

# 微藻作原料生产生物柴油的研究现状和前景

徐春明, 焦志亮\*, 王晓丹, 傅宇

(北京工商大学食品添加剂与配料北京高校工程研究中心, 北京 100048)

**摘要:**近年来,微藻因其脂质含量高,且具有吸收二氧化碳的特性,已成为生产生物柴油的新兴原料,藻类燃料因此变成一个有吸引力的石油燃料替代品。目前,国内外关于微藻生物柴油的研究日益增多,且都有很大的发展,其产业化的进程也在逐步推进。本文对微藻生产生物柴油的基础研究、培养选择及微藻燃料工程过程的开发等一系列问题做了更新概述,指出了微藻作为商业原料需注意的问题,并提出了微藻作为生物燃料在开发中可能遇到的障碍。

**关键词:**生物柴油;原料;微藻;脂质

中图分类号:TQ645.6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)08-0001-05

## Biodiesel production from microalgae: current status and potential

XU Chun-ming, JIAO Zhi-liang\*, WANG Xiao-dan, FU Yu

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In recent years, microalgae become a new kind of feedstock to produce biodiesel, due to its high lipids and CO<sub>2</sub> absorption properties. The algal biofuel is proposed as an attractive alternative of petroleum-based fuels. At present, the research development of microalgae biodiesel at home and abroad and industrialization are gradually growing. In this paper, the production of biodiesel from microalgae is reviewed, including fundamental research, culture selection and engineering process. The problems that the microalgae as a commercial raw material should pay attention to are also pointed out. The barriers of the microalgae as biofuels may be encountered in the development are finally put forward.

**Key words:** biodiesel; feedstock; microalgae; lipid

近年来,微藻已经成为生物柴油的第三代和第四代原料<sup>[1]</sup>。微藻种类繁多,主要包括绿藻、硅藻、红藻等。作为能量来源,微藻与其他原材料相比优势在于较高的生产力,远高于大豆和其他材料。如果用微藻燃料代替美国全部的石油燃料,需要的培养面积仅占美国领土总数的0.42%<sup>[2]</sup>。微藻还有一些优势,如生产不占用耕地,对传统农业发展无不良影响;对生长环境的要求不高,海水、荒漠地区地下水 and 有机废水都能培养;能够减缓CO<sub>2</sub>的排放并消除磷化物,有利于空气及污水的治理<sup>[3-5]</sup>;可以用来合成甲烷、氢气、合成气体等其他生物燃料<sup>[6-7]</sup>。关于微藻作为生物能源和生物燃料的研究已有很多,本文将综述微藻作为生产生物柴油原料的研究现状和存在的问题,希望为相关研究者提供参考。

## 1 微藻的研究和开发进展

### 1.1 优良菌株的筛选

优质的含油微藻是发展能源微藻技术的基础,

优良的微藻要满足生长快、油脂含量高、油脂组成好,还要易于培养、采集和加工,对营养的要求较低,有较强的抗污染能力。通常微藻种类的筛选需要考察其在环境条件改变情况下(如营养水平、温度、CO<sub>2</sub>供应、pH、光和细菌污染等)的抵抗性。因此,生长速率和脂质含量是微藻筛选最主要的考察因素。高生长速率可以减少培养时间和成本;高脂质含量能带来高的生物柴油产量。另外还需考察脂质的组成情况和质量,才能够筛选出产生极性和中性脂质的种类。此外,微藻的筛选还取决于设定的目的,如 *Botryococcus braunii* 油脂质量分数高达75%; *Nannochloropsis oculata* 脂质生长速度高达142 mg/(L·d); *Scenedesmus sp.* CO<sub>2</sub> 固定率高达10%。Xia等<sup>[8]</sup>通过户外光生物反应器筛选出3种微藻种类分别为 *Desmodesmus sp.* NMX451、*Desmodesmus sp.* T28-1 和 *S. obtusus* XJ-15,它们具有更高的脂质生产能力和更好的生物柴油特性,其中 *S. obtusus* XJ-15 是最佳选择,其最高的生物量生

收稿日期:2015-03-06

基金项目:学科与研究生教育—食品学科特色教学科研创新平台建设(PXM2012-014213-000063)

