

粉末油脂组成与制备及其在食品中的应用

吴超^{1,2}, 刘哲¹, 田艳杰^{1,3}, 职兰懿¹, 刘红芝¹, 石爱民^{1,2*}, 王强^{1,2}

(¹中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工综合性重点实验室 北京 100193

²河北农业大学食品科技学院 河北保定 071001

³青岛农业大学食品科学与工程学院 山东青岛 266109)

摘要 粉末油脂是通过微胶囊技术制备的功能性脂质食品配料,可以很好地保护芯材油脂免受外界环境的影响,与未包埋的油脂相比具有提高氧化稳定性,延长货架期,控制释放,提升食品品质等优点。本文综述粉末油脂的组成与制备工艺,加工过程对微胶囊化粉末油脂理化特性的影响以及在食品中的应用情况,展望粉末油脂的未来发展方向。

关键词 粉末油脂; 制备工艺; 稳定性; 应用特性; Pickering 乳液

文章编号 1009-7848(2023)11-0435-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.11.041

粉末油脂是以精炼氢化植物油、合成乳化剂和多种食品辅料为原料,经调配、乳化、杀菌,采用喷雾干燥、冷冻干燥、复合凝聚法等微胶囊技术制备的功能性脂质食品配料。微胶囊技术可将液态油转化为固态的粉末油脂,从而方便油脂的储存运输^[1]。粉末油脂与未包埋的油脂相比,具有提高氧化稳定性,延长货架期,控制释放,提升品质等优点,在奶茶、咖啡、烘焙食品、麦片等食品中有着广泛应用。

传统粉末油脂是以食用油脂作为芯材,蛋白质、碳水化合物等作为壁材,通过包埋加工而成的微胶囊化油脂产品。基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂产品,符合现代营养健康食品的发展趋势。开展基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂制备研究以及新型粉末油脂的理化特性与加工稳定性规律研究,创制新型粉末油脂产品,实现食品品质提升,是保障全民营养健康的重要举措。

本文综述微胶囊化粉末油脂的组成与制备工艺,加工过程中对粉末油脂理化特性的影响,粉末油脂在食品中的应用情况,展望其未来发展方向,为基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂在食品中

的应用提供参考。

1 粉末油脂的组成与制备

微胶囊技术是把分散的固体物质颗粒、液滴或气体完全包埋在一层膜中形成球状微胶囊的一种技术,被包埋的物料称为芯材,外部的包裹膜称为壁材。粉末油脂通过微胶囊技术将油脂作为芯材包埋在壁材中,从而保护芯材其免受外界环境因素的影响。基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂是在传统粉末油脂制备技术的基础上,使用 Pickering 乳液通过喷雾干燥等方法制备更绿色健康的微胶囊化粉末油脂。

1.1 粉末油脂的基本组成

1.1.1 芯材 微胶囊的芯材可免受周围环境的影响,提高氧化稳定性,延长贮藏期,所有植物油脂原料均可作为芯材用于粉末油脂的生产中。白雪等^[2]通过喷雾干燥制备大豆油粉末油脂,得到了包埋率达 40.15%,且具有良好色泽、气味的粉末油脂。郭芳等^[3]以苦杏仁油为芯材,通过喷雾干燥制得了包埋率达 88.43%的粉末油脂,所制得的产品干燥、细腻。Luna-Guevara 等^[4]通过喷雾干燥制得了核桃油、花生油、山核桃油 3 种粉末油脂。目前在粉末油脂中植物原料应用广泛,由于原料自身的性质不同,如含油量、水分活度等,制得的粉末油脂特性也不同。

与一般植物油脂相比,动物油脂在加工过程中具有独特的风味和营养价值,如鱼油可以起到

收稿日期: 2022-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172149);中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-2021-IFST-02);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2022QC11)

第一作者: 吴超,男,硕士生

通信作者: 石爱民 E-mail: shiaimin@caas.cn

预防多种疾病,改善健康状况的作用,然而在食品工业中的应用受到低溶解度、易氧化性、不理想气味和不良的加工处理能力的限制,通过微胶囊技术可以很好的掩盖鱼的腥味^[5]。目前以动物油脂为原料的微胶囊研究主要集中在鱼油上,未来可开展更多种类动物油粉末油脂的研究,为提升动物油的稳定性及应用特性开发新思路。

1.1.2 壁材 壁材可以保护芯材免受氧气、水、光等外界因素的影响,常用于生产植物油粉末油脂的壁材主要有蛋白质、碳水化合物、复合壁材等。

蛋白质具有良好的两亲性、水溶性、乳化性和发泡性,这些特性可以用来制备稳定的乳液,作为微胶囊的壁材起到有效的保护芯材,提高微胶囊效率的作用^[6]。目前,已有多种蛋白质作为壁材用于微胶囊的研究,常见的有大豆分离蛋白^[7]、豌豆分离蛋白^[8]、乳清分离蛋白^[9]、水果蛋白^[10]等。以蛋白质作为壁材时需考虑 pH 值的影响,当 pH 值位于等电点时蛋白质溶解度降低,乳化能力下降,导致蛋白质的成膜性降低^[11]。

同样,碳水化合物是微胶囊制备中另一种应用广泛的壁材。改性后的淀粉具有良好的两亲性、乳化性、成膜能力等,这些特性使得氧化淀粉、麦芽糊精、环糊精等改性淀粉衍生物成为良好的微胶囊壁材^[12]。Lei 等^[13]通过复合酶处理制备了紫薯多孔淀粉,并作为微胶囊壁材制备了橄榄油粉末油脂。碳水化合物本身的性质对粉末油脂有显著影响,以麦芽糊精为例,葡萄糖当量(MD 值)是麦芽糊精最重要的物化指标,研究发现以 MD 10 的麦芽糊精作为微胶囊壁材时,与 MD 15 及 MD 20 的麦芽糊精相比,具有更低的水分活度,更好的流动性和微胶囊效率等,可显著提高粉末油脂的稳定性^[14]。

