

含丙二醇酯低脂蛋糕的流变学、气泡微结构和烘焙特性研究

Studies on the rheological, bubble microstructure and baking properties of the low-fat cake with propylene glycol esters

王家宝¹ 陈 诚¹ 王 凤^{1,2} 郝月慧²

WANG Jia-bao¹ CHEN Cheng¹ WANG Feng^{1,2} HAO Yue-hui²
黄金鑫² 陈军民² 黄卫宁¹ 小川晃弘³

HUANG Jin-xin² CHEN Jun-min² HUANG Wei-ning¹ AKIHIRO Ogawa³

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 无锡麦吉贝可生物食品有限公司, 江苏 无锡 214131; 3. 三菱化学食品株式会社, 日本 东京 100-8251)

(1. State Key of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. MagiBake International Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214131, China; 3. Mitsubishi-Chemical Foods Corporation, Tokyo 100-8251, Japan)

摘要:文章探究了新型丙二醇酯对低脂蛋糕的面糊密度、黏度、流变、微观结构以及蛋糕烘焙特性的影响。结果表明:丙二醇酯能增加油脂的表面张力,通过 X 射线衍射仪(XRD)研究表明丙二醇酯促进其转化为 α 晶型,有助于保护面糊小气泡不受到油脂消泡的影响,最优组气泡数增加了 1.87 倍。丙二醇酯能显著提高低脂蛋糕比容、降低硬度,从而改善了低脂蛋糕的品质特性。

关键词:丙二醇酯;乳化剂;气泡;低脂蛋糕;界面;面糊

Abstract: This study was conducted to evaluate the effect of new propylene glycol esters emulsifier on the specific gravity, viscosity, rheology, microstructure of batter and baking characteristics of low-fat cake. The results showed that propylene glycol esters increased the surface tension of oil and promoted changes in fat structure to the α crystalline form as observed by XRD. The small bubbles were protected by propylene glycol esters from defoaming caused by oil. The number of bubbles increased by 1.87 times. Propylene glycol ester significantly increased the specific

volume and decreased hardness of low-fat cake.

Keywords: propylene glycol esters; emulsifier; bubble; low-fat cake; interface; cake batter

随着饮食健康习惯和消费升级,传统蛋糕高脂高热量引发的肥胖、高血脂问题引起消费者的广泛忧虑^[1]。美国食品药品监督管理局(FDA)亦计划严格控制烘焙产品使用氢化固体油脂,低固体油脂含量的食品逐渐成为研究热点。相比于传统蛋糕,低脂蛋糕面糊因减少油脂无法使空气均匀分布在乳化体系中^[2],调节油-水界面张力能力弱导致乳化稳定性较差^[3],烘焙后的蛋糕比容和柔软度欠佳^[4-5]。目前工业生产常用的“一步法”工艺制作的低脂蛋糕比容小、易发硬是行业共性问题。

汤晓娟等^[6]研究发现使用亲脂性的蔗糖脂肪酸聚酯可减少蛋糕的油脂用量。丙二醇酯在烘焙行业是一种新型乳化剂,具有一定的亲油性,拥有优良的乳化性能^[7-8]。研究^[9-10]指出,丙二醇酯可在 W/O 乳液的油-水界面处结晶形成稳定的界面膜增强稳定性。但其在低脂蛋糕油-水-气复杂三相乳化体系中的研究尚未报道。

本试验拟以添加新型丙二醇酯并结合“一步法”制作低脂蛋糕为研究对象,研究不同添加量的丙二醇酯对低脂蛋糕面糊的流变学、微结构以及烘焙特性的影响,为丙二醇酯的现代烘焙食品工业化应用提供参考。

基金项目:“十三五”国家重大专项(编号:2016YFD0400500);国家自然科学基金(编号:31071595,31571877);比利时国际合作项目(编号:BE110021000)

作者简介:王家宝,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:黄卫宁(1963—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: wnhuang@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2018-12-11

1 材料与amp;方法

1.1 材料

新鲜鸡蛋、白砂糖:购自无锡本地市场;

低筋小麦粉:美玫牌,粗蛋白含量 8.2%,香港面粉有限公司;

固体油:福临门烘焙黄油,中粮东海粮油工业(张家港)有限公司;

液体油:菜籽油,中粮粮油工业(巢湖)有限公司;

丙二醇酯:三菱化学食品株式会社合作;

双效泡打粉:配料为焦磷酸二氢二钠(<40%)、碳酸氢钠(<25%)、碳酸钙(<5%)、淀粉,广州培乐道食品有限公司。

1.2 主要仪器与amp;设备

搅拌机:5K5SS 型,美国厨宝 Kitchen Aid 公司;

