

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.03.015

刘畅, 王梦雅, 宋洪东, 等. 以 Hailwood-Horrobin 平衡水分模型分析聚葡萄糖吸潮机理[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 140-147.

LIU C, WANG M Y, SONG H D, et al. A study on the mechanism of polydextrose moisture absorption analyzed by hailwood-horrobin equilibrium moisture model[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 140-147.

以 Hailwood-Horrobin 平衡水分模型 分析聚葡萄糖吸潮机理

刘 畅^{1,2,3}, 王梦雅^{2,3}, 宋洪东¹, 曹子怡^{1,2,3},
颀 宇^{2,3}, 李兴军^{2,3}✉, 宁国庆⁴

1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;
3. 国家粮食储运工程研究中心, 北京 100037;
4. 人良生物科技(上海)有限公司, 上海 201800)

摘 要: 为解释聚葡萄糖的吸潮性能, 改进包装材料, 在 20~35 °C 和平衡相对湿度 (ERH) 10%~90% 范围内, 测定了初始含水率 (IMC) 1.01%~4.89% 的 5 个国产样品 (a1~a5) 的水分吸附与解吸等温线。吸附和解吸等温线均是 S 型曲线, 在 ERH 小于 80% 时, 解吸等温线与吸附等温线之间存在滞后现象, 样品初始含水率越低, 滞后现象越显著。由于聚葡萄糖是无定形相态的粉末, 我们假定聚葡萄糖水分吸附过程是蒸汽相态、液体相态 (多分子层吸附) 及固体溶液 (单分子层吸附) 之间存在的平衡, 按照 Hailwood-Horrobin (HH) 模型把 S 型吸附等温线去卷积为单分子层 (M_h) 和多分子层成分 (M_d), 吸附和解吸多分子层水含量随 ERH 增加呈现 S 型曲线增加, 解吸单分子层含水率随 ERH 增加保持不变, 而吸附单分子层含水率随 ERH 增加对 a1~a4 样品 (IMC 4.87%~2.35%) 缓慢增加, 对 a5 样品 (IMC 1.01%) 几乎线性减少。随着样品初始含水率降低, 吸附位点聚合物分子量对 a1 样品最大, 对 a5 样品最小。尽管红外光谱扫描显示 a5 样品羟基 (3416 cm^{-1}) 和无定形结构官能团 (1027 cm^{-1}) 的强度最小, 但是 a5 样品的吸潮率最大。说明不同工艺加工的聚葡萄糖样品含水率越低, 吸附单分子层水含量随 ERH 增加几乎线性减少, 但是吸附多分子层含水量随 ERH 增加是 S 型增加, 吸潮率和吸湿量增大。

关键词: 聚葡萄糖; 水分吸着等温线; 吸潮率; 单分子层吸附; 滞后环

中图分类号: TS201.7; S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)03-0140-08

网络首发时间: 2024-05-09 15:09:46

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240509.1158.026>

A Study on the Mechanism of Polydextrose Moisture Absorption Analyzed by Hailwood-Horrobin Equilibrium Moisture Model

LIU Chang^{1,2,3}, WANG Meng-ya^{2,3}, Song Hong-dong¹, CAO Zi-yi^{1,2,3},

收稿日期: 2023-10-28

基金项目: 院所企业合作课题 (H22076)

Supported by: Cooperation between Institutions and Enterprises (No.H22076)

作者简介: 刘畅, 男, 1998 年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮食生化与工程。E-mail: shlgc@126.com

通讯作者: 李兴军, 男, 1971 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食生化与工程。E-mail: lxj@ags.ac.cn

JIE Yu^{2,3}, LI Xing-jun^{2,3}✉, NING Guo-qing⁴

(1. College of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 3. National Engineering Research Center for Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China; 4. Renliang Biotechnology (Shanghai) Co. LTD, Shanghai 201800, China)

