

油凝胶的制备及在食品中应用研究进展

屈岩峰^{1,2,3,4} 刘偲铭¹ 孔 珍¹ 裴濡楠¹ 张晓红⁵

(1. 哈尔滨学院, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 东北农业大学, 黑龙江 哈尔滨 150006;
3. 九三粮油工业集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 屈岩峰高技能人才(劳模)创新工作室,
黑龙江 哈尔滨 150086; 5. 黑龙江省粮食质量安全监测和技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150008)

摘要:油凝胶是目前被广泛认可的半固体状塑性脂肪替代品之一,可替代含有较多饱和脂肪酸(SFAs)和反式脂肪酸(TFAs)的人造奶油、起酥油等。文章概述了包括直接分散法在内的油凝胶的4种制备方法、油凝胶多种凝胶剂的特点及油凝胶在食品中应用的研究现状与进展,并对油凝胶在食品中应用的研究前景进行展望。

关键词:油凝胶;脂肪替代品;反式脂肪酸;凝胶剂;制备方法

Research progress on oleogel preparation and application in food

QU Yanfeng^{1,2,3,4} LIU Ruoming¹ KONG Zhen¹ PEI Runan¹ ZHANG Xiaohong⁵

(1. Harbin University, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 2. Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150006, China; 3. Jiusan Oils and Grains Industries Group Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150090, China; 4. Highly-skilled Talents (Model Worker) Innovation Studio of Qu Yanfeng, Harbin, Heilongjiang 150086, China; 5. Heilongjiang Provincial Grain Quality and Safety Monitoring and Technology Center, Harbin, Heilongjiang 150008, China)

Abstract:As one of the widely recognized semi-solid plastic fat substitutes, oleogel can be used to replace food products, such as margarine and shortening oil, that contain high levels of saturated fatty acids (SFAs) and trans fatty acids (TFAs). This paper illustrates four methods for oleogel preparation, including direct dispersion. Besides, the paper presents the characteristics of various gelling agents for oleogels, along with the research status and progress of oleogel application in the food industry. Finally, this paper puts forward prospective outlooks for oleogel applications in food.

Keywords: oleogel; fat substitute; trans fatty acid; gelling agent; preparation method

固体脂肪为多种食品提供了良好的风味、口感和部分功能特性,具有可塑性和加工稳定性,但传统固体脂肪特别是部分氢化植物油中存在大量饱和脂肪酸(SFAs)和反式脂肪酸(TFAs)。而TFAs的摄入会导致人体胰岛素抵抗、增加患心脏病的风险,根据WHO报告,每年有54万人的死亡与摄入反式脂肪酸有关^[1],在这样的背景下,油凝胶应运而生。油凝胶在一定条件下可通过凝胶剂与植物油产生相互作用,形成稳定的三维网状结构^[2]。油凝胶不但为人体安全摄入植物油提供了保障,且在制备过程中未经过氢化反应,几乎不含有TFAs^[3]。

油凝胶在食品领域中有较大的应用潜力,近年来油凝胶被广泛应用到烘焙食品、肉制品、奶制品等方面,主要用于替代或部分替代人造奶油和起酥油等固体脂肪^[4-7]。文章拟论述油凝胶的制备方法、多种凝胶剂发挥的重要作用,以及油凝胶在食品中的应用,为油凝胶制备及其多领域广泛应用提供依据。

1 油凝胶制备技术

1.1 直接分散法

直接分散法通常选用蜡、单、双甘酯、脂肪酸、脂肪

基金项目:黑龙江省自然科学基金(编号:LH2023C068);哈尔滨学院乡村振兴博士科研基金(编号:HXC2023002);国家级大学生创新训练项目(编号:202410234014)

通信作者:张晓红(1981—),女,黑龙江省粮食质量安全监测和技术中心工程师,硕士。E-mail: 13766828371@163.com

收稿日期:2024-10-27 **改回日期:**2025-02-21

引用格式:屈岩峰,刘偲铭,孔珍,等.油凝胶的制备及在食品中应用研究进展[J].食品与机械,2025,41(3):221-227.

Citation:QU Yanfeng, LIU Ruoming, KONG Zhen, et al. Research progress on oleogel preparation and application in food[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 221-227.

醇、乙基纤维素等物质作为凝胶剂,利用高于其熔点的温度使凝胶剂融化,直接分散到油相中,使其充分混合,再冷却到较低温度,冷却时凝胶剂分子间通过非共价键相互作用,进而形成三维网络结构,最终形成油凝胶^[8]。其制备过程如图 1 所示。Sejwar 等^[9]以直接分散法制备巴西棕榈蜡基大豆油凝胶,工艺过程简单,易操作,并结合超声处理作为外部条件,油凝胶的持油能力从 91.4% 增加到 98.7%,硬度可达 290.22 N/mm²。