烤箱:SM-503 型,新麦机械(无锡)有限公司;

切片机:SM302N 型,新麦机械(无锡)有限公司;

质构分析仪:Brookfield CT3 型,美国博勒飞公司;

旋转流变仪:DHR-3 型,美国沃特世公司;

X-射线衍射仪(XRD):D2 PHASER 型,德国布鲁克 AXS 有限公司;

电子天平:JY2000 型,上海良平仪器有限公司;

荧光倒置显微镜:Zeiss Axio Vert.A1 型,卡尔·蔡司公司;

黏度计:NDJ-5S 数字旋转黏度计,上海微川精密仪器有限公司;

全自动表面张力仪:DCAT21 型,德国德菲公司。

1.3 方法

1.3.1 低脂蛋糕配方 低脂蛋糕配方如表 1 所示。乳化剂添加量均根据推荐量使用。

1.3.2 低脂蛋糕“一步法”制作工艺 将新鲜全蛋液倒入搅拌缸中,高速(速度 6)分散鸡蛋 30 s;白砂糖加入蛋液低速(速度 2)1 min,中速(速度 4)搅拌 2 min 至糖完全溶化;粉类过筛后加入蛋液中,低速搅拌 1 min,中速打发 2 min;低速下加入熔化的固体油、液体油和丙二醇酯混

合物,搅拌至完全均匀。取 150 g 低脂蛋糕面糊,倒入模具中,将低脂蛋糕面糊放入已经预热到上火 200 ℃、下火 190 ℃烤箱中,焙烤时间 30 min。将烘焙完成的低脂蛋糕迅速取出,冷却 1 h 后进行后续研究。

1.3.3 油脂表面张力测定 取 100 mL 油脂样品放置在平底容器中,静置至界面光滑平整,然后在表面张力测定仪上进行表面张力测定,至数据稳定到±0.03 mN/m^[11]。

1.3.4 油脂晶型测定 油脂样品均匀平整涂在 X-射线衍射玻片上。铜靶管射线源 λ = 1.540 60 × 10⁻¹⁰ m,功率 1 600 W (40 kV × 40 mA)。扫描角度 2θ 为 1°~30°,步长 0.02°^[12]。

1.3.5 低脂蛋糕面糊密度分析 采用相对密度法进行测定,试验均重复 3 次^[13]。首先取一个平底容器并称出其质量 m₀,记下注满蒸馏水和容器的总质量 m₁,再用相同的容器盛装面糊,记为质量 m₂,水的密度约为 1 g/cm³,按式(1)计算出面糊密度(ρ)。

$$\rho = \rho_{\text{水}} \times (m_2 - m_0) \div (m_1 - m_0), \tag{1}$$

式中:

ρ——低脂蛋糕面糊密度,g/mL;

m₀——密度杯质量,g;

m₁——密度杯中装满蒸馏水质量,g;

m₂——密度杯中装满面糊质量,g。

1.3.6 低脂蛋糕流变特性曲线测定 根据汤晓娟等^[6]的方法,修改如下:取适量面糊在 25 ℃条件下用流变仪流动模式测定面糊流变特性。平板直径选用 40 mm,夹缝距离为 1 mm。剪切速率从 0.1 s⁻¹线性增加到 100 s⁻¹。面糊流变曲线用以下方程描述,并所有曲线符合幂律模型:

$$\eta = K\gamma^{n-1}, \tag{2}$$

式中:

η——表观黏度,Pa · s;

K——稠度系数,Pa · sⁿ;

γ——剪切速率,s⁻¹;

n——流动系数。

1.3.7 低脂蛋糕面糊黏度分析 测量低脂蛋糕面糊制作的起泡结束与消泡结束时刻的面糊黏度,试验均重复 3 次。黏度测试参数:转速 6 r/min,最大量程 100 Pa · s,4# 转子头^[14]。

1.3.8 低脂蛋糕面糊显微观察 用荧光倒置显微镜对低脂蛋糕的面糊微观特性进行研究,放大倍数为 100 ×。使用软件 Image-J 进行气泡计数与圆度分析^[15],采用分形维数分析气孔粗糙度、变形度^[16]。

1.3.9 低脂蛋糕比容测定 采用油菜籽替换法。蛋糕在室温下冷却 1 h 后测定蛋糕质量与体积,依照式(3)计算低脂蛋糕比容,试验均重复 3 次。

$$SV = \frac{V}{m}, \tag{3}$$

表 1 低脂蛋糕配方

Table 1 Low-fat cake formula g

配料	P0	P25	P50	P75	P100
全蛋液	250	250	250	250	250
白砂糖	200	200	200	200	200
低筋小麦粉	200	200	200	200	200
固体油	100	75	50	25	0
液体油	0	25	50	75	100
泡打粉	3	3	3	3	3
丙二醇酯	0	2.5	5	7.5	10

