

文章编号:1004-4213(2010)07-1324-6

喇曼光谱法测定单个大米淀粉微粒糊化过程的实时研究*

李艳^{1,2}, 孟令晶^{1,2}, 刘军贤¹, 郑禹², 宋春胜², 姚辉璐^{2,†}

(1 广西师范大学 物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004)

(2 广西科学院 生物物理实验室, 南宁 530003)

摘要:在特定加温模式和过量水分条件下,采用激光光镊喇曼光谱系统研究了单个大米淀粉微粒的糊化行为,获得了整个糊化过程的喇曼光谱.以光谱峰高的变化标记糊化过程,进一步验证了 477 cm^{-1} 峰归属为淀粉分子骨架振动的事实.通过分析 C-O-H 基团相关特征峰 $1\ 052$ 、 $1\ 083$ 、 $1\ 127$ 、 $1\ 339\text{ cm}^{-1}$ 的变化情况研究大米淀粉颗粒糊化过程中的速率问题.结果显示:糊化开始后,相关特征峰在过程中呈增强趋势,随着时间增加,温度升高,速率加快,直至糊化结束.

关键词:激光光镊;喇曼光谱;淀粉;糊化过程

中图分类号:O433.5+4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103907.1324

0 引言

淀粉与水的混合物加热至一定温度后,淀粉颗粒吸水膨胀,晶体溶解,双折射性和结晶性不可逆转地丧失,产生糊化现象.糊化过程中,提供给淀粉颗粒的两种形式的能分别是热能和剪切力能.淀粉糊化的静力特性对设计挤压器和对挤压出的淀粉产物的质量非常重要.国内外许多学者对淀粉的糊化特性做了大量工作^[1-3].其中包括 X-衍射研究淀粉糊化过程中晶体的溶解特性;用粘度仪研究淀粉糊的流变学特性;差试量热扫描仪(Difference Scanning Calorimetry, DSC)研究淀粉的热特性;用衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪跟踪测定了不同品种大米淀粉的糊化过程,研究淀粉颗粒内结晶结构在糊化过程中变化的详细情况等,通过这些研究来了解淀粉的糊化特性,确定淀粉质食品的加工参量.

喇曼光谱也被用来检测淀粉糊化过程.由于其对样品中的水分有相对较弱的背景而比红外光谱具有更大的优势. Ik-Hwan Kim 等人研究了生淀粉和熟淀粉的喇曼光谱,建立一个淀粉糊化机械分子模型^[4]. FT-Raman 光谱也已应用于淀粉糊化的研究中, Schuster 等研究者^[5]采用 FT-Raman 光谱在线

监控淀粉的糊化过程.这些方法对淀粉糊化行为的认识都是通过研究其群体样品而得到的统计平均信息,研究的是淀粉群体颗粒的糊化趋势,由于糊化过程不是绝对同步和均一的,所以上述方法不能准确描述温度升高时某一微粒的糊化特性.而且,迄今为止,未见有大米淀粉糊化过程速率问题与光谱对照的相关性研究.

本文采用激光光镊喇曼光谱系统实时记录加热过程中单个大米淀粉微粒喇曼光谱的变化过程,用一束光来实现囚禁单个大米淀粉颗粒和激发其喇曼散射,同时用温控仪控制样品槽升温,通过分析光谱的变化了解大米淀粉微粒在过量水分条件下随温度升高的糊化情况,特别研究了单个大米淀粉颗粒糊化速率问题.

1 实验部分

1.1 材料与方法

实验材料:麦芽糖(Maltose, $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}\text{H}_2\text{O}$, 分子量:360.32, 上海润捷化学试剂有限公司), 葡萄糖(D-(+)-Glucose, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 分子量:198.17, 国药集团化学试剂有限公司), 东北米(GB1354-20009, 寒带金典, 龙跃米业), 无菌水, 聚苯乙烯小球.