此外,复合壁材是多种壁材的混合物,目前在粉末油脂生产中多使用复合壁材。苗欣月等^[15]以乳清分离蛋白和麦芽糊精为壁材制备了糜子壳油的粉末油脂,发现较高含量的乳清分离蛋白因良好的成膜性和乳化性可以提高包埋率,所制备的粉末油脂具有良好的应用价值。Lin 等^[16]以低聚果糖和大豆分离蛋白为壁材制备了核桃油粉末油脂,研究发现低聚果糖通过降低乳液粒径和提高

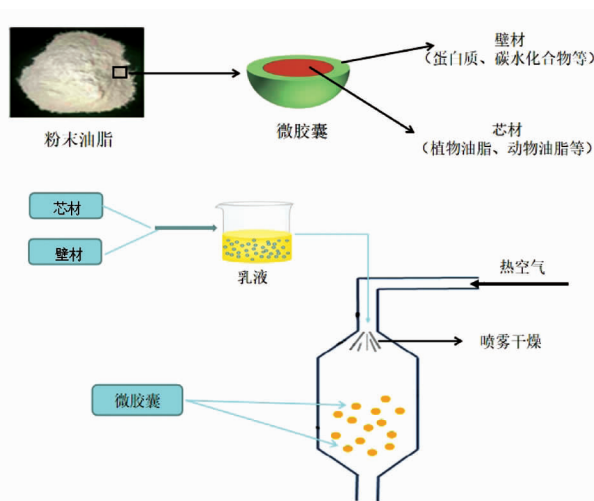


图1 微胶囊化粉末油脂结构及喷雾干燥法制备示意图
Fig.1 Structure of microencapsulated powder oil and its preparation by spray drying method

乳液黏度,显著提高了粉末油脂的包封效率。

与单一壁材相比,复合壁材可以很好的互补单一壁材的缺点,如蛋白质因其自身性质易发生聚集,易被消化酶水解,而碳水化物的乳化稳定性较差,因此选择合适的壁材及比例进行复合,可以更好地提高微胶囊的包埋率,提高粉末油脂产品的稳定性。

1.2 粉末油脂的制备方法

1.2.1 传统粉末油脂 传统粉末油脂的制备方法一般是先将芯材和壁材混合制备乳液,进而形成微胶囊,粉末油脂的制备技术主要有喷雾干燥法、冷冻干燥法、复合凝聚法等。其中喷雾干燥所制备的微胶囊化粉末油脂颗粒小而均匀,具有良好的均一性和稳定性,粉末颗粒更规则,更有利于保存,同时因具有时间短、成本低等优点,成为制备粉末油脂最常用的方法。粉末油脂的制备过程中制备工艺是非常重要的影响因素,壁材的选择、芯壁比例、均质压力、进风温度等工艺参数都会对粉末油脂的品质产生影响。Karrar 等^[17]为研究麦芽糊精、阿拉伯胶、乳清分离蛋白为壁材时对芝麻油粉末油脂的影响而设计了不同的组合方式,结果表明基于碳水化合物(阿拉伯胶与麦芽糊精质量比为 2:1)所制备的粉末油脂微胶囊化产率和效率最高。

表 1 几种微胶囊化粉末油脂的制备工艺

Table 1 Preparation technology of several microencapsulated powder oils

芯材	壁材	制备技术	包埋率/%	参考文献
南极磷虾油	m 明胶: m 麦芽糊精=1:3	喷雾干燥法	74.15	[18]
鱼油	牧豆胶+壳聚糖	喷雾干燥法	85.23	[19]
鱼油	魔芋葡甘露聚糖+大豆分离蛋白	冷冻干燥法	83.52	[20]
米糠油	m 麦芽糊精: m 酪蛋白酸钠=8:1	喷雾干燥法	85.23	[21]
元宝枫籽油	m 大豆分离蛋白: m 阿拉伯胶=5:1	喷雾干燥法	89.09	[22]
辣椒籽油	m 阿拉伯胶: m 麦芽糊精=1:5	喷雾干燥法	82.75	[23]
核桃油	脱脂奶粉+吐温 80	喷雾干燥法	91.01	[24]
绿咖啡油	明胶+果胶	复合凝聚法	87.60	[25]
玉米油 Pickering 乳液	海藻酸盐+麦芽糊精	喷雾干燥法	80.95	[26]
薄荷油 Pickering 乳液	羟丙基甲基纤维素	喷雾干燥法	89.10	[27]

1.2.2 新型粉末油脂 传统粉末油脂大量使用合成乳化剂对人体健康有害,迫切需要寻找合成乳化剂的健康替代品。Umana 等^[28]对洋蓍副产物加入喷雾干燥油水乳状液微胶囊化粉末油脂进行了研究,发现喷雾干燥洋蓍苞片淀粉乳状液后制备的粉末油脂包封率较高,存在抗氧化因子,表明洋蓍苞片可以用作合成乳化剂的健康替代品。

