

## 口腔摩擦学在食品口腔加工中的应用

林顺顺<sup>1</sup>, 史家琪<sup>1</sup>, 赵杰<sup>1,2</sup>, 张剑<sup>1</sup>, 孙夫才<sup>2</sup>, 马兵团<sup>3</sup>, 李梦琴<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002

<sup>2</sup>贝一食品(山东)有限公司 山东临沂 276000

<sup>3</sup>河南同昌实业有限公司 郑州 450000

**摘要** 口腔加工不仅是一个饮食过程,也是一个享乐过程。人们所感知的食物质地是一种多维的感官特征。目前仅通过流变学已无法表征这一复杂感官感知。摩擦学通过模拟食物在口腔内的加工过程和食物被舌头挤压至口腔表面时的润滑行为来客观表征食物在口腔加工中的感官属性。口腔摩擦学已成为表征食物口腔加工中润滑行为的重要工具。本文综述口腔摩擦学在食品加工和研发中的应用,重点阐述食物在口腔加工中的涩感、润滑感等感官感知及其润滑机制,旨在为未来食品设计提供参考。

**关键词** 口腔加工; 摩擦学; 流变; 润滑感; 涩感

文章编号 1009-7848(2023)11-0457-08 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.11.043

食品在口腔中的加工是一个复杂的动态过程,它包含了食物的获取、咀嚼、吞咽等。Stokes等<sup>[1]</sup>将口腔处理分为6个阶段:第1口咬合、粉碎、颗粒化、食团形成、吞咽和残留。这一系列行为,既是口腔对食物的处理过程,也是口腔感知食物享受属性的过程。人们通过口腔加工感知食物的质地属性是一种多维的感官感知,受食物的结构、流变性、表面特性以及唾液的影响,无法简单地使用仪器测量。在食物口腔加工初期,食物的流动性、黏弹性等流变学特性在口腔感官感知中起主导作用,在咀嚼后期口腔感知到的食物质地属性与口腔表面分散体的摩擦学行为有关。大量研究表明,仪器测定的食物流变行为与食物的感官属性及特定结构之间虽存在着一定的相关性<sup>[2-3]</sup>,但流变学无法预测口腔加工中复杂的感官参数,如口感<sup>[4]</sup>、奶油味<sup>[5]</sup>等。摩擦学通过模拟食物在口腔内的加工过程和食物被舌头挤压至口腔表面时的润滑行为来客观表征食物的感官属性<sup>[6-7]</sup>。有研究表明,巧克力的摩擦系数随口腔加工时间的增加呈减小趋势,消费者能够获得更好的丝滑感<sup>[8]</sup>。Nguyen等<sup>[9]</sup>测定不同巴氏杀菌牛奶和奶油奶酪的摩擦系数,

结果发现对于不同脂肪含量的样品,摩擦系数之间存在显著性差异,这表明摩擦学具有区分不同脂肪含量样品的能力。此外,口腔摩擦学对于开发适合吞咽障碍患者的功能性食品也具有重要价值<sup>[10]</sup>。

### 1 摩擦学的 Stribeck 曲线

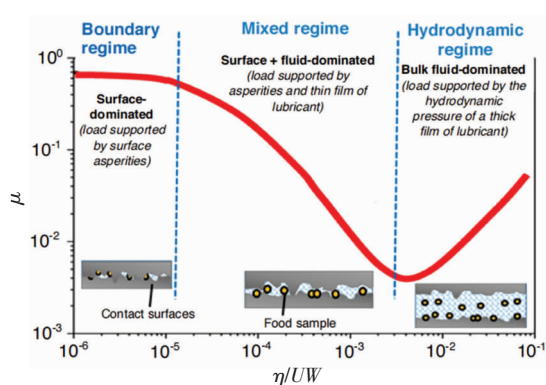
在食物摩擦学中,通过 Stribeck 曲线揭示食物的润滑机制<sup>[11]</sup>(图 1)。该曲线适用于表征润滑剂黏度、表面运动的相对速度(夹带速度)、负载和摩擦系数之间的关系。在 Stribeck 曲线中,从左至右可分为边界润滑区、混合润滑区和流体润滑区。如图 1 所示,在边界润滑时,接触面间相对运动速度很小时,流体动力压力不足以将上颚和舌头分开,接触表面的粗糙度决定了食物的润滑特性。随着夹带速度的增加,更多的润滑剂进入两接触面间,润滑剂形成一层连续的薄膜将舌头-上颚两表面分开,此时摩擦系数最小,称为混合润滑,在此阶段决定食物润滑特性的不仅是润滑剂和接触面的材料性质,还包含了润滑剂和接触面间的相互作用。随着夹带速度的进一步提高,食物受到较大的流体压力与平面分离,不存在直接接触,称为流体润滑。在这里,润滑剂的体积特性(即黏度、结构)决定摩擦行为。因此,摩擦学可以很好的和流变学、流体力学结合,来描述食品在口腔加工中发生的变化<sup>[12-13]</sup>。