作者简介:徐春明(1978-),男,副教授,博士,研究方向为食品与生物化工,18911033668, xucm78@163.com;焦志亮(1988-),男,硕士生,研究方向为食品与生物化工,通讯联系人,13161992445,354208188@qq.com。

产能力为  $20.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 大规模培养中脂质的质量分数高达 31.7%。Thai 等<sup>[9]</sup>通过流式细胞分选技术进行高通量筛选, 得出 *Nannochloropsis* 是脂质的质量分数最高的, 占细胞干重的 39.4% ~ 44.9%, 相应的脂肪酸甲酯产量占细胞干重的 16% ~ 22%。

随着藻类生物学研究的不断深入, 人们利用分子遗传技术对藻株进行改造。侯李君等<sup>[10]</sup>通过将蓝藻正反义 *pepcA* 基因导入大肠杆菌, 在其脂类合成的调控研究中发现转反义 *pepcA* 片段 *E. coli* 中脂类合成增加了 46.9%; 而转正义 *pepcA* 片段 *E. coli* 脂类合成减少了 49.6%; 转基因菌中十八碳酸的质量明显增加。Li 等<sup>[11]</sup>通过基因和代谢工程来选择微藻, 通过改变基因组成和调控来降低捕光天线大小; 通过工程途径提高生物柴油的生产; 通过基因调控或敲除一些支路代谢途径提高脂质的产量。王国盼等<sup>[12]</sup>通过改变微藻基因组成或其调控元件、加强产油代谢途径或减少产油支路代谢来构造富油微藻。Jin 等<sup>[13]</sup>通过 UV 照射, 得到 *S. obliquus* 突变体 X5-H13, 生长速率比野生型的提高了 21%, 脂质的质量分数高达 46.9%, 在污水中生长速度达到  $59.8 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。

## 1.2 微藻生长

### 1.2.1 生长条件的影响

影响微藻生长和脂质含量的主要因素包括温度、光、 $\text{CO}_2$ 、营养成分、盐浓度等。Converti 等<sup>[14]</sup>研究了温度对于 *Nannochloropsis oculata* 和 *Chlorella vulgaris* 生长的影响。结果显示随温度逐渐升高, *N. s oculata* 的脂质的质量分数增加; 然而对于 *C. vulgaris*, 温度升高脂质的质量分数降低; *N. oculata* 和 *C. vulgaris* 最适生长温度分别为  $25^\circ\text{C}$  和  $30^\circ\text{C}$ 。Renaud 等<sup>[15]</sup>研究了温度对于 *Rhomonas sp.* 和 *Chaetoceros sp.* 的影响, 结果表明前者在  $25 \sim 27^\circ\text{C}$  中生长最快, 油脂和蛋白质产量最高; 后者在  $33 \sim 35^\circ\text{C}$  中生长速度最快。Wu 等<sup>[16]</sup>研究得出 *Monoraphidium sp.* SB2 的最适生长温度是  $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 。光是影响微藻生长和储存脂质的重要因素。低光照强度导致细胞干重中脂质质量分数降低, 过强光照产生光抑制作用<sup>[17]</sup>。Solovchenko 等<sup>[18]</sup>研究了光对 *Parietochlorisincisa* 生长的影响, 发现随着光照强度不断增强, *P. incisa* 中脂肪酸的质量分数也不断增高。Ruangsomboon 等<sup>[19]</sup>研究了光对 *B. braunii* 生长的影响, 当光照强度达到  $538 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 微藻脂质生产量达到最高  $0.45 \text{ g}/\text{L}$ 。Yeh 等<sup>[20]</sup>研究了光源对微藻生长的影响, 在荧光灯下得到的脂质