Abstract: To explain the moisture adsorption properties and improve the package material of polydextrose product, the adsorption and desorption isotherms of five domestic samples with initial moisture content (IMC) of 1.01%~4.89% were determined in this study in the range of 20~35 °C and ERH10%~90% using a dynamic water sorption analyzer. The adsorption and desorption isotherms were sigmoidal-shaped curves, and there was a hysteresis between desorption isotherm and the adsorption isotherm when ERH was less than 80%. Because polydextrose is an amorphous phase powder, we assumed that the water adsorption process of polydextrose was an equilibrium that existed among the vapor phase, the liquid phase (polylayer adsorption) and the solid solution (monolayer adsorption), and the adsorptive and desorptive sigmoidal-shaped isotherms can be de-convolved into a monolayer (M_h) and a polylayer component (M_d) in accordance with Hailwood-Horrobin (HH) model. The polylayer water content of adsorption and desorption showed a sigmoidal increase with increasing ERH. The monolayer water content of desorption remained constant with increasing ERH, while that of the adsorption increased slowly for samples a1 to a4 with IMC 4.87% to 2.35% and decreased almost linearly for sample a5 with IMC 1.01%. As the IMCs of the samples decreased, the molecular weight of the polymer at the sorption site was maximum for sample a1 and minimum for sample a5. Although the FTIR showed the smallest intensity of hydroxyl group ($3\ 416\ \text{cm}^{-1}$) and amorphous structural functional group ($1\ 027\ \text{cm}^{-1}$) for a5 sample, a5 sample had the largest moisture absorption rate. These results suggested that, for the lower moisture content of polydextrose samples processed by different processes, their adsorptive monolayer water content seemed to decrease almost linearly with an increase of ERH. However their adsorptive polylayer water content sigmoidally increased with an increase of ERH, and their moisture absorption rate and hygroscopic capacity increased.

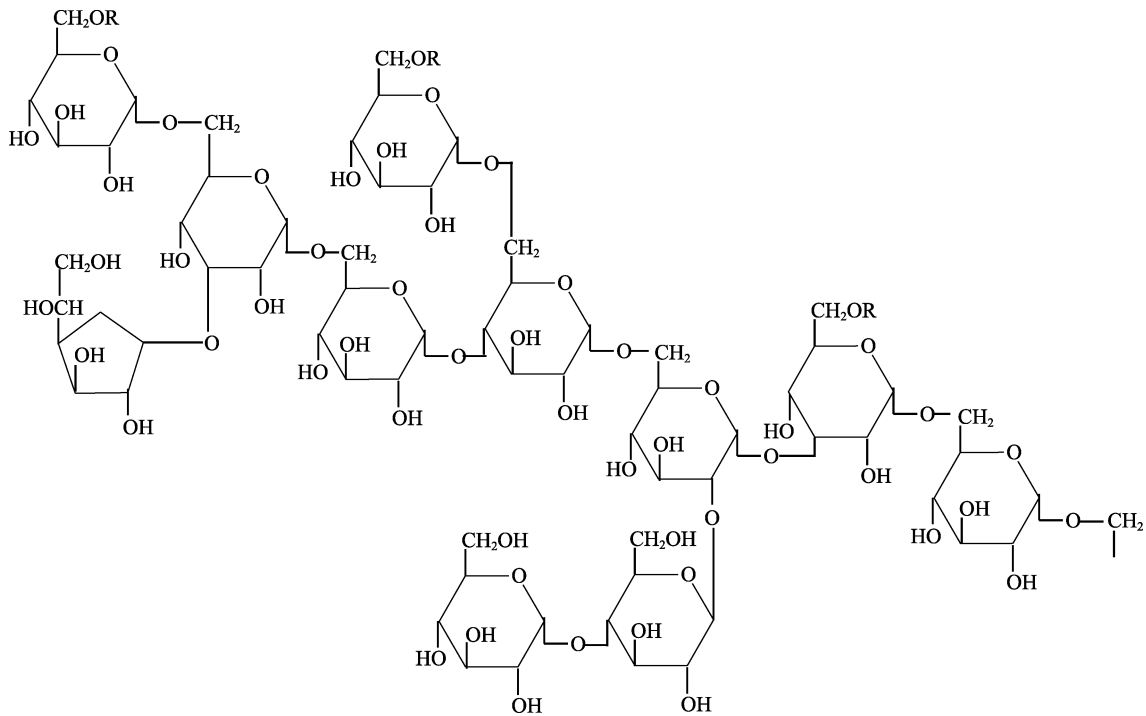
Key words: polydextrose; moisture sorption isotherms; moisture absorption rate; monolayer adsorption; hysteresis loop

聚葡萄糖是由葡萄糖和少量山梨醇、柠檬酸在反应釜中按照 89 : 10 : 1 的比例经高温熔融、真空缩聚 D-葡萄糖而生成的高度分支和随机 α -和 β -糖苷键分布的一种多聚体 (图 1)。我国聚葡萄糖产量在 2020 年是 10.1 万 t, 年产值约 10 亿元; 预计 2026 年产量是 13.5 万 t。它的用量在健康食品、饮料、发酵奶制品、烘焙食品分别占到 39%、21.6%、16.6%及 11.8%, 其余 11%用于巧克力、营养棒等食品。聚葡萄糖作为较昂贵的可溶性膳食纤维, 对人体健康有益。聚葡萄糖是随机连接的葡萄糖聚合物, 所有可能的糖苷键有 α -和 β -1-2、1-3、1-4 及 1-6 连接, 并带有分支, 图