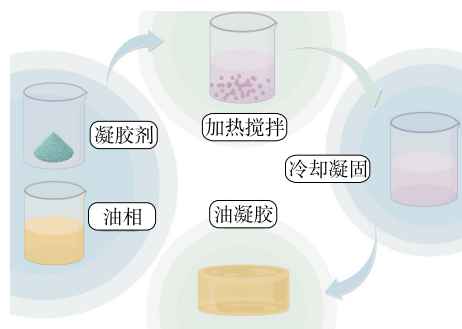


图 1 直接分散法制备油凝胶流程图

Figure 1 Process of oleogel preparation by direct dispersion method

直接分散法制备油凝胶的流程最为简便,但凝胶剂形成三维网络时易受外部环境的影响,形成的凝胶网络有可能不够牢固;若要使其达到一定的硬度,需提高凝胶剂添加量并对油相进行加热,但会加速油脂氧化,降低油凝胶品质^[10]。

1.2 乳液模板法

乳液模板法是通过剪切、均质,使凝胶剂形成一定的结构,得到凝胶乳液,再对其进行干燥离心,去除水分,采用温和的机械剪切使油脂重新分布,并将干燥的乳液转化为弹性油凝胶^[11]。该制备过程如图 2 所示。该方法可将不具备凝胶化能力的潜在凝胶因子转变为凝胶化所需的网络结构,进而将液态油裹入/嵌入网络结构中,最终呈现出含油量>85%的凝胶化体系,且具有较高的凝胶稳定性^[12]。

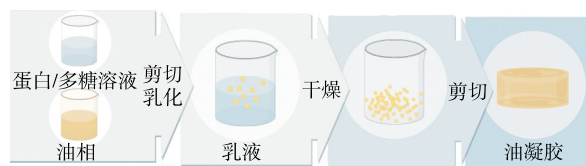


图 2 乳液模板法制备油凝胶流程图

Figure 2 Process of oleogel preparation by emulsion template method

Zhu 等^[13]采用乳液模板法,结合静电沉积技术制备了黄原胶(XG)一大豆油凝胶,通过静电沉积的方法加入黄原胶,形成小粒径乳液,可提高油凝胶的稳定性和持油能

力。Jiang 等^[14]采用乳液模板法制备了富含>97% 葵花籽油的纤维素油凝胶。采用再生纤维素(RC)和羧甲基纤维素(CMC)稳定的乳液表现出典型的剪切稀化行为,干燥后的产品凝胶强度 $\geq 15\ 000$ Pa,使液体油转化为以纤维素为基础的干燥产品和凝胶,利用此技术制备出稳定的纤维素油凝胶在食品等相关领域具有巨大的应用潜力。

乳液模板法的凝胶制备机制为双亲性高分子多聚物附着于液态油滴表面,经相互作用形成稳定的乳液,乳液中被包裹的油滴在干燥过程中密集堆叠,形成脱水软固体油,经剪切破坏其部分乳化层,继而释放油相,间接生成油凝胶。乳液模板法构建的油凝胶体系受外部环境的影响较少,具有稳定的结构,但形成的油凝胶质地较硬,聚合性略差。

1.3 泡沫模板法

泡沫模板法是先高速均质机将多糖、蛋白等原料均质,形成泡沫液,再将其转移到模具中,经冷冻干燥后,快速成型,制成泡沫模板,再将泡沫模板浸没至液体油脂中,一定时间内达到吸附平衡,从而形成油凝胶^[15]。其制备过程如图 3 所示。泡沫模板法是以高分子的聚合物借助水相均质起泡,冷冻干燥形成泡沫结构,吸附液态油,剪切激发凝胶剂自组装,构建致密网络,从而制备油凝胶。该方法无需高温,能有效保护液态油的品质,且凝胶体系具有较好的油结合能力。Wei 等^[16]利用米糠蛋白(RBP)泡沫模板,通过简单的低温工艺制备油凝胶,将 RBP 泡沫冻干,形成一种多孔的低温凝胶,可以物理吸收液体油,且具有较强的机械强度和油结合能力。

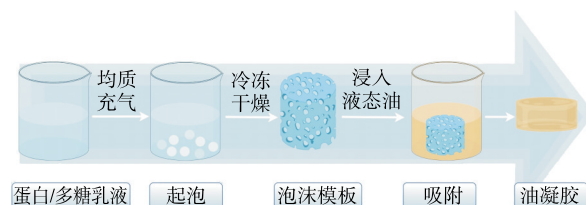


图 3 泡沫模板法制备油凝胶流程图

Figure 3 Process of oleogel preparation by foam template method

1.4 气凝胶模板法

气凝胶诞生于 1931 年,最早由 KISTLER 通过乙醇超临界干燥技术制备而得,多用于航空、军工、能源等领域。根据其开放的孔隙结构和较大的表面积,气凝胶能迅速吸收大量的油,对油凝胶的制备有一定帮助^[17]。气凝胶模板法的制备过程如图 4 所示。采用气凝胶模板法制备油凝胶,先将蛋白质纳米纤维、海藻酸钠等作为前体进行混合,分散在水相或有机相溶液介质中,在特定温度和 pH 等条件下,前体物质相互交联,形成凝胶化的连续的网络结构,进而形成湿凝胶,通过干燥移除连续相,留下多孔网络骨架与空气的混合物,并将气凝胶轻放至油相中吸

