

内置LED光源罐式全自动光生物反应器设计及性能分析

谢水英^{1*}, 王科², 韩承江¹

(1. 浙江工业职业技术学院, 浙江绍兴 312000;
2. 江苏元洲生物工程有限公司, 江苏镇江 212028)

摘要:研究了具有光源波长可选、光强可控、能耗小、体积小、可高温高压灭菌和全自动控制培养条件的光生物反应器。采用独特的内置LED光源集成结构、密封结构与冷却系统,以AT56C55和RTL8019AS芯片为核心的智能控制系统设计该反应器。实验证实,在其他条件相同的情况下,设计的5L内置LED光源发酵罐相比5L外置光源发酵槽,培养球形红杆菌的浓度要高出10倍多,培养类胡萝卜素产量与菌体生物总量分别提高了60.5%和59.9%,并且能耗较小。

关键词:内置LED光源;光生物反应器;控制;设计;性能

中图分类号:Q949.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0147-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.036

Design and performance analysis of cylindrical photo-bioreactors with built-in light emitting diodes (LED) in microalga culture

XIE Shui-ying^{1*}, WANG Ke², HAN Cheng-jiang¹

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China;

2. Jiangsu Yuanzhou Biological Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212028, China)

Abstract: A newly developed cylindrical photo-bioreactor with competitive specifications, including small size, low energy consumption, flexible wavelength, controllable light intensity, capability of sterilization under high pressure and temperature and automatically controlled culture environment, is studied. Combined with the advantages of a specially integrated LED, sealing structure and cooling system, an intelligent control system with AT56C55 and RTL8019AS CPU is adopted to design this reactor. It is confirmed by the experiment that under the same conditions, the newly developed 5L of photo-bioreactor with built-in LED provides 10 times higher concentration of spherical red coli compared with that of 5L of fermentation tanks with external light source. The yields of carotenoid and bacteria are correspondingly improved by 60.5% and 59.9%, respectively. In addition, it also has lower energy consumption.

Key words: built-in LED; photo-bioreactor; control; design; performance

光生物反应器是指用于培养植物细胞、藻类、光合细菌等光合生物的一种反应体系,主要由反应器主体、光源系统、管路系统及控制系统等组成。按其是否封闭分为敞开式与封闭式。对于种群竞争能力较弱或需要有温和培养条件以及基因工程所需光生物的培养,要求采用可灭菌的封闭式光生物反应器^[1-2]。目前,这种反应器主要是采用外部光源,如太阳光、日光灯、白炽灯等,依靠光纤传递与光分散系统相结合,实现发酵罐内光照需要,但这种反应器体积大、光能利用率低、能耗大、成本高^[3]。

本文中研究设计的反应器,采用独特的内置LED光源集成结构、密封结构与冷却系统,以AT56C55和RTL8019AS芯片为核心的智能控制系统,具有光生物产量高、能耗小、可控性强等优点,在

光生物反应器中具有较强的竞争力。

1 内置LED光源罐式全自动光生物反应器设计

1.1 主体结构设计

用于光合生物培养的反应器与普通微生物培养发酵罐不同,据光合生物的生物特性,其培养除一般的要求,如适合的温度、压力、pH、DO以及无菌、较好的混合等条件外,还要求有一定的光照强度、光源波长等,故光合作用生物反应器在普通微生物培养发酵罐设计基础上还应考虑光源的选型和光源结构设置^[4]。本项目在主体结构设计上着重研究内置于反应器内的光照均匀、波长可选、光强可调节的LED光源,以及易于更换、便于操作使用的光源集

成结构。

本项目设计的内置 LED 光生物反应器主体结构是在不锈钢罐顶部或底部制作多个法兰孔,将耐温、耐压、耐温度急变的硼硅玻璃筒体植入不锈钢材质反应罐体内,在密封反应罐内将集成了高亮 LED 光源的支撑体通过玻璃筒体放入反应器内部^[5-6]。反应器主体结构如图 1 所示。

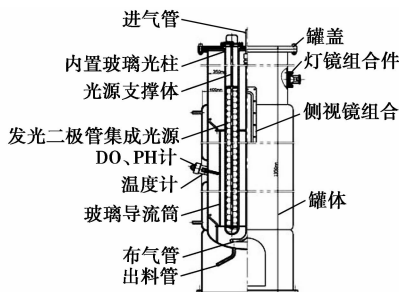


图 1 反应器主体结构图(气升式)

