

## 表面活性剂对木质纤维素酶解产糖的影响研究进展

代勇勇<sup>1</sup>, 孙丹<sup>1,2,3</sup>

- 1 湖北工业大学 材料与化学工程学院, 湖北 武汉 430068
- 2 湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068
- 3 绿色轻质材料与加工湖北工业大学协同创新中心, 湖北 武汉 430068

代勇勇, 孙丹. 表面活性剂对木质纤维素酶解产糖的影响研究进展. 生物工程学报, 2020, 36(5): 861–867.

Dai YY, Sun D. Progress in applying surfactants to lignocellulose hydrolysis for sugar production. Chin J Biotech, 2020, 36(5): 861–867.

**摘要:** 木质纤维素是生产生物燃料乙醇的主要原料, 其含量丰富、绿色环保以及可再生性, 因此有效地利用木质纤维素有望解决能源短缺问题。表面活性剂能够有效地促进木质纤维素的酶解反应, 通过探讨不同表面活性剂对酶解反应的影响及机理, 为实际的酶解过程找到合适表面活性剂提供一定的理论指导。

**关键词:** 木质纤维素, 表面活性剂, 酶解产糖, 机理

## Progress in applying surfactants to lignocellulose hydrolysis for sugar production

Yongyong Dai<sup>1</sup>, and Dan Sun<sup>1,2,3</sup>

1 School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

2 Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

3 Collaborative Innovation Center of Green Light-weight Materials and Processing, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

**Abstract:** Lignocellulose is a major biomass resource for the production of biofuel ethanol. Due to its abundance, environmental friendliness and renewability, the utilization of lignocellulose is promising to solve energy shortage. Surfactant can effectively promote the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. By discussing the influence and mechanism of different surfactants on the enzymatic hydrolysis, we provide references for finding appropriate surfactants in enzymatic hydrolysis process.

**Keywords:** lignocellulose, surfactant, enzymatic hydrolysis, mechanism

**Received:** July 17, 2019; **Accepted:** September 27, 2019

**Supported by:** Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials Light Industrial and Open Fund Project of Collaborative Innovation Center of Green Light-weight Materials and Processing, Hubei University of Technology (No. 201806B07), Doctoral Research Foundation Project of Hubei University of Technology (No. BSQD2017020), Guiding Project of Science and Technology Department of Hubei Province (No. 2019CFC858).

**Corresponding authors:** Dan Sun. Tel: +86-27-67815008; E-mail: 80367532@qq.com

绿色轻工材料湖北省重点实验室暨绿色轻质材料与加工湖北工业大学协同创新中心开放基金 (No. 201806B07), 湖北工业大学博士科研启动基金 (No. BSQD2017020), 湖北省科技厅指导性计划项目 (No. 2019CFC858) 资助。

网络出版时间: 2019-10-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20191010.1133.007.html>

目前, 世界各国都面临着以化石能源为主的传统能源逐步枯竭的问题, 因此发展新能源是未来必然的趋势, 生物质能源是新能源的发展方向之一, 具有资源丰富、可再生性以及绿色环保的重要特点。木质纤维素制备生物燃料乙醇技术是当前生物质能源化的研究热点<sup>[1]</sup>, 该技术以木质纤维素为原材料, 对其进行预处理、酶解、发酵和蒸馏 4 个关键步骤, 得到生物燃料乙醇。

优化预处理技术以及降低酶解成本是木质纤维素酶解产糖的研究重点。木质纤维素主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。木质素会对酶产生非反应性吸附<sup>[2]</sup>, 酶解产生的纤维二糖会抑制纤维素酶的活性<sup>[3]</sup>。在酶解产糖过程中加反应助剂能够减少酶的非反应性吸附和稳定酶的活性。常见的酶解添加剂有表面活性剂、氧化钙、氯化钙和镁离子<sup>[4]</sup>。

