

基于透光性能分析的微藻光生物反应器构筑板材选型

李永富 孟范平

(中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要 利用配备人工光源的光生物反应器(AL-PBR)培养微藻是实现微藻快速增殖,进而满足相关产业需求的重要手段。为指导 AL-PBR 的构筑材质选型,完善了现有方法,比选了 7 种市售透明板材。考虑到微藻在不同入射光波段的光生态学,应综合分析板材在光合有效辐射波段(400~700 nm)、红光波段(630~700 nm)、蓝光波段(430~480 nm)和中波紫外线波段(UV-B,280~320 nm)的透光性能。前三波段的平均透射率越高越好,UV-B 波段反之。测定结果表明:如果 AL-PBR 以太阳光作为外部光源,现阶段宜采用进口聚碳酸酯板和普通玻璃板作为构筑材质,且前者更佳;如果以单色 LEDs 灯或荧光灯作为外部光源,宜选用聚甲基丙烯酸甲酯板。

关键词 光谱学;透射率;光生物反应器;透明板材;比选

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0123003

Type Selection of Transparent Plate for Microalgae Photo-Bioreactor Building Based on Light Transmissivity Analysis

Li Yongfu Meng Fanping

(Key Laboratory of Environment Science and Ecology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract The photo-bioreactor equipped with artificial light (AL-PBR) is an important mean for realizing rapid proliferation of microalgae, and therefore meeting the demand of relevant industries. To guide the material selection of AL-PBR, this study improves the current method by comparing seven transparent plates. Considering the light ecology of microalgae under different light wave bands, the photosynthetically active radiation (400~700 nm), red light (630~700 nm), blue light (430~480 nm) and ultraviolet B (UV-B, 280~320 nm) are taken into account for analyzing materials' transmission performance. The higher the average transmittance of the former three bands is, the better the materials are, while the UV-B band is not. Results illustrate that if taking sunshine as an external light source, polycarbonate plate from abroad or common glass plate is the ideal material, and the former is better; if using monochromatic LEDs or fluorescent lamps, polymethyl methacrylate plate is an optimal option.

Key words spectroscopy; light transmittance; photo-bioreactor; transparent plate; selection

OCIS codes 300.6550; 350.4800; 350.6050; 230.3670

1 引 言

微藻在食品、水产养殖、污水处理、生物质能源等领域有很好的应用前景^[1-2]。构筑适于微藻生长的光生物反应器(PBR)是实现微藻快速增殖的重要手段^[3]。其中,配备人工光源的密闭式光生物反应

器(AL-PBR),是未来的发展方向。AL-PBR 中的人工光源,以前一般选用荧光灯、金属卤素灯等^[4],近几年的研究表明发光二极管(LEDs),尤其是蓝光 LEDs、红光 LEDs 等在微藻培养中具有增产效应,目前的 LEDs 改进技术也使利用这些光源培养微藻

收稿日期: 2013-07-01; **收到修改稿日期**: 2013-08-23

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAD14B04)

作者简介: 李永富(1985—),男,博士研究生,主要从事海洋微藻高效固定工业二氧化碳技术、水体高效净化吸附技术等方面的研究。E-mail: lyf_qingdao@126.com

导师简介: 孟范平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事工业二氧化碳减排技术、生物标志物与生物传感器、海洋生态修复技术等方面的研究。E-mail: fanpingm@tom.com(通信联系人)

成为可能^[3,5-8]。有研究者认为,人工光源与太阳光协同使用(即白天采用太阳光,夜间用人工光源补光)可以有效提高微藻的生物物质产率,降低光照能耗^[9-10]。但是,太阳辐射中的紫外光(UV, 200~400 nm),尤其是中波紫外线(UV-B, 280~320 nm)易对微藻产生损伤^[11]。