大米淀粉的提取:在提取淀粉的过程中去蛋白是关键,国际上常用的方法是碱浸法和酶法.本实验对 Yang^[6]的碱浸法进行了改良.东北米,去杂,选择大小颜色均一的颗粒.研磨成粉末,过 400 目筛,用 0.3%~0.5% 的 NaOH 浸泡大米,碱液的量约为米

* 国家自然科学基金(60868002)、广西科学基金(桂科回 0731013、桂科合 0895001-1-1)、广西科学院基金(09YJ17WL02)和广西研究生创新基金(2009106020702M37)资助

† Tel:0771-2503932

Email:yaohl@tom.com

收稿日期:2010-01-04

修回日期:2010-03-29

的 2 倍,浸泡温度为室温 27 ℃. 浸泡过程中,每隔 6 h 搅拌一次,共浸泡 24 h. 浸泡后去掉上层黄色浸泡液,用无菌水离心清洗多次去掉 NaOH 溶解的蛋白质. 取上清液 100 μL ,无菌水稀释(每 50 μL 上清液加无菌水 150 μL),得到含有大小 2~3 μm 的淀粉颗粒的溶液.

实验方法:将稀释过的上清液注入自制 1 500 μL 铝制样品池,样品池上用 1 # 盖玻片留一微小缝隙以便气流均匀逸出维持样品池内力学稳定性. 样品池放置在倒置显微镜操控台上,样品池连接温控仪,从 20 ℃ 开始加热,每 2 min 升温 4 ℃,连续加热升温到 83.5 ℃,采用此种加温方式在势阱中能稳定俘获淀粉微粒. 生米光谱积分两次后连接温控仪从 42 ℃ 开始加热,连续观察记录被俘获颗粒 40 min.

1.2 实验装置

本实验所用的喇曼光谱系统如文献[7]所述:半导体激光器(DL7140 - 201S - Sanyo Laser Diode, Single Mode)产生波长为 785 nm 的激光束,滤波,导入倒置生物显微镜(TE2000U, Nikon).

激光束经油浸物镜(NA. 1.30 100 \times)聚焦后在焦点附近形成了一个单光束光势阱来囚禁样品,同时这束激光也用来激发被囚禁样品的喇曼散射光(如图 1). 样品槽由一个厚 10 mm,中心有一个直径为 8 mm 孔的铝板构成,下部用一个厚 100 μm 石英片密封,上部盖上盖玻片. 悬浮在无菌水中大米淀粉颗粒就放置在两个玻片之间的孔里. 两个二色镜(Dichroic mirror)滤除与激发波长相同的弹性散射

光,喇曼散射光聚焦进光谱仪的入射狭缝. 光谱仪(SpectraPro2300i, Acton)的衍射光栅参量是闪耀波长 650 nm,每毫米 600 线. 光谱仪耦合到电荷耦合器件 CCD(Spec-10, Princeton Instruments)上,CCD 用液氮冷却到 -120 ℃. 摄像机(Video Camera, VC)连续监视被囚禁微粒. 收集 300~2 000 cm^{-1} 范围的喇曼光谱,光谱分辨率为 6 cm^{-1} .

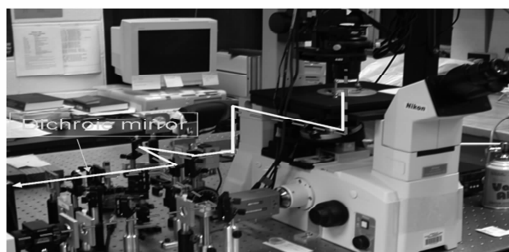
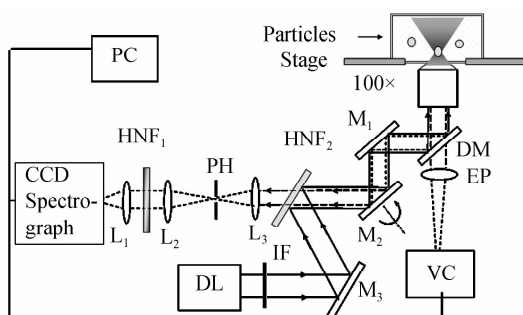
1.3 光谱收集与数据处理