式中:

SV——低脂蛋糕比容, mL/g;

V——低脂蛋糕体积, mL;

m——低脂蛋糕质量, g。

1.3.10 低脂蛋糕质构分析 将室温冷却 1 h 后的低脂蛋糕切成高度 12 mm, 直径 35 mm 的圆形薄片。采用质构仪 P/36 探头, 对蛋糕进行连续 2 次压缩测试。试验参数设定为:测前速率 1.0 mm/s, 测试速率 3.0 mm/s, 测后速率 1.0 mm/s, 触发感应力 5 g, 压缩距离 4 mm。2 次压缩间隔时间 15 s。低脂蛋糕指标包括硬度、咀嚼性和弹性^[17]。

1.3.11 低脂蛋糕感官评定 由食品科学与工程专业 10 位经验丰富的感官评定人员(之前经过训练的用于感官评定的人员)对蛋糕品质进行产品感官评定。感官评定评分标准分别为以下 6 项。湿润程度:1 为干燥, 9 为湿润;口感:1 为口感较好, 9 为口感较差;风味:1 为令人不悦的气味, 9 为令人满意的气味;柔软度:1 为口感干硬, 9 为口感绵软;外观:1 为体积较小, 9 为体积较大;整体可接受度:1 为不可接受, 9 为非常喜欢。将蛋糕分成多块, 每人 1 片, 所有蛋糕片都被标有随机的 3 位数字代码。

1.3.12 统计分析 采用 SPSS 16.0 数据分析软件对变化显著性分析, 显著差异水平取 $P < 0.05$ 。采用 Microsoft Office Excel 2016 进行数据处理分析。

2 结果与讨论

2.1 丙二醇酯对油脂物性的影响

2.1.1 表面张力比较 油脂表面张力会显著影响蛋糕面糊乳化体系稳定性^[18]。油脂引入面糊体系后, 由于其与水相的不溶性和表面张力差异, 从而起到面糊消泡的作用。试验结果(表 2)表明, 不含油脂的面糊表面张力为 (39.450 ± 0.029) mN/m, 加入低表面张力的熔化固体油使得其和纯面糊的表面张力的差值过大。Murray 等^[19]研究指出, 在不同大小气泡的拉普拉斯压降梯度的影响下, 气泡有朝着相同大小发展的趋势, 导致面糊气泡发生歧化现象。而 P25~P100 和未含油脂的面糊表面张力差距较小, 表面张力差小有助于增加小型气泡稳定性^[20], 同时还能消除稳定性较差的异常大气泡。

2.1.2 丙二醇酯对油脂晶型的影响 烘焙油脂通过熔化和结晶来实现固态和液态的相互转化, 这种不完全固态形式存在的特征即塑性, 油脂的塑性与其晶型密切相关, 借助 XRD 可以分析晶格几何形状的信息以分辨脂类晶型。短间距在 4.15×10^{-10} m (2θ 在 21.5°) 附近的单一峰为 α 晶型, 短间距在 3.80×10^{-10} m 和 4.20×10^{-10} m (2θ 在 23° 和 20.5°) 周围的强衍射峰对应 β' 晶型, 而短间距在 4.60×10^{-10} m (2θ 在 19.5°) 附近的强衍峰则为 β 晶型^[21]。由图 1 可见, L0 即固体油以 β' 晶型为主, 几乎检

表 2 丙二醇酯与固体油混合物表面张力比较 (40°C)[†]

Table 2 Comparison of surface tension between propylene glycol esters emulsifier and solid shortening-mixture mN/m

组别	表面张力	△表面张力
L0	22.978 ± 0.024^a	16.472
L25	38.559 ± 0.028^b	0.891
L50	38.831 ± 0.028^b	0.619
L75	38.083 ± 0.025^b	1.367
L100	38.873 ± 0.027^b	0.577

† L0、L25、L50、L75、L100 分别为 P0、P25、P50、P75、P100 对应的油脂与丙二醇酯混合物; 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

测不出 α 晶型和 β 晶型。随着丙二醇酯添加量增大, β' 晶型对应的衍射峰变小, 在 L75 和 L100 组中基本观察不到 β' 晶型。 α 晶型对应的衍射峰随着丙二醇酯添加量增大明显变得尖锐, 说明丙二醇酯促进油脂转化为 α 晶型。丙二醇酯对脂类的影响可能是丙二醇酯晶体可以插入甘油单酯晶体内, 阻止 α 晶型向 β' 和 β 晶型转变^[22]。据报道^[23], 丙二醇酯没有多晶性, 只以 α 晶型存在, 具有趋 α 晶型倾向性, 即能使其它油脂或乳化剂 α 晶型稳定。 α 晶型的乳化剂可改变油脂表面排列, 稳定油脂晶型以及改善塑性。当乳化剂在油相中达到缔合极限时, 在界面处形成结晶界面膜^[24]。

