

文章编号: 1003-9015(2009)02-0263-07

一种新型多节隔板-平板式光生物反应器的数值和实验研究

林 晨¹, 李元广¹, 王伟良¹, 沈国敏¹, 陈剑佩², 吴洪喜³, 黄建科¹

(1. 华东理工大学 生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237; 2. 华东理工大学 联合化学反应工程研究所, 上海 200237; 3. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005)

摘 要: 光是影响光生物反应器培养效率的最主要因素之一。而在一定的外部光强下, 光生物反应器内部的混合状况对微藻细胞生长有重要影响。采用CFD (Computational Fluid Dynamics)模型对一种新型多节隔板-平板式光生物反应器在不同通气量下的流场分布进行了模拟并与 PIV(Particle Image Velocimetry)测量结果进行比较, 结果表明CFD模型可用于光生物反应器流场的模拟;利用CFD模型对不同隔板节数的平板式光生物反应器的内部流场进行了模拟, 对光照方向混合进行定量研究,并通过分析光照方向径向速度 U 、下降通道体积平均湍动能ADT、流体(藻液)绕隔板循环一周所用时间 t_c 、下降通道(光区)停留时间占藻液绕隔板循环一周所用时间的比例 ε 四个参数来优化光生物反应器的隔板节数。理论分析表明, 三节隔板-平板式光生物反应器为最佳选择, 并通过球等鞭金藻3011培养实验对此进行了验证。

关键词: CFD; PIV; 光生物反应器; 多节; 球等鞭金藻3011; 径向速度

中图分类号: Q819

文献标识码: A

Numerical and Experimental Investigation of a Novel Flat-Photobioreactor with Multistage-Separator

LIN Chen¹, LI Yuan-guang¹, WANG Wei-liang¹, SHEN Guo-min¹, CHEN Jian-pei²,
WU Hong-xi³, HUANG Jian-ke¹

(1.State Key Lab of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2.Unilab Research Center of Chemical Reaction Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China)

Abstract: Light is one of the most important factors affecting the photoautotrophic cultivation of microalgae, and the hydrodynamic performance, especially mixing, has great effects on the microalgae growth in photobioreactor (PBR) under a certain exterior light intensity. The hydrodynamic performance of a novel flat PBR with multistage-separator was simulated at different aerating rates by using computation fluid dynamics (CFD) model. The experimental results of the Particle Image Velocimetry (PIV) validate that the CFD model can be used to simulate the hydrodynamic performance of the flat PBR with multistage-separator well. Based on this result, CFD simulation was applied to compare the hydrodynamic performance of the PBR with different separator numbers, and their mixing effects in illumination direction were investigated quantitatively. The stage numbers of the separator of PBR was optimized by analyzing its effects on radial speed (U), average turbulence kinetic energy (ADT), cycle time of PBR (t_c) and the ratio of cycle time of the downer channel to cycle time of PBR (ε). The theoretical analysis results show that the PBR with three-stage separator is optimal, and this prediction was also confirmed by the experimental results of *Isochrysis galbana* 3011 cultivation.

Key words: CFD; PIV; photobioreactor; multistage; *Isochrysis galbana* 3011; radial speed

收稿日期: 2007-10-16; 修订日期: 2008-03-07。

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD09A12); “十一五”863 计划项目(2007AA09Z419)和(2007AA02Z209)。

作者简介: 林晨(1983-), 男, 福建莆田人, 华东理工大学硕士生。通讯联系人: 李元广, E-mail: ygli@ecust.edu.cn

1 前言

微藻在食品、饲料、医药等^[1]多个方面具有广泛的应用价值,同时微藻培养过程中能吸收很多有毒物质,去除空气和废气中的 CO_x 与 SO_x ^[2,3],因此可以净化空气、减少地球的温室效应^[4]。目前,高密度高品质培养是国内外微藻培养中亟待解决的难题,而应用光生物反应器是解决这一问题的的重要途径。Pulz等^[5]认为目前微藻的商业化培养规模仍然较小,主要是由于落后的光生物反应器技术。因此,光生物反应器技术的开发研究已经迫在眉睫。

光是影响微藻生长的重要因素,增强光在光生物反应器内的分布是提高微藻培养效率的重要手段,Richmond^[6]认为增强光生物反应器的内部混合是使光在光生物反应器内更均匀分布的最有效方法。目前,许多研究^[7~10]已经致力于提高光生物反应器内的混合。