淀粉颗粒囚禁在载玻片上方约 8 μm 的位置,激光束进显微镜前功率为 30 mW,喇曼信号积分时间是 5 s,延迟 5 s 再收集,连续观测 40 min,得到带背景的淀粉颗粒喇曼光谱. 在同一高度,分别连续采集糊化前和糊化后溶液背景光谱,光谱转换为 ASCII 数据,用 Micro Origin 8.0 结合 Matlab7.0 软件进行处理,每一个光谱减掉来之溶液光学部件的背景光谱,5 点平滑,得到实际淀粉颗粒的光谱,每个光谱去掉基线,输入 Unscramble 软件,对特征峰 1 458 cm^{-1} (归属- CH_2 deformation)进行归一化,得到校正体积膨胀影响后的光谱.

2 实验结果与讨论

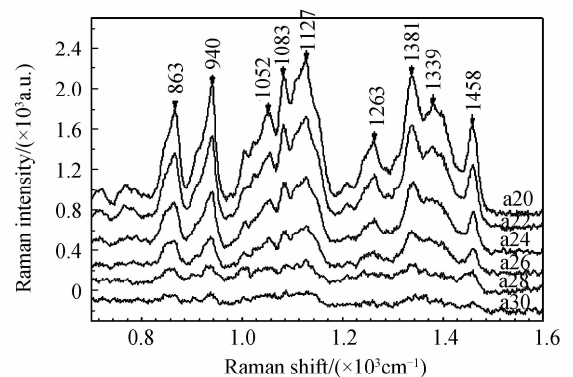
2.1 光谱变化标记糊化过程

采用连续升温实时监测的方式来观测淀粉颗粒的糊化过程. 文献报道当温度从 35 ℃ 升到 55 ℃ 时,非糯性淀粉颗粒会有微弱的膨胀,55 ℃~65 ℃ 时观察到颗粒直径从 6 μm 增大到 10 μm ,温度达到 65 ℃ 时,颗粒急剧膨胀,可增至 16 μm [8]. 本实验观察到:如图 2(b)(1),从 42 ℃~60 ℃ 这段温度范围内,颗粒体积只有极为微弱的膨胀,光谱基本保持不变;图 2(b)(2)、(3)中,当温度达到 60 ℃,体积显著增大,同时光谱系列峰强度开始减弱. 表 1 是经过去背景,平滑等处理后,大米淀粉颗粒糊化过程中特征峰 1 052、1 083、1 127、1 263、1 458 cm^{-1} 的峰值变化. 图 2(a)中,曲线 a、b、c、d、e、f 分别为糊化过程中第 20、22、24、26、28、30 min 时淀粉颗粒喇曼图

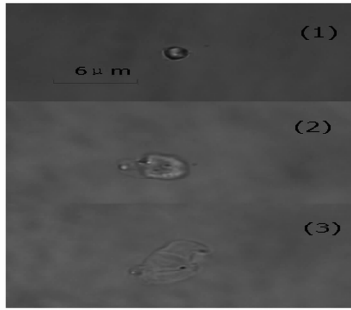


HNF: Holographic notch filter; DM: Dichroic mirror; L: Lens; M: Reflection mirror; EP: Eyepiece; PH: Pinhole; DL: Diode laser; VC: Video camera; IF: Interference filter; PC: Personal computer

