

马铃薯渣制备微晶纤维素的工艺研究

何晨雨¹,顾正彪^{1,2,3,*},程力^{1,2,3,*},李兆丰^{1,2,3},洪雁^{1,2,3}

(1.江南大学食品学院,江苏无锡 214122;

2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室,江苏无锡 214122;

3.食品安全与营养协同创新中心,江苏无锡 214122)

摘要:以马铃薯淀粉加工的主要副产物——湿马铃薯渣为原料,研究直接制备微晶纤维素的方法。首先采用氢氧化钠脱除半纤维素,再使用酸性亚氯酸钠法脱除木质素,最后使用稀酸处理来去除残留的淀粉,同时降解纤维素得到微晶纤维素。该工艺针对马铃薯渣的组分特征和物料特性,采用一步酸解法直接制备微晶纤维素,无需预先制备粗纤维素,将前处理除去淀粉和降解纤维素的步骤合并,简化了工艺流程,提高了处理效率和资源利用效率,同时对所得微晶纤维素的品质无明显影响。根据单因素实验以及正交优化实验结果,酸解的最佳实验条件为:盐酸浓度为10%,酸解时间为120min,酸解温度为95℃,料液比为1:2。

关键词:马铃薯渣,微晶纤维素,酸解制备

Preparation of microcrystalline cellulose from potato pulp

HE Chen-yu¹, GU Zheng-biao^{1,2,3}, CHENG Li^{1,2,3,*}, LI Zhao-feng^{1,2,3}, HONG Yan^{1,2,3}

(1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.The State Key Laboratory of Food Science and Technology, Wuxi 214122, China;

3.Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition, Wuxi 214122, China)

Abstract: This paper used potato pulp which was the main by-products during potato starch processing as raw material for preparing microcrystalline cellulose. First, sodium hydroxide was used to remove hemicellulose, then acid sodium chlorite was used to remove lignin, finally dilute hydrochloric acid was used to remove residual starch, and hydrolyze cellulose to microcrystalline cellulose (MCC). Compared with traditional methods, preparation of microcrystalline cellulose by one-step acid hydrolysis could omit the step of preparation of crude fiber and pre-processing to removing starch by acid hydrolysis. By simplify the preparation process of potato pulp MCC, production and utilization efficiency could be enhanced. The optimal condition which was explored through single factors and orthogonal experiments was as follows: hydrochloric acid concentration of 10%, acid hydrolysis time of 120min, acid hydrolysis temperature of 95℃, solid-liquid ratio of 1:2.

Key words: potato pulp; microcrystalline cellulose; acid hydrolysis

中图分类号: TS209

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2015)08-0230-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.08.040

微晶纤维素(Microcrystalline cellulose, MCC)^[1]是纤维素在降解达到平衡聚合度(level-off degree of polymerization, LODP)^[2-3]时形成的具有良好流动性的白色或者近白色的粉末状物质,颗粒的大小一般在20~80 μm, LODP一般在15~375,不溶于水、稀酸、稀碱和大多数有机溶剂^[4]。微晶纤维素因为具有独特的吸水性、比表面积等特性广泛的应用在制药、食品等领域。

目前,制备微晶纤维素原材料国外主要是木材,而我国木材短缺,此法受到了限制。我国现在多以短绒棉为原材料来制备微晶纤维素。但是随着微晶纤

维素应用的更加广泛,必然导致短棉绒生产的微晶纤维素的供不应求,所以开发利用新的纤维素资源来制备微晶纤维素是必然的趋势。目前,甘蔗渣^[5]、胡萝卜渣^[6]、稻秸秆^[7]、大豆皮^[8]等都被应用制备微晶纤维素。马铃薯渣是马铃薯淀粉生产的主要副产物,含水量高(高于80%),产量巨大。其中纤维素的含量在25%~30%,半纤维素含量在10%~15%。薯渣中含量最高的是淀粉(40%左右),但是相较于半纤维素、木质素更易予除去。同时马铃薯渣木质素含量较低(3%左右)。作为制备MCC的纤维原料来源而言,具有一定的优势。目前国内没有马铃薯渣制备微晶纤