产量最高。Das 等<sup>[21]</sup>研究了不同光质对 *Nannochloropsis sp.* 生长的影响, 发现蓝光得到最高生长速率, 红色 LED 得到最低生长速率。Yoshioka 等<sup>[22]</sup>研究了高频率光对微藻脂质质量的影响, 结果表明当用蓝光间歇性照射 *Isochrysisgalbana* 时, 微藻脂质质量增加。由于微藻在生长过程中吸收  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  水平的提高会使光合效率升高, 从而影响微藻脂质含量。Zhang 等<sup>[23]</sup>研究发现, *Nannochloropsisoculata* 在 2%  $\text{CO}_2$  (体积分数, 下同) 下, 达到高生物生产量和高脂质含量, 且微藻细胞在高  $\text{CO}_2$  水平下可以产生多不饱和脂肪酸。Ho 等<sup>[24]</sup>研究表明, 当  $\text{CO}_2$  供应增加 10% ~ 15% 时, 微藻脂质的质量分数增加 6%。Yeh 等<sup>[20]</sup>研究了不同碳源对 *Chlorella vulgaris* 生长的影响, 分别采用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  来作碳源, 研究结果显示碳酸氢盐作为碳源可获得更高的生物量产量和脂质含量。Converti 等<sup>[14]</sup>研究了氮对微藻生长的影响, 在 *Chlorella* 和 *Nannochloropsis* 菌株生长过程中, 氮的缺失使脂质含量增加。当培养基中氮的质量浓度相对于最佳生长数值降低 75% 时, *Nannochloropsis* 的脂质的质量分数从 7.9% 增长到 15.31%, 而 *Chlorella* 中脂质的质量分数从 5.9% 增长到 16.41%。Solovchenko 等<sup>[18]</sup>研究了氮对于微藻生长的影响, 在 *Parietochlorisincisa* 生长过程中, 氮的缺失, 会造成总脂肪酸质量分数的增加。Ruangsomboon 等<sup>[19]</sup>研究了氮对 *B. braunii* 生长的影响, 氮源采用  $\text{KNO}_3$ , 当其含量不断增加时, 微藻的生长速率没有明显变化。磷浓度升高可以增加生物量, 但是对于脂质浓度没有太大的影响。Ruangsomboon 等<sup>[19]</sup>研究了磷对 *B. braunii* 的影响, 当培养基中磷的质量浓度达到  $222 \text{ mg}/\text{L}$  时, 脂质的质量分数达到最大 54.7%, 产量达到  $0.47 \text{ g}/\text{L}$ 。另外发现铁离子质量浓度和盐质量浓度对于 *B. braunii* 生物量和脂质质量分数也没有明显影响。

### 1.2.2 培养条件

根据不同的能源和碳源, 微藻的培养模式可以分为 4 种: 光自养、异养、混合培养和光异养<sup>[25]</sup>。到目前为止, 光自养型是微藻生产最有效的培养模式<sup>[26]</sup>。

光自养就是利用光作为能量来源,  $\text{CO}_2$  通过光合作用作为碳源<sup>[27]</sup>; 当微藻生长用有机碳作为能源和碳源时, 培养方式就成了异养培养<sup>[28]</sup>。

虽然光自养培养成本低, 并且对环境无污染, 但是它的细胞生长缓慢, 导致油脂产量比较低。异养培养的优势在于其脂质生产率可以达到光自养培养

的20倍。但缺点是更容易染菌,尤其是在户外培养的情况下,而且不适合大规模脂质生产。所以,从商业角度来看,提供有机碳源的成本比较高。预防细菌感染和降低有机碳源成本是将来要面临的挑战。

混合培养是微藻在进行光合作用的时候,既可以利用有机碳源也可以利用无机碳源如 $\text{CO}_2$ 来培养,要求培养的微藻可以进行光自养,或者异养,或者两者都可以。光异养培养就是微藻在生长过程中需要光照,但是运用有机化合物作为碳源。这种培养方式因为需要光照而且有一定的感染风险,所以很少用于微藻油脂的生产<sup>[25]</sup>。

## 2 微藻养殖和生物柴油精炼

### 2.1 微藻生物量的生产设备

#### 2.1.1 开放式培养池或者跑道式培养池

开放式培养池是一个连续的闭环回流的渠道<sup>[29]</sup>。典型的跑道式培养池深 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ <sup>[30]</sup>,系统由一个培养池或者一组培养池组成<sup>[31]</sup>。水道渠道由混凝土或压实土建造,并内衬白色塑料减少渗漏损失<sup>[32]</sup>。以自然光为光源和热源靠叶轮转动的方式使培养液混合、循环,防止藻体沉淀并提高藻体细胞的光能利用率;通入空气或 $\text{CO}_2$ 气体进行鼓泡或气升式搅拌。开放池虽然成本比较低,但占地面积大,生产力不高,培养的微藻细胞浓度低且容易产生杂菌污染,后处理工作量较大,很容易受到周围环境的影响<sup>[33]</sup>。

