

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.03.009

王梦雅, 赵明慧, 高光标, 等. 七参数多项式方程拟合氦等离子体处理面粉的水分吸着等温线[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 93-100.

WANG M Y, ZHAO M H, GAO G B, et al. Proposing a seven-parameter polynomial equation to fit the moisture sorption isotherms of helium cold plasma-treated wheat flours[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 93-100.

七参数多项式方程拟合氦等离子体处理面粉的水分吸着等温线

王梦雅^{1,2,3}, 赵明慧^{1,2,3}, 高光标^{1,2,3}, 吴建章¹, 李兴军^{2,3}✉, 王万贵⁴

1. 河南工业大学 粮食和物资储备学院, 河南 郑州 450001;
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. 粮食储运国家工程研究中心, 北京 100037;
4. 山东良友储备粮承储有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:为了解释小麦面粉经过冷等离子体处理后面团吸水率增加的成因,采用120 W低压强射频氦冷等离子体处理面粉0~180 s,随着等离子体处理时间增加,小麦面粉吸水率、电导率、水和蔗糖溶剂保持力(SRC)值及糊化衰减值显著增加,深入探究这些指标变化原因,我们提出一个七参数多项式 $M = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E \cdot ERH + F \cdot ERH^2 + G \cdot ERH^3$ (M 是平衡水分%, ERH 是小数表示的平衡相对湿度, t 是温度 $^{\circ}\text{C}$, A ~ G 是参数),能够拟合氦冷等离子体处理面粉的水分吸着等温线,拟合度指标优于修正Chung-Pfost(常用)和四参数多项式(不含温度项)方程。七参数多项式方程能够清晰显示面粉样品水分吸附与解吸等温线之间的滞后环,随着温度增加,滞后环下移,且滞后度随 ERH 增加呈现抛物线形状,抛物线顶点在 ERH 40%~50%。冷等离子体处理将单分子层吸附位点转变为多分子层吸附位点的区域提前了,由 ERH 50%转变为40%。用Dent模型分析显示,氦冷等离子体处理能够降低面粉单分子层含水量和扩展压强,增加毛细管壁弹性,水分子与化学成分形成氢键的能力加大,促进水分子向面粉颗粒均匀分布和渗透。红外光谱扫描显示面粉中淀粉粒表面短程有序化程度及淀粉与蛋白的作用程度增大。氦冷等离子体技术在改善面粉加工品质具有应用潜力。

关键词: 多项式平衡水分方程; 面粉; 氦冷等离子体; 滞后环; 扩展压强

中图分类号: TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)03-0093-08

网络首发时间: 2024-05-09 13:58:08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240509.1056.014>

Proposing a Seven-parameter Polynomial Equation to Fit the Moisture Sorption Isotherms of Helium Cold Plasma-treated Wheat Flours

WANG Meng-ya^{1,2,3}, ZHAO Ming-hui^{1,2,3}, GAO Guang-biao^{1,2,3},
WU Jian-zhang¹, LI Xing-jun^{2,3}✉, WANG Wan-gui⁴

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 山东省重点研发计划课题(202CXGCO108053-3-3)

Supported by: Key Research and Development Project of Shandong Province (No. 202CXGCO108053-3-3)

作者简介: 王梦雅, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 研究方向为粮食生化与食品工程。E-mail: ahueqw1007@163.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食品工程。E-mail: lxj@ags.ac.cn

(1. College of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Institute of Grain Storage and Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 3. National Engineering Research Centre for Grain Storage and Logistics, Beijing 100037, China; 4. Shandong Liangyou Stored Grain Chengchu LTD. Co. Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: For seeking the cause of the increase in dough water absorption rate after cold plasma treatment, this study adopted low-pressure, radiofrequency 120 W helium cold plasma (CP) to treat wheat flours from 0 s to 180 s. Results showed that water absorption rate, conductivity, values of water and sucrose solvent retention capacity (SRC), and paste breakdown value in wheat flours increased significantly with increasing CP treatment time. To further explore the change causes in these physiochemical indexes, we developed a seven-parameter polynomial $M = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E \cdot ERH + F \cdot ERH^2 + G \cdot ERH^3$, (M was equilibrium moisture (%), ERH was equilibrium relative humidity (decimal), t was temperature ($^{\circ}\text{C}$), and $A \sim G$ were parameters. This polynomial could fit moisture sorption isotherms (20-35 $^{\circ}\text{C}$ and ERH 10%-90%) of helium CP treated flours, and the goodness-of-fit indexes were superior to those of modified Chung-Pfost (commonly used) and four-parameter polynomial (without temperature term) equations. The seven-parameter polynomial equation clearly showed the hysteresis loops between moisture adsorption and desorption isotherms of flour samples, which shifted downward with increasing temperature. The hysteresis degree showed a parabolic shape curve with increasing ERH , and the vertex of the parabola was at the range of 40-50% ERH . CP treatment shifted the monolayer adsorption sites to multi-molecular adsorption sites ahead of schedule, from ERH 50% to 40%. Further analysis using Dent model showed that the helium CP treatment was able to reduce the mono-layer moisture content and spreading pressure in wheat flour, and increase the elasticity of a capillary wall. The ability of water molecules was increased to form hydrogen bonds with the chemical components, which promoted the uniform distribution and permeation of water molecules into flour particles. Infrared spectral scanning showed that the degree of short-range order at the surface of starch granules and the interaction between protein and starch tended to increase with increasing CP time. Helium cold plasma technology has potential application in improving flour processing quality.

