

文章编号: 0254-0096(2014)11-2222-08

# 相切套管曝气式光生物反应器设计和流场分析

张雯雯<sup>1</sup>, 赵 军<sup>1</sup>, 杨俊红<sup>1,2</sup>, 冯远征<sup>1,2</sup>

(1. 中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津大学机械工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 运用场协同原理分析微藻培养系统, 提出一种新型光生物反应器, 并利用 Fluent 进行流场模拟, 分析流体径向速度  $V_r$ 、速度与光照方向协同角  $\alpha$  及旋流数  $Sn$  的变化特征。结果表明, 该反应器截面明显存在纵向涡,  $V_r$  最大达 0.045 m/s,  $|\cos\alpha|$  平均为 0.7,  $Sn$  平均为 2.26。初步研究证实, 新型相切套管内置曝气式光生物反应器具有较好的流体混合性能, 速度场与光分布的协同性, 有利于强化传质和加强藻细胞光暗区的高频游动, 可在较大程度上提高微藻的高效规模化培养效果。

**关键词:** 微藻; 旋流数; 径向速度; 套管式光生物反应器; 场协同; 数值模拟

**中图分类号:** TK6

**文献标识码:** A

## 0 引 言

目前, 在微藻筛选方面已有大量研究, 许多高效产油固碳的微藻已被筛选并总结出来<sup>[1,2]</sup>。光生物反应器近几年的发展非常迅速, 其中管式光生物反应器相比于其他光生物反应器, 具有产量高和可扩大培养的优势, 但其传质弱、条件不易控制、贴壁生长和光对管径的影响等缺点限制了其推广。Sato Toru 等<sup>[3]</sup>提出光生物反应器的设计应遵循光吸收、局部混合和全局混合三方面。J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>提出用旋流数  $Sn$  来评价光生物反应器混合性能, 研究结果证明, 光照方向的混合可提高传质效果和光合效率<sup>[4-6]</sup>。因此, 为了加快藻细胞的生长固碳速率、增强光合作用, 应增多传递给细胞的营养物质以及提高汽液传递效率。目前, 许多学者设计了不同类型的光生物反应器和不同形式的混合方法, 通过培养实验来验证微藻生长情况和固碳效率, 但这些方法和构造是否最优化并不确定。

场协同理论首次被过增元等<sup>[7]</sup>提出后得到众多学者的验证和应用<sup>[8,9]</sup>。除了应用于强化传热以外, 场协同理论也被应用于自然界中其他场之间的协同

上<sup>[10,11]</sup>。基于传热和传质的相似性, 程伟良等<sup>[12]</sup>和陈 群等<sup>[13]</sup>推导出适合强化传质的场协同概念和方程, 并应用于优化光催化氧化反应器的传质效果上<sup>[14]</sup>, 其模拟结果显示截面产生纵向涡是强化传质的最优化流场。由此可见, 纵向涡既符合场协同理论, 又可增强传热传质效果。基于场协同理论对强化传质的指导作用, 本文将应用到光生物反应器的设计上来描述速度和光梯度方向的协同程度。同时, 提出一种新型相切套管式反应器, 以产生纵向涡为出发点, 达到微藻培养环境的优化。在模拟过程中, 主要分析流体的径向速度  $V_r$  变化以验证该反应器的传质作用, 分析协同角  $\alpha$  的余弦绝对值变化以验证该反应器在光照方向上的混合效果, 用旋流数  $Sn$  的变化来验证整个反应器的混合效果。

## 1 光生物反应器的设计

实际培养过程中, 若传统的直管式光生物反应器内径过大, 管底背光区的藻细胞由于光衰减会光照不足, 而管顶的藻细胞由于光照过强易产生光抑制。这使得一般管式光生物反应器管径受限, 成为其无法实现大规模培养的原因之一<sup>[15]</sup>。而光照方向

收稿日期: 2012-10-10

基金项目: 天津市自然科学基金项目(13JCYBJC19000); 天津大学内燃机国家重点实验室自主课题

通信作者: 杨俊红(1967—), 女, 博士、副教授, 主要从事多孔介质传热传质、新型强化传热技术等方面的研究。yangjunhong@tju.edu.cn

的混合可使藻细胞在光暗区游动,消除光抑制和光衰减对管径的限制<sup>[16]</sup>,也是本文设计此反应器的依据之一。另外, Sato Toru 等<sup>[3]</sup>通过模拟藻细胞数标准偏差和沿藻细胞运动路径对光流密度的积分值,分析了抛物线形、管式和菱形 3 种光生物反应器中藻液的混合情况,得出抛物线形为最优结构。因此,本文将传统直管式光生物反应器和 Sato Toru 等<sup>[3]</sup>提出的抛物线形相结合并改进,设计一种新型的相切套管式光生物反应器,达到在适当增大管径时,通过产生纵向涡,增加径向的扰动,减薄浓度边界层,提高藻细胞在光区和暗区的循环。

