

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.05.022

# 凝胶脆性的测量方法在食品领域的应用

张玉龙, 宗子歆, 陈鑫, 曹际娟\*, 胡冰\*

(大连民族大学 生命科学学院 生物技术与资源利用教育部重点实验室, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** 凝胶是一种介于液体和固体之间的弹性半固体, 具有良好的吸附性、生物降解性、生物相容性, 在食品、材料和医学领域应用广泛。脆性是食品质构的一项重要指标, 影响着食品的口感和风味。该文综述近几年来食品脆性的测定方法, 主要包括力学测定、声学测定和感官测定, 然而上述方法均存在不同缺点, 力学测定不能准确反映凝胶脆性; 声学测定存在信号采集不稳定、易受外界噪声干扰等问题; 对于感知测定而言, 该方法对评价人员要求高, 主观性较强, 容易出现偏爱型误差。因此, 该文旨在为开发新的凝胶脆性方法提供理论基础和研究思路。

**关键词:** 凝胶; 脆性; 力学测定; 声学测定; 感官测定

## Applications of Gel Brittleness Determination Methods in Food Industry

ZHANG Yulong, ZONG Zixin, CHEN Xin, CAO Jijuan\*, HU Bing\*

(Key Laboratory of Biotechnology and Bioresources Utilization, Ministry of Education, College of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, Liaoning, China)

**Abstract:** Gel is a type of elastic semi-solid material situated between liquid and solid states. It possesses good adsorption, biodegradability, and biocompatibility, making it widely applicable in the fields of food, materials, and medicine. Brittleness is an important indicator of food texture, influencing its taste and flavor. This paper reviewed the methods for determining food brittleness in recent years, mainly focusing on mechanical, acoustic, and sensory determination. However, these methods have different drawbacks: mechanical determination cannot accurately reflect the brittleness of gel; acoustic determination has the problems of unstable signal acquisition and susceptibility to external noise interference; sensory determination requires highly skilled evaluators and is prone to subjective bias and preference-based errors. Therefore, this paper aimed to provide a theoretical basis and research ideas for developing new methods for assessing gel brittleness.

**Key words:** gel; brittleness; mechanical determination; acoustic determination; sensory determination

引文格式:

张玉龙, 宗子歆, 陈鑫, 等. 凝胶脆性的测量方法在食品领域的应用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 167-172.

ZHANG Yulong, ZONG Zixin, CHEN Xin, et al. Applications of Gel Brittleness Determination Methods in Food Industry[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 167-172.

凝胶是一种介于液体和固体之间的弹性半固体, 溶胶或溶液中的胶体粒子或高分子在一定条件下相互连接形成三维网状结构, 从而捕获溶剂, 并限制溶剂的流动<sup>[1]</sup>。凝胶因具有良好的吸附性、生物降解性、生物相容性而受到广泛关注, 目前主要应用于果冻、糖果、酸奶等食品领域产品中。食物在食用过程中的质构和

口感是引起消费者感官愉悦的重要原因, 会直接影响消费者对食品的偏爱及接受度<sup>[2]</sup>。食品质构是指物体的表面特征和外观, 由食物的大小、形状、密度以及通过口腔和手部触摸感等因素决定, 其主要包括食品的弹性、黏度、硬度、脆性、内聚性等特征<sup>[3]</sup>。随着人口老龄化社会的来临, 吞咽困难和咀嚼困难的问题引起许

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202232); 大连市揭榜挂帅科技攻关重大项目(2021JB12SN038); 国家重点研发计划项目(2021YFF0601902); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2002106); 辽宁省民生科技计划项目(2021JH2/10200019); 辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0037)

作者简介: 张玉龙(2000—), 男(汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 食品凝胶质构调控。

\*通信作者: 曹际娟(1968—), 女(汉), 二级教授, 博士, 研究方向: 食品分子检测与分子营养; 胡冰(1987—), 男(汉), 讲师, 博士, 研究方向: 食品胶体物理改性及功能化结构设计。