2.2 含丙二醇酯的蛋糕的面糊特性

2.2.1 低脂蛋糕面糊密度 蛋糕面糊密度分析是蛋糕研究重点之一, 面糊密度反映蛋糕面糊的持气能力和充气能力, 合理的面糊密度有助于高品质蛋糕的生产。表 3 结果表明含有丙二醇酯的蛋糕面糊密度出现下降趋势。相比于单独加入固体油的 P0, 加入丙二醇酯和固体油的混合物对体系消除气泡影响较小, 其原因在于添加丙二醇酯的油脂混合物表面张力与未含油脂面糊类似, 两者表面张力差异较小, 其消泡现象不明显。单独加入熔化后的固体油导致油脂与起泡蛋白质的水相表面张力差距较大, 从而使得面糊消泡程度较为严重。而随着丙二醇酯添加量增加, 面糊密度明显下降, 其原因在于丙二醇酯良好的乳化性能使得面糊加入油脂后的阶段依然有起泡和消除异常气泡的作用。

2.2.2 低脂蛋糕面糊黏度特性 低脂蛋糕面糊黏度是评价面糊品质的重要参数, 合适的蛋糕黏度将不仅可以增加生产过程面糊倾倒的便捷性, 而且保证面糊在生产转移过程中不发生持气性下降的现象。另外, 合理的蛋糕黏度有利于烘焙过程中乳化体系中的气泡膨胀与定型。表 3 结果表明随着丙二醇酯添加量的增加, 面糊黏度显著增加, 说明低脂蛋糕面糊的稳定性增加。丙二醇酯的

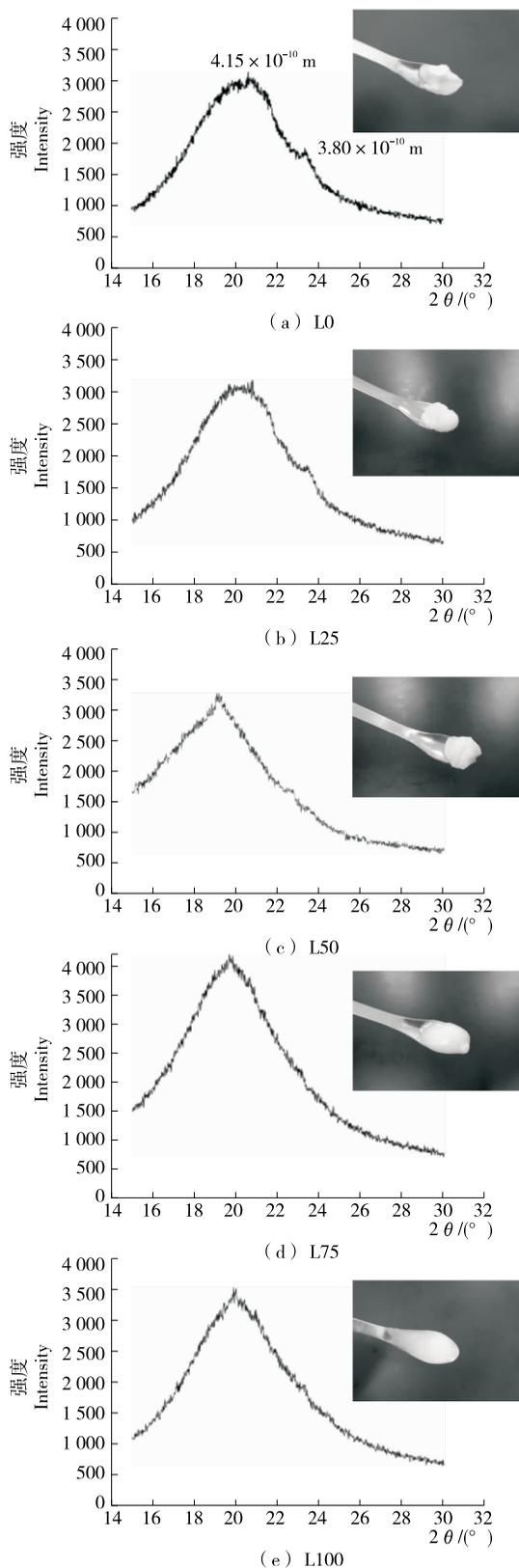


图 1 丙二醇酯对油脂晶型的影响

Figure 1 Effect of propylene glycol ester on the crystal form of fat

表 3 低脂蛋糕面糊特性[†]