目前已有基于 Pickering 乳液的粉末油脂研究, Pickering 乳液是一类由固体颗粒稳定的乳液,其稳定性强、安全性好^[29-30],基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂可避免传统粉末油脂使用合成乳化剂和氢化植物油的缺点,是一种绿色健康的产品^[31]。同时, Pickering 乳液可以包埋生物活性成分,对其具有保护、递送、控制释放等作用^[32],广泛应用于食品领域,是潜在的粉末油脂稳定体系革新途径,基于 Pickering 乳液的新型粉末油脂最常用的制备方法为喷雾干燥法,已有研究利用纤维素纳米晶体稳定 Pickering 大麻籽油,通过喷雾干燥制备了粉末油脂^[33]。Marefati 等^[34]发现用淀粉 Pickering 双重乳液可制备高包封率和高含油率的粉末油脂。Zhang 等^[35]制备了热诱导大豆分离蛋白和纳米纤维素协同稳定的 O/W Pickering 乳液,通过喷雾干燥得到可食用的粉末油脂。

传统粉末油脂制备过程中大量产生反式脂肪酸、使用合成乳化剂,长期摄入存在严重健康风险问题^[36];同时,传统粉末油脂应用过程中容易氧化、稳定性差、用途单一、营养品质差,无法满足未来营养健康需求。未来可借助 Pickering 乳液体

系,实现固体颗粒代替合成乳化剂,植物油代替氢化油,为新型粉末油脂提供新路径、新方法^[37];通过 Pickering 乳液负载活性成分,提升粉末油脂品质功能,为多用途、营养健康新型油脂创新提供新策略、新技术。

2 加工过程对粉末油脂特性的影响

2.1 粉末油脂的基本理化特性

粉末油脂的理化特性与其质量及稳定性有着密切关系,如水分活度、粒径、流动性、孔隙率等^[38]。水分活度受到干燥条件(空气湿度、液滴大小、湿度等)和乳液性质(含油量、浓度、黏度、液滴大小、壁材等)的影响,较低的水分含量和水分活度有利于提供粉末油脂的质量和保质期, Nayana 等^[39]制备了含水量为 2.67%,水分活度为 0.46 的粉末油脂,产品质量较好。粉末油脂的质量、外观、流动性等特性直接取决于粉末粒径^[40], Chen 等^[41]制备了平均粒径 6.79 μm 的粉末油脂,观察到其微胶囊分散均匀,在水中没有明显聚集,表明具有良好的分散能力。流动性常用豪斯纳比率与卡尔指数评价,豪斯纳比率与卡尔指数越小,粉末的流动性就越好^[42]。孔隙率是指颗粒之间的空隙体积和孔隙体积与粉末所占总体积的比值,孔隙率低通常有较高的贮藏稳定性,壁材对粉末油脂的孔隙率有着显著影响,已有研究通过酪蛋白酸钠和 β -环糊精为壁材制备了孔隙率较低的粉末油脂^[43]。包埋率是粉末油脂的一项重要指标,包埋率可以影响粉末油脂的形状和表面形态,同时包埋率越高粉

末油脂的氧化稳定性越好。黄雨洋等^[44]制备了高包埋率(94.32%)的核桃油粉末油脂,发现高包埋率的粉末油脂形貌较好,表面光滑且无裂纹。

2.2 制备工艺对粉末油脂理化特性的影响

微胶囊的壁材选择,以及超声处理、均质压力、喷雾干燥的温度等加工条件均对粉末油脂的理化特性有显著的影响。

2.2.1 壁材的选择 粉末油脂成功制备需要选择合适的壁材,壁材对包埋率、稳定性等都有很大影响。杨婷茹^[45]准备了大豆分离蛋白+麦芽糊精、阿拉伯胶+麦芽糊精、变性淀粉+麦芽糊精3种不同壁材,发现以大豆分离蛋白与麦芽糊精为复合壁材制备的粉末油脂形态完整,表面光滑,同时较其它2种壁材相比有更好的润湿性、吸水性和堆积密度等。唐东等^[46]以包埋率,含水率,乳液稳定性等为指标,对壁材的选择配比进行研究,结果表明麦芽糊精添加量为总壁材25%,大豆分离蛋白与阿拉伯胶质量比为1:1时制备的粉末油脂乳状液稳定性指数最高,包埋率89.58%,最终确定茶籽油粉末油脂的最佳壁材组合方式为:麦芽糊精+大豆分离蛋白+阿拉伯胶。由此可知,在粉末油脂的制备过程中选择合适的复合壁材对理化特性是有益的。

2.2.2 超声处理 超声处理具有机械传质,加热和空化的功能,可降低乳状液的粒径和PDI,有利于芯材,壁材的充分均匀,提高乳状液的稳定性^[47]。Wang等^[48]发现超声处理后的乳状液粒径明显低于未经过超声处理的乳状液,起到了提高粉末油脂稳定性和包埋效果的作用。这是因为超声处理可以提高蛋白质氨基和多糖羧基的分子运动,提高大豆分离蛋白与麦芽糊精复合壁材的乳化作用。然而较低的超声功率会使壁材的分散性变差,粉末油脂的包埋率降低^[49];而过高的超声功率会使疏水蛋白暴露,导致蛋白聚集,从而降低乳化作用和包埋率,因此在粉末油脂的制备过程中超声处理要选择合适的功率。

2.2.3 高压均质 高压均质增加了乳化剂的表面活性 and 分散液滴周围的黏弹性膜厚度,可以提高乳化效率^[21]。提高均质压力,可以使液滴更小更均匀,从而提高乳状液的稳定性。梁井瑞等^[50]发现在均质压力40 MPa下制备的粉末油脂最稳定,而随