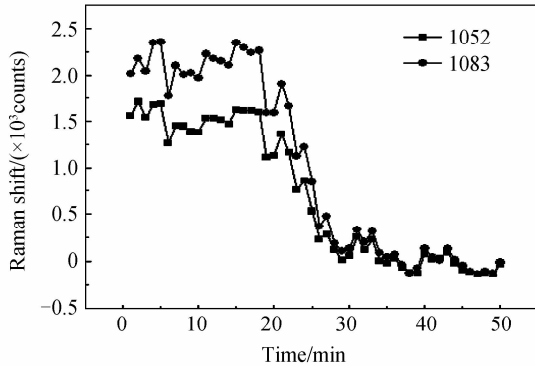
图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup



(a) The Raman spectra of starch granule at different time after subtracting background and smooth



(b) The starch particle pictures of the pre-gelatinization, mid-gelatinization and pro-gelatinization



(c) The changes of intensity at bands of 1052, 1083 cm^{-1}

图2 淀粉颗粒的形态、光谱强度等随着糊化过程的阶段性变化

Fig. 2 A clear staged variation in morphology and spectral intensity of starch granule with the gelatinization process going on

表1 在糊化第20、22、24、26、28、30 min时淀粉颗粒在1 052、1 127、1 263、1 083、1 458 cm^{-1} 处的峰值强度

Table 1 These intensity values at bands of 1 052、1 127、1 263、1 083、1 458 cm^{-1} on the 20th、22nd、24th、26th、28th、30th minutes during gelatinization

Time/min	Raman shift/ cm^{-1}				
	1 052	1 083	1 127	1 263	1 458
20(a)	790	1 133	1 280	480	639
22(b)	573	844	931	348	447
24(c)	296	471	510	107	194
26(d)	128	182	245	-0.75	38
28(e)	32	38	101	-48	-21
30(f)	-136	-106	-103	-205	-202

表2 在淀粉颗粒糊化过程中主要变化峰的归属

Table 2 The most prominent bands changing in the process steps of rice starch hydrolysis, with tentative assignments

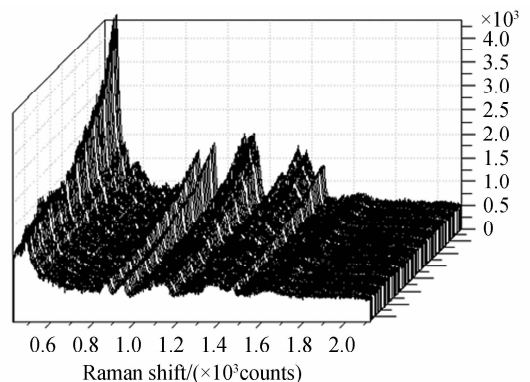
Band/(cm^{-1})	Gelatinisation	Assigned to
477		skeletal mode
1 052		$\nu(\text{C-C}) + \delta(\text{C-O-H})$ modes
1 083		$\delta(\text{C-O-H})$ modes (in polymers)
1 127		$\nu(\text{C-O}) + \delta(\text{C-O-H})$ modes
1 263		CH_2OH (related mode)
1 339		C-O-H (bending)
1 370-1 381		$\delta(\text{CH}_2)$ scissoring
1 458		CH_2 deformation

谱. 由图可见,第20 min 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,光谱开始变化,863、940、1 052、1 083、1 127、1 263、1 339、1 458 cm^{-1} 系列峰强度明显减弱,各峰归属如表2.