#### 2.1.2 光生物反应器

光生物反应器(PBR)主要有3种形式:平板式、管式和柱式生物反应器,包括光照系统、温度控制仪、pH控制仪、 $\text{CO}_2$ 供应和 $\text{O}_2$ 去除设备<sup>[34]</sup>。主要的缺点是成本和运行维护费用比较高,不适合大规模生产。Hsieh等<sup>[35]</sup>利用一种带有透明矩形房间的新型生物反应器来提高光合效率,该反应器是由透明的丙烯酸树脂组成,能有效提高光的穿透性,与普通生物器相比,微藻生物量能增长56%。Bilad等<sup>[36]</sup>研究了膜生物保留光生物反应器和膜碳化光生物反应器2种耦合系统,该耦合系统的最新发展提高了养殖系统的容积效率和无机碳的捕获效率。

#### 2.1.3 混合系统

混合系统是由PBR和开放式培养池两者结合的系统,PBR可以提供充足的无污染菌剂,而开放式培养池可以帮助达到生物柴油生产所需的生物量

要求<sup>[37]</sup>。

2012年8月,美国国际藻类协会发布了1种新的商业生产系统,可以解决开放式培养池的染菌和低生产率问题,也解决了PBR的高成本问题,但是,目前还未有关于该系统的详细报道发表。

### 2.2 生物量收集和油精炼

微藻生物柴油的生产包括生物量的收集、细胞干燥、脂质提取、脂质转化为生物柴油等步骤。其中生物量的收集最为关键,常见的收集方法有:沉降、浮选、过滤、离心等,占据总成本的20%~30%<sup>[36]</sup>。Zhang等<sup>[38]</sup>将膜技术应用于藻类收集,运用一步成批过滤将*Scenedesmusquadricauda*浓缩了15%,并运用气泡反复冲洗来控制膜污染。Bhave等<sup>[39]</sup>通过两步膜过滤收集微藻与一步过滤收集相比降低了成本。先用高分子膜,再用陶瓷膜大大提高了收集率,通过加入 $\text{FeCl}_3$ 作凝结剂来提高过滤效果,反复脉冲控制膜污染。Rohit等<sup>[40]</sup>研究了非牺牲炭电极电化学收集法对*Chlorella sorokiniana*和*Scenedesmusobliquus*的收集情况和加入电解质对收集效率的影响,结果表明, $\text{NaCl}$ 电解质的加入使*Chlorella sorokiniana*的收集率提高,且能量消耗低。由此证明了非牺牲炭电极电化学收集法回收效率高、能量消耗低,是走向商业化的重要进步。微藻还可以通过超声在低频率、低振幅下收集。超声可以破坏微藻的细胞,降低它们的浮力,从而增加其沉降能力。Kim等<sup>[41]</sup>研究了微藻产生物柴油过程中微藻的收集方法,通过超声微藻收集率高达90%。刘圣臣等<sup>[42]</sup>用400 W超声波对不同密度的小球藻液进行破壁。其中密度为 $0.32 \times 10^9$ 个/mL的小球藻液经过12 min后,破壁率可达93.37%;密度为 $1.55 \times 10^9$ 个/mL的小球藻液经过24 min,破壁率也能达到90.86%。

生物法主要有酶法等。Cho等<sup>[43]</sup>用纤维素酶对小球藻进行破壁处理,发现当pH为5.0、温度为 $50^\circ\text{C}$ 时,酶解72 h,能有效破壁,并且脂质质量提取率为85.3%。何扩等<sup>[44]</sup>在研制小球藻藻片时,也采用了酶解法对小球藻进行破壁处理,发现当pH为5.0、温度为 $50^\circ\text{C}$ 时,酶解6 h,小球藻的破壁率为80%,最佳用酶量为 $[E]/[S]=2\%$ 。

Alberto等<sup>[45]</sup>在使用 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的基础上,加入或不加 $\text{FeSO}_4$ ,比较脂质提取情况。结果表明,只有 $\text{H}_2\text{O}_2$ 时,提取的脂质含量有所增长;当再加入 $\text{FeSO}_4$ 后,提取的脂质含量增加2倍,而且脂肪酸甲酯的质量也有所提高。Dai等<sup>[46]</sup>采用常规加热、超

