

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.019

小麦秸秆半纤维素丙酸法预处理降解动力学^{*}

田 龙^{1,2} 马晓建¹

(1. 郑州大学化工与能源学院, 郑州 450001; 2. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 南阳 473061)

【摘要】 研究了小麦秸秆丙酸法预处理过程中半纤维素的降解动力学。结果表明,半纤维素降解过程可分为0~60 min的快速降解和60~180 min的缓慢降解2个阶段。通过建立反应动力学方程,获得了小麦秸秆丙酸法预处理的化学反应速率常数和反应级数。当温度为60、70、80和90℃时,速率常数分别为 1.98×10^{-4} 、 1.67×10^{-3} 、 1.79×10^{-2} 和 4.42×10^{-2} ,反应级数分别为1.99、1.40、0.61和0.46。在一定温度和时间条件范围内的动力学研究表明,小麦秸秆的丙酸法预处理的平均反应活化能为180.16 kJ/mol,频率因子为 5.27×10^{24} L/(mol·min)。

关键词: 秸秆 半纤维素 丙酸法 降解动力学

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0105-05

Degradation Kinetics of Hemicellulose of Wheat Straw Pretreated by Propionic Acid

Tian Long^{1,2} Ma Xiaojian¹

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2. School of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract

Degradation kinetics of hemicellulose of wheat straw pretreated by propionic acid was studied. The results showed that two distinct phases occurred during the degradation process of hemicellulose of wheat straw, the fast degradation stage from the beginning to 60 min and the mild degradation stage from 60 min to 180 min. The rate constant and the order of reaction were determined through the establishment of kinetic equation. Under the temperature of 60℃, 70℃, 80℃ and 90℃, the rate constants were 1.98×10^{-4} , 1.67×10^{-3} , 1.79×10^{-2} and 4.42×10^{-2} , respectively. At the same time, the order of reactions were 1.99, 1.40, 0.61, 0.46, respectively. The experiment was carried out in a certain range of temperature and time, the average active energy was 180.16 kJ/mol, and the frequency constant was 5.27×10^{24} L/(mol·min).

Key words Straw, Hemicellulose, Propionic acid, Degradation kinetics

引言

木质纤维素制备燃料乙醇是开发生物质能的重要途径^[1~2]。将数量巨大的纤维素废弃物转化为能源和其他产品,可推动农业生产的良性循环,具有极大的发展前景^[3~8]。

截止目前,木质纤维素制备燃料乙醇的预处理

技术尚未取得突破性进展,使得纤维素乙醇迟迟不能进入产业化。

近年研究表明,利用有机溶剂预处理木质纤维素具有显著的优势,不仅能避免稀酸、稀碱等传统预处理方法的污染问题,同时可以有效地分离副产品,获得半纤维素的降解物和木质素,为生产生物燃料和其他高附加值的化工产品提供原料。

收稿日期: 2011-05-10 修回日期: 2011-08-03

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD66B04)

作者简介: 田龙, 博士生, 南阳师范学院讲师, 主要从事生物质能源研究, E-mail: 858687144@163.com

通讯作者: 马晓建, 教授, 博士生导师, 主要从事生物设备研究, E-mail: maxj@zzu.edu.cn

目前,有机溶剂预处理中研究较多的是有机醇法和有机酸法制浆,尤其是甲酸法的研究较多,而丙酸法的研究较少^[9-10]。

前期实验表明,小麦秸秆采用丙酸法预处理,可在较温和的条件下以闭循环方式将秸秆降解为纤维素、半纤维素和木质素,不仅可以去除半纤维素和木质素对纤维素的束缚,提高纤维素酶的可及性,更有利于对小麦秸秆的3大组分分别加以利用,即实现生物精炼的目标。

半纤维素是小麦秸秆的3大组分之一,约占秸秆质量的25%~30%,如果能在制备生物乙醇的预处理工序中将之分离提取出来,就可通过生物转化生产出乙醇、木糖醇、低聚木糖等化学品或聚合物结构材料等一系列增值产品,不仅可以避免资源浪费,创造巨大的经济效益,更能弥补纤维素乙醇制备阶段的成本过高导致的亏损,促进纤维素乙醇的产业化进程,具有重要的现实意义。