Key words: polynomial equilibrium moisture equation; flour; helium-cold plasma; hysteresis loop; extended pressure

冷等离子体处理能够促进面粉麦谷蛋白之间形成二硫键, 提高面团的强度^[1]。然而冷等离子体处理面粉的吸湿特性缺乏研究。平衡水分等温线对于预测食品的货架期, 选择储藏条件和包装材料, 设计干燥操作模型和设备, 以及计算热动力参数如焓和熵都非常重要, 国际上有 200 多个描述方程^[2-3]。近年来, 国内粮食行业提出了四个参数的 CAE 方程、含有温度与相对湿度互作的 7 参数多项式、11 个参数多项式^[2]。对同一粮食类型和品种, 采用饱和盐溶液调湿和静态称重法测定吸附和解吸等温线, 肯定了存在滞后现象, 分析了安全储运水分, 并将 CAE 方程用于储粮智能化机

械通风示范应用^[5]。深入研究方向应当是分析滞后环的形状、提出新方程, 重视粮食加工品水分吸着等温线的测定及解释食品加工和储藏中的现象。本研究提出一个七参数多项式方程拟合面粉水分吸着等温线, 考虑温度和湿度的多次项对平衡含水率的贡献, 有助于分析面筋蛋白和淀粉的吸附和促进冷等离子体技术在面粉行业的应用。

1 材料与方法

1.1 仪器设备与样品

冷等离子体发生仪 (HD-3N): 江苏常州冷等离子体种子处理机有限公司; 快速粘度分析仪

(RVA-TecMaster): 波通瑞华科学仪器北京(有限)公司; 高速冷冻离心机(3-30K): sigma 公司; 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。面粉样品采用 120 W 低压强射频氦冷等离子体分别处理 0、30、60、90、120、150、180 s。

1.2 理化指标、平衡水分等温线测定及数据分析

面粉的电导率和吸水率参照徐咏宁等^[4]方法, 溶剂保持力参考 Li 等^[5]方法。面粉糊化衰减采用快速粘度测定仪(RVA)测定。面粉吸着等温线用动态水分吸附仪测试。样品原始含水率采用 105 $^{\circ}$ C 恒重法(GB 5009.3—2010)。每次进样时每个样品约 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 $^{\circ}$ C。收集的 ERH/EMC 数据以 Kaleidagraph 软件作图。采用 SPSS 软件(版本 17)和表 1 方程对面粉水分吸附和解吸数据进行拟合, 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%)来评价模型好坏。MRE 小于 10%时模型拟合度好。

平衡水分滞后度(H_y)计算公式是

$$H_y = \frac{EMC_{\text{解吸}} - EMC_{\text{吸附}}}{EMC_{\text{吸附}}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

扩展压强(ϕ , J/m²)为,

$$\phi = \frac{K_b T}{A_m} \ln \left[\frac{1 + A \cdot ERH - B \cdot ERH}{1 - B \cdot ERH} \right] \quad \text{式(2)}$$

式中, K_b 是常数 1.38E-23 J/K, T 是绝对温度(K), A_m 是一个水分子的表面积 1.06E-19 m², A 和 B 是 Dent 模型系数。

表 1 本研究采用的水分吸附等温线模型
Table 1 Models for fitting the moisture sorption isotherms

方程名称	缩写	$M = f(ERH, t)$
修正的 Chung-Pfost	MCPE	$M = -\frac{1}{C} \ln \left[-\frac{(t+B)\ln(ERH)}{A} \right]$
四参数多项式	4-para	$M = A + B \cdot ERH + C \cdot ERH^2 + D \cdot ERH^3$
七参数多项式	7-para	$M = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E \cdot ERH + F \cdot ERH^2 + G \cdot ERH^3$
Dent 模型		$M = \frac{X_m \cdot ERH}{1/A + (1-2B/A)ERH - (B-B^2/A)ERH^2}$

注: 4-para 引自文献[6]; Dent 模型参考文献[7]; ERH 是小数表示的平衡相对湿度; M 是平衡含水率(%); X_m 是单分子层含水量(%); t 是温度($^{\circ}$ C); A~D 是方程的系数。

Notes: 4-para was cited from reference[6]; Dent model comes from reference[7]; ERH was equilibrium relative humidity, decimal; M was equilibrium moisture content(%); X_m was the monolayer water content(%); t was temperature($^{\circ}$ C); A~D were the equation coefficients.