图 1 为新设计的结构示意图。反应器总长为 1000 mm, 外径为 200 mm, 其中图 1a 为管段中间 500 mm 处的剖面图, 图 1b 为  $x=0$  截面的剖面图。 $y=40$  mm 以上为光区; $y=40$  mm 以下为暗区。

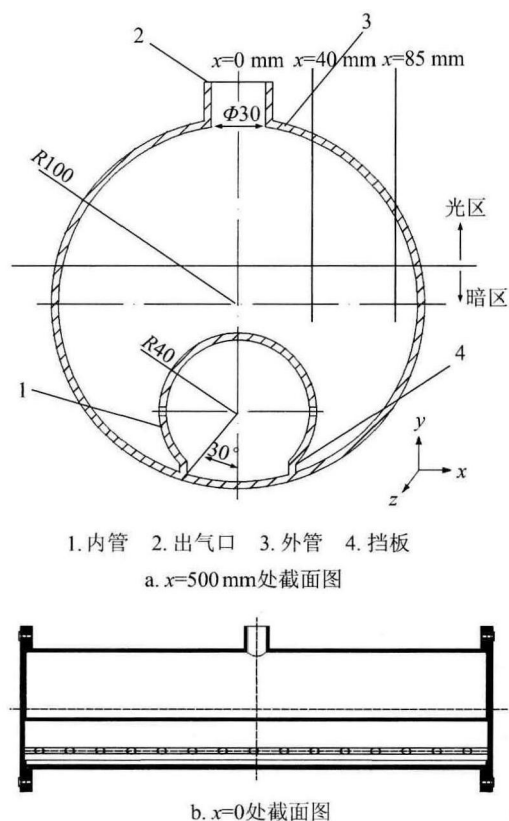


图 1 相切套管式物理模型结构图

Fig. 1 Physical model of the tangent tube-in-tube bioreactor

对于相切套管式结构的设计有如下考虑:

1) 内管径为 80 mm 既可增大有效培养体积,又可保留适当的暗区体积,供藻细胞的呼吸作用。

2) 内管相切于外管底部可减少暗区的体积而增大光区体积。原先管径 200 mm 的直管光暗比达

到 0.78, 而本设计的反应器的结构使光暗比增大到 1.51。因此相切式的设计有利于增强藻细胞的光合作用。

3) 为了避免循环死角而导致藻细胞滞留的情况,将内管底部去除 60° 的圆弧,采用玻璃挡板连接内外管,如图 1a 所示。

4) 为了提高暗区的混合情况,使藻细胞能游到光区接受光照,本文设计将两排直径为 5 mm 的曝气孔布置于内管,曝气方向与水平方向夹角为 30°,间隔 50 mm。气体通入内管后经曝气孔向藻液曝气,作为此反应器的动力源。与传统管式反应器不同,相切套管式反应器沿用板式光生物反应器的培养方法,采用广泛应用的半连续培养模式,因此反应器内部无轴向流动,在外管中间  $z=500$  mm 处布置一个直径为 30 mm 的出气孔。

5) 经过调研 C. U. Ugwu 等<sup>[17]</sup>对倾斜管式反应器研究得知,通气量在 0.125~1.25 vvm (即每分钟通气量与罐体实际料液体积的比值) 之间。因此本文选择 0.7 vvm 的通气比进行模拟。反应器总容积为 26.3 L,相对应的通气速度为 18.4 L/min。

## 2 理论模型和模拟方法

### 2.1 用于微藻培养的协同理论

本文将场协同理论用于微藻培养微环境的优化,来描述速度场和光梯度之间的协同对微藻光合作用的重要性,其二者夹角是评价协同程度的关键因素。当协同角  $\alpha$  为 90° 时,协同效果最差,而角度越接近 180° 或 0°,其二场间的协同效果越好。本文取  $|\cos\alpha|$  来分析协同曲线,如式 (1)。 $|\cos\alpha|$  越接近于 1,说明协同程度越好。

$$|\cos\alpha| = \left| \frac{\vec{\text{grad}}I \cdot \vec{U}}{|\vec{\text{grad}}I| \cdot |\vec{U}|} \right| \quad (1)$$

