

doi: 10. 3969/j. issn. 0253-2417. 2016. 01. 015

解结晶对纤维素吸附纤维素酶的影响



HANG Jing-qiang

张景强¹, 李清春¹, 林鹿^{2*}

(1. 电子科技大学中山学院 化学与生物工程学院, 广东 中山 528402;

2. 厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为探讨解结晶处理提高酶水解效率的机理, 对比研究了高结晶度的微晶纤维素(MCC)和低结晶度的解结晶微晶纤维素(D-MCC)对纤维素酶的吸附过程。结果发现: 酶吸附平衡后, 样品的 XPS 和 FT-IR 分析表明纤维素酶通过酶蛋白的氨基(—NH₂)与纤维素分子链上的羟基(—OH)之间以氢键(C—OH…NH)力吸附在 MCC 上; 相同条件下得到的 MCC 和 D-MCC 吸附率曲线的差异表明, 底物结构的改善比提高温度更能提高酶吸附率; 比较纤维素酶对 MCC 和 D-MCC 在 35 °C 下的吸附动力学可知, 通过降低底物的结晶度可促进酶吸附, 刚性结构的 MCC 更满足准一级动力学的假设, D-MCC 表面结构相对松散, 其吸附过程需进一步分析, 以得到更适合的动力学方程。

关键词: 纤维素酶; 微晶纤维素; 解结晶; 吸附

中图分类号: TQ35

文献标识码: A

文章编号: 0253-2417(2016)01-0105-07

引文格式: 张景强, 李清春, 林鹿. 解结晶对纤维素吸附纤维素酶的影响[J]. 林产化学与工业, 2016, 36(1): 105-111.

Effect of Decrystallization of Cellulose on Adsorbing Cellulase

ZHANG Jing-qiang¹, LI Qing-chun¹, LIN Lu²

(1. College of Chemistry & Biology Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Zhongshan Institute, Zhongshan 528402, China; 2. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The cellulase adsorbed and formed enzyme-substrate (ES) compound is a key step in the process of enzymatic hydrolysis. Through the comparison of cellulase adsorbed on two substrates: microcrystalline cellulose (MCC) with high degree of crystallinity and decrystallization microcrystalline cellulose (D-MCC) with low degree of crystallinity, it was found that, in the XPS wide scan patterns of adsorption equilibrium MCC, a new absorption peak of nitrogen element (399.06 eV) was observed. The fitting method is adopted to treat the strong peak of XPS-O1s, and the binding energy of this new peak was only 530.53 eV. In the infrared absorption range of 3050–3550 cm⁻¹, the absorption intensity of OH group decreased with extending adsorption time on cellulose. The above results proved that new hydrogen bonds (C—OH…NH) between the protein amino (—NH₂) and cellulose molecule chain (—OH) were generated during the cellulose adsorption process. From the comparison of the adsorption rate curves between MCC and D-MCC, the decrystallization method to improve cellulase adsorption was more effective than enhancing the temperature. From the comparison of adsorption kinetics between MCC and D-MCC at 35 °C, it was indicated that a reduction of cellulose crystallinity was positive for adsorption rate. MCC with rigid surface was fit for the first-order kinetic hypothesis. D-MCC with flexible surface was not suitable for the first-order kinetic. A more suitable kinetic hypothesis should be investigated in the future.

Key words: cellulase; microcrystalline cellulose; decrystallization; adsorption

纤维素酶水解是一个固液多相反应^[1], 首先酶转移到固体纤维素(底物)的表面, 酶被底物吸附并形成酶-底物(ES)复合物, 之后底物开始水解, 所产生的水溶性产物从底物表面转移到液相并进一步水

收稿日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金-广东自然科学基金联合基金重点项目(U0733001)

作者简介: 张景强(1974—), 男, 四川西昌人, 副教授, 博士, 从事植物资源化学与农产品研究

* 通讯作者: 林鹿, 教授, 博士生导师, 主要从事植物资源化学与生物技术领域研究工作; E-mail: lulin@xmu.edu.cn。

解生成葡萄糖。其中,ES复合物的形成是纤维素酶水解反应的关键步骤,其形成过程一是取决于酶结构,二是取决于底物结构,即底物的可及度。纤维素的化学结构是由D-吡喃葡萄糖环彼此以 β -1,4-糖苷键以 C_1 椅式构象联结而成的线形高分子化合物。对天然纤维素超分子结构的研究表明^[2-3],纤维素中大量的羟基基团形成了数目庞大的氢键,这些氢键形成了致密的晶体结构,严重阻碍了化学试剂或生物酶与纤维素表面的有效接触和作用,这已成为纤维素开发利用的最大障碍。本研究以解结晶方法处理微晶纤维素,对比探讨了不同结晶度的纤维素与纤维素酶吸附过程的差异,为进一步研究纤维素高效酶解机理打下基础。