目前许多研究表明, 在酶解产糖过程中加入表面活性剂能够有效地提高还原糖产率和降低酶解成本。木质素是由苯基丙烷单元通过醚键和碳碳单键组成的不定形三维立体聚合物, 含有苯基、甲基和亚甲基等疏水位点, 表面活性剂有亲水性和疏水性两性, 其疏水基团可以和木质素的疏水位点结合, 占据木质素表面从而阻碍酶的非反应性吸附。

## 1 表面活性剂对木质纤维素酶活性的影响

在木质纤维素中, 纤维素聚集非常紧密, 半纤维素和木质素通过化学键相互连接, 围绕在纤维素周围, 导致纤维素难以被降解。因此在酶解之前必须对木质纤维素进行预处理, 降低纤维素的聚合度和结晶度, 提高纤维素的可及度。

表面活性剂对木质纤维素的酶解过程有很好的促进效果, Parnthong 等<sup>[5]</sup>研究发现非离子表面活性剂效果最佳。表面活性剂能够辅助纤维素酶酶解木质纤维素, 在酶解过程中不仅能提高葡萄糖和木糖的产率, 而且可以增加木质素的去除率以及减少纤维素酶与木质素的非反应性吸附, 另外, 表面活性剂对纤维素酶活性有一定的影响。但是有很多因素对表面活性剂的促进效果有一定的影响, 例如木质纤维素原料的结构和成分、对其进行的预处理以及酶解条件。通过对比在不同因素下表面活性剂促进酶解的差异性, 从而揭示表面活性剂在酶解过程中的作用机理, 在实际设计和开发中, 可针对不同木质纤维素原料选择合适的酶解助剂, 揭示其机理有着极其重要的理论指导意义。

根据表 1 发现, 不同表面活性剂和不同的预

表 1 在不同预处理条件下不同表面活性剂对木质纤维素酶解的影响

Table 1 Effects of different surfactants on enzymatic hydrolysis of lignocellulose pretreatment

Surfactant	Type	Pretreatment	Substrate	Surfactant concentration	Conversion (%)	Reference
PVP8000	Non-ionic	Acid	Eucalyptus	1 g/L	27.2→81.8	[10]
PVP360000	Non-ionic	Acid	Eucalyptus	1 g/L	27.2→59.2	[10]
Tween-80	Non-ionic	Acid	Miscanthus	0.2 g/L	36.5→84	[11]
Tween-80	Non-ionic	Alkali	Miscanthus	0.2 g/L	56.5→98.9	[11]
NPE	Non-ionic		Avicel	0.001 g/L	36→53	[10]
NPE	Non-ionic		Avicel	0.01 g/L	36→56	[10]
NPE	Non-ionic		Avicel	1 g/L	36→51	[10]
LS-CTAB	Cationic	Steam explosion	Corn stover	1 g/L	24.3→56.2	[12]
SB3-16	Zwitterionic	Acid	Eucalyptus	2 mmol/L	27.9→72.6	[13]
Tween-20	Non-ionic	Ionic liquid	Beech wood	0.2 g/L	75.2→84.1	[14]
Tween-80	Non-ionic	Ionic liquid	Beech wood	0.2 g/L	75.2→87.5	[14]
SDS	Anionic		Avicel	0.3 mmol/L	42.1→54.8	[15]

处理方式都会对酶解效率有一定的影响,其中非离子表面活性剂和离子液体预处理促进酶解效果较为显著。酶解条件不仅只有浓度,温度以及 pH 都会影响表面活性剂的作用效果。有研究表明<sup>[6]</sup>鼠李糖脂表面活性剂在不同的酶解条件下还原糖的产率有明显差异,最优酶解条件为: pH 7.5,  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表面活性剂浓度为  $10\text{ mg/L}$ 。在低浓度时,表面活性剂的作用效果随浓度的增加而增大,但超过一定浓度,作用效果会受到抑制<sup>[7]</sup>。同时研究表明<sup>[8]</sup>较高浓度的表面活性剂会显著降低外切酶活力,进而抑制纤维素酶总酶活。不仅是表面活性剂,其他酶解添加剂也会出现此类现象。如烟杆的酶解过程中随着添加剂的浓度增加,酶解液中还原糖质量浓度先增加后降低<sup>[9]</sup>。