计算流体力学(CFD)可以较好地模拟反应器内的混合,目前它已经广泛应用于化工、生物反应器等方面的设计。而新近发展起来的粒子成像测速技术(PIV)等测量方法能够提供流场内粒子图像、速度矢量图分布,成为CFD模拟过程控制方程校正的首选。因此采用CFD模拟与PIV等测量方法相结合已经成为研究反应器内部流场分布的新趋势^[11~16]。

对于光生物反应器来说,光照方向的混合状况是影响微藻细胞生长的重要因素。目前,对光照方向的混合状况并没有定量研究报道;多节隔板结构能够较大程度上促进光照方向的混合^[17],但目前未见对多节隔板节数优化的文献报道。本文采用CFD对一种新型多节隔板-平板式光生物反应器^[17]进行了研究,首次在光生物反应器中对光照方向混合进行定量研究,并提出了通过分析光照方向径向速度 U 、下降通道体积平均湍动能ADT、流体(藻液)绕隔板循环一周所用时间 t_c 、下降通道(光区)停留时间占藻液绕隔板循环一周所用时间的比例 ε 四个流体动力学参数对隔板节数进行优化,最终通过球等鞭金藻3011培养实验验证了分析结果。本文的研究不仅有助于深入了解多节隔板结构在提高平板式光生物反应器内部混合的作用,同时所建立的理论模型对于其他类型光生物反应器的结构优化也具有借鉴作用。

2 实验材料与方法

2.1 多节隔板-平板式光生物反应器

实验中采用15L多节隔板-平板式光生物反应器,其具体结构如图1所示。 h_0 为隔板上沿至液面距离, h_1 为隔板下沿至反应器底部距离, A_r 为上升通道截面积, A_d 为下降通道截面积, d 为各隔板之间的间隔距离,气体分布器采用橡胶管材料,管径为5 mm,橡胶管顶上开有孔径为0.5 mm的3排气孔,共150个。各排气孔两两之间成60°,气体分布器中心线与隔板下沿平齐。该反应器由有机玻璃制成。

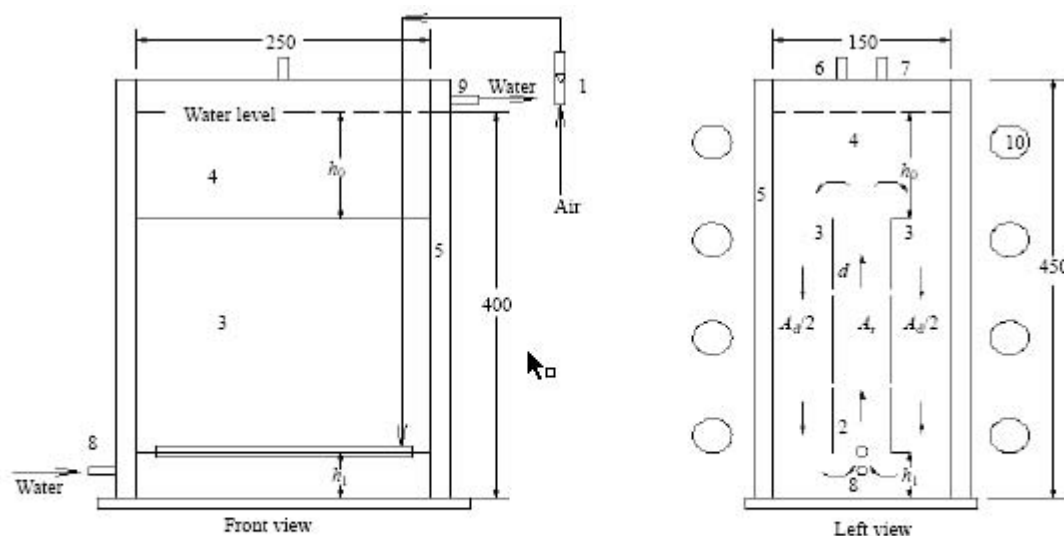


图1 15L多节隔板-平板式光生物反应器结构示意图

Fig.1 Schema of 15L multistage-separator flat-photobioreactor

1. air flowmeter 2. sparger 3. multistage separator 4. reactor chamber 5. jacket 6. air exhaust
7. sampler 8. water inlet for jacket 9. water outlet for jacket 10. lamps