附,最后经高速均质、剪切,得到油凝胶^[18]。其中,蛋白质类物质在气凝胶模板法中发挥了重要作用,增强了油凝胶的持油性、机械强度等特性。Shan等^[19]使油脂吸附在气凝胶骨架上,采用静电吸附和化学交联的双强化策略成功制备了羧甲基纤维素钠/大豆蛋白(CMC-Na/SPI)复合气凝胶模板,油凝胶通过交联纤维素,提高了油凝胶的强度,并表现出显著的结构弹性。

气凝胶制得的共聚物具有良好的机械性能和热稳定性。气凝胶可作为模板吸收大量液态油,形成油凝胶,也可以负载活性物质,使之保留抗菌活性。近年来,对气凝胶的研究逐渐转向以天然高分子聚合物为前体的有机凝胶,其具有独特的生物可降解性、生物相容性和可持续性等特点,在生物医药和食品营养领域具有良好的前景。

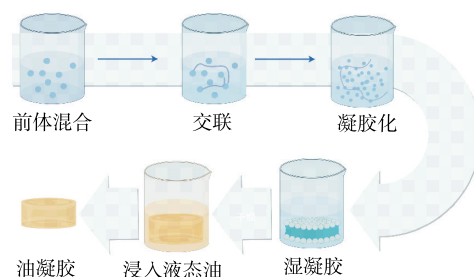


图4 气凝胶模板法制备油凝胶流程图

Figure 4 Process of oleogel preparation by aerogel template method

油凝胶主要的4种制备方法的形成机制、特点、优势及局限性见表1。

表1 油凝胶4种制备方法的机制、特点、优势与局限性

Table 1 Mechanisms, characteristics, advantages, and limitations of the four oleogel preparation methods

方法	形成机制	特点或优势	局限性	参考文献
直接分散法	在熔融状态油相与凝胶剂混合,凝胶剂相互聚集、组装、形成三维网络结构,经剪切或静态冷却后形成半固体脂质凝胶	制作流程简单、便捷	油凝胶质地较软,部分油脂易从边缘析出	[20]
乳液模板法	油相与蛋白液等乳化剂充分混合、乳化,乳化剂在乳液表面形成保护膜,降低油水界面张力,凝胶剂分子通过氢键、范德华力等相互交联,形成三维网络结构,经干燥、剪切得到油凝胶	受外部环境影响较少,具有较好的稳定结构和氧化稳定性,触变性好	形成的油凝胶质地较硬,聚合性略差	[21]
泡沫模板法	制备蛋白、多糖泡沫模板,降低体系表面张力,凝胶剂通过分子间氢键、范德华力等非共价键协助模板形成网络结构,泡沫模板浸没在液体油脂中,形成凝胶	可物理吸收液体油,形成具有较强机械强度的油凝胶,有良好的油结合能力	充气凝胶孔径较大,其制备的油凝胶网络密度较低,易发生漏油现象	[22] [23]
气凝胶模板法	前体分子水解和缩聚,形成凝胶网络结构,油相填充到气凝胶孔隙中,凝胶剂在油相中通过氢键、疏水相互作用等连接成三维网络结构	可以物理吸收液体油,形成具有较强机械强度的油凝胶,具有良好的持油性和热稳定性	制备成本较高,工艺略复杂	[24]

2 油凝胶的凝胶剂

油凝胶的凝胶剂可以通过相互作用自组装,形成结油的网络结构,从而固定液态油脂,以实现凝胶化。

2.1 单甘酯(MAG)

单甘酯因具有良好的自组装性能,经常被用作制备油凝胶的凝胶剂。Zhang等^[25]对单甘酯油凝胶的结晶行为及物理性质进行了研究,相同的MAG水平下,甘油单硬脂酸酯(GMS)和甘油单戊酸酯(GMC)基油凝胶具有更高的结晶度,从而具有更高的热稳定性和更好的力学性能。随着MAG含量的增加,油凝胶表现出更紧凑的三维网络结构,具有更好的热稳定性和抗形变能力。因此,以MAG作为凝胶剂的油凝胶,特别是含有中链脂肪酸的油凝胶,是一种很有前途的氢化植物油替代品。

2.2 生物蜡

单一的油凝胶不能充分补偿固体脂肪在复杂食物系统中的多种作用,通常采用生物蜡与油凝胶共同制备复

合油凝胶体系^[26]。从植物或动物来源提取得到的生物蜡主要有巴西蜡、小烛树蜡、蜂蜡、棕榈蜡、米糠蜡等,其中,蜂蜡和巴西蜡的利用率较高,因其来源安全,成本低而广受关注^[27]。Wang等^[28]以共轭红花子油为基础油,蜂蜡为胶凝剂制备了油凝胶。结果表明,酸释放速率随蜂蜡浓度的增加而降低,蜂蜡形成的晶体网络影响脂肪酶与油接触,从而减缓油从内部释放,抑制红花籽油的二次氧化,提高产品的氧化稳定性。