在酶解过程使用同一种表面活性剂,其分子量不同,酶解效果也会有差异。由表 1 可以看出, PVP8000 和 PVP360000 的酶解效率相差很明显,这是由于表面活性剂分子量过大在空间上形成空间位阻阻碍了纤维素酶和纤维素的接触。

方志峰<sup>[16]</sup>研究了不同表面活性剂对花生壳木质纤维素的影响,所使用的表面活性剂有 Tween、PEG、SDS、CTAB 以及 AOT,结果表明 Tween 和 PEG 表面活性剂对酶解过程没有明显的促进效果,其中 CTAB 的促进效果最为显著。Alhammad 等<sup>[17]</sup>考察了不同非离子表面活性剂对杨树果肉酶解的影响,添加的表面活性剂为 TitronX-100、PEG 以及 Tween-80,结果表明 PEG 的酶解促进效果最好。以上情况都表明了木质纤维素原料、预处理方式、表面活性剂种类以及酶解条件因素都会影响木质纤维素的酶解效果,因此需要进一步研究表面活性剂对木质纤维素的作用机理。

## 2 表面活性剂对木质纤维素酶活性的机理研究

表面活性剂的加入对纤维素的酶解产生积极影响的机理有很多种,同时在一定条件下对酶解

也有抑制作用。非离子表面活性剂的主要作用机理是吸附在木质素表面防止纤维素酶无效吸附以及对纤维素酶有稳定作用;离子表面活性剂也有吸附在木质素表面防止纤维素酶无效吸附的作用效果,同时对木质纤维素的结构能产生破坏作用,但是离子表面活性剂本身带有电荷性,这对纤维素酶活存在促进作用,同时也有一定的抑制作用。Kaar 和 Holtzapfle<sup>[18]</sup>研究表明 Tween 非表面活性剂不仅可以阻止纤维素酶的无效吸附,同时也能够保护纤维素酶在较高温度下不变性。Goshadrou 等<sup>[14]</sup>研究发现添加表面活性剂显著提高了木质素和半纤维素去除率,降低了纤维素的结晶度,产生了多孔、无序的结构,使纤维素的比表面积增大了。另外,表面活性剂对纤维素酶构象有一定的影响,非离子表面活性剂在水溶液中不存在电性斥力,对酶的构象改变很小;阴离子表面活性剂和阳离子表面活性剂存在电性斥力,因此对酶活有一定的影响<sup>[7]</sup>。表面活性剂浓度在较低时对酶解反应有促进作用,但是表面活性剂浓度过高往往会因为破坏了酶的活性构象而导致酶活性丧失,同时也会在酶解体系中形成胶束,降低了纤维素酶的可及度。不同种类的表面活性剂有不同的结构,因此在酶解过程中有不同的作用机理。

### 2.1 非离子表面活性剂

聚乙二醇 (PEG) 是由环氧乙烷单元组成,其中 1,2-乙烷具有疏水性,易于与木质素的疏水位点结合,醚基可以与木质素的酚羟基形成氢键,使得 PEG 牢牢地吸附在木质素上。PEG 同时也有亲水性,吸附在木质素后形成了水化层,这可能是防止木质素对纤维素酶的非特异性结合,从而导致纤维素酶活性增加。Sindhu 等<sup>[19]</sup>研究发现表面活性剂能够通过降低两个液相之间的表面张力来帮助去除疏水物质,通过提取木质素降解过程中的疏水产物,提高了木质素去除率。壬基酚聚氧乙烯醚 (NPE) 也能很好地减少木质素对纤维素酶的非生产性吸附,其作用机理与 PEG 相似。