对于大多数类型的 PBR,需要选用透明板/管材作为主体构筑材料。对透明材料的光透过性分析,周长吉等^[12-13]研究了聚碳酸酯中空板对紫外线、可见光和红外线的透过性能;鲁大学^[14]探讨了光伏玻璃透光性能的检测标准;曹小华等^[15]进行了汽车贴膜透射率的测定和实用性分析。在 AL-PBR 选材过程中,既要考虑 PBR 构型,又要将是否与光源种类相匹配纳入考察范畴。目前,常用的构筑材料有普通玻璃板^[16]、高硼硅玻璃板^[17]、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板^[18]、透明聚氯乙烯树脂(PVC)板^[19]、聚碳酸酯(PC)板^[20]、聚乙烯袋^[21]等。这些材质具备毒性低、机械强度适中、化学稳定性好等优点,但国内外报道中尚未见 AL-PBR 常用材质的透射率比较研究,透明板材的透射率测定方法学也缺乏针对性,这显然不利于 AL-PBR 的构建。基于此,本文完善了基于板材透光性能的比选方法,探讨了 7 种常见市售板材的透光性能,以期对 PBR 构筑材料的选择提供依据。

2 均质板材透光性能测试方法学

2.1 现有测定方法的比较与分析

对于均质透光覆盖材料,国家标准 GB/T 2410-1980^[22]和 GB/T 2680-1994^[23]分别对塑料材料和建筑玻璃规定了具体的测定方法。前者规定了特定厚度的板状、片状、薄膜状透明塑料透射率的测试条件和计算方法,透明塑料只有在同一厚度下,才可比较透射率;而后者提出分别测定紫外区(280~380 nm)、可见区(380~780 nm)、太阳光区(350~1800 nm)和远红外区(4.5~25 μm)的透射率。周长吉等^[12-13]运用 GB/T 2680 中的公式,测定计算了 PC 中空板的透光性能,指出了国内材料的改进方向。目前,国内测定方法存在的主要问题是光源(即入射光谱能量分布)的规定不全面。对 AL-PBR,由于微藻生长的适宜波段不同,按前文所述的四波段法比较板材透射率,结果缺乏针对性。此外,由于市售板材规格往往不一致,而 AL-PBR 设计对板材厚度有其设计需求,二者之间的矛盾需要归一化处理。

2.2 AL-PBR 构筑板材透射率测定波长范围的确定

AL-PBR 中,入射光的性质(如光源类型、光照强度、光暗周期、光质等)及光能传递均会影响微藻对光的利用率及其生物物质产率。在长期的进化过程中,微藻形成了独特的光生物学特性。在可见光范围内,微藻主要吸收 400~700 nm 波段的光,因此该波段称为光合有效辐射(PAR)区。光合色素中,叶绿素 a 是大多数微藻光合作用的主要色素。从其吸收光谱看,在 PAR 波段内,红光区(630~700 nm)和蓝光区(430~480 nm)各有一个吸收峰^[24],蓝光区吸收较低。微藻光合作用要求光源的峰值波长与微藻的吸收峰峰值相对应。已有研究表明,红光对于利玛原甲藻、纤细角毛藻、湛江等鞭金藻,蓝光对于绿藻中的普通小球藻、盐生杜氏藻、布朗葡萄藻,硅藻中的小环藻、红藻中的紫球藻等具有生长增益效应^[3]。可见,在 AL-PBR 构筑时,材质除在 PAR 区应有较高的透射率外,对红光波段和蓝光波段较好的透光性能也应成为重要的考察指标。值得一提的是,紫外光区(200~400 nm)中的中波紫外线(280~320nm)易对微藻(如小新月菱形藻^[25]、盐藻^[26-27]、金藻^[26]、小角毛藻、三角褐指藻、小球藻^[27]等)产生损伤。短波紫外线(UV-C, 200~280 nm)可被臭氧层完全吸收;长波紫外线(UV-A, 320~400 nm)尽管可以完全穿过臭氧层到达地面,但一般情况下没有杀伤作用^[11]。AL-PBR 中引入太阳光作为光源,可显著降低微藻培养过程中的光能消耗,进而降低生产成本。如果自然光源的 UV-B 部分能在传递过程中被器壁屏蔽,将对藻细胞起到保护作用。

综上所述,根据微藻生长对入射光波长范围的要求,适宜的透明板/管材应具备以下特点:1)在可见光波段(尤其是 PAR 区,400~700 nm)透射率较高,传导损失小;2)当用特定波段的光如蓝光(430~480 nm)、红光(630~700 nm)等培养特定种类的微藻时,对这些波段具有较好的透过性;3)如果采用太阳光作为 AL-PBR 的部分光源,器壁应对 UV-B 光区有较好的屏蔽作用。