2.3 植物甾醇

植物甾醇是植物衍生的天然甾醇化合物,在植物油中含量较高。甾醇具有较好的生理活性和安全性,不仅可降低饮食中胆固醇的吸收,还可以降低血清中总胆固醇和低密度脂蛋白含量,其主要包括谷甾醇、豆甾醇和麦角甾醇。植物甾醇被认为是最有前途的制备油凝胶的凝胶剂之一,它天然与植物油共存,是油凝胶制备的首选凝胶剂。Jia等^[29]将肉桂酸(CA)和阿魏酸乙酯(EF)成功地

与植物甾醇结合制备油凝胶,通过光谱分析表明,该凝胶网络主要由羟基、羰基和芳香族基团的非共价键驱动,特别是氢键和 $\pi-\pi$ 堆积,双组分体系油凝胶表现出很好的凝胶强度。从总甾醇中提取出的豆甾醇也是油凝胶制备的优良凝胶剂,Liu等^[30]以豆甾醇作为凝胶剂,成功制备了性能优良的油凝胶,豆甾醇通过分子间氢键自主装作用,形成棒状晶体结构,将植物油束缚在其三维网状结构中,使体系凝胶化。且豆甾醇油凝胶中的TFAs、SFAs产生量降低,更符合人们的健康理念,有广阔的市场前景。

2.4 多糖

多糖以其自组装或自排列成某些物理结构的能力而闻名,以多糖为基础的油凝胶,由于其安全、丰富的原料,更健康的脂肪酸组成,可控的黏弹性和更多样的营养、风味嵌入,已成为取代固体脂肪的新策略。同时,多糖基油凝胶具有良好的保油性,营养、风味包埋性和三维食品可

打印性,并作为脂肪替代物应用于多种食品中^[31]。Jiang等^[32]采用乳液模板法制备了油凝胶。结果表明,高浓度的多糖具有较好的乳化性能,有助于提高油凝胶的机械强度,有利于减少油凝胶的油损失。

另一种应用较广泛的多糖类凝胶剂是乙基纤维素。乙基纤维素是唯一一种可在 $>120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温下溶解于油中的纤维素衍生物,其协助油凝胶形成更稳定的三维网络结构^[33]。Chen等^[34]研究表明,基于花生二酰基甘油—乙基纤维素/单甘油酯的油凝胶蛋糕是一种很有前途的烘焙产品,在人造黄油含量降低50%的情况下,该烘焙产品依然可以保持良好的感官特性,这得益于多糖协助形成的油凝胶具有稳定的三维网络结构。多糖油凝胶由于廉价、无毒、乳化性好等优点,已成为开发健康脂肪替代品的重要解决方案。

4种凝胶剂的优势与特点概括见表2。

表2 4种凝胶剂的优势与特点
Table 2 Advantages and characteristics of the four gel agents

凝胶剂	优势与特点	参考文献
单甘酯	较高的热稳定性、较好的刚性和抗变形能力	[35]
生物蜡和蜡脂	生物蜡复合油凝胶中分子层的横向堆积更高,结合油的能力、熔温、硬度、黏度和强度增加	[36]
植物甾醇	其本身既是活性成分,具有降低胆固醇等多种生理功能,天然地与植物油共存	[29—30]
多糖	具有良好的保油性,营养、风味包埋性和三维食品可打印性,并具有较好的乳化性,有助于提高油凝胶的机械强度,减少油损失	[31—32]

2.5 其他凝胶剂

脂肪酸醇、磷脂、硬脂酸、硬脂酰乳酸钠(SSL)等物质,因具有高效的凝胶能力、优越的乳化性和安全性,具有成为油凝胶凝胶剂的广阔前景,但其应用研究仍处于起步阶段,相关报道较少。磷脂作为凝胶剂形成的油凝胶应用于食品中,可以提高食品的溶解性和氧化稳定性^[37]。SSL是一种阴离子表面活性剂,被广泛应用于烘焙工业、乳制品、巧克力和糖果产品中。SSL油凝胶中的晶体网络模仿了由三酰基甘油形成的晶体网络结构的典型功能,在高浓度条件下,晶体尺寸增大并重叠,加速成核和随后的凝胶化,从而形成更紧凑的油凝胶网络结构,具有更强的机械强度,提高了产品的持油性^[38]。此外,皮克林乳液,作为一种以超细固体颗粒为乳化剂而得到的乳状液,具有突出的分散性、环保性等优点,并以凝胶剂的形式被应用于油凝胶的制备中,可提高油凝胶系统的水分散性和食品底物的感官品质^[39]。

3 油凝胶在食品中的应用

3.1 烘焙食品

在烘焙食品中,起酥油和黄油为常使用的固体脂肪。起酥油的主要成分是部分氢化植物油,其SFAs含量高,生产过程中极易产生TFAs,从而增加心血管等疾病发生的风险^[40]。以油脂凝胶替代或部分替代起酥油,被广泛应用于焙烤食品中。Leila等^[36]用巴西棕榈蜡作为凝胶剂,