多研究人员的重视,伴随而来的对于食品质构的研究也越来越受到广泛关注。食品质构中脆性是影响食物感官的一项重要指标,Tunick等<sup>[4]</sup>认为脆性是人咀嚼或挤压食物时发出的一种声音,不容易被定义。但是Vincent<sup>[5]</sup>将“脆性”转化为材料科学中可以描述的形式,通过在材料和结构水平上建立可独立测量的参数,并将这些参数可以与所定义的脆度概念相关联,认为脆性是物料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的力。

脆性食品被分为干脆性食品和湿脆性食品,但是不同研究者对其定义略有差别。Chauvin等<sup>[6]</sup>将干脆性食品定义为细胞内只含有空气的食品,而湿脆性食品是指细胞内含有液体的食品。黄佳玲等<sup>[7]</sup>认为干脆性食品一般是指食品原料经过煎炸、烘焙、挤压等特殊工艺加工后形成的内部充满网格空腔的食品,如膨化食品;湿脆性食品指具有膨胀的植物活细胞的水果及蔬菜等农产品,如苹果、胡萝卜、芹菜等。尽管干脆性食品和湿脆性食品的组成不同,但是两种食物都能产生类似的脆度感知。

凝胶作为食品结构骨架,在未来食品结构设计中扮演不可或缺的角色。近年来,由于凝胶材料的优越性能,研究人员对其进行了深入的研究,而凝胶的脆性属性是其质构特性的重要指标。为获得性能更加优越的凝胶产品,脆性的研究是不可或缺的。本文将从脆性力学特征、声学特征和感官评定的角度,阐述凝胶脆性测定相关的最新研究进展,以期为凝胶与未来食品的创新研究与开发提供新思路。

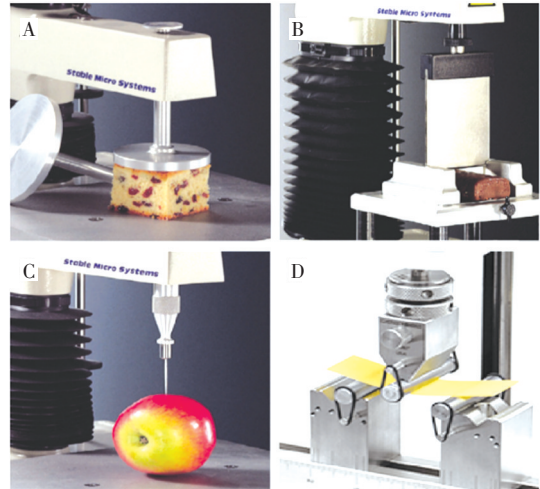
## 1 力学测定

在凝胶食品力学特征的研究中,大部分是通过凝胶断裂特性来反映其脆性,即产品断裂时的力<sup>[8]</sup>。脆性材料的断裂是由于裂纹在局部应力场的作用下突然快速扩展造成的,这些局部应力场明显高于施加的宏观应力,导致裂纹尖端周围原子的局部重排,随后原子键的张力最终断裂,导致材料分离<sup>[9]</sup>。力学测定具有客观、稳定和操作简单等优点,但是力学测定受不同测定模式的影响较大。目前测量脆度常用的力学方法有弯曲试验、剪切试验、压缩试验和穿刺试验,其中压缩试验、剪切试验和穿刺试验常用质构分析仪进行测定。

质构分析是用于评估食品的机械性质的成熟方法,并且由使用平坦表面探针在重复运动到给定应变的两个压缩循环组成<sup>[10]</sup>。国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)将质构分析定义为“通过机械、触觉以及适当的视觉和听觉感受器可感知的产品的所有机械、几何和表面属性”<sup>[11]</sup>。但是通过仪器来测量食品质地,仪器不具备人体口腔中的身体感觉系统,身体感觉系统是由机械感受器、温度感受器、伤害感受器、本体感受器、牙周感受器等组成<sup>[12]</sup>。

仪器测量不能很好的与人体相关联最重要原因是经典仪器测量中缺乏受体、唾液和风味<sup>[13]</sup>。食品在口腔加工中的复杂操作也不是简单的压缩,而是压缩和剪切的混合模式。