1 实验

1.1 材料与仪器

纤维素酶 EC3.2.1.4 来源于黑曲霉(*Aspergillus niger*),上海伯奥生物科技有限公司,酶活单位定义为^[4]:1 mg 酶 1 min 产生 1 μ g 还原糖(以葡萄糖计)为 1U,测试条件为 pH 值 4.8 柠檬酸盐缓冲液,50 $^{\circ}$ C 下反应 30 min;该酶的滤纸酶活为 1.163U。

微晶纤维素(MCC),上海恒信化学试剂有限公司;福玛(FUMA)恒温培养摇床,上海福玛实验设备有限公司。

1.2 解结晶纤维素(D-MCC)的制备

称取 5.0 g 的 MCC 于 100 mL 烧杯中,首先加入 5 mL 去离子水充分润湿,然后缓慢加入 50 mL 磷酸(85%)边加边搅拌,混合均匀后烧杯中磷酸的质量分数控制在 83.03%。于 50 $^{\circ}$ C 的水浴锅中反应 6 h,立即加入 100 mL 去离子水并剧烈搅拌,6 000 r/min 离心 10 min,收集全部固体部分,先用无水乙醇 100 mL 洗涤(5次,每次 20 mL),离心收集固体部分后再用去离子水充分洗涤,以氢氧化钠溶液中和至 pH 值 7.0 左右,最后用丙酮脱水,样品于 50 $^{\circ}$ C 下真空烘干,即得 D-MCC,备用。

1.3 酶吸附底物实验

1.3.1 酶-底物(ES)复合物制备 在 50 mL 带塞锥形瓶中,先加入 3 g/L 的纤维素酶溶液 5 mL,再加入 15 mL pH 值 4.8 浓度 0.01 mol/L 的柠檬酸钠缓冲液(酶溶液最终质量浓度为 0.750 g/L),然后将锥形瓶放入培养摇床,恒温 35 $^{\circ}$ C,再分别加入 0.500 0 g 的 MCC 或 D-MCC 粉末样品,摇匀,在吸附 30 min 后,10 000 r/min 离心 10 min,所得固体粉末样品于去离子水中浸泡 1 min 后,低速离心 1 min(800 r/min),倾去上清液,样品于 35 $^{\circ}$ C 真空干燥,即得 ES 复合物,备用。

1.3.2 酶对底物的吸附率 按 ES 复合物的制备,控制温度分别为 5、20 和 35 $^{\circ}$ C,在吸附时间分别为 0、2、4、8、10、15、20、25、30、35、40、45 和 50 min 时,取出锥形瓶,10 000 r/min 离心 10 min,取上清液检测酶溶液的质量浓度。纤维素酶在底物上的吸附率按以下公式计算:

$$\eta_a = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_a —酶吸附率,%; C_0 —初始酶液质量浓度,g/L; C_t — t 时间样品上清液中的酶液质量浓度,g/L。

上述酶溶液质量浓度采用紫外法^[5]在 280 nm 波长处检测。酶标准溶液的质量浓度分别为 0.050、0.075、0.100、0.300、0.500、0.750、1.000 和 1.500 g/L,酶溶液质量浓度(C)与吸光度值(A)的线性方程为:

$$A = 1.0009C + 0.013 \quad (2)$$

线性方程的相关系数(r)为 0.999 5,具有高度的相关性。说明酶液质量浓度在 0.050~1.500 g/L 的范围内,与其吸光度值的关系严格符合朗伯-比尔定律。