式中,  $I$ ——光照强度, lx;  $\vec{U}$ ——流体速度, m/s。

### 2.2 旋流数 $Sn$

J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>提出并证明了光生物反应器横截面的旋流数  $Sn$  可用来确定光生物反应器的混合性能。旋流数主要描述了管内漩涡强度的物理量,根据定义,反应器横截面的旋流数  $Sn$  表达式为:

$$Sn = \frac{\iint U_z w r dS}{\iint U_z^2 r dS} \quad (2)$$

式中,  $U_z$ ——轴向平均速度, m/s;  $W$ ——周向平均速度, m/s;  $r$ ——径向距离, m;  $S$ ——横截面积,  $m^2$ 。

### 2.3 数值数学模型的建立

由于微藻培养过程是定温培养, 模拟工作不考虑能量方程。本文选用欧拉-欧拉两相流模型和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型作为控制方程。

两相流欧拉模型的连续性方程如 (3) 所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} r_q \rho_q + \nabla r_q \rho_q \vec{U}_q = 0 \quad (q=1, g) \quad (3)$$

式中,  $t$ ——时间;  $r_q$ 、 $\rho_q$  和  $U_q$ ——分别是第  $q$  相的体积分数、密度和速度矢量;  $l$  和  $g$ ——液相和气相,  $r_l + r_g = 1$  (液相和气相的体积分数之和为 1)。

欧拉模型的动量方程如式 (4) 所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_q \rho_q \vec{U}_q) + \nabla [r_q (\rho_q \vec{U}_q \vec{U}_q)] = & -r_q \nabla p_q + r_q \rho_q \vec{g} + \\ & \nabla [r_q \mu_q (\nabla \vec{U}_q + (\nabla \vec{U}_q)^T)] + \vec{M}_q \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\vec{g}$ ——重力加速度矢量;  $\mu_q$ ——第  $q$  相的动力粘性系数;  $\vec{M}_q$ ——升力; 上标 T 表示湍流项。

标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 包含湍动能及其耗散率方程两个方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_q \rho_q k_q) + \nabla (r_q \rho_q k_q \vec{U}_q) = & \nabla (r_q \frac{\mu_{q,t}}{\sigma_k} \nabla k_q) + \\ & r_q G_{k,q} + r_q \rho_q \Pi_{k,q} - r_q \rho_q \varepsilon_q \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_q \rho_q \varepsilon_q) + \nabla (r_q \rho_q \varepsilon_q \vec{U}_q) = & \nabla (r_q \frac{\mu_{q,t}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_q) + \\ & r_q \frac{\varepsilon_q}{k_q} (C_{1\varepsilon} G_{k,q}) - C_{2\varepsilon} \rho_q r_q \frac{\varepsilon_q^2}{k_q} + r_q \rho_q \Pi_{\varepsilon,q} \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $G_{k,q}$ ——由于平均速度梯度引起的湍动能;  $\Pi_{k,q}$ ——由于浮力产生的湍动能;  $\mu_{q,t}$ ——湍流粘性系数。

$$\mu_{q,t} = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\varepsilon_q} \quad (7)$$

在 Fluent 软件中, 作为默认值常数,  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ , 湍动能  $k$  与耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特数分别为  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

在模拟过程中, 作如下假设:

1) 简化光入射角固定在  $90^\circ$ ;

2) 由于大部分绿藻粘度在  $0.9 \sim 1.2$  MPa/s 内, 密度在  $1000 \sim 1030$   $kg/m^3$  内, 故将藻液的物理性质视为水<sup>[3]</sup>, 因此本文采用水-空气混合流体, 用水代

替藻液。

入口为曝气孔, 边界采用速度边界, 通气比为 0.7 vvm。出口为顶部出气孔, 边界采用压力出口边界。初始化时设置水充满套管。利用标准壁面函数法, 计算步长选用 0.1 s, 进行非稳态计算, 收敛残差为  $10^{-4}$ 。后处理结果利用自编软件 UDF, 计算  $|\cos \alpha|$ 。选择该截面上  $x=0$ 、40、85 mm 3 个位置进行监视和数据分析。模型利用 Gambit 处理后, 生成网格 34 万, 物理模型网格图见图 2。