着压力的增大,稳定性下降。可见均质压力过高,则会产生较大的热能,影响芯材的质量,因此在粉末油脂的制备过程中要选择合适的均值压力。周麒依等^[51]研究了空化射流、高压均质、超声破碎3种均质工艺对鱼油粉末油脂的影响,发现空化射流10 min下粉末油脂的包埋率为87.44%,100 MPa高压均质下包埋率为80.36%,400 W超声破碎下包埋率为78.64%,空化射流工艺比高压均质,超声破碎处理制备的粉末油脂包埋率更高,粒径更小,稳定性更高。由此可知,空化射流工艺可以作为一种新型均质工艺用于生产粉末油脂。

2.2.4 喷雾干燥温度 在粉末油脂的制备过程中,喷雾干燥是最常使用的一种制备技术,而入口温度则对喷雾干燥的粉末油脂产品有着显著的影响。已有研究通过入口温度对红麻籽油微胶囊化粉末油脂的影响证明,较高的入口温度导致雾化进料和干燥空气之间存在巨大的温差,从而导致了更高的热量传递到颗粒,使得水分加速去除,进而降低了含水率^[52]。基于Pickering乳液的粉末油脂制备技术与传统粉末油脂相同,喷雾干燥仍是常用的制备技术。Ribeiro等^[53]分别通过喷雾干燥和冷冻干燥将烘焙咖啡油Pickering乳液制备粉末油脂,研究表明喷雾干燥所制得的粉末油脂较冷冻干燥相比具有更均匀的外观及更小的粒径。

以上简述了几种目前常见的制备粉末油脂的制备工艺对其理化特性的影响,当前在制备过程中研究者并不使用单一的制备工艺,常常多种工艺结合从而提高产品的理化特性。未来的研究中需要继续深入研究更多的制备工艺对粉末油脂的影响,如芯壁比、固形物含量等,新型的制备工艺以及基于Pickering乳液的粉末油脂产品开发也是未来的发展方向。

2.3 粉末油脂的消化特性

粉末油脂常利用体外模拟消化用来衡量油脂是否顺利到达肠道进行释放,以满足消化吸收的要求,通过体外消化试验后,发现控释作用主要由壁材引起^[54]。根据Alvarez等^[55]的报道,粉末油脂的壁材可以有效的保护芯材油脂传递到小肠中进行消化吸收。

体外消化模型主要包括口腔消化模型、胃消化模型和肠道消化模型。口腔消化因时间短,消化

酶、离子等不足以破坏壁材,从而使得微胶囊的芯材无法释放;胃环境酸度高,常用 HCl 调节 pH 值至酸性,壁材可以保护芯材不被分解,同时因壁材的不同,消化效果也有很大的差异,根据 Binsi 等^[56]的研究,发现阿拉伯胶-鱼卵蛋白复合壁材(RG)比单独使用鱼卵蛋白(RC)保护效果更好,这可能是由于阿拉伯胶的加入使得蛋白质的聚集程度变小造成的;在肠道消化中,绝大多数的脂肪可被胰脂酶水解,是吸收的主要场所,马明月等^[57]以明胶-海藻酸钠为壁材制备紫苏油粉末油脂,通过体外模拟消化发现在胃液消化中的释放效率为 13.25%,而在肠液中的释放率达 33.02%,表明粉末油脂可以有效保护油脂到达小肠再被消化吸收。总的来讲,对控释作用进行研究不仅可以在粉末油脂的制备过程中选择合适的壁材配比及制备工艺,同时也能够拓展其在食品工业中的应用。近年来有研究发现基于 Pickering 乳液的粉末油脂同样能够起到良好的控释作用,未来可为抗消化新型粉末油脂的开发提供一定的指导。

3 粉末油脂的应用

粉末油脂具有优异的流动性和溶解特性,添加到食品中可使组织状态更佳、口感顺滑^[58],在食品工业中具有巨大的应用潜力。

3.1 提升稳定性和货架期

油脂由于自身的特性,在加工储藏过程中易受到光照、氧气等因素的影响发生氧化酸败,从而影响油脂的质量,无法满足消费者对食品稳定性的需求,同时对商家的经济效益造成影响。粉末油脂因壁材的保护作用,可降低油脂在保存过程中的氧化酸败,掩盖异味,同时提高油脂的稳定性及货架期。

微胶囊化粉末油脂中氧化速率很大程度上取决于油脂的性质和抗氧化剂的存在。Le Priol 等^[59]通过对葵花籽油和亚麻籽油分别包埋于微胶囊中,发现在相同的条件下,亚麻籽油的氧化速率更慢,可见油脂中脂肪酸的不饱和度越高,油脂对氧化越敏感。Meng 等^[60]通过将花椒油与抗氧化剂共同包埋,发现抗氧化剂加入显著降低了粉末油脂的过氧化值、酸价等,提升了稳定性,延长货架期。

油脂经长时间加热,会导致油脂的品质降低,

微胶囊的壁材可以减少在加工过程中热对油脂带来的不良影响,提高油脂的热稳定性。Qiu 等^[61]利用热重曲线在 100~500 °C 下进行热稳定性分析,发现微胶囊在 200~500 °C 期间才被分解破坏,表明以绿豆分离蛋白-杏皮果胶为壁材可以显著提高玫瑰精油的热稳定性。此外,研究表明粉末油脂可以提高生姜精油^[62]、奇亚籽油^[63]、柠檬草精油^[64]等的热稳定性。

综上所述,微胶囊化能够对油脂进行有效的保护,降低在保存过程中的氧化哈喇,提高热稳定性而且极大地提高了油脂的使用方便性,如市面上最常见的咖啡伴侣,产品的保质期可长达一年。粉末油脂添加到食品中可作为保鲜剂、增香剂、干燥剂代替品,可延长食品货架期。