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901820);  
河南省高等学校重点科研项目(20A550010)

第一作者: 林顺顺,女,博士,讲师

通信作者: 李梦琴 E-mail: lmqfood@163.com



注:横坐标是润滑剂黏度  $\eta$  (Pa·S), 夹带速度  $U$  (m/s) 和负载  $W$  有关的函数, 纵坐标为摩擦系数  $\mu$ 。

图1 Stribeck 曲线<sup>[11]</sup>

Fig.1 Stribeck curve<sup>[11]</sup>

摩擦系数是口腔摩擦学中最重要参数, 表现为食物在口腔中发生的挤压和剪切时所表现出的摩擦性质<sup>[14]</sup>。有研究表明, 当2个相互接触的平面间存在润滑剂或者液体薄膜时, 摩擦系数就不再是一个稳定的常数, 这个时候它不但会受到接触表面性质的影响, 还受到2个平面相对运动的速度、润滑剂的性质和平面上负荷大小等的影响<sup>[15]</sup>。

## 2 摩擦学在客观表征食物感官属性方面的应用

### 2.1 涩感

多酚类是最常见的涩感物质, 通常存在于水果、树叶或树皮中。葡萄酒<sup>[16]</sup>、咖啡<sup>[17]</sup>、茶<sup>[18]</sup>以及未成熟的水果<sup>[17]</sup>等一系列在消费过程带给消费者涩感的食物中都被证实存在着多酚类物质, 该类物质可与唾液膜中的蛋白质结合后沉淀, 降低食物的润滑度。Rossetti 等<sup>[19]</sup>将涩感和口腔摩擦学联系起来, 该研究向唾液中添加表没食子儿茶素没食子酸酯 (Epigallocatechin gallate, EGCG) 或表儿茶素没食子酸酯 [(-)-Epicatechin gallate, ECG], 比较添加前后界面的摩擦特性, 发现 EGCG 或 ECG 会剥夺口腔中的唾液膜从而增大摩擦系数。即摩擦系数与口腔涩感呈现出较强的线性相关, 该研究表明 EGCG 引发口腔涩感。Charlton 等<sup>[20]</sup>提出蛋白质可与多酚结合形成可溶性复合物, 复合物之间通过相互作用导致沉淀生成。

李燕等<sup>[21]</sup>通过探究普洱茶冲泡次数及浸出物

的含量, 得出儿茶素及衍生物, 如 EGCG、ECG 对茶叶涩味有决定性作用, 酚酸及其衍生物、黄酮类、生物碱类物质对涩味具有协同作用。此外, Laguna 等<sup>[22]</sup>提出口腔摩擦学作为一种新方法可以量化多酚-蛋白质相互作用, 建立与涩味感官感知之间的联系。Wang 等<sup>[23]</sup>研究表明, 葡萄酒中单宁吸附在唾液膜上是导致口腔涩感和粗糙感的主要因素, 进而降低体系的润滑性。Wang 等<sup>[24]</sup>同样提出降低葡萄酒中的 pH 值同样会引起涩感, 且与单宁在唾液膜上的吸附作用具有不同的机制。此外, 乳清蛋白与口腔组织上的受体相互作用也被证实可引起口腔的涩感<sup>[25]</sup>。Laiho 等<sup>[26]</sup>改变酸奶中酪蛋白与乳清蛋白的比例, 发现含高比例乳清蛋白的酸奶样品中存在着大颗粒蛋白质聚集体, 该聚集体可提高口腔加工的剪切强度, 降低了口感的乳脂感和光滑度。综上表明, 口腔摩擦学已被认为是定量分析涩味感知的客观依据。