收稿日期: 2014-04-11

作者简介: 何晨雨(1989-),男,在读硕士研究生,研究方向:淀粉科学与工程。

* 通讯作者: 程力(1984-),男,硕士,实验师,研究方向:淀粉资源的开发与利用。

基金项目: 广东省专业镇中小微企业服务平台——安全食品精深加工科技创新平台建设(2012B091400030)。

维素的报道,国外的报道也较少,且局限于干马铃薯渣制备微晶纤维素。Alain dufresne等^[9]利用干马铃薯渣制备微晶纤维素并将其添加到淀粉膜中,提高了淀粉膜的机械性能以及持水性。本研究直接采用湿马铃薯渣制备附加值较高的微晶纤维素产品,可以变废为宝,增加企业的经济效益,解决马铃薯渣难于处理带来的环境污染问题。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

湿马铃薯渣 黑龙江北大荒马铃薯产业有限公司;亚氯酸钠、邻二氮菲 上海晶纯试剂有限公司;铜乙二醇溶液 中国制浆造纸研究院;其他试剂 为分析纯。

DKB-501型超级恒温水槽 上海森信实验仪器有限公司;乌氏粘度计0.8mm 中国医药(集团)上海化学试剂公司;IKA型搅拌机 广州仪科实验室技术有限公司;DFT-50型万能粉碎机 温岭市林大机械有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 马铃薯渣主要化学成分测定 淀粉:GB/T 5009.9-2008;纤维素:酸性洗涤法^[10];半纤维素:中性洗涤法^[10]。

1.2.2 与碘液的反应 取少许样品置于培养皿中,在样品中加入两滴碘液观察样品颜色变化,样品变蓝说明样品有淀粉残留。

1.2.3 MCC含量的测定 参考袁毅^[11]测定MCC含量。计算方法为(样品消耗的硫酸亚铁铵(mL)-空白消耗的硫酸亚铁铵(mL)) $\times$ 0.675(g/mL)/样品的质量。

1.2.4 MCC聚合度测定 采用铜乙二醇-乌氏粘度计法^[12]测定MCC聚合度。计算公式为:

$$[\eta]=KD_p^a$$

式中:[η]-特性粘数;K-比例常数;a-与分子形状有关经验常数; D_p -平均聚合度;在25℃时,对于纤维素-铜乙二醇溶液体系,K为1.7g/mL,a为0.8。

1.2.5 淀粉去除工艺的筛选 预处理得到粗纤维素时除去:马铃薯渣 $\rightarrow$ A $\rightarrow$ 碱处理 $\rightarrow$ 离心洗涤 $\rightarrow$ 亚氯酸钠处理 $\rightarrow$ 洗涤过滤 $\rightarrow$ 酸解 $\rightarrow$ 离心洗涤 $\rightarrow$ 干燥粉碎 $\rightarrow$ 微晶纤维素;

降解纤维素时一步法除去:马铃薯渣 $\rightarrow$ 碱处理 $\rightarrow$ 离心洗涤 $\rightarrow$ 亚氯酸钠处理 $\rightarrow$ 洗涤过滤 $\rightarrow$ 酸解B $\rightarrow$ 离心洗涤 $\rightarrow$ 干燥粉碎 $\rightarrow$ 微晶纤维素。

1.2.6 马铃薯渣MCC制备方法 脱半纤维素:马铃薯渣500g用水和NaOH调浆到2000g,NaOH的量分别为2%、4%、6%、8%、10%,在90℃处理2h,离心(4000r/min,10min)洗涤,滤渣备用。

脱木质素^[9]:滤渣加入20g/L的亚氯酸钠溶液,再用乙酸调节pH到4.9,在70℃处理2.5h,洗涤过滤,滤渣备用。

酸解:单因素实验以酸解温度、酸的浓度、酸解

时间以及料液比作为考察因素,以样品与碘液反应、得率、纯度以及DP值为考察指标,评价酸解的效果。其中酸解温度(80、85、90、95、100℃)、酸的浓度(6%、7%、8%、9%、10%)、酸解时间(30、60、90、120、150min)、料液比(1:1、1:2、1:3、1:4、1:5),当考察某一单因素时,其他因素条件取中间值。