3 用于 AL-PBR 构建的板材比选

3.1 材料与方法

取 PMMA 板(PMMA-P)、PS 板(PS-P)、普通玻璃板(CG-P)、高硼硅玻璃板(BG-P)、PVC 板(PVC-P)、国产 PC 板(PCC-P)、进口 PC 板(PCI-P)等 7 种市售透明板材,切割成 10 mm×30 mm 方块,保证双面平整光滑且无异物和油污等,用于透光

性能测试。用游标卡尺(0.05 mm)测量板材实际厚度(表1)。板材透射率曲线用 UV-2600 型紫外可

见分光光度计[尤尼柯(上海)仪器有限公司]扫描。

表1 板材的种类及厚度

Table 1 Thicknesses of seven type transparent plates

Plate type	PMMA-P	PS-P	CG-P	BG-P	PVC-P	PCC-P	PCI-P
Thickness /mm	3.50	2.80	2.90	3.00	2.00	1.60	3.00

3.2 测试步骤

3.2.1 透光曲线扫描

按照 GB/T 2918-1998^[28] 要求,将待测板材置于温度为(23±2) °C,相对湿度为(50±5)% 的环境中调节 4 h。通过紧密堆叠方型板材改变试样厚度,垛层上下用细皮筋扎紧(如图 1 所示),保证方块之间无缝隙且试样能放入紫外可见分光光度计 1 cm 吸收池,在 200~800 nm 波段内测定透射率曲线。质量控制实验结果表明,同样光径下,采用堆叠方式与直接扫描两种方式的测定结果吻合较好,板材垛层间界面对扫描结果影响甚微。测量前扫描基线,以光谱在空气中的透射率为基线标准,并设定基线透射率为 100%。然后测试试样,光束为直射光,光谱带宽 1 nm,扫描速率为 5 nm/s。

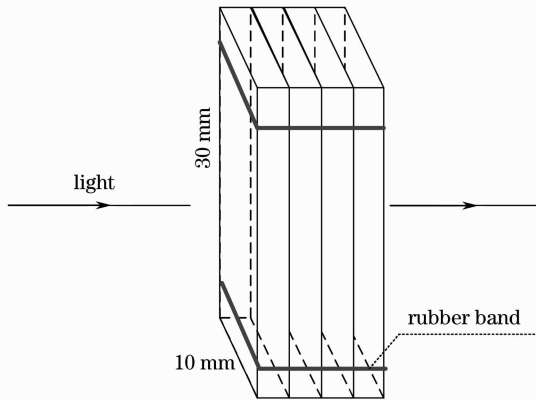


图1 板材堆叠方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stack board method

3.2.2 平均透射率及平均消光系数计算

参照文献[7-8,23]的方法,材料在 PAR 区、红光区、蓝光区的平均透射率为

$$\bar{T} = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_d}^{\lambda_u} S(\lambda) \times T(\lambda) \times V(\lambda)}{\sum_{\lambda=\lambda_d}^{\lambda_u} S(\lambda) \times V(\lambda)}, \quad (1)$$

式中 \bar{T} 为材料在一定波长范围内的平均透射率。 λ_d 和 λ_u 分别为光区波段的下限波长和上限波长: PAR 区为 400 nm 和 700 nm; 红光区为 630 nm 和 700 nm; 蓝光区为 430 nm 和 480 nm。 $S(\lambda)$ 为相应

波长上相对光谱功率分布,数值由 GB/T 3978-2008 中表 1 标准照明体 A 查得。 $T(\lambda)$ 为各波长的单色光透射率。 $V(\lambda)$ 为相应波长的光谱光(视)效率,数值参见 GB/T 7922-2003^[29] 表 2 的 $y(\lambda)$ 。按国际电工委员会(CIE)规定, $S(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 取值间隔为 5 nm,因此在计算 \bar{T} 时,将 λ 每隔 5 nm 计算一次。

