

基于气流-激光检测技术的面包老化表征

张玉生, 何珂, 罗秀芝, 汤修映*

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 目的 探索应用气流-激光检测技术实现面包老化快速定量检测方法。**方法** 使用基于气流-激光检测技术的检测装置进行蠕变测试对面包黏弹性参数进行采集, 分别使用采集到的蠕变阶段全参数和基于伯格模型提取的黏弹性参数, 结合不同预处理方法建立基于水分含量的水分损失速率和基于硬度的老化率的多元线性回归分析和偏最小二乘回归分析模型。**结果** 使用蠕变阶段全参数建立的预测模型取得最佳预测效果, 对于老化率模型, 使用卷积平滑(savitzky-golay, S-G)结合偏最小二乘回归最佳建模结果为校正集和验证集相关系数分别为 0.971 和 0.959, 校正集均方根误差和验证集均方根误差分别为 9.723 和 10.721; 对于水分损失速率模型, 使用 1 阶导加 S-G 平滑结合偏最小二乘回归最佳建模结果为校正集和验证集相关系数分别为 0.984 和 0.968, 校正集均方根误差和验证集均方根误差分别为 0.002 和 0.002。**结论** 使用气流-激光检测技术可以对面包老化进行快速、简单、可靠的表征, 实现对面包老化的定量检测。

关键词: 伯格模型; 蠕变; 面包; 老化; 气流-激光; 定量模型; 快速检测

Characterization of bread staling based on airflow-laser detection technology

ZHANG Yu-Sheng, HE Ke, LUO Xiu-Zhi, TANG Xiu-Ying*

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective To explore the method for the application of airflow-laser detection technology to achieve rapid quantitative detection of bread staling. **Methods** The creep test was performed using a detection device based on airflow-laser detection technology to collect the bread viscoelastic parameters. The full parameters of the creep phase and the mechanical properties parameters extracted based on the Burgers model were collected and combined with different pretreatment methods to establish multiple linear regression analysis and partial least squares regression analysis models for the moisture loss rate based on moisture content and staling rate based on hardness. **Results** The prediction model established by using the full parameters of creep stage achieved the best prediction effect. For the staling rate model, the best modeling results using savitzky-golay (S-G) convolutional smoothing combined with partial least squares regression were 0.971 and 0.959 for the calibration set and validation set correlation coefficients, respectively, and 9.723 and 10.721 for the root mean square error of the calibration set and validation set, respectively. For the moisture loss rate model, the best modeling results were 0.984 and 0.968 for the calibration set and the validation set, respectively, and 0.002 and 0.002 for the root mean square error of the calibration set and the root mean square error of the validation set, respectively, using the first-order derivative plus

基金项目: 北京市自然科学基金项目(6202020)

Fund: Supported by the Beijing Municipal Natural Science Foundation (6202020)

*通信作者: 汤修映, 博士, 教授, 主要研究方向为食品无损检测技术与装备。E-mail: txying@cau.edu.cn

*Corresponding author: TANG Xiu-Ying, Ph.D, Professor, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China. E-mail: txying@cau.edu.cn

S-G convolutional smoothing combined with partial least squares regression. **Conclusion** The use of airflow-laser detection technique can provide a fast, simple and reliable characterization of bread staling, and realize the quantitative detection of bread staling.

KEY WORDS: Burgers model; creep; bread; staling; airflow-laser; quantitative model; rapid detection

0 引言

新鲜制作的面包在存储过程中, 由于水分迁移和支链淀粉回生的作用导致面包老化^[1]。目前检测面包老化的技术主要有: 近红外光谱^[2]、差示扫描量热法^[3]、核磁共振光谱^[4]、X 射线衍射^[5]、动态热分析法^[6]、比色法^[7]、混合仪器法^[8]以及流变学方法^[9-10]等。这些技术虽然可以从分子水平对面包老化进行解释, 但这些分析技术还存在造价高、操作难度大以及分析指标单一等局限性, 这使其不能普遍应用于面包产业中^[11]。因此, 急需开发一种简单、可靠且尽可能便宜的适用于工业生产的检测方法, 以便在面包存储过程中监测面包老化。

食品的流变特性与其化学成分及组织结构有着极大的关系, 可通过食品流变特性的研究来反映食品内部品质^[12]。蠕变测试是研究黏弹性食品流变特性的方法之一, 它反映了食品在一定的应力下其应变随时间的变化过程^[13]。在一定的条件下, 可以认定黏弹性食品是线性黏弹性的, 这样就可以简化分析的过程, 而线性黏弹性是指同时服从胡克定律的线性弹性行为和服从牛顿定律的线性黏性行为, 这就为研究黏弹性食品提供了物理模型基础^[14]。杨玲等^[15]使用质构仪进行蠕变测试, 研究了乔纳金苹果蠕变特性与其品质的相关性, 研究表明, 乔纳金苹果的果肉黏性因子和弹性因子与相关营养成分都具有较密切关系, 能够综合反映其内部品质特性。MIRSAEEDGHAZI 等^[16]使用流变仪进行小振幅振荡剪切测量, 研究了面团的黏弹性对面包烘焙质量的影响, 研究认为面团的温度、组成成分、含水率等因素通过决定面团的黏弹性影响面包烘焙质量。TAKEI 等^[17]利用蠕变测试仪对经过酶处理的牛肉进行压缩实验, 通过建立二阶开尔文蠕变模型对牛肉的蠕变特性进行解析, 获得了牛肉的黏弹性参数并依据此对其咀嚼适口性进行了评价。因此, 研究蠕变测试获取的力学参数与存储过程中的食品品质的关系具有重要价值。