### 2.2 润滑感

2.2.1 脂肪对于润滑感的作用 脂肪在口腔加工中起润滑作用, 可以降低口腔摩擦系数从而得到更好的润滑感。脂肪感知的现象在口腔中并不能通过流变学或者黏度的测定进行表征。人们在大量研究中建立“乳脂感”感知与摩擦学之间的关系。郑淇丹等<sup>[27]</sup>研究发现适当的结晶态脂肪比例可以显著降低乳液的摩擦系数。Dresselhuis 等<sup>[28]</sup>设计不同比例脂肪液滴的水包油乳液, 用猪舌头和聚二甲基硅氧烷 (Polydimethylsiloxane, PDMS) 作为基底进行模拟口腔摩擦学处理, 发现提高总脂肪含量可以显著降低口腔加工的摩擦系数。对于无脂、低脂、全脂蛋黄酱的研究发现, 不同脂肪含量的蛋黄酱在摩擦过程中表现出不同的形态与口感的相关性<sup>[29]</sup>。Mu 等<sup>[30]</sup>采用葡萄糖- $\delta$ -内酯对不同脂肪含量的胶束酪蛋白分散体进行酸化处理, 制备乳液凝胶, 测定了该凝胶体系的流变学及摩擦学特性, 并与激光共聚焦扫描显微镜得到的微观结构变化相结合, 发现摩擦学与流变性能均与乳化度高度相关, 随着脂肪含量的增加摩擦系数显著降低。Principato 等<sup>[31]</sup>对市售不同脂肪/糖比例的榛子酱进行摩擦学分析, 发现脂肪/糖比例对摩擦系数呈负相关关系。Chung 等<sup>[32]</sup>以中链甘油三酯为油相, 桂花皂苷为植物基表面活性剂研究油滴

浓度对模型咖啡奶精理化性质的影响,结果表明表观黏度随着油滴浓度的增加而增加,进而影响感官感知。众所周知,脂肪的过多摄入会对人体健康造成威胁,近年来,对于低脂低热量食品的消费趋势越来越高,而口腔摩擦学的研究为低脂食品的开发提供一些参考。

**2.2.2 蛋白质对于润滑感的作用** 人们发现蛋白质可以作为脂肪替代物提高食物的润滑度。Laiho 等<sup>[26]</sup>发现影响酸奶润滑的主要因素是酪蛋白胶束上的乳清蛋白形成连续均质蛋白网络,低浓度、小颗粒均匀的蛋白质聚集体填充在两个移动表面之间,从而起到润滑作用,对酸奶的乳脂感和润滑度起到积极作用。赵杰等<sup>[33]</sup>发现浓缩乳清蛋白(Whey protein concentrate, WPC)的复合会显著提升淀粉凝胶体系的润滑特性,且 WPC 浓度对复合体系润滑特性提升呈非线性关系的显著影响。Chojnicka 等<sup>[34]</sup>采用了不同浓度卵清蛋白和乳清蛋白聚集体在橡胶表面的小型牵引机上模拟了与口腔条件相关的压力和牵引速度,结果表明摩擦系数既受口腔中食物体积黏度的影响,也与口腔中食物的粗糙度、弹性和表面相互作用有关。蛋白质聚集体可以作用于粗糙表面来调节摩擦力,从而控制口腔感知。Godoi 等<sup>[35]</sup>研究 3 种蛋白质亲水胶体(明胶、胶原蛋白水解物和微粒乳清蛋白)对低脂巧克力牛奶摩擦流变特性的影响,表明摩擦系数的大小虽受到蛋白质类型及浓度的影响甚微,但 Stribeck 曲线趋势差异显著,且对比得出明胶-胶原蛋白水解物混合状态样品在改善口感方面作用更为明显。蛋白质和多糖在食品工业中可作为天然食品添加剂,它们的混合体系比单一的蛋白质或多糖混合物具有更好的特性,Bot 等<sup>[36]</sup>调整了口服营养补充剂中脂肪、碳水化合物、蛋白质三者的比例,将摩擦系数与感官评价、粒度分布相关联,发现大豆蛋白-乳清蛋白混合物中脂肪含量较少的样品综合评分最高,有明显的甜味、乳脂感以及香草味。综上,食品中蛋白质可以改变食物的润滑特性,适当的配比将使消费者拥有享乐性口感感知(如奶油感、润滑感)。