3D 食品打印是一种新兴的食品技术,可以提供个性化的营养饮食,为不同营养需求的人群提供独特的饮食配方。目前已有番石榴叶等功能性粉末作为 3D 打印的油墨材料成分的研究,可以显著提高产品的稳定性,改善其功能特性^[65]。同时,也有研究表明冬虫夏草粉末同样可以应用于 3D 打印食品^[66],但目前未见粉末油脂应用于食品的 3D 打印中,未来可以开展基于粉末油脂的 3D 打印技术开发,继续拓展粉末油脂的应用。

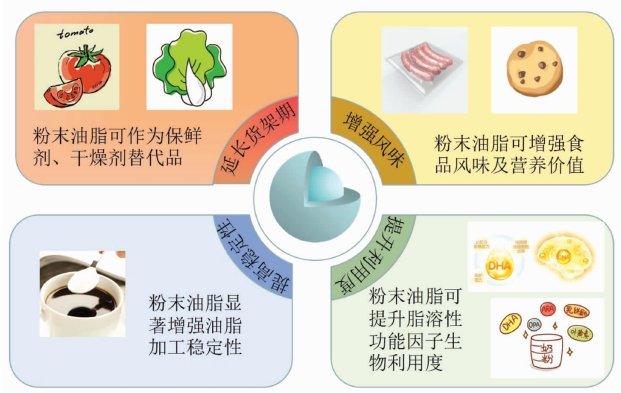


图 2 粉末油脂在食品中的应用

Fig.2 Application of powder oil in food

3.2 改善食品质构与风味

质构是食品的重要特性,具有影响口感和饮食愉悦感以及风味释放的重要性,通过食品加工,食品加工及配方等可改变质构,从而提高食用和商品价值,改善口感,延长食品的货架稳定性。粉

末油脂添加到肉类产品中可以改善其弹性和动态黏度,Kean等^[67]将肉桂精油粉末油脂添加到鸡肉末中,可显著延缓鸡肉末12 d冷藏期间细菌的生长,同时对气味和颜色无负面影响。有研究发现花椒精油粉末油脂的加入可以降低香肠的硬度、黏附性和咀嚼性,同时显著提高了弹性和黏结性,表明粉末油脂的加入改善了香肠的结构性能,这可能是因为粉末油脂的壁材提高了香肠的保水能力和蛋白质与脂质之间的黏附作用,此外粉末油脂的加入显著提高了 L^* 、 a^* 和 b^* 值,改善了香肠的颜色,这是因为微胶囊具有保护蛋白质和脂质的能力^[59]。可见粉末油脂添加到食品体系中能够有效地改善食品的质构和风味。

除此之外,有学者^[24]使用通过喷雾干燥获得的向日葵油和芝麻油共混粉末油脂来配制饼干,发现其在不同条件下有更长的储存期和抗氧化能力,同时丰富了饼干的营养成分。基于Pickering乳液的新型粉末油脂同样具有良好的应用特性,有研究发现由壳聚糖纳米粒子稳定的烘焙咖啡油Pickering乳液微胶囊可以很好的保护酚类化合物以及提高抗氧化活性,制得的粉末油脂在咖啡中有着良好的应用特性^[52]。未来加强对食品质构的研究,可以提高市场竞争力,在食品中添加粉末油脂产品不仅具有提升稳定性的作用,同时对食品营养、风味具有相得益彰的效果。

3.3 提高脂溶性功能因子生物利用度

脂溶性功能因子如多不饱和脂肪酸等具有提供健康益处的能力,然而由于自身含大量不饱和和双键,易发生氧化,通过微胶囊技术可以很好地提高其生物利用度。鱼油中富含包括二十二碳六烯酸(DHA)在内的 ω -3多不饱和脂肪酸,摄入DHA对人体有益,具有促进心理健康和大脑发育,以及降低心血管疾病的风险^[68],然而由于DHA不饱和度高容易发生氧化,微胶囊可以保护DHA的多不饱和脂肪酸的结构和功能,并在达到吸收点释放,提高生物利用度^[55]。Eratte等^[69]分别制备了包含 ω -3脂肪酸、益生菌以及共同包埋的粉末油脂,通过气相色谱测量释放过程中油的 ω -3脂肪酸分布,发现 ω -3脂肪酸与益生菌共同包埋可以提高 ω -3脂肪酸的生物利用度,同时可以提高益生菌的存

活率。Fard等^[70]发现与未封装的金枪鱼油相比,将微胶囊化DHA金枪鱼油添加到婴幼儿配方奶粉中,血液中的DHA增加幅度显著,表明在婴幼儿奶粉中使用DHA金枪鱼油粉末油脂提供了更好的DHA生物利用度。近年来,食品工业中以富含 ω -3多不饱和脂肪酸的植物油为基础的食品开发成为热门方向,如奇亚籽油、海藻油中DHA含量高,产量高,适合素食者食用。未来,可通过微胶囊技术将富含脂溶性功能因子的植物油与益生菌等共同包埋,可以具有更好的氧化稳定性,更高的提高功能因子的生物利用度。

综上所述,胶囊具有保护物质使其免受环境中的湿度、氧气、温度等环境因素的影响,微胶囊化粉末油脂可提高其抗氧化能力,提升贮藏稳定性和货架期,同时能够改善食品风味,提高脂溶性功能因子的生物利用度。