1.4 表征与分析

1.4.1 X 射线衍射(XRD)分析 在 D/max-III A 型 X 射线衍射仪(日本理学电机工业株式会社)上进

行。检测条件: Cu 靶, 电压 40 kV, 电流 30 mA, 波长 0.154 2 nm, 扫描速度 $12(^{\circ})/\text{min}$, 扫描范围 $5^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。结晶度 (X_c) 按下式计算:

$$X_c = F_c / (F_a + F_c) \times 100\% \quad (3)$$

式中: F_c —XRD 图谱中结晶区的积分面积; F_a —XRD 图谱中非结晶区的积分面积。

1.4.2 傅里叶红外光谱 (FT-IR) 分析 在 NEXUS 红外光谱仪上进行。扫描范围: $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$; 分辨率 4 cm^{-1} ; 取 2 mg 样品混合于 200 mg KBr 粉末中, 在压片机上压片, 压力 10 MPa, 时间 2 min。

1.4.3 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析 Thermo-VG Scientific 公司生产的 ESCALAB 250, 分析室工作时的真空度为 $2.0265 \times 10^{-4}\text{ kPa}$ (打开 X 射线源的情况下)。使用 X 光源: 单色化的 Al $K\alpha$ 源 (Mono Al $K\alpha$), 能量为 1486.6 eV, 15 kV, 功率 150 W, 束斑大小为 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。所得能谱图用 XPSPEAK4.1 软件分峰, 进行高斯-洛伦兹混合拟和。

2 结果与讨论

2.1 ES 复合物的表征

2.1.1 XPS 分析 ES 复合物经 XPS 宽扫描分析, 结果见图 1。由图 1 中可见, 未吸附纤维素酶的 D-MCC 仅有碳元素 (C) 与氧元素 (O) 出峰, 二者以积分面积计算的摩尔分数分别为 65.98% 和 34.02%; 吸附酶液的 ES 复合物的图谱上则出现了少量氮元素 (N), 其结合能为 399.06 eV, 其摩尔分数为 2.50%, 另外碳元素摩尔分数为 66.03%, 氧元素摩尔分数为 31.47%; O/C 比值由 0.516 下降到 0.477。由此可知, 少量蛋白酶分子吸附到纤维素样品上, 由于酶蛋白分子中富含氨基 ($-\text{NH}_2$), 因而带入了氮元素, 这也证明了纤维素酶确实吸附到了纤维素表面。

图 2(a) 为 D-MCC 的 XPS-O1s 图谱, 图 2(b) 为酶吸附 30 min 所得 ES 复合物的 XPS-O1s 图谱。纤维素中氧原子均与碳原子以 C—O 连接, 在能谱图中表现为一个大的 O1s 峰。考虑到纤维素中的氧原子有的参与了氢键的形成, 有的存在于自由羟基中而未参与氢键的形成, 二者化学键结合能存在微小差异。因此将 D-MCC 样品的 XPS-O1s 能谱图的大峰通过高斯-洛伦兹拟合为两个小峰^[6-7]: O1s1 (C—OH \cdots O) 与 O1s2 (C—OH), 其摩尔分数与结合能分别为 70.56% (531.13 eV) 和 29.44% (531.69 eV)。

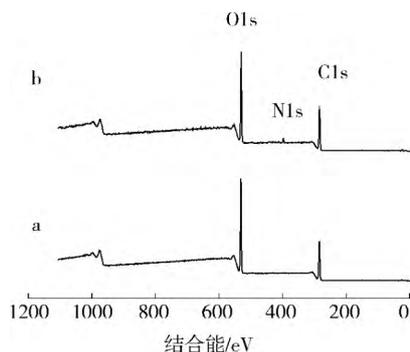


图 1 D-MCC 和 ES 的 XPS 宽扫描图谱
Fig.1 XPS wide scan patterns of D-MCC and ES compounds

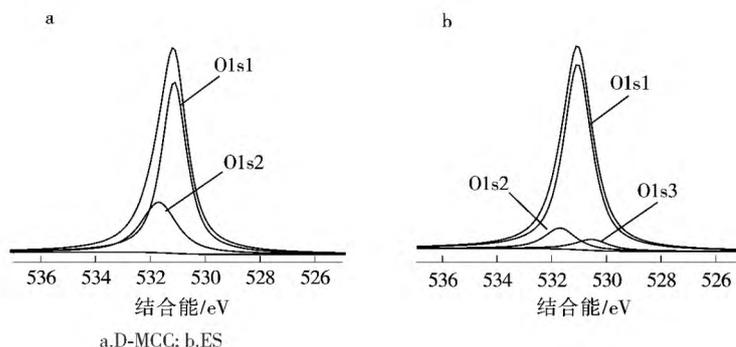


图 2 吸附酶对 D-MCC 的 XPS-O1s 峰的影响
Fig.2 Effects of enzyme absorption on the XPS-O1s peak of D-MCC