声、微波辅助萃取 3 种方式提取脂质,结果表明微波辅助萃取脂质得到的脂质含量最高。Lee 等<sup>[47]</sup>采用高速珠磨法对 3 株微藻 *Botryococcus* sp.、*Chlorella vulgaris* sp. 和 *Scenedesmus* sp. 进行油脂提取,并和微波法、超声波法等提取技术对比发现,微波法对 3 种微藻油脂提取效率更高。

提取的微藻油脂需要通过酯交换法转化为生物柴油<sup>[48]</sup>。酯交换是一个多步骤、连续反应的过程,三酰甘油和甲醇在催化剂的作用下反应生成脂肪酸甲酯和副产物甘油。近年来,多数的酯交换研究主要是为了找到经济适合的催化剂,为了提高脂肪酸甲酯的产量<sup>[49]</sup>。Lam 等<sup>[50]</sup>通过在微藻脂质酯交换反应中加入不同的共溶剂,优化出最佳共溶剂四氢呋喃,效率高达 60%,其次是甲苯和正己烷,效率分别是 45% 和 25%。

### 3 国际有关藻类燃料的活动和商业尝试

#### 3.1 全球藻类组织和资源

国际组织在以微藻为原料的能源发展方面起着重要的作用,如来自明尼苏达州普雷斯顿的藻类生物组织,是一个非营利组织,提供一些与微藻相关的研究和商业应用信息,由多家航空公司和蒙大拿州大学组成;休斯敦的 National Aeronautic Association 是一个贸易机构,主要为参与微藻生物燃料生产和销售的可再生能源公司及研究人员服务;美国能源部网站持续更新美国政府对于微藻生物技术的研究进展;另外中国海洋大学,已经收集了 700 多种海洋微藻;中国科学院水生生物研究所的淡水藻种库已经收集了 1 500 多种淡水藻株。

#### 3.2 商业应用尝试

微藻生产工艺从实验室生产转移到商业大规模生产,虽然微藻有着比其他二代生物能源作物产能高出 10 ~ 100 倍的优势,但较高的投资和运营成本制约了它的发展。所以全球都在尝试降低成本,使微藻生物燃料变得更加经济可行。

美国是藻类生物燃料发展的佼佼者,2007 年美国能源部提出藻类能源计划,预计在 2020 年实现微藻生物柴油的商业化,并在 2010 年 6 月,投资 2 400 万美元,有 3 个科研机构参与其中。

2010 年 6 月在柏林航空展上欧洲航空防务空间公司展示了第一批运用藻类生物燃料的飞机。2006 年中国政府颁布了可再生能源法律,并把生物柴油作为能源项目的研究重点。2010 年中国政府将微藻能源项目列入“973 计划”,以期在微藻生物

柴油的大规模生产技术上做出重大突破。中国科学院青岛生物能源与过程技术研究所筛选出高油脂微藻株,发现了经济可行的油脂提取和酯交换技术,可以从藻类生物量提取 100% 的脂质。微藻生物柴油的生产在试验规模中已经得到了验证,预计在 2015 年建造 1 个试验工厂,每年生物柴油的生产量可达 5 000 t。

### 4 展望和挑战

微藻作为新兴的商业原料,还需要在以下几个方面加强研究:严格筛选并运用分子工程技术提高微藻产油能力,增强其对严酷环境的抵抗力;进一步提高生物反应器的生产能力进而降低成本;合理运用发电站的 CO<sub>2</sub>, 并利用废水中的营养和有机碳来培养微藻,提高产量并降低生产成本;回收生产过程中高价值的副产物;回收利用藻渣。

目前在微藻生物燃料开发中仍有不少的障碍,包括在有效成本前提下,大批量生产藻类和无菌培养的知识比较欠缺;在现有技术条件下,开放式池塘系统需要大面积土地和水资源;生物柴油生产成本高,尤其在收集生物量和油脂提取方面;酯交换反应过程需要大量的甲醇或乙醇;高资本支出,尤其是 PBRs(光生物反应器)和操作支出。大规模的应用带来经济问题,随着越来越多的中型、大型系统的投入,我们需要更加精确的成本估算,研发成本的控制也需要我们去探索新的技术途径。