Table 3 Characteristics of batter of low-fat cake

组别	密度/(g · mL ⁻¹)	黏度/(mPa · s)
P0	0.943 ± 0.004 ^c	19 744 ± 704 ^a
P25	0.830 ± 0.009 ^b	36 016 ± 2 013 ^b
P50	0.832 ± 0.005 ^b	42 779 ± 2 900 ^c
P75	0.829 ± 0.008 ^b	53 679 ± 2 140 ^d
P100	0.706 ± 0.002 ^a	86 419 ± 3 097 ^e

[†] 同列字母不同表示差异显著(P < 0.05)。

α 晶型非多晶态特性,意味着在油脂—气泡界面处形成表面活性晶体。气泡外表面的油脂结晶可有助于增加界面黏度来增强稳定性^[25],丙二醇酯于油脂层中结晶,进一步增强气泡稳定。Llewellyn 等^[14]的研究结果表明面糊黏度与面糊中的气泡数量呈现正相关现象,P25~P75 面糊密度无显著性差异,说明黏度增加的原因在于原本充入面糊的气体依旧保持在体系中,Hunter 等^[26]认为气泡会在不稳定的情况下自发发生聚集与歧化,从而降低面糊乳化体系的黏度。随着丙二醇酯添加量增加,气泡聚集和歧化现象得到抑制。面糊黏度的增加同样有助于提高面糊乳化体系的稳定性,原因在于黏度增大使得体系不易流动,阻碍乳化微结构中的液膜排液,其液膜变薄速率减慢,延缓液膜破裂的时间,从而使乳化体系稳定性提高^[27]。

2.2.3 低脂蛋糕面糊动态流变特性 蛋糕面糊流变特性和面糊品质以及蛋糕烘焙特性密切相关。良好的流变特性有助于提高面糊的充气与持气能力。采用幂律模型对流变曲线进行拟合结果如图 2 所示,幂律模型对蛋糕面糊体系有较高的拟合精度,决定系数 $R^2 > 0.99$ 。试验结果表明,面糊样品具有剪切变稀和假塑性的特性,其表观黏度随着剪切速率增加而降低。Sun 等^[28]指出面糊的假塑性可归因于淀粉分子的定向排列,以及剪切作用下直链淀粉分子间的氢键断裂。在低剪切速率时,面糊体系中的链状大分子与气泡相互缠绕,体系黏度表现较为黏稠;当剪切速率增大时,流动层之间的剪切作用使散乱分

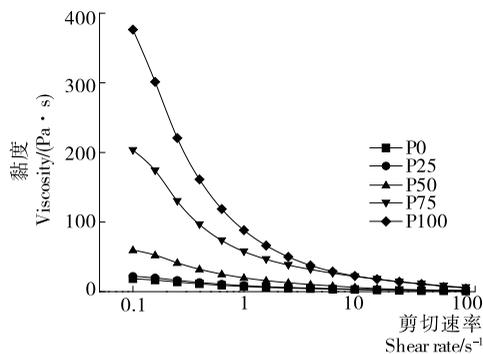


图 2 低脂蛋糕面糊流变特性曲线

Figure 2 Rheological characteristics of low-fat cake batter

子链和气泡沿剪切方向变形,缠绕现象减少从而黏度下降。

图2结果表明,剪切模式下黏度都随着丙二醇酯添加量增加而增大。丙二醇酯的乳化效果主要是由于它们能够在水-油界面形成具有一定机械强度的结晶膜^[9]。丙二醇酯随着油脂吸附于气泡外层,从而防止气泡聚结,维持气泡数量使得黏度提高。

2.3 低脂蛋糕面糊微观特性

在低脂蛋糕面糊特性研究中,除流变特性以外,面糊微观气泡特性也是评价蛋糕面糊特性的方法之一。气泡微结构是面糊结构的重要研究部分,通过面糊中面糊气泡数量(CD值)、面糊气泡面积分数(AF值)、圆度和分形维数等参数对面糊品质进行评价。面糊气泡数目和气泡面积分数值反映面糊起泡能力与持气能力以及气泡均匀性和致密程度。

表4中面糊微观特性结果表明,随着丙二醇酯添加量增加,气泡数量逐渐增加,与黏度结果相互印证。说明随着丙二醇酯含量增加,油脂对面糊的消泡能力减弱,可能是丙二醇酯进入气泡蛋白质表面,面糊气泡厚度和刚性增加^[15],从而增加面糊气泡稳定性。