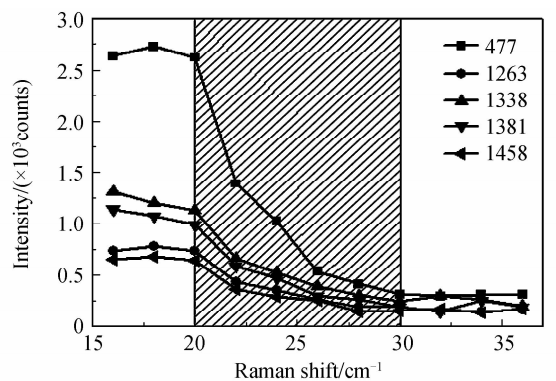
图2(c)是淀粉的两个特征峰1 052、1 083 cm^{-1} 峰值指示糊化时间图. 由图可以看出,1 052、1 083 cm^{-1} 峰峰值在第20 min开始降低,第30 min峰值不再变化,光谱稳定. 在糊化过程中,采用上述加温模式,加热过量水分下的淀粉颗粒,从室温到60 $^{\circ}\text{C}$ 时,这20 min是可逆吸水阶段^[9],在这段温度范围内,水分子只是单纯地进入淀粉颗粒的微晶束的间隙中,淀粉粒缓慢地吸收少量的水分,产生有限的膨胀,而颗粒内部保持原来的晶体结构,光谱基本保持不变^[3]. 20 min左右进入不可逆吸水阶段,淀粉颗粒在过量的水环境中加热到一定程度,水分子进入到淀粉颗粒内部致使淀粉分子链与链之间的氢键作用力被破坏,同时形成水合层,进一步打破其分子作用力,使颗粒膨胀到原体积的数倍以上,颗粒密度变小. 由于喇曼峰强度和物质密度成直接的线性关系^[6],大部分的喇曼峰强度减弱. 膨胀过程持续10 min,第30 min光谱稳定. 实验结果证明以光谱的变化能很好的标记糊化过程,这些结论与之前的报道一致^[5,1,3].

2.2 验证 477 cm^{-1} 峰的归属

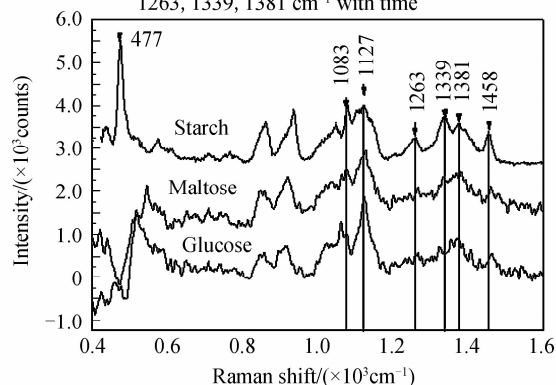
图3(a)、(b)是477 cm^{-1} 与1 052、1 083、1 127、1 263 cm^{-1} 特征峰糊化随时间变化的过程图,大部分的喇曼特征峰平缓的减弱,477 cm^{-1} 峰的减弱幅度明显高于其它特征峰. 477 cm^{-1} 峰与1 052、1 083、1 127、1 263 cm^{-1} 特征峰相比减弱2.5~4.5倍. 说明477 cm^{-1} 峰代表着糊化过程中的显著变化. 图3(c)是未加热处理过的大米淀粉微粒和浓度为6%的麦芽糖、葡萄糖溶液的喇曼光谱图. 观察淀粉完全水解时第三步和第四步产物,麦芽糖和葡萄糖的喇曼光谱图,麦芽糖和葡萄糖没有477 cm^{-1} 特征峰,而在淀粉中有很强的477 cm^{-1} 峰,且糊化的过程中



(a) The 3D graph of single starch granule during gelatinization process



(b) The trends of some peaks such as 477, 863, 1263, 1339, 1381 cm^{-1} with time



(c) Raman spectra of reference substances: maltose and glucose

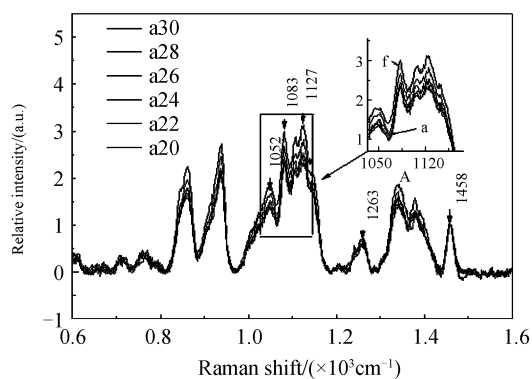
图3 验证 477 cm^{-1} 峰归属问题的假说

Fig. 3 Confirming the fact that the peak of 477 cm^{-1} is assigned as skeletal mode