1 中最右侧亚甲基相连接的是葡萄糖基。与抗性糊精的聚合度 (14) 和膳食纤维含量 (约 82%) 比较, 聚葡萄糖的平均聚合度是 12, 膳食纤维含量约 90%。聚葡萄糖是弱酸性、吸湿、水溶性的无定形相态的粉末。聚葡萄糖的甜度极低, 仅为蔗糖甜度的 10%, 抗性糊精呈现微甜。在 10% 的水溶液中, 聚葡萄糖 pH 是 2.5~7, 抗性糊精的 pH 是 4~6。聚葡萄糖的能量值是 1 kcal/g, 而抗性糊精是 0.5~1.4 kcal/g。作为增体剂, 葡聚糖的每天食用量不超过 90 g, 否则可能引起腹泻^[1]。然而, 聚葡萄糖的水分吸附等温线报道较少^[2-3], 水分解吸等温线尚未见报道。在谷物和马铃薯全粉平衡

水分^[4-6]测定基础上,本研究首次测定国产聚葡萄糖样品的水分吸附和解吸等温线,为该产品的吸潮

机理进行分析,并为聚葡萄糖产品生产环节干燥、包装储存及复配食品提供数据支撑。



注: R 是氢原子,葡萄糖基,山梨糖醇基,柠檬酸基或聚葡萄糖基。

Note: R was the group of hydrogen, glucose, sorbitol, citric acid or polydextrose.

图 1 聚葡萄糖的分子结构式

Fig.1 Molecular formula of polydextrose

1 材料与方法

1.1 仪器设备与样品

动态水分吸附测定仪型号 SPS11-10 μ : 德国普优米德有限公司;傅里叶转换红外光谱扫描仪 Nicolet 6700 FTIR: 美国热电公司;烘箱 DHG9070A: 杭州蓝天化验仪器厂。

聚葡萄糖样品,五种样品 a1、a2、a3、a4、a5 的初始含水率(IMC)分别为 4.87%、3.19%、2.52%、2.35%及 1.01%: 人良生物科技(上海)有限公司提供。

1.2 吸潮率

称取 1 g 次粉样品置于已知质量的直径 5 cm、高度 3 cm 的铝盒中,置于 26 °C 保温箱中部的不锈钢丝架上,盛有蒸馏水的瓷盘放在保温箱底部,每隔半小时取出盛有样品的铝盒称重。

1.3 平衡水分等温线测定及数据分析

采用动态水分吸附仪测试聚葡萄糖的吸附和解吸等温线。样品原始含水率采用 105 °C 恒重法

(食品安全国家标准 食品中水分的测定 GB 5009.3—2010)。每次进样时,每个样品克数约 2 g。平衡相对湿度(ERH)范围设定为 10%~90%,等温线温度分别是 20、25、30 及 35 °C。收集的 ERH/EMC 数据以 Kaleidagraph 软件作图,平衡含水率(EMC)为横坐标,ERH 为纵坐标。本研究采用 Hailwood-Horrobin(HH)模型^[7]分析聚葡萄糖水分吸附过程,认为存在未水合聚合物、水合聚合物及多层水三种化学物质,这三种成分被假定为理想的溶液,HH 模型分析蒸汽相态、液体相态(多分子层吸附)及固体溶液(单分子层吸附)之间存在的平衡,将经典的 S 型吸附等温线去卷积为单分子层(M_h)和多分子层成分(M_d)。

$$EMC = M_h + M_d \quad \text{式(1)}$$

$$EMC = \frac{1800}{W} \times \frac{A \cdot B \cdot ERH}{100 + A \cdot B \cdot ERH} + \frac{1800}{W} \times \frac{B \cdot ERH}{100 - B \cdot ERH} \quad \text{式(2)}$$

式中, EMC 是平衡含水率, %湿基; M_h 是单分子层吸附的百分含水率; M_d 是多分子层吸附的百分含水率; ERH 是平衡相对湿度 (%) 或水分活度 (小数表示); A 和 B 分别是单分子层和多分子层水的平衡常数, W 是每个吸附位点聚合物的分子质量。