基于此,本文在前期实验的基础上,考察小麦秸秆丙酸法预处理过程中半纤维素的反应历程,建立半纤维素降解反应动力学方程,得到小麦秸秆丙酸法预处理的化学反应速率常数和反应级数,试图揭示小麦秸秆丙酸法预处理的反应规律。

1 材料与方法

1.1 材料

小麦秸秆,取自郑州市郊区,洗净、干燥、粉碎,过40目,备用。经测定,其主要成分的质量分数为:纤维素39.8%、半纤维素28.5%、木质素20.2%。

1.2 小麦秸秆丙酸法预处理工艺

根据前期研究,预处理工艺如下:准确称取5.00 g 秸秆,按料液比1:20、丙酸质量浓度900 g/L、催化剂HCl质量浓度3 g/L,搅拌均匀,分别在60、70、80和90℃的水浴锅中处理180 min,在不同时间下取样、抽滤,得到的粗纤维经洗涤、抽滤、干燥后进行半纤维素质量分数测定。

1.3 分析方法

半纤维素质量分数分析方法,参见文献[11]。

2 结果与讨论

2.1 半纤维素降解反应历程

在90℃温度条件下,小麦秸秆经过丙酸法预处理后,所得到的粗纤维中残留的半纤维素的质量分数变化见图1。

从图1可知,90℃时,预处理初期半纤维素的降解速度较快,而在预处理后期其变化逐渐减小,直至达到平衡。为准确描述半纤维素的溶出历程,对图1

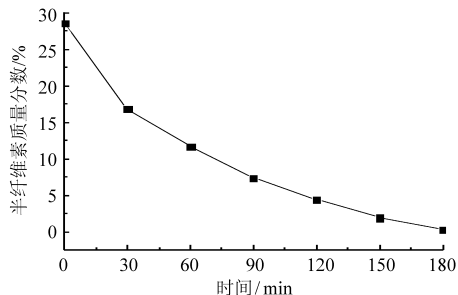


图1 半纤维素质量分数随时间的变化

Fig. 1 Hemicellulose content at different time

中的曲线进行微分后可得到半纤维素质量分数的变化速率与时间的关系曲线,如图2所示。

由图2可知,丙酸法预处理过程中半纤维素的降解反应历程可分为2个阶段:第1阶段为半纤维素快速降解阶段,在0~60 min的时间内半纤维素的溶出率为59.3%。这说明丙酸较容易渗透到小麦秸秆等原料的内部,渗透过程同时伴随着半纤维素的溶出,又为丙酸进入细胞壁与半纤维素反应以及反应产物从细胞壁中扩散出来打开了通道,使半纤维素大量溶出。第2阶段为半纤维素缓慢降解阶段,在60~180 min共120 min的时间内半纤维素溶出量为总溶出量的40%。说明此阶段溶出的半纤维素结构和性能与前一阶段有所不同,这部分的半纤维素反应活性较低,其结构单元之间以及与木质素之间的连接比较牢固,结构比较稳定,分子量较高,使得半纤维素水解难度加大。

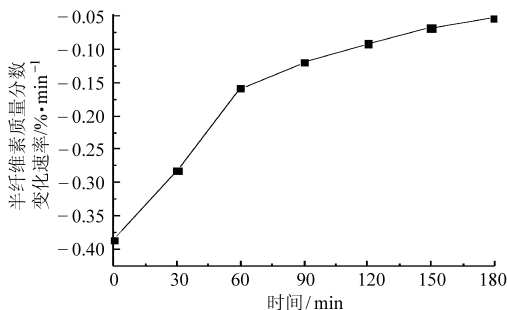


图2 半纤维素质量分数变化速率与时间的关系

Fig. 2 Hemicellulose content rate at different time

2.2 半纤维素降解动力学

作物秸秆半纤维素主要是聚阿拉伯糖4-O-甲基葡萄糖醛酸木糖,影响其降解的因素有介质、料液比、温度和时间,而主要因素是反应物浓度和反应温度。为简化研究,将料液比固定为1:20,在此情况下,反应体系的浓度可视为恒定。