由于 GB/T 3978-2008 表 1 中未规定波长低于 300 nm 的 UV-B 区 $S(\lambda)$,因此将(1)式简化,按波长间隔 1 nm 积分得到^[23]

$$\bar{T} = \frac{\sum_{\lambda=280}^{319} [T(\lambda) + T(\lambda + 1)] / 2}{320 - 280}. \quad (2)$$

由于板材的厚度不一致,不能直接比较其平均透射率。运用简化的 Lambert-Beer 定律^[30-31],对 $\ln(\bar{T})$ 与板材厚度 L (单位: cm) 进行线性拟合后,求得材料的平均消光系数($\bar{\alpha}$)和平均反射系数(\bar{r})。推导过程及线性形式见(3)、(4)式。求取了不同板材的 $\bar{\alpha}$ 和 \bar{r} 后,理论上可以按(3)式反推任意厚度试样的透射率,进而比较同一厚度下不同种类板材的透射率大小。依据比较结果,即可结合光源设计选择适宜的板材种类。

$$\bar{T} = (1 - \bar{r})^2 \exp(-\bar{\alpha}L), \quad (3)$$

$$\ln(\bar{T}) = 2\ln(1 - \bar{r}) - \bar{\alpha}L. \quad (4)$$

3.3 板材的比选结果与讨论

不同厚度板材的透射率曲线如图 2 所示。根据 3.2.2 节的计算方法,求取板材的主要光学参数(线性拟合的可决系数 $R > 0.99$),结果如表 2 所示。由图 2 可见,入射波长在 400 nm 以上时,7 种板材的透射率均维持在较高水平;低于 400 nm 时,透射率急剧下降。PCI-P 在入射光波长低于 380 nm 时透射率接近 0,说明该板材能很好的屏蔽紫外光;其他板材在入射光波长 300~400 nm 范围内仍有较高的透射率。整体来看,板材在可见光 380~780 nm 范围内透射率较高,且与板材厚度呈反比关系,厚度越大,透射率越低,这与材料通常的透光特性相同^[2]。