1.2 设计独特的 LED 光源集成结构,实现光照均匀、波长可选和功率可调

本项目在光源上着重研发 LED 光源在光合生物反应器内的集成结构。根据不同的培养要求选择不同特性的高亮度 LED,做了 5 种光合菌试验,即螺旋藻、微蓝藻、鱼腥藻 7120、 β 胡萝卜素、叶绿素。试验结果表明,不同种类的光合生物对光源波长要求不同,并且在生长与合成阶段对光源的波长要求也不同^[7-9]。因此,必须据不同的培养对象选择适

(上接第 146 页)

由于各种原因导致分子筛粉化、失效,降低了吸附性能,影响氮气的纯度,更换分子筛后氮气的纯度明显提高。

3.3.3 调校氧/氮分析仪

氧/氮分析仪是监测和显示氮气纯度最直接的部位,它的完好性与测量数值的准确性直接影响氮气的使用情况。因此在不影响生产使用的情况下及时调校氧/氮分析仪,确保测量氮气纯度数值的合格。

4 结语

分子筛质量的好坏、塔体填装分子筛的密实度、气源压力的稳定性及净化设施的效率等都直接影响分子筛的使用寿命和吸附效果,不满足任何条件都会加剧分子筛的粉化,最终导致设备内部构件损坏,设备无法正常运行。

在保证分子筛质量的情况下,通过间断启停填

当的照射功率和光源波长,光源集成体应具有区块分割和方便更换的模块化结构,实现光源照射的均匀性和可选可调性^[10-11]。本项目设计制造的 LED 光源集成体实物图如图 2 所示。



图 2 集成 LED 光源

1.3 发光二极管光源支撑体及密封结构设计

本项目中发光二极管光源内置于反应器,且反应器可高温高压灭菌,故作为光源的支撑体的材料必须具有高透明性,以及能耐受高温高压及温度急变等特性。光源支撑体的材料选定为硼硅玻璃,由于硼硅玻璃光柱与不锈钢罐体二种材料的热膨胀系数不同,容易引起硼硅玻璃破碎,为了解决这一问题设计了在结合处使用成型的硅胶密封圈,实验证明,该结构能很好解决这一难题,具体结构如下:插入罐内的耐温、耐压、耐温度急变的硼硅玻璃管与反应器联为整体,形成密闭反应空间。LED 强制水冷集成支架放入玻璃筒,通过固定板与上夹紧法兰连接。LED 光源透过玻璃筒体对反应器内部光合

装法、在压紧气缸上安装电磁感应报警器、加强气源处理效率有效解决了分子筛的泄漏问题;通过对焊缝处理,更换布气板支撑有效解决了内部构件损坏的故障;通过调整进气、排气的流量,调校氧/氮分析仪保证了氮气出口的体积分数。

对 PSA 制氮机在褐煤提质装置生产中的故障进行原因分析和处理后,大大降低了生产运行成本和检修成本,提高了设备运行的稳定性,有效保证了褐煤提质装置生产的连续性和安全性。

参考文献

- [1] 韩有龙. 氮气在煤矿防火中的应用[J]. 中国科技博览, 2013, 6(4): 202 - 202.
- [2] 朱自洲, 刘云肖, 吴涛. 氮气在褐煤提质装置中的制备和综合应用[J]. 中国化工贸易, 2014, 6(31): 156 - 157.
- [3] 卢樟好, 赵开利. 碳分子筛制氮技术研究[J]. 低温与特气, 1996, 14(2): 27 - 31.
- [4] 朱自洲, 刘云肖, 吴涛. 氮气在褐煤提质装置中的制备和综合应用[J]. 中国化工贸易, 2014, 6(31): 156 - 157. ■

生物进行照射。该支撑体及密封结构使得反应器内的培养液与光源隔绝,防止对培养液的染菌,此特殊材料及结构也使光反应器可进行高温高压灭菌进行密封无菌培养^[12]。结构如图3。