将向日葵油和亚麻籽油混合制备油凝胶,使用油凝胶替代70%的起酥油,所制备的蛋糕在感官评定中更易被接受,同时,蛋糕中SFAs含量从47.21%降至25.68%,效果显著。

黄油作为传统脂肪来源,含有较高的SFAs。油凝胶可以很好地替代黄油。油凝胶的独特成分能够形成保护性油层,有效减少食物与高温油之间的直接接触,这不仅可以减少煎炸和吸油过程中的营养损失,还可以提高食物的嫩度和风味。此外,油凝胶在味道和质地方面提供了一种独特的感官体验。Hong等^[41]通过乳液模板法,以黄原胶和大豆卵磷脂为凝胶剂,制备了负载姜黄提取物的油凝胶,将其用作商业黄油的替代品生产蛋糕,并将其流变特性与使用商业黄油制备的蛋糕进行比较,发现油凝胶制作的蛋糕硬度从 $(10.08\pm1.39)\text{ N}$ 降至 $(7.88\pm0.68)\text{ N}$ ($P<0.05$),流动性增加,孔隙率增加,SFAs比例下降,且烘焙产品的综合品质提高。

3.2 乳制品

油凝胶可以提高奶酪的氧化稳定性,有利于减少油脂团聚现象,被广泛应用于奶酪、冰淇淋等乳制品中。Park等^[42]利用高油酸大豆油和米糠蜡制备油凝胶,再用其制作油凝胶奶酪,所得油凝胶奶酪的蛋白质网络可作为油和氧之间的屏障,保护脂质免受进一步氧化。同时,植物油中的 α -生育酚对非极性相的亲合力更大,使脂质氧化传播的界面具有更好的定位,进而影响系统的氧化

速率,使产品具有更好的氧化稳定性。

Botega等^[43]研究了米糠蜡油凝胶替代固体脂肪和提高冰淇淋中不饱和脂肪含量的潜在应用价值,其制备的油凝胶冰淇淋具有良好的质地和外观。Jing等^[44]将山茶油凝胶代替固体脂肪应用于冰淇淋中,通过油凝胶冰淇淋与山茶油冰淇淋和黄油冰淇淋对照试验表明,油凝胶冰淇淋硬度适中,不饱和脂肪酸含量明显高于黄油冰淇淋,特别是油酸和亚油酸含量分别占脂肪酸总含量的62.07%和6.74%,综合评价最高。在奶酪、冰淇淋等乳制品中用油凝胶替代固体脂肪,所得产品具有较高的氧化稳定性,油的团聚现象减少,SFAs含量降低,展现了较好的工业应用前景。

3.3 香肠制品

油凝胶已被用于替代香肠制品中部分猪肉脂肪,添加在香肠制品配方中,使大脂肪粒含量较低,呈现出更均匀的结构、更高的机械强度、更致密的网络结构和更低的油损失,并保持了产品良好的口感,提高了产品营养品质。Zampouni等^[45]用橄榄油油凝胶替代50%的猪肉背脂制备香肠。结果表明,橄榄油油凝胶部分替代脂肪制备的香肠中单不饱和脂肪酸含量增加了9.4%,总胆固醇含量降低了18.8%,且发酵香肠口感较好。Zhu等^[46]以亚麻籽胶、阿拉伯胶通过乳液模板法制备油凝胶,并将其应用于乳化香肠中部分替代猪肉脂肪。所制备的复合油凝胶稳定性强、机械强度高、网络结构致密、油损失低。作为脂肪替代品,油凝胶改善了乳化香肠的质构特性和营养品质。

3.4 酱制品

将油凝胶应用至酱制品中,可提高产品的贮藏稳定性,减小油的分离,也可以用于替代部分脂肪,同时改善酱制品的黏弹性,提升产品口感^[47]。为了减少花生酱中油的分离,Ding等^[48]以GMS为凝胶剂,制备了富含二酰基甘油(DAG)的花生油凝胶。与富含三酰基甘油的花生油相比,DAG花生油凝胶在增加GMS浓度的情况下表现出更好的油结合能力,应用于花生酱时,DAG花生油凝胶显示了减少油分离的效果,其可以作为有效的稳定剂替代物应用于花生酱配方中。Wang等^[49]通过在油相中加入蜂蜡,水相中加入可得然胶来稳定油凝胶,构建了一种具有双相稳定性的油包水油凝胶,并将其应用至低油沙拉酱中。由于两相稳定,内部水相的体积分数增加至70%,油凝胶表现出较高的稳定性,双相稳定性的油包水油凝胶表现出剪切变薄行为,具有较好的弹性。