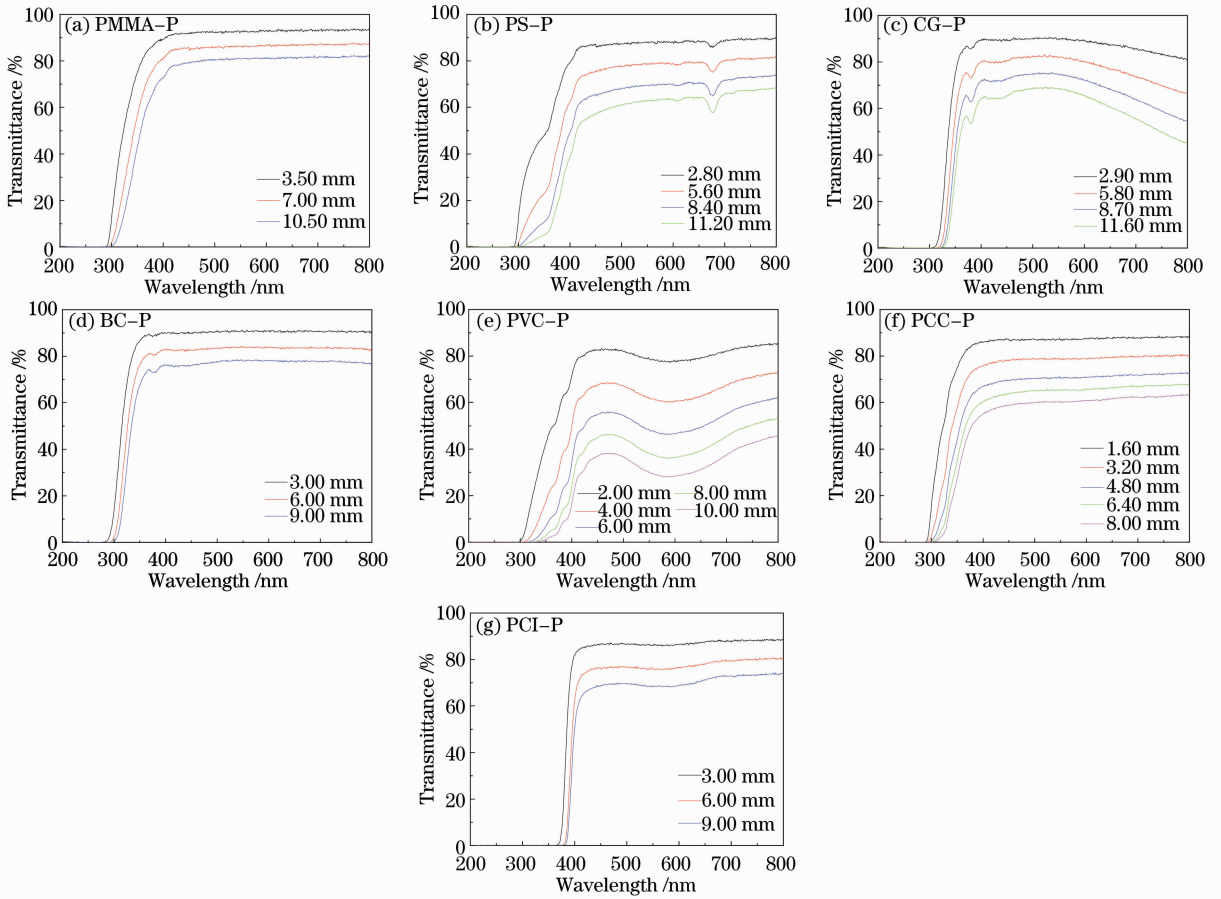


图 2 7 种板材在 200~800 nm 波段的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of seven type plates in 200~800 nm wave bands

从表 2 可见, 7 种板材的光学参数存在差异。平均消光系数 $\bar{\alpha}$ 均以 PVC-P 最高。平均反射率 \bar{r} 在 PAR 区、红光区、蓝光区均低于 2.7%, 但在 UV-B 光区差异明显: 在 UV-B 光区, 7 种板材 \bar{r} 介于 32%~98% 之间, 尤以 CG-P (89%) 和 PCI-P

(98%) 为高。以 PVC-P 板为例, 在 PAR 区、红光区、蓝光区 \bar{r} 较低, 而 $\bar{\alpha}$ 较高, 说明该种板材通过自身吸收屏蔽对微藻有效的辐射波段, 但在有害的 UV-B 区, 则存在自吸收和反射双重效应。

表 2 7 种板材在不同波段的平均消光系数和平均反射率

Table 2 Average extinction coefficients and spectral reflectances of seven type plates in different wave bands

Light region*	Parameter	PMMA-P	PS-P	CG-P	BG-P	PVC-P	PCC-P	PCI-P
PAR	$\bar{\alpha}$	0.019±0.001	0.04±0.000	0.034±0.000	0.025±0.001	0.12±0.003	0.057±0.000	0.038±0.000
	\bar{r} / %	0.4±0.008	0.8±0.001	0.8±0.009	1.2±0.002	0.01±0.000	2.7±0.009	1.8±0.010
Red light	$\bar{\alpha}$	0.019±0.001	0.039±0.000	0.041±0.002	0.025±0.001	0.117±0.003	0.056±0.000	0.035±0.000
	\bar{r} / %	0.3±0.008	0.9±0.010	0.8±0.018	1.3±0.880	0.2±0.005	2.6±0.007	1.8±0.010
Blue light	$\bar{\alpha}$	0.021±0.001	0.047±0.000	0.034±0.009	0.027±0.000	0.099±0.000	0.06±0.010	0.037±0.001
	\bar{r} / %	0.4±0.007	0.5±0.080	0.5±0.052	1.2±0.041	0.01±0.000	2.6±0.060	1.9±0.008
UV-B	$\bar{\alpha}$	0.3±0.091	0.44±0.062	0.31±0.028	0.28±0.044	1.0±0.009	0.56±0.000	0.37±0.009
	\bar{r} / %	33±0.108	32±0.400	89±1.209	32±0.342	50±0.850	33±0.308	98±1.008

* The wave bands of PAR, red light, blue light and UV-B are 400~700 nm, 630~700 nm, 430~480 nm and 280~320 nm respectively.