1.3 傅里叶转换红外光谱扫描

样品与溴化钾混合后研磨, 压成片, 扫描范围 400~4 000 cm⁻¹。所有测定用 OMNIC 软件分析。

1.4 数据处理

采用随机区组实验设计, LSD 检验中同一列不同小写字母表示样品之间差异显著($P < 0.05$)。

2 结果与分析

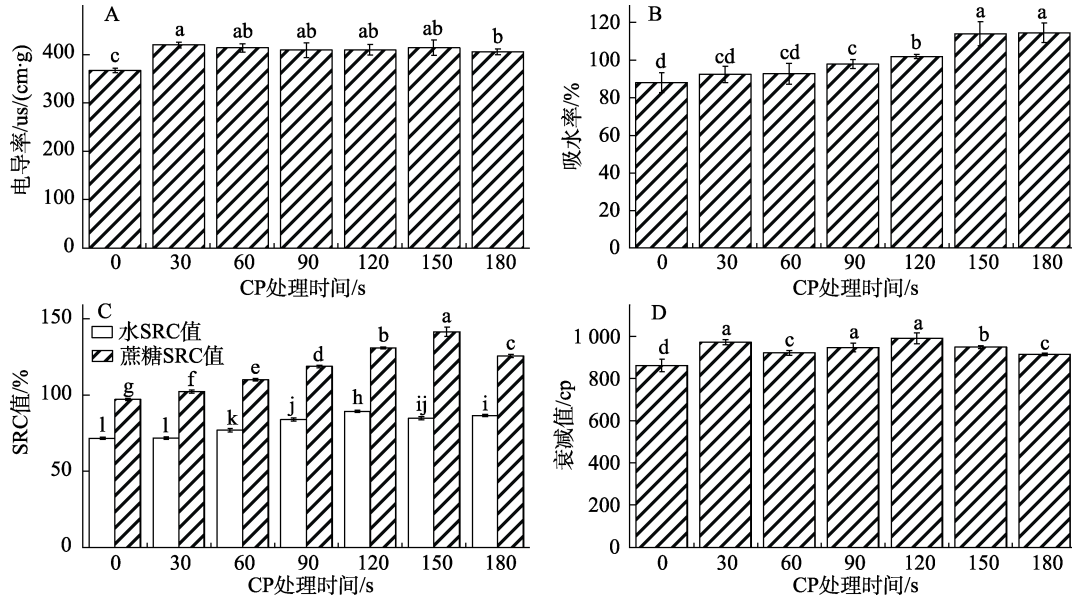
2.1 面粉的理化品质指标变化

随着 120 W 氦冷等离子体处理时间增加, 面粉吸水率、电导率、水和蔗糖溶剂保持力(SRC)值、糊化衰减显著增加(图 1), 表明氦冷等离子体能够促进营养成分的释放, 促进阿拉伯木聚

糖的膨胀, 提高淀粉糊化程度。

2.2 面粉的水分吸着等温线拟合

图 2A 和 2B 分别是实测的对照和 120 W 氦冷等离子体(He)处理 120 s 的面粉在 20 $^{\circ}$ C 和 30 $^{\circ}$ C 吸附和解吸等温线, 等温线是 S 型曲线, 存在明显的滞后现象, 随着温度增加, 等温线下移。表 1~2 分别是 MCPE、4-para 和 7-para 多项式拟合的等温线方程系数和统计学参数。拟合度指标 7-para 多项式 > MCPE > 4-para 多项式(表 4)。MCPE 方程拟合的吸着等温线不能够显示滞后环(图 2C 和 2D), 4-para 多项式拟合的吸着等温线不能够显示温度的影响(图 2E 和 2F), 而 7-para 多项式显示了滞后环和温度的影响(图 2G 和 2H)。