吐温 (Tween) 为多聚山梨醇酯,其分子中含

有大量的聚氧乙烷基,故亲水性能良好。Tween 表面活性剂吸附在木质素表面,其亲水基团对纤维素酶产生空间阻碍作用,避免木质素疏水部分与纤维素酶产生作用。Tween 80 的加入能够有效改善纤维素酶的吸附和脱附性能<sup>[20]</sup>。Tween 80 通过减少葡聚糖内切酶的无效吸附,使得游离的葡聚糖内切酶产生更多的游离链末端基,促进了纤维二糖水解酶将纤维二糖单元从游离的纤维素链末端基中脱除,以进一步降解纤维素,提高了纤维素酶中纤维二糖酶和内切葡萄糖苷酶的活力,并且促进这两种酶与外切葡萄糖苷酶的协同作用<sup>[21-22]</sup>。吐温表面活性剂主要通过影响底物和酶来提高木质纤维素的酶解效率。

## 2.2 阳离子表面活性剂

十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 是一种阳离子表面活性剂,具有优良的渗透性、乳化、抗静电等性质。CTAB 具有优良的渗透性能,因此可以辅助木质纤维素预处理过程。CTAB 在预处理过程中可能将部分半纤维素剥离,破坏木质纤维素内部结构之间的连接,改变细胞壁的致密结构,导致更多的纤维素暴露出来,从而提高酶解效率<sup>[15]</sup>。木质素磺化盐 (LS) 与 CTAB 形成的配合物也能有效提高纤维素酶降解效率,同时也能提高纤维素酶的稳定性<sup>[12]</sup>。LS 通过疏水作用或静电吸引作用于纤维素酶团聚体上形成了 LS-纤维素酶复合物,增加了纤维素酶的有效浓度,以减少纤维素酶团聚体对纤维素的非生产性吸附<sup>[23]</sup>; CTAB 可以将 LS-纤维素酶复合物表面的强负电荷调控为弱负电荷,减少了电荷的排斥作用,有利于纤维素酶的水解反应。此外,若纤维素酶暴露在气液界面,纤维素酶会受力不均匀从而破坏其三维结构,导致活性下降<sup>[24]</sup>。LS-CATB 表面活性剂分散在气液表面,防止了纤维素酶在酶解过程中活性下降,提高了纤维素酶的稳定性<sup>[25]</sup>。

阳离子表面活性剂中的阳离子对纤维素酶的活性有一定的影响。低浓度的阳离子可能只与纤维素酶的表面原子或基团发生一定的相互作用,

导致纤维素酶的构象发生较小变化,对纤维素酶的活性影响相对较小;当阳离子浓度增加时,阳离子会与纤维素酶内部原子或基团相互作用,导致纤维素酶的构象变化太大,使得纤维素酶的活性受到抑制<sup>[26]</sup>。

## 2.3 阴离子表面活性剂

十二烷基硫酸钠 (SDS) 是一种阴离子表面活性剂。SDS 能够促进对木质纤维素结构的破坏,同时也能够吸附在木质素表面<sup>[15]</sup>,从而提高了酶解效率。十二烷基硫酸钠可以作为蛋白质的变性剂和助溶性试剂。在较低浓度时强化酶解的机理与非离子表面活性剂相似<sup>[26]</sup>,通过吸附在木质素表面防止了纤维素酶的无效吸附。十二烷基硫酸钠对生物质进行预处理,能够有效增加木质素的去除率<sup>[27]</sup>。但是高浓度时会破坏蛋白质的结构,导致纤维素酶失活。

鼠李糖脂属于阴离子生物表面活性剂,鼠李糖脂结构中包含两个长度相同的脂肪酸链,在碱性水溶液中有良好的溶解特性。张耿峻等<sup>[28]</sup>研究了不同表面活性剂联合离子液体对稻秆的酶解作用,研究结果表明 1% 的鼠李糖脂能显著提高稻秆的酶解速度,说明鼠李糖脂可能有利于纤维素酶与纤维素的结合或能够促进木质纤维素在酶解体系中的分散和溶解。