气流-激光检测技术作为一种非接触式无损检测方法在食品检测领域得到广泛关注。所谓气流-激光检测技术就是利用气流对样品施加激励, 由激光传感器将样品表面的黏弹性信息转换为形变信息的变化, 以此实现对样品品质进行判别^[18]。徐虎博等^[19]以鸡肉嫩度为研究对象, 采用气流-激光检测技术进行蠕变回复测试, 结合数学建模实现了对鸡肉嫩度的定性判别和定量预测, 结果表明该项技术通过可控气流可以实现对样品施加持续且稳定的激励, 满

足蠕变测试的检测条件, 能够实现对样品的非接触式、无损蠕变检测。LONG 等^[20]通过采用激光测距和气流脉冲技术测试了牛肉的嫩度, 验证了该项技术应用于牛肉嫩度检测的可行性。ASAITHAMBI 等^[21]使用气流激光技术研究了面包面团的流变学性质。研究证实气流激光检测技术可以实现对工业化面团揉捏过程的有效监督, 探索了该技术应用于淀粉基产品的可行性。OKANIWA 等^[22]采用气流和激光位移传感器测距技术对猕猴桃成熟度进行了研究, 结果表明通过该技术可以实现对猕猴桃成熟度的有效预测, 且其效率和可操作性优于传统接触式检测手段。上述研究表明气流-激光检测技术在食品快速无损检测方面有着巨大的潜力。

面包作为典型的黏弹性体, 其黏弹性信息与其品质息息相关^[23]。吐司面包作为最常见的面包种类, 制作工艺成熟、结构均匀、形状规整, 容易获得, 具有广泛的代表性。故本研究以吐司面包为研究对象, 采用基于气流-激光检测技术的检测装置, 使用稳定气力作为面包的蠕变测试激励, 通过激光位移传感器采集并记录面包表面的微小形变。通过基于气流激光检测技术对面包的流变学特性研究, 探索适用于工业应用、简单、可靠且尽可能便宜的面包老化检测方法, 为面包老化的定量检测提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 样本制备

将采购自北京市海淀区某面包房的新鲜吐司面包, 根据该类面包实际售卖时的保存方式, 使用保鲜袋密封并保存至 24℃空调室内。参照张瑶^[24]面包老化实验方案, 按存储时间每隔 24 h 取样, 实验持续 7 d。

1.1.2 主要仪器

LJD-LINUX-LH070T ARM 微处理器(北京蓝海微芯科技发展有限公司); VX220DAXB 电磁阀(江苏皖华自动化科技有限公司); ITV2030-212L 电气比例阀[森杰(上海)液压机械设备有限公司]; IL100 型激光位移传感器感测头、信号放大器、DL-EP1 RS232 通讯器[基恩士(中国)有限公司]; A/D 变换(北京聚英翔翔电子有限公司); 7SVA160 升降台(北京塞凡光电仪器有限公司); GZX-9070MBE 电热鼓风干燥箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); LQ-C30001 电子天平(精度 0.1 g, 深圳市飞亚衡器有限公司); XT plus 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司)。

1.1.3 气流-激光检测装置

气流-激光检测装置由气力控制系统、形变信息检测系统、电子系统、机械系统和嵌入式 ARM (advanced risc machines)微处理器等部分组成。其中,气力控制系统由电磁阀、电气比例阀、气室和喷嘴组成;形变信息检测系统由激光位移传感器感测头、信号放大器、RS232 通讯器组成;电子系统主要由 A/D 转换模块、控制电路等部分组成;机械系统主要由支撑框架、升降台等部分组成。嵌入式 ARM 微处理器通过接口与其他系统的电路相连,主要用来操作和控制装置的运行、气力的切换、形变信息的采集、处理、储存和显示等。气流-激光检测装置原理如图 1 所示,升降台将面包试样调整至合适位置,气力控制系统产生稳定的气体射流通过喷嘴发出对面包试样进行蠕变测试激励,形变信息检测系统通过激光位移传感器实时检测面包试样的形变信息并通过电子系统传输给嵌入式 ARM 微处理器,嵌入式微处理器使用自主开发的软件对获取的信息进行处理、储存和显示面包试样的蠕变信息。