为直观比较各板材的透射率, 依据表 2 的结果, L 取 0.3 cm, 将 $\bar{\alpha}$ 和 \bar{r} 代入(3)式, 反推求得 7 种透明板材在特定波段的平均透射率。图 3 为 7 种板材

在 PAR 区、红光区和蓝光区的平均透射率, 三个波段的极差分别为 24%、24% 和 19%, 差异明显。PMMA-P、BG-P 在利于微藻生长的三波段平均透

射率较高, PVC-P 和 PCC-P 最低。值得注意的是, 对微藻生长不利的 UV-B 光区, 平均透射率的计算结果(图 4)表明, PCI-P 的屏蔽效应最好, 几乎无有害紫外线透射(\bar{T} 仅为 0.02%), 这与透射率曲线的测定结果一致; 其次为 CG-P、PVC-P、PCC-P; 而 PMMA-P、PS-P 和 BG-P 对 UV-B 的平均透射率较高, 不利于保护藻细胞。

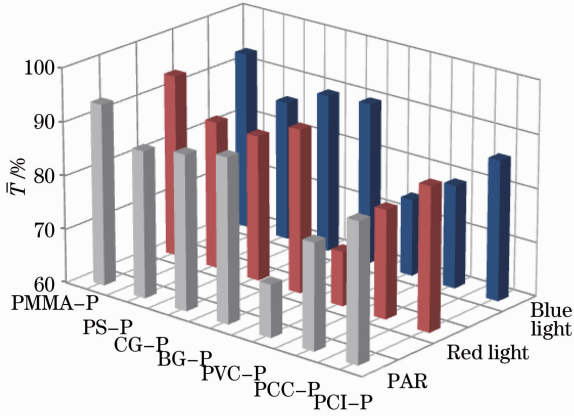


图 3 PAR、红光、蓝光波段内 7 种板材的平均透射率
Fig. 3 Average transmittances of seven type plates in PAR, red light and blue light wave bands

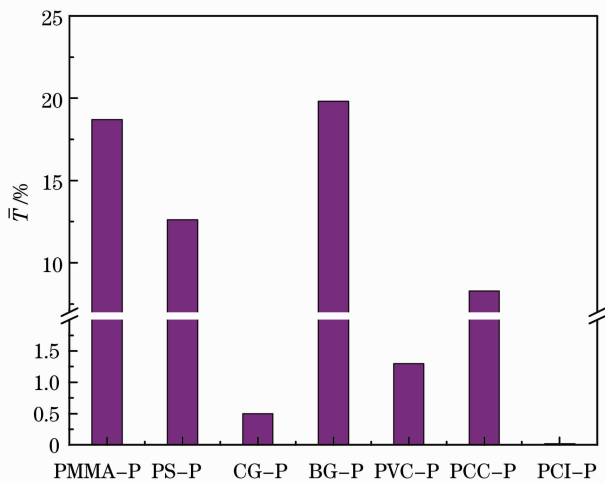


图 4 UV-B 波段内 7 种板材的平均透射率
Fig. 4 Average transmittances of seven type plates in UV-B wave band

微藻对光质的光生态学决定了 AL-PBR 培养中选用的光源, 进而指导板材选型。如前文所述, 透过 AL-PBR 外壁进入藻液中的有效波段光能越多, 意味着因构筑板材吸收或反射产生的光能损耗越低。若用单色 LEDs 灯或荧光灯作为外部光源 (UV-B 可忽略不计), 则从节能角度推荐使用 PMMA-P, 这在角毛藻、小球藻、盐藻、等鞭金藻、布朗葡萄藻、紫球藻等的密闭培养中应该引起重视。

如果采用太阳光作为外部光源, 则无需考虑光能消耗问题。由于日光中仍含有大量的中波紫外线, 夏天和午后特别强烈, 为保护藻细胞免遭紫外损伤, 有必要选用 PCI-P 和 CG-P。比较而言, 后者容易破碎、不易安装及成型, 而前者具有采光好、保温性能优良、质轻、高强度、抗击穿及抗破坏力强、易于设计造型、寿命长等优点, 性能更为优越^[32]。