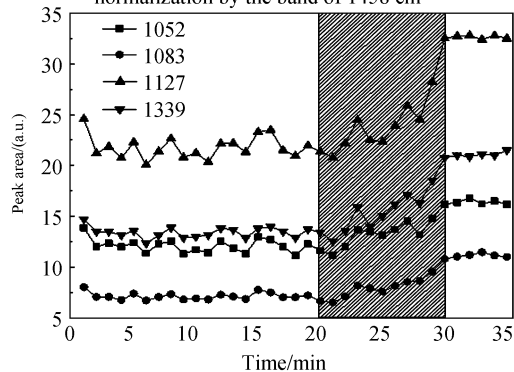
477 cm^{-1} 急剧减弱,这与文献推测 477 cm^{-1} 归属为淀粉骨架振动峰的事实相符合^[4-5].

2.3 校正体积膨胀影响后单个淀粉颗粒喇曼光谱糊化速率变化过程分析

图4(a)中,a20、a22、a24、a26、a28、a30(a、b、c、d、e、f)分别是对 1458 cm^{-1} 峰投影后的第22、24、26、28、30 min 大米淀粉微粒喇曼频移图. 糊化过程中胶束解体,淀粉分子展开,骨架形变,同时分子链间和分子内氢键断裂,生成更多的自由 C-O-H 基团. 淀粉 α -D-吡喃单体中的 C-O-H 基团作为氢键赠予者,氢键受体是任何淀粉分子中配体单位中的-O键^[4]. 在糊化开始后,更多自由的 C-O-H 基团的形成,导致一些与 C-O-H 基团相关的喇曼峰逐步增强. 图4(b)中灰色区域代表糊化过程,由于淀粉颗粒体积膨胀也能引起喇曼光谱强度降低,为了校正体积膨胀和温度上升带来的影响,以不形成氢键的 1458 cm^{-1} 峰 (1458 cm^{-1} -CH₂ deformation) 作内标,归一化处理,得到能真实反应糊化过程的喇曼光谱. 为了消除单个峰强度比较的不确定性,针对峰值求出峰面积.



(a) These Raman spectra on the 20th,22nd,24th, 26th,28th,30th minutes during gelatinization with normalization by the band of 1458 cm^{-1}



(b) The trend of peak area intensity above four Raman shift

图4 校正体积膨胀影响后单个淀粉颗粒糊化速率变化过程
Fig. 4 Gelatinization rate variation process of a single starch granules after volume expansion calibration

图4中 1052 cm^{-1} 附近的喇曼峰为 C-C 伸缩和 C-O-H 弯曲振动, 1083 和 1139 cm^{-1} 附近谱带代表 C-O-H 弯曲振动. 而 1127 cm^{-1} 则是 C-O 伸缩振动和 C-O-H 弯曲振动的复合表现. 考察与 C-O-H 基团相关的喇曼频移 1052 、 1083 、 1127 、 1339 cm^{-1} , 其喇曼峰面积积分相对 1458 cm^{-1} 峰面积分别增强 4.57、3.7、10.6、7.28 倍(以 1458 cm^{-1} 峰面积为 1). 前 20 min, 温度从 $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 1052 、 1083 、 1127 、 1339 cm^{-1} 峰高基本没有变化, 20 min 后, $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时峰高开始上升, 30 min 后, 温度升高, 峰高不再变化. 据图4(b)所示糊化开始后, 上叙特征峰呈增强趋势, 局部两次迂回波动下降, 第 24 min $68 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和第 27 min $72 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 共两次. 根据速率随时间的变化, 大致可分为三个阶段, 第一、二阶段分别在 3 min 内特征峰强度增强 12.5% 和 8%. 第三阶段在相同时间内增强 30%. 糊化开始后, 上叙特征峰在过程中呈增强趋势, 随着时间增加, 温度升高, 速率加快, 糊化速度在糊化结束前达到最大值.