2.2 CFD 模拟实验

采用CFD软件CFX10对多节隔板-平板式光生物反应器的流场进行模拟计算。用Gambit软件进行网格化前处理。为了减少模拟计算过程中的计算量,沿反应器宽度方向截取整个流场中一个厚度为15 mm的薄层作为计算对象,并设该薄层的两个端面为周期性界面(Periodic Interfaces)。模拟计算采用Eulerian-Eulerian法多相模型,其中各种湍流模型与假设如表1所示。

表1 模拟计算所用模型与假设

Table 1 Theory models and hypotheses used in the simulations

Simulation type	Steady state
Domain type	General fluid
	Fluid-Dependent turbulence model
Turbulence model	Dispersed phase zero equation k-Epsilon
Buoyant flow	
Multiphase	Ideal air & water at 25°C
Boundary conditions	Inlet (Subsonic) Outlet (Degassing) Interfaces: Periodic Wall: Slip depends on volume fraction

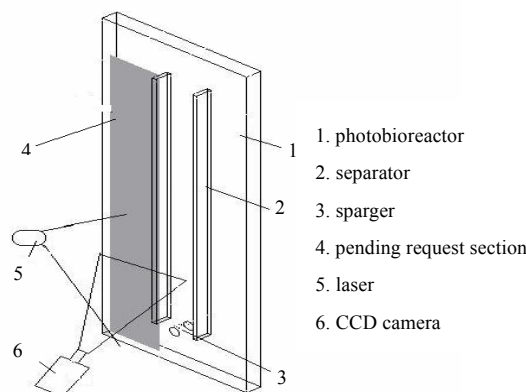


图2 PIV实验示意图

Fig.2 Schema of PIV experiment

2.3 PIV 实验

PIV 技术是近年来发展起来的一种非接触式流场测量技术,它通过对流场图像的相关分析获取流速信息,能够进行平面二维流场的测试,是一种很有效的了解流场内部速度分布的手段。本文采用 PIV 测量方法对 CFD 模拟结果进行验证。图2给出了PIV实验的示意图。图示中激光发生器5与CCD高速摄像机6成90°。在PIV实验中为了防止激光的透射,隔板由不透光材料制成。实验过程中示踪粒子采用聚酰胺粒子(PSP, 20 μm diameter, 1.03 g·cm⁻³)。由于所测反应器截面较高,CCD高速摄像机无法一次测量,所以把待测截面(图2中4)分成3段进行测量。采用 Tecplot 软件对所测数据进行后处理。

2.4 球等鞭金藻 3011 培养

2.4.1 藻种及培养基

藻种为球等鞭金藻 3011(*Isochrysis galbana* 3011),由浙江省海洋水产养殖研究所提供。

所用培养基为: NaNO₃ 100 mg·L⁻¹, KH₂PO₄ 10 mg·L⁻¹, FeC₆H₅O₇·5H₂O 0.5 mg·L⁻¹, EDTA 15 mg·L⁻¹, 维生素溶液 1 mL·L⁻¹, 用海水配制;其中维生素溶液的配方为: 维生素 B12 0.5 mg, 维生素 B1 100 mg, 蒸馏水 1000 mL。15L 多节隔板-平板式光生物反应器中海水采用煮沸消毒。

2.4.2 培养及分析测定方法

15L 多节隔板-平板式光生物反应器初始接种密度为 100×10⁴ cell·mL⁻¹ 左右,培养至藻细胞密度达到最高时结束。培养条件: 装液量 15 L, 温度 28~30℃, 起始 pH 为 8.2, 双侧连续光照, 每侧入射光强为 9000 lx 左右, 气液比设为 0.4 vvm(单位时间单位体积反应器内的通气量), 即通气量 6 L·min⁻¹。

藻细胞密度测定方法: 采用 XB-K-25 型血球计数板在显微镜下计数, 取其三次测量的平均值。

3 结果与分析

3.1 下降通道径向速度分布

光生物反应器内部的混合状况,特别是光照方向的混合,是影响微藻细胞培养效率的重要因素^[14,18]。因此模型模拟光照方向速度(即径向速度)的分布是否准确是整个流场模拟的关键。图3和图4分别给出了15L 三节隔板平板式光生物反应器内部结构为 $A_d/A_r=2.57$, $h_0=50$, $h_1=40$ 和 $d=20$ 时,不同通气量下光照方向速度即下降通道径向速度场等高线 CFD 模拟与 PIV 实测分布曲线。