**2.2.3 唾液对于润滑感的作用** 唾液是一种固有的生物润滑剂,它覆盖在口腔内的所有表面,涉及到食物加工的所有阶段<sup>[37]</sup>。口腔加工过程中唾

液里的蛋白质被底物吸收形成多层膜,唾液膜中具有高黏性和弹性的黏蛋白是口腔润滑行为的重要参与者,食物-唾液相互作用均被证实会影响食物在口腔加工过程中的流变学和摩擦学行为<sup>[38]</sup>。唾液膜的吸附和润滑与唾液分泌密切相关,而唾液膜在口腔中的厚度因为部位不同会有所区别,其分泌速度也会随着食物的刺激以及唾液腺的位置而发生改变。有研究表明,唾液流速会影响受试者对茶叶的回甘感觉<sup>[39]</sup>。唾液还可以作为乳化剂,使进入口腔的脂肪分布均匀<sup>[40]</sup>,可以有效降低酸奶样品的摩擦系数<sup>[41]</sup>。Watrelet 等<sup>[42]</sup>研究指出,唾液比黏蛋白润滑剂在疏水表面聚二甲基硅氧烷(PDMS)上更能降低红酒的摩擦系数。Fuhrmann 等<sup>[43]</sup>同样提出,唾液添加量越大,食物的摩擦力就越小,唾液分泌量受到食物颗粒大小的影响。Morell 等<sup>[44]</sup>探究蛋白质、淀粉以及唾液对酸奶润滑能力的影响,发现添加高浓度 WPC 或奶粉使样品具有颗粒感,而淀粉及唾液浓度的增大均能显著降低酸奶的摩擦系数,这也说明进行摩擦学测定时,唾液的存在可以提高数据的真实性。

**2.2.4 物质环境及操作条件对润滑感的作用** 淀粉在食品工业中广泛用作胶凝剂、增稠剂和稳定剂,大多数淀粉类基质食物含有食盐、乳酸、乙酸等成分,这些小分子电解质会影响食物的 pH 值以及离子强度,这些条件的变化对淀粉糊化、黏弹性、回生程度均有影响。离子强度在一定范围内对马铃薯淀粉黏弹性影响显著,超出该范围后,影响就明显减弱,且马铃薯淀粉比玉米淀粉对离子强度的反应更敏感<sup>[44]</sup>。Fang 等<sup>[45]</sup>研究表明,在中性和碱性 pH 值下,电离化的磷酸单酯会阻止凝胶的老化。随着 pH 值的降低和磷酸单酯的质子化,分子间静电斥力减小,糯性马铃薯淀粉通过分子间双螺旋结构形成黏弹性极强的凝胶。蛋白质虽然也可以提高淀粉凝胶的结构强度,但是降低体系 pH 值会弱化蛋白质的作用。Aleixandre 等<sup>[46]</sup>向淀粉中加入酚类物质(苯甲酸、原儿茶酸、香草酸和藜芦酸)后发现这类物质可以影响淀粉的糊化特性、热稳定性、黏度、微观结构及硬度等特性,且在适当 pH 值下,酚类物质中的羟基可以有效抑制淀粉的消化水解,进而达到调节餐后葡萄糖释放的目的。Hossain 等<sup>[47]</sup>发现不同浓度 NaCl 以及各种



pH 值环境等水质参数会改变氧化纤维素纳米纤维-淀粉共混凝胶的稳定性及其流变性质。Olivares 等<sup>[48]</sup>研究不同浓度脱脂奶粉(Skim milk powder, SM)和氯化钙制备的钙诱导脱脂乳凝胶体系的凝胶化过程、理化特性和摩擦流变学特性,结果发现较高 SM 浓度的凝胶具有较好的持水性能,热处理前牛奶分散物的 pH 值影响凝胶化过程开始的温度及凝胶的最终结构,提高 SM/氯化钙含量,凝胶体系的润滑性能也随之提高。Young 等<sup>[49]</sup>研究 pH 值对蛋清蛋白和乳清分离蛋白(Whey protein isolate, WPI)的影响时发现在 pH 值为 7.5 即等电点(Isoelectric point, IEP)条件下的蛋清液体凝胶表现出高黏度和良好的润滑性能。当 pH 值为 3.5 和 pH 值为 8 时,WPI 液体凝胶的黏度及润滑性能良好,在 IEP 条件下的 WPI 流体凝胶则表现了较高的摩擦值。

许多食品乳状液的感官属性,比如乳脂性、厚度、光滑性等都与流变学性质直接相关。小振幅振荡剪切(Small amplitude oscillatory shear measurement, SAOS)通常用于量化食品结构的流变行为,大振幅振荡剪切(Large-amplitude oscillatory shear, LAOS)被用于表征非线性区域的食物流变学测量<sup>[50]</sup>。Anvari 等<sup>[51]</sup>研究指出,在处于较高 pH 值以及 LAOS 时,鱼明胶-阿拉伯树胶络合浓缩乳试样的摩擦系数较高。研究表明,在 LAOS 时香雪球种子胶体系表现永久变形和较低的摩擦系数<sup>[52]</sup>。糊化后的淀粉凝胶大多表现剪切稀化行为,而 Ang 等<sup>[53]</sup>发现在 300 r/min 的连续搅拌下,在过量水中处理 30 min 的糯马铃薯淀粉则表现出剪切增稠行为。Gao 等<sup>[54]</sup>指出在高剪切速率下,紫胶钠脂肪酸链的疏水相互作用增大,紫胶钠悬浮液由牛顿流体变为非牛顿流体。Shahbazi 等<sup>[55]</sup>通过不同剪切速率对玉米淀粉分散体进行物理改性,制备改性后的淀粉凝胶体系,研究剪切力对其功能性能的影响。结果发现,低剪切处理会降低凝胶体系的硬度以及结晶度,随着剪切速率增加,体系硬度增加而黏性降低。该结果在 Ang 等<sup>[53]</sup>的研究中同样被发现,在 120 °C 下处理蜡质马铃薯淀粉,低速剪切速率下淀粉黏度逐渐降低,当超过其临界剪切速率时则表现剪切增稠,原因是剪切促进了聚合物链之间分子的缔合。