丙酸法预处理过程中半纤维素降解反应的动力学方程可表示为

$$-dL/dt = K'L^n C^m \quad (1)$$

式中 C ——丙酸质量分数, %

L ——粗纤维中半纤维素的质量分数, %

t ——反应时间, min
 K ——反应速率常数
 n ——反应级数
 m ——反应分级数

式(1)中 dL/dt 为半纤维素降解速率, 料液比 1:20 条件下, 式(1)简化为

$$-dL/dt = K'L^n \tag{2}$$

对式(2)两边取对数得到

$$\ln(-dL/dt) = \ln K + n\ln L \tag{3}$$

将式(3)写成分差的形式

$$\ln(-\Delta L/\Delta t) = \ln K + n\ln L \tag{4}$$

对一定温度不同反应时间所得的的粗纤维中半纤维素的含量进行线性回归, 并且根据各温度下 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ 与 $\ln L_{av}$ 关系作图的直线截距和斜率, L_{av} 为一定时间段内半纤维素质量分数平均值, 即可分别求得各温度下半纤维素降解过程的反应速率常数和反应级数。

2.2.1 60℃时半纤维素降解反应速率方程

表 1 是在 60℃ 的温度下, 不同预处理时间得到的粗纤维中半纤维素质量分数。

表 1 60℃时不同反应时间粗纤维中半纤维素的质量分数
Tab.1 Hemicellulose remained in crude fiber under different reaction time at 60℃

反应时间 t/min	起/止时刻残余半纤维素 质量分数 $L/\%$	半纤维素质量分数 平均值 $L_{av}/\%$	$\ln L_{av}$	$\ln(-\Delta L/\Delta t)$
30 ~ 60	23.8/20.2	22.0	3.09	-2.12
60 ~ 90	20.2/17.4	18.8	2.93	-2.37
90 ~ 120	17.4/15.4	16.4	2.80	-2.71
120 ~ 150	15.4/13.6	14.5	2.67	-2.81
150 ~ 180	13.6/12.4	13.0	2.56	-3.22

对表 1 中数据进行拟合, 以 y 代表 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$, x 代表 $\ln L_{av}$, 拟合模型 $y = a + bx$, 线性回归模型拟合结果如图 3 所示。

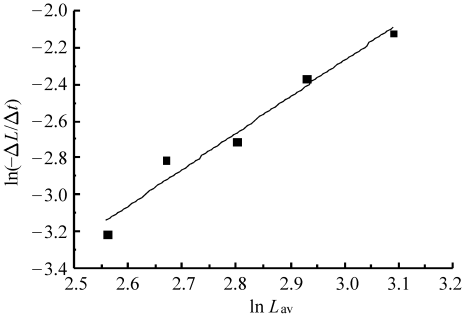


图 3 60℃时 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ 与 $\ln L_{av}$ 的关系
Fig.3 Relationship between $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ and $\ln L_{av}$ at 60℃

由此可知, 60℃ 时的半纤维素降解反应速率方程: $\ln(-\Delta L/\Delta t) = 1.99\ln L_{av} - 8.23$, 决定系数 R^2 为 0.9674, 说明回归方程极显著。因此, 得到 60℃ 时小麦秸秆丙酸法预处理的半纤维素降解反应速率方程为

$$-dL/dt = 1.98 \times 10^{-4} L^{1.99}$$

2.2.2 70℃时半纤维素降解反应速率方程

表 2 是 70℃ 时不同预处理时间得到的粗纤维中半纤维素的质量分数。

对表 2 中数据进行拟合, 以 y 代表 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$, x 代表 $\ln L_{av}$, 拟合模型 $y = a + bx$, 线性回归模型拟合结果见图 4。