采用式 2 对聚葡萄糖的水分吸附和解吸数据进行拟合。用 SPSS 软件 (版本 17) 的非线性回归方法, 通过决定系数 (R^2)、残差平方和 (RSS)、标准差 (SE) 及平均相对百分率误差 (MRE%)、残差分布来分析模型的拟合情况^[8]。

平衡水分滞后度 (Hy) 计算公式是

$$Hy = \frac{EMC_{\text{解吸}} - EMC_{\text{吸附}}}{EMC_{\text{吸附}}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.4 傅里叶转换红外光谱 (FTIR) 扫描

样品的 FTIR 记录条件, 光谱分辨率是 4 cm^{-1} ;

100%T 线信噪比: $4\ 300 \sim 4\ 400 \text{ cm}^{-1}$, 64 次扫描 (相当于 1 分钟测量)。样品光谱对没有样品的背景光谱进行记录, 所有测定采用 OMNIC 软件分析。样品与溴化钾混合后研磨, 压成片。扫描范围数 $400 \sim 4\ 000 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.5 数据处理

采用随机区组实验设计, 数据以平均值 \pm 标准差表示。LSD 检验中同一列不相同小写字母表示样品之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 聚葡萄糖吸潮率

从图 2 看出, 在 12 个小时内检测聚葡萄糖吸潮率, 吸潮率随时间持续增加; 对样品 a1、a3、a5, 初始含水率越低, 吸潮率越大。样品 a2 和 a4 的吸潮率曲线与 a3 的相似。

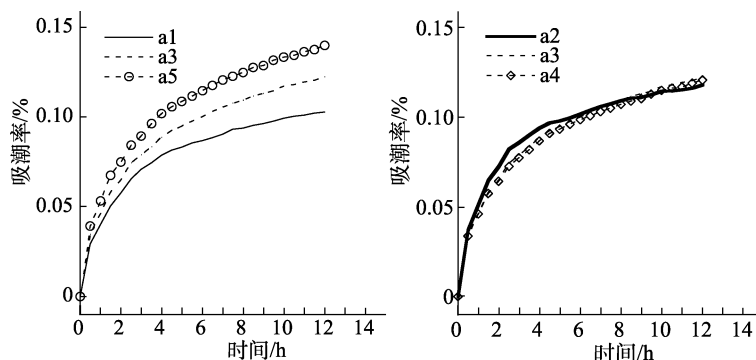


图 2 聚葡萄糖样品吸潮率

Fig.2 The absorption rate of polydextrose samples

2.2 聚葡萄糖水分吸附和解吸等温线

5 个聚葡萄糖样品的水分吸附和解吸等温线呈现 S 型曲线 (图 3), 在 ERH 小于 80%, 解吸等温线与吸附等温线之间存在滞后现象, 样品初始含水率越低, 滞后现象越显著; 随着温度增加, 滞后环变小。

2.3 聚葡萄糖单分子层、多分子层及总平衡水分

HH 方程能够拟合出聚葡萄糖水分吸附和解吸等温线, MRE 范围为 10.6%~12.89%, 尽管 MRE 大于 10%, 但是残差分布均是随机的 (表 1)。本研究认为 HH 方程对聚葡萄糖水分吸着等温线的拟合结果是有效的。随着样品初始含水率减少, 方程的系数 A、B、W 对吸附和解吸呈现一定的

规律。吸附和解吸单分子层水的含量明显区分了 5 个样品, 吸附单分子层水随 ERH 增加对 a1~a4 样品的增加依次变得缓慢, 对 a1 样品则减少 (图 4); 解吸单分子层水随 ERH 增加而保持不变。吸附和解吸的多层水含量, 以及解吸总平衡含水率 (单分子层+多分子层水) 随 ERH 增加均呈现 S 型曲线递增, 随着样品初始含水率减少, 这些指标则增大。吸附总平衡含水率随样品初始含水率减少在 $ERH < 65\%$ 时则减少, 在 $ERH \geq 65\%$ 时则增加。说明 ERH65% 是曲线的拐点, 即玻璃态向橡胶态转变点。