从图3和图4可以看出在多节隔板的间隔处与底部,都明显存在一个速度增大区,这说明多节隔板

确实对提高流场内的径向混合有很大作用;而且随着通气量的增大,多节隔板结构在提高下降通道的径向混合的作用越明显;但对比图3与图4发现,随着通气量的增大,PIV实测顶部与CFD模拟顶部径向速度分布差异较大,这可能是由于通气量的增大导致反应器下降通道内气泡增多,从而对PIV测量结果造成误差影响。

为了能够更为直观地比较不同通气量时下降通道径向速度的大小,对整个下降通道的径向速度取平均值。图5给出了三节隔板平板光生物反应器,在不同通气量下,采用CFD模拟与PIV测量得出的光生物反应器下降通道平均径向速度的分布曲线。

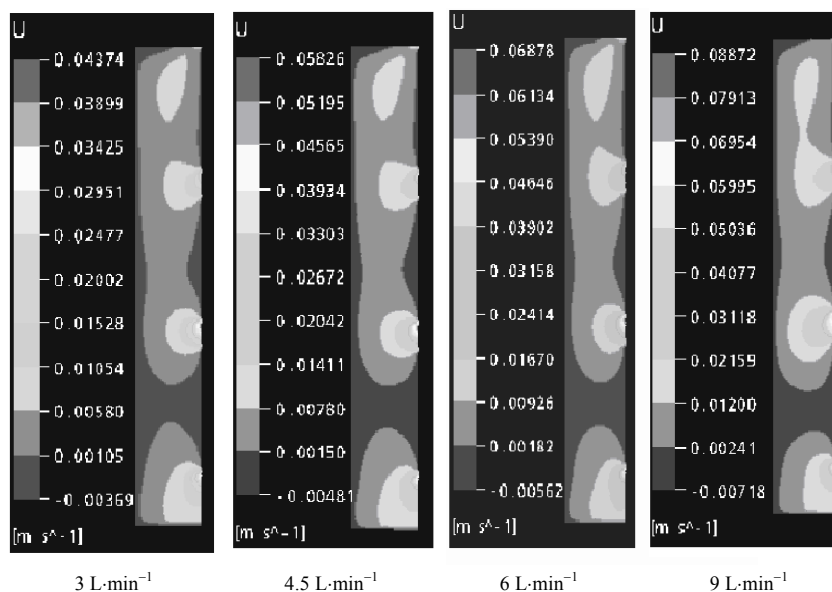


图3 不同通气量下CFD模拟下降通道径向速度等高线分布曲线

Fig.3 Contour of CFD simulating radial speed in downer channel with different aerating rates

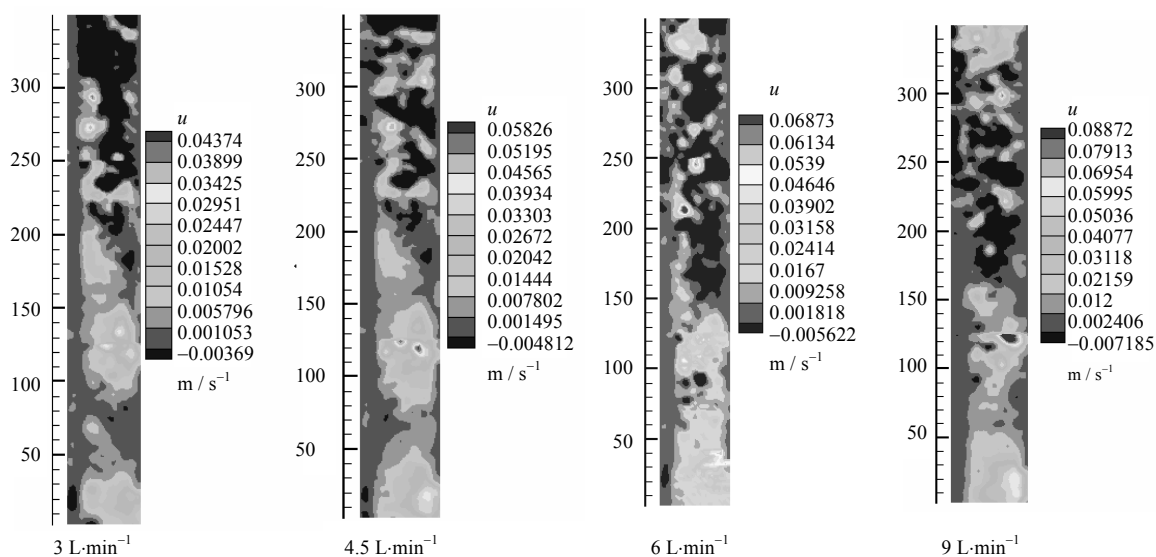


图4 不同通气量下PIV实测反应器下降通道径向速度等高线分布曲线

Fig.4 Contour of PIV measuring radial speed in downer channel with different aerating rates