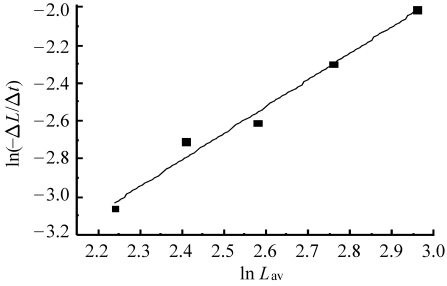


图 4 70℃时 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ 与 $\ln L_{av}$ 的关系
Fig.4 Relationship between $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ and $\ln L_{av}$ at 70℃

由此可知, 70℃ 时的半纤维素降解反应速率方程: $\ln(-\Delta L/\Delta t) = 1.40\ln L_{av} - 6.17$, 决定系数 R^2 为 0.9831, 说明回归方程极显著。因此, 得到 70℃ 时

表 2 70℃时不同反应时间粗纤维中半纤维素的质量分数
Tab.2 Hemicellulose remained in crude fiber under different reaction time at 70℃

反应时间 t/min	起/止时刻残余半纤维素 质量分数 $L/\%$	半纤维素质量分数 平均值 $L_{av}/\%$	$\ln L_{av}$	$\ln(-\Delta L/\Delta t)$
30 ~ 60	21.3/17.3	19.3	2.96	-2.01
60 ~ 90	17.3/14.3	15.8	2.76	-2.30
90 ~ 120	14.3/12.1	13.2	2.58	-2.61
120 ~ 150	12.1/10.1	11.1	2.41	-2.71
150 ~ 180	10.1/8.7	9.4	2.24	-3.06

小麦秸秆丙酸法制浆的半纤维素降解反应速率方程为

$$-dL/dt = 1.67 \times 10^{-3} L^{1.40}$$

2.2.3 80℃时半纤维素降解反应速率方程

表3是在80℃的温度下,不同预处理时间得到

的粗纤维中半纤维素质量分数。

对表3中数据进行拟合,以 y 代表 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$, x 代表 $\ln L_{av}$,拟合模型 $y = a + bx$,线性回归模型拟合结果见图5。

表 3 80℃时不同反应时间粗纤维中半纤维素的质量分数

Tab.3 Hemicellulose remained in crude fiber under different reaction time at 80℃

反应时间 t/min	起/止时刻残余半纤维素	半纤维素质量分数	$\ln L_{av}$	$\ln(-\Delta L/\Delta t)$
	质量分数 $L/\%$	平均值 $L_{av}/\%$		
30 ~ 60	18.6/14.4	25.8	3.25	-1.97
60 ~ 90	14.4/11.2	12.8	2.55	-2.23
90 ~ 120	11.2/8.6	9.9	2.29	-2.45
120 ~ 150	8.6/6.4	7.5	2.01	-2.61
150 ~ 180	6.4/4.8	5.6	1.72	-2.93

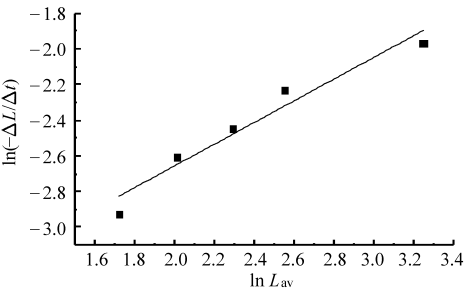


图 5 80℃时 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ 与 $\ln L_{av}$ 的关系

Fig.5 Relationship between $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ and $\ln L_{av}$ at 80℃

由此可知,80℃时半纤维素降解反应速率方程回归方程为: $\ln(-\Delta L/\Delta t) = 0.61\ln L_{av} - 3.88$,决定系数 R^2 为0.9494,说明回归方程极显著。因此,得到80℃时小麦秸秆丙酸法制浆的半纤维素降解反应速率方程为

$$-dL/dt = 1.79 \times 10^{-2} L^{0.61}$$

2.2.4 90℃的半纤维素降解反应速率方程

表4是在90℃的处理温度下,不同预处理时间得到的粗纤维中半纤维素含量。

表 4 90℃时不同反应时间粗纤维中半纤维素的质量分数

Tab.4 Hemicellulose remained in crude fiber under different reaction time at 90℃

反应时间 t/min	起/止时刻残余半纤维素	半纤维素质量分数	$\ln L_{av}$	$\ln(-\Delta L/\Delta t)$
	质量分数 $L/\%$	平均值 $L_{av}/\%$		
30 ~ 60	16.9/11.6	14.25	2.660	-1.73
60 ~ 90	11.6/7.4	9.50	2.250	-1.97
90 ~ 120	7.4/4.4	5.90	1.770	-2.30
120 ~ 150	4.4/1.9	3.15	1.150	-2.48
150 ~ 180	1.9/0.3	1.10	0.095	-2.93