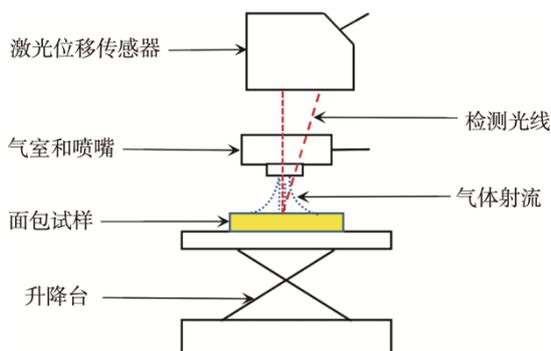


图 1 气流-激光检测装置原理图

Fig.1 Principle diagram of airflow-laser detection device

1.2 实验方法

1.2.1 面包黏弹性信息采集

根据美国谷物化学家协会(American Association of Cereal Chemists, AACC)制定的面包硬度测定的标准方法 AACC 74-09 测定面包样品硬度,使用面包切片机将上述待处理面包切成(12.5±1) mm 的面包片,每个待处理样品切成 6 片,取中间 4 片面包片,去除面包皮及其周边 10 mm 的面包瓤,将两块面包叠放制成一个测试样本,每个待处理样品制成两个平行样本。利用气流-激光检测装置实施蠕变测试,每次测试结束立即使用保鲜袋将面包试样密封,防止面包自然老化进程受测试环境影响。测试过程参数设定为:测试距离设置 5 mm,加载气力 25 g,加载时间 5 s,恢复时间 5 s。每个平行样本测试 5 次,取 10 次测定结果的平均值作为一个面包试样的最终测试结果。66 块面包样品应变信息如图 2 所示。图 2 获得的面包样品信息曲线中,前 5 s 为蠕变阶段。此阶段中,面包样品受到持续稳定的气

力激励,样品应变随时间逐渐变小。激光传感器数据采集时间约为 5 ms,5 s 的蠕变阶段共获得 102 组面包形变信息数据,将作为后续蠕变全阶段建模以及使用本构模型提取粘弹性参数的实验数据。后 5 s 为回复阶段,反映气力撤销后样品形变自由恢复的过程,此阶段中包含的样品粘弹性信息同样可以有效反映样品的品质。由于两阶段存在一定的差异,但都能反映的样品品质,本研究暂以前 5 s 蠕变阶段进行研究。

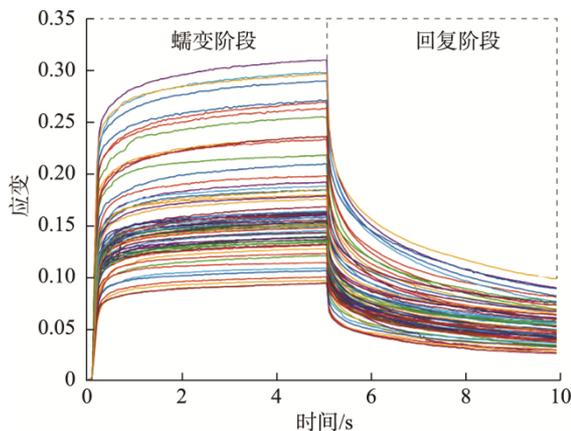


图 2 所有面包样品应变信息曲线

Fig.2 Strain information curve of all bread samples

1.2.2 黏弹性信息预处理

由于温度、气流扰动以及面包表面孔隙等的影响,使用激光位移传感器获得的面包表面微小形变存在噪音。为消除噪音影响提高模型的准确性和解释能力,使用一阶导数(the first derivative, 1st)和卷积平滑(savitzky-golay, S-G)、1st+S-G 对采集到的黏弹性信息数据进行预处理^[25]。

1.2.3 面包水分含量测定

测定面包中的水分含量参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品水分的测定》,采用直接干燥法(103℃);使用电热鼓风干燥箱和电子天平对面包样品含水率进行测定,并计算水分含量损失速率。使用公式(1)将实验测得的水分含量转换成面包水分损失速率^[26]。

$$\text{水分损失速率} = \frac{W_n - W_0}{n} \quad (1)$$

式中, W_n : 储藏 n d 后面包的水分含量(%); W_0 : 新鲜面包的水分含量(%); n : 储藏天数(d)。

1.2.4 面包硬度测定

测定面包的硬度参照 AACC 制定的面包硬度测定的标准方法 AACC 74-09 并结合现有条件进行测定。面包样品测试完毕立即使用保鲜膜进行密封,防止面包因接触空气加速老化,影响实验结果。每个面包样品制成两个平行样本,每个平行样本尺寸为 75 mm×75 mm×25 mm,每个平行样本测试 3 次,取 6 次测定结果的平均值。使用 XT

plus 质构仪进行硬度测试。测试模式: 全质构(texture profile analysis, TPA), 测试探头型号为 P/36 铝制圆柱形探头, 触发类型设置为“Auto”, 触发力设置为 5×g, 数据采集速度设置为 200 pps。测试探头的测前速度为 60 mm/min, 测后速度为 120 mm/min, 面包质构测定的压缩速度和压缩程度分别设置为 100 mm/min 和 50%, 压缩 2 次时间间隔为 5 s。使用公式(2)将质构仪测得的面包样品硬度转变成面包老化率^[26]。