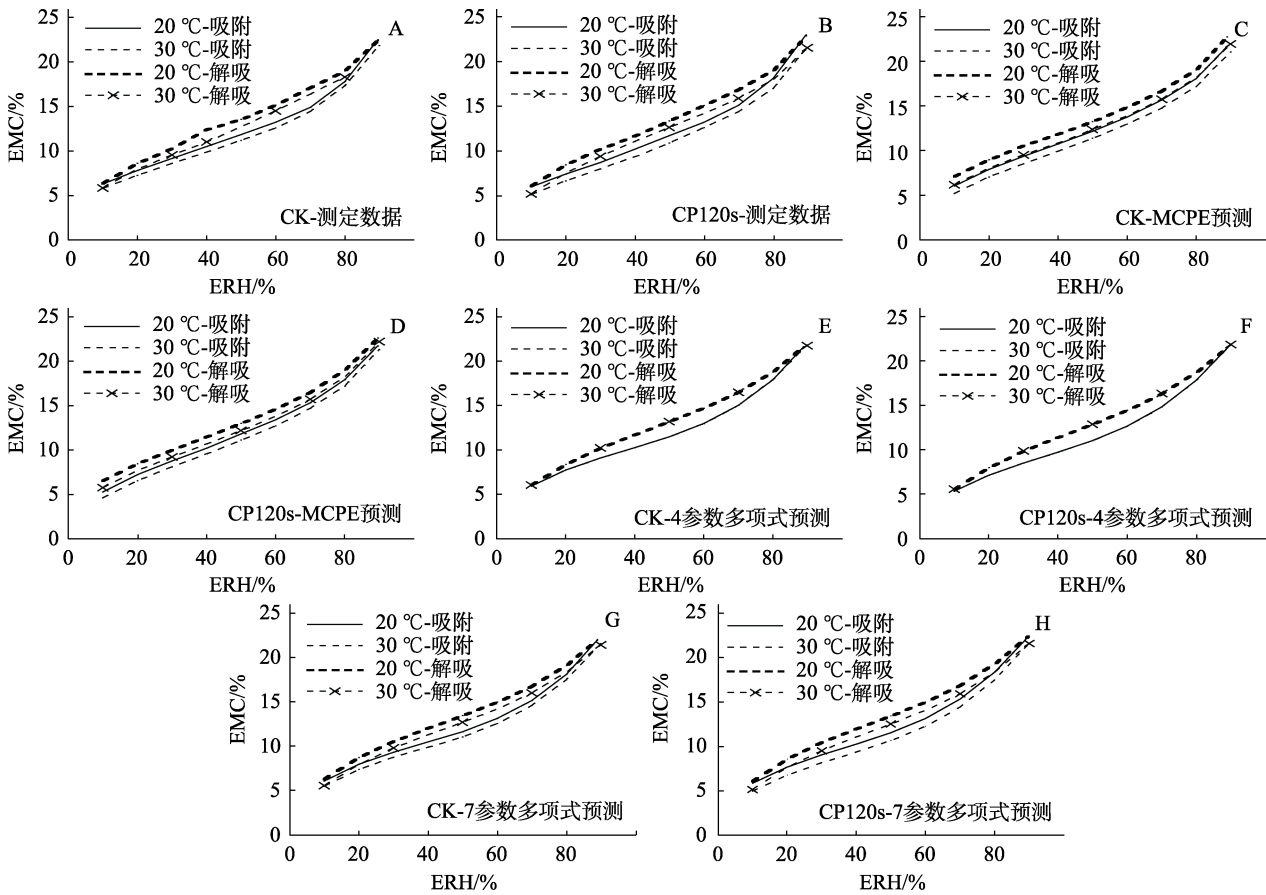


注：A：电导率；B：吸水率；C：SRC 值；D：衰减值。不同小写字母表示差异达到显著水平。

Note: A: conductivity; B: water absorption rate; C: solvent retention capacity value; D: paste breakdown value. Different small letters indicate significant difference.

图 1 氦冷等离子体对面粉理化指标的改善

Fig.1 The improvement of physico-chemical indexes in helium CP treated wheat flours



注：A：CK-测定数据；B：CP120s-测定数据；C：CK-MCPE 预测；D：CP120s-MCPE 预测；E：CK-4-参数多项式预测；F：CP120s-4-参数多项式预测；G：CK-7-参数多项式预测；H：CP120s-7-参数多项式预测。

Note: A: CK-measured data; B: CP120s-measured data; C: CK-MCPE predicting; D: CP120s-MCPE predicting; E: CK-4-para-polynomial predicting; F: CP120s-4-para-polynomial predicting; G: CK-7-para-polynomial predicting; H: CP120s-7-para-polynomial predicting.

图 2 实测的对照和 120 W 氦 120 S 处理面粉样品等温曲线及 3 种方程拟合等温线

Fig.2 The measured isotherms of the control and 120W-He CP-120s treated samples and the fitted isotherms by three equations

表 2 MCPE 和四参数多项式方程 (4-para) 拟合的方程系数和统计参数
Table 2 Fitting equation parameters and statistical parameter in MCPE and 4-parameter polynomial