#### 参考文献

- [1] Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, (14): 557–77.
- [2] Han S F, Jin W B, Tu R J, et al. Biofuel production from microalgae as feedstock: Current status and potential[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2014: 1–14.
- [3] Abdel-Raouf N, Al-Homaidan A A, Ibraheem I B M. Microalgae and wastewater treatment [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2012, 19(3): 257–275.
- [4] El-Sheekh M M, El-Shouny W A, Osman M, et al. Growth and heavy metals removal efficiency of *Nostocmuscorum* and *Anabaena subcylindrica* in sewage and industrial wastewater effluents[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, 19(2): 357–365.
- [5] Harun R, Singh M, Forde G M, et al. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 1037–1047.
- [6] Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E, et al. Microalgal triacylglycerols as

- feedstocks for biofuel production; Perspectives and advances [J]. *The Plant Journal*, 2008, 54(4): 621 - 639.
- [7] Li Y, Horsman M, Wu N, *et al.* Biofuels from microalgae [J]. *Biotechnology Progress*, 2008, 24(4): 815 - 820.
- [8] Ling Xia, Shaoxian Song, *et al.* Selection of microalgae for biodiesel production in a scalable outdoor photo-bioreactor in north China [J]. *Bioresour Technol*, 2014, (174): 274 - 280.
- [9] Thi Thai Yen Doan, Balasubramanian Sivaloganathan, Jeffrey Philip Obbard. Screening of marine microalgae for biodiesel feedstock [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, (35): 2534 - 2544.
- [10] 侯李君, 施定基, 等. 蓝藻正反义 *pepC* 基因导入对大肠杆菌中脂质合成的调控 [J]. *中国生物工程杂志*, 2008, 28(5): 52 - 58.
- [11] Yuan-Guang Li, *et al.* Microalgal biodiesel in China: Opportunities and challenges [J]. *Applied Energy*, 2011, 10(88): 3432 - 3437.
- [12] 王国盼, 苏宏飞, 苏辉兰, 等. 微藻生产生物柴油的研究进展 [J]. *现代化工*, 2014, 34(6): 41 - 45.
- [13] Jin W B, Tu R J, *et al.* Biofuel production from microalgae as feedstock; Current status and potential [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2014: 1 - 14.
- [14] Converti A, Casazza A A, Ortiz E Y, *et al.* Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production [J]. *Chemical Engineering and Processing; Process Intensification*, 2009, 48(6): 1146 - 1151.
- [15] Renaud S M, Thinh L V, Lambrinidis G, *et al.* Effect of temperature on growth, chemical composition and fatty acid composition of tropical Australian microalgae grown in batch cultures [J]. *Aquaculture*, 2002, 211(1): 195 - 214.
- [16] Wu L F, Chen P C, Lee C M. The effects of nitrogen sources and temperature on cell growth and lipid accumulation of microalgae [J]. *Int Biodeteriorat Biodegrad*, 2013, (85): 506 - 510.
- [17] Scott S A, Davey M P, Dennis J S, *et al.* Biodiesel from algae: Challenges and prospects [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2010, (21): 277 - 286.
- [18] Solovchenko A E, Khozin-Goldberg I, Didi-Cohen S, *et al.* Effects of light intensity and nitrogen starvation on growth, total fatty acids and arachidonic acid in the green microalga *Parietochlorisincisa* [J]. *J Appl Phycol*, 2008, (20): 245 - 51.
- [19] Ruangsomboon S. Effect of light, nutrient, cultivation time and salinity on lipid production of newly isolated strain of the green microalga, *Botryococcus braunii* KMITL 2 [J]. *Bioresour Technol*, 2012, (109): 261 - 265.