4 结 论

完善了基于透光性能分析的 AL-PBR 构筑板材选型方法学: 扫描不同厚度板材的透射率曲线, 计算不同厚度板材在不同波段的平均透射率并利用 Lambert-Beer 定律获得该种板材的平均消光系数和平均反射率; 依据这些光学参数归一化计算特定厚度板材的透射率, 最终用于板材选型。AL-PBR 板材选型时, 应考虑 PAR 区 (400~700 nm)、蓝光区 (430~480 nm)、红光区 (630~700 nm) 材料的透光性能, 同时应将板材对 UV-B 区 (280~320 nm) 的屏蔽作用纳入考察范畴。

7 种市售透明板材均在可见光范围内具有较好的透光性能, 但不同板材在不同入射光波段的主要光学参数存在差异。AL-PBR 适宜构筑的板材类型因光源种类而异。如果以太阳光作为外部光源, 宜采用进口 PC 板或普通玻璃板作为构筑材质, 且前者更佳; 如果以单色 LEDs 灯或荧光灯作为外部光源 (UV-B 可忽略不计), 宜选用 PMMA 板。

参 考 文 献

- 1 P Spolaore, C Joannis-Cassan, E Duran, *et al.*. Commercial applications of microalgae [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, 101(2): 87-96.
- 2 T M Mata, A A Martins, N S Caetano. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 217-232.
- 3 Li Yongfu, Meng Fanping, Li Xianglei, *et al.*. Effect of illumination on microalgae cultured at high cell density in photobioreactor [J]. *China Biotechnology*, 2013, 33(2): 103-110. 李永富, 孟范平, 李祥蕾, 等. 光照对光生物反应器中微藻高密度光自培养的影响 [J]. *中国生物工程杂志*, 2013, 33(2): 103-110.
- 4 N Yeh, J P Chung. High-brightness LEDs-energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13 (8): 2175-2180.
- 5 Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123005. 崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 高显色白光 LED 的制备及其变温特性 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0123005.
- 6 Su Shi, Zhang Guoyu, Fu Yun, *et al.*. New development of solar simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7):