3.5 巧克力

在巧克力中添加油凝胶,可以改善巧克力中油脂的迁移和表面起霜现象,从而改善产品外观和质地缺陷,且具有良好的流动性。Zhu等^[50]以枸杞籽油为基础油制备甘油单硬脂酸米糠蜡复合油凝胶,部分替代巧克力配料可可脂,所制得的巧克力产品具有更稳定的流变学特性和更好的口感。王凤艳等^[51]研究表明,当用油凝胶替代50%或100%的可可脂时,制得的油凝胶基巧克力在温度

变化时,油凝胶熔化,并在巧克力表面重结晶,重结晶的晶体填充了巧克力表面的微小空隙,使得油凝胶巧克力中油脂的迁移路径更复杂,从而有效改善了巧克力的起霜现象。

3.6 人造肉制品

人造肉主要有两种类型,一种是指利用植物蛋白为原料加工制作而成的素食肉制品,其富含大量的植物源蛋白质,且胆固醇含量极低;另一种是利用动物细胞培养制得的。李恩泽等^[52]将油凝胶作为脂肪替代物用于植物肉饼的制备,由于油凝胶的质构性质、流变学性质接近牛油,制得的植物肉饼有良好的感官品质。Yen等^[53]构建了一个细胞培养平台,在该平台下使用可食用的微载体在生物反应器中进行细胞扩增,将具有植物蛋白的油凝胶作为脂肪替代品,最终制备出的人造肉具有大理石花纹,且质地柔软。

3.7 功能性食品

Zhuang等^[54]使用磷脂与硬脂酸作凝胶剂,添加10%的水制备了一种半固体磷脂基油凝胶,该油凝胶可将嗜酸乳杆菌和乳酸芽孢杆菌在肉汤中生长存活率延长42 d,此外,油凝胶乳液的物理和微观结构特性延缓了体系中脂质的氧化反应。Hashim等^[55]利用芝麻油凝胶和海藻酸盐水凝胶制作营养涂抹黄油替代传统黄油,此新型黄油的抗氧化性远高于传统黄油,且此产品还为益生菌株提供了良好的生存条件,可将其作为递送益生菌株的新型载体,有广阔的发展空间。

4 结论与展望

油凝胶作为品质优良的脂肪替代物,其制备方法日趋成熟,更多种类的复合型凝胶剂也被应用于油凝胶的制备过程中,油凝胶在焙烤食品、乳制品、香肠制品等食品中的应用已经得到初步推广。然而,添加油凝胶后产品的质地、口感、消化吸收率等方面问题仍亟需解决,特别是油凝胶的诸多制备方法操作温度较高,容易导致油凝胶中的脂肪氧化,将其应用于食品中会促进产品的脂肪氧化,且易产生不良风味。与此同时,关于油脂本身含有的谷维素等微量功能性化合物对凝胶性质影响的研究较少,一定程度上限制了对油脂凝胶功能性的研究。因此,在未来的研究中,超高压、超声干燥等非热处理加工技术的应用将是油凝胶制备研究的重要方向,其可为防止脂肪氧化、保持原有风味提供技术保障。在应用方面,如何有效利用脂质伴随物营养功能,以此提高油凝胶的功能性将是油凝胶研究的又一重要领域。此外,在保证氧化稳定性和热稳定性的基础上,如何提高适口性也将成为未来油凝胶应用于食品工业的研究热点之一。油凝胶的制备及应用研究虽有一些问题尚待解决,但其在食品领域的应用有着广阔的前景。