图 2(b) 中酶吸附所得 ES 复合物由于酶蛋白的氨基 ($-\text{NH}_2$) 与纤维素分子链的羟基 ($-\text{OH}$) 形成了新的氢键 (C—OH \cdots NH $_2$), 将其 O1s 峰分为 3 个小峰^[8-9]: O1s1、O1s2 和 O1s3 (C—OH \cdots NH $_2$), 其摩尔分数与结合能分别为 83.60% (531.05 eV)、10.46% (531.69 eV) 和 5.94% (530.53 eV)。可以看出, 由于氧负离子的吸引作用, C—OH \cdots O 中 C—O 的结合能降低了 0.56 eV; 而氮负离子的电负性要强于氧, 所以 C—OH \cdots NH $_2$ 中 C—O 的结合能降低更多, 为 1.16 eV。由此也证明, 纤维素酶与纤维素样品

确实发生了吸附作用,其作用力主要是氢键 $C-OH \cdots NH_2$ 键。

2.1.2 XRD 分析 样品 XRD 分析结果见图 3,经公式(3)计算可知,MCC 的 X_c 为 92.23%,以浓磷酸解结晶处理 6 h 后的微晶纤维素样品(D-MCC)的 X_c 为 53.38%。

2.1.3 FT-IR 分析 图 4 为吸附不同时间所得纤维素样品在 $3050 \sim 3550 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内的红外图谱,这一范围的红外吸收峰对应了 $-OH$ 基团强烈的伸缩振动以及纤维素分子内与分子间氢键的振动。

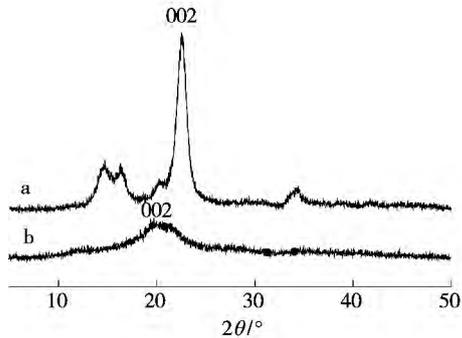
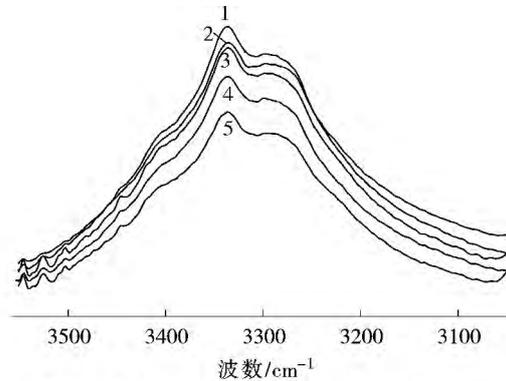


图 3 MCC(a) 和 D-MCC(b) 的 XRD 图谱



1. 0 min; 2. 8 min; 3. 20 min; 4. 60 min; 5. 100 min

图 4 吸附时间对 D-MCC 红外吸收强度的影响

Fig. 3 XRD spectra of MCC(a) and D-MCC(b) Fig. 4 Effect of enzyme adsorption time on FT-IR of D-MCC

由图 4 可见,D-MCC 吸附酶 0、8、20、60 和 100 min 后 $3050 \sim 3550 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围对应的羟基红外吸收强度呈缓慢下降趋势,说明随着酶吸附时间延长,纤维素酶分子中的吸附区蛋白不但吸附于纤维素表面,而且随着吸附量的增加,以形成新的氢键($C-OH \cdots NH_2$)的形式影响着原有的氢键($C-OH \cdots O$)^[10-11],从而降低了纤维素分子在 $3550 \sim 3050 \text{ cm}^{-1}$ 处的振动强度。

2.2 解结晶对酶吸附率的影响

Wyk^[12] 研究发现,60 °C 时酶吸附量远大于其它温度的,而酶活却最小,原因就是温度过高会使酶蛋白失活。本课题组前期实验中发现酶吸附温度在 50 °C 左右时,酶水解就不可避免,为真实反映活性酶蛋白的吸附状况,本研究将吸附温度设置在比较低的 5~40 °C 范围,分别为 5、20 和 35 °C。图 5 为 MCC 和 D-MCC 在不同温度下对纤维素酶的吸附率曲线。