4 结语

利用微胶囊技术可将液态油转化为固态的粉末油脂,微胶囊的壁材可以保护油免受氧气、水、温度等外界环境因素的影响,隔绝不良气味,可以提高油脂的稳定性和货架期,改善食品质构和风味,提高功能因子生物利用度。近年来对粉末油脂的研究已取得了较大进展,虽广泛应用于咖啡、奶茶、香肠、烘焙食品等领域中,但仍存在部分问题:1)传统粉末油脂加工过程中会产生大量反式脂肪酸,使用合成乳化剂,长期摄入存在严重健康风险,因此需要寻找新型粉末油脂的制备方式,而基于Pickering乳液制备粉末油脂可实现固体颗粒代替合成乳化剂,植物油代替氢化油,是一种绿色健康的新型粉末油脂产品;2)体外模拟消化过程中发现部分壁材虽然可以很好的保护功能成分免受胃酸的破坏,但在肠道中的吸收率较低,仍需通过对消化中的生物利用度进行研究,选择合适的壁材及制备工艺;3)目前粉末油脂的应用较为单一,未来可进一步拓宽粉末油脂的应用范围,如作为保鲜材料、3D打印成分等。在粉末油脂的组成和制备工艺、理化特性和功能因子的生物利用度以及在食品中的应用等方面的研究将对高品质、健康食品的开发具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 白雪. 高粱醇溶蛋白制备粉末油脂及其作用机理的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
BAI X. The study on the preparation of oil powder by kafirin and its action mechanism[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [2] 白雪, 田忠华, 赵悦琳, 等. 以高粱醇溶蛋白和酪蛋白酸钠为壁材制备粉末油脂的工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(2): 33-37.
BAI X, TIAN Z H, ZHAO Y L, et al. Process optimization of oil powder using kafirin and sodium caseinate as wall materials[J]. Cereals & Fat, 2021, 34(2): 33-37.
- [3] 郭芳, 张璐, 李鑫杰. 苦杏仁油微胶囊制备及其性质研究[J]. 农产品加工, 2022(2): 21-25.
GUO F, ZHANG L, LI X J. Preparation and properties of bitter almond oil microcapsules [J]. Farm Products Processing, 2022(2): 21-25.
- [4] LUNA-GUEVARA J J, OCHOA-VELASCO C E, HERNANDEZ-CARRANZA P, et al. Microencapsulation of walnut, peanut and pecan oils by spray drying [J]. Food Structure -Netherlands, 2017, 12: 26-32.
- [5] 夏蕴实, 刘畅, 赵丽娟, 等. 动物油脂粉末化技术研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 223-227.
XIA Y S, LIU C, ZHAO L J, et al. Research progress of animal fat powder technology [J]. The Food Industry, 2021, 42(9): 223-227.
- [6] NESTERENKO A, ALRIC I, SILVESTRE F, et al. Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 42: 469-479.
- [7] NESTERENKO A, ALRIC I, SILVESTRE F, et al. Comparative study of encapsulation of vitamins with native and modified soy protein[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 38: 172-179.
- [8] GHARSALLAOUI A, SAUREL R, CHAMBIN O, et al. Pea (*Pisum sativum* L.) protein isolate stabilized emulsions: A novel system for microencapsulation of lipophilic ingredients by spray drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2211-2221.
- [9] TON N M N, TRAN T T T, LE V V M. Microencapsulation of rambutan seed oil by spray-drying using different protein preparations [J]. International Food Research Journal, 2016, 23(1): 123-128.
- [10] BASYIGIT B, YUCETEPE M, KARAASLAN A, et al. High efficiency microencapsulation of extra virgin olive oil (EVOO) with novel carrier agents: Fruit proteins[J]. Materials Today Communications, 2021, 28: 102618.
- [11] 李佳笑, 石爱民, 刘红芝, 等. 植物蛋白酸性条件下溶解性提高的改性方法及应用研究进展[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 59-65.
LI J X, SHI A M, LIU H Z, et al. Progress in modification methods to improve plant proteinsolubility under acidic conditions and its application [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(9): 59-65.
- [12] GUO Y B, QIAO D L, ZHAO S M, et al. Starch-based materials encapsulating food ingredients: Recent advances in fabrication methods and applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 270: 118358.
- [13] LEI M, JIANG F C, CAI J, et al. Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 755-761.
- [14] ZHU J Y, LI X T, LIU L, et al. Preparation of spray-dried soybean oil body microcapsules using maltodextrin: Effects of dextrose equivalence[J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 154: 112874.
- [15] 苗欣月, 朱立斌, 朱丹, 等. 糜子壳油微胶囊工艺优化及其理化特性分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 136-143.
MIAO X Y, ZHU L B, ZHU D, et al. Optimization of preparation process of *Panicum miliaceum* L. shell oil microcapsules and analysis of their physicochemical properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 136-143.
- [16] LIN D R, XIAO L J, LI S Q, et al. Effects of fructooligosaccharide and soybean protein isolate in the microencapsulation of walnut oil [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 177: 114431.
- [17] KARRAR E, MAHDI A A, SHETH S, et al. Effect of maltodextrin combination with gum arabic and whey protein isolate on the microencapsulation of gorum seed oil using a spray-drying method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 171: 208-216.
- [18] 暴莎莎, 张晶, 谭明乾, 等. 南极磷虾油的微胶囊

