

# 气升式微藻光生物反应器的设计研究进展

张芬芬<sup>1</sup>, 马晓建<sup>1,2\*</sup>, 常春<sup>1,2</sup>, 韩秀丽<sup>1,2</sup>, 李斐<sup>1</sup>

(1. 郑州大学化工与能源学院, 河南 郑州 450001;

2. 生物质炼制技术与装备河南省工程实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:**概述了几种常见密闭式光生物反应器的发展现状,着重讨论了近几年气升式内环流光生物反应器在光源利用率与混合效果方面的研究进展,以及结构尺寸和附属装置对混合效果的影响,作为对现有气升式光生物反应器进一步研究和改进的基础。

**关键词:**密闭式;气升式内环流;光源利用率;结构尺寸;附属装置;混合效果

**中图分类号:**TK6

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)10-0046-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.10.012

## Design and research progress in airlift photobioreactors for algae

ZHANG Fen-fen<sup>1</sup>, MA Xiao-jian<sup>1,2\*</sup>, CHANG Chun<sup>1,2</sup>, HAN Xiu-li<sup>1,2</sup>, LI Fei<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Engineering Laboratory of Henan Province for Biorefinery Technology and Equipment, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The current development status of several closed photobioreactors is reviewed. The research progress in light utilization efficiency and mixing effect of the internally-lit airlift photobioreactors are emphatically discussed. The influence of structure size and accessory device on mixing effect is also focused. It can be the foundation of the further research and improvement based on the existing closed photobioreactors.

**Key words:** closed; internally-lit airlift; light utilization efficiency; accessory device; mixing effect

2010年国内石油产量为1.89亿t,进口1.99亿t,进口比例达到51.29%,2013年该比例增长到57.39%<sup>[1]</sup>,2014年该数据已经增长到59.5%<sup>[2]</sup>。按照国际上通行的一个观点,如果一个国家的石油进口比例达到或超过50%,说明该国已经进入了能源预警期<sup>[3]</sup>。因此,至少从2010年开始,我国已经进入了能源预警期。为应对即将到来的能源危机,必须从原料和技术两方面着手,近几年,人们已经开始不断探索研发新能源,例如天然气、页岩气等众多替代能源不断受到人们的关注,电动车也越来越炙手可热,生物质能源更是成为清洁替代能源中的佼佼者。

对于生物质能源的研究,19世纪末世界范围内曾掀起一阵热潮,当时取得了一定的成果,但其研究却在1900年后戛然而止,直到20世纪70年代全世界范围内爆发石油危机,能源革命的号角再次吹响,1983年,美国科学家首次通过亚麻籽油分离出生物柴油。之后的30年间,生物柴油已经被许多国家提高到重要的战略位置。美国正在酝酿和巴西共建非石油的OPEC组织,以期与现有的OPEC国家抗衡。德国现有的生物柴油加油站已经达到了900多个,并提倡在主要道路销售生物柴油。日本以废弃用油

为原料,生产生物柴油,而且产品价格低于石油柴油。我国虽然生物柴油项目开发较晚,但发展速度较快,国内很多科研院所及部分高校均开展了生物柴油的研究,并取得了阶段性的成果<sup>[4]</sup>。

目前微藻生物柴油仍处于实验室阶段,规模化的工程应用仍面临一些问题,如大量培养基的制取,经济有效的微藻采收技术,能用于工业化规模的脂质萃取技术等。而且市场上也缺乏一种成熟的可用于大规模培养的光生物反应器,现有的光生物反应器种类虽多,但仍存在一些缺陷,需不断改进以实现微藻的高效高密度培养。

## 1 几种现有光生物反应器类型

目前用于微藻培养的光生物反应器主要有开放式和封闭式2种。开放式系统结构简单、成本低廉、操作简便,但是占地面积大,温度和光照强度随季节性变化较大,且易受杂菌污染。封闭式反应器可精确控制培养条件,如pH、营养盐浓度、光照强度、光暗周期、O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>浓度,可无菌操作,占地面积小,可用于菌株的扩大培养。一般封闭式光生物反应器有管道式、平板式、柱状气升式、搅拌式、浮式薄膜袋等。

收稿日期:2016-01-30

基金项目:国家自然科学基金项目(21176227,U1404519)