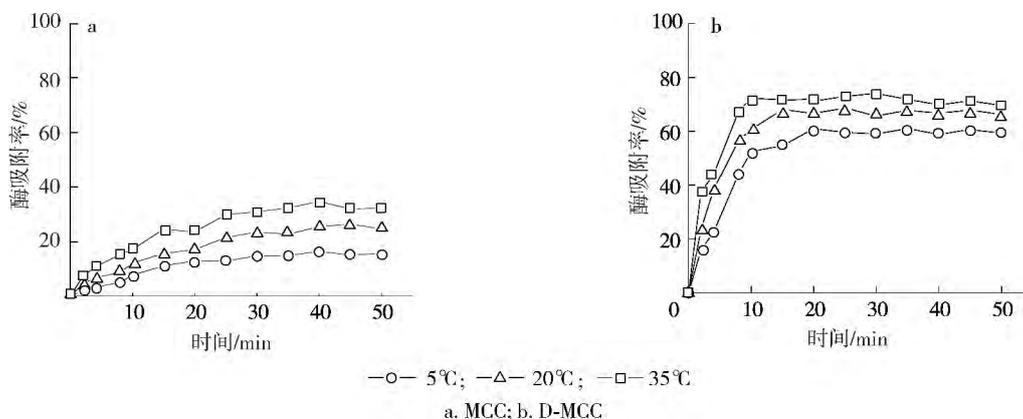


图 5 纤维素酶在不同温度的吸附率曲线

Fig. 5 Absorption rate curves of cellulase at different temperatures

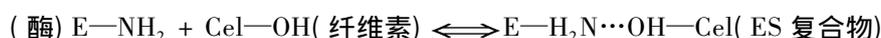
由图 5(a) 可知,随着温度升高,酶在 MCC 上吸附量随之增加,35 °C 时酶吸附率是最大的,说明酶吸附过程需要一定能量以加速酶蛋白分子的运动,并有助于酶蛋白与纤维素大分子之间形成新的某种程度的化学键结合,例如形成 $H_2N \cdots HO-C$ 氢键。在 5、20 和 35 °C 时酶的吸附率曲线均呈现在开始阶

段快速上升,之后增幅趋缓,然后逐渐接近一个吸附平衡的状态。平衡状态时,纤维素酶在高结晶度的 MCC 上的吸附率都不大,35 °C 时也只有 30% 左右。

图 5(b) 中,质量浓度 0.750 g/L 的纤维素酶液在 3 种温度下,D-MCC 在吸附的前 10 min 吸附量快速增加,在 10 min 左右就达到平衡状态。对比图 5(a) 和 (b) 发现,D-MCC 达到平衡状态的时间远远低于 MCC(40 min)。MCC 在不同温度下,吸附率差异较大,而 D-MCC 的差距则不大,5 °C 时的最大吸附率为 60%,20 °C 时为 66%,35 °C 时为 72%,说明通过解结晶可显著降低吸附底物的刚性的结晶结构,可大大提高底物对酶的吸附率,而且其对提高酶吸附率的贡献超过了温度对酶吸附的促进作用。3 种温度下达到吸附平衡时,5 °C 时 D-MCC 的酶吸附率是 MCC 的 4.62 倍,20 °C 时是 3 倍,35 °C 时是 2.4 倍。解结晶后纤维素结构松散,葡萄糖环上的羟基随机裸露,有利于蛋白酶与其形成 OH...NH₂ 键,酶的吸附率有较大提高,因此,解结晶可以通过促进酶吸附率,提高酶后续作用于纤维素链 β-糖苷键的效率,从而大大提高还原糖的得率,进而促进生物化工的下游产业,如发酵制备生物乙醇或者制备糠醛、乙酰丙酸等高附加值产品^[13-14]。这与陈洪章等^[15]研究发现纤维素对纤维素酶的可及性是决定水解起始速率的关键因素是一致的。

2.3 酶吸附动力学

假设酶蛋白与纤维素的吸附作用力主要是酶蛋白分子上的氨基(-NH₂)与纤维素分子链上的羟基(-OH)之间形成的氢键(H₂N...OH)力;由于该氢键(H₂N...OH)的键能较低(平均约 29 kJ/mol),新形成的键并不稳定,处于结合与断裂的动态平衡状态,这也就是酶的吸附与解吸附的动态过程。因此,酶蛋白吸附于纤维素的动力学过程可以描述为:



当底物纤维素浓度远远大于体系中酶液浓度时,酶吸附过程可以假设为自由态酶与吸附态酶的相互转化过程,吸附态酶的量就是初始酶量与吸附平衡后自由态酶量的差值。因此,酶与纤维素的吸附过程可以看作是准一级反应,其动力学方程为:

$$\ln(1 - q_t/q_e) = -K_a \cdot t \quad (4)$$

式中: q_t — t 时间时的吸附量; q_e —平衡吸附量。

q_t/q_e 为酶吸附率,将式(2)代入公式(4),可得:

$$\ln(1 - \eta_a) = -K_a \cdot t \quad (5)$$

$$\ln(1/(1 - \eta_a)) = K_a \cdot t \quad (6)$$

将纤维素酶在 35 °C 时对 MCC 和 D-MCC 的吸附率与时间的关系分别按照公式(6)作图,得到图 6,拟合曲线的斜率即为 K_a 。在 35 °C 时 MCC 和 D-MCC 的 K_a 分别为 0.012 0 和 0.023 9 min⁻¹。

D-MCC 的 K_a 大于 MCC,说明解结晶后随着结晶纤维素转化为无定形纤维素的量的增加,MCC 原有的致密结构被破坏,以无定形纤维素为主要成分的 D-MCC 结构松弛,纤维素长分子链大多处于随机排列状态,弯曲折叠,大大提高了整个纤维素的表面积,增加了纤维素酶蛋白分子与之接触、吸附的机会,促进了酶与底物的充分接触。

图 7 是 MCC 和 D-MCC 在 35 °C 时,对酶吸附率的实验值与理论计算值的对比。由图 7(a) 可看出, MCC 的实验值与理论计算值吻合较好,相关系数为 0.975 5,说明酶对高结晶度的 MCC 的吸附过程是准一级的动力学过程,而由图 7(b) 可看出 D-MCC 的实验值与理论计算值吻合度一般($r = 0.852 3$)。说明解结晶后 D-MCC 与 MCC 结构有较大差异,低结晶度的 D-MCC 表面原有的光滑的刚性晶体结构被相对粗糙的柔性结构取代,酶蛋白可以通过静电吸附作用吸附在

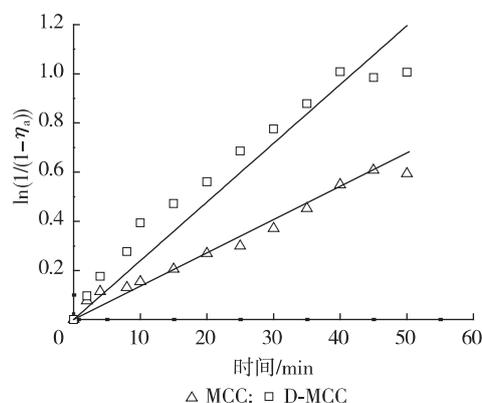


图 6 纤维素对酶吸附的数学模型(35 °C)
Fig.6 Absorption rate mathematical modeling of absorbed enzyme on cellulose(35 °C)

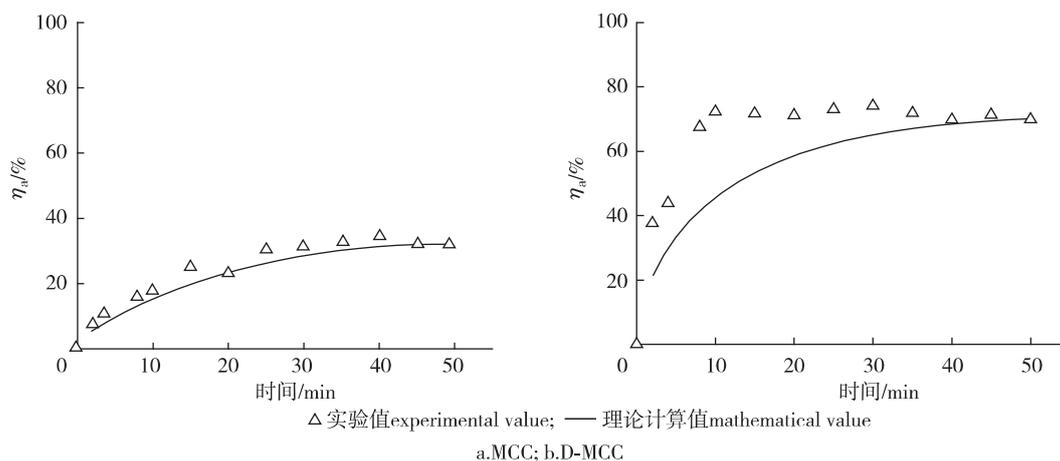


图7 纤维素酶吸附率的实验与理论计算曲线(35 °C)