在 $ERH \leq 50\%$, 聚葡萄糖平衡水分滞后度随着 ERH 的增加则急剧减少, 样品初始含水率越大,

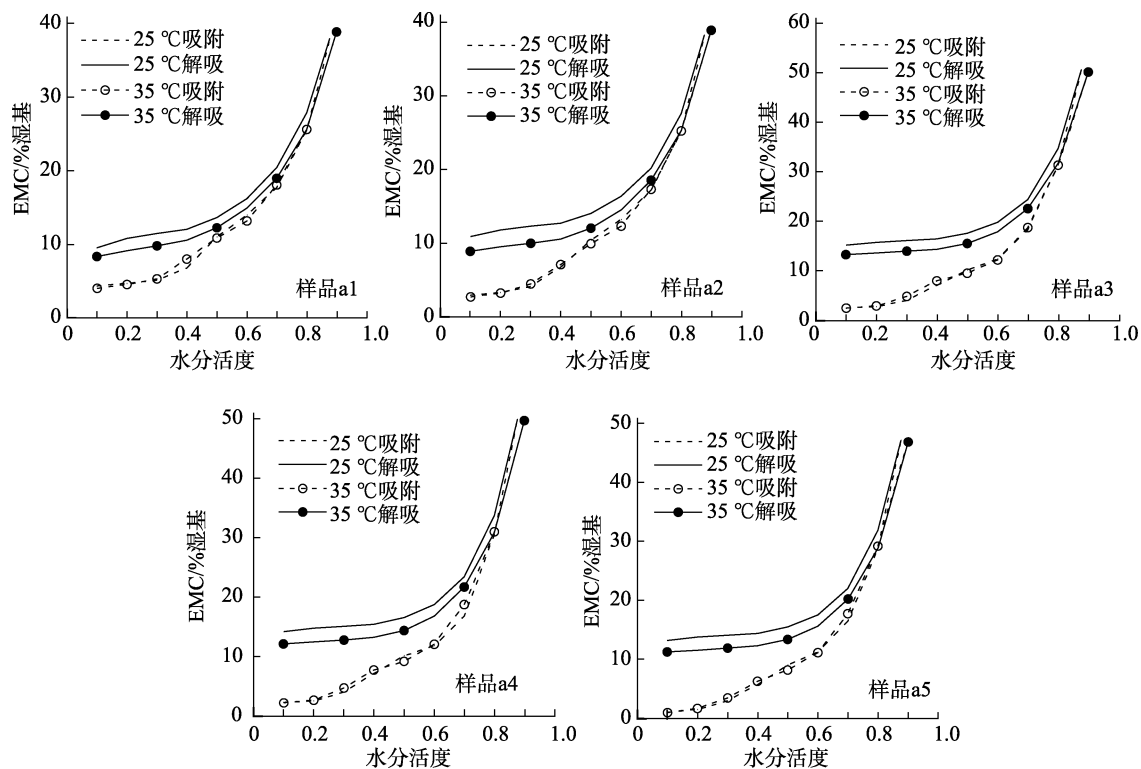


图 3 实测的聚葡萄糖水分吸附和解吸等温线

Fig.3 The experimental moisture adsorptive and desorptive isotherms of polydextrose

表 1 HH 方程对聚葡萄糖水分吸着等温线的拟合结果

Table 1 The fitting results of HH equation to moisture sorption isotherms of polydextrose