测定食品脆性的不同质构试验如图1所示。



A. 压缩试验;B. 剪切试验;C. 穿刺试验;D. 弯曲试验。

图1 不同质构试验测定食品脆性

Fig.1 Determination of food brittleness using different texture experiments

### 1.1 压缩试验

压缩试验(图1A)是测定材料在轴向静压力作用下力学性能的试验,是材料机械性能试验的基本方法之一,主要用于测定材料在室温下单向压缩的屈服点和脆性材料的抗压强度<sup>[14]</sup>。作为材料学中测量物质性质常用的手段,压缩试验如今已广泛应用于食品领域。解伟妮等<sup>[14]</sup>通过质构压缩把所得的力、斜率、面积、面积/距离等参数与感官平均脆度值进行相关性分析,结果表明,斜率与感官脆度值具有最高的相关性,据此建立脆度指标的表征模型。压缩试验的数据分析是基于流变学参数(杨氏模量和破碎应力)测定的基础方法,这些分析仪局限于应力形变曲线线性变化的范围,这些参数经过样品尺寸校正可用于不同样品的对比<sup>[15]</sup>。余纪柱等<sup>[16]</sup>利用质构压缩黄瓜果实,将仪器所得的硬度参数与脆度参数之间构建线性回归方程,通过硬度反映黄瓜果实脆度,从而为黄瓜果实脆度的评价提供了一种简易的方法。Voong等<sup>[17]</sup>对油炸面糊和面包屑涂层进行单轴压缩,在力变形剖面图中看见多个断裂事件,并把这些断裂事件看作脆性,证明了较高含水量的物质需要用较低的压力来压缩。此外,一些研究人员将压缩试验中食品产生的应力-应变作为食品脆性的反映,如Van Koerten等<sup>[18]</sup>将马铃薯应力-应变看作是其脆性的变化。

压缩试验中模拟人体口腔咀嚼的过程,在一定程

度上可以测定食品脆度。但是人体口腔咀嚼过程是一个复杂的过程,不仅有食物被外力破坏,还有唾液酶与食物发生生化反映和人的多种感受器感知的过程。因此要想准确反映出食品脆性及其变化,单单依靠压缩试验不足以准确测定。

### 1.2 剪切试验

剪切试验(图 1B)是一种用于测量物质抗剪切应力和剪切应变的试验方法。在剪切试验中,一般通过施加一定的剪切力(或称切应力)来使物质发生剪切变形,然后测量该变形所产生的剪切应变<sup>[11]</sup>。剪切试验模拟了样品被门齿咬断的过程,用于测量样品硬度和剪切力等机械性能。国内外多项有关采用该模式评价食品脆度的研究中,都将食品脆度描述为当用门齿第一次咬断脆性食品时,产生伴有高频声音的清脆断裂,以及第一口咬断时感觉到的力<sup>[7]</sup>。食品脆度是力、声的结合,即短的咬合声和长时间的爆裂声。叶阳等<sup>[19]</sup>通过海藻酸钠、氯化钙和碳酸钙作为保脆剂对芥菜进行保脆,之后用剪切试验,其剪切力越大表明脆性越大,发现氯化钙添加量为 0.24% 时,剪切力最高达到 17.25 N/mm,此时保脆效果最佳;海藻酸钠的添加量为 0.12% 时,芥菜剪切力最高为 16.24 N/mm,而碳酸钙的保脆效果最差。

剪切试验通常在实验室条件下进行,无法完全模拟真实的口感体验。食品脆性涉及多个感官,包括咀嚼时的声音和口感,这些因素可能无法通过剪切试验充分模拟。食品的脆性受到多种因素的影响,如含水量、温度、存储条件等。剪切试验可能未能充分考虑这些因素对食品脆性的综合影响,因而无法提供全面的评估。

### 1.3 穿刺试验

穿刺试验(图 1C)是一种用于研究物质的穿刺性能或穿透性的试验方法。在该试验中,通常使用尖锐的工具(如针或探头)对待测样品进行穿刺,然后测量或观察穿刺的相关参数,以了解样品的性质和性能<sup>[11]</sup>。穿刺试验主要模拟人牙齿刺穿样品的过程。Lu 等<sup>[20]</sup>利用穿刺试验对蒸煮的荸荠进行脆性测量,发现样品细胞壁随着蒸煮处理时间的延长而逐渐收缩,导致细胞形态被破坏、细胞壁裂解,从而使其脆度下降。李笑梅等<sup>[21]</sup>对经不同保脆剂处理的老山芹在解冻后进行穿刺试验,结果显示复配比为 1:1.8(质量比)、浓度(以浸泡液计)为 4 g/L 且浸泡时间为 29 min 的海藻酸钠-氯化钙复合液处理对维持老山芹脆性的效果最佳。Arimi 等<sup>[22]</sup>对不同水分活度的饼干脆性测定时,采用穿刺过程中声音的变化来表示脆性的变化,从而使力学试验和声学试验结合起来。