## 2.4 小结

由以上的研究结果及分析讨论可知,表面活性剂在一定浓度范围内促进纤维素酶活性的作用机理主要分为 2 个层面。

### (1) 表面活性剂对木质纤维素的作用

表面活性剂能通过打破木质纤维素的内部结构增加木质纤维素酶对纤维素的可及度,从而促进酶解反应<sup>[29]</sup>;表面活性剂可增加木质素的去除率,也可通过疏水作用或氢键作用于木质素表面,减少底物中木质素对纤维素酶的非特异性吸附。图 1 表示了 NPE 吸附在木质素表面,减少了纤维素酶的无效吸附。

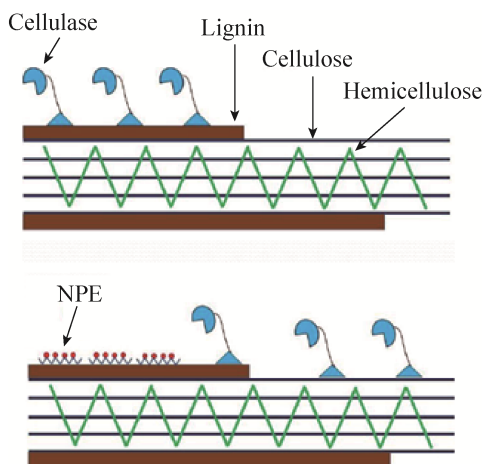


图1 NPE减少纤维素酶在木质素上无效吸附机理<sup>[9]</sup>  
Fig. 1 Mechanism of NPE reducing non-productive adsorption of cellulase on lignin<sup>[9]</sup>.

## (2) 表面活性剂对纤维素酶的作用

表面活性剂能够提高酶的活性以及稳定性。在低浓度时,表面活性剂会使得酶分子的柔性增加,有利于与底物的相互作用与结合,从而增加酶活性;阳离子表面活性剂在低浓度时,阳离子对纤维素酶表层作用而使酶的构象产生变化,当这种变化能促进酶分子中的电子的传递时,此时就表现为提高纤维素酶的活性。LS-CTAB表面活性剂分散在气液界面,阻止纤维素酶暴露在气液界面导致活性下降的现象发生,提高了纤维素酶的稳定性,其作用机理如图2所示。

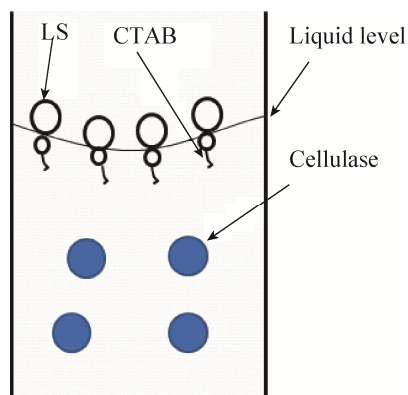


图2 LS-CTAB稳定纤维素酶作用机理  
Fig. 2 Mechanism of LS-CTAB stabilizing the cellulase.

## 3 总结与展望

在木质纤维素转化为生物能源过程中,减少纤维素酶用量和提高木质纤维素酶解效率一直是研究的重点。表面活性剂的添加可有效地减少酶用量和提高酶解效率,但是这种促进作用受底物成分和结构、预处理方式、酶解条件以及酶的活性等因素影响。因此需要更进一步探究在不同因素的影响下表面活性剂与底物木质素及纤维素酶的相互作用机理。国内外学者已经作出了大量研究,由于表面活性剂种类不同、性质各异,作用机理也不同,许多问题还有待更进一步的研究,例如表面活性剂与木质素的相互作用,表面活性剂与纤维素酶的协同作用等等。