1.2.7 正交优化实验 根据单因素实验结果,本实验选取酸的浓度(A)、酸解时间(B)、酸解温度(C)、料液比(D)为对象进行正交优化实验,以聚合度(DP值)为主要考察指标,优化最佳酸解工艺。正交优化实验因素和水平见表1。

表1 正交实验因素与水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experimental

水平	因素			
	A 酸的浓度 (%)	B 酸解时间 (min)	C 酸解温度 (℃)	D 料液比
1	8	60	90	1:2
2	9	90	95	1:3
3	10	120	100	1:4

2 结果与分析

2.1 马铃薯渣主要化学成分分析

马铃薯渣主要化学成分如表2所示。由表2可以看出马铃薯渣中主要成分为淀粉、纤维素、半纤维素等。其中纤维素的含量达到了28.23%,半纤维素含量只有11.87%,木质素含量低(3.22%)。与其他微晶纤维素制备原料相比,马铃薯渣纤维素含量略低,但是其他原料的半纤维素含量较高(约为19%~24%),同时含有较多的难于去除的木质素(约为23%~32%)。马铃薯渣虽然淀粉含量较高,但相比半纤维素、木质素等组分更容易除去。因此,马铃薯渣具有成为制备微晶纤维素原料潜力。

2.2 淀粉去除工艺的选择

传统的制备微晶纤维素工艺首先要得到较纯的粗纤维素产品,然后再用酸解得到微晶纤维素,该过程主要通过除去半纤维素和木质素来实现。马铃薯渣中含有较多的淀粉,淀粉的去除可用酶法和酸法,但是酶法难以彻底去除淀粉,且制备微晶纤维素需要采用酸来降解纤维素,所以淀粉的去除采用酸法。根据传统制备微晶纤维素的方法,淀粉要在制备 α -纤维素前除去,如1.2.5所示的A步骤。本研究综合考虑淀粉除去的难易程度和MCC制备过程中纤维素的降解步骤,考虑将淀粉在酸解纤维素的B步骤同步处理。结果表明,在A步骤采用3%盐酸浓度90℃时处理2h,可以达到较好的淀粉去除效果。在B步骤同步降解纤维素和淀粉时,10%浓度盐酸70℃时处理2h,淀粉无法彻底除去。而处理温度达到90℃时,通过B步

表2 马铃薯渣主要化学成分表

Table 2 Table of main chemical composition of potato pulp

成分	淀粉	纤维素	半纤维素	木质素	其他
含量(%)	45.14 $\pm$ 0.25	28.23 $\pm$ 0.12	11.87 $\pm$ 0.13	3.22 $\pm$ 0.1	11.54 $\pm$ 0.13

骤的同步处理可以有效除去淀粉,其原因是温度高时,分子运动剧烈,降低了纤维素和淀粉结合对酸解的阻碍作用,且升高温度可以降低淀粉酸解的活化能,强化对淀粉结晶区的作用,提高酸解效率。故综合考虑工艺的难易和提高处理利用效率等因素选择在B处去除淀粉,这样可以简化处理工艺和减少洗涤次数,减少酸的用量,降低处理成本,提高微晶纤维素的得率。

2.3 脱半纤维素工艺中碱液浓度的优化

脱半纤维素采用碱液处理。这个过程主要分为两个部分,首先是碱液对原料的渗透,然后是反应生成物的溶出。NaOH的浓度对半纤维素脱除效果影响很大,在90℃处理2h条件下,对其浓度做单因素实验,结果如图1所示,粗纤维素(即马铃薯渣经过碱液处理洗涤过滤后得到的滤渣干燥后的样品)的质量在NaOH浓度低于8%时相差不大,高于8%时粗纤维素的质量有所下降,其原因是NaOH的浓度过大,使得纤维素和NaOH发生剥皮反应,纤维素严重损失。

