

封闭式光生物反应器研究进展

刘晶璘 张嗣良*

(华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室 上海 200237)

摘 要 国际上 80~90 年代,封闭式光生物反应器是微藻生物技术的重要研究热点,也是微藻生物技术产业化的关键技术之一。本文较全面地介绍了用于微藻大规模培养的封闭式光生物反应器研究现状。将封闭式光生物反应器分为柱式、管式、板式和光导纤维反应器等类型。工业放大前景的管式和板式光生物反应器采取了典型案例分析的方法,列表比较了典型反应器的主要技术参数,并对它们的技术发展趋势进行了归纳总结。

关键词 生物反应器,光生物反应器,微藻

中图分类号 Q813.1 **文献标识码** C **文章编号** 1000-3061(2000)02-0119-05

微藻大规模培养系统可以区分为两大类:敞开式和封闭式。敞开式微藻培养技术经过了广泛深入的试验,已普遍应用于商业化微藻大规模培养中^[1-3]。敞开池微藻培养有其技术局限性,目前,仅有少数几种微藻能够采用敞开池培养^[4-6]。对于要求温和培养条件和种群竞争能力较弱的微藻,则只能采用封闭式光生物反应器培养。另外,对于高卫生要求的微藻产品生产,以及将来的基因工程微藻都必需采用封闭式光生物反应器培养。

与敞开式培养系统相比较,封闭式光生物反应器有以下优点^[7-9]:能够培养更多种类的微藻;产率较高,全年生产期较长;能够维持较高的藻液浓度,能一定程度地降低采收成本;能够更好地控制培养条件,如温度,pH 等;能有效地降低污染。封闭式光生物反应器的这些优越性是以提高投资和操作成本为代价的^[10]。目前,全国报道封闭式光生物反应器建设投资以及成本核算问题的资料极少。这可能一方面,封闭式光生物反应器尚未进入实际商业化生产阶段;另一方面,有些公司的开发研究试验结果和成本核算未公开报道。本文仅从技术层面上考察封闭式光生物反应器的研究进展。封闭式光生物反应器的主要类型有:垂直柱式、管式、板式,以及一些其它特殊类型,例如:光导纤维光生物反应器。

据 Cook, Miyamoto *et al.*^[2,4,11]报道:垂直柱式光生物反应器(柱的直径 5cm 高 2.3m)最大产率为 $23\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, James and Alkhars 气升式反应器产率达到 $20\sim 26\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,还有 Hu 和 Richmond^[12]直径 2.6cm 的柱式反应器等。柱式光生物反应器是管式反应器的前身,柱式反应器都是用于初期的小试规模研究。管式光生物反应器实际上是柱式反应器研究基础上的放大。

1 管式光生物反应器

1.1 管式光生物反应器的主要类型

收稿日期:1999-03-19,修回日期:1999-11-12。

* 通讯联系人。

Jüttner^[13]报道了实验室内的人工光源管式玻璃反应器。柏林谷类研究所有一个较小的人工光源的类似装置^[3]。Pirt 等对内径 1cm 的小管径反应器进行了研究^[14]。Grima^[15]等曾研究用管式光生物反应器培养微藻生产不饱和脂肪酸。一些规模较大的户外管式光生物反应器有必要详细讨论。

1.1.1 水平放置地面的蛇形管式光生物反应器: Torillo 等^[7,16]在意大利佛罗伦萨,试验了一种用聚乙烯塑料管制作的管式反应器。反应器的管径 14cm,培养液总体积 8000L,占地面积约 80m²,由于管壁较薄,机械强度不够。后来又用有机玻璃为材料制作了管径 13.1cm 和管径 7.4cm 的两种管式反应器,管壁厚度达到 4mm,管道平行排列水平放置于地面。平行排列的管道之间用 U 形聚氯乙烯塑料弯头连接,管路的两端连接到距地面 3m 的贮罐中,贮罐体积为 350L。藻液循环采取间歇方式进行,藻液由泵输送到贮罐中,每 4min 通过虹吸作用藻液从贮罐中向管道内快速排放流动一回,形成 0.2~0.3m/s 的平均流速。间歇流动的混合效果明显优于连续流动的混合效果。该反应器培养螺旋藻 5 年试验中平均产率达到每公顷每年 30~33t,最高日平均面积产率达到 $25\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。这种平行排列的管式光生物反应器存在着较严重的混合不均的问题和溶氧脱气问题。在晴天的阳光下,只需几分钟溶氧 DO 饱和度就会达到 300% 以上,这样高的溶氧 DO 水平对提高产率有明显的不良影响,同时,也会影响到蛋白质的正常合成^[3]。