如图5所示,CFD模拟过程与PIV实测过程所得的下降通道平均径向速度有较好的吻合性。当通气量较小时,PIV实测值比模拟值稍小,最大偏差10.1%;当通气量较大时,PIV实测值比模拟值稍大,最大偏差12.1%。出现这种情况可能是由于气体分布器所用的打孔橡胶管具有弹性,当通气量较小时,分布器孔径没有完全涨开,而当通气量较大时,分布器孔径由于气量较大而过度涨开,导致二者在实测过程与模拟产生差异,但从总体分布来说,对于下降通道平均径向速度,CFD模拟结果与PIV实测结果还是较为一致,偏差在误差范围内。

3.2 循环时间分布

图6给出了三节隔板平板光生物反应器,在不同通气量下,分别采用CFD模拟与PIV技术测出(不含顶部、底部区域的循环时间)的光生物反应器内循环时间的分布曲线。图中CFD模拟过程的循环时间均

大于 PIV 测量过程循环时间,但二者趋势是一致的。二者之间的差异主要是由于 CFD 模拟过程循环时间是从气体分布器开始粒子循环一周的时间,而 PIV 测量过程时间只是计算了上升通道和下降通道粒子循环时间,并没有包括粒子在顶部、底部区域的循环时间(没法实测顶部、底部区域的速度)。顶部、底部区域的循环时间在 2~3 s 左右,因此可以认为 CFD 模拟过程循环时间与 PIV 测量所得的循环时间较为一致。

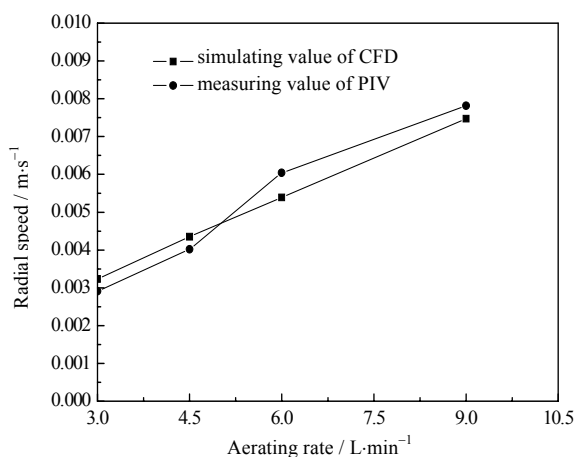


图5 不同通气量下 CFD 模拟平均径向速度与实测平均径向速度分布曲线

Fig.5 Contour of CFD simulating radial speed and PIV measuring radial speed with different aerating rates

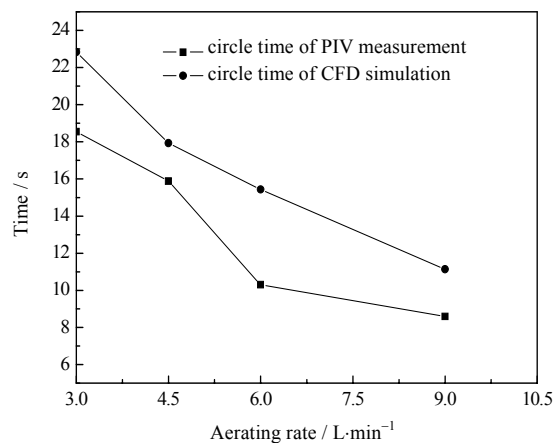


图6 不同通气量下 CFD 模拟循环时间与 PIV 实测循环时间分布曲线

Fig.6 Contour of CFD simulating circle time and PIV measuring circle time with different aerating rates