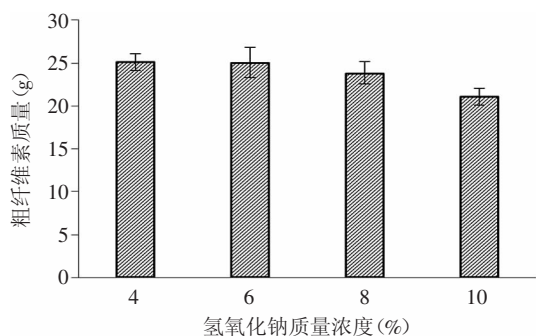


图1 碱液浓度对粗纤维质量的影响

Fig.1 Effect of alkali concentration on crude fiber weight

NaOH浓度对半纤维素的残留量影响很大,结果如图2所示,得到的粗纤维素中纤维素含量在70%以上,半纤维素的含量是先减小后有所增加,在质量浓度为8%时,半纤维素的残留比例达到最小。随着浓度的进一步提高,其残留比例反而有所提升,这主要是由于NaOH浓度增大虽然促进了半纤维素的溶出,但也导致大量纤维素因剥皮反应被降解所致。故综合考虑粗纤维素的质量和半纤维素去除效果,NaOH

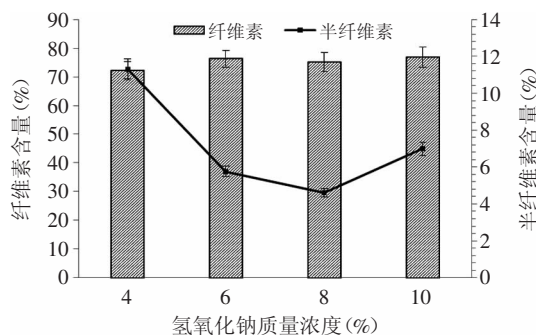


图2 碱液浓度对纤维素及半纤维素含量的影响

Fig.2 Effect of alkali concentration on cellulose and hemicellulose content

的浓度选择8%,此时,粗纤维素中含有部分淀粉以及少量的木质素,可以在后面的脱木质素和酸解阶段除去。

2.4 木质素脱除工艺的选择

马铃薯渣中的木质素含量很低,与其他木质纤维素资源相比较容易除去。木质素和碳水化合物存在化学键,破坏这些化学键就能脱除木质素。酸性亚氯酸钠法是指亚氯酸钠能够在使用乙酸调节pH4.9的情况下起到脱木质素的作用,相对于其他方法,这是一种温和的除去木质素的方法。本研究采用20g/L的亚氯酸钠溶液,用乙酸调节pH到4.9,70℃处理2.5h后,木质素能够被完全除去,且对后续制备微晶纤维素无明显影响。

2.5 酸解处理的单因素实验和正交实验

2.5.1 酸解温度对酸解马铃薯渣微晶纤维素性能的影响 由2.2结果可知,温度对于淀粉的去除效果有重要影响,同时有报道指出温度的提高有利于纤维素的降解。考察不同处理温度下酸解处理对淀粉去除效果的影响。结果如表3所示。温度对淀粉的去除效果有很大的影响,温度低时,淀粉不能彻底除去,而在90℃的处理条件下可以彻底除去。分析原因可能是纤维素和淀粉的结合对于淀粉降解有阻碍作用,温度的提高能够使分子运动的更加剧烈,降低这种阻碍作用,同时降低淀粉糖苷键断裂的活化能,提高水解的效率。所以水解制备微晶纤维素的温度选择在90℃以上。

表3 温度对淀粉除去的影响

Table 3 Effect of temperature on starch removed

温度(℃)	80	85	90	95	100
与碘液反应	变蓝	变蓝	不反应	不反应	不反应

2.5.2 酸的浓度对酸解马铃薯渣微晶纤维素性能的影响 考察不同酸的浓度对酸解微晶纤维素性能的影响。结果如表4所示。酸的浓度对淀粉能否彻底除去有很大的影响,在酸的浓度低于8%时,淀粉不能彻底除去,高于8%时能够彻底除去。这是因为酸的浓度增加,降低了淀粉糖苷键断裂的活化能提高了水解效率。而随着酸浓度的提高,微晶纤维素的DP值有所下降,但下降趋势逐渐减弱,这是因为酸的浓度对降低纤维素糖苷键断裂的作用在减弱。微晶纤维素的得率有所下降,这是由于纤维素在高浓度酸的条件下水解为葡萄糖的比例有所增加,而微