类型	样品	方程				统计		参数	
		A	B	C	D	RSS	SE	R ²	MRE/%
MCPE 吸附	对照	415.963	35.661	0.194		6.503 2	0.154 8	0.993 5	2.641 7
	He-30s	401.421	40.069	0.188		6.565 4	0.156 3	0.993 8	2.692 9
	He-60s	444.029	49.178	0.186		6.418 1	0.152 8	0.994 1	2.731 4
	He-90s	443.407	48.978	0.185		6.342 7	0.151 1	0.994 2	2.768 6
	He-120s	476.203	57.871	0.185		6.553 6	0.156 1	0.994 1	2.776 6
	He-150s	440.452	54.349	0.184		6.282 9	0.149 6	0.994 3	2.783 1
	He-180s	508.471	69.158	0.183		6.680 6	0.159 1	0.993 9	2.813 1
MCPE 解吸	对照	461.559	29.936	0.195		8.463 0	0.201 5	0.991 5	3.252 1
	He-30s	432.959	31.427	0.189		7.713 7	0.183 7	0.992 6	3.087 9
	He-60s	468.359	37.358	0.188		7.768 4	0.185 1	0.992 7	3.128 3
	He-90s	466.265	36.421	0.187		7.821 5	0.186 3	0.992 7	3.181 4
	He-120s	485.824	41.326	0.188		8.149 9	0.194 1	0.992 3	3.207 4
	He-150s	466.659	41.068	0.187		7.235 8	0.172 3	0.993 2	3.078 9
	He-180s	512.513	48.596	0.187		8.116 2	0.193 2	0.992 4	3.247 6
4-para 吸附	对照	3.402	29.657	-47.991	41.941	20.393 6	0.497 4	0.979 5	5.017 7
	He-30s	3.205	28.768	-46.153	41.526	18.767 3	0.457 7	0.982 3	5.096 0
	He-60s	3.123	28.314	-44.678	40.545	15.674 8	0.382 3	0.985 4	4.542 8
	He-90s	3.197	28.031	-43.571	39.791	16.085 5	0.392 3	0.985 3	4.517 7
	He-120s	2.904	28.507	-44.855	40.666	13.850 1	0.337 8	0.987 3	4.259 3
	He-150s	2.707	28.888	-45.401	41.009	14.710 4	0.358 8	0.986 7	4.534 0
	He-180s	2.529	29.274	-46.202	41.575	12.251 7	0.298 8	0.988 9	3.897 5
4-para 解吸	对照	3.027	34.304	-44.193	32.412	22.755 6	0.555 1	0.977 2	5.085 6
	He-30s	2.639	35.573	-46.797	34.488	22.951 6	0.559 8	0.978 1	5.115 3
	He-60s	2.541	35.755	-47.035	34.695	19.568 1	0.477 3	0.981 5	4.716 2
	He-90s	2.692	35.249	-45.809	33.969	20.515 2	0.500 4	0.980 8	4.797 5
	He-120s	2.397	35.942	-47.489	35.037	18.276 6	0.445 8	0.982 8	4.623 4
	He-150s	2.289	35.721	-47.266	35.143	18.042 8	0.440 1	0.983 2	4.655 2
	He-180s	2.099	36.643	-49.247	36.372	15.996 8	0.390 2	0.985 1	4.320 7

表 3 七参数多项式方程拟合的方程系数和统计参数
Table 3 Equation parameters and statistical parameter in 7-parameter polynomial

类型	样品	7-参数							拟合度	
		A	B	C	D	E	F	G	R ²	MRE/%
吸附	对照	13.288	-1.038 0	3.573E-02	-4.248E-04	31.482	-52.861	45.494	0.996 8	1.896 1
	He-30s	2.583	0.277 8	-1.601E-02	2.245E-04	30.183	-49.931	44.283	0.996 8	1.736 4
	He-60s	1.818	0.333 8	-1.733E-02	2.347E-04	29.518	-47.892	42.891	0.996 5	1.871 5
	He-90s	1.276	0.416 3	-2.078E-02	2.803E-04	29.235	-46.784	42.136	0.996 5	1.948 0
	He-120s	-1.088	0.654 2	-2.953E-02	3.860E-04	29.489	-47.479	42.581	0.996 4	2.021 6
	He-150s	-0.983	0.628 1	-2.888E-02	3.812E-04	29.950	-48.238	43.079	0.996 6	2.078 9
	He-180s	-2.304	0.734 8	-3.193E-02	4.097E-04	30.079	-48.353	43.146	0.996 3	2.205 7
解吸	对照	9.651	-0.617 9	1.901E-02	-2.153E-04	36.099	-48.985	35.908	0.995 9	1.735 9
	He-30s	2.779	0.173 1	-1.101E-02	1.459E-04	37.086	-50.835	37.436	0.996 1	1.601 8
	He-60s	1.322	0.316 3	-1.582E-02	1.998E-04	37.051	-50.498	37.223	0.996 3	1.614 9
	He-90s	1.805	0.283 3	-1.484E-02	1.908E-04	36.599	-49.414	36.601	0.996 1	1.682 1
	He-120s	-7.845E-03	0.444 7	-2.017E-02	2.477E-04	37.085	-50.545	37.268	0.996 1	1.662 9
	He-150s	1.18	0.299 1	-1.521E-02	1.951E-04	36.965	-50.588	37.568	0.996 2	1.643 3
	He-180s	-1.074	0.519 9	-2.254E-02	2.735E-04	37.619	-51.854	38.276	0.996 1	1.703 1