- 化及其包埋率检测方法的建立[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 272-279.
- BAO S S, ZHANG J, TAN M G, et al. Microencapsulation and establishment of detection method for microencapsulation efficiency of Antarctic Krill oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(2): 272-279.
- [19] ESPINOSA -ANDREWS H, MORALES -HERNANDEZ N, GARCIA -MARQUEZ E, et al. Development of fish oil microcapsules by spray drying using mesquite gum and chitosan as wall materials: Physicochemical properties, microstructure, and lipid hydroperoxide concentration[J/OL]. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, (2022-02-24)[2022-05-05]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00914037.2022.2042289>.
- [20] CUI T T, CHEN C J, JIA A R, et al. Characterization and human microfold cell assay of fish oil microcapsules: Effect of spray drying and freeze-drying using konjac glucomannan (KGM)-soybean protein isolate (SPI) as wall materials[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 83: 104542.
- [21] LAI Q D, DOAN N T T, NGUYEN T T T. Influence of wall materials and homogenization pressure on microencapsulation of rice bran oil[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1885-1896.
- [22] 吴隆坤, 李佩, 德青玉珍, 等. 微胶囊化元宝枫籽油粉末油脂的工艺优化及稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1): 106-114.
- WU L K, LI P, DE Q Y Z, et al. Research on preparation technology of microencapsulated *Acer truncatum* seed oils and stability[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(1): 106-114.
- [23] KARAASLAN M, SENGUN F, CANSU U, et al. Gum arabic/maltodextrin microencapsulation confers peroxidation stability and antimicrobial ability to pepper seed oil[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127748.
- [24] SHAMAEI S, SEHIEDLOU S S, AGHBASHLO M, et al. Microencapsulation of walnut oil by spray drying: Effects of wall material and drying conditions on physicochemical properties of microcapsules[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 101-112.
- [25] 谭睿, 申瑾, 董文江, 等. 复合凝聚法制备绿咖啡油微胶囊及其性能[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 144-152.
- TAN R, SHEN J, DONG W J, et al. Preparation of green coffee oil microcapsules by complex coacervation method and its physicochemical Properties[J]. Food Science, 2020, 41(23): 144-152.
- [26] SINGH C K S, LIM H P, TEY B T, et al. Spray-dried alginate-coated Pickering emulsion stabilized by chitosan for improved oxidative stability and *in vitro* release profile[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117110.
- [27] LAI H Z, LIU Y, HUANG G T, et al. Fabrication and antibacterial evaluation of peppermint oil-loaded composite microcapsules by chitosan-decorated silica nanoparticles stabilized Pickering emulsion templating[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 2314-2325.
- [28] UMANA M, WAWRZYNIAK P, ROSSELLO C, et al. Evaluation of the addition of artichoke by-products to O/W emulsions for oil microencapsulation by spray drying[J]. LWT -Food Sci Technol, 2021, 151: 112146.
- [29] JIAO B, SHI A M, WANG Q, et al. High-internal-phase Pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2018, 57(30): 9274-9278.
- [30] LIU Z, MCCLEMENTS D J, SHI A, et al. Janus particles: A review of their applications in food and medicine[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 69(29): 10093-10104.
- [31] LI S S, JIAO B, MENG S, et al. Edible mayonnaise-like Pickering emulsion stabilized by pea protein isolate microgels: Effect of food ingredients in commercial mayonnaise recipe[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131866.
- [32] SHI A M, WANG J, GUO R, et al. Improving resveratrol bioavailability using water-in-oil-in-water (W/O/W) emulsion: Physicochemical stability, *in vitro* digestion resistivity and transport properties[J]. Journal of Functional Foods, 2021, 87: 104717.
- [33] ESPARZA Y, NGO T D, BOLUK Y. Preparation of powdered oil particles by spray drying of cellulose nanocrystals stabilized Pickering hempseed oil emulsions[J]. Colloids and Surfaces a -Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 598: 124823.

- [34] MAREFATI A, SJOO M, TIMGREN A, et al. Fabrication of encapsulated oil powders from starch granule stabilized W/O/W Pickering emulsions by freeze-drying [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 261-271.
- [35] ZHANG X Z, LI Y, LI J, et al. Edible oil powders based on spray-dried Pickering emulsion stabilized by soy protein/cellulose nanofibrils [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2022, 154: 112605.
- [36] CHASSAING B, KOREN O, GOODRICH J K, et al. Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome [J]. *Nature*, 2015, 519(7541): 92-96.
- [37] SHI A M, FENG X Y, WANG Q, et al. Pickering and high internal phase Pickering emulsions stabilized by protein-based particles: A review of synthesis, application and prospective [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106117.
- [38] AL-MAQTARI Q A, MOHAMMED J K, MAHDI A A, et al. Physicochemical properties, microstructure, and storage stability of *Pulicaria jaubertii* extract microencapsulated with different protein biopolymers and gum arabic as wall materials [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 187: 939-954.
- [39] NAYANA N, ABRAHAM L M, ISHWARYA S P, et al. Spray-dried microcapsules of red palm olein-flaxseed oil blend: Development, physicochemical characterization, and evaluation of its potential applications as a fat replacer and beta-carotene fortificant in cupcakes [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(9): e15663.
- [40] BAJAC J, NIKOLOVSKI B, LONCAREVIC I, et al. Microencapsulation of juniper berry essential oil (*Juniperus communis* L.) by spray drying: Microcapsule characterization and release kinetics of the oil [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107430.
- [41] CHEN K, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Microencapsulation of Sichuan pepper essential oil in soybean protein isolate-Sichuan pepper seed soluble dietary fiber complex coacervates [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107421.
- [42] FUCHS M, TURCHIULI C, BOHIN M, et al. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration [J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(1): 27-35.
- [43] CHEW S C, TAN C P, NYAM K L. Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using beta-cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 237: 78-85.
- [44] 黄雨洋, 齐宝坤, 赵城彬, 等. 微胶囊化核桃粉末油脂制备工艺及其氧化稳定性研究 [J]. *中国食品学报*, 2019, 19(2): 132-138.
- HUANG Y Y, QI B K, ZHAO C B, et al. Research on preparation technology of microencapsulated walnut powder oils and oxidative stability [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(2): 132-138.
- [45] 杨婷茹. 葡萄籽油生产工艺优化及其微胶囊化 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- YANG T R. Optimization of grape seed oil production process and its microencapsulation [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.
- [46] 唐冬, 宋其斌, 郭向阳, 等. 三种壁材组合方式茶籽油微胶囊产品的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 96-100.
- TANG D, SONG Q B, GUO X Y, et al. Three combinations of all materials for tea seed oil microcapsule products [J]. *Journal of the China Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 96-100.
- [47] 丁俭, 隋晓楠, 王婧, 等. 超声处理大豆分离蛋白与壳聚糖复合物对 O/W 型乳液稳定性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(13): 74-80.
- DING J, SUI X N, WANG J, et al. Effect of ultrasonic treatment on stability of oil-in-water (O/W) emulsion containing soybean protein isolate-chitosan complex [J]. *Food Science*, 2018, 39(13): 74-80.
- [48] WANG T, CHEN K R, ZHANG X Z, et al. Effect of ultrasound on the preparation of soy protein isolate-maltodextrin embedded hemp seed oil microcapsules and the establishment of oxidation kinetics models [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 77: 105700.
- [49] 王洪玲, 刘长霞, 郭晶兰, 等. 单凝聚法制备壳聚糖硬脂酸钠为壁材的鱼油微胶囊 [J]. *中国油脂*, 2021, 46(11): 26-30.
- WANG H L, LIU C X, GUO J L, et al. Preparation of fish oil microcapsules with chitosan sodium stearate as wall material by single coacervation method [J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(11): 26-30.
- [50] 梁井瑞, 杜健, 高秀华, 等. DHA 乳状液制备工艺