穿刺试验通常关注样品的局部区域,而脆性是一个更广泛的感官特性,涉及到食物在咀嚼中的断裂和

崩解。穿刺试验可能无法全面捕捉和模拟这种复杂的食物脆性。

### 1.4 弯曲试验

果蔬组织的拉伸力学性能可能对果蔬品质评价产生重大影响,由于水果和蔬菜组织单轴拉伸测试的样品制备是困难的,因此对拉伸材料性能的研究很少。三点弯曲是测量拉伸弹性模量的另一种试验方法,弯曲试验(图 1D)检验材料在受弯曲载荷作用下的性能,许多材料是在弯曲载荷下工作的,主要用于测定脆性和低塑性材料的抗弯强度并能反映塑性指标的挠度<sup>[11]</sup>。利用材料力学的理论和概念来确定弯曲试验中性轴的位置与压缩弹性模量与拉伸弹性模量之比之间的关系,通过弯曲载荷来表示脆度的变化<sup>[23]</sup>。这种试验方法非常适合于测量许多水果和蔬菜的拉伸性能。

Bolin 等<sup>[24]</sup>使用原始弯曲试验来测量苹果楔形变形所需的力,经过不同的加工处理,以监测脆度的变化;采用单边缘缺口弯曲几何形状来评估材料的断裂性能,单边缘缺口弯曲几何是一种完善的测试方法,已广泛用于金属和聚合物材料的研究,不同的果蔬在断裂过程中载荷的变化情况不一样。Pitts 等<sup>[23]</sup>通过弯曲试验验证了对不同拉伸和压缩弹性模量材料的有效性,将弯曲试验测得的拉伸弹性模量值与传统拉伸试验测得的拉伸弹性模量值进行了比较,结果表明弯曲试验计算得到的拉伸弹性模量与传统拉伸试验的弹性模量误差为 0.67%。安明琦等<sup>[25]</sup>用三点弯曲试验评价鱼糜凝胶脆性,发现结晶固体材料的断裂通常发生在一个明确的瞬间,而凝胶样品的断裂存在延迟现象。Fiszman 等<sup>[26]</sup>用三点弯曲试验对饼干进行拉伸,发现饼干在拉伸作用下发生断裂,从而得到样品的受力变形曲线,这些曲线可以反映饼干的脆性断裂,其基本特征是弹性响应和较小的断裂应变。

力学测定方法虽然具备客观、稳定等优势,但不同测试方法对结果影响较大。在实际应用中,一些研究人员认为单一的力学测定不能准确表示出食品的脆性,于是将力学测定和声学测定结合起来,根据材料的性质、类型、特性和形状选用合适的测定方法。

## 2 声学测定

质地分析仪是根据力/变形法设计的,通过模拟人的感官评价来客观测量食品的质地特性。这些方法可以测试食物的单一或多种机械特性,这些特性对人类用手或嘴对质地的感官感知以及在处理过程中对机械损伤的抵抗力很重要<sup>[27]</sup>。因此,质构分析仪在食品质量评价中得到广泛的应用,如糊状物、面条、烘焙食品、肉制品、水产品、乳制品、水果、蔬菜、休闲食品(糖果、膨化食品)和凝胶食品(果冻)。食品质地的机械测量可分为破坏性和非破坏性两种方法。破坏性试验可以