作者简介:张芬芬(1991-),女,硕士生;马晓建(1953-),男,硕士,教授,研究方向为生物质能源化工,通讯联系人,0371-67780093,maxj@zzu.edu.cn。

目前国内最大的开放式微藻培养基地在深圳龙岗,至2009年,在兆凯生物研发中心的开放式光生物反应器中,20 cm水深就可以每年每公顷生产干藻120 t(以每年300个生产工作日计算),其生产微藻的最高总脂含量为24%,相当于每年每公顷养殖面积生产28 800 kg油脂,粗略估计潜在生物产量为每年每公顷25 000 L。但是由于受环境因素的影响,例如台风、季节因素的影响,产量不稳定<sup>[5]</sup>。

封闭式光生物反应器近20年来发展迅猛,尤其在国外研制和开发利用较快,部分国家已实现了高密度商业化培养。

### 1.1 管式光生物反应器

管式光生物反应器多用于户外培养,材料多为玻璃管道或塑料管道,使用泵循环或气升循环系统,可以水平、垂直或倾斜放置。管式反应器由于曝光面积大,所以适于户外培养,但是其传质效果差。例如,Molina等<sup>[6]</sup>研究发现,培养过程中管式反应器中的溶氧浓度很高。Vonshak等<sup>[7]</sup>在实验中发现管式反应器中极易发生光抑制现象。Ugwu等<sup>[8]</sup>在2005年提出可通过改善反应器内的混合系统来达到光分布的效果,减轻光抑制现象的发生,因而井广宁<sup>[9]</sup>在2012年的时候提出了套管式光生物反应器的设计理念,通过在反应管内增加曝气管的方式增强了反应管内的气液传质效果,解决了管式反应器随着管道增长溶氧积累和碳饱和的难题。在大规模培养中,Maor<sup>[10]</sup>针对管式光生物反应器管间遮盖的问题进行优化,根据管径的不同研究合适的管间距和管与墙面之间的距离,并研究了墙面的东西朝向和南北朝向对太阳光反射作用于管的效果,为管式反应器在实际中的应用进一步做了优化。但是管式反应器还有一个问题就是温度很难控制,虽然可以通过增加恒温器来控制温度,但这无疑会增加成本。

### 1.2 平板式光生物反应器

平板式光生物反应器通常采用透明材料来增大对太阳光的利用率,其结构简洁,透光性能良好,光照面积大,易清洗。Richmond<sup>[11]</sup>在实验中发现平板式光生物反应器的光合成效率相当高,适合扩大培养。早在十几年前,Zhang<sup>[12]</sup>就报道了由100个板式反应器单元组成的平板式光生物反应器系统,用于微藻 *Nannochloropsis* sp. 的高密度培养,细胞密度达到648个/mL,是当时用于大规模密闭式光生物反应器培养微藻投资最少的反应器。但平板式光生物反应器一直存在着贴壁生长现象严重和传质效果差的缺陷,因此,黄建科<sup>[13]</sup>借鉴了气升式和鼓泡式

反应器的原理在平板的底部增加鼓泡装置,并在反应器内设置不同形状的挡板增加气液混合时间,起到了很好的效果。若是可以进一步解决固定结构耗费大的问题,平板式反应器应用于大规模培养将具有很好的发展前景。

### 1.3 鼓泡式光生物反应器

鼓泡式光生物反应器的造价低,内部传质效果好,能耗低,不易感染,培养条件容易控制,但是单位光照面积较小,混合效果差,在培养过程中暗区时间长,不易实现高密度培养。近几年,人们不断地对泡沫柱状光生物反应器进行改进,通过增加内置导流筒或其他结构达到分流的目的,内置导流筒将反应器分为上升区和下降区,藻液在两区之间不断循环进行传热和传质。这种结构也就是现有气升式反应器的初步结构,在反应器里,气泡、液体流动速率、分布器的位置和几何尺寸、气泡大小和表面气体速率等因素均会影响到反应器内的动力学和传热效果。气体分布器的种类有穿孔盘、多孔盘、筛板式、圆环式、网状式、放射式、喷射式和注射式。分布器种类不同,气泡流动机制也不同。气泡大小决定了气泡上升的速率和气体停留时间,反过来又影响了气液传质效率。