1.1.2 浸没在水池中冷却的蛇形管式光生物反应器: Gudin and Chaumont^[3,4]报道,在法国建造了管径 6.4cm,面积 100m²的管式光生物反应器。反应器的管道材料是聚乙烯塑料。此管式反应器是由 5 个面积为 20m²的相同单元组成。反应器的集光管放在水池中,可以根据需要对藻液进行冷却。Chaumont^[17]等报道,用该系统连续培养紫球藻

(*Phophyridium cruentum*) 2 个月中, 产率达到 $20 \sim 25\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。西班牙的 Grima 等^[15]报道了一套集光管总管长 80.8m, 内径 2.6cm, 外径 3cm 的浸没水池蛇形管式反应器研究。

1.1.3 双层排列管式光生物反应器: Torzillo 等^[18]报道了一种集光管双层排列的管式光生物反应器。最初设计的是提高管式反应器的光能利用率。阳光首先照射到上层集光管, 从上层集光管缝隙之间漏过的直射光再由下层集光管吸收, 在两层集光管的底部放上白色聚乙烯薄膜, 未被两层集光管吸收的光线落到底部, 经白色薄膜反射后再次由上面两层集光管吸收, 进一步提高光能利用率。该反应器每层集光管由 15 根 8m 长的有机玻璃管道组成, 管道之间由 U 形玻璃弯管连接。管道内径 2.6cm, 外径 3.0cm, 管路总长 245m, 反应器的总装液体积为 145L, 总占地面积 7.8m^2 。双层管式光生物反应器培养钝顶螺旋藻时, 获得了 $27.8\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的日平均面积产率(包括夜间呼吸消耗, 不包括夜间消耗的白天面积产率达到 $33.4\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 白天的光能利用率达到 7.95%。

1.1.4 多支路并行流管式光生物反应器: Richmond^[19]报道, 这种管式光生物反应器的集光管是平放在地面上的。8 根集光管平行排列与两端的多支复合接头管连接, 构成并行的流动回路。反应器采取气生循环, 气升管内径 4.6cm, 外径 5.0cm, 高 2.22m。降液管的直径 5.0cm。脱气筒内径 18cm, 外径 20cm, 高 80cm, 容积 20L。集光管以聚碳酸酯为材料, 内径 3cm, 外径 3.2cm, 每只集光管长度均为 20m。并行流管式光生物反应器, 在提高集光管内藻液的流速方面取得了一定的成效。用水测试, 管内流速可达 $50\text{cm}/\text{s}$ 。在微藻培养过程中, 藻液溶氧水平最高可达 200% 以上。根据文献报道分析, 反应器的产率与其它类型的管式反应器处于相同水平。

1.1.5 α -型管式光生物反应器: Lee Yuan-Kun^[20]报道了一种立体构造的 α -型管式光生物反应器。反应器的两端是两排 5m 高的气升式提升管, 每排提升管的顶部各有一只长方形的贮液槽。藻液从气升式提升管流入贮液槽, 再从与贮液槽相连的一排平行排列的倾斜聚氯乙烯管流出, 到达对面一侧的气升式提升管底部, 经气升提升后, 进入对面一侧提升管顶部的贮液槽, 然后, 从另一排聚氯乙烯倾斜管流回到原来的提升管底部, 如此循环。该反应器培养小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 最高面积产率达到 $72\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 藻液浓度超过 $10\text{g}/\text{L}$ 。

