可用湍流强度估算,其表达式为

$$K = \frac{3}{2}(uT_1)^2 \tag{2}$$

式中: u 为平均速度, T_1 为湍流强度。图 13 为 3 种

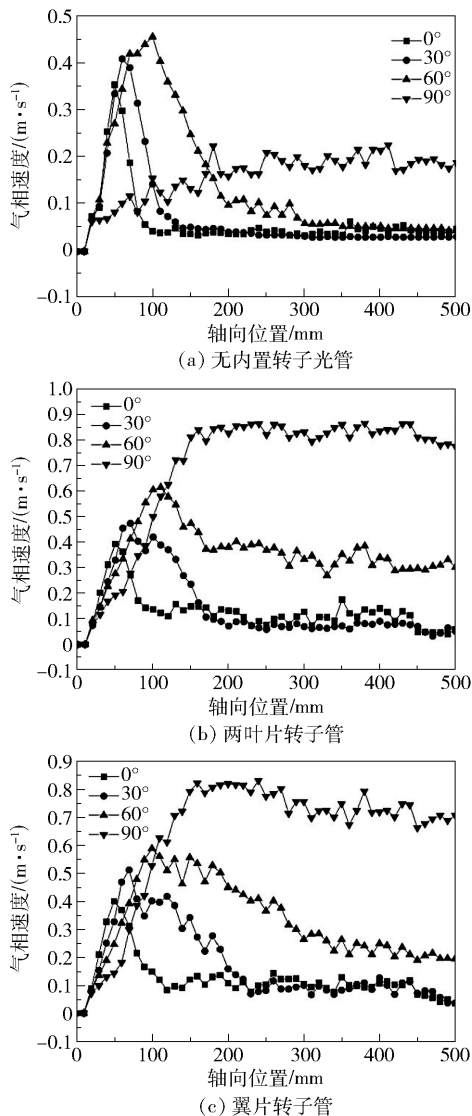


图 12 3 种管路不同倾角条件下沿程气速变化

Fig. 12 Velocity of gas flow for the three types of

T-PBRs with different dip angles

管路不同倾角条件下的流体平均湍动能。从图 13 (a) 无内置转子光管 4 种倾角下的平均湍动能可以看出, 从 0° 至 60° , 随着管路倾斜角度的增大, 流体的平均湍动能逐渐增加。这是因为气相速度随管路倾斜角度的增大而增大, 气速提高促进了液相的流动并且气泡在上升时会产生无规则的摆动, 增加了整个流体的湍动程度。而在 90° 倾角条件下, 气相始终附着管壁上升, 抑制了流体的湍动程度, 使得湍动能略低于 60° 倾角条件。从图 13 (b)、(c) 两种转子管的平均湍动能可以看出, 转子的加入显著提高了流体的平均湍动能, 特别是在 90° 倾角下, 其湍动能数值几乎是 60° 倾角条件下平均湍动能数值的两倍。另外, 比较图 13 (b)、(c) 可知, 在 0° 、 30° 条件

下翼片转子的湍动能较高, 在 60° 、 90° 条件下两叶片转子的湍动能较高。

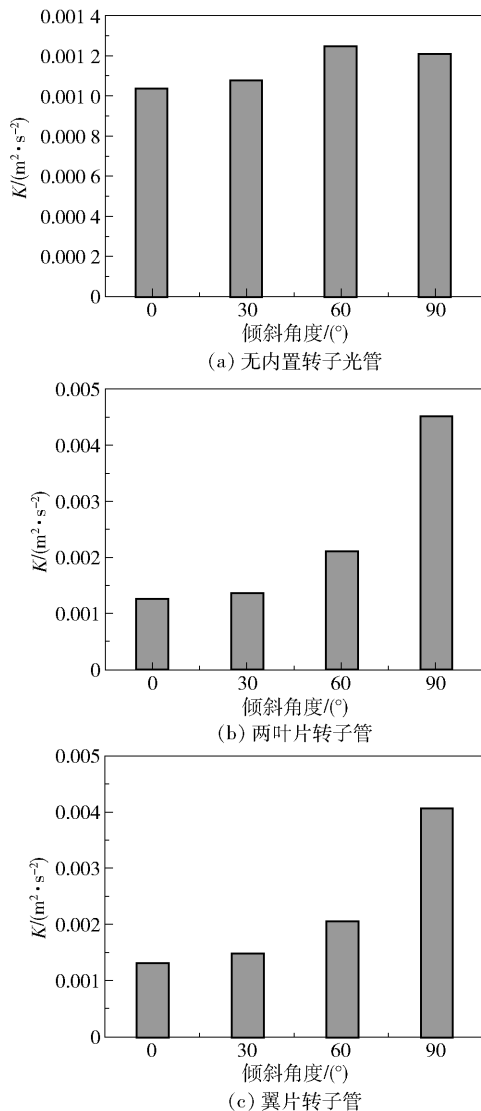


图 13 3 种管路不同倾角条件下的流体平均湍动能

Fig. 13 The average turbulent kinetic energy for the three types of T-PBRs with different dip angles