综上,物质环境(如盐离子浓度、pH 值)及操作条件(如剪切振幅及强度等)均对食品口腔加工中的润滑感具有显著影响。

### 3 摩擦学在食品加工及口感研发中的应用

口腔摩擦被运用于食品加工中,旨在开发消费者喜爱的风味产品。碳酸饮料因饮用后感到的“畅快感”常常受到年轻人的偏爱。碳酸化感知是口腔和鼻腔内的整体感知,包括刺痛,灼热,口腔灼伤和刺激<sup>[56]</sup>。Vladescu 等<sup>[57]</sup>发现碳酸饮料进入口腔后会使得唾液膜剥离,且 CO<sub>2</sub> 进入口腔后,形成了气泡,降低了流体动压,这些都导致了摩擦系数显著增加,使口感更加清爽。Barker 等<sup>[58]</sup>发现碳酸化后的蓝莓汁和苹果汁比非碳酸化时更受消费者认同。程欢<sup>[59]</sup>研究发现 Span 系列乳化剂与黏蛋白的复合物则会引发口腔涩味的分子机制与不可逆絮凝紧密相关。这一发现对于研发口感及健康偏好的乳饮料具有一定的理论借鉴意义。胡静茹<sup>[60]</sup>发现掺有不同含量三聚氰胺的牛奶与普通牛奶相比,其摩擦系数显著变大,因此摩擦学测试可应用于检测牛奶中三聚氰胺的存在。Kim 等<sup>[61]</sup>对苹果进行固态食品的摩擦行为研究,发现粉状及颗粒粗糙的苹果具有更低的摩擦系数,且瞬态阶段的摩擦系数与质地属性之间具有显著相关性,而在稳态阶段没有相关性。这在未来与感官评价相关的固态食品摩擦学研究具有重要意义。功能性乳饮料对于改善肠道菌群以及生物代谢等方面多有益处, Garavand 等<sup>[62]</sup>研究副干酪乳杆菌(*Lactococcus paracasei*, *L.paracasei*)与益生元(乳果糖、菊粉、大豆分离蛋白和螺旋藻)为补充剂的酸奶的生物活性以及摩擦学测定,对照发现副干酪乳杆菌-螺旋藻复合酸奶具有较好的生物活性以及较低的摩擦系数,因此在发酵乳制品中采用益生菌-益生元共生系统可以提高其功能特性,从而得到营养价值更高的乳制品。Kardas 等<sup>[63]</sup>最新证明一些细菌可以产生与唾液性质相当的胞外聚物质,溶出后具有与唾液相当的流变学和摩擦学特性,可作为唾液替代物参与食品口腔加工研究。

### 4 结语与展望

对摩擦学的广泛研究在近十年兴起,它作为

一种工具客观表征食物口腔加工过程中的感官感知属性。本文综述了口腔摩擦学的基本原理以及物质环境、操作条件等因素对口感润滑属性的影响。对于食品口腔加工而言,食品的感官和生理属性是动态的、复杂的,目前的技术仍然无法在体外精确模拟这一过程,因此,将模拟口腔加工摩擦学数据完全取代实际人体的主观感官属性仍是一个挑战。但是,可以预见,口腔摩擦学在未来食品加工中将具有更大的潜力,将会成为食品研发及感官评价中一项重要的客观参考。