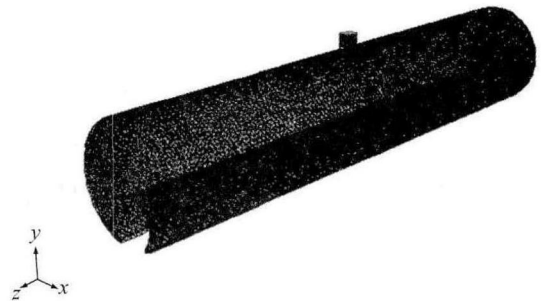


图 2 物理模型网格图

Fig. 2 The grid of physical model

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 流线的对比

图 3 为反应器各截面的流线分布图。反应器的各截面产生纵向涡, 并在光区形成小漩涡, 流动方向如图中  $z=125$  mm 截面标注所示, 截面左右侧基本呈对称漩涡流动; 暗区区域流线规则, 明显提高了暗区的混合效果, 有利于藻细胞向光区游动。其中,  $z=125$ 、375、625、875 mm 4 个截面位置的内管无曝气孔, 但仍由于周围曝气的绕流作用, 有纵向涡的形成。

在强化传质的场协同理论应用上, 陈群等<sup>[14]</sup>将强化传质的场协同方程应用于优化光催化氧化反应器的传质效果上, 并得出纵向涡是强化传质的场协同理论得出的最优化流场, 如图 4a 所示。此后, 吴良相等<sup>[18]</sup>根据在圆管内产生纵向涡的思想, 以传统直管光生物反应器为基础, 提出 Type I 和 Type II 两种螺旋管光生物反应器形式, 结构如图 4b 所示。该反应器依靠螺旋结构产生纵向涡, 其模拟的各截面流线如图 4c 所示。

通过将本文的流线和图 4a 的流线对比发现, 相切套管式反应器截面的纵向涡形式与场协同理论的最佳流场相近, 定性验证了该反应器达到了强化

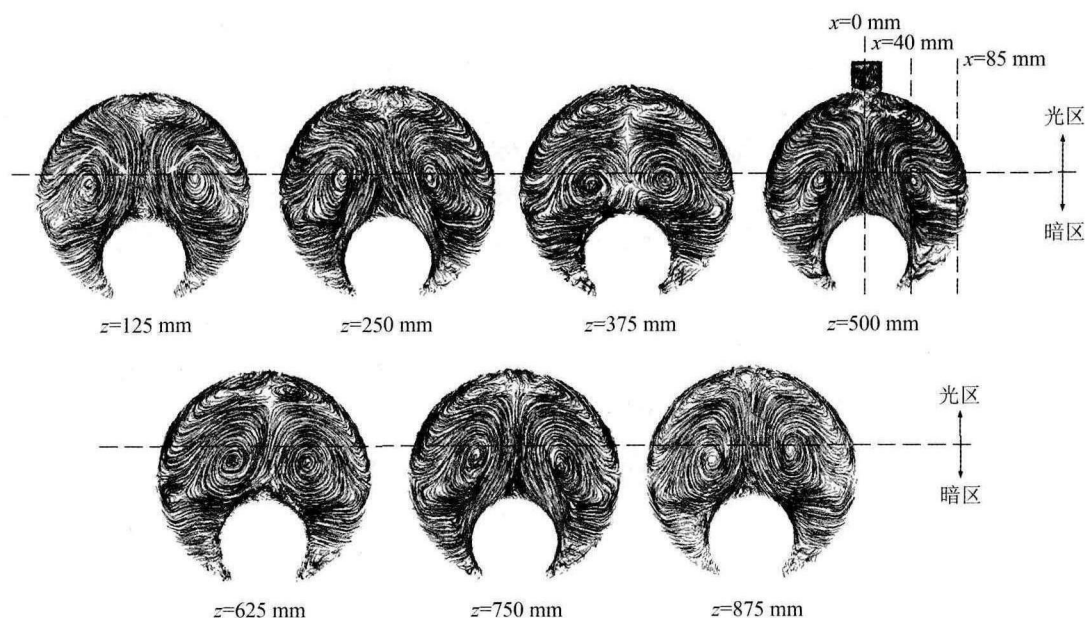
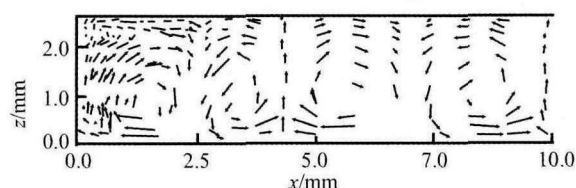
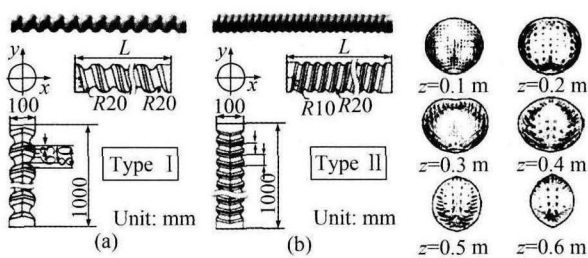