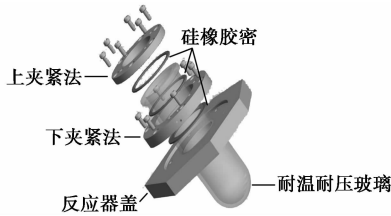


图3 光源支撑体及密封结构

1.4 采用强制水冷结构,解决光源散热问题

在光生物反应器中,内置光源可能产生局部过热,从而影响微生物的培养效率,本项目采用拉制铝型材作为强制水冷集成支架解决这一难题。

(1)拉制铝型材壁厚5 mm,壁内均匀拉制6个直径2.5 mm的孔作为冷却水通道。

(2)在上、下端面,每相邻两孔为一组,间隔铣槽贯通。而上、下端面铣槽贯通孔相互交叉,从而保证冷却水在集成支架内上下互通。

(3)根据照射强度换算为LED个数,在拉制孔相间壁上依次开孔,用于安装LED发光二极管。LED发光二极管与管壁紧贴。

以上结构使LED热量通过铝材管壁传导到冷却水从而完成强制冷却。结构如图4所示。



图4 强制水冷结构原理图

1.5 采用离散流体磁力搅拌结构,确保介质的完全循环

小型生物反应器都使用圆盘式磁力耦合联轴器,罐内一个磁力联轴器(上半部分),罐外一个磁力联轴器(下半部分)。由于内外磁力半联轴器之间的间隙越小上下联轴器之间的磁力就越大,这就要求反应器的磁力耦合上下联轴器之间间隙必须尽可能小,但实际的使用和安装过程中上联轴器与罐底隔层总有一个距离,在搅拌时,其间的介质基本处于没有物质交流的“死区”,是可能导致反应器培养失

败的隐患^[13]。

针对这一隐患,本项目独创离散流体磁力搅拌器,内磁力半联轴器内间隔嵌入耐高温永磁体,在内磁力半联轴器圆盘底部永磁体间隔内加工导流槽,在旋转时导流槽内介质被强制甩出,“死区”内介质补充入导流槽,而“死区”外介质补充入“死区”,从而完成介质循环^[14]。搅拌器结构如图5。

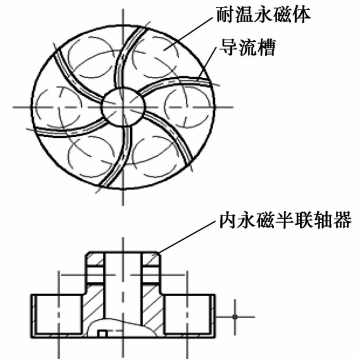


图5 搅拌器结构图

该搅拌器具有以下优点:①用焊接隔离套静态死密封取代动态机械密封,完全解决动态机械密封泄漏问题;②结构简单,易拆卸,易清洗,无“死区”。

1.6 全自动智能控制系统设计

智能控制系统是光生物反应器的核心技术之一,除应具备一般微生物发酵罐的控制功能外,还应具备控制光合生物培养中的光照强度、光波选择和变换等功能,本项目采用以AT56C55和RTL8019AS芯片为核心的智能控制模块和触摸屏显示,自动控制光照强度及细胞培养的全过程。根据生物数学模型运算,预先设定培养过程各阶段的培养参数和光照强度,实现温度、浓度等参数的PID控制,pH、DO电极的标定运算及定时采集或变化采集批次发酵数据存储。

同时,反应器与PLC控制系统相结合,实现智能模块与监控计算机之间的遥控、遥测、遥讯以实现在线网络监控功能。项目控制系统的开发任务主要包括人机界面功能设计、控制数字板电路设计、驱动执行隔离板设计、控制软件优化、数字式PID控制算法设计、联动设计、发酵监测软件设计。

控制器选用日本松下PLC为控制基础元件,控制系统分为上位机和下位机,控制系统由传感器现场检测→变送→信号处理→中央控制区→输出系统→执行系统等组成,控制系统下位机可以与上位机进行远程通讯和远程控制^[15]。控制系统结构如