综上所述,对光生物反应器的改进主要集中在提高光吸收速率和增强传质效果,这两者会影响微藻在光自养培养过程中的培养条件,例如光照强度、光暗比、溶氧量、温度、pH等因素。下面着重讨论近年来人们对气升式光生物反应器的改进。

## 2 气升式光生物反应器的研究进展

气升式内环流光生物反应器具有培养条件稳定,无菌化程度高,多种环境参数可以精确定量控制的特点,由于其结构简单,具有扩大培养的潜能,近年来人们仍不断地对其进行研究改进,希望可以进一步提高其培养效率,为扩大奠定基础。

### 2.1 反应器曝光性的改进

与板式反应器相比,气升式反应器曝光面积相对较小,吴垠等<sup>[14]</sup>采用内置光源的方式进行改善,他用自行设计的600 L气升式光生物反应器进行试验,反应器中配置内置光源,补充了外部光源的不足;同样的,康瑞娟等<sup>[15]</sup>用15 L的气升式光生物反应器培养微藻时,采用内外光源相结合的光照方式,提高了光能利用效率。

Hincapie等<sup>[16]</sup>在原有内置光源的基础上引用了光导纤维,将集中的单一光源通过光导纤维转换

成多个小光源,相对均匀地分布在培养液中,构成一个个小单元,一方面提高了光利用效率,另一方面提高了微藻的光暗循环速率,若是能达到闪光效应<sup>[13]</sup>的效果,将大大提高微藻的比生长速率。

同样的,Dan 等<sup>[17]</sup>也是从光源入手,尝试在光生物反应器设计中采用菲涅耳透镜来收集太阳光,并采用平面波导装置对收集到的太阳光进行分布来降低太阳光的强度,避免光抑制现象的发生,起到了很好的效果,收获的微藻干重的产量是同等条件下不采用菲涅耳透镜和平面波导的光生物反应器的 3 倍。但实验中由于太阳光线时刻转动,需要有光线追踪器来精确地追踪太阳光线,相关的组件也要相应地变动,否则效率将大大降低。因而在实际中不仅要考虑到光线变动的影响,还要考虑到季节、天气影响,例如阴雨天气或者冬季光强较弱需要有相关的措施来保证微藻的正常的生长。该设计首次采用光分布器的理念,当光照强度较集中且过强时,光分布器可将集中的光照分散,既可避免光抑制现象的发生,也可提高光的利用效率。采用菲涅耳透镜来收集太阳光充分地利用了自然光源,可降低成本。所以该设计理念在微藻的小面积季节性培养过程中可以应用。若要扩大培养仍需一定的技术支持。

除了内增光源的方式,杨泽嫡等<sup>[18]</sup>则从材料入手,设计的新型气升式光生物反应器外壳材料采用双层透明钢化玻璃,内层玻璃折射率为 1.7 以上,外层玻璃折射率为 1.5,造成全反射的效果,减少内部光能的损失。这种方法在筒体的制作上虽然稍显烦琐,但改变了前人从光源着手提高光利用效率的传统观念,为后人提供了新思路。

## 2.2 混合效果的改进

反应器内良好的混合效果不仅可以提高藻体的光合效率,降低溶氧量,还可以减缓藻体贴壁生长的现象。对于气升式光生物反应器,主要通过气流传动来达到混合效果。

### 2.2.1 筒体结构尺寸的影响

筒体的高径比、上升区下降区截面积的比值等几何参数都会影响藻液的传质效果,徐志标等<sup>[19]</sup>研究了不同内外径比值对微藻生长的影响,结果显示,通气量不同时不同内外径比值对微藻的生长影响略有差异,但内外径比值为 0.6 或 0.7 时微藻生长情况较好。由于徐志标等在实验中应用的是球等鞭金藻,通气量较大时受剪切力影响较大,而且内外径比值也没有继续做更细致地划分,所以在实际操作中要根据藻种的不同,选择合适的内外径比值。