图3 各截面的流线分布图

Fig. 3 Results of the pathlines in the cross sections



a. 光催化氧化反应器左壁优化结果



b. 两种螺旋管反应器的结构

c. 不同截面的流线

图4 产生最优化流场——纵向涡的文献研究

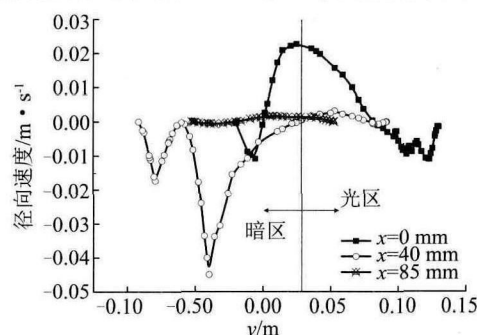
Fig. 4 The results of longitudinal vortex in the articles

传质的目的。而且,相切套管式结构的流场相对于图 4c 的流线来说,纵向涡的流线更清晰显著,尤其在暗区,且各截面流型相似。这说明内管曝气的结构形式实现了暗区的扰动,并由于浮力作用带动液体在截面形成纵向涡,从而加强了对壁面的边界层扰动,强化了气液传质作用。而图 4c 中的壁面处的流线存在且明显,而截面中间流线稍不明显,可能是因为该螺旋管内的气液混合物轴向速度为主要速度,螺旋结构对径向速度有影响但很小,因此截面中间的流线主要沿轴向分布,纵向涡形状不显著,对传

质的强化作用存在一定的局限性。相比之下,相切套管式光生物反应器在径向截面处的涡流更强烈,其径向的传质作用增强,光暗循环频率加大,有利于提高光合作用,强化微藻的培养效果。

### 3.2 径向速度的对比

为了更清楚地对模拟结果进行分析,对该截面 3 条直线上的径向速度进行数据对比。图 5 为  $z=500$  mm 截面处的径向速度  $V_r$  分布曲线。 $x=0$  mm 处位于截面中央,由于内管占有大部分暗区,因此速度分布主要集中于光区,且径向速度数值较大,最高速度达到  $0.0226$  m/s。 $x=40$  mm 接近曝气口,因此此处的径向速度  $V_r$  的梯度相对较大,且在暗区出现两个峰值分别达到  $0.017$  m/s 和  $0.045$  m/s,提高了暗区的混合情况,且速度方向朝外管圆心,使藻细胞游动向光区;在光区区域,  $V_r$  值上下浮动,流体

图5  $z=500$  mm截面不同位置处的径向速度分布Fig. 5 Radial velocity curves in the  $z=500$  mm cross section

在光区局部形成了小漩涡。靠近壁面的  $x=85\text{ mm}$  处,  $V_r$  有小幅波动, 但径向速度量级较小, 平均达到  $0.00073\text{ m/s}$ , 说明壁面处的流体流动方向主要沿壁面, 对传质的增强作用稍弱, 因此近管壁位置应是强化传质的优化重点。

截面的径向速度反映了藻液和气体的传质效果, 另一方面, 很多学者在研究光生物反应器时都关注了光照方向的速度分布, 普遍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<sup>[4-6]</sup>。于是, 计算出  $z=500\text{ mm}$  截面处在光照方向上的平均速度, 并与文献中的光照方向上的平均速度进行对比, 如表 1 所示。林晨等<sup>[5]</sup>对板式光生物反应器的光照方向的速度分布进行了 CFD 模拟, 得出光照方向上的平均速度, 并利用 PIV 测试技术验证了模拟结果的正确性。目前, 有关管式光生物反应器中光照方向的速度分析研究尚少。虽然反应器的形式和本文不同, 但都是利用曝气来实现内部混合, 因此在一定程度上与本文数据有可比性。通过表 1 中对比得出, 相切套管式反应器内  $z=500\text{ mm}$  处截面在光照方向上的平均速度达到  $0.00712\text{ m/s}$ , 大于文献 [5] 的平均值。由此可见, 本文的相切套管式反应器截面不仅产生了纵向涡, 还增强了光照方向上的混合效果, 强化了传质混合效果, 增强了藻细胞的光合作用。