### 参 考 文 献

- [1] STOKES J R, BOEHM M W, BAIER S K. Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2013, 18(4): 349-359.
- [2] HARTE F, CLARK S, BARBOSA-CÁNOVAS G V. Yield stress for initial firmness determination on yogurt[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(3): 990-995.
- [3] JØRGENSEN C E, ABRAHAMSEN R K, RUKKE E O, et al. Improving the structure and rheology of high protein, low fat yoghurt with undenatured whey proteins[J]. *International Dairy Journal*, 2015, 47: 6-18.
- [4] GUINARD J X, MAZZUCHELLI R. The sensory perception of texture and mouthfeel[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1996, 7(7): 213-219.
- [5] UPADHYAY R, AKTAR T, CHEN J. Perception of creaminess in foods[J]. *J Texture Stud*, 2020, 51(3): 375-388.
- [6] CHOJNICKA-PASZUN A, DOUSSINAULT S, DE JONGH H H J. Sensorial analysis of polysaccharide-gelled protein particle dispersions in relation to lubrication and viscosity properties[J]. *Food Research International*, 2014, 56: 199-210.
- [7] SELWAY N, STOKES J R. Insights into the dynamics of oral lubrication and mouthfeel using soft tribology: Differentiating semi-fluid foods with similar rheology[J]. *Food Research International*, 2013, 54(1): 423-431.
- [8] 王迪, 钱善华, 程帅, 等. 口腔环境下巧克力摩擦性能影响的试验研究[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(12): 57-62.
- [9] WANG D, QIAN S H, CHENG S, et al. Experimental investigation on the frictional properties of chocolate in the oral environment[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(12): 57-62.
- [9] NGUYEN P T M, BHANDARI B, PRAKASH S. Tribological method to measure lubricating properties of dairy products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 168: 27-34.
- [10] VIEIRA J M, OLIVEIRA JR F D, SALVARO D B, et al. Rheology and soft tribology of thickened dispersions aiming the development of oropharyngeal dysphagia-oriented products[J]. *Curr Res Food Sci*, 2020, 3: 19-29.
- [11] SARKAR A, KROP E M. Marrying oral tribology to sensory perception: A systematic review[J]. *Curr Opin Food Sci*, 2019, 27: 64-73.
- [12] 莫琳怡. 真实口腔摩擦测量方法的建立及可行性验证[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.
- [12] MO L Y. Establishment and feasibility verification of the method of real oral friction measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.
- [13] PRAKASH S, TAN D D Y, CHEN J. Applications of tribology in studying food oral processing and texture perception[J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1627-1635.
- [14] 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.
- [14] WANG Q, ZHU Y, CHEN J S. Application of oral soft friction theory and experimental methods in studying food sensory perception[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 222-232.
- [15] 蔡慧芳. “口腔”摩擦学在质构感知上的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- [15] CAI H F. Applications of ‘oral’ tribology in studying texture and sensory perception[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017.
- [16] MCRAE J M, KENNEDY J A. Wine and grape tannin interactions with salivary proteins and their impact on astringency: A review of current research[J]. *Molecules*, 2011, 16(3): 2348-2364.
- [17] MA S, LEE H, LIANG Y, et al. Astringent mouthfeel as a consequence of lubrication failure[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2016, 55(19): 5793-5797.
- [18] SCHARBERT S, HOLZMANN N, HOFMANN T. I-