同样反应器内上升区与下降区截面积的比值也是影响设备内藻液混合效果的重要参数,有人提出当导流筒与外筒直径比值为 0.8 时混合效果最好,即上升区与下降区截面积比值约为 1.8,但是对于内置光源管的反应器来说不能单纯地以内外径比值为指标进行设计,因为内光源管还要占据一部分体积,使得上升区(内环流方式)或下降区(外环流方式)截面积减小。因此在实际应用中以上升区和下降区截面积比值为指标进行设计取值比较合理。表 1 简单列举了在实际应用中几种气升式反应器的几何参数及培养藻种,以供参考。

表 1 几种气升式光生物反应器在实际应用中几何参数及培养藻种

总体积/L	高/mm	直径/mm	内筒高/直径/mm	高径比	上升区截面积/下降区截面积	培养藻种
1.5	390	76.0	160/50	5.1	0.76	集胞藻 <sup>[20]</sup>
2.8	300	110.0	/65	2.7	0.54	小球藻 <sup>[21]</sup>
70.0	1800	220.0	1500/160	8.2	0.90	栅藻 <sup>[22]</sup>
96.0	1600	320.0	1000/250	5.0	0.53	等鞭藻 <sup>[18]</sup>
130.0	1037	203.2	703/152.4	5.1	1.00	小球藻 <sup>[16]</sup>
300.0	1125	600.0	700/400	2.0	0.80	蓝藻、小球藻、栅藻 <sup>[23]</sup>

从表 1 中可以看出,相关研究人员对设备高径比的取值各有不同,根据大量文献显示,对于气升式光生物反应器,高径比为 5 时,培养效果较好,虽然高径比越大气液传质效果越好,但是对于自养型微藻来说,溶氧量过高会抑制微藻的生长,因此合适的高径比对于微藻的持续高效生长至关重要。上升区与下降区截面积比值基本都为 1,这说明上升的藻液与下降的藻液基本维持平衡,反映了良好的环流效果。

### 2.2.2 附属装置的影响

除了反应器的结构尺寸之外,其附属装置如通气量、通气管孔的间距、通气管的位置以及导流筒的结构也是极其关键的影响因素。

Oscar 等<sup>[24]</sup>曾对气升式内导流光生物反应器和鼓泡式光生物反应器的动力学进行模拟研究,他们得出结论:在同等的物理条件和操作条件下,气升式内导流光生物反应器里的微藻浓度要高于鼓泡式光生物反应器,原因是气升式内导流光生物反应器内液体的混合效果更好,光照分布更均匀,停滞区更少。因此在气升式光生物反应器的内部加一个导流

筒使得反应器内液体形成上升区和下降区,这样可以增强反应器内液体的传质传热效果,还可增大微藻的受光时间。

针对通气管孔的间距, Ghazi 等<sup>[25]</sup>用计算流体力学对其动力学和传热效果进行模拟。结果发现与分布器间隔为 7.62 cm 相比,分布器间隔为 10.16 cm 时,表面风速更高,最大可达到 0.16 cm/s。表面风速越大,混合效果越好,因而在设计时,分布器间隔的选取也尤为重要。

对于通气管的位置,多数设计者都将其安装在导流筒内部,使得导流筒内形成液体上升区,导流筒与反应器内壁间形成下降区,如此达到循环效果。但是在杨泽楠等设计的新型反应器中,通气管安装在导流筒与反应器内壁之间,形成反向循环, Cooper<sup>[26]</sup>已经实验证明了这样的环流方式确实能够改善反应器内部的传热性能。除此之外,在实际应用中通气管孔的直径、分布的均匀性以及安装是否平稳等因素都严重影响整个流场,影响传质效果。

### 3 结语

在实际应用中,根据不同的藻种、实验需求等条件,各种生物反应器均发挥了各自的优势。对于气升式光生物反应器,在具有细胞壁的微藻培养过程中虽然显现出了极大的优越性,但仍存在一些缺陷,例如对于内置光源的气升式反应器,在培养后期会出现大量藻液附着在内光源管壁上,阻断光路,严重降低光的利用效率,同时减缓微藻的生长速率;而且在大型气升式反应器中,单纯地依靠导流筒与气体分布器已不能达到很好的混合效果,甚至会降低微藻的产率,笔者认为可以在导流筒内外安装螺旋叶片、挡流板等扰流装置将大型装置单元化,才能在扩大培养中继续保证微藻的高产率。

### 参考文献

[1] 张家仁,雪晶,孙洪磊. 生物柴油新反应器及其应用[J]. 化工进展,2015,34(4):911-920.