表4 酸的浓度对水解马铃薯渣纤维素的影响

Table 4 Effect of acid concentration hydrolysis cellulose of potato pulp

酸浓度(%)	6	7	8	9	10
与碘液反应	变蓝	变蓝	不反应	不反应	不反应
得率(%)	-	-	77.74	74.84	74.08
纯度(%)	-	-	95.34	96.28	96.37
DP值	-	-	222	197	193

注:“-”表示未测定;表5、表6同。

晶纤维素纯度的提高是因为残留的半纤维素被水解所致。

2.5.3 酸解时间对酸解马铃薯渣微晶纤维素性能的影响 考察酸解时间对酸解粗纤维素的影响。结果如表5所示,酸解时间低于60min,淀粉不能彻底除去,这是因为酸解反应以及酸对淀粉结晶区的渗透需要一定的时间。微晶纤维素的DP值随着水解时间的增加持续下降,这是因为随着纤维素和酸反应的时间延长,纤维素分子的糖苷键断裂增多。纯度的提高是因为半纤维素随着时间延长而被水解;得率也随着时间的延长下降,这是由于时间的延长导致更多的纤维素水解成葡萄糖。

表5 时间对水解马铃薯渣纤维素的影响

Table 5 Effect of time on the hydrolysis of cellulose of potato pulp

时间(min)	30	60	90	120	150
与碘液反应	变蓝	不反应	不反应	不反应	不反应
得率(%)	—	75.67	75.58	75.60	74.88
纯度(%)	—	96.16	96.58	96.60	97.24
DP值	—	219	183	159	105

2.5.4 料液比的对酸解马铃薯渣微晶纤维素性能的影响 考察料液比(是根据鲜马铃薯渣的质量计算的)对酸解粗纤维素的影响。结果如表6所示,由表中数据可知,料液比低时,淀粉不能彻底除去;料液比高于1:2时,淀粉能够彻底除去,这可能是因为随着料液比的提高体系粘度降低,搅拌更充分,酸也更容易渗透进去,提高了水解的效率。随着料液比的增大,微晶纤维素的DP值没有明显的变化,这是由于在料液比为1:2时水解液与纤维素颗粒已近能够充分混合反应,进一步提高料液比影响不大。得率下降是因为部分纤维素被降解成葡萄糖所致,纯度提高是因为残留的半纤维素被水解所致。

表6 料液比的对水解马铃薯渣纤维素的影响

Table 6 Effect of solid-liquid ratio on the hydrolysis of cellulose of potato pulp

料液比	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
与碘液反应	变蓝	不反应	不反应	不反应	不反应
得率(%)	—	76.38	75.89	75.38	75.08
纯度(%)	—	96.35	96.85	96.91	97.11
DP值	—	220	218	215	210

2.5.5 马铃薯渣微晶纤维素制备的正交实验 单因素实验结果表明,在淀粉完全除去的情况下能够制得基本符合条件的微晶纤维素,为了进一步优化工艺条件设计了正交实验,选择酸的浓度、水解时间、水解温度和料液比这四个对微晶纤维素的制备影响最大的因素进行四因素三水平正交实验。

表7是酸水解制备马铃薯渣微晶纤维素正交实验的结果及分析,以马铃薯渣微晶纤维素的聚合度为评价指标。

极差分析的结果表明,各因素的影响强弱依次为:酸解时间>酸的浓度>酸解温度>料液比。这主要是由于淀粉和纤维素的结合和淀粉的结晶结构阻碍了酸解作用,所以酸浓度的进一步提高对酸解的影响较小,而延长反应时间能够克服这种作用,同时使淀粉彻底水解和充分降解纤维素。由极差分析结果可以判断最佳水解条件为 $A_3B_3C_2D_2$,即盐酸浓度为10%,酸解时间为120min,酸解温度为95℃,料液比为1:3,此时DP值为141,微晶纤维素得率为74.58%。但是由单因素实验以及极差结果可以看出,料液比对微晶纤维素的聚合度影响极小,几乎可以忽略不计。盐酸浓度为10%,酸解时间为120min,酸解温度为95℃,料液比为1:2的验证实验结果表明,制备的微晶纤维素DP值为144,得率为75.65%,DP值虽略有上升,但是得率高于1:3料液比的产品,且增加料液比会显著的增加成本,所以根据实验结果以及实际条件选择料液比为1:2,所制得的微晶纤维素的纯度为97.51%,超过中国药典规定的96%。