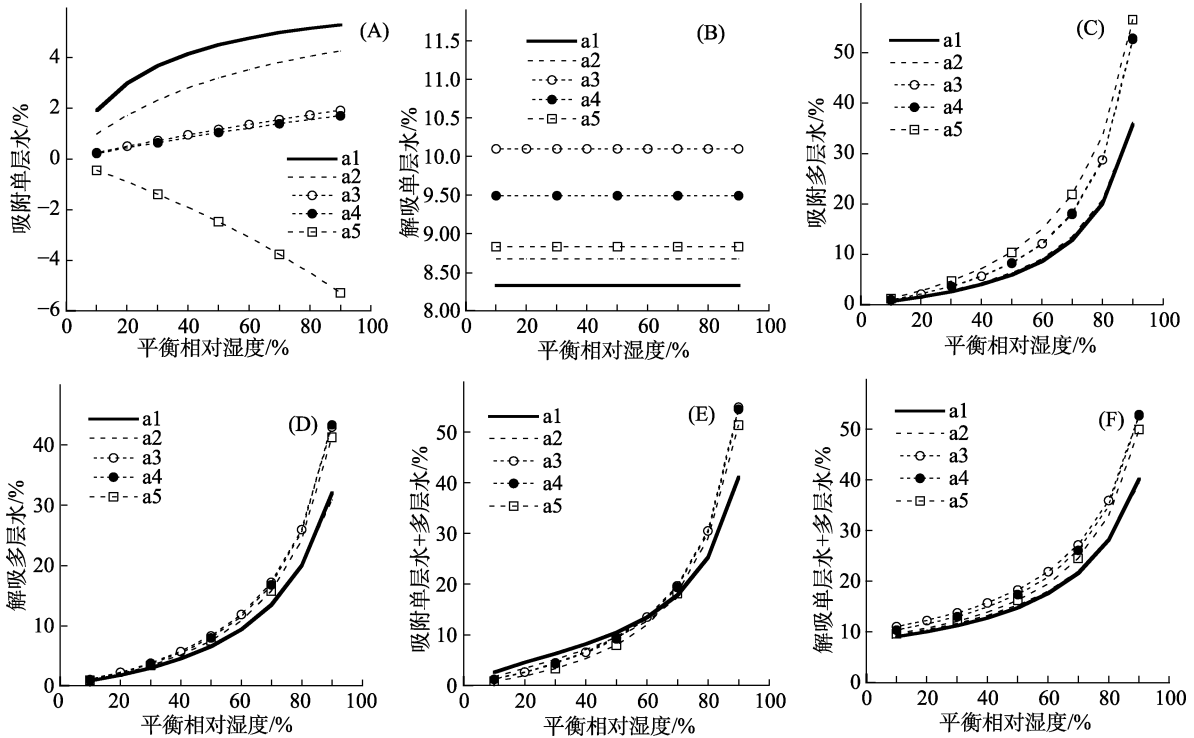
吸着类型	样品	方程			统计	参数			
		A	B	W		RSS	SE	R ²	MRE/%
吸附	a1	4.232	0.933 4	263.483	49.124 1	1.488 6	0.989 3	11.12	R
	a2	1.675	0.923 6	244.011	28.794 3	0.872 6	0.993 9	10.21	R
	a3	0.308	0.945 9	194.198	93.610 7	2.836 7	0.989 6	12.89	R
	a4	0.274	0.947 6	197.384	104.477 2	3.165 9	0.988 3	12.29	R
	a5	-0.363	0.910 7	144.071	82.534 3	2.501 1	0.990 1	11.33	R
解吸	a1	4.901E+12	0.882 1	216.074	152.625 2	4.625 1	0.952 1	10.65	R
	a2	4.067E+08	0.867 5	207.606	195.995 1	5.939 3	0.933 2	12.23	R
	a3	1.281E+09	0.899 4	178.132	332.059 8	10.062 4	0.938 3	12.51	R
	a4	7.061E+08	0.911 5	189.745	319.494 5	9.681 7	0.941 6	12.77	R
	a5	2.114E+09	0.915 2	203.739	286.268 5	8.674 8	0.942 4	12.83	R

滞后度降低越剧烈(图 5)。这是由于随着样品初始含水率降低,吸附过程中吸附点聚合物的分子量显著减少,而解吸过程中吸附点聚合物分子量从 a1 到 a3 显著减少,从 a3 到 a5 则显著增加(图 6)。

2.4 聚葡萄糖样品红外光谱扫描

从图 7 看出,聚葡萄糖样品红外光谱吸收峰至少有 11 个,吸光值大于 1 的峰有两个 1 027 和 3 416 cm^{-1} ,分别代表无定形结构(伯醇 C—OH)

和羟基官能团。这是无定形相态聚葡萄糖粉末的显著特征。1 216 和 1 270 cm^{-1} 分别是 C—OH 和 CH₂OH 基团的伸缩振动峰,1 339、1 647 和 2 932 cm^{-1} 是 CH 和 CH₂ 基团。1 733 cm^{-1} 是 C=O 基团。如表 2,对 a1、a2、a3、a4、a5 五个样品,随着样品初始含水率降低,重要官能基团的吸光强度先增加,再降低,这些官能基团的强度对 a3 样品最大,对 a5 样品最小。这可能解释了 a1~a4 样品单



注：(A) 吸附单层水；(B) 解吸单层水；(C) 吸附多层水；(D) 解吸多层水；(E) 吸附总水分；(F) 解吸总水分。

Note: (A) adsorption of monolayer water content; (B) desorption of monolayer water content; (C) adsorption of polylayer water content; (D) desorption of polylayer water content; (E) adsorption of total water contents; (F) desorption of total water contents.