与微观结构和分子机制联系起来,模拟咀嚼过程,但与无损测量相比,破坏性测量的一个主要缺点是在测量过程中食物样品被破坏。作为最常用的模仿方法,压缩试验不能完美地模拟咀嚼过程中口腔内的情况。咀嚼过程中个体的感觉是反映食物质地特征的重要因素。众所周知,破碎的食物和咬碎食物的牙齿的振动会使空气振动,由此产生的压缩波产生声音<sup>[28]</sup>。因此,近年来,利用声学测量来评价食品的质地也引起了研究者的关注。声学测量的主要原理是基于一个假设,即人们通过食物在口中咀嚼时产生的声音来评估食物的质地<sup>[29]</sup>。在声学测量的基础上,可以用质地指数来定量评价食物的质地,质地指数被定义为能量密度。这种方法使用一个模拟人类门牙或犬牙的探针。将探针插入食物样品中,探针在破坏样品时发生的振动由直接附着在探针上的压电传感器检测。此外,固体食物机械分解的性质取决于微观结构和口腔运动对食物物理结构变化的响应<sup>[30]</sup>。因此,断裂行为和微观结构变化的变量也被考虑在内,以理解与感官知觉有关的食物质地特性。

人类感知细胞结构破裂的声音通过空气传导到耳朵和骨传导通过舌头、脸颊和下颌骨到耳朵。由于低频率在骨传导过程中被肌肉组织吸收,因此在咀嚼过程中录制到的声音比实际听到的声音更加清晰。当力作用于一种材料时,储存的应变能被转化为声能,空气中的单个分子移动其他分子,引起振动,从而声波被传播。材料变形过程中产生的裂缝可能是声信号的来源,其中还可能包含有关产品质构的信息<sup>[31]</sup>。利用形变过程中产生的声波发射可以预测食物的质地。声发射方法已被用于研究许多脆性食品的特性,如挤出物<sup>[32]</sup>、干凝胶<sup>[33]</sup>和糖泡沫<sup>[34]</sup>。材料的结构和食品的成分可能会影响它们的声学特性。声学振动试验是通过施加声波或超声波,通过提供一定频率的周期性力或冲激力,使被测样品产生自由振动而进行的<sup>[35]</sup>。在声振动测量中,可获得固有频率、传播速度、声阻抗、衰减系数等参数<sup>[36]</sup>。食品对振动的响应取决于食品的机械和物理性质(如弹性模量、质量和形状)以及振动频率。声学振动技术已被广泛用于水果硬度或刚度测量,如苹果、梨、猕猴桃和火龙果的刚度系数与质地指标之间获得了良好的相关系数( $r>0.8$ )<sup>[36]</sup>。

声音是在咬或压缩脆的食物时产生的。为了使产品产生声发射,裂纹必须以高于临界速度的速度发射。已有研究表明大多数干脆产品的临界开裂速度在300~500 m/s 范围内<sup>[37]</sup>。研究认为,临界裂纹速度与产品的杨氏模量和密度等物理特性有关,如果一个产品不脆,裂纹速度就会低,断裂时也不会产生声音。Salvador 等<sup>[38]</sup>对6种感官硬度和脆度不同的薯片的断口和声学特性进行了分析和讨论,结果表明一定程度的

感官硬度是获得较高脆度的必要条件。Jakubczyk 等<sup>[39]</sup>利用声发射技术对添加麦芽糊精和苹果浓缩液的凝胶进行测定,发现随着苹果浓缩液含量的增加,凝胶脆性逐渐变弱;添加苹果浓缩液但不含麦芽糖糊精和浸泡制备的凝胶发出较低的声能,这可能与这些软凝胶的脆性结构较小有关。Jakubczyk 等<sup>[32]</sup>将声学测量技术和穿刺试验结合起来,应用于不同填充物(太妃糖、牛奶、椰子和巧克力奶油、果冻)的共挤物产品的质地分析。结果表明,奶油夹心零食口感酥脆,发出的声音强度显著;对于含有牛奶奶油的挤压产品,记录了更高数量的力和声音峰值以及更高数量的声学事件。

声学检测法可以无损检测农产品结构的变化,而且还能用于预测内部品质,减少对产品的破坏,但是声学检测具有一定的局限性。采用咀嚼声音信号进行评价虽然也是破坏性的分析方法,但本身也是食品脆度评价中的重要参考依据,且信号采集较为方便,因此一些研究人员将声学检测和感官测定相结合,更为有效地评价食品脆度。