表1 光照方向平均速度与文献对比

Table 1 Radial velocity compared with another article				
文献	光生物反应器	混合方法	评价参数	径向速度 $V_r/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
本文	相切套管式	曝气	$V_r,  \cos\alpha $	0.00712
[5]	板式	曝气、隔板	$V_r$ 等	0.00543

3.3  $|\cos\alpha|$  的对比

场协同理论在强化传热领域研究中, 张晓屿等<sup>[8]</sup>利用各场间的协同角来评价螺旋形多孔介质的传热性能; 在强化传质领域中, 陈群等<sup>[14]</sup>将其应用于优化光催化氧化反应器的传质效果上。可见, 场协同理论已在传热传质方面得到验证和应用。同时, 还有很多学者将此理论应用到自然界和工程中各种场之间的优化上。吴明等<sup>[11]</sup>将场协同理论应用于脉管制冷机的优化上, 解决压力波和速度波之间的协同作用, 找到最佳长径比。郭平生等<sup>[10]</sup>验证了奇异热电效应中温度场与电场之间的协同关系。以上研究证明, 场协同理论可能适用于自然界和工程

中各物理过程的优化。本文在调研微藻培养的研究过程中发现, 现有的光生物反应器结构部分符合强化传质的理论体系。传统的设计理论是否达到强化传质的最优化流场并不确定, 如吴良柏等<sup>[18]</sup>提出的螺旋管结构, 其设计目的是为了产生纵向涡, 正好符合陈群等<sup>[14]</sup>得出的最优化流场形式, 但气液混合物从管段一侧通入, 主要流动方向为轴向, 因此在径向的混合效果一定程度上略不明显, 如图 4c 所示。而 Toru Sato 等<sup>[3]</sup>和 J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>为了达到全局混合性能, 提出的光生物反应器结构在一定程度上符合强化传质的场协同理论, 是否达到微环境的最优化并不确定。由此, 可以认为, 场协同理论包含了传统的光生物反应器设计理论, 又可对各场综合考虑, 将其应用于优化微藻培养环境和指导光生物反应器的结构设计具有一定的优势。

基于以上对场协同理论的适用性分析, 本文利用了强化传质的场协同理论得出的纵向涡来指导光生物反应器的设计, 并已得到之前所述的模拟数据分析; 同时利用场协同理论来评价光照方向和速度方向的协同, 以下就二者协同角的余弦绝对值  $|\cos\alpha|$  进行分析。图 6 为  $z=500\text{ mm}$  截面的不同位置上的  $|\cos\alpha|$  分布曲线对比。光照方向上的混合不仅取决于光强和速度, 还取决于他们之间夹角  $\alpha$ 。  $|\cos\alpha|$  越接近 1, 速度和光梯度方向的协同程度越好。  $x=0\text{ mm}$  的曲线可看出, 在大部分光区,  $|\cos\alpha|$  均大于 0.9, 经过计算可知,  $|\cos\alpha|_{\text{average}}=0.71$ 。而在  $x=40\text{ mm}$  直线位置, 光区的协同程度较  $x=0\text{ mm}$  处稍差, 但在暗区, 其平均值高达 0.808, 说明暗区在光照方向上的混合较好。近壁面  $x=85\text{ mm}$  处, 暗区和部分光区区域内速度和光梯度的协同程度很好, 平均值达到 0.89。经过计算, 整个截面的  $|\cos\alpha|_{\text{average}}$  达到 0.7。因此, 相

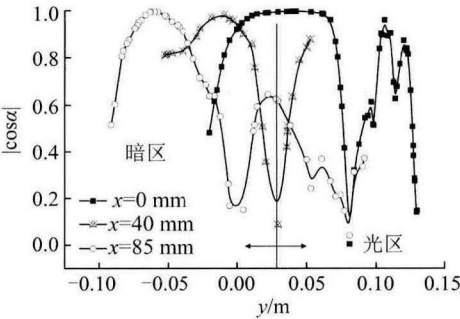


图 6  $z=500\text{ mm}$  截面不同位置处的  $|\cos\alpha|$  分布  
Fig. 6 The value curve of the parameter  $|\cos\alpha|$  in different positions in the cross sections of  $z=500\text{ mm}$