$$\text{老化率} = \frac{H_n - H_0}{n} \quad (2)$$

式中, H_n : 储藏第 n d 面包芯的硬度(N); H_0 : 新鲜面包芯的硬度(N); n : 储藏天数(d)。

1.3 数据处理

使用 Matlab 2020a 软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 理化值测定结果

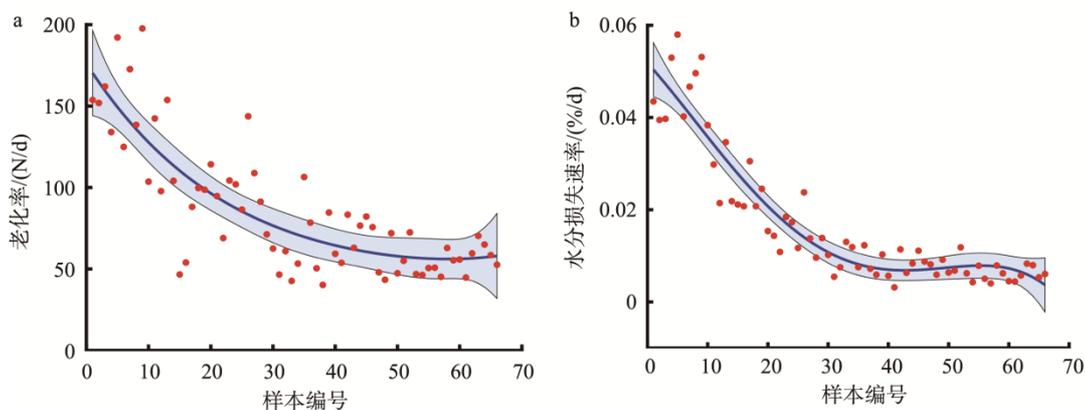
取存储期间面包样品老化率、水分损失速率, 设置 95% 置信区间绘制变化趋势图, 每 10 个样本作为一天的实验样本, 如图 3 所示。由图 3a 可以看出随着储存时间的延长老化率逐渐降低, 且变化速率逐渐减小, 表明面

包老化是一个加速的过程。对与基于水分含量的水分损失速率来说, 其总的变化趋势与老化率变化趋势基本相同, 这印证了 LI 等^[27]的研究, 指出面包老化与支链淀粉的含量有关, 支链淀粉的回生是导致面包硬度增加、水的性质变化的重要原因。图 3b 中可以看出第 5 d 面包水分损失速率值稍有回升。BAIK 等^[28]使用软面包为研究对象, 研究两周内面包水分变化与老化的关系中指出, 面包老化是一个复杂的过程, 水分的增加和损失也是其老化的一部分, 面包储存超过一定时间后, 由于面包皮变质或冷稠等变化, 会引起水分迁移的异常变化。因此, 回升的原因可能面包皮的物理化学变化导致水分迁移量的改变。

2.2 校正集与验证集划分

目前常用的样本选择方法主要包括随机法、含量梯度法和 Kennard-Stone 算法^[29]。本研究使用含量梯度法, 首先按照计算得到的老化率和水分损失速率值分别按降序排序, 而后按照 3:1 的比例分别将老化率和水分损失速率样本数据划分为校正集和验证集, 最后再将老化率和水分损失速率的划分结果合成对应的校正集和验证集^[30]。

如表 1 所示, 老化率和水分损失速率样本集划分中样本校正集均包含样本验证集, 且两样本划分中校正集的平均值和标准偏差均大于或与验证集的平均值和标准差相近, 样本集的划分满足建立预测模型的基本条件。



注: a 为样本老化率变化趋势; b 为样本水分损失速率变化趋势。

图 3 面包储存期间样本老化率和水分损失速率变化趋势)

Fig.3 Variation trend of sample staling rates and moisture loss rates of bread during storage

表 1 面包老化率、水分损失速率的校正集和验证集样本参数分布

Table 1 Distribution of sample parameters of calibration set and validation set of bread staling rates, moisture loss rate

项目	样品集	样品数	范围	平均值±标准偏差
老化率/(N/d)	校正集	50	40.218~197.669	86.039±41.131
	验证集	16	44.733~172.656	82.700±36.055
水分损失速率/(%/d)	校正集	49	0.003~0.058	0.017±0.014
	验证集	17	0.004~0.050	0.016±0.015