3.3 CFD 模型应用于多节隔板光生物反应器隔板节数的优化及实验验证

光照方向速度场分布与速度流场的径向分量有关,而循环时间分布与速度流场的轴向分量有关,上述分析表明本文用于模拟光生物反应器内部流场的 CFD 模型能够较好地与实际情况相吻合,因此采用该模型对含有多节隔板内部结构的平板式光生物反应器的内部流场做进一步分析。本文分别对 $A_d/A_r=1.14$, $A_d/A_r=2.57$ 在不同节数隔板下的流场进行了模拟。表 2 给出了 8 种不同内部结构的多节隔板平板式光生物反应器内部结构尺寸。光生物反应器其它结构参数一致: $h_0=50$ mm, $h_1=40$ mm, $d=20$ mm。

Maria 等^[7]通过实验研究发现 t_c 、 ε 是影响光生物反应器中微藻培养效率的两个基本参数; Pruvost 等^[14]认为光生物反应器中光照方向速度是影响微藻培养过程的一个重要流体动力学参数;于钢等^[18]认为下降通道总湍动能(TKE)_d、 ε 、 t_c 、死区 DZ 四个参数是表征光生物反应器内部混合的重要参数。通过分析文献资料与本实验室已有研究结果,本文选取了更能代表光生物反应器内部混合的 U 、ADT、 t_c 、 ε 四个参数进行过程分析。采用 CFD 模型在通气量为 6 L·min⁻¹ 时对表 2 中 8 种不同内部结构的多节隔板平板式光生物反应器的内部流场进行模拟,模拟结果各导出参数如表 2。

如表 2 所示,当 $A_d/A_r=1.14$ 时,随着反应器内部隔板节数增加, t_c 、 U 、ADT 均是逐渐增大但幅度越来越小, ε 缓慢下降。在 t_c 、 ε 变化不大的情况下,应该尽可能增大光照方向的混合,即 ADT、 U 越大,光生物反应器内光照方向的混合也更好,微藻的培养效率也更高。从上述分析可知,当隔板节数为三节时反应器内混合效果较好,增加到四节时,其混合效果几乎没有增强。当 $A_d/A_r=2.57$ 时,光生物反应器的流场变化与 $A_d/A_r=1.14$ 时大致

表 2 不同内部结构的多节隔板平板光生物反应器内部结构尺寸和内部流场 CFD 模拟结果

Table 2 Inner dimension parameter and CFD simulation results of multistage separator flat-photobioreactor with different inner structures

No.	Stage number	A_d/A_r	t_c/s	ε	ADT/J·kg ⁻¹	$U/m·s^{-1}$
1	1	1.14	14.62188	0.48089	6.55E-04	0.00335
2	2	1.14	15.81823	0.47703	7.48E-04	0.00388
3	3	1.14	16.43192	0.46894	7.92E-04	0.00408
4	4	1.14	17.97487	0.43851	8.07E-04	0.00407
5	1	2.57	12.97086	0.68623	6.16E-04	0.004484
6	2	2.57	14.01843	0.68683	7.33E-04	0.005478
7	3	2.57	15.42965	0.68228	8.07E-04	0.005391
8	4	2.57	16.2424	0.67924	8.51E-04	0.005428

Note: $h_0=50$ mm, $h_1=40$ mm, $d=20$ mm

相同,但隔板节数的增加对反应器内混合效果的增强作用不如 $A_d/A_r=1.14$ 时明显,这主要是由于结构参数 A_d/A_r 对光生物反应器内部流场的分布起较为重要的作用。于钢^[17]研究表明当其它结构相似时, $A_d/A_r=2.57$ 时,其内部流场混合比 $A_d/A_r=1.14$ 较优,因此多节隔板结构对 $A_d/A_r=1.14$ 的内部流场的混合影响更为明显。

为了验证上述分析结果,在四个平板光生物反应器内进行球等鞭金藻 3011 的培养实验,四个平板光生物反应器的具体尺寸见表 2 的 No.1,2,3,4。培养过程条件如 2.4 节。

图 7 给出不同节数隔板下平板光生物反应器中球等鞭金藻 3011 培养过程曲线。从图中可以看出,随着节数的增加,最终藻细胞培养密度不断增大,这验证了多节结构确实是有利于提高平板光生物反应器的培养效率。三节隔板平板光生物反应器与四节隔板平板光生物反应器二者最终藻细胞培养密度相差不大,与上述的理论分析结果相一致。因此,对于相同外部结构的光生物反应器,通过分析 U 、 ADT 、 t_c 、 ε 四个流体动力学参数来比较各反应器的性能是可行的。