3 结论

实验利用喇曼光谱实时监测了在过量水分条件

下单个大米淀粉微粒糊化行为,证明了喇曼光谱能很好的标记糊化过程.研究表明单个微粒 60 °C 时开始糊化,十分钟左右糊化完成.在糊化过程中,颗粒膨胀,大部分特征峰减弱,由于胶束解体,淀粉分子螺旋展开,骨架振动密度减弱急剧,实验结果很好的证明了 477 cm^{-1} 附近谱带的指认.淀粉分子链间和分子本身的氢键断裂,形成更多自由的 C-O-H 基团,与 C-O-H 基团相关的特征峰 1 052、1 083、1 127、1 339 cm^{-1} 峰面积和峰强度相对于 1 458 峰增强,说明在氢键断裂后,C-O-H 基团本身振动和伸缩逐步增强,随着时间增加,温度升高,速率加快,直至糊化结束.从而分子水平上实时研究了单个大米微粒糊化特性,准确的描述直径为(2~3 μm)微粒糊化过程中形态和分子结构的变化情况,为研究淀粉的糊化行为过程提供有利的信息.

参考文献

- [1] FECHNER P M, WARTEWIGB S, KIESOWC A, *et al.* Influence of water on molecular and morphological structure of various starches and starch derivatives[J]. *Starch*, 2005, **57** (12): 605-615.
- [2] KIZILI R, IRUDAYARAJ J. Discrimination of irradiated starch gels using FT-Raman spectroscopy and chemometrics [J]. *Agric Food Chem*, 2006, **54**(1): 13-18.
- [3] LI Yue, ZHONG Fang, GU Xiao-hong *et al.* Spectra analysis on rice starch from different varieties during pasting[J]. *Acta Polym Sin*, 2008, **11**(7): 720-725.
李玥,钟芳,顾小红,等.大米淀粉糊化过程的光谱分析[J]. *高分子学报*, 2008, **11**(7): 720-725.
- [4] KIM I-H, YEH AN-I, ZHAO B L. Gelatinization kinetics of starch by using Raman spectroscopy[J]. *Biotechnol Prog*, 1989, **5**(11): 172-175.
- [5] SCHUSTER K C, EHMOSER H, GAPES J R, *et al.* On-line FT-Raman spectroscopic monitoring of starch gelatinisation and enzyme catalysed starch hydrolysis [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2000, **22**(8): 181-190.
- [6] YANG C C, LAI H M, LIH C Y. The modified alkaline steeping method for isolation of rice starch[J]. *Food Science*, 1984, **11**(6): 158-171.
- [7] XIE C A, DINNO M A, LI Y Q. Near-infrared Raman spectroscopy of single optically trapped biological cells[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(9): 249-251.
- [8] KAR A, JACQUIER J C, MORGAN D J, *et al.* Influence of lipid extraction process on the rheological characteristics, swelling power, and granule size of rice starches in excess water[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, **53**(21): 8259-8264.
- [9] LI Yue, SHOEMAKERB C F, MA Jian-guo, *et al.* Structure-viscosity relationships for starches from different rice varieties during heating[J]. *Food Chemistry*, 2008, **109**(1): 1105-1112.
- [10] TANG H Y, WANG Y, LI Y Q, *et al.* NIR Raman spectroscopic investigation of single mitochondria trapped by optical tweezers [J]. *Opt Exp*, 2007, **15**(6): 12708-12716.
- [11] BARTON F E, HIMMELSBACH D S, McCLUNG A M, *et al.* Two-dimensional vibration spectroscopy of rice quality and cooking[J]. *Cereal Chem*, 2002, **79**(1): 143-147.
- [12] CHO M J, MORAWICKI R, GUERRA C. Ability of near-infrared spectroscopy to predict solid loss, volumetric expansion, and water uptake of cooked rice [J]. *Cereal Chem*, 2009, **86**(1): 113-116.
- [13] DASILVA C E M, CIAECO C F, BARBERIS G E, *et al.* Starch gelatinization measured by pulsed nuclear magnetic resonance[J]. *Cereal Chem*, 1996, **73**(3): 297-301.
- [14] LEI Ming, YAO Bao-li. The explanation of Bessel-like beam from axicon with three-beam interference model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 146-148.
雷铭,姚保利.用三光束干涉模型解释锥镜产生类贝塞尔光束 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 146-148.
- [15] YU You-li, ZHANG Zhen-xi, JIA Rui, *et al.* Compare for calibration methods to optical trapping force upon non-spherical biological cells [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 394-397.
喻有理,张镇西,贾蕊,等.两种非球形细胞光镊阱力标定方法的比较 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 394-397.
- [16] MAO Fang-lin, XING Qi-rong, WANG Kai, *et al.* Analysis of the lateral optical force applied by the femtosecond laser tweezers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 523-516.
毛方林,邢岐荣,王锴,等.飞秒激光光镊横向光学力的理论分析 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 523-516.
- [17] WANG Gui-wen, YAO Hui-lu, PENG Li-xin, *et al.* Analysis of single paraporal crytal from bacillus thuringiensis by Raman tweezers [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemist*, 2007, **35**(9): 1352-1354.
王桂文,姚辉璐,彭立新,等.喇曼镊子分析单个苏云金芽孢杆菌伴孢晶体蛋白 [J]. *分析化学*, 2007, **35**(9): 1352-1354.
- [18] YAO Hui-lu, ZHU Miao, WANG Gui-wen, *et al.* Study of Raman spectra of single carcinoma of nasopharynx cell [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(9): 1761-1764.
姚辉璐,朱淼,王桂文,等.单个鼻咽癌细胞的喇曼光谱分析的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(9): 1761-1764.
- [19] XIONG Shan-bo, ZHAO Si-ming, YAO Ni, *et al.* A study on the gelatinization properties of rice starch [J]. *Cereals and Oils*, 2001, **9**(5): 2-4.
熊善柏,赵思明,姚霓,等.淀粉在过量水分下糊化机理研究 [J]. *粮食与油脂*, 2001, **9**(5): 2-4.