fig.7 Experimental and mathematical absorption rate curves of enzyme absorbed on cellulose(35 °C)

其表面,而不一定通过形成新的氢键来吸附;另一方面 D-MCC 在溶液中有一定溶解性,吸附过程中底物浓度不恒定,有一定波动。因此,相对柔性的 D-MCC 与刚性的 MCC 的酶吸附过程不完全一致, D-MCC 的酶吸附过程不完全满足推导吸附动力学方程的假设条件。

3 结论

3.1 酶吸附平衡后的微晶纤维素(MCC)的 XPS 宽扫描图谱中出现少量氮元素(399.06 eV), XPS-O1s 大峰拟合后多了一个结合能较低的小峰,结合能为 530.53 eV; 3050~3550 cm^{-1} 范围的红外吸收强度,随着酶吸附时间小幅度降低。说明纤维素酶通过酶蛋白的氨基($-\text{NH}_2$)与纤维素分子链上的羟基($-\text{OH}$)之间以氢键($\text{C}-\text{OH}\cdots\text{NH}_2$)力吸附在 MCC 上。

3.2 相同条件下得到的 MCC 和解结晶微晶纤维素(D-MCC)吸附率曲线的差异表明,底物结构的改善比提高温度更能提高酶吸附率。

3.3 比较 MCC 和 D-MCC 对纤维素酶在 35 °C 下的吸附动力学,表明通过降低底物的结晶度可促进酶吸附;刚性结构的 MCC 更满足一级动力学的假设, D-MCC 表面结构相对松散,其吸附过程需进一步分析,以得到更适合的动力学方程。

参考文献:

- [1] THOMPSON D N, CHEN H C, GRETHLEIN H E. Comparison of pretreatment methods on the basis of available surface area [J]. *Bioresource Technology*, 1992, 39(2): 155-163.
- [2] NISHIYAMA Y, SUGIYAMA J, CHANZY H, et al. Crystal structure and hydrogen bonding system in cellulose I_α from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(47): 14300-14306.
- [3] NISHIYAMA Y, LANGAN P, CHANZY H. Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose I_β from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124(31): 9074-9082.
- [4] 张瑞萍. 纤维素酶的滤纸酶活和 CMC 酶活的测定 [J]. *印染助剂*, 2002, 19(5): 51-53.
ZHANG Rui-ping. Determination of filter paper enzyme activity and cmc enzyme activity of cellulase [J]. *Textile Auxiliaries*, 2002, 19(5): 51-53.
- [5] MORJANOFF P J, GRAY P P. Optimization of steam explosion as a method for increasing susceptibility of sugarcane bagasse to enzymatic saccharification [J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 1987, 29(6): 733-741.
- [6] DORRIS G M, GRAY D G. The surface analysis of paper and wood fibers by ESCA. 1. Application to cellulose and lignin [J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1978(12): 9-23.
- [7] DORRIS G M, GRAY D G. The surface analysis of paper and wood fibers by ESCA: 2. Surface composition of mechanical pulps [J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1978(12): 721-734.
- [8] AHMED A, ADNOT A, GRANDMAISON J L, et al. ESCA analysis of cellulosic materials [J]. *Cellulose Chem Technol*, 1987, 21(5): 483-492.
- [9] AHMED A, ADNOT A, KALIAGUINE S. ESCA study of the solid residues of supercritical extraction of *Populus tremuloides* in methanol [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1987, 34(1): 359-375.