图 6 所示。

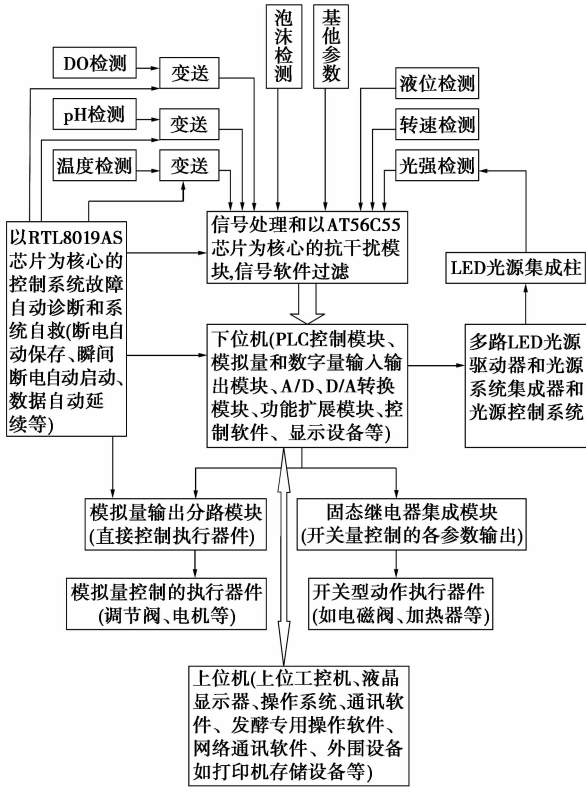


图 6 智能控制系统结构图

2 反应器性能分析

2.1 技术性能指标

本项目设计制造的光生物反应器技术性能指标如表 1 所示。

表 1 技术与性能指标

项目	指标
生物反应器搅拌方式	气体环流型、磁力搅拌型、机械搅拌型
转速可调性	50 ~ 800 r/min, 无级调速
温度自控	(冷媒温度 + 5) ~ 60℃
酸碱 pH 自控	2 ~ 12, 精度: ±0.1
溶氧 DO 检测	0 ~ 100% (150%) ± 2%
光照强度自控	10 ~ 200 cd
自动补料	可定时定量精确计量补料或根据液位补料
自动消泡	消泡电极检测并自动消泡
发光体耐温性	≤ 130℃
发光体耐用性	工作电压 12 V 或 24 V 安全电压, 在 ≤ 130℃ 环境下使用寿命 ≥ 50000 h
发光体耗能	传统光源的 20%
气体流量	流量计显示
压力显示	隔膜压力表显示

2.2 光合菌培养性能分析

2.2.1 球型红杆菌连续培养试验

利用本项目设计制造的光生物反应器对球型红杆菌进行连续培养试验, 试验数据如表 2。

表 2 球型红杆菌的连续培养试验实验数据分析

光源形式	日光灯	日光灯	内置 LED (红蓝紫均布)
光照强度	2000 lx 左右	2000 lx 左右	2000 lx 左右
培养设备	外置光源发酵槽	外置光源式培养摇床	内置 LED 光源发酵罐
设备规格	100 L 圆型槽	500 mL 三角瓶 70 只	100 L 发酵罐
培养搅拌条件	底部通气搅拌	180 r/min 旋回摇动, 振幅 16 mm	搅拌转速 260 r/min, 罐底通气
接种后培养时间	48 h	48 h	48 h
培养基	乙酸培养基 (g/100 mL): 乙酸钠 2.0, KH ₂ PO ₄ 0.5, K ₂ HPO ₄ 0.5, NH ₄ CL 0.8, MgSO ₄ · 7H ₂ O 0.2, CaCl ₂ · 12H ₂ O 0.4, 酵母膏 0.5		
球形红杆菌浓度	10 ⁹ /mL (最佳)	10 ⁹ /mL (普遍能达到, 极少能超过)	10 ¹⁰ /mL (正常状态下才达到) 都能超过)
连续生产情况	利用蠕动泵手动调节进出料, 每批次只能是 2.5 L 能真正做到连续生产	不能连续生产,	利用蠕动泵自动调节进出料, 实现连续生产

从表 2 的实验结果可以看出, 用光照摇床来进行实验室实验, 在扩大培养时摇床的效率较低, 培养操作性不大, 外置光源式发酵槽和内置 LED 光源发酵罐都可以进行连续培养和生产, 但在相同时间, 产出同样发酵菌的情况下, 用本项目设计制造的内置 LED 发酵罐所培养的菌浓度要高出 10 倍多, 相同产量废液少, 达到了节能降耗的效果^[16-17]。

2.2.2 类胡萝卜素二次培养提取试验

本项目与天津科技大学海洋学院共同合作, 在 5 L 内置 LED 光源发酵罐进行类胡萝卜素二次培养提取试验, 具体数据如表 3 所示。

表 3 内置 LED 光源发酵罐提高效率数据分析

培养方法	5 L 外置日光灯	5 L 内置 LED 光源发酵罐培养 (红色条、绿色条和紫色条)
光照强度	1600 lx	1600 lx
种子培养基	苹果酸 2.5 g, 酵母膏 1 g, (NH ₄) ₂ SO ₄ 1.25 g, MgSO ₄ 0.2 g, CaCl ₂ 0.07 g, FeSO ₄ 0.01 g, KH ₂ PO ₄ 0.15 g, 用蒸馏水溶解并定容到 1 L, pH 7.0	

续表

培养方法	5 L 外置日光灯 5 L 内置 LED 光源发酵罐培养 光源发酵罐培养 (红色条、绿色条和紫色条)	
发酵培养基	柠檬酸 8.1 g/L, NH ₄ Cl 3.5 g/L, 玉米浆 1.8 g/L, pH 7.0, 配得发酵液 3.5 L	
生物量的测定	干重法: 发酵液经离心、洗涤后, 于 105℃ 烘干 至恒重称重, 实验进行 2 次平行测定	
类胡萝卜素产量	31.28 mg/罐	50.22 mg/罐
菌体生物量	47.11 mg/罐	75.34 mg/罐