- dentification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bioresponse[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(11): 3498–3508.
- [19] ROSSETTI D, BONGAERTS J H H, WANTLING E, et al. Astringency of tea catechins: More than an oral lubrication tactile percept[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1984–1992.
- [20] CHARLTON A J, BAXTER N J, LOKMAN K M, et al. Polyphenol/peptide binding and precipitation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(6): 1593–1601.
- [21] 李燕, 王文富, 王金涛, 等. 不同冲泡次数普洱茶浸出物含量及滋味品质变化分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 210–218.
- LI Y, WANG W F, WANG J T, et al. Analysis of variations in content of extracts and taste quality of pu-erh raw tea with different brewing times[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 210–218.
- [22] LAGUNA L, SARKAR A. Oral tribology: update on the relevance to study astringency in wines[J]. *Tribology–Materials, Surfaces & Interfaces*, 2017, 11(2): 116–123.
- [23] WANG S, OLARTE MANTILLA S M, SMITH P A, et al. Tribology and QCM–D approaches provide mechanistic insights into red wine mouthfeel, astringency sub–qualities and the role of saliva[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106918.
- [24] WANG S, OLARTE MANTILLA S M, SMITH P A, et al. Astringency sub–qualities drying and pucker are driven by tannin and pH – Insights from sensory and tribology of a model wine system[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106109.
- [25] CARTER B G, DRAKE M. Influence of oral movement, particle size, and zeta potential on astringency of whey protein[J]. *Journal of Sensory Studies*, 2021, 36(3): 1–13.
- [26] LAIHO S, WILLIAMS R P W, POELMAN A, et al. Effect of whey protein phase volume on the tribology, rheology and sensory properties of fat–free stirred yoghurts[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 67: 166–177.
- [27] 郑淇丹, 樊迪, 沈清武, 等. 不同结晶态脂肪比例对乳液奶油感知的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 7–14.
- ZHENG Q D, FAN D, SHEN Q W, et al. Effect of solid fat content on creaminess perception of emulsions[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 7–14.
- [28] DRESSELHUIS D M, KLOK H J, STUART M A C, et al. Tribology of O/W emulsions under mouth–like conditions: Determinants of friction[J]. *Food Biophysics*, 2007, 2(4): 158–171.
- [29] GIASSON S, ISRAELACHVILI J, YOSHIKAWA H. Thin film morphology and tribology study of mayonnaise [J]. *Journal of Food Science*, 1997, 62(4): 640–646.
- [30] MU S, REN F, SHEN Q, et al. Creamy mouthfeel of emulsion–filled gels with different fat contents: Correlating tribo–rheology with sensory measurements [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107754.
- [31] PRINCIPATO L, CARULLO D, DUSERM GARRIDO G, et al. Rheological and tribological characterization of different commercial hazelnut –based spreads[J]. *J Texture Stud*, 2022, 53(2): 196–208.
- [32] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Impact of oil droplet concentration on the optical, rheological, and stability characteristics of O/W emulsions stabilized with plant–based surfactant: Potential application as non–dairy creamers[J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 913–919.
- [33] 赵杰, 宋晓燕, 马兵团, 等. 淀粉–乳清蛋白复合条件对体系润滑特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(14): 22–27.
- ZHAO J, SONG X Y, MA B T, et al. The effect of starch–whey protein compound condition on the lubricating properties of the system[J]. *Food Science*, 2022, 43(14): 22–27.
- [34] CHOJNICKA A, JONG S D, KRUIF C G D, et al. Lubrication properties of protein aggregate dispersions in a soft contact[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(4): 1274–1282.
- [35] GODOI F C, NINGTYAS D W, GEOFFROY Z, et al. Protein–based hydrocolloids: Effect on the particle size distribution, tribo–rheological behaviour and mouthfeel characteristics of low –fat chocolate flavoured milk[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 115: 106628.
- [36] BOT F, CROWLEY S V, O’SULLIVAN J J, et al. Colloidal, tribological and sensory properties of oral nutritional supplements[J]. *Italian Journal of Food Science*, 2020, 32(4): 956–969.
- [37] BROWN F N, MACKIE A R, HE Q, et al. Pro-