## REFERENCES

- [1] Hassan SS, Williams GA, Jaiswal AK. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 2018, 262: 310–318.
- [2] Cai C, Zhan XJ, Zeng MJ, et al. Using recyclable pH-responsive lignin amphoteric surfactant to enhance the enzymatic hydrolysis of lignocelluloses. *Green Chem*, 2017, 19(22): 5479–5487.
- [3] Wang W, Zhuang XS, Tan XS, et al. Dual effect of nonionic surfactants on improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Energy Fuels*, 2018, 32(5): 5951–5959.
- [4] Akimkulova A, Zhou Y, Zhao XB, et al. Improving the enzymatic hydrolysis of dilute acid pretreated wheat straw by metal ion blocking of non-productive cellulase adsorption on lignin. *Bioresour Technol*, 2016, 208: 110–116.
- [5] Parthong J, Kungsanant S, Chavadej S. Enhancement of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials by nonionic surfactant. *Key Eng Mater*, 2017, 757: 151–155.
- [6] Yuan JG, Wen Y, Wang P, et al. Influence of surfactants on cellulase bio-washing. *J Text Res*, 2014, 35(5): 78–82 (in Chinese).

- 袁久刚, 文艺, 王平, 等. 表面活性剂对纤维素酶水洗性能的影响. 纺织学报, 2014, 35(5): 78–82.
- [7] Zhang SD. Stimulatory effect and adsorption behavior of rhamnolipid on lignocellulose degradation system[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016 (in Chinese).  
张树栋. 鼠李糖脂对木质纤维素降解体系的增效作用及吸附行为探究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [8] Zhou Y, Zhao XB, Liu DH. Effects of non-ionic surfactant on the enzymatic hydrolysis of lignocellulose and corresponding mechanism. Prog Chem, 2015, 27(11): 1555–1565 (in Chinese).  
周妍, 赵雪冰, 刘德华. 非离子型表面活性剂对木质纤维素酶催化水解的影响及机理. 化学进展, 2015, 27(11): 1555–1565.
- [9] Wang FQ, Su ZP, Fu CQ, et al. Effects of reducing nicotine on cellulase activity by surfactants. J Henan Agric Univ, 2018, 52(3): 412–417, 423 (in Chinese).  
王风芹, 苏增平, 付晨青, 等. 表面活性剂降低烟碱对纤维素酶活性抑制作用的研究. 河南农业大学学报, 2018, 52(3): 412–417, 423.
- [10] Hu QY. Effect of nonionic surfactant and shear force on the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic and its mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017 (in Chinese).  
胡俏衍. 非离子表面活性剂和剪切作用对木质纤维素酶解的影响及其机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [11] Sun D. Characterization of the molecular mechanism for biomass enzymatic saccharification under steam explosion and surfactant supply in *Miscanthus*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese).  
孙丹. 利用汽爆预处理及表面活性剂提高芒草生物质降解效率分子机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [12] Lin XL, Cai C, Huang JH, et al. Understanding the effect of the complex of liginosulfonate and cetyltrimethylammonium bromide on the enzymatic digestibility of cellulose. Energy Fuels, 2017, 31(1): 672–678.
- [13] Cai C, Pang YX, Zhan XJ, et al. Using temperature-responsive zwitterionic surfactant to enhance the enzymatic hydrolysis of lignocelluloses and recover cellulase by cooling. Bioresour Technol, 2017, 243: 1141–1148.
- [14] Goshadrou A, Lefsrud M. Synergistic surfactant-assisted [EMIM]OAc pretreatment of lignocellulosic waste for enhanced cellulose accessibility to cellulase. Carbohydr Polym, 2017, 166: 104–113.
- [15] Lin XL, Lou HM, Qiu XQ, et al. Effect of sodium dodecyl sulfate and cetyltrimethylammonium bromide catanionic surfactant on the enzymatic hydrolysis of Avicel and corn stover. Cellulose, 2017, 24(2): 669–676.
- [16] Fang ZF. Effect and mechanism of surfactants on enzymatic hydrolysis characteristics of peanut shells[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014 (in Chinese).  
方志锋. 表面活性剂对花生壳水解特性的影响和机制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [17] Alhammad A, Adewale P, Kuttiraja M, et al. Enhancing enzyme-aided production of fermentable sugars from poplar pulp in the presence of non-ionic surfactants. Bioprocess Biosyst Eng, 2018, 41(8): 1133–1142.
- [18] Kaar WE, Holtzapple MT. Benefits from Tween during enzymic hydrolysis of corn stover. Biotechnol Bioeng, 1998, 59(4): 419–427.
- [19] Sindhu R, Binod P, Mathew AK, et al. An effective surfactant-assisted hydrothermal pretreatment strategy for bioethanol production from chili post-harvest residue by separate hydrolysis and fermentation. Bioprocess Biosyst Eng, 2018, 41(4): 565–571.
- [20] Dai L, Liu K, Han F, et al. Promotion of corncobs