对表4中数据进行拟合,以 y 代表 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$, x 代表 $\ln L_{av}$,拟合模型 $y = a + bx$,线性回归模型拟合结果见图6。

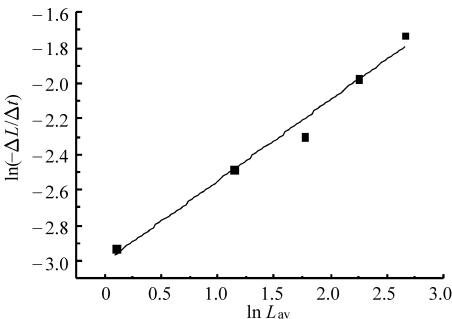


图 6 90℃时 $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ 与 $\ln L_{av}$ 的关系

Fig.6 Relationship between $\ln(-\Delta L/\Delta t)$ and $\ln L_{av}$ at 90℃

由此可知,90℃时的半纤维素降解反应速率方程: $\ln(-\Delta L/\Delta t) = 0.46\ln L_{av} - 3.01$,决定系数 R^2 为0.9822,说明回归方程极显著。因此,得到90℃时

小麦秸秆丙酸法预处理过程中的半纤维素降解反应速率方程

$$-dL/dt = 4.42 \times 10^{-2} L^{0.46}$$

半纤维素水解时,同时进行以下过程:水溶性组分的溶出;不溶解多糖复相水解成溶解的低聚糖;低聚糖的溶解;低聚糖在均相条件下水解成为单糖。

2.3 半纤维素降解反应活化能测定

根据 Arrhenius 方程

$$K = k_0 e^{-E_a/(RT)} \tag{5}$$

式中 k_0 ——频率因子, $L/(\text{mol} \cdot \text{min})$

E_a ——反应活化能, J/mol

R ——气体常数,取 8.314 J/mol

T ——绝对温度, K

对式(5)两边取对数,可得

$$\ln K = \ln k_0 - E_a/(8.314T) \tag{6}$$

根据式(6)可知, $\ln K$ 与 $1/T$ 呈线性关系。

将 60、70、80 和 90℃ 时半纤维素降解反应速率常数汇总后,列于表 5。

表 5 不同温度下的反应速率常数
Tab.5 Reaction rate constants at different temperature

参数	温度/℃			
	60	70	80	90
T^{-1}/K^{-1}	3.00×10^{-3}	2.91×10^{-3}	2.83×10^{-3}	2.75×10^{-3}
$\ln K$	-8.23	-6.17	-3.88	-3.01
$k_0/\text{L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{min})^{-1}$	1.98×10^{-4}	1.67×10^{-3}	1.79×10^{-2}	4.42×10^{-2}

对表 5 中的数据进行作图和分析,以 y 代表 $\ln K$, x 代表 $1/T$,拟和模型 $y = a + bx$,线性回归模型拟合结果如图 7 所示。

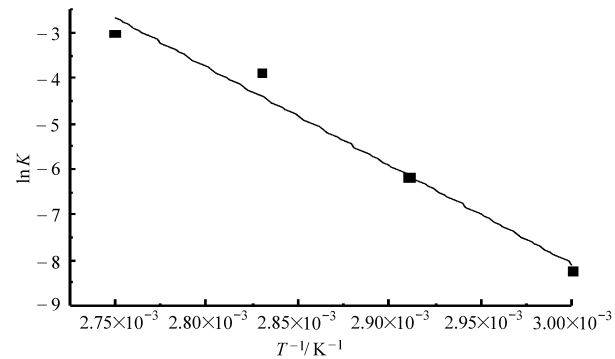


图 7 $\ln K$ 与 $1/T$ 的关系

Fig.7 Relationship between $\ln K$ and $1/T$

可以看出,线性回归方程为

$$y = -21.67x + 56.925$$

相关系数 R^2 为 0.975 2,说明回归方程是极显著的。

根据式 (6) 可得 $\ln k_0 = 56.925, E_a/8.314 = 21.67$,由此可知, $k_0 = 5.27 \times 10^{24} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{min})$ 。