1.1.6 圆形螺旋盘绕管式光生物反应器: 有一种螺旋盘绕式管式光生物反应器, 直径 3.0cm 的聚乙烯塑料管安放在支架上呈螺旋状排列, 表面积与体积比为: 每 1200L 藻液的表面积是 100m^2 。在藻液流速和产率等方面, 这种反应器与水平放置的管式反应器相当。Chrismadha 与 Borowitzka 曾研究过采用这种装置培养微藻生产二十碳五烯酸报道。

1.1.7 国内的户外玻璃管式光生物反应器: 李师翁和李虎乾^[22]用管式光生物反应器户外培养小球藻研究, 反应器管内径 5cm, 总容积 1000L, 受光面积 30m^2 , 藻液流速为 $40 \sim$

$60\text{cm}/\text{s}$ 。培养小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 最大体积产率达到 $0.605\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 相当于面积产率 $20.2\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。平均体积产率 $0.375\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$, 相当于面积产率 $12.5\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

为了便于比较, 我们把上述几种管式光生物反应器的主要技术参数列在表 1 中。

表 1 几种管式光生物反应器主要技术参数比较

| 反应器类型 | 集光管内径(cm) | 占地面积和总体积 | 产率(藻种) $/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$ | 文献作者与报道时间 |
|-------------|-------------------|-------------------------|---|-----------------------|
| 水平放置蛇形管式反应器 | 13~14 | 80m^2 8000L | 25 (<i>Spirulina platensis</i>) | Torzillo G. 等 1986 |
| 浸没水池蛇形管式反应器 | 6.4 | 100m^2 | 20~25 (<i>Pholphrydium cruentum</i>) | Chaumont 等 1983 |
| 双层排列管式反应器 | 2.6 | 7.8m^2 145L | 27.8 (<i>Spirulina platensis</i>) | Torzillo G. 等 1993 |
| 多支路并行流管式反应器 | 3.0 | 约 10m^2 | $0.37\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ (面积产率不详) (<i>Anabeana siamensis</i>) | Richmond A. 等 1993 |
| a-型管式反应器 | 提升管 3.2 斜管 2.5 | 12m^2 300L | 72.5 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) | Lee Y. K. 等 1995 |
| 螺旋盘绕管式反应器 | 3.0 | 不详 | 不详 | Biocoil 公司 1987 |
| 玻璃管式反应器(国内) | 5.0 | 30m^2 1000L | 20.2(最大) 12.5(平均) (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) | 李师翁 李虎乾 1997 |

1.2 管式光生物反应器开发设计的主要发展趋势

根据管式光生物反应器的研究现状分析, 以提高产率为目的管式光生物反应器的开发设计有以下一些发展趋势。

1.2.1 管径减小并稳定在一定范围内: 管式反应器设计中, 管径从十几厘米, 逐渐减小并渐渐稳定在 $2.5 \sim 5.0\text{cm}$ 范围内。由于管式反应器的表面积与体积比(A/V)得到了提高, 从而, 较大幅度地提高了反应器的体积产率。管式反应器的单位体积产率与管径有直接关系, 管径越大体积产率越小。管径的减小, 对反应器的放大负有负面影响, 主要限制了管式光生物反应器的总体积的增加。

1.2.2 集光管的排列向空间发展: 管式光生物反应器集光管的排列方式, 从平放于地面, 向空间立体结构发展。这样在占地面积不变的条件下, 增加了反应器的采光表面积, 使得按照占地面积计算的单位面积产率有较大提高。例如: 双层管式光生物反应器利用两层集光管采光; 螺旋盘绕管式反应器和 α -型管式光生物反应器, 集光管的排列采取了空间立体结构的布管方式。这样集光管背向着直射太阳光的一面, 能够吸收周围的散射光, 反应器的采光面积得到增加。

1.2.3 采取措施降低管路阻力提高藻液流速: 在管式光生物反应器集光管的排列方式和管路连接方式设计中, 采取了措施试图降低藻液流动阻力, 以期提高藻液在集光管中的流速和藻液流动的湍流强度。例如: 多支路并行流管式反应