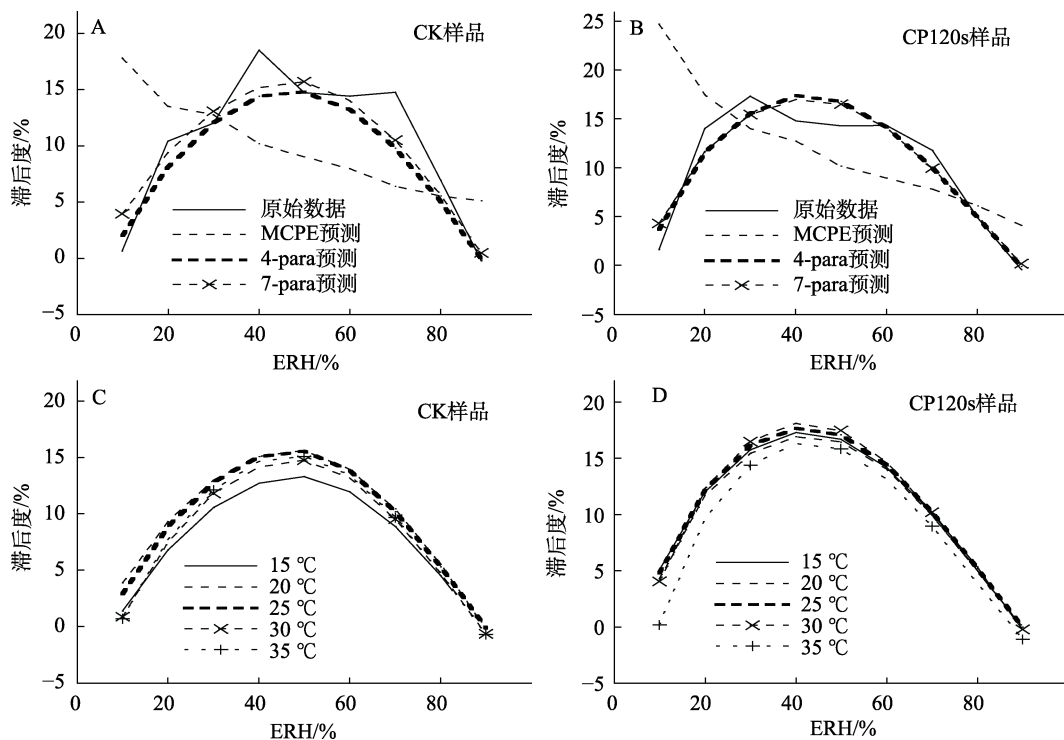
表 4 方程拟合优劣排序
Table 4 The order of fitting equations

方程	类型	RSS	SE	R ²	MRE/%	排序
MCPE	吸附	6.478 1±0.138 4	0.154 3±0.003 3	0.994 1±0.000 3	2.743 9±0.059 5	2
	解吸	7.895 5±0.392 7	0.188 1±0.009 3	0.992 5±0.000 5	3.169 1±0.072 1	2
4-para	吸附	15.961 9±2.810 7	0.389 3±0.068 6	0.985 1±0.003 2	4.552 1±0.414 1	3
	解吸	19.729 5±2.551 8	0.481 2±0.062 2	0.981 2±0.002 8	4.759 1±0.276 3	3
7-para	吸附	3.708 8±0.316 5	0.098 6±0.009 3	0.996 6±0.000 2	1.965 4±0.152 8	1
	解吸	4.146 3±0.133 3	0.109 1±0.003 5	0.996 1±0.000 1	1.663 4±0.047 8	1

等离子体处理面粉及对照样品水分吸附滞后度随 ERH 增加大体上呈现抛物线形状 (图 3A 和 3B), 七参数和四参数多项式方程预测这种曲线为光滑的抛物线, 抛物线顶点在 ERH 40%~50%, 而 MCPE 方程预测为不规则的线性。七参数多项式方程预测的滞后度曲线随温度增加或减少变化规律不明显, 但是 120 W 氦等离子体处理样品的滞后度拐点在 ERH 40%, 而对照样品则在 ERH 50% (图 3C 和 3D), 说明冷等离子体处理将单分子层吸附位点转变为多分子层吸附位点提前了, 由于毛细管壁弹性增加, 干物质与面粉中存在水之间形成氢键的能力加大。

表 5 显示, 随着氦等离子体处理时间增加, 单分子层水含量 (X_m) 减少, Dent 模型系数 A 减少, B 增加。扩展压强等温线随着温度增加则上移 (图 4A), 同样温度和 ERH 下, 吸附扩展压强大于解吸的扩展压强; 氦冷等离子体处理降低扩展压强 (图 4B), 即降低表面过剩自由能 (或表面张力), 促进水分子向面粉颗粒均匀分布和渗透。