3.4 3 种管路阻力压降分析

图 14 为 3 种管路水平放置时的沿程压力损失。以管路出口压力为基准, 无内置转子光管压降为 97.25 Pa , 两叶片转子管压降为 473.38 Pa , 翼片转子管压降为 576.13 Pa 。转子的加入增加了压力损失, 部分压力转化为转子的转动动力。根据以往的研究和实验来看, 此压力损失在可接受范围内, 对实际应用影响很小。

4 结论

(1) 翼片转子特有的夹角结构能够显著提高管

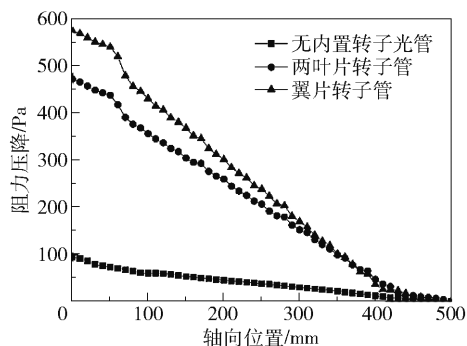


图14 3种管路沿程压力损失

Fig. 14 Drop of pressure for the three types of T-PBRs

式光生物反应器中的气含率,提高气液两相传质效果,相较两叶片转子管和光管分别提高 53.7% 和 26.5%,有利于微藻对碳源的吸收。

(2) 0° 、 30° 、 60° 3 种不同倾斜角度下管路沿程气速均先急速增加至峰值再逐渐减小, 90° 下管路沿程气速逐渐增加并稳定在峰值;在 90° 情况下内置转子能够明显提高气相速度,增加流体扰动程度,有利于促进气液混合。

(3) 管式光生物反应器放置倾角由 0° 至 90° ,管路流体平均湍动能逐渐增加,内置转子后平均湍动能增加更加明显。可以认为,在 90° 倾角、内置转子条件下,气液两相流流体的混合能力更强,更有利于微藻的生长;和两叶片转子相比,翼片转子在 0° 和 30° 下效果更好,更适用于水平放置的管式光生物反应器中。

参考文献:

- [1] 刘振强,陆向红,晏荣军,等. 高密度高含油率微藻培养研究进展[J]. 农业工程学报,2011,27(增刊1): 210-217.
LIU Z Q, LU X H, YAN R J, et al. Advances on technology of high density and high lipid microalgae culture [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 210-217. (in Chinese)
- [2] GUPTA P L, LEE S M, CHOI H J. A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2015, 31(9): 1409-1417.
- [3] UGWU C U, OGBONNA J C, TANAKA H. Characterization of light utilization and biomass yields of *Chlorella sorokiniana* in inclined outdoor tubular photobioreactors equipped with static mixers [J]. Process Biochemistry, 2005, 40(11): 3406-3411.
- [4] 杨卫民,丁玉梅,耿立波,等. 转子式自清洁强化传热

装置;CN 2833494Y [P]. 2006-11-01.

YANG W M, DING Y M, GENG L B, et al. A self-cleaning heat transfer device with a rotor;CN 2833494Y [P]. 2006-11-01. (in Chinese)