2.3 预测模型建立

2.3.1 伯格模型及蠕变过程解析

黏弹性体的流变特性之一,就是在一定力作用下会产生蠕变现象。伯格模型是研究食品蠕变特性最常用的力学模型,弹性元件和黏性元件是组成伯格模型的基本元件^[23]。由图 2 中面包样品应变信息曲线可以看出,第 0 s 时面包样品在受到气力作用后迅速发生形变,第 5 s 时去掉加载的气力面包形变迅速恢复,但并未恢复至初始位置,存在残余变形。因此需要在蠕变初始阶段添加一个弹性元件,在回复阶段添加一个黏性阻滞,故为了更好地描述面包的蠕变过程使用如图 4 所示的四要素伯格模型。当加载荷应力 σ 时,模型的变形相当于 E_1 的虎克体、 η_1 的阻尼体及 E_2 、 η_2 的开尔文模型 3 部分变形的叠加。这一模型的蠕变公式(3)为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \frac{-t}{e_{\tau_K}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} t \quad (3)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为气流加载阶段任意时间的应变(无量纲); σ 为气流所施加的压力(kPa); E_1 为伯格模型中胡克体的瞬时弹性模量(kPa); η_1 为伯格模型中的第 1 阻尼器的黏度,表示剩余黏度(kPa·s); E_2 表示伯格模型的第 2 弹性模量,表示延迟弹性(kPa); τ_K 为伯格模型中第 2 个阻尼器的延迟时间(s), $\tau_K = \eta_2/E_2$, η_2 为第 2 个阻尼器的黏度(kPa·s); t 为蠕变阶段的加载时间(s)^[31]。

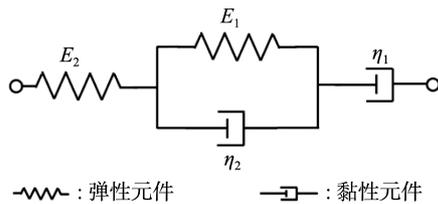


图 4 四要素伯格模型

Fig.4 Four-factor Burgers model

本研究使用四要素伯格模型蠕变阶段解析公式(3),参照李岩磊^[31]对牛肉嫩度的研究中使用的方法,利用 matlab 中的 lsqnonlin 函数解析蠕变阶段的曲线,提取 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 4 个参数。

2.3.2 建立预测模型

利用四要素伯格模型提取的 4 组参数分别使用多元线性回归(multiple linear regression, MLR)、偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR),使用伯格模型提取的黏弹性参数作为自变量矩阵 X , 分别使用经处理得到的老化率和水分损失速率作为因变量矩阵 Y , 建立面包样品的老化率和水分损失速率预测模型。而后将自变量矩阵 X 更换为预处理后的蠕变阶段全参数重复上述建模过程。利用校正集相关系数(correlation coefficient of calibration, Rc)、校正集均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)、验证集相关系数(correlation coefficient of validation, Rv)、验证集均方根误差(root mean

square error of validation, RMSEV)对使用不同预处理建立的两个回归模型进行评价。 R^2 值越大, RMSEC 和 RMSEP 值越小则模型的预测效果越好, RMSEC 和 RMSEP 值相差越小则模型的稳定性越好, 以此从多种建模方法中选出最佳预测模型^[32-33]。

2.4 预测模型结果

2.4.1 黏弹性参数建模结果

表 2 是使用不同预处理算法结合 MLR 和 PLSR 建立的模型结果比较。对于老化率模型, 使用 S-G 平滑预处理与使用 $1^{st}+S-G$ 平滑预处理结合 PLSR 获得的预测模型建模结果相近, 但使用 S-G 平滑结合 PLSR 获得的预测模型校正集相关系数与验证集相关系数相近, 这样的模型更稳定, 所以选择使用 S-G 平滑结合偏 PLSR 获得的预测模型作为最佳模型, 此时 Rc 和 RMSEC 分别为 0.604 和 40.749, Rv 和 RMSEV 分别为 0.560 和 53.519; 对于水分损失速率模型, 使用 S-G 平滑结合 PLSR 分析获得的预测模型更佳, Rc 和 RMSEC 分别为 0.770 和 0.009, Rv 和 RMSEV 分别为 0.581 和 0.011。

2.4.2 蠕变阶段全参数建模结果

表 3 是蠕变阶段全参数与面包老化率和水分损失速率建模结果, 对于老化率模型, 使用 S-G 平滑结合 PLSR 获得的预测模型更佳, Rc 和 RMSEC 分别为 0.971 和 9.723, Rv 和 RMSEV 分别为 0.959 和 10.721; 对于水分损失速率模型, 使用 S-G 平滑预处理与使用 $1^{st}+S-G$ 平滑预处理结合 PLSR 分析获得的预测模型结果相近, 但使用 $1^{st}+S-G$ 平滑预处理结合 PLSR 获得的预测模型 RMSEC 和 RMSEV 较小, 预测模型效果更好, 故选择使用 $1^{st}+S-G$ 平滑预处理结合 PLSR 获得的预测模型作为最佳模型, Rc 和 RMSEC 分别为 0.984 和 0.002, Rv 和 RMSEV 分别为 0.968 和 0.002。