图 4 聚葡萄糖单分子层、多分子层及总平衡水分随平衡相对湿度的变化

Fig.4 Changes in monlayer, polylayer, and total water contents of polydextrose with ERH

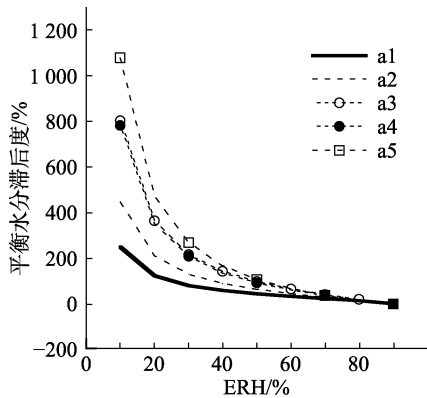


图 5 聚葡萄糖平衡水分滞后度随 ERH 的变化

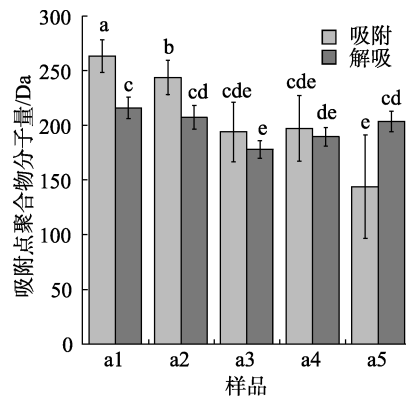
Fig.5 Hysteresis degree of polydextrose EMC with ERH

分子层水含量随 ERH 增加而持续增加，a5 样品的单分子层水含量随 ERH 增加几乎线性减少。

3 讨论

聚葡萄糖具有保湿性能^[2]。当环境湿度相对高时，固体聚葡萄糖会充分吸水，可延缓焙烤食品水分蒸发，阻止产品走味，保持或延长产品的货架寿命。聚葡萄糖另一重要特性是对溶液水活度的影响^[2-3]。水活度会影响食品质构、湿度变化和微生物稳定性。当浓度较低 (<60%) 时，聚葡

萄糖降低水活度的效果不如蔗糖和山梨醇等小分子物质。但在高浓度时，蔗糖会析出结晶，而聚葡萄糖由于是不同分子量的高度分支结构的混合物，不会结晶。由于聚葡萄糖粉末会吸湿，要包装良好并贮存于低湿度条件下。聚葡萄糖的水分吸附等温线缺乏研究，主要原因是其水分吸附等温线测定时间非常长，样品测定小环境中温度



注：不同小写字母代表差异达到显著水平。

Note: Different lowercase letters represent differences at the significant level.

图 6 聚葡萄糖解吸和吸附时的吸附点聚合物分子量

Fig.6 The polymer molecular weight of sorption sites when polydextrose occurs desorption and adsorption

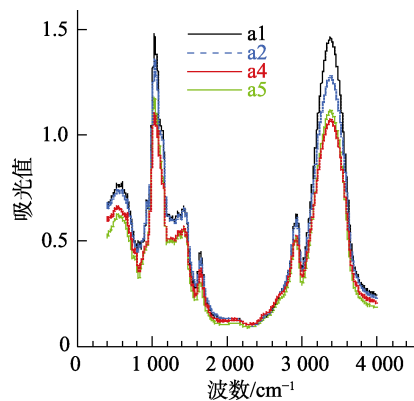


图 7 聚葡萄糖样品的红外光谱扫描

Fig.7 IR scanning curves of polydextrose samples

和相对湿度较长时间保持高精度对设备条件要求高。本研究采用动态水分吸附测定仪，温度采用帕尔贴半导体准确控制，相对湿度以去离子水调节产生，且罗卓尼克 (rotronic) 传感器读数快，能够闭环控制，打湿和干燥样品小室中空气非常及时；采用高纯氮吹干和防止高相对湿度时样品霉变。本研究首次测定了聚葡萄糖解吸等温线，观察到解吸等温线与吸附等温线之间在 ERH 小

于 80% 时存在滞后现象。

4 结论

在 20~35 °C 和 ERH10%~90% 范围测定了初始含水率 (IMC) 1.01%~4.87% 的 5 个聚葡萄糖样品的吸附和解吸等温线，吸附和解吸等温线均是 S 型 (sigmoidal) 曲线，解吸等温线与吸附等温线之间在 ERH 小于 80% 时，存在显著的滞后现象，样品初始含水率越低，滞后现象越显著。按照 Hailwood-Horrobin (HH) 模型将 S 型吸附等温线划分为单分子层 (M_h) 和多分子层成分 (M_d)，吸附和解吸的多分子层含水率随 ERH 增加呈现 S 型曲线增加，解吸单分子层含水率随 ERH 增加保持不变，而吸附单分子层含水率随 ERH 增加对 IMC 2.35%~4.87% 的 a1~a4 样品呈现缓慢地增加，对 IMC 1.0% 的 a5 样品则几乎线性减少。说明无定形相态的聚葡萄糖粉末的吸潮性能大小取决于吸附位点聚合物分子量，吸附位点聚合物分子量越小，吸附单分子层含水率越低，该样品吸潮性能越强。

表 2 聚葡萄糖样品特定波数的红外吸光强度 (a.u.)