- [5] 黄新雪. 螺旋转子管式光生物反应器流体动力学特性研究[D]. 北京:北京化工大学,2017.
HUANG X X. Study of hydrodynamic behaviors of tubular photobioreactor with inserted helical rotors[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 杜奎. 利用烟道气培养能源微藻小球藻和栅藻的研究[D]. 武汉:中国科学院大学,2016.
DU K. Studies on cultivation of energy microalgae *Chlorella* and *Scenedesmus* with flue gas[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [7] 黄新雪,关昌峰,阎华,等. 内置螺旋转子管式光生物反应器的流动特性数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2016,43(6):15-21.
HUANG X X, GUAN C F, YAN H, et al. Numerical simulation of hydrodynamic characteristics in tubular photobioreactors with inserted helical rotors [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2016, 43(6): 15-21. (in Chinese)
- [8] 唐志伟,闫桂兰,高丽丽. 管内插入扭带的强化传热数值模拟[J]. 工程热物理学报,2008,29(7):1211-1214.
TANG Z W, YAN G L, GAO L L. Numerical simulation of heat transfer enhancement for twisted inserts in tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(7): 1211-1214. (in Chinese)
- [9] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战: Fluent Gambit Icem CFD Tecplot [M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
LI P F, XU M Y, WANG F F. Proficient in CFD engineering simulation and case of actual combat [M]. Beijing: Post&Telecom Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 韩路长. 搅拌釜反应器内流体流动的 CFD 数值模拟[D]. 湘潭:湘潭大学,2005.
HAN L C. Numerical simulation of fluid flow in stirred tank reactors using CFD method[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2005. (in Chinese)
- [11] 何立臣,关昌峰,张崇文,等. 换热管内安装转子的 PIV 实验[J]. 化工学报,2014,65(12):4755-4759.
HE L C, GUAN C F, ZHANG C W, et al. PIV experiment for tube fitted with rotors [J]. CIESC Journal, 2014, 65(12): 4755-4759. (in Chinese)

- [12] 徐一,周力行,曹东. 旋流数为 1.0 的强旋湍流两相流动的 PDPA 实验[J]. 化工学报,2000,51(1):39-44.
XU Y, ZHOU L X, CAO D. Experiment on strongly swirling turbulent gas-particle flows with swirl number of 1.0[J]. CIESC Journal, 2000, 51(1): 39-44. (in Chinese)
- [13] 王小川,贺国,郭朝有,等. 旋流强度对气/雾两相传热传质的影响[J]. 上海交通大学学报,2013,47(11):1767-1772.
WANG X C, HE G, GUO C Y, et al. Effect of swirl intensity on heat and mass transfer in gas-droplets two-phase flow[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(11): 1767-1772. (in Chinese)
- [14] GUPTA A K, LILLEY D G, SYRED N. Swirl flows [M]. Tunbridge Wells: Abacus Press, 1984.
- [15] 肖浩飞. 曝气池内气液两相流 CFD 数值模拟[D]. 上海:东华大学,2010.
XIAO H F. CFD numerical simulation of gas-liquid flow in aeration tank [D]. Shanghai: Donghua University, 2010. (in Chinese)
- [16] 陈智杰,姜泽毅,张欣欣,等. 微藻培养光生物反应器内传递现象的研究进展[J]. 化工进展,2012,31(7):1407-1413,1418.
CHEN Z J, JIANG Z Y, ZHANG X X, et al. Research progress of transport phenomena within photobioreactor for microalgae culturing [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(7): 1407-1413,1418. (in Chinese)
- [17] 王银亮,艾海男,黄维,等. 排水管道内湍动能分布特性及影响因素[J]. 环境工程学报,2015,9(8):3637-3642.
WANG Y L, AI H N, HUANG W, et al. Characteristics and influencing factors of turbulent kinetic energy distribution in sewers [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8): 3637-3642. (in Chinese)

Simulation of mixing characteristics of gas-liquid two-phase flow in a tubular photobioreactor with combined rotors

ZHENG Lin GUAN ChangFeng* YAN Hua YANG WeiMin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The mixing characteristics of gas-liquid two-phase flow in a tubular photobioreactor with combined rotors were simulated by Fluent, which is a flow field analysis software. Based on the Euler multiphase flow model and the $k-\varepsilon$ turbulence model, we analyzed the velocity nephogram, swirl number, gas holdup, gas phase velocity and turbulent kinetic energy at various angles of inclination for three different tubes: one without rotors, one with two-blade rotors and one with a folding two-blade rotors. The results showed that: the rotors can improve the fluid turbulence and promote the mass transfer of fluid; because of its special structure, the folding two-blade rotor can significantly increase the gas holdup in the tubular photobioreactor and increase the mass transfer effect between gas and liquid, which is respectively 53.7% and 26.5% higher than the values for the tube with two-blade rotor and no rotor. From 0° to 90° , the average turbulent kinetic energy of flow increases gradually in the tube, and the average turbulent kinetic energy increases significantly when the rotors are combined. Compared with the two-blade rotor, the folding two-blade rotor works better in two cases, namely 0° and 30° .

Key words: tubular photobioreactor; combined rotors; gas-liquid two-phase flow; numerical simulation

(责任编辑:吴万玲)