### 3 感官测定

食物质构的感知是一个复杂的过程,其涉及人体的视觉、听觉、体觉和动觉<sup>[40]</sup>。在食品的咀嚼过程中,人脑在不同的刺激作用下形成了脆的感觉,但是“脆”分为两种,一种是“脆脆的”,另一种是“酥脆的”<sup>[41]</sup>。“脆脆的”与在雪地或霜冻上行走的声音联系在一起,被试验人员形容为干净的断裂和轻盈的质地;“酥脆”指的是一种轻薄的质地,当用力时,主要是在用门牙第一次咬的时候,它会产生尖锐而干净的裂痕,并发出高音,常用来形容果蔬等食品<sup>[42]</sup>。

在食品质地研究中,由经过培训的小组进行感官评价可用于验证仪器测量结果<sup>[43]</sup>。感官评价中常使用描述性分析对各类食物进行评测,描述性分析被认为是表征产品脆度的有效工具。描述性分析是一种数据分析方法,用于描述和总结数据集的特征和属性,食品中利用此方法对构成样品感官特征的各个指标强度进行完整、准确地评价<sup>[44]</sup>。湿脆性食物的最佳评估时间被认为是在第一次咬的过程中,这是食物表面破裂发生并且水分还没有向外壳迁移<sup>[42]</sup>。Voong 等<sup>[45]</sup>使用描述性分析表征油炸产品脆度,招募了8名感官评价成员,进行了3h 的培训课程,让他们在第一次咬一口和第一次咀嚼时评估食品脆性,并利用仪器对食品属性进行测定,证实了仪器测量和感官测量之间的正相关关系,发现脆度是与仪器数据相关性最高的变量之一。Liu 等<sup>[46]</sup>将制备的魔芋葡甘聚糖凝胶在氯化钠溶液中室温浸泡48h,然后由20名成员组成的经验丰富、训练有素的测试小组对其脆度进行了评估,发现魔芋葡甘聚糖的有效网络密度与其感官脆性成正比( $r=0.871$ ,

$P < 0.05$ )。

食品的感官评价,特别是分析性感官评价,不仅要求评价人员具有一定的判断能力,而且需要花费大量的时间和精力。同时,评价结果也受到多种因素的影响,其稳定性和可重复性难以保证。人类对食物质地的传统感官评价是主观的、不精确的、耗时的。与主观评价法相比,客观评价法在表征食品质地的多方面特性方面具有很大的优势。因此,客观仪器技术在食品工业中是首选的,甚至是必需的<sup>[11]</sup>。

#### 4 结语

食品凝胶在食品领域中发挥着重要的作用,它是一种具有特定结构和功能的材料,能够改善食品的质地、口感和稳定性。随着人们物质生活的不断丰富,人们除了追求健康食品,对于食品口感也越来越重视,而脆性是影响食品口感的一项重要属性,所以对于凝胶脆性的研究十分重要。目前凝胶脆性的研究都是基于力学测定、声学测定和感官测定,但是其缺点较为明显。力学测定不能准确反映凝胶脆性,一些研究人员认为脆性是人的感知,不易被下定义;声学测定存在信号采集不稳定、易受外界噪声干扰等问题;感知测定对评价人员要求高,该方法主观性较强,容易出现偏爱型误差。为了解决这些缺点,目前一些研究人员将这3种方法两两结合,如声学测定和力学测定相结合;感官测定和力学测定相结合;声学测定和感官测定相结合。