Table 2 IR absorption intensity of polydextrose at certain wavenumber

样品	波数/cm ⁻¹					
	445	453	1 027	1 216	1 270	1 339
a1	0.683 8±0.030 7 ^b	0.688 5±0.029 9 ^b	1.450 6±0.078 9 ^b	0.611 8±0.029 8 ^b	0.602 6±0.029 5 ^b	0.626 6±0.031 9 ^b
a2	0.687 2±0.007 0 ^b	0.690 4±0.007 3 ^b	1.363 0±0.010 3 ^b	0.619 6±0.006 9 ^b	0.607 7±0.006 3 ^b	0.630 0±0.006 2 ^b
a3	1.043 3±0.009 5 ^a	1.049 0±0.012 5 ^a	2.335 3±0.036 7 ^a	0.901 4±0.010 0 ^a	0.925 5±0.010 4 ^a	0.980 7±0.010 8 ^a
a4	0.605 5±0.019 2 ^c	0.605 8±0.019 4 ^c	1.087 8±0.033 9 ^d	0.499 9±0.017 4 ^c	0.509 9±0.017 7 ^c	0.539 9±0.018 5 ^c
a5	0.564 5±0.017 7 ^d	0.566 7±0.017 6 ^d	1.195 9±0.037 2 ^c	0.506 1±0.023 8 ^c	0.514 5±0.002 4 ^c	0.540 1±0.025 1 ^c
样品	1 647	1 733	2114	2932	3416	
a1	0.440 9±0.022 2 ^b	0.210 8±0.008 3 ^c	0.133 6±0.004 4 ^b	0.617 2±0.030 3 ^b	1.406 5±0.073 8 ^b	
a2	0.420 2±0.005 0 ^b	0.227 9±0.004 7 ^b	0.137 4±0.002 6 ^b	0.608 9±0.005 6 ^b	1.254 4±0.012 1 ^c	
a3	0.573 8±0.009 9 ^a	0.280 8±0.010 5 ^a	0.191 8±0.011 8 ^a	0.975 4±0.013 5 ^a	2.261 8±0.034 3 ^a	
a4	0.364 4±0.014 0 ^c	0.195 4±0.008 5 ^{cd}	0.129 0±0.007 4 ^c	0.519 8±0.019 4 ^c	1.046 5±0.032 7 ^c	
a5	0.321 0±0.022 1 ^d	0.177 7±0.001 7 ^d	0.123 2±0.015 7 ^c	0.532 2±0.024 1 ^c	1.119 4±0.032 9 ^d	

注：同一列不同小写字母表示差异达到显著水平。

Different small letters in the same column indicate significant difference.

参考文献:

[1] O'BRIEN-NABOR L. Alternative sweeteners (4thed.) [M]. Unit States of American, Boca Raton: CRC Press. 2012.

[2] LI Q E, SCHMIDT S J. Use of ramping and equilibrium water-vapor sorption methods to determine the critical relative humidity at which the glassy to rubbery transition occurs in polydextrose [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): E149-E153.

- [3] WONG K Y, THOO Y Y, TAN C P, et al. Moisture absorption behavior and thermal properties of sucrose replacer mixture containing inulin and polydextrose[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2, 100089.
- [4] 李兴军, 姜平. 稻谷及其加工产品平衡水分研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2014, 22(6): 100-105.
LI X J, JIANG P. Advance in the equilibrium moisture of paddy and its processed products[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2014, 22(6): 100-105.
- [5] 文韵漫, 李兴军, 陈治天, 等. 马铃薯全粉水分吸附等温线及吸附等热研究[J]. *粮油食品科技*, 2019, 27(1): 63-68.
WEN Y M, LI X J, CHEN Z T, et al. A study on moisture adsorption isotherms and isosteric heat of potato meals[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2019, 27(1): 63-68.
- [6] CHEN Z T, WANG R L, LI X J, et al. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of cold plasma treated milled rice[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 55: 35-47.
- [7] HILL C A, NORTON A, NEWMAN G. The water vapor sorption behavior of natural fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112: 1524-1537.
- [8] LI X J, HAN X, TAOLS, et al. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese wheat bran products added to rice to increase its dietary fiber content[J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2021, 4: 149-161. 完