070003.
苏 拾, 张国玉, 付 芸, 等. 太阳模拟器的新发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070003.
- 7 Mao Anjun, Wang Jing, Lin Xuezheng, *et al.*. Effect of spectra on growth of *Chlorella* and *isochrysis* [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 991–994.
毛安君, 王 晶, 林学政, 等. 光谱对小球藻和等鞭金藻生长的影响 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 991–994.
- 8 Miao Hongli, Zhou Xiaoguang, Liu Fengxue, *et al.*. Application of the spectrum of LED on growth of *Chaetoceros gracilis* and *Platymonas subcordiformis* [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1101–1105.
苗洪利, 周晓光, 刘逢学, 等. LED 光谱对纤角毛藻和亚心形扁藻生长的影响 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1101–1105.
- 9 E Ono, J L Cuello. Design parameters of solar concentrating systems for CO₂-mitigating algal photobioreactors [J]. Energy, 2004, 29(9): 1651–1657.
- 10 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Zhang Ming, *et al.*. Crystalline silicon solar-cell development status and trends [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030002.
周 涛, 陆晓东, 张 明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030002.
- 11 Sun Li, Li Shouchun. Damage of enhanced UV-B on algae and adaptation of algae under enhanced UV-B radiation [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2010, 31(4): 17–19.
孙 丽, 李守淳. UV-B 辐射增强对藻类产生的损害及其适应机制 [J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(4): 17–19.
- 12 Zhou Changji, Ding Xiaoming. Study on the light transmissivity of polycarbonate multi-wall sheet for greenhouse glazing [C]. Chinese Society of Agricultural Engineering Academic Conference, 2005. 109–112.
周长吉, 丁小明. 温室用聚碳酸酯中空板透光性能研究 [C]. 中国农业工程学会学术年会, 2005. 109–112.
- 13 Zhou Changji, Ding Xiaoming, Du Xiaoming. Light transmissivity of polycarbonate multi-wall sheet used as greenhouse glazing material [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 192–196.
周长吉, 丁小明, 杜孝明. 温室用聚碳酸酯中空板辐射透过特性初步研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 192–196.
- 14 Lu Daxue. Study on the detection standards of the photovoltaic glass transmittance performance [J]. Solar Energy, 2011, (5): 34–37.
鲁大学. 光伏玻璃透光性能检测标准的探讨 [J]. 太阳能, 2011, (5): 34–37.
- 15 Cao Xiaohua, Yu Qibo, Zhong Weimin, *et al.*. Determination of transmittance and practical analysis of auto foil [J]. Chinese J Spectroscopy Laboratory, 2012, 29(2): 887–889.
曹小华, 虞奇波, 钟伟民, 等. 汽车贴膜透射率的测定和实用性分析 [J]. 光谱实验室, 2012, 29(2): 887–889.
- 16 L Rodolfi, Z G Chini, N Bassi, *et al.*. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 102(1): 100–112.
- 17 J E Keffer, G T Kleinheinz. Use of *Chlorella vulgaris* for CO₂ mitigation in a photobioreactor [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2002, 29(5): 275–280.
- 18 K Kaewpintong, A Shotipruk, S Powtongsook, *et al.*. Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(2): 288–295.
- 19 J M Sandnes, T Ringstad, D Wenner, *et al.*. Real-time monitoring and automatic density control of large-scale microalgal cultures using near infrared (NIR) optical density sensors [J]. Journal of Biotechnology, 2006, 122(2): 209–215.
- 20 Liu Xiaocheng, Liu Yongping. Design consideration on two-step method photobioreactor algae growth system [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 127–133.
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.
- 21 Zhang Xiaokui, Zhang Fazhong, Zhang Yingshan, *et al.*. Culture of the third stage marine microalgae with floating polyethylene bags [J]. Marine Sciences, 2004, 28(12): 8–10.
张小葵, 张法忠, 张英珊, 等. 浮式塑料薄膜袋培养海洋微藻的研究 [J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 8–10.
- 22 National Standardization Technical Committee. GB/T 2410-1980. Light Transmittance and Haze Test of Transparent Plastic [S]. Beijing: China Standard Press, 1980.
- 23 National Standardization Technical Committee. GB/T 2680-1994. Determination of Building Glass Visible Light Transmittance, Solar Direct Transmittance, Total Solar Energy Transmittance, Ultraviolet Transmittance and the Window Parameters [S]. Beijing: China Standard Press, 1994.
- 24 Han Boping, Han Zhiguo, Fu Xiang. Algal Photosynthesis: Mechanisms and Models [M]. Beijing: Science Press, 2003.
韩博平, 韩志国, 付 翔. 藻类光合作用机理与模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- 25 Tian Jiyan, Tang Xuexi, Yu Juan, *et al.*. The physiological and biochemical responses of marine microalgae to UV-B radiation [J]. Marine Sciences, 2006, 30(4): 54–58.
田继远, 唐学玺, 于 娟, 等. 海洋微藻对 UV-B 辐射的生理生化响应 [J]. 海洋科学, 2006, 30(4): 54–58.
- 26 H Herrmann, D P Häder, M Köfferlein, *et al.*. Effects of UV radiation on photosynthesis of phytoplankton exposed to solar simulator light [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 1996, 34(1): 21–28.
- 27 Yu Hongling. Effects of Enhanced UV-B Radiation on Growth, Biochemical Characteristics and Ultrastructure of Marine Microalgae [D]. Ningbo: Ningbo University, 2012.
俞泓伶. UV-B 辐射增强对海洋微藻生长、生理生化特征和超微结构的影响 [D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- 28 National Standardization Technical Committee. GB/T 2918-1998. Test Standard Environment of Plastic Sample Status Adjust [S]. Beijing: China Standard Press, 1998.
- 29 National Standardization Technical Committee. GB/T 7922-2003. Color Measurement of Light Source [S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
- 30 C Y Chen, K L Yeh, R Aisyah, *et al.*. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 71–81.
- 31 Luo Wei. Research on optical transmission property of Dy- α -Pialon ceramic [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(3): 491–494.
罗 伟. Dy- α -Pialon 陶瓷透光性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 491–494.
- 32 Chen Jian, Liu Zhijie. Light design of large scale solar greenhouse in arctic area [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(3): 69–72.
陈 健, 刘志杰. 高寒地区大型日光温室的采光设计 [J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(3): 69–72.

栏目编辑: 李志兰