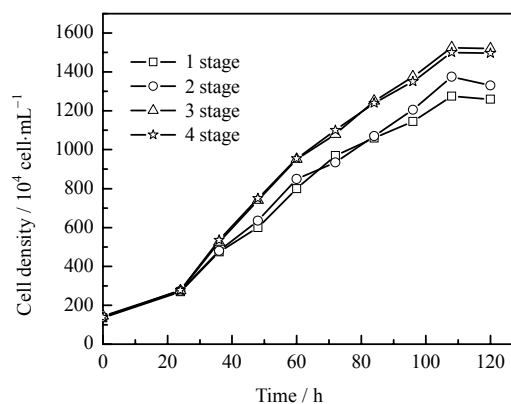


图 7 不同节数平板光生物反应器中球等鞭金藻 3011 培养过程曲线

Fig.7 Growth of *Isochrysis galbana* 3011 in flat-photobioreactor with different stage numbers of separator

4 讨论与结论

对于光生物反应器来说,反应器内部的混合,特别是光照方向的混合状况,是影响微藻细胞生长的重要因素。反应器内部结构参数虽对藻细胞生长有很大的影响,但内部结构参数不能反映光生物反应器中的光照和混合状况,不直接影响藻细胞生长;直接影响藻细胞生长的参数是能表征光生物反应器内部混合状况的流体动力学参数,特别是光照方向混合的流体动力学参数。

Degen 等^[8]和 Ugwu 等^[10]在光生物反应器内添加构件来增加光生物反应器内部的混合,提高了微藻的培养效率,但他们只是采用传统的实验优化设计方法,并没有形成一套理论方法,本文采用了 CFD 模型对多节隔板平板式光生物反应器的内部流场进行了模拟,并提出了通过分析 U 、 ADT 、 t_c 、 ε 四个流体动力学参数来优化光生物反应器的隔板节数。实验表明,上述四个参数能够较好地表征光生物反应器内部流场与藻细胞生长之间的关系。

Perner 等^[13]运用 CFD 技术模拟了平板式光生物反应器内部结构改变对流体压力损失与死区的影响,模拟结果与实际测量结果具有很好的一致性,同时定性地分析了反应器内部流场湍动能、死区对微藻培养的影响。Pruvost 等^[14]利用 CFD 技术对带有搅拌桨的圆环式光生物反应器内的流场进行了研究,模拟结果与 PIV 实测结果二者较为吻合,并考查了反应器中总体混合、横向扩散以及剪切力等流体动力学特性。虽然上述研究都采用了 CFD 对各种不同光生物反应器的内部流场进行了深入分析,但都未涉及分析光生物反应器内部结构参数、流体动力学参数与微藻培养效率之间的关系。而本文在模型建立后,通过对模型模拟得出的 U 、 ADT 、 t_c 、 ε 四个流体动力学参数进行比较,得出了较优反应器结构,并通过球等鞭金藻 3011 培养实验进行验证。

Sato 等^[19]利用 CFD 通过考查碗式、环管式、板式以及圆拱式光生物反应器内每个计算网格中藻细胞数标准偏差数和沿藻细胞运动路径对 PFD (Photon Flux Density, 简称 PFD) 的积分值来分析各种反应器中的总体混合和受光情况,并结合微藻培养结果获得了较优结构。但是对以上两个参数分析获得的较优结构为碗式光生物反应器,而微藻培养实验结果显示环管式光生物反应器培养效果最佳,可见仍需进一步优化其所选参数。而本文所选取的四个参数更能表征光生物反应器的作用性能,理论分析结果与微藻培养实验结果较为一致。

本文对光生物反应器中未见文献报道的多节隔板结构进行了研究,首次对光照方向混合进行定量研究,并采用CFD技术建立了一个理论模型,运用PIV测量技术对该模型模拟结果的可靠性进行了验证,并提出综合 U 、 ADT 、 t_c 、 ε 四个流体动力学参数来优化隔板节数。该研究不仅对于光生物反应器的内部结构优化具有借鉴意义,所采用的方法对于其他类型的反应器优化设计也具有借鉴作用,下一步工作将致力于运用上述四个流体动力学参数对多节隔板-平板式光生物反应器内部结构优化进行深入的研究。