切套管式反应器的截面的速度和光梯度方向的协同程度很好,说明该反应器在光照方向有良好的混合效果,有利于提高微藻的光合作用。

### 3.4 旋流数 $Sn$ 的对比

J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>提出旋流数  $Sn$ ,并用  $Sn$  评价了圆环式光生物反应器的混合性能,该圆环式反应器以螺旋桨为动力源,搅动气体和藻液的混合物以产生漩涡,其结构形式如图 7 所示,培养形式类似于直管式光生物反应器,区别在于环形的截面形状是矩形。经模拟计算发现,旋流数在近叶轮处最大,范围在 0.20~0.27 之间,漩涡强度也达到最大,但旋流数沿轴向呈现衰减趋势,甚至接近于零。由此看来,该圆环结构仅加强了叶轮处的混合,远端由于没有补充动力源,旋流数大大降低,较难实现全局混合效果。同时 J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>还得出旋流数的临界值为 0.2,当实际旋流数低于 0.2 时,会出现迪恩涡,削弱管内的漩涡运动。此后,吴良柏等<sup>[18]</sup>以管式光生物反应器为基础设计了螺旋式结构,得到螺旋管结构的  $Sn$  变化范围在 0.25~0.35 内,大于 J. Pruvost 等<sup>[4]</sup>得到的结果。

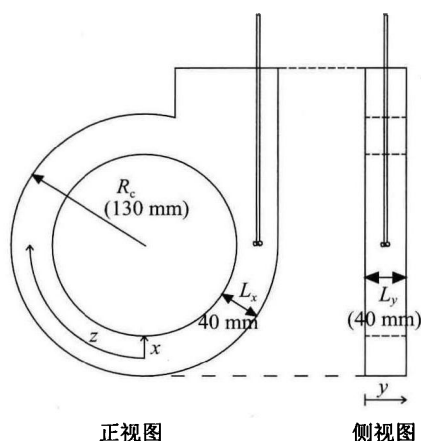


图7 圆环式光生物反应器结构

Fig.7 The structure of the torus photobioreactor

本文提出的相切套管结构一方面以直管式反应器作为参考,另一方面以抛物线型反应器作为依据,因此与文献[4, 18]在一定程度上有可比性。相切套管式光生物反应器的  $Sn$  平均值为 2.26,超过临界旋流数 0.2。文献中的反应器动力源均为轴向,截面扰动通过复杂的结构变化来形成,因此轴向速度较大,截面内的旋转流动相对较小,因此  $Sn$  较小,刚刚超过临界值。旋流数越大,说明流体的切向速度相对轴向速度越大,管内漩涡强度越大,藻细胞

的高频游动越快。总之,由于各截面间漩涡的相互作用,该相切套管式反应器内部形成了全局混合,其混合性能较高,具有大规模培养微藻的潜力。

## 4 结 论

本文所研究的相切套管式光生物反应器的截面明显产生纵向涡,满足了强化传质的场协同理论。径向速度  $V_r$  最大达 0.045 m/s,提高了暗区的混合性能,在一定程度上达到了强化传质的目的。而且,  $|\cos\alpha|$  平均为 0.7,且整个截面在光照方向上的平均速度达 0.00712 m/s,说明在光照方向上的混合效果较好,提高了微藻的光合作用。另一方面,整个反应器的  $Sn$  平均值为 2.26,管内漩涡强度较大,加快了藻细胞的高频游动。

初步研究可证实,场协同原理一定程度上可指导光生物反应器的优化设计;本文提出的新型相切套管内置曝气式光生物反应器具有较好的流体混合性能,速度场与光分布的协同性,有利于强化传质和加强藻细胞光暗区的高频游动,较大程度地提高微藻的高效规模化培养效果。

### [参考文献]

- [1] 李 涛, 李爱芬, 桑 敏, 等. 富油能源微藻的筛选及产油性能评价[J]. 中国生物工程杂志, 2011, 31(4): 98—105.
- [1] Li Tao, Li Aifen, Sang Min, et al. Screening oleaginous microalgae and evaluation of the oil-producing characteristic[J]. China Biotechnology, 2011, 31(4): 98—105.
- [2] Mata Teresa M. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 217—232.
- [3] Toru Sato, Shinsuke Usui, Yoshihiro Tsuchiya, et al. Invention of outdoor closed type photobioreactor for microalgae[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(6): 791—799.
- [4] Pruvost J, Pottier L, Legrand J. Numerical investigation of hydrodynamic and mixing conditions in a torus photobioreactor [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(14): 4476—4489.
- [5] 林 晨, 李元广, 王伟良, 等. 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[J]. 高校化学工程