- tein-saliva interactions: A systematic review[J]. *Food Funct*, 2021, 12(8): 3324-3351.
- [38] BRAVO NUNEZ A, PANDO V, GOMEZ M. Physically and chemically modified starches as texturisers of low-fat milk gels[J]. *International Dairy Journal*, 2019, 92: 21-27.
- [39] CHONG P H, CHEN J, YIN D, et al. Tea compound-saliva interactions and their correlations with sweet aftertaste[J]. *NPJ Sci Food*, 2022, 6(1): 13.
- [40] GLUMAC M, QIN L, CHEN J, et al. Saliva could act as an emulsifier during oral processing of oil/fat [J]. *J Texture Stud*, 2019, 50(1): 83-89.
- [41] MORELL P, CHEN J, FISZMAN S. The role of starch and saliva in tribology studies and the sensory perception of protein-added yogurts[J]. *Food Funct*, 2017, 8(2): 545-553.
- [42] WATRELOT A A, KUHL T L, WATERHOUSE A L. Friction forces of saliva and red wine on hydrophobic and hydrophilic surfaces[J]. *Food Res Int*, 2019, 116: 1041-1046.
- [43] FUHRMANN P L, AGUAYO -MENDOZA M, JANSEN B, et al. Characterisation of friction behaviour of intact soft solid foods and food boli[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105441.
- [44] 黄峻榕, 薛婷, 魏宁果, 等. pH 和 NaCl 对马铃薯、玉米淀粉黏度特性的影响[J]. *食品与机械*, 2013, 29(6): 10-14.
- HUANG J R, XUE T, WEI N G, et al. The effect of starch-whey protein compound condition on the lubricating properties of the system[J]. *Food Machinery*, 2013, 29(6): 10-14.
- [45] FANG F, LUO X, FEI X, et al. Stored gelatinized waxy potato starch forms a strong retrograded gel at low pH with the formation of intermolecular double helices[J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(13): 4036-4041.
- [46] ALEIXANDRE A, ROSELL C M. Starch gels enriched with phenolics: Effects on paste properties, structure and digestibility[J]. *LWT*, 2022, 161: 113350.
- [47] HOSSAIN K M Z, CALABRESE V, DA SILVA M A, et al. Monovalent salt and pH-induced gelation of oxidised cellulose nanofibrils and starch networks: Combining rheology and small-angle X-ray scattering [J]. *Polymers (Basel)*, 2021, 13(6): 951.
- [48] OLIVARES M L, COSTABEL L M, ZORRILLA S E, et al. Calcium-induced skim milk gels: Effect of milk powder concentration and pH on tribo-rheological characteristics and gel physico-chemical properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107335.
- [49] YOUNG P W, MILLS T B, NORTON I T. Influence of pH on fluid gels produced from egg and whey protein isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106108.
- [50] AHMED J. Advances in rheological measurements of food products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 23: 127-132.
- [51] ANVARI M, JOYNER H S. Effect of fish gelatin and gum arabic interactions on concentrated emulsion large amplitude oscillatory shear behavior and tribological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79: 518-525.
- [52] ANVARI M, TABARSA M, JOYNER H S. Large amplitude oscillatory shear behavior and tribological properties of gum extracted from *Alyssum homolocarpum* seed[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 669-676.
- [53] ANG C L, THA GOH K K, LIM K, et al. rRheological characterization of a physically-modified waxy potato starch: Investigation of its shear-thickening mechanism[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106908.
- [54] GAO J, LI K, XU J, et al. Unexpected rheological behavior of a hydrophobic associative shellac-based oligomeric food thickener[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(26): 6799-6805.
- [55] SHAHBAZI M, MAJZOBI M, FARAHNAKY A. Impact of shear force on functional properties of native starch and resulting gel and film [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 223: 10-21.
- [56] CARSTENS E, CARSTENS M I, DESSIRIER J M, et al. It hurts so good: Oral irritation by spices and carbonated drinks and the underlying neural mechanisms[J]. *Food Quality and Preference*, 2002, 13(7/8): 431-443.
- [57] VLADESCU S C, BOZORGI S, HU S T, et al. Effects of beverage carbonation on lubrication mechanisms and mouthfeel[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 586: 142-151.
- [58] BARKER S, MOSS R, MCSWEENEY M B. Carbonated emotions: Consumers' sensory perception and emotional response to carbonated and still fruit

- juices[J]. *Food Res Int*, 2021, 147: 110534.
- [59] 程欢. Span 系列乳化剂引发口腔涩味的分子机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- CHENG H. The molecular mechanism of oral astringency induced by span series of emulsifiers [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [60] 胡静茹. 饮品品质与摩擦学物理参量关联性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- HU J R. Study on the correlation between beverage quality and tribological physical parameters[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [61] KIM M S, WALTERS N, MARTINI A, et al. Adapting tribology for use in sensory studies on hard food: The case of texture perception in apples [J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 86: 103990.
- [62] GARAVAND F, DALY D F M, G. GÓMEZ-MAS-CARAQUE L. Biofunctional, structural, and tribological attributes of GABA-enriched probiotic yoghurts containing *Lactocaseibacillus paracasei* alone or in combination with prebiotics[J]. *International Dairy Journal*, 2022, 129: 105348.
- [63] KARDAS P, ASTASOV -FRAUENHOFFER M, BRAISSANT O, et al. Bacterial extracellular polymeric substances as potential saliva substitute [J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2022, 369(1): 1-6.

### The Application of Oral Tribology in Food Oral Processing

Lin Shunshun<sup>1</sup>, Shi Jiaqi<sup>1</sup>, Zhao Jie<sup>1,2</sup>, Zhang Jian<sup>1</sup>, Sun Fucui<sup>2</sup>, Ma Bingtuan<sup>3</sup>, Li Mengqin<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

<sup>2</sup>Shandong Beiyi Food Industry Co. Ltd., Linyi 276000, Shandong

<sup>3</sup>Henan Tongchang Industrial Co. Ltd., Zhengzhou 450000)

**Abstract** Oral processing is not only a dietary process, but also a pleasure seeking process. The texture of food perceived by people is a multidimensional sensory characteristic. At present, rheology is no longer able to characterize this complex sensory perception. Tribology objectively characterizes the sensory properties of food in oral processing by simulating the processing process of food in the mouth and the lubrication behavior of food when pressed onto the surface of the mouth by the tongue. Oral tribology has become an important tool for characterizing the lubrication behavior in food oral processing. This article reviews the application of oral tribology in food processing and research and development, focusing on the sensory perception and lubrication mechanism of food in oral processing, such as astringency and lubrication, with the aim of providing reference for future food design.

**Keywords** oral processing; tribology; rheology; lubrication; acerbitity