参考文献:

- [1] Chen F. High cell density culture of microalgae in heterotrophic growth [J]. **Trends Biotechnol**, 1996, 14(11): 421-426.
- [2] Negoro M, Shioji N, Miyamoto K *et al*. Growth of microalgae in high CO_2 gas and effects of SO_x and NO_x [J]. **Appl Biochem Biotech**, 1991, (28-29): 877-886.
- [3] Yoshihara K, Nagase H, Eguchi K *et al*. Biological elimination of nitric oxide and carbon dioxide from flue gas by marine microalga NOA-113 cultivated in a long tubular photobioreactor [J]. **J Ferment Bioeng**, 1996, 82(4): 351-354.
- [4] Vilchez C, Garbayo I, Lobato M V *et al*. Microalgae-mediated chemicals production and wastes removal [J]. **Enzyme Microb Technol**, 1997, 20(8): 562-572.
- [5] Pulz O, Scheibnbogen K. Photobioreactors : design and performance with respect to light energy input [J]. **Adv Biochem Eng Biotech**, 1998, 59:123-152.
- [6] Richmond A. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview [J]. **Hydrobiology**, 2004, 512(1-3): 33-37.
- [7] Maria J B, Marcel J, Nienke H *et al*. Microalgae cultivation in air-lift reactors: modeling biomass yield and growth rate as a function of mixing frequency [J]. **Biotech Bioeng**, 2003, 82(2): 170-179.
- [8] Degen J, Uebele A, Retze A *et al*. A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect [J]. **J Biotech**, 2001, 92(2): 89-94.
- [9] Ugwu C U, Ogbonna J C, Tanaka H. Light/dark cyclic movement of algal culture (*Synechocystis aquatilis*) in outdoor inclined tubular photobioreactor equipped with static mixers for efficient production of biomass [J]. **Biotech Lett**, 2005, 27(2): 75-78.
- [10] Ugwu C U, Ogbonna J C, Tanaka H. Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers [J]. **Appl Microbiol Biotech**, 2002, 58(5): 600-607.
- [11] Hua Feng, Michael G O. Investigation of turbulent mixing in a confined Planar-Jet reactor [J]. **AIChE J**, 2005, 51(10): 2649-2664.
- [12] Hauta B, Amora H B, Coulonb L *et al*. Hydrodynamics and mass transfer in a Couette-Taylor bioreactor for the culture of animal cells [J]. **Chem Eng Sci**, 2003, 58(3): 777-784.
- [13] Perner I, Posten C, Broneske J. CFD optimization of a plate photobioreactor used for cultivation of microalgae [J]. **Eng Life Sci**, 2003, 3(7): 287-291.
- [14] Pruvost J, Pottier L, Legrand J. Numerical investigation of hydrodynamic and mixing conditions in a torus photobioreactor [J]. **Chem Eng Sci**, 2006, 61(14): 4476-4489.
- [15] Sozzi D A, Taghipour F. Computational and experimental study of annular photo-reactor hydrodynamics [J]. **Int J Heat Fluid Flow**, 2006, 27(6): 1043-1053.
- [16] HONG Hou-sheng(洪厚胜), ZHANG Qing-wen(张庆文), OU YANG Ping-kai(欧阳平凯). CFD study on fluid dynamics characteristics of downcomer zone in an airlift internal loop bioreactor.(用CFD研究气升式内环流生物反应器下降管中的流体力学性质) [J]. **J Chem Eng of Chinese Univ**(高校化学工程学报), 2006, 20(1): 85-89..
- [17] LI Yuan-guang(李元广), YU Gang(于钢), SHEN Guo-min(沈国敏) *et al*. A new multistage flat-photobioreactor(新的多节式平板光生物反应器) [P]. **CNP**: 188044, 2006-12-20.
- [18] YU Gang(于钢). Studies on Development of A Novel Method Using CFD to Optimize Inner Structure of Flat-panel Photobioreactors and Cultivation of *Isochrysis Galbana* 3011(平板光生物反应器内部结构的CFD优化方法研究及球等鞭藻3011的培养) [D]. ShangHai(上海): East China University of Science and Technology (华东理工大学), 2006.
- [19] Sato T, Usui S, Tsuchiya Y *et al*. Invention of outdoor closed type photobioreactor for microalgae [J]. **Energy Convers Manage**, 2006, 47(6): 791-799.