凝胶脆性是人的多种感受器收脆性食品刺激的感知,受多种因素的影响。因此,目前已有的测量方法都不能准确反映出其真实情况,构建一种新的测量方法对于推进凝胶的发展具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 张倩, 蒋玲, 王启明, 等. 双凝胶在食品领域:从组成到应用[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 277-284.  
ZHANG Qian, JIANG Ling, WANG Qiming, et al. Bigels in food field: From their composition to their applications[J]. Food Science, 2024, 45(6): 277-284.
- [2] 汪琦, 朱扬, 陈建设. 口腔软摩擦理论与测量技术及其在食品感官感知研究中的应用[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 222-232.  
WANG Qi, ZHU Yang, CHEN Jianshe. Application of oral soft friction theory and experimental methods in studying food sensory perception[J]. Food Science, 2021, 42(9): 222-232.
- [3] ALEMU T. Texture profile and design of food product[J]. Journal of Agriculture and Horticulture Research, 2023, 6(2): 272-281.
- [4] TUNICK M H, ONWULATA C I, THOMAS A E, et al. Critical evaluation of crispy and crunchy textures: A review[J]. International Journal of Food Properties, 2013, 16(5): 949-963.
- [5] VINCENT J F V. Application of fracture mechanics to the texture of food[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(5): 695-704.
- [6] CHAUVIN M A, YOUNCE F, ROSS C, et al. Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: Relationship with acoustical determinations[J]. Journal of Texture Studies, 2008, 39(4): 345-368.
- [7] 黄佳玲, 曹嘉莹, 骆开璇, 等. 食品脆度评价方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(3): 12-19.  
HUANG Jialing, CAO Jiaying, LUO Kaixuan, et al. Research progress on evaluation methods of food crispness[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(3): 12-19.
- [8] NISHINARI K, FANG Y P. Perception and measurement of food texture: Solid foods[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(2): 160-201.
- [9] LUO J, DENG B H, VARGHEESE K, et al. Atomic-scale modeling of crack branching in oxide glass[J]. Acta Materialia, 2021, 216: 117098.
- [10] RIVERA S, KERCKHOFFS H, SOFKOVA-BOBCEVA S, et al. Data of texture profile analysis performed by different input settings on stored 'Nui' and 'Rah' blueberries[J]. Data in Brief, 2021, 38: 107313.
- [11] LIU Y X, CAO M J, LIU G M. Texture analyzers for food quality evaluation[M]//Evaluation Technologies for Food Quality. Amsterdam: Elsevier, 2019: 441-463.
- [12] LESME H, RANNOU C, FAMELART M H, et al. Yogurts enriched with milk proteins: Texture properties, aroma release and sensory perception[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 140-149.
- [13] PEYRON M A, WODA A. An update about artificial mastication[J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 9: 21-28.
- [14] 解伟妮, 陈建杨. 食品脆度的客观表征及其通用测量公式的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(3): 150-152.  
XIE Weini, CHEN Jianyang. Objective characterization and general measurement equation of food crispness[J]. Food Science, 2010, 31(3): 150-152.
- [15] 于泓鹏, 曾庆孝. 脆度的研究方法及其控制参数[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(3): 85-89.  
YU Hongpeng, ZENG Qingxiao. Crispness study methods and its controlling parameters[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(3): 85-89.
- [16] 余纪柱, 石内伝治. 黄瓜果实脆度的简易评价方法[J]. 园艺学报, 1996(1): 91-93.  
YU Jizhu, ISHIUCHI Denji. A study on the evaluation of cucumber fruit crispness[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1996, 23(1): 91-93.
- [17] VOONG K Y, NORTON A B, MILLS T B, et al. Characterisation of deep-fried batter and breaded coatings[J]. Food Structure, 2018, 16: 43-49.
- [18] VAN KOERTEN K N, SCHUTYSER M A I, SOMSEN D, et al. Crust morphology and crispness development during deep-fat frying of potato[J]. Food Research International, 2015, 78: 336-342.
- [19] 叶阳, 肖川泉, 袁茜, 等. 预制菜肴中芥菜护色及保脆工艺优化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 72-80.  
YE Yang, XIAO Chuanquan, YUAN Qian, et al. Process optimization for preserving the color and crispness of mustard in prefabricated food[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 72-80.
- [20] LU Y, ZHAO S M, JIA C H, et al. Textural properties of Chinese water chestnut (*Eleocharis dulcis*) during steam heating treatment[J]. Foods, 2022, 11(9): 1175.
- [21] 李笑梅, 赵廉诚, 邢竺静, 等. 浸泡保脆工艺的优化对老山芹解冻后品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 139-145.  
LI Xiaomei, ZHAO Liancheng, XING Zhujing, et al. Effect of optimization of soaking and crisping process on the quality of *Herac-*