表7 正交实验结果

Table 7 Results of orthogonal experiment

实验号	A	B	C	D	聚合度(DP值)
1	1	1	1	1	225
2	1	2	2	2	175
3	1	3	3	3	154
4	2	1	2	3	213
5	2	2	3	1	170
6	2	3	1	2	148
7	3	1	3	2	208
8	3	2	1	3	163
9	3	3	2	1	138
k_1	185	215	179	178	
k_2	177	169	175	177	
k_3	170	147	177	177	
R	15	68	4	1	

3 结论

以湿马铃薯渣为原料,通过碱液处理除去半纤维素,然后通过亚氯酸钠处理,得到粗纤维素,最后通过盐酸水解在降解纤维素的同时除去淀粉。通过正交实验确定了最佳工艺条件:盐酸浓度10%,水解时间120min,温度95℃,料液比1:2。本法工艺简单,直接以湿马铃薯渣为原料,通过脱半纤维素、木质素和一步酸解降解淀粉和纤维素制备了性能较好的微晶纤维素产品,解决了马铃薯渣难处理的问题,提高了附加值。同时马铃薯渣微晶纤维素的平均聚合度,微晶纤维素的纯度等指标都符合中国药典的相关要求。

参考文献

- [1] Imeson A. Food stabilisers, thickeners and gelling agents[M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009, 67: 218-236.
- [2] Battista O A, Coppick S, Howsmon J, et al. Level-off degree

of polymerization[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1956, 48(2):333-335.

[3] Battista O A. Hydrolysis and crystallization of cellulose[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1950, 42(3):502-507.

[4] 宋杰, 侯永发. 微晶纤维素的性质与应用[J]. 纤维素科学与技术, 1995, 3(3):1-10.

[5] 覃荣灵, 黄爱民, 黄祖强, 等. 蔗渣微晶纤维素的制备及性能测定[J]. 中国食品添加剂, 2012, 6:250-253.

[6] 刘欢, 王新伟, 魏静, 等. 胡萝卜渣微晶纤维素的制备[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(4):135-138.

[7] 姜绪邦. 超声波协同化学法制备稻秸秆微晶纤维素及其在面包中的应用[D]. 无锡:江南大学, 2013.

[8] 刘恩岐, 张建萍, 唐仕荣, 等. 酶法制备大豆皮微晶纤维素及其理化特性[J]. 食品科学, 2012, 33(24):122-126.

[9] Alain dufresne, Danie le Dupeyer, Michel R Vignon. Cellulose microfibrils from potato tuber cells: processing and characterization of starch-cellulose microfibril composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 76:2080-2092.

[10] 郑健仙. 功能性膳食纤维[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

[11] 袁毅, 张黎明, 高文远. 穿龙薯蓣微晶纤维素的制备及其理化性质研究[J]. 生物质化学工程, 2007, 41(4):22-26.

[12] 哈丽丹·买买提, 努尔买买提, 吾满江·艾力. 粘度法测定植物纤维素的聚合度[J]. 合成纤维工业, 2006, 29(1):40-42.

(上接第217页)