参考文献

[1] PIPOYAN D, STEPANYAN S, STEPANYAN S, et al. The

- effect of trans fatty acids on human health: regulation and consumption patterns[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2 452.
- [2] GAO X, PEI Z S, YI X Z, et al. Development and characterization of defatted coconut flour based oleogels: a fat substitute for application in oil-fortified surimi[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101635.
 - [3] LI Y D, DUAN M X, LIU G Y, et al. Effects of sinapine on structure, rheology, stability, and antioxidant properties of protein-based capillary bridging oleogels[J]. *Food Bioscience*, 2024, 58: 103622.
 - [4] MORAES I A, NEVES M G, SIESLER H W, et al. Characterization and classification of oleogels and edible oil using vibrational spectroscopy in tandem with one-class and multiclass chemometric methods[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2024, 313: 124148.
 - [5] MESELDZIJA S, RUZIC J, SPASOJEVIC J, et al. Alginate cryogels as a template for the preparation of edible oleogels[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 1 297.
 - [6] LAMA M, MONTES L, FRANCO D, et al. Chitosan-based oleogels: emulsion drying kinetics and physical, rheological, and textural characteristics of olive oil oleogels[J]. *Marine Drugs*, 2024, 22(7): 318.
 - [7] TANISLAV A E, ŞANDRU B, MAN S M, et al. Investigating the complete replacement of conventional fat with oleogel on the structural behavior of five different pastry products[J]. *European Food Research and Technology*, 2024, 250(7): 1 933-1 947.
 - [8] SHARMA S, PARMAR V, SHARMA R, et al. Virgin coconut and mustard oleogels as affected by beeswax and candelilla wax: functional, textural, rheological and morphological characteristics[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(6): 3 293-3 302.
 - [9] SEJWAR H, SINGH A, KUMAR N, et al. Effect of ultrasonication on the properties of carnauba wax-based soybean oleogel[J]. *Applied Acoustics*, 2024, 216: 109729.
 - [10] LIN Q Z, WANG C X, JIN Z Y, et al. Construction of oleogels based on emulsion gels stabilized by glycyrrhizic acid and chitosan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 155: 110163.
 - [11] LI J W, XI Y H, WU L R, et al. Preparation, characterization and *in vitro* digestion of bamboo shoot protein/soybean protein isolate based-oleogels by emulsion-templated approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108310.
 - [12] ZHENG S J, LI Y, JIANG Q B, et al. Composite-structure oleogels constructed by glycerol monolaurate and whey protein isolate: preparation, characterization and *in vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2024, 455: 139959.
 - [13] ZHU J Y, LIU L, LI X T, et al. Construction of soybean oil bodies - xanthan gum composite oleogels by emulsion-templated method: preparation, characterization, and stability analysis[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109526.
 - [14] JIANG Y, LIU L L, WANG B J, et al. Cellulose-rich oleogels prepared with an emulsion-templated approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 460-464.
 - [15] ZHENG S B, WEI F L, ZHENG Q W, et al. Fabrication of rice bran protein-sodium alginate-calcium double cross-linked foam template for oleogel preparation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 143: 108873.
 - [16] WEI F L, LU M W, LI J Z, et al. Construction of foam-templated oleogels based on rice bran protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107245.
 - [17] KISTLER S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. *Nature*, 1931, 127(3 211): 741.
 - [18] NITA L E, GHILAN A, RUSU A G, et al. New trends in bio-based aerogels[J]. *Pharmaceutics*, 2020, 12(5): 449.
 - [19] SHAN G C, CUI M Q, WANG X S, et al. Dual-reinforcement strategy: fabrication of CMC-Na/SPI aerogel-templated oleogels through electrostatic adsorption and chemical crosslinking[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 148: 109525.
 - [20] 魏玉磊, 郭鹏, 高云, 等. 油凝胶改善二氧化硅颗粒薄荷醇的吸附性能[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 44-49.
 - WEI Y L, GUO P, GAO Y, et al. Study on improving menthol adsorption performance of silica particles by oleogel[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 44-49.
 - [21] LUO S Z, HU X F, JIA Y J, et al. Camellia oil-based oleogels structuring with tea polyphenol-palmitate particles and citrus pectin by emulsion-templated method: preparation, characterization and potential application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 76-87.
 - [22] TIRGARIAN B, FARMANI J. A novel approach for the development of edible oleofoams using double network oleogelation systems[J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136634.
 - [23] TANTI R, BARBUT S, MARANGONI A G. Hydroxypropyl methylcellulose and methylcellulose structured oil as a replacement for shortening in sandwich cookie creams[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 329-337.
 - [24] SHAN G C, CUI M Q, WANG X S, et al. Fabrication of enhanced aerogel template oleogels with enzyme-hydrolyzed soy protein isolate and covalent cross-linking[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 275: 133674.
 - [25] ZHANG Y Z, XU J Q, TANG C E, et al. Crystallization behavior and physical properties of monoglycerides-based oleogels as function of oleogelator concentration[J]. *Foods*, 2023, 12(2): 345.
 - [26] FROLOVA Y, SOBOLEV R, SARKISYAN V, et al. Investigation of the effect of hydrocarbons and monoesters in the gelators' composition on the properties of edible oleogel[J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2024, 7(2): 96-104.
 - [27] WANG Z Y, CHANDRAPALA J, TRUONG T, et al. Binary wax oleogels: improving physical properties and oxidation stability through substitution of carnauba wax with beeswax[J]. *Journal of Food Science*, 2024, 89(7): 4 372-4 388.
 - [28] WANG R, WANG D H, YU J Y, et al. Conjugated safflower seed oil and its oleogels stabilization properties: thermodynamic properties, rheology, oxidative stability[J]. *Food Bioscience*, 2024, 59: 104203.