2.4.3 对比分析

通过对比面包黏弹性参数建模结果和蠕变阶段全参数建模结果可以发现, 蠕变阶段全参数 PLSR 建模取得最佳的建模效果, 对于老化率模型, 使用 S-G 平滑结合 PLSR 最佳建模结果为, Rc 和 Rv 分别为 0.971 和 0.959, RMSEC 和 RMSEV 分别为 9.723 和 10.721; 对于水分损失速率模型, 使用 $1^{st}+S-G$ 平滑结合 PLSR 最佳建模结果为, Rc 和 Rv 分别为 0.984 和 0.968, RMSEC 和 RMSEV 分别为 0.002 和 0.002。黏弹性参数建模结果较差的原因可能是: 本研究只使用了四要素伯格模型对蠕变参数进行解析, 由于面包是复杂的黏弹性体, 使用四要素伯格模型无法确切地表述本次实验所使用的吐司面包的黏弹性参数, 导致建模效果较差; 此外, 由于面包瓤中的孔隙大小不一, 所处的环境与起始构象也不同, 孔隙的实际大小也有变化。所以在力学松弛中, 蠕变时间远不止一个值, 而是一个分布很宽连续谱, 即为时间谱。故须尝试采用多元系列的黏弹性力学模型才可以更准确的描述^[34]。

表 2 黏弹性参数与面包老化率、水分损失速率建模结果
Table 2 Modeling results of viscoelastic parameters and bread staling rates, moisture loss rates

项目	建模方式	预处理方法	Rc	RMSEC	Rv	RMSEV
老化率 (N/d)	MLR	原始	0.321	33.675	0.316	28.530
		1 st	0.402	31.818	0.373	35.840
		S-G	0.562	26.831	0.637	33.777
	PLSR	1 st +S-G	0.441	30.717	0.403	31.849
		原始	0.361	55.290	0.341	55.019
		1 st	0.309	49.737	0.281	55.213
水分损失 速率 (%/d)	MLR	S-G	0.604	40.749	0.560	53.519
		1 st +S-G	0.626	48.562	0.536	50.572
		原始	0.341	0.012	0.245	0.011
	PLSR	1 st	0.443	0.011	0.403	0.016
		S-G	0.686	0.008	0.871	0.010
		1 st +S-G	0.553	0.010	0.948	0.011
	MLR	原始	0.365	0.014	0.344	0.014
		1 st	0.316	0.014	0.228	0.014
		S-G	0.770	0.009	0.581	0.011
PLSR	S-G	0.634	0.016	0.524	0.017	
	1 st +S-G	0.634	0.016	0.524	0.017	
	1 st +S-G	0.634	0.016	0.524	0.017	

表 3 蠕变阶段全参数与面包老化率、水分损失速率建模结果
Table 3 Modeling results of full parameters in creep stage and bread staling rates, moisture loss rates

项目	建模方式	预处理方法	Rc	RMSEC	Rv	RMSEV
老化率 (N/d)	MLR	原始	0.411	31.095	0.362	32.08
		1 st	0.263	34.642	0.311	44.485
		S-G	0.602	26.215	0.544	27.179
	PLSR	1 st +S-G	0.563	27.037	0.525	28.187
		原始	0.634	31.852	0.539	31.361
		1 st	0.673	30.940	0.510	31.034
水分损失 速率 (%/d)	MLR	S-G	0.971	9.723	0.959	10.721
		1 st +S-G	0.957	11.901	0.946	11.788
		原始	0.533	0.009	0.374	0.012
	PLSR	1 st	0.436	0.009	0.237	0.014
		S-G	0.716	0.009	0.599	0.008
		1 st +S-G	0.623	0.010	0.554	0.008
	MLR	原始	0.757	0.010	0.667	0.010
		1 st	0.824	0.008	0.641	0.010
		S-G	0.982	0.003	0.977	0.003
PLSR	S-G	0.984	0.002	0.968	0.002	
	1 st +S-G	0.984	0.002	0.968	0.002	
	1 st +S-G	0.984	0.002	0.968	0.002	