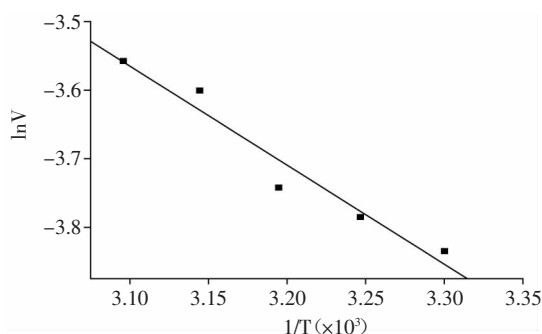


图5 $\ln V-1/T$

Fig.5 $\ln V-1/T$

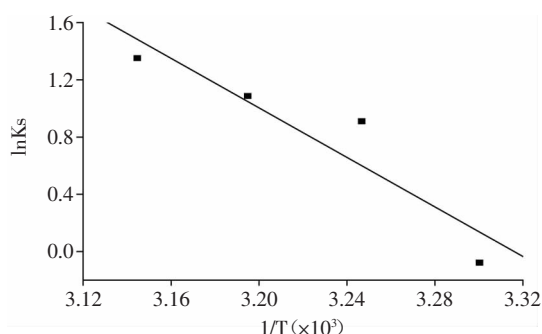


图6 $\ln K_s-1/T$

Fig.6 $\ln K_s-1/T$

3 结论

利用响应面法优化 α -淀粉酶酶解荸荠淀粉, 对酶解动力学进行研究。酶解工艺为: 时间88min、温度53℃、E/S=0.12U/mg和pH7.7。在此条件下, 验证实验DE值为(53.393%±0.899%)。在pH7.0, 60℃条件下, $V_{\max}=0.335\text{mg}/(\text{mL}\cdot\text{min})$, $K_m=47.298\text{mg}/\text{mL}$, $E_a=11.995\text{kJ}/\text{mol}$, $\Delta H=71.882\text{kJ}/\text{mol}$ 。与其他薯类的 α -淀粉酶酶解相比较, DE较低, 其原因与淀粉的分子结构有关, 如直链淀粉与支链淀粉的比例、颗粒大小、形状、结晶结构和结晶度及其他组分等^[19]。

参考文献

[1] 王海, 屠康, 静玮, 等. 罐制过程中荸荠质构变化及其与淀

粉特性的关系[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4):222-227.

[2] 王海. 荸荠质构特性及其抑菌物质的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007.

[3] 刑湘臣. “江南人参”——荸荠[J]. 蔬菜, 2002(5):40.

[4] 阮振华, 许宏贤, 段钢. 甘薯生料酒酒精发酵[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(9):6-9.

[5] 赵宗保, 胡翠敏. 能源微生物油脂技术进展[J]. 生物工程学报, 2011, 27(3):427-435.

[6] 黎金, 张国权, 罗勤贵. 荞麦蛋白的碱性蛋白酶酶解动力学研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(6):41-46.

[7] 尹志华, 汪兰, 田斌强, 等. 荸荠淀粉的物化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(1):66-70.

[8] 张惟杰. 糖复合物生化研究技术[M]. 第二版. 杭州:浙江大学出版社, 1999:10-11.

[9] 李艳红, 刘坚, 张涛, 等. 酶解鹰嘴豆蛋白制备抗氧化肽工艺优化研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):268-273.

[10] 钟昔阳, 杨积东, 汤玉清, 等. α -淀粉酶酶解小麦面粉动力学模型研究[J]. 食品科学, 2012, 33(7):96-100.

[11] 任省涛, 程可可, 宋安东, 等. 蒸汽爆破玉米秸秆酶解动力学[J]. 生物工程学报, 2011, 27(4):592-597.

[12] 齐明, 房书, 沙同胜, 等. 葡萄糖糖化率-糖化反应的研究[J]. 牡丹江医学院学报, 1993(S1):29-31.

[13] 张国权, 史一一, 魏益民, 等. 荞麦淀粉的真菌淀粉酶酶解动力学研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5):42-46.

[14] Tanyildizi M S, Ozer D, Elibol M. Optimization of α -amylase production by Bacillus sp. using response surface methodology[J]. Process Biochemistry, 2005, 40(7):2291-2296.

[15] 郑宝东. 食品酶学[M]. 南京:东南大学出版社, 2006:88.

[16] 蔡丽华, 马美湖. 4种常用蛋白酶对牛骨蛋白的酶解动力学研究[J]. 食品科学, 2010, 31(5):150-154.

[17] 袁亚宏, 蔡露阳, 岳田利, 等. 胺基化磁性壳聚糖微球对苹果渣多酚的吸附条件优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11):279-286.

[18] 于轩, 李兆丰, 顾正彪, 等. 淀粉结构对其酶解性能影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4):137-140.

[19] 吕巧玲, 张兴, 谢逸萍, 等. 不同酶对淀粉的协同作用动力学研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6):156-158.