- enzymatic hydrolysis by hot liquid water pretreatment combined with surfactant assistant. *Petrochem Ind Appl*, 2018, 37(12): 92–97 (in Chinese).
- 戴莉, 刘凯, 韩峰, 等. 高温液态水预处理结合表面活性剂促进纤维素酶水解玉米芯. *石油化工应用*, 2018, 37(12): 92–97.
- [21] Agrawal R, Satlewal A, Kapoor M, et al. Investigating the enzyme-lignin binding with surfactants for improved saccharification of pilot scale pretreated wheat straw. *Bioresour Technol*, 2017, 224: 411–418.
- [22] Parthong J, Kungsanant S, Chavadej S. The influence of nonionic surfactant adsorption on enzymatic hydrolysis of oil palm fruit bunch. *Appl Biochem Biotechnol*, 2018, 186(4): 895–908.
- [23] Cai C, Qiu XQ, Lin XL, et al. Improving enzymatic hydrolysis of lignocellulosic substrates with pre-hydrolysates by adding cetyltrimethylammonium bromide to neutralize lignosulfonate. *Bioresour Technol*, 2016, 216: 968–975.
- [24] Lou HM, Zeng MJ, Hu QY, et al. Nonionic surfactants enhanced enzymatic hydrolysis of cellulose by reducing cellulase deactivation caused by shear force and air-liquid interface. *Bioresour Technol*, 2018, 249: 1–8.
- [25] Lin XL, Qiu XQ, Lou HM, et al. Enhancement of lignosulfonate-based polyoxyethylene ether on enzymatic hydrolysis of lignocelluloses. *Ind Crops Prod*, 2016, 80: 86–92.
- [26] Zhang HM, Zhao J, Lin ZX, et al. Effects of neutralizing agents on enzymatic hydrolysis of corn stover pretreated by dilute acid-mediated steam explosion. *Chin J Bioprocess Eng*, 2011, 9(1): 1–4 (in Chinese).
- 张红漫, 赵晶, 林增祥, 等. 中和剂对稀酸蒸爆玉米秸秆酶解效果的影响. *生物加工过程*, 2011, 9(1): 1–4.
- [27] Kataria R, Woods T, Casey W, et al. Surfactant-mediated hydrothermal pretreatment of Ryegrass followed by enzymatic saccharification for polyhydroxyalkanoate production. *Ind Crops Prod*, 2018, 111: 625–632.
- [28] Zhang GL, Chen XM, Wang XQ, et al. The physico-chemical properties of rice straw after different surfactants-assisted ionic liquid pretreatment. *Acta Scien Circum*, 2016, 36(9): 3300–3305 (in Chinese).
- 张耿峻, 陈细妹, 王小琴, 等. 不同种类表面活性剂联合离子液体预处理稻秆的物化特性研究. *环境科学学报*, 2016, 36(9): 3300–3305.
- [29] Chen YA, Zhou Y, Qin YL, et al. Evaluation of the action of Tween 20 non-ionic surfactant during enzymatic hydrolysis of lignocellulose: pretreatment, hydrolysis conditions and lignin structure. *Bioresour Technol*, 2018, 269: 329–338.

(本文责编 陈宏宇)