- [29] JIA J, ZHANG J, CHEN X W, et al. Towards the development of novel bicomponent phytosterol-based oleogels with natural phenolics[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136895.
- [30] LIU Y G, MA S S, XIA H P, et al. Edible oleogels stabilized solely by stigmasterol: effect of oil type and gelator concentration[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(11): 4 759-4 769.
- [31] HU X F, JIANG Q B, DU L Y, et al. Edible polysaccharide-based oleogels and novel emulsion gels as fat analogues: a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 322: 121328.
- [32] JIANG Z B, BAI X P. Effects of polysaccharide concentrations on the formation and physical properties of emulsion-templated oleogels[J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5 391.
- [33] EISA A H, LAUFER S, ROSEN - KLIGVASSER J, et al. Stabilization of ethyl- cellulose oleogel network using lauric acid[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122(2): 1900040.
- [34] CHEN X H, DING S L, CHEN Y, et al. Assessing the effectiveness of peanut diacylglycerol oil-ethylcellulose/monoglyceride-based oleogel in sponge cake as a margarine replacer[J]. *Food Bioscience*, 2023, 55: 102959.
- [35] RONDOU K, DE WITTE F, RIMAUX T, et al. Multiscale analysis of monoglyceride oleogels during storage[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2022, 99(11): 1 019-1 031.
- [36] ROUEGARINEJAD L, DEHGhani S, BAKHSHI S, et al. Oleogelation of sunflower-linseed oils with carnauba wax as an innovative strategy for shortening substitution in cakes[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137745.
- [37] LIAO Z Y, GUO S L, LU M W, et al. Tailoring water-induced multi-component (ceramide and lecithin) oleogels: influence of solute added in water[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17(1): 84-92.
- [38] MENG Z, GUO Y, WANG Y, et al. Oleogels from sodium stearoyl lactylate-based lamellar crystals: Structural characterization and bread application[J]. *Food Chemistry*, 2019, 292: 134-142.
- [39] WEI Z H, DONG Y, SI J Y. Ovotransferrin fibril: gum Arabic complexes as stabilizers for oleogel-in-water Pickering emulsions: formation mechanism, physicochemical properties, and curcumin delivery[J]. *Foods*, 2024, 13(9): 1 323.
- [40] BELACHEW M G, BADHADHA K U. Physicochemical characteristics and shelf-life stability of soya bean oil-based shortening[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60(9): 2 393-2 400.
- [41] HONG S J, SHIN G H, KIM J T. Fabrication and application of turmeric extract-incorporated oleogels structured with xanthan gum and soy lecithin by emulsion template[J]. *Gels*, 2024, 10(1): 84.
- [42] PARK C, BEMER H L, MALEKY F. Oxidative stability of rice bran wax oleogels and an oleogel cream cheese product[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2018, 95(10): 1 267-1 275.
- [43] ZULIM BOTEAGA D C, MARANGONI A G, SMITH A K, et al. The potential application of rice bran wax oleogel to replace solid fat and enhance unsaturated fat content in ice cream[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(9): C1 334-C1 339.
- [44] JING X Y, CHEN Z H, TANG Z H, et al. Preparation of camellia oil oleogel and its application in an ice cream system [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 169: 113985.
- [45] ZAMPOUNI K, SONIADIS A, DIMAKOPOULOU-PAPAZOGLU D, et al. Modified fermented sausages with olive oil oleogel and NaCl - KCl substitution for improved nutritional quality[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 158: 113172.
- [46] ZHU Q M, CHEN F, LI P Y, et al. Flaxseed gum/Arabic gum/tween 80-based oleogel as a fat substitute applied in emulsified sausage: physicochemical properties, sensory attributes and nutritional quality[J]. *Gels*, 2023, 9(9): 759.
- [47] MALVANO F, MUCCIO E, GALGANO F, et al. Design of a high protein, no added sugar pistachio spread using oleogel as fat replacer[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 198: 115993.
- [48] DING S L, CHEN X H, OUYANG B, et al. Exploring diacylglycerol oil-based oleogels as effective stabilizers in peanut butter: performance, structural insights, and sensory evaluation[J]. *Journal of Oleo Science*, 2024, 73(2): 135-145.
- [49] WANG F Y, GUO L, LIU H, et al. Water-in-oil oleogel with biphasic stabilization for fabrication of low-fat salad dressing [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108805.
- [50] ZHU Q, ZHANG W W, NI Z J, et al. Development and characterization of novel Lycium barbarum seed oil-based oleogels and their application in functional chocolate[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103155.
- [51] 王风艳, 王翔宇, 周佩文, 等. 棕榈糖对油凝胶基巧克力起霜特性的影响[J]. *中国油脂*, 2024, 49(2): 82-87, 131.
- WANG F Y, WANG X Y, ZHOU P W, et al. Effect of palm sap sugar on blooming properties of oleogel-based chocolate[J]. *China Oils and Fats*, 2024, 49(2): 82-87, 131.
- [52] 李恩泽, 吴静雯, 贾心悦, 等. 油凝胶替代脂肪的研究及在植物肉饼中的应用[J]. *食品科学*, 2024, 45(8): 45-54.
- LI E Z, WU J X, JIA X Y, et al. Preparation and application of oleogel as fat substitute in plant-based patties[J]. *Food Science*, 2024, 45(8): 45-54.
- [53] YEN F C, GLUSAC J, LEVI S, et al. Cultured meat platform developed through the structuring of edible microcarrier-derived microtissues with oleogel-based fat substitute[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2 942.
- [54] ZHUANG X Q, GAUDINO N, CLARK S, et al. Novel lecithin-based oleogels and oleogel emulsions delay lipid oxidation and extend probiotic bacteria survival[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 136: 110353.
- [55] HASHIM A F, EL-SAYED S M, EL-SAYED H S. Bigel formulations based on sesame oleogel with probiotics alginate hydrogel: a novel structure for nutritious spreadable butter[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124782.