因此, $E_a = 180.16 \text{ kJ/mol}$ 。

3 结束语

前期实验表明,小麦秸秆丙酸法预处理过程中,纤维素的质量分数基本不变,发生的反应主要是半

纤维素的降解和木质素的脱除,这是因为半纤维素以木糖为主,其以 β -1,4 糖苷键连接构成,分支度高,聚合度低,结晶结构很少,酸催化半纤维素水解容易实现。丙酸降解半纤维素时,酸在水中解离生成的氢离子与水分子结合后生成水合氢离子,同时水溶性组分溶出, H_3O^+ 侵入纤维矩阵结构,使大部分半纤维素溶解于酸溶液中,并将半纤维素大分子中糖苷键的氧原子迅速质子化,形成共轭酸,使苷键键能减弱而断裂,从而使难溶解多糖复相水解成易溶解的低聚糖,不同聚合度的低聚糖进一步溶解并在均相条件下水解成单糖,整个过程是半纤维素的连续解聚过程。

本文研究表明,小麦秸秆丙酸法预处理的过程中,半纤维素降解反应在动力学上表现出 2 个阶段,即半纤维素大量溶出阶段和半纤维素残余溶出阶段。在料液比为 1:20 的条件下,对一定温度、不同反应时间所得到的粗纤维中半纤维素的质量分数进行分析,发现半纤维素降解反应速率和残余半纤维素质量分数之间有显著的相关性。通过建立反应动力学方程,获得了化学反应速率常数以及反应级数。小麦秸秆的丙酸法预处理的反应活化能为 $E_a = 180.16 \text{ kJ/mol}$, $k_0 = 5.27 \times 10^{24} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{min})$,在 60~90℃ 的温度范围内半纤维素降解的反应级数为 0.46~1.99。

参 考 文 献

1 Galbe M,Zacchi G. A review of the production of ethanol from softwood[J]. Appl. Microbiol. Biotechnol. ,2002,59(6):618~628.

2 管小冬.农作物秸秆资源利用浅析[J]. 农业工程学报,2006,22(1):104~106.

3 Wyman C E. Biomass ethanol:technical progress,opportunities,and commercial challenges[J]. Biomass Annu. Rev. Energy Environ. ,1999,24(1):189~226.

4 Yang B,Wyman C E. Effect of xylan and lignin removal by batch and flow through pretreatment on the enzymatic digestibility of corn stover cellulose[J]. Biotechnol. Bioeng. ,2004,86(6):88~95.

5 Herrera S. Bonkers about biofuels[J]. Nature Biotechnology,2006,24(7):755~760.

6 赵华,康忆隆,刘文宇,等.利用丙酸处理玉米秸秆生产燃料酒精的研究[J].酿酒科技,2006,142(4):34~37.

7 张利,张清东,刘世贵,等.利用丙酸降解小麦秸秆的研究[J].四川大学学报:自然科学版,2001,38(3):430~433.

8 杨培周,姜绍通,潘丽军,等.玉米芯糖化微波与酸/碱联合预处理效果实验分析[J].农业机械学报,2010,41(7):101~104.

Yang Peizhou, Jiang Shaotong, Pan Lijun, et al. Experiment analysis on pretreatment of corn cob saccharification by acid and alkali coordination with microwave[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):101~104. (in Chinese)

参 考 文 献

1 农业工程技术编辑部. 马铃薯的种类及特性阐述[J]. 农业工程技术·农产品加工业, 2009(11): 22 ~ 24.