- 优化及氧化稳定性的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(7): 97-103.
- LIANG J R, DU J, GAO X H, et al. Optimization of preparation process and oxidation stability of DHA emulsion[J]. Journal of the China Cereals and Oils Association, 2020, 35(7): 97-103.
- [51] 周麟依, 任双鹤, 郭亚男, 等. 均质工艺对制备鱼油微胶囊结构和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 99-105.
- ZHOU L Y, REN S H, GUO Y N, et al. Effect of homogenization process on structure and physico-chemical properties of fish oil microcapsules[J]. Food Science, 2021, 42(5): 99-105.
- [52] NG S K, WONG P Y, TAN C P, et al. Influence of the inlet air temperature on the microencapsulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2013, 115(11): 1309-1318.
- [53] RIBEIRO E F, POLACHINI T C, ALVIM I D, et al. Microencapsulation of roasted coffee oil Pickering emulsions using spray- and freeze-drying: Physical, structural and *in vitro* bioaccessibility studies[J]. Int J Food Sci Tech, 2022, 57(1): 145-153.
- [54] ZHU Y C, PENG Y Y, WEN J Y, et al. A Comparison of microfluidic-jet spray drying, two-fluid nozzle spray drying, and freeze-drying for co-encapsulating beta-carotene, lutein, zeaxanthin, and fish oil[J]. Foods, 2021, 10(7): 1522.
- [55] ALVAREZ R, GIMENEZ B, MACKIE A, et al. Influence of the particle size of encapsulated chia oil on the oil release and bioaccessibility during *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Food & Function, 2022, 13(3): 1370-1379.
- [56] BINSI P K, NATASHA N, SARKAR P C, et al. Structural, functional and *in vitro* digestion characteristics of spray dried fish roe powder stabilised with gum arabic[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1698-708.
- [57] 马明月, 姜宏宇, 张华. 紫苏油微胶囊的性质与体外模拟消化研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 102-108.
- MA M Y, JIANG H Y, ZHANG H. The properties of perilla oil microcapsules and simulated digestion *in vitro*[J]. Journal of The Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 102-108.
- [58] 柳新荣, 王炜清, 刘元法, 等. 奶茶粉末油脂乳化液性能分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(3): 96-102.
- LIU X R, WANG W Q, LIU Y F, et al. Emulsion property analyses of powdered oils used in milk tea [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(3): 96-102.
- [59] LE PRIOL L, GMUR J, DAGMEY A, et al. Co-encapsulation of vegetable oils with phenolic antioxidants and evaluation of their oxidative stability under long-term storage conditions[J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 142: 111033.
- [60] MENG F B, LEI Y T, ZHANG Q, et al. Encapsulation of *Zanthoxylum bungeanum* essential oil to enhance flavor stability and inhibit lipid oxidation of Chinese-style sausage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4035-4045.
- [61] QIU L Q, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Microencapsulation of rose essential oil in mung bean protein isolate-apricot peel pectin complex coacervates and characterization of microcapsules [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107366.
- [62] TAVARES L, NORENA C P Z. Encapsulation of ginger essential oil using complex coacervation method: Coacervate formation, rheological property, and physicochemical characterization [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(8): 1405-1420.
- [63] BORDON M G, PAREDES A J, CAMACHO N M, et al. Formulation, spray-drying and physicochemical characterization of functional powders loaded with chia seed oil and prepared by complex coacervation [J]. Powder Technology, 2021, 391: 479-493.
- [64] MARTINS W D, DE ARAUJO J S F, FEITOSA B F, et al. Lemongrass (*Cymbopogon citratus* DC. Stapf) essential oil microparticles: Development, characterization, and antioxidant potential [J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129644.
- [65] PARK Y E, KIM J, KIM H W, et al. Rheological, textural