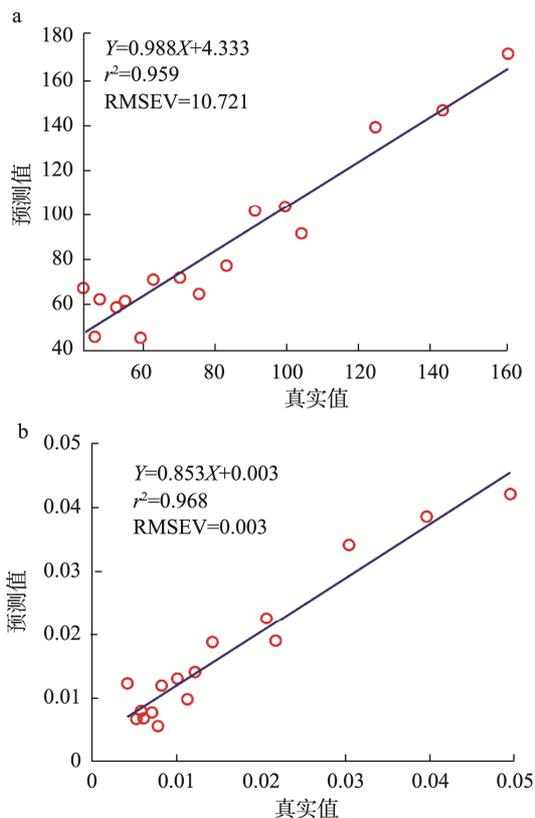
2.5 模型的验证

图 5 为使用面包蠕变测试蠕变阶段全参数建立的最佳预测模型的面包老化率和水分损失速率模型验证集拟合线性情况。结果显示各项成分指标预测结果良好。

3 结论

本研究以吐司面包为研究对象, 使用基于气流-激光检测技术的检测装置获取吐司面包的黏弹性参数。使用基

于硬度描述的面包老化率和基于水分含量描述的水分损失速率双因素作为指标,探讨了面包黏弹性参数和蠕变阶段全参数对面包老化定量预测能力。结果显示使用蠕变阶段全参数建立的面包老化双因素预测模型具有最佳的预测效果,对于老化率模型,使用 S-G 平滑结合 PLSR 可以得到最佳建模结果,对于水分损失速率模型,使用 1^{st} +S-G 平滑结合 PLSR 获得最佳建模结果。表明使用蠕变阶段全参数可以实现对面包老化的确切描述,且根据双因素监测结果使用者可以综合定量对面包老化进行分析和监测,即使用基于气流-激光检测技术对存储过程中面包老化实现快速、可靠、简单的检测具有巨大的潜力。但仍需探索多要素蠕变模型对面包老化的定量预测,以简化预测模型继续提高检测效率和检测效果。



注: a 为老化率验证集预测值与真实值,老化率模型使用的是 S-G 平滑结合 PLSR 最佳建模结果; b 为水分损失速率验证集预测值与真实值,水分损失速率模型使用的是 1^{st} +S-G 平滑结合 PLSR 最佳建模结果。

图 5 面包老化率和水分损失速率较佳模型验证集拟合曲线
Fig.5 Fitted curves of the better model validation set for the staling rates and moisture loss rates of bread

参考文献

[1] LI C, GIDLEY MJ. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced staling of high-amylose wheat bread [J]. Food Chem, 2022, 385:

132673.

- [2] AMIGO JM, DEL OLMOA, ENGELSEN MM, *et al.* Staling of white wheat bread crumb and effect of maltogenic α -amylases. Part 2: Monitoring the staling process by using near infrared spectroscopy and chemometrics [J]. Food Chem, 2019, 297: 124946.
- [3] KOTSIUO K, SACHARIDIS DD, MATSAKIDOU A, *et al.* Physicochemical and functional aspects of composite wheat-roasted chickpea flours in relation to dough rheology, bread quality and staling phenomena [J]. Food Hydrocolloid, 2022, 124: 107322.
- [4] CURTI E, BUBICI S, CARINI E, *et al.* Water molecular dynamics during bread staling by nuclear magnetic resonance [J]. LWT-Food Sci Technol, 2011, 44(4): 854-859.
- [5] FU Y, LIU X, XIE Q, *et al.* Effects of *Laminaria japonica* polysaccharides on the texture, retrogradation, and structure performances in frozen dough bread [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 151: 112239.
- [6] WITCZAK M, CHMIELEWSKA A, ZIOBRO R, *et al.* Rapeseed protein as a novel ingredient of gluten-free dough: Rheological and thermal properties [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 118: 106813.
- [7] SUWANNARONG S, WONGSAGONSUP R, SUPHANTHARIKA M. Effect of spent brewer's yeast β -D-glucan on properties of wheat flour dough and bread during chilled storage [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 156: 381-393.
- [8] CHEN Y, PARRILLI A, JAEDIG F, *et al.* Micro-computed tomography study on bread dehydration and structural changes during ambient storage [J]. J Food Eng, 2021, 296: 110462.
- [9] HAYES AMR, OKONIEWSKA M, MARTINEZ MM, *et al.* Investigating the potential of slow-retrograding starches to reduce staling in soft savory bread and sweet cake model systems [J]. Food Res Int, 2020, 138: 109745.
- [10] ATUDOREI D, ROPCIUC S, CODINĂ GG. Possibilities to use germinated lupine flour as an ingredient in breadmaking to improve the final product quality [J]. Agronomy, 2022, 12(3): 667.
- [11] 詹冬玲, 任玉雪, 闵伟红, 等. 面包老化机理及其分析技术的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(23): 353-355, 360.
ZHAN DL, REN YX, MIN WH, *et al.* Research progress in the bread aging mechanism and analysis techniques [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(23): 353-355, 360.
- [12] 李云飞, 殷涌光, 徐树来. 食品物性学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
LI YF, YIN YG, XU SL. Food physical properties [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009.
- [13] 方媛, 赵武奇, 张清安, 等. '红富士'苹果蠕变特性与果实品质的相关分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(4): 717-726.
FANG Y, ZHAO WQ, ZHANG QAN. The correlation analysis between quality and creep property of 'Fuji' apple [J]. Sci Agric Sin, 2016, 49(4): 717-726.
- [14] 王立刚, 林福严, 董绍庆, 等. 黏弹性材料蠕变柔量测试方法研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(5): 155-157.
WANG LG, LIN FY, DONG SQ, *et al.* Study of creep flexibility test method for viscoelastic materials [J]. Coal Technol, 2020, 39(5): 155-157.
- [15] 杨玲, 田义, 张彩霞, 等. 乔纳金苹果的应力松弛和蠕变特性与其品质相关性分析[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 21-29.