- [20] Yeh K-L, Chang J-S, Chen W-M. Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31 [J]. *Eng Life Sci*, 2010, (10): 201 - 208.
- [21] Das P, Lei W, Aziz S S, *et al.* Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light [J]. *Bioresour Technol*, 2011, (102): 3883 - 3887.
- [22] Yoshioka M, Yago T, Yoshie-Stark Y, *et al.* Effect of high frequency of intermittent light on the growth and fatty acid profile of *Isochrysis galbana* [J]. *Aquaculture*, 2012, 338 - 341: 111 - 117.
- [23] Zhang X, Amendola P, Hewson J C, *et al.* Influence of growth phase on harvesting of *Chlorella zofingiensis* by dissolved air flotation [J]. *Bioresour Technol*, 2012, (116): 477 - 84.
- [24] Ho S-H, Chen W-M, Chang J-S. *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for CO<sub>2</sub> mitigation and biodiesel production [J]. *Bioresour Technol*, 2010, (101): 8725 - 8730.
- [25] Chen C, Yeh K, Aisyah R, *et al.* Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review [J]. *Bioresour Technol*, 2011, (102): 71 - 81.
- [26] Yoo C, Jun S, Lee J, *et al.* Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide [J]. *Bioresour Technol*, 2010, (101): S71 - 74.
- [27] Huang G H, Chen F, Wei D, *et al.* Biodiesel production by microalgal biotechnology [J]. *Appl Energy*, 2010, (87): 38 - 46.
- [28] Chojnacka K, Marquez-Rocha F J. Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae [J]. *Biotechnol*, 2004, (3): 21 - 34.
- [29] Chisti Y. Biodiesel from microalgae [J]. *Biotechnol Adv*, 2007, (25): 294 - 306.
- [30] James S C, Boriah V. Modeling algae growth in an open-channel raceway [J]. *J Comput Biol*, 2010, (17): 895 - 906.
- [31] Shen Y, Yuan W, Pei Z J, *et al.* Microalgae mass production methods [J]. *Transactions of the Asabe*, 2009, (52): 1275 - 1287.
- [32] 高春芳, 余世实, 吴庆余. 微藻生物柴油的发展 [J]. *生物学通报*, 2011, 46(6): 1 - 5.
- [33] Ugwu C U, Aoyagi H, Uchiyama H. Photobioreactors for mass cultivation of algae [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(10): 4021 - 4028.
- [34] Chisti Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol [J]. *Trends Biotechnol*, 2008, (26): 126 - 31.
- [35] Hsieh C H, Wu Wenteng. A novel photobioreactor with transparent rectangular chambers for cultivation of microalgae [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, (46): 300 - 305.
- [36] Bilal M R, Hassan A Arafat, Ivo F J Vankelecom. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: A review [J]. 2014, 32(7): 1283 - 1300.
- [37] Gong Y, Jiang M. Biodiesel production with microalgae as feedstock; From strains to biodiesel [J]. *Biotechnol Lett*, 2011, (33): 1269 - 1284.
- [38] Zhang X, Hu Q, Sommerfeld M, *et al.* Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes [J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(14): 5297 - 5304.
- [39] Bhavne R, Kuritz T, Powell L, *et al.* Membrane-based energy efficient dewatering of microalgae in biofuels production and recovery of value added co-products [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(10): 5599 - 5606.
- [40] Rohit Misra, Abhishek Guldhe, Poonam Singh, *et al.* Electrochemical harvesting process for microalgae by using nonsacrificial carbon electrode: A sustainable approach for biodiesel production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, (255): 327 - 333.