器,将集光管并联连接,期望这样能够减少藻液的流动阻力,从而提高流速,并且取得了一定成效。水平放置的蛇形管式反应器集光管之间通过 U 形弯头连接,藻液流动的拐弯阻力较大。 α -型管式光生物反应器,较大幅度地减小了管道拐弯连接处的拐弯角度,这对提高藻液流速有较大作用。

1.2.4 普遍采用气升循环混合系统:在试验中通过与泵循环比较,大多数管式光生物反应器的设计都选择了气升循环混合方式。气升循环有特殊优越性,它在提供藻液流动力的同时,还有助于溶氧脱气。气升循环对藻体的剪切作用较小,动力消耗也不大。这可能就是选择气升循环的主要原因。各种管式光生物反应器都存在着溶氧积累问题,微藻培养过程中,大多数管式反应器的溶氧水平超过 200%,有些文献未介绍培养中的溶氧水平,可能是试验中未测定藻液的溶氧水平,从其反应器的结构和产率分析,它们的溶氧积累问题可能更加严重。

2 板式光生物反应器

2.1 板式光生物反应器的主要类型

较早报道板式光生物反应器研究的有:Samson 与 Leduy^[23]报道了一种人工光源的板箱式反应器研究;Anderson 与 Eakin^[24]报道了用光路长度达 8 英寸的板箱式反应器培养 *Porphyridium cruentum* 生产多糖的研究。Ramos de Ortega and Roux^[25]报道了板式反应器的户外培养研究。这之后,Tredici^[7,26]报道了垂直嵌槽板式反应器研究。Pulz^[27,28]报道了多层平行排列的板式反应器研究,由 21 个单元组成的多层板式反应器的总体积达 6000L。Hu, Guterma 和 Richmond^[29]等报道了 4 种不同厚度板式反应器微藻培养的比较研究;Hu^[30]等还报道了关于入射光强和通气混合强度对板式反应器产率影响试验结果。

板式光生物反应器研究起步比管式反应器略晚。在封闭式光生物反应器的各种几何形状类型中,管式反应器和板式反应器是培养规模最大的、有放大前景的两种类型。下面按照文献报道的时间顺序,对有代表性的板式反应器研究做一介绍,这样我们可以更清楚地看到板式光生物反应器的技术发展脉络。

2.1.1 人工光源的板箱式光生物反应器:加拿大的 Samson 和 Leduy^[23]报道了一种人工光源的板箱式光生物反应器,板箱长度 122cm,板箱厚度 10cm,板箱内藻液的装液高度约 50cm。用 16 根荧光灯照明,板箱两侧每侧 8 根,表面平均光强 30klx。反应器的总装液体积 64L。表面积与体积比约 20m^{-1} ,采取通气鼓泡混合。昼夜连续光照,最大面积产率达到 $60\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,最大体积产率达到 $1.17\text{g}/(\text{L}\cdot\text{d})$ 。

2.1.2 水平放置的板式光生物反应器:在法国 Ramos de Ortega 和 Roux^[25]报道了一种硬质聚乙烯塑料板式光生物反应器的户外培养研究。这种反应器由具有三层壁的单元板组合而成,每块单元板长 6m,宽 25cm,厚 4cm。单元板的内部结构与空心瓦的内部结构相似,从单元板的横截面观察,可以看到两排网格状方形通孔管道。一排方形管道用来

通冷却水,另一排方形管道用作藻液流动。每个方形通管长度与板长相等为 6m,口径为 $3.85\text{cm}\times 1.85\text{cm}$ 。该反应器户外培养小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 平均面积产率达 $16.2\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

2.1.3 垂直嵌槽板式反应器:在意大利,Tredici^[26]等开发了一种垂直嵌槽型板式反应器,反应器是用建温室的商品盖板材料改装制成。反应器的板厚 1.6cm,迎光表面积为 2.2m^2 ,反应器的装液量约在 25~27L 之间,表面积与体积比为 80m^{-1} 。这种盖板材料内部也是方形通孔管道结构。与 Ramos de Ortega 的板式反应器不同的是,Tredici 等将这种盖板材料垂直放置,并采用气升循环混合,藻液沿着垂直方向流动,故称为垂直嵌槽板式反应器 (Vertical Alveolar Panel, VAP)。