- leum moellendorffi after thawing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 139-145.
- [22] ARIMI J M, DUGGAN E, O'SULLIVAN M, et al. Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread): Mechanical and acoustic evaluation[J]. Food Research International, 2010, 43(6): 1650-1655.
- [23] PITTS M J, DAVIS D C, CAVALIERI R P. Three-point bending: An alternative method to measure tensile properties in fruit and vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1): 63-69.
- [24] BOLIN H R, NURY F S, FINKLE B J. An improved process for preservation of fresh peeled apples[J]. Bakers Dig, 1964, 38(3): 46-48.
- [25] 安玥琦, 赵思明, 刘茹, 等. 鱼糜凝胶脆性的力学性能表征与模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 292-298.  
AN Yueqi, ZHAO Siming, LIU Ru, et al. Mechanical characterization and establishment of its model for crunchiness of surimi gels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 292-298.
- [26] FISZMAN S M, SANZ T, SALVADOR A. Instrumental assessment of the sensory quality of baked goods[M]//Instrumental Assessment of Food Sensory Quality. Amsterdam: Elsevier, 2013: 374-402.
- [27] MISHRA G, SAHNI P, PANDISELVAM R, et al. Emerging nondestructive techniques to quantify the textural properties of food: A state-of-art review[J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(2): 173-205.
- [28] AKIMOTO H, SAKURAI N, SHIRAI D. A new device for acoustic measurement of food texture using free running probe[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 215: 156-160.
- [29] DIAS-FACETO L S, SALVADOR A, CONTI-SILVA A C. Acoustic settings combination as a sensory crispness indicator of dry crispy food[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(2): 232-241.
- [30] MENDOZA M G A. Chew on it: Consumer and food characteristics steer oral processing behavior and sensory perception[D]. Wageningen: Wageningen University & Research, 2020.
- [31] EL-MESERY H S, MAO H P, ABOMOHR A E F. Applications of non-destructive technologies for agricultural and food products quality inspection[J]. Sensors, 2019, 19(4): 846.
- [32] JAKUBCZYK E, GONDEK E, TRYZNO E. Application of novel acoustic measurement techniques for texture analysis of co-extruded snacks[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 582-589.
- [33] MAEDA Y, HAYASHI Y, FUKUSHIMA J, et al. Sonochemical effect and pore structure tuning of silica xerogel by ultrasonic irradiation of semi-solid hydrogel[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105476.
- [34] JAKUBCZYK E, KAMIŃSKA-DWÓRZNICKA A. Effect of addition of chokeberry juice concentrate and foaming agent on the physical properties of agar gel[J]. Gels, 2021, 7(3): 137.
- [35] LOPES R Z, DACANAL G C. Classification of crispness of food materials by deep neural networks[J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(6): 845-859.
- [36] ZHANG W, LV Z Z, XIONG S L. Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods-A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(14): 2386-2397.
- [37] LUYTEN H, VAN VLIET T. Acoustic emission, fracture behavior and morphology of dry crispy foods: A discussion article[J]. Journal of Texture Studies, 2006, 37(3): 221-240.
- [38] SALVADOR A, VARELA P, SANZ T, et al. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(3): 763-767.
- [39] JAKUBCZYK E, KAMIŃSKA-DWÓRZNICKA A, OSTROWSKA-LIGEŻA E. The effect of composition, pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of apple gels and freeze-dried materials[J]. Gels, 2022, 8(2): 110.
- [40] KAMEI M, NISHIBE M, ARAKI R, et al. Effect of texture preference on food texture perception: Exploring the role of matching food texture and preference[J]. Appetite, 2024, 192: 107078.
- [41] VINCENT J F V. The quantification of crispness[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1998, 78(2): 162-168.
- [42] LUYTEN H, PLIJTER J J, VAN VLIET T. Crispy/crunchy crusts of cellular solid foods: A literature review with discussion[J]. Journal of Texture Studies, 2004, 35(5): 445-492.
- [43] VIVEK K, SUBBARAO K V, ROUTHAY W, et al. Application of fuzzy logic in sensory evaluation of food products: A comprehensive study[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(1): 1-29.
- [44] TORRICO D D, NGUYEN P T, LI T Y, et al. Sensory acceptability, quality and purchase intent of potato chips with reduced salt (NaCl) concentrations[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 102: 347-355.
- [45] VOONG K Y, NORTON-WELCH A, MILLS T B, et al. Understanding and predicting sensory crispness of deep-fried battered and breaded coatings[J]. Journal of Texture Studies, 2019, 50(6): 456-464.
- [46] LIU Z J, LIU J, ZHONG H, et al. Structural features underlying crunchy property of konjac glucomannan gels[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108998.