气相面积分数(AF值)越大,说明面糊搅拌过程中充入的气体越多。P0的AF值较小,P25、P50、P75的AF值无显著性差异,P100的AF值显著高于其他组($P<0.05$),表明丙二醇酯的引入促进面糊充气量和气泡稳定性。气泡越多、气泡越小有利于提高蛋糕体积的增大,有助于在烘焙过程中形成细密的气泡核,从而使蛋糕结构得以扩展。随着丙二醇酯添加量增大,面糊充气性整体提高,从

而有助于烘焙过程中得到组织蓬松、比容大的蛋糕。

气泡圆度值是评价气泡结构的一项参数,其值越接近1则越圆,越接近零则越扁。在临近球形气泡聚结时会形成椭圆形气泡,而低黏度的面糊容易导致气泡聚结与歧化。随着丙二醇酯含量的增加,蛋糕的气泡圆度值增大,与黏度增加防止气泡聚结的结果相一致。

采用分形维数对气孔粗糙度、变形度进行分析,分形理论的研究对象是非线性系统的不规则几何图形,对几何维数的定义不再规定为整数维,而出现了分数维^[16]。分形维数越大,表明气泡形状越复杂。根据消泡理论,低表面张力的油脂吸附于气泡表面后,铺展处表面张力降低,液膜内的液体向高表面张力处牵引,使得蛋白膜迅速变薄(Marangoni效应)^[29],从而导致气泡聚集与歧化,使得气泡分形维数增加,气泡变形程度增加。油脂吸附于起泡表面后,丙二醇酯附着于气泡表面上,由于结晶的性质,不能迅速铺展在蛋白质界面膜上,从而降低了油脂的消泡作用。随着丙二醇酯含量增加,面糊气泡分形维数出现下降的趋势,说明丙二醇酯可以改善气泡变形程度,从而有利于改善蛋糕均匀性。

2.4 蛋糕烘焙特性的影响分析

2.4.1 低脂蛋糕比容 比容是判断蛋糕产品质量的重要指标之一,是决定消费者购买的关键因素之一,并且可以反映出配方中所使用的油脂的种类和数量。蛋糕最终体积不仅取决于充入面糊中的空气量,而且还取决于烘烤过程中面糊乳化体系的持气能力。搅拌过程中充气能力越强,烘焙过程中持气性较好的面糊制作的等质量的蛋糕体积越大,组织也相对较为松软^[15]。

表4 丙二醇酯对面糊微观结构的影响[†]

Table 4 Effect of propylene glycol esterson batter microstructure

组别	CD值/(Cells · cm ⁻²)	AF值/%	圆度	分形维度
P0	223±50 ^a	39.2±0.2 ^a	0.42±0.00 ^{ab}	1.83±0.01 ^b
P25	219±10 ^a	41.7±1.1 ^b	0.41±0.01 ^a	1.80±0.04 ^{ab}
P50	277±42 ^{ab}	43.1±0.9 ^b	0.44±0.00 ^{bc}	1.77±0.03 ^{ab}
P75	332±17 ^b	44.1±1.6 ^b	0.45±0.01 ^c	1.75±0.02 ^a
P100	639±5 ^c	46.7±0.5 ^c	0.46±0.01 ^c	1.77±0.04 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

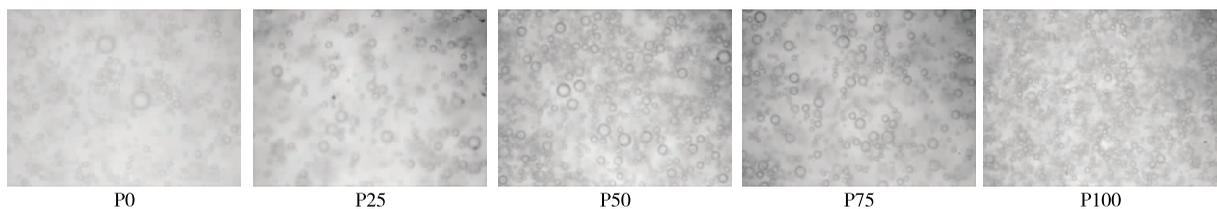


图3 低脂蛋糕面糊微观图片

Figure 3 Micro-picture of low-fat cake batter (100×)

表 5 丙二醇酯对蛋糕比容及质构的影响[†]

Table 5 Effect of propylene glycol esterson cake specific volume and texture

组别	比容/(mL·g ⁻¹)	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ
P0	1.809±0.030 ^a	1 761±160 ^c	3.55±0.07 ^{ab}	48.5±4.4 ^c
P25	2.210±0.064 ^b	1 274±71 ^b	3.67±0.10 ^b	36.2±4.5 ^b
P50	2.418±0.020 ^c	1 405±109 ^b	3.33±0.15 ^a	33.7±3.5 ^b
P75	2.496±0.024 ^c	823±107 ^a	3.35±0.17 ^a	20.5±2.8 ^a
P100	2.522±0.059 ^c	666±22 ^a	3.52±0.11 ^{ab}	17.8±1.0 ^a