图 5 显示, 面粉红外光谱吸收峰超过 15 个, 吸收峰值的比率 R_{1022/995}、R_{1047/1022}、R_{1068/1022} 分别表示分子内氢键的强度、短程次序螺旋的对齐、蛋白质与淀粉相互作用。随着 120 W 氦等离子体



注: A: CK 样品; B: CP120s 样品; C: CK 样品; D: CP120s 样品; A 和 B 是 20 °C 的滞后度曲线, C 和 D 是七参数多项式拟合滞后度曲线。

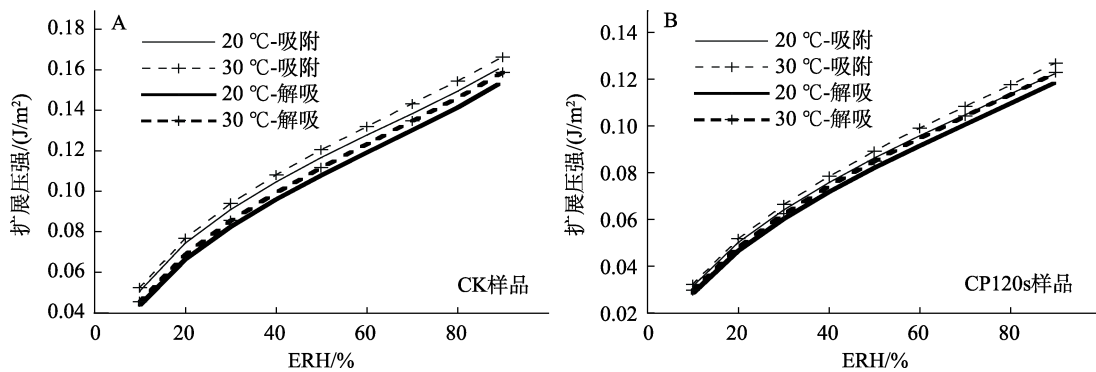
Note: A: CK-sample; B: CP120s-sample; C: CK-sample; D: CP120s-sample; A and B are 20 °C hysteresis curves, C and D are 7-parameter polynomial fitting hysteresis curves.

图 3 方程预测的对照和 CP120s 处理样品的滞后度曲线

Fig.3 The hysteresis curves of CK and CP120s treated samples by fitted by equations

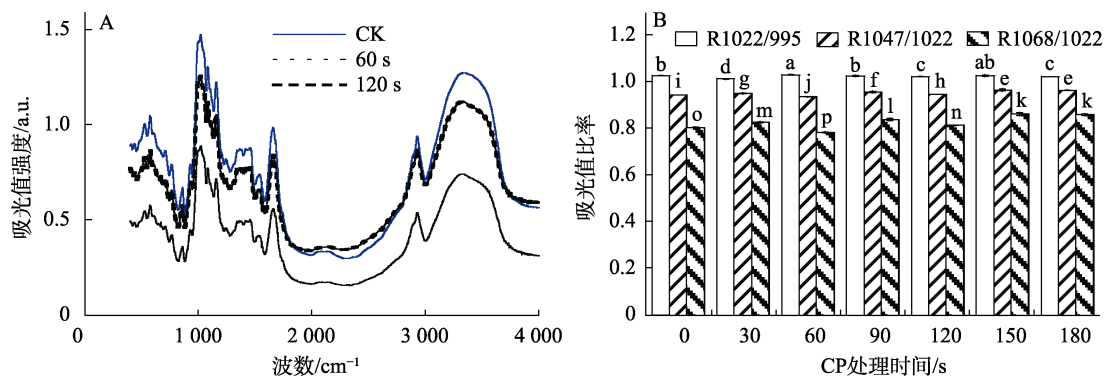
表 5 Dent 模型对面粉样品 EMC 数据拟合的方程参数和统计学参数
Table 5 Dent model parameters and statistical parameters for the EMC data of wheat flour samples

吸着类型	样品	Dent 模型			统计学参数	
		Xm/%	A	B	R ²	MRE/%
吸附	对照	7.677	25.764	0.725	0.979 1	5.047 5
	He-30s	7.472	23.382	0.739	0.982 5	5.087 7
	He-60s	7.443	21.834	0.742	0.985 7	4.529 3
	He-90s	7.534	21.492	0.741	0.985 6	4.483 5
	He-120s	7.355	20.092	0.745	0.987 6	4.232 2
	He-150s	7.312	18.575	0.747	0.987 1	4.493 7
	He-180s	7.242	17.626	0.751	0.989 4	3.872 2
	解吸	对照	10.181	11.930	0.609	0.976 6
He-30s		10.067	11.083	0.619	0.977 6	5.136 3
He-60s		10.052	10.784	0.621	0.980 9	4.708 8
He-90s		10.109	11.037	0.622	0.980 4	4.777 7
He-120s		9.973	10.478	0.623	0.982 2	4.582 6
He-150s		9.835	10.265	0.629	0.982 7	4.629 9
He-180s		9.814	9.971	0.629	0.984 4	4.314 6



注：A：CK 样品；B：CP120s 样品。
Note: A: CK-sample; B: CP120s-sample.