[2] 李扬,曾静,杜伟,等. 我国生物柴油产业的回顾与展望[J]. 生物工程学报,2015,31(6):820-828.

[3] 浅谈能源战略[J]. 化工文摘,2009,(5):1.

[4] 王莉. 生物能源的发展现状及发展前景[J]. 化工文摘,2009,(2):48-50.

[5] 王兆凯. 海洋硅藻生产生物燃油[R]. 深圳:兆凯生物工程研发中心,2009.

[6] Molina E, Ferna'ndez J, Acie'n F G, et al. Tubular photobioreactor design for algal cultures[J]. J Biotechnology, 2001, 92(2):113-131.

[7] Vonshak A, Torzillo G. Environmental stress physiology[M]. Hand-

book of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology, 2004:57-82.

[8] Ugwu C U, Ogbonna J C, Tanaka H. Light/dark cyclic movement of algal cells in inclined tubular photobioreactors with internal static mixers for efficient production of biomass [J]. Biotechnol Lett, 2005, 27:75-78.

[9] 井广宁. 新型套管式光生物反应器的设计及微藻培养性能实验[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2012.

[10] Maor T. Solar radiation on horizontal tubular microalgae photobioreactor direct beam radiation[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133(2):1-5.

[11] Richmond A. Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: A personal view [J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12(3):441-451.

[12] Zhang Chengwu. An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of nannochloropsis sp[J]. Aquaculture, 2001, 195:35-49.

[13] 黄建科. 光生物反应器敏感性参数及小球藻异养—稀释—光诱导串联培养工艺中试研究[D]. 上海:华东理工大学,2014.

[14] 吴垠,孙建明,杨志平. 气升式光生物反应器培养海洋微藻的中试研究[J]. 农业工程学报,2004,20(5):237-240.

[15] 康瑞娟,蔡昭铃,施定基. 用于微藻培养的气升式光生物反应器[J]. 化学反应工程与工艺,2001,17(1):44-49.

[16] Hincapie E, Stuart B J. Design, construction, and validation of an internally lit air-lift photobioreactor for growing algae[D]. the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, 2010.

[17] Dan Dye, Jeff Muhs, Byard Wood, et al. Design and performance of a solar photobioreactor utilizing spatial light dilution[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2011, 133(1):1-7.

[18] 杨泽楠,李鑫,王英娟. 一种培养产油微藻的新型气升式光生物反应器设计[J]. 西北大学学报:自然科学版,2013,43(4):585-589.

[19] 徐志标,裴鲁青,骆其君,等. 气升式光生物反应器内外径比对球等鞭金藻生长的影响[J]. 宁波大学学报:理工版,2005,17(4):406-409.

[20] 张志斌,颜日明,曾庆桂,等. 气升式反应器培养集胞藻 6803 过程中光能利用特性研究[J]. 海洋通报,2009,28(4):54-61.

[21] 周集体,桂冰,李昂,等. 气升式光生物反应器中 Chlorella sp. 优化培养与能量计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(6):94-98.

[22] 丛威,颜成虎,张庆华,等. 一种气升式光生物反应器:CN, 203923169U [P]. 2014-11-05.

[23] 丛威,张庆华,薛升长,等. 一种实现微藻闪光效应的气升式光生物反应器:CN, 102876561A [P]. 2013-01-16.

[24] Oscar Pupo Roncallo, Samira Garcia Freites, Edgardo Paternina Castillo, et al. Comparison of two different vertical column photobioreactors for the cultivation of nannochloropsis sp. [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135(1):1-7.

[25] Ghazi S Bari, Taylor N Suess, Gary A Anderson, et al. Hydrodynamic and heat transfer effects of varying sparger spacing within a column photobioreactor using computational fluid dynamics[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2015, 12(3):1-10.

[26] Cooper P G. Semi-commercial studies of a petroprotein process based on n-paraffins [C]//Tannenbaum S R, Wang DIC. Single Cell Protein II, Heat Transfer Massachusetts: MIT Press, 1975:454. ■