† 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

表 5 表明,含丙二醇酯的蛋糕比容显著大于仅使用固体油的低脂蛋糕。丙二醇酯的引入使得面糊搅拌过程中形成更多更细密大小均匀的气泡,气泡稳定性较好,因此蛋糕比容较大。

2.4.2 低脂蛋糕质构 硬度是使蛋糕达到一定形变所需要的力,是质构评价中的一个重要指标。硬度值越低,说明蛋糕越柔软口感越好^[6]。表 5 表明,蛋糕的硬度随丙二醇酯添加量的增大而减小,说明丙二醇酯与淀粉形成复合物后,淀粉的吸水溶胀能力下降,糊化温度升高,从而更多的水分向体系中的蛋白质转移,因而蛋糕柔软性增加。另一原因是蛋糕的柔软度与比容呈正相关关系,比容的增大带来更松软的质构特性。同时蛋糕微观气孔均匀性和硬度存在一定的联系,气孔均匀性增加也使得蛋糕硬度下降^[30]。随着丙二醇酯添加量的增加,说明蛋糕的气孔均匀性改善。从弹性来看,各组蛋糕之间的数值较为接近,无显著性差异。咀嚼性和蛋糕品质呈负相关,当咀嚼性越大时,说明蛋糕越不容易嚼碎,口感较差。蛋糕的咀嚼性随丙二醇酯添加量的增大而减小,说明蛋糕品质随着丙二醇酯的增加而有所提高。

2.5 蛋糕感官评定

蛋糕感官评定结果表明,使用丙二醇酯的蛋糕除了风味方面与使用固体油的蛋糕相比较差,P0 较好的风味主要是来自固体油。添加丙二醇酯后,外观、柔软度、口感、湿润度和整体可接受度的得分提高。整体可接受度方面,P100 组的蛋糕的得分最高,达到 8.2 分。

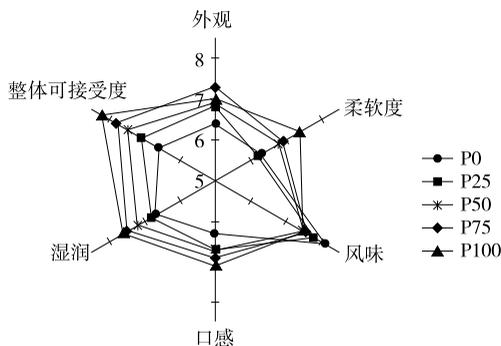


图 4 蛋糕感官评定结果

Figure 4 Sensory evaluation of cakes

3 结论

综合各方面,丙二醇酯在低脂蛋糕中的应用具有明显的优良特性,其中 P100 为最优组。添加丙二醇酯能减小油脂与面糊的表面张力差,保护气泡不受到油脂消泡的影响,改善面糊乳化特性;通过 XRD 研究发现丙二醇酯可促进油脂转化为 α 晶型,维持面糊稳定性。丙二醇酯使低脂蛋糕面糊充气量提高,最优组气泡数增加了 1.87 倍。丙二醇酯可改善一步法制作的低脂蛋糕比容小、硬度大等缺点,相比于不含丙二醇酯的蛋糕组,最优组比容提高了 39.4%,硬度降低了 62.2%。丙二醇酯可改善油脂物性和面糊稳定性,有效提高低脂蛋糕烘焙品质和感官特性。工业上常使用两种或多种乳化剂复配,本研究并未涉及到该方面。因此,丙二醇酯和其他乳化剂的复配对蛋糕体系的影响有待进一步深入研究。

致谢:感谢日本三菱化学食品有限公司的国际合作项目,感谢小川晃弘博士及其团队的积极参与学术交流和指导。

参考文献

[1] LEAN M. Management of obesity and overweight[J]. Medicine, 2003, 31(4): 12-17.

[2] CHEN Jian-she, ROSENTHAL A. Modifying food texture[M]. Oxford, UK: [s. n.], 2015: 99-112.

[3] BENT A J, BENNION E B, BAMFORD G S T. The Technology of Cake Making[M]. London, UK: Springer US, 1997: 48-80.

[4] FERNANDES S S, SALAS-MELLADO M D L M. Addition of chia seed mucilage for reduction of fat content in bread and cakes[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 237-244.

[5] BROOKER B E. The stabilisation of air in foods containing fat: A review[J]. Food Structure, 1993, 12(1): 115-122.