Gelatinization Process of Single Rice Starch Particle Using Laser Tweezers Raman Spectroscopy System

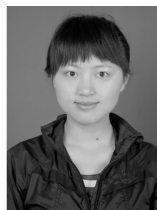
LI Yan^{1,2}, MENG Ling-jing^{1,2}, LIU Jun-xian¹, ZHENG Yu², SONG Chun-sheng², YAO Hui-lu²

(1 *College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China*)

(2 *Biophysics Laboratory, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530003, China*)

Abstract: Real-time monitoring the gelatinization process of single rice starch particle using laser tweezers Raman spectroscopy system under the condition of excessive water and special heating mode is reported. These Raman spectra of gelatinization process are acquired using an imaging CCD spectrograph and the gelatinization process is remarked by the changes of spectra peak height. The experimental result further confirmed the fact that the band of 477cm^{-1} is assigned as skeletal mode. The rate of gelatinization about single rice starch granules is studied by analyzing the C-O-H group related characteristic peaks which locate at the band of 1 052, 1 083, 1 127, 1 339 cm^{-1} . The results demonstrate that the rate of gelatinization accelerates with rising temperature until the end of gelatinization process.

Key words: Laser tweezers; Raman spectroscopy; Starch; Gelatinization process



LI Yan is a graduate student and her research interests focus on theoretical physics and biological physics.



YAO Hui-lu was born in 1972 and his research interests focus on biophysics and spectrum analysis.