2 沈群. 薯类加工技术[M]. 北京: 中国轻工出版社, 2008.

3 赵明, 刘凡. 马铃薯多酚氧化酶的抑制研究[J]. 北京农业, 2011(9): 15 ~ 16.

4 王琼波, 陈琦, 冯金丹. 嘎拉苹果多酚氧化酶性质及其抑制方法研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(6): 118 ~ 121.
Wang Qiongbo, Chen Qi, Feng Jindan. Study on properties and inhibition methods of polyphenol oxidase from gala apple[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(6): 118 ~ 121. (in Chinese)

5 徐苇. 红外技术在食品工业中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2005(1): 86 ~ 89.
Xu Wei. The application of infrared technology on food industry[J]. China Food Additives, 2005(1): 86 ~ 89. (in Chinese)

6 林亚玲, 李树君, 潘忠礼. 苹果片红外加热同步灭酶脱水试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 70 ~ 73.
Lin Yaling, Li Shujun, Pan Zhongli. Experimental investigation on simultaneous dry-blanching and dehydration of apple slice under infrared heating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 70 ~ 73. (in Chinese)

7 Pan Z, Mchugh T H. Novel infrared dry-blanching (IDB), infrared blanching, and infrared drying technologies for food processing[J]. U. S. Patent Application, 2004(10): 917, 797.

8 李云飞, 葛克山. 食品工程原理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 115 ~ 117.

9 刘程惠, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 不同贮藏温度下鲜切马铃薯的生理生化变化[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 38 ~ 42.
Liu Chenghui, Hu Wenzhong, Jiang Aili, et al. Physio-biochemical changes of fresh-cut potato at different storage temperatures[J]. Food and Machinery, 2008, 24(2): 38 ~ 42. (in Chinese)

10 黄建韶, 张洪, 田洪现. 苹果中多酚氧化酶的性质[J]. 食品与机械, 2001(3): 21 ~ 22.
Huang Jianshao, Zhang Hong, Tian Hongxian. Characteristic of polyphenoloxidase in apple[J]. Food and Machinery, 2001(3): 21 ~ 22. (in Chinese)

11 尚远, 卢立新, 许文才. 橙汁饮料中维生素 C 的无氧分解动力学[J]. 食品工业科技, 2008(3): 120 ~ 122.
Shang Yuan, Lu Lixin, Xu Wencai. Anaerobic decomposition kinetics of vitamin C in orange juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(3): 120 ~ 122. (in Chinese)

12 张秉森. 基于非线性拟合的织物染色计算机配色研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2008.
Zhang Bingsen. Misalignment fitting-based fabric dyeing computer matches colors the research[D]. Qingdao: Qingdao University, 2008. (in Chinese)

13 徐林, 王金鹏, 邓力, 等. 热敏电阻法测量胡萝卜及马铃薯的热物性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 237 ~ 241.
Xu Lin, Wang Jinpeng, Deng Li, et al. Thermistor for measuring thermophysical properties of carrot and potato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 237 ~ 241. (in Chinese)

14 Bomben J L. Effluent generation, energy use, and cost of blanching[J]. Journal of Food Process Engineering, 1977, 1(4): 329 ~ 341.

(上接第 109 页)

9 杨培周, 姜绍通, 郑志, 等. 碱性氧化物预处理玉米秸秆维管柱、皮层和表皮研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 137 ~ 140.
Yang Peizhou, Jiang Shaotong, Zheng Zhi, et al. Pretreatment of micro-column, cortex and epidermis of corn stover by alkali oxide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 137 ~ 140. (in Chinese)

10 宋孝周, 吴清林, 傅峰, 等. 农作物与其剩余物制备纳米纤维素研究进展[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 106 ~ 112.
Song Xiaozhou, Wu Qinglin, Fu Feng, et al. Research progress of nanocrystalline cellulose prepared from crops and agricultural residues[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 106 ~ 112. (in Chinese)

11 王万玉. 木质纤维素固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木质素的定量分析程序[J]. 微生物学通报, 1987, 14(2): 81 ~ 84.