- [10] STIPANOVIC A J, SARKO A. Packing analysis of carbohydrates and polysaccharides: 6. Molecular and crystal structure of regenerated cellulose II [J]. *Macromolecules*, 1976, 9(5): 851-857.
- [11] OH S Y, YOO D I, SHIN Y et al. FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide [J]. *Carbohydrate Research*, 2005, 340(3): 417-428.
- [12] WYK J P H V. Cellulase adsorption-desorption and cellulose saccharification during enzymatic hydrolysis of cellulose materials [J]. *Biotechnology Letters*, 1997, 19(8): 775-778.
- [13] 张继泉, 王瑞明, 孙玉英. 利用木质纤维素生产燃料乙醇的研究进展[J]. *酿酒科技* 2003(1): 39-41.
ZHANG Ji-quan, WANG Rui-ming, SUN Yu-ying. Research on the production of fuel alcohol by lignocellulose [J]. *Liquor-Making Science & Technology* 2003(1): 39-42.
- [14] 薛金爱, 毛雪, 李润植. 生物技术与植物纤维性废弃资源的综合利用[J]. *自然资源学报* 2005 20(6): 938-944.
XUE Jin-ai, MAO Xue, LI Run-zhi. Biotechnology and comprehensive utilizations of plant-fiber waste resources [J]. *Journal of Natural Resources* 2005 20(6): 938-944.
- [15] 陈洪章, 李佐虎. 影响纤维素酶解的因素和纤维素酶被吸附性能的研究[J]. *化学反应工程与工艺* 2000 16(1): 30-35 71.
CHEN Hong-zhang, LI Zuo-hu. Factors of enzymatic hydrolysis for cellulose and adsorption of cellulase [J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology* 2000 16(1): 30-35 71.

大型精密仪器

准确分析结果

中国林业科学研究院林产化学工业研究所仪器分析中心

中国林业科学研究院林产化学工业研究所仪器分析中心是江苏省大型仪器协作共用及维修网成员单位。以开展分析测试服务、分析测试技术与方法研究为主要任务。提供无机化合物分析、有机化合物的定性和结构分析、有机化合物组成定量分析、固体粉末或乳液中颗粒的粒度分布测定、微孔物质的比表面积和孔隙度测定等分析测试服务, 承接所内外的样品测试任务。

美国 Agilent 公司 7890A/5975C 气质联用仪
美国 Agilent 公司 LC/MSD Trap SL 液质联用仪
美国 PE 公司 OPTIMA 7000DV 电感耦合等离子体发射光谱仪
美国 PE 公司 ATD350 自动热脱附仪
美国 PE 公司 Diamond DSC 差示扫描量热仪
美国 PE 公司 PE-2400 元素分析仪
美国 Waters 公司 1515 凝胶色谱仪
美国麦克仪器公司 ASAP 2020M 自动比表面积及物理吸附分析仪
美国 TA 公司 Q800 动态热机械分析仪
美国赛默飞世尔公司 MARS 旋转流变仪
美国赛默飞世尔公司 iS10 红外光谱仪
美国赛默飞世尔公司 Delta V advantage 同位素质谱仪

日本 Shimadzu 公司 LC-20A 液相色谱仪
日本日立公司 S3400N-I 型扫描电子显微镜
日本岛津公司 LCMS-IT-TOF 电喷雾-离子阱-飞行时间质谱仪
日本岛津公司 SPM-9600 原子力显微镜
德国耐驰公司 QMS403 热质联用仪
德国耐驰公司 ARC244 绝热加速量热仪
德国 Kruss 公司 DSA100 接触角测量仪
德国布鲁克公司 D8 X 射线粉末多晶衍射仪
英国 FTT 公司 FTT2000 锥形量热仪
英国马尔文公司 Nano ZS 纳米粒度、Zeta 电位和绝对分子量分析仪
英国马尔文公司 Mastersizer 2000 激光粒度仪

法定检验机构 第三方公正评价

国家林业局林化产品质量检验检测中心(南京)

该中心是国家林业局授权的法定检测机构, 具有第三方公正地位, 挂靠中国林业科学研究院林产化学工业研究所。是国内唯一一家通过国家计量认证的林化产品专业检测机构。可对下列产品进行质量监督和产品质量检验:

脂松香及再加工产品
松节油及再加工产品
栲胶原料、栲胶产品
活性炭产品

单宁酸原料、工业单宁酸、工业没食子酸、络合剂等
纤维原料、纸浆和纸产品
其他归口的林化产品

欢迎来人来函联系产品分析和产品质量检验

联系电话: 025-85482448 85482449
传 真: 025-85482448

联系地址: 南京市锁金五村 16 号 林化所内
联系人: 谭卫红