在垂直嵌槽板式反应器的内部,藻液流动有两种基本方式。一种称为流过式 VAP (Flow through VAP),在反应器内部的方形管道之间由隔板隔开,每一个相间隔的隔板上方,多缩进数厘米,每间隔一个方形通管从底部通入空气,形成垂直方向的河曲水道式流动。另一种流动方式是鼓泡式 VAP,在每个方形通管的下部通入空气,成为并排的鼓泡管。这种板式反应器在采取了适当的控温措施后,培养钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 的日平均产率达到 $18\sim 24\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的水平。

2.1.4 多层平行排列板式光生物反应器:德国的 Pulz^[27,28]等报道了多层平行排列板式光生物反应器研究。这种反应器的表面积与体积比为 60m^{-1} 。试验中最多时,反应器由 21 个平行的板式反应器单元组成,单板的厚度为 2.5cm,总体积达 6000L,其中暗体积 680L。该板式反应器的透光表面积为 436m^2 ,占地面积约 100m^2 。阳光有一部分直射到反应器板面,大部分是通过反射或散射进入反应器的。据称,这种反应器取得了相当高的光能利用率。反应器的体积产率达到 $1.3\text{g}/(\text{L}\cdot\text{d})$,藻种不详。

2.1.5 倾斜鼓泡板式光生物反应器:Hu^[29]等报道了这种板式光生物反应器研究。该反应器的板箱用玻璃制作。反应器箱体内部没有纵向或横向隔板,形成完整的连续内部空间。通过试验比较,选择了鼓泡混合方式。

这种板式光生物反应器高 70cm,宽 90cm。试验中比较了 4 种不同光路长度(光路长度即指板式反应器的厚度)板式反应器的螺旋藻培养效果。Hu 等首次通过试验阐述了板式光生物反应器光路长度与产率之间的关系。Hu^[30]等还利用人工光源的窄光路板式反应器研究了混合强度对板式光生物反应器产率的影响。

上述几种板式光生物反应器的主要技术参数列在表 2。从中可以看到一些板式光生物反应器的存在问题和的发展趋势。

2.2 板式光生物反应器的发展趋势和存在的问题

板式光生物反应器板面趋向于空间立体放置。早期 Rejean^[23]的板箱式人工光源反应器,由于需要两侧采光采取了立式放置。Ramos de Ortega^[25]的板式反应器是平放地面的。Tredici^[26]等用垂直嵌槽板式反应器采取了倾角可调的

安装设计。Pulz^[27,28]报道的多层板式光生物反应器是竖直平行排列的,这样扩大了藻液与散射光的接触面积。Hu^[29]等报道的倾斜板式反应器研究中,也考虑了反应器背向阳光一侧的散射光吸收对产率的贡献,从上述分析可以看到,为了提高按占地面积计算的单位面积产率,有赖于反应器的板面布局向立体空间发展,有赖于提高板式反应器内藻液与散射光的接触面积。但是,这样就增加了对反应器制作材料的强度要求。从而提高了板式反应器的制造成本。

表 2 几种板式光生物反应器主要技术参数比较

| 反应器类型 | 光路长度 (内部厚度) | 采光面积 藻液体积 | 产率(藻种) | 文献作者与 报道时间 |
|---------------------|----------------|---|--|---|
| 人工光源 板箱式 反应器 | 10cm | 0.6m ² ×2 64L | 1.17g/(L·d) 60g/(m ² ·d) (<i>Spirulina maxima</i>) | Rejean Samson and Anh Leduy (1985) |
| 水平放置 的板式 反应器 | 1.85cm | 8m ² 120L | 1.08g/(L·d) 16.2g/(m ² ·d) (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) | Ramos de Ortega and J. C. Roux (1986) |
| 垂直嵌 槽板式 反应器 | 1.6cm | 2.2m ² 25~27L | 1.52~2.03g/(L·d) 18~24g/(m ² ·d) (<i>Spirulina platensis</i>) | Tredici M. R. and Materassi R. 1991&1992 |
| 多层平行 排列板式 反应器 | 2.5cm | 100m ² (占地面积) 436m ² (透光面积) 6000L | 1.3g/(L·d) 78g/(m ² ·d)(占地面积) (藻种不详) | O. Pulz, (1994) |
| 倾斜鼓 泡板式 反应器 | 2.6cm | 0.63m ² 12L | 2.1g/(L·d) 49.4g/(m ² ·d) (<i>Spirulina platensis</i>) | Qiang Hu, Hugo Guterman and Amos richmond (1996) |