[6] 汤晓娟, 王凤, 贾春利, 等. 含 Olestra 低脂休闲蛋糕体系的流变学、微结构与烘焙特性[J]. 食品科学, 2013(1): 1-7.

[7] DARDIR M M, ELSAYED AHMED H, ABDE F M, et al. Propylene glycol mono and di stearates as water in oil emulsi-

- fiers for oil-well drilling fluids[J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2018, 27: 1 035-1 041.
- [8] FAN C Wang, MARANGONI A G. Advances in the application of food emulsifier α -gel phases: Saturated monoglycerides, polyglycerol fatty acid esters, and their derivatives[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2016, 483: 394-403.
- [9] MACIERZANKA A, SZELAG H, SZUMALA P, et al. Effect of crystalline emulsifier composition on structural transformations of water-in-oil emulsions: Emulsification and quiescent conditions[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2009, 334(1): 40-52.
- [10] MACIERZANKA A, SZELAG H. Microstructural behavior of water-in-oil emulsions stabilized by fatty acid esters of propylene glycol and zinc fatty acid salts[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2006, 281(1): 125-137.
- [11] 郝月慧, 汤晓娟, 黄卫宁, 等. 糖醇对鸡蛋液功能特性及无糖海绵蛋糕烘焙品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2015(3): 49-53, 59.
- [12] LATIP R A, LEE Y Y, TANG T K, et al. Physicochemical properties and crystallisation behaviour of bakery shortening produced from stearin fraction of palm-based diacylglycerol blended with various vegetable oils[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(4): 3 938-3 946.
- [13] 贾春利, 汤晓娟, 黄卫宁, 等. 羧甲基纤维素改善冷冻蛋糕体系热力学与烘焙特性研究[J]. *食品工业科技*, 2012(16): 327-331.
- [14] 陈诚, 张宾乐, 王家宝, 等. 蔗糖酯与淀粉酶改善海绵蛋糕品质特性[J]. *食品科学*, 2018, 39(24): 1-6.
- [15] CHESTERTON A K S, DE ABREU D A P, MOGGRI-DGE G D, et al. Evolution of cake batter bubble structure and rheology during planetary mixing[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(3): 192-206.
- [16] CHAMORRO-POSADA P. A simple method for estimating the fractal dimension from digital images: The compression dimension [J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2016, 91: 562-572.
- [17] TANG Xiao-juan, WANG Feng, JIA Chun-li, et al. Effect of olestra on microstructure, rheological properties and baking properties of snack cake[J]. *Food Science*, 2013, 34(1): 1-7.
- [18] GUY R C, SAHI S S. Application of a lipase in cake manufacture[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 86(11): 1 679-1 687.
- [19] MURRAY B S. Stabilization of bubbles and foams[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2007, 12(4): 232-241.
- [20] 陈诚. 蔗糖酯乳化性能对海绵蛋糕气泡分布和贮藏特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 35-36.
- [21] MACMILLAN S D, ROBERTS K J, ROSSI A, et al. In Situ Small Angle X-ray Scattering (SAXS) Studies of Polymorphism with the Associated Crystallization of Cocoa Butter Fat Using Shearing Conditions[J]. *Crystal Growth & Design*, 2002, 2(3): 221-226.
- [22] 宋慧颖. 不同脂肪酸丙二醇单酯的酶法合成及性质比较[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 4.
- [23] H-KITTIKUN A, KAEWTHONG W, CHEIRSILP B. Continuous production of monoacylglycerols from palm olein in packed-bed reactor with immobilized lipase PS[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, 40(1): 116-120.
- [24] KROG N, LARSSON K. Crystallization at interfaces in food emulsions: A general phenomenon [J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2010, 94(2): 55-57.
- [25] OGDEN L G, ROSENTHAL A J. Interactions between fat crystals and proteins at the oil-water interface[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1997, 191(1): 38.
- [26] HUNTER T N, PUGH R J, FRANKS G V, et al. The role of particles in stabilising foams and emulsions[J]. *Advances in Colloid & Interface Science*, 2008, 137(2): 57-81.
- [27] 周盛敏, 李磊, 张余权. 油脂起泡机理及影响因素研究进展[J]. *粮食科技与经济*, 2015, 40(2): 69-72.
- [28] SUN Dong-soo, YOO B. Rheological and thermal properties of blend systems of rice flour and potato starch[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(6): 1 679-1 684.
- [29] JOSHI K S, BAUMANN A, JEELANI S A K, et al. Mechanism of bubble coalescence induced by surfactant covered antifoam particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 339(2): 446-453.
- [30] DEWAEST M, VILLEMEJANE C, BERLAND S, et al. Effect of crumb cellular structure characterized by image analysis on cake softness[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 49: 328-338.