图 4 面粉样品扩展压强的吸附/解吸等温线
Fig.4 Spreading pressure sorption isotherms for wheat flours



注：A：吸光值强度；B：吸光值比率。不同小写字母表示差异达到显著水平。
Note: A: absorbance intensity; B: absorbance ratio. Different small letters indicate significant difference.

图 5 氦冷等离子体处理的面粉样品的红外光谱扫描
Fig.5 The infrared spectral scanning analysis of helium CP treated wheat flours

处理时间增加, $R_{1047/1022}$ 和 $R_{1068/1022}$ 呈现增加趋势, 即淀粉粒表面的短程有序化程度、淀粉与蛋白质作用加强, 面筋强度加大。

3 讨论

美国农业生物工程学会 (ASABE) 一直推荐 MCPE 方程是谷物及加工品水分吸着等温线的最佳拟合方程^[2,8], 该方程是含有三个参数的互逆方程, 容易求导数, 用于吸着等热计算, 能够显著区分温度对等温线的影响, 缺点是不能够显示吸附与解吸之间的滞后环。Li-Schmidt^[6]采用的四参数多项式方程能够显示面粉水分吸附完美的滞后环, 而不能区分温度对滞后环的影响。本研究提出的七参数多项式方程完美地显示了面粉水分吸附滞后环和温度对滞后环的影响。近年研究认为, 冷等离子体通过降低粮食籽粒水滴接触角和表面能而改善粮粒品质参数^[9]。本研究首次分析氦冷等离子体处理面粉的水分吸着等温线, 发现冷等离子体能够降低单分子层含水量和扩展压强, 将吸附滞后度曲线顶点由 ERH 50% 转变为 ERH40%, 将单分子层吸附位点转变为多分子吸附位点提前了; 冷等离子体降低面粉颗粒表面张力, 增加毛细管壁弹性, 水分子与化学成分形成氢键的能力加大, 促进水分子向面粉颗粒均匀分布和渗透。这反映在面粉吸水率、水和蔗糖的溶剂保持力 (SRC) 及糊化衰减值均增大。深入分析冷等离子体处理小麦加工品的吸湿特性有助于延长产品的货架期。

4 结论

粮食及农产品水分吸附等温线拟合方程经过 70 多年的研发, 随着温度和平衡相对湿度测试准确性的不断提高, 需要提出新方程以解释面粉水分吸附的滞后现象。本研究提出七参数多项式方程含有温度和相对湿度的 1~3 次项, 显示了温度对面粉水分吸附滞后环的影响, 并显示吸附滞后度曲线顶点在 ERH 40%~50% 之间。采用 Dent 模型分析表明氦冷等离子体处理能够降低面粉单分子层含水量和扩展压强, 将吸附滞后度曲线顶点由 ERH 50% 转变为 ERH 40%, 降低面粉颗粒表面

张力, 促进水分子向面粉颗粒均匀分布和渗透, 从而增大了面粉吸水率、水和蔗糖的溶剂保持力 (SRC) 及糊化衰减值。氦冷等离子体技术在改善面粉加工品质具有应用潜力。

参考文献:

- [1] CHAPLE S, SARANGAPANI C, JONES J, et al. Effect of atmospheric cold plasma on the functional properties of whole wheat (*Triticum aestivum* L.) grain and wheat flour[J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2020, 66: 102529.
- [2] 李兴军主编. 粮食平衡水分理论与实践[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022, 42-50.
LI X J. Chief-edition. Grain equilibrium moisture theory and practice[M]. Beijing: China Light-industry Press, 2022, 42-50.
- [3] LI X J, HAN Z Q, LIN Q, et al. Smart cooling-aeration guided by an aeration window model for paddy stored in concrete silos in a subtropical region of southern China[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 173, 105452.
- [4] 徐咏宁, 王若兰, 李兴军, 等. 常压空气冷等离子体处理对陈小麦生理生化及全麦粉糊化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 37-42.
XU Y N, WANG R L, LI X J, et al. Effect of atmospheric pressure cold plasma on physiological biochemistry and whole meal gelatinization properties of stale wheat[J]. *Journal of Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(16): 37-42.
- [5] LI X J, HAN X, GAO G B, et al. Rice freshness determination during paddy storage based on solvent retention capacity[J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99(3): 593-602.
- [6] 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.
- [7] FAN K, CHEN L B, WEI X H, et al. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Auricularia auricular*[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39: 1534-1541.
- [8] LI X J, HAN X, TAO L S, 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.
- [9] WARNE G R, WILLIAMS P M, PHO H Q, et al. Impact of cold plasma on the biomolecules and organoleptic properties of foods: A review[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(1): 1-16. 