- 学报, 2009, 23(2): 263—269.
- [5] Lin Chen, Li Yuanguang, Wang Weiliang, et al. Numerical and experimental investigation of a novel flat-photobioreactor with multistage-separator[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2009, 23(2): 263—269.
- [6] Su Zhenfeng, Kang Ruijuan, Shi Shaoyuan, et al. Study on the destabilization mixing in the flat plate photobioreactor by means of CFD[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(12): 1879—1884.
- [7] Guo Zengyuan, Li Deyi, Wang Buxuan. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221—2225.
- [8] 张晓屿, 刘志春, 刘 伟. 圆管内插入螺旋片状多孔介质的换热性能及场协同分析[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1371—1374.
- [8] Zhang Xiaoyu, Liu Zhichun, Liu Wei. Heat transfer performance for tube inserted with helical screw-tape porous media and its field synergy analysis[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1371—1374.
- [9] 徐志明, 张艾萍, 杨 洋. 污垢对圆管内对流换热场协同的影响[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(6): 1035—1038.
- [9] Xu Zhiming, Zhang Aiping, Yang yang. The effects of the fouling on the convective heat transfer field synergy in round tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(6): 1035—1038.
- [10] 郭平生, 华 贲, 韦绍波. 温度场与电场在奇异热电效应中的协同[J]. 华南理工大学学报, 2002, 30(4): 7—10.
- [10] Guo Pingsheng, Hua Ben, Wei Shaobo. Synergism of temperature field and electric field in the specific thermoelectricity effect[J]. Journal of South China University of Technology, 2002, 30(4): 7—10.
- [11] 吴 明, 何雅玲, 陶文铨. 场协同理论在脉管制冷机研究中的推广[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 488—490.
- [11] Wu Ming, He Yaling, Tao Wenquan. Extension and application of field synergy principle to pulse tube refrigerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(4): 488—490.
- [12] 程伟良, 韩晓娟, 孙宏玉. 质量传递过程中的场协同作用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 105—108.
- [12] Cheng Weiliang, Han Xiaojuan, Sun Hongyu. Field synergy action in mass transfer process[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 105—108.
- [13] Chen Qun, Ren Jianxun, Guo Zengyuan. Field synergy analysis and optimization of decontamination ventilation designs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(3-4): 873—881.
- [14] Chen Qun, Meng Jian. Field synergy analysis and optimization of the convective mass transfer in photocatalytic oxidation reactors[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(11-12): 2863—2870.
- [15] Marcel Janssen, Johannes Tramper, Mur Luuc R, et al. Enclosed outdoor photobioreactors: Light regime, photosynthetic efficiency, scale—Up, and future prospects[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 81(2): 193—210.
- [16] Vonshak A, Torzillo G. Environmental stress physiology[Z]. In: Richmond, A. (Ed.), Handbook of Microalgal Culture. Blackwell Publishers, Oxford, 2004: 57—82.
- [17] Ugwu C U, Aoyagi H, Uchiyama H. Photobioreactors for mass cultivation of algae[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10): 4021—4028.
- [18] 吴良柏, 李 震, 宋耀祖. 螺旋管式光生物反应器的研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(8): 1375—1378.
- [18] Wu Liangbo, Li Zhen, Song Yaozu. Study on spiral photobioreactor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(8): 1375—1378.

## DESIGN AND FLOW FIELD ANALYSIS OF A NOVEL TANGENT TUBE-IN-TUBE PHOTOBIOREACTOR

Zhang Wenwen<sup>1</sup>, Zhao Jun<sup>1</sup>, Yang Junhong<sup>1,2</sup>, Feng Yuanzheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, Tianjin University, School of Mechanical Engineering, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** By using field synergy theory as the instruction for the first time, shows a novel tangent tube-in-tube photobioreactor and we utilized the Fluent to analyze that the curves of radial velocity  $V_r$ , synergy angle  $\alpha$  between the light gradient and velocity and swirl number  $Sn$ . The results show that longitudinal vortex is generated in the cross section, the largest value of radial velocity is 0.045 m/s and the average value of  $Sn$  is 2.26. Preliminary study can confirm that the tangent tube-in-tube photobioreactor has a better mixing performance and a better synergy extent between the velocity and light gradient which is beneficial to enhance mass transfer and increase the swimming frequency of algae cells across the light and dark zones and has a huge potential for large-scale cultivation.

**Keywords:** microalgae; swirl number; radial velocity; tubular photobioreactor; field synergy; numerical simulation