关于板式光生物反应器光路长度的选择。Ramos de Ortega 水平放置的板式反应器光路长度为 1.85cm。Tredici 等的垂直嵌槽板式反应器光路长度 1.6cm。Pulz 的多层板式反应器单元板层组件的光路长度为 2.5cm。Richmond 等也推荐选择 2~2.6cm 的光路长度^[31]。板式光生物反应器设计中光路长度的选择,主要是在体积产率、面积产率和反应器的总体积三者之间进行权衡。目前,封闭式光生物反应

器设计选择光路长度,还只能根据已有的研究案例经验来判断。有关的优化理论研究十分薄弱。板式反应器光路长度太窄,大大地限制了反应器的放大潜力。这是封闭式光生物反应器面临的共同问题。

3 光导纤维光生物反应器

在提高封闭式光生物反应器的照光表面积与体积比的探索中,Mori^[32]报道了一种光导纤维光生物反应器。该装置的顶端是一个集光器用于收集入射光,光导纤维连接在集光器的底部,通过光导纤维将光直接传入六角柱形反应器罐体内部的光导棒上。竖直平行排列于反应器罐体内的光导棒,将光线均匀地分散到罐体内部的藻液中。用透明高分子材料制作的光导棒的外围包裹了一层折射率较低的介质。沿光导棒的长度方向,每 1cm 切割一个环状凹槽,促使光线向周围散射,这样使光线在反应器中均匀分布。

混合和高溶氧积累是这种光导纤维光生物反应器微藻高密度培养的主要技术障碍之一,该反应器采取鼓泡方式通入 10.4% 的 CO₂, 8.5% 的 O₂, 和 81.1% 的 N₂ 混合气体,通气速率达到 264L/h,相当于 1.7vvm,取得了较好的混合效果。该反应器六角柱形罐体内部总体积为 2.4L,反应器的表面积与体积比(A/V 比)高达 577.4m,培养小球藻产率达到 0.3~0.4g/(L·h),相当于 7.2~9.6g/(L·d)。此反应器在美国、日本、加拿大和澳大利亚等国申请了专利,但未见有开发出可销售商品的报道。

1991 年美国密执根大学 Javanmardian 和 Palsson^[33]报道了一个类型相似的光导纤维光生物反应器,反应器的表面积与体积比(A/V 比)稍小为 300m⁻¹。反应器罐体为圆柱形,直径 10cm,高 17cm,装液体积 600mL,反应器培养小球藻的产率达到 0.063g/(L·h),相当于 1.5g/(L·d)。该光纤反应器配备了复杂的气体交换系统和培养液的超滤系统,用来解决极高 A/V 比下的混合及培养液的更新问题。这说明,通气混合在该光纤反应器系统中问题严重。

光导纤维光生物反应器的生产制作成本是极昂贵的。笔者认为,在可以预见的将来很难应用于微藻商业化生产。如果将这种光纤反应器设计成特殊用途的精密研究设备,或许会有潜在的商业市场。