以及协同设计。有的公司正研究和部署云系统,以便更高效、便捷地管理和使用数据。

国内工程企业对工程设计集成做了不少研究与尝试<sup>[4-7]</sup>,积累了不少经验。在电力<sup>[8]</sup>、海上油田建设<sup>[9]</sup>等行业目前已实现设计集成,能够进行数字化移交。数字化设计有3个层次<sup>[10]</sup>:图纸数字化、设计数字化和设计过程数字化,其中还贯穿了规则数字化和经验数字化。石化行业从早前计算机的普及——“甩图板”,到设计工具软件的应用,再到具有数据属性和三维石化工程软件的应用、数据库的建立,集成平台软件的引进,基本实现了图纸数字化和设计数字化,设计过程、结果数字化以及规则数字化和经验数字化正是需要通过设计集成系统的构建来实现。国内石化工程企业在与国外工程公司合作、参与国际工程项目时,虽然从国外大型工程公司学到了很多先进的理念和经验,但还有比较大的差距。目前,设计集成系统的构建基本处于应用试点阶段,并且主要集中在国内大型工程公司。

SEI较早地开始了这方面的应用与研究<sup>[11-15]</sup>,也先后尝试了多种不同的平台性软件<sup>[16-17]</sup>。从2008年开始,在中原OCC项目中开始了集成化应用试点。该集成试点项目以Intergraph公司SmartPlant Foundation(SPF)为数据集成平台,集成智能工艺系统SmartPlant PID(SPP&ID)、智能仪表系统SmartPlant Instrumentation(SPI)、三维工厂设计软件SmartPlant 3D(SP3D)等设计软件。2012年,SEI率先开展“数字化工厂”建设,在已有集成SPP&ID、SPI、SP3D、PDS、PDMS的基础上,逐步建立与材料管理系统SmartPlant Material(SPM)、Documentum、Comos等软件的集成,在中海油惠州二期裂解汽油

加氢项目上全面推进工艺设计和工程设计集成。目前,已建立了工程设计集成系统,实现了多专业集成化和协同设计,基本确定了EPC项目集成化方案和“数字化工厂”架构。

中石化上海工程公司在2009年完成的沙特聚烯烃项目中,其承担的详细工程设计为满足业主数字化交付的要求,采用了SPF系统、SP3D、SPP&ID、SPI、智能电气系统SmartPlant Electrical(SPEL)等系列软件。工程设计文件通过SPF系统移交,所有设计、采购等方面的文件均通过文件编号、位号进行有效的关联。除了使用智能软件产生的文档,大部分是利用SPF系统的装载工具将文件上传到系统中,此次试点应用尚不能够完全满足真正意义上集成化设计的要求。

2001—2003年,中国寰球工程公司分别参与了中海壳牌南海石化项目和扬子石化—巴斯夫一体化项目,被海外业主要求同步使用国际主流软件。三维设计2002年在管道专业全面运用;2004年,覆盖项目所有专业;2007年,启动三维协同设计研究和试点;2009年,启动三维协同施工研究;至今,寰球公司实现了从二维到三维的过渡。中国石油集团公司工程建设板块正在进行数字化设计集成系统建设研究试点,中国寰球工程公司承担了部分试点工作。经过长时间的调研认证,寰球公司选定了以Intergraph公司SPF和西门子公司COMOS FEED为基础平台的工艺和工程设计集成方案。该设计集成系统的构建从2013年启动。

2014年6月,惠生工程公司宣布实现其首个数字化工厂设计<sup>[18]</sup>——新疆独山子天利实业4万t/a苯乙烯项目的数字化交付。设计过程中,惠生工程综合应用了SP3D、材料编码系统SPRD、SPP&ID、

(上接第5页)

- [41] Kim J, Yoo G, Lee H, *et al.* Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(6): 862-876.
- [42] 刘圣臣, 邹宁, 吴电云, 等. 小球藻海藻油提取中不同破壁方法的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2009, (5): 100-102.
- [43] Hyeon-Soo Cho, You-Kwan Oh, Soon-Chul Park, *et al.* Effects of enzymatic hydrolysis on lipid extraction from *Chlorella vulgaris*[J]. *Renewable Energy*, 2012, 12(9): 1-5.
- [44] 何扩, 张秀媛, 李玉峰. 小球藻破壁技术及其藻片研制[J]. *食品工业科技*, 2006, 27(2): 147-151.
- [45] Alberto Steriti, Roberto Rossi, Alessandro Concas, *et al.* A novel cell disruption technique to enhance lipid extraction from microalgae[J]. *Bioresource Technology*, 2014, (164): 70-77.

- [46] Dai Y M, Chen K T, Chen C C. Study of the microwave lipid extraction from microalgae for biodiesel production[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, (250): 267-273.
- [47] Jae-Yon Lee, Chan Yoo, So-Young Jun, *et al.* Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae[J]. *Biore-source Technology*, 2010, (101): s75-s77.
- [48] Demirbaş A. Diesel fuel from vegetable oil via transesterification and soap pyrolysis[J]. *Energy Sources*, 2002, 24(9): 835-841.
- [49] Kouzu M, Kasuno T, Tajika M, *et al.* Calcium oxide as a solid base catalyst for transesterification of soybean oil and its application to biodiesel production[J]. *Fuel*, 2008, 87(12): 2798-2806.
- [50] Lam M K, Lee K T. Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, (110): 242-248. ■