- YANG L, TIAN Y, ZHANG CX, *et al.* Correlation analysis of stress relaxation and creep properties of Jonagold apples with their quality [J]. *Stor Proc*, 2020, 20(4): 21–29.
- [16] MIRSAEEDGHAZI H, EMAM-DJOMEH Z, MOUSAVI SMA. Rheometric measurement of dough rheological characteristics and factors affecting it [J]. *Int J Agric Biol*, 2008, 10(1): 112–119.
- [17] TAKEI R, HAYASHI M, UMENE S, *et al.* Changes in physical properties of enzyme-treated beef before and after mastication [J]. *J Texture Stud*, 2014, 24: 1–9.
- [18] 何珂, 罗秀芝, 孙钦明, 等. 基于气流与多点激光技术的牛肉新鲜度检测装置研发[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(21): 278–286.
- HE K, LUO XZ, SUN QM, *et al.* Development of beef freshness detection device based on air flow and multi-point laser technique [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2021, 37(21): 278–286.
- [19] 徐虎博, 赵庆亮, 何珂, 等. 基于可控气流-激光检测技术的鸡肉嫩度评估方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 457–465.
- XU HB, ZHAO QL, HE K, *et al.* Evaluation of chicken tenderness based on controlled air-flow laser detection technique [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 51(S2): 457–465.
- [20] LONG Y, TANG X, WANG W, *et al.* A unique method for detecting beef tenderness based on viscoelasticity principle [J]. *J Texture Stud*, 2017, 48(5): 433–438.
- [21] ASAITHAMBI N, FONTAINE J, LANCELOT E, *et al.* Evaluation of bread dough aeration during kneading by an air-jet impulse system [J]. *J Food Eng*, 2020, 278: 109931.
- [22] OKANIWA R, KOYAMA K, KOSEKI S. Does the firmness vary within a single kiwifruit? Estimation of firmness distribution in individual fruit by compressed air deformation measurement [J]. *J Food Meas Charact*, 2022, 16(1): 12–18.
- [23] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- LI LT. *Food physical properties* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001.
- [24] 张瑶. 右旋糖苷对面包品质的影响及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- ZHANG Y. Study on effect of dextran on wheat bread quality and its mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [25] LU B, LIU N, WANG X, *et al.* A feasibility quantitative analysis of NIR spectroscopy coupled Si-PLS to predict coco-peat available nitrogen from rapid measurements [J]. *Comput Electron Agric*, 2020, 173: 105410.
- [26] ZHANG Y, GUO L, XU D, *et al.* Effects of dextran with different molecular weights on the quality of wheat sourdough breads [J]. *Food Chem*, 2018, 256: 373–379.
- [27] LI C, GIDLEY MJ. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced staling of high-amylose wheat bread [J]. *Food Chem*, 2022, 385: 132673.
- [28] BAIK M, CHINACHOTI P. Moisture redistribution and phase transitions during bread staling [J]. *Cereal chemistry*, 2000, 77(4): 484–488.
- [29] SUN Y, YUAN M, LIU X, *et al.* A sample selection method specific to unknown test samples for calibration and validation sets based on spectra similarity [J]. *Spectrochim Acta A*, 2021, 258: 119870.
- [30] 张天亮, 张东兴, 崔涛, 等. 基于叶片光谱特性的玉米品种抗倒伏性预测[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 178–185.
- ZHANG TL, ZHANG DX, CUI T, *et al.* Predicting lodging resistance of maize varieties using leaf hyperspectral imaging [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2022, 38(1): 178–185.
- [31] 李岩磊. 冷却牛肉黏弹性参数解析及其品质快速预测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.
- LI YL. Analysis of cooling beef viscoelastic parameters and its rapid quality prediction study [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019.
- [32] HE K, SUN Q, TANG X. Prediction of tenderness of chicken by using viscoelasticity based on airflow and optical technique [J]. *J Texture Stud*, 2022, 53(1): 133–145.
- [33] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- WANG HW. *Partial least squares regression methods and their applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [34] 张志健, 秦礼康. 食品物性学[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- ZHANG ZJ, QIN LK. *Food physical properties* [M]. Beijing: Science Press, 2019.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



张玉生, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品无损检测技术。
E-mail: 2933696312@qq.com



汤修映, 博士, 教授, 主要研究方向为食品无损检测技术与装备。
E-mail: txying@cau.edu.cn