参 考 文 献

- [1] Kenneth L Terry. *Enzyme Microb Technol*, 1985, 7: 474~487
- [2] Lee Y K, Compilation of International Seminar of Spirulina Industry Development. (Kunming China), 1996, pp. 1~16
- [3] Becker E W. *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. Lonton: Cambridge University Press, 1994, pp. 66~75
- [4] Chaumont Daniel. *Journal of Applied Phycology*, 1993, 5: 593~604
- [5] Borowitzka M A, Borowitzka L J. *Micro-algal Biotechnology*. Lonton: Cambridge University Press, 1988
- [6] Ciferri O. *Microbiological Reviews*, 1983, 47(4): 551~578
- [7] Tredici M R, Materassi R. *Journal of Applied Phycology*, 1992, 4: 221~231
- [8] Richmond A. *Journal of Applied Phycology*, 1992, 4: 281~286
- [9] Prokop A, Erickson L E. *Photobioreactors in: Bioreactor System Design*, Asenjo J A, Merchuk J C et al. ed, Marcel Dekker Inc. 1995
- [10] Benemann J R. In: *Algal and Cyanobacterial Biotenology*, by Rees T A V et al ed, New York: Longman Scientific and Technical, 1989, pp. 317~337

- [11] Miyamoto K, Wable O, Benemann J R. *Biotechnology Letters*, 1988, **10**(10): 703~708
- [12] Hu Qiang, Richmond A. *Journal of Applied Phycology*, 1994, **6**: 391~396
- [13] Jüttner F. *Process Biochemistry*, 1982 March/April: 2~7
- [14] Pirt S J, Lee Y K, Walach M R *et al.* *J Chem Tech Biotechnol.* 1983, **33**: 35~58
- [15] Grima E M, Camacho F G, Perez J A S *et al.* *Biotechnol Appl Biochem*, 1994, **20**: 279~290
- [16] Torzillo G, Pushparaj B, Bocci F *et al.* *Biomass*, 1986, **11**: 61~74
- [17] Chaumont D, Thepenier C, Gudín C. In: *Algal and Cyanobacteria Biotechnology*, by Stadler T *et al.* ed, New York: 1988, pp. 239~271
- [18] Torzillo G., Carozzi P, Pushparaj B *et al.* *Biotechnology and Bioengineering*, 1993, **42**: 891~898
- [19] Richmond A., Boussiba S, Vonshak A *et al.* *Journal of Applied Phycology*, 1993, **5**: 327~332
- [20] Lee Yuan-Kun, Ding Sun-Yeun, Chin-Seng Low *et al.* *Journal of Applied Phycology*, 1995, **7**: 47~51
- [21] Chrismadha T, Borowitzka M A. *Journal of Applied Phycology*, 1994, **6**: 67~74
- [22] 李师翁, 李虎乾. *生物工程学报*, 1997, **13**(1): 93~97
- [23] Samson R, Leduy A. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1985, **63**: 105~112
- [24] Anderson D B, Eakin D E. *Biotechnology and Bioengineering symp*, 1985, (15): 533~547
- [25] Ramos de Ortega, Roux J C. *Biomass*, 1986, **10**: 141~156
- [26] Tredici M R, Carozzi P, Chini Zittelli G *et al.* *Bioresource Technol*, 1991, **38**: 153~160
- [27] Pulz O. *Russian Journal of Plant Physiology*, 1994, **41**(2): 256~261
- [28] Pulz O, Gerbsch N, Bachholz R. *Journal of Applied Phycology*, 1995, **7**: 145~149
- [29] Hu Qiang, Hugo Guterman and Amos Richmond. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, **51**: 51~60
- [30] Hu Qiang, Amos Richmond. *Journal of Applied Phycology*, 1996, **8**: 139~145
- [31] Richmond A. *Journal of Applied Phycology*, 1996, **8**: 381~387
- [32] Kei Mori. *Biotechnology and Bioengineering Symp.* 1985, (15): 331~345
- [33] Minoo Javanmardian, Bernhard O. Palsson. *Biotechnology and Bioengineering*, 1991, **38**: 1182~1189

Advances of Studies on Enclosed Photobioreactors

LIU Jing-Lin ZHANG Si-Liang

(State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract In the last two decades, enclosed photobioreactors have received major research attention. It is one of the key techniques in microalgae biotechnology. This article reviews the system development of enclosed photobioreactors which are divided into column, tubular plate and opticle fibre type respectively. Typical photobioreactors of tubular and plate type are introduced separately. Their technical parameters are table compared. The technical development tendencies are summarized.

Key words Bioreactor, photobioreactors, microalgae