提取数据结果表明, 相比外置日光灯光源发酵罐, 5 L 内置 LED 光源的发酵罐在培养类胡萝卜素产量与菌体生物总量分别提高了 60.5% 和 59.9%^[18-19]。

3 结语

研究的反应器采用独特的内置 LED 光源集成结构、密封结构与冷却系统, 以 AT56C55 和 RTL8019AS 芯片为核心的智能控制系统, 除具有一般封闭式反应器的特点外, 还具有多个优点, 如光源波长可选, 光强可控, 能耗小, 高效节能; 采用罐体式, 体积小, 占地少; 可高温高压灭菌, 适用需无菌培养的光生物; 全自动控制培养条件, 如发酵罐温度、培养液 pH、溶氧浓度 (DO) 等。

分析测试表明, 在其他条件相同的情况下, 用本项目设计的 5 L 内置 LED 光源发酵罐, 相比 5 L 外置光源发酵槽, 培养球型红杆菌的浓度要高出 10 倍多; 相比 5 L 外置日光灯光源发酵罐, 培养类胡萝卜素产量与菌体生物总量分别提高了 60.5% 和 59.9%, 并且能耗较小, 在国内生物工程行业中具有较强的竞争力^[20]。

参考文献

- [1] 王琴, 区子弁, 柳建良. 藻类光生物反应器的研究与应用进展[J]. 广东农业科学, 2011, (5): 180-181.
- [2] Chun-Yen Chen, Kuei-Ling Yeh, Rifka Aisyah, et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review [J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 71-81.
- [3] 孙芝兰, 黄芸, 陈以峰. 微藻气肥光生物反应器研究进展[J].

- 中国农业科技导报, 2014, 16(6): 117-123.
- [4] 刘小澄, 刘永平. 封闭式光生物反应器工业设计选型思考[J]. 可再生能源, 2010, 28(2): 130-136.
- [5] 刘小澄, 刘永平. 两步法光生物反应器海藻生长系统设计思考[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 127-133.
- [6] 袁桃, 梁斌, 李茂涛, 等. 管道式微藻光生物反应器设计[J]. 现代化工, 2013, 33(5): 104-107.
- [7] 徐明芳, 李贻玲. 钝顶螺旋藻在 LDE 光电板式光生物反应器中的培养研究[J]. 海洋科学, 2001, (2): 42-45.
- [8] 徐明芳. 光生物反应器内设 LED 光源的特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2001, 27(4): 7-10.
- [9] Seyedeh Fatemeh Mohsenpour, Nik Willoughby. Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic pigment production through spectral conversion of light [J]. Biore-source Technology, 2013, (142): 147-153.
- [10] 陈智杰, 姜泽毅, 张欣欣, 等. 微藻培养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.
- [11] 吴小芳, 张志斌, 余佳清, 等. 光生物反应器中光传递模型在微藻培养中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2013, 35(4): 878-886.
- [12] Alessandra Adessi, Roberto De Philippis. Photobioreactor design and illumination systems for H₂ production with anoxygenic photosynthetic bacteria: A review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, (39): 3127-3141.
- [13] 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.
- [14] Abhinav Soman, Yogendra Shastri. Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics [J]. Applied Energy, 2015, (140): 246-255.
- [15] 王燕红, 叶君耀, 王英连. 一种基于 485 网络的嵌入式光生物反应器系统[J]. 微计算机信息, 2009, 12(2): 146-147.
- [16] 井广宁, 杨俊红, 张恒, 等. 套管式新型光生物反应器的性能初步实验[J]. 现代化工, 2013, 33(4): 120-123.
- [17] 孙利芹, 王长海, 史磊. 2 种光生物反应器在微生物培养中的性能比较[J]. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2010, 23(1): 32-37.
- [18] Kuei-Ling Yeh, Jo-Shu Chang. Nitrogen starvation strategies and photobioreactor design for enhancing lipid production of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP - 31: Implications for biofuels [J]. Biotechnol J, 2011, 6: 1358-1366.
- [19] 肖玉朋, 戴玉杰, 申世刚, 等. 户外管式光生物反应器培养发状念珠藻细胞[J]. 食品科技, 2014, (3): 2-6.
- [20] 刘小澄, 刘永平. 管道式光生物反应器的设计和性能[J]. 生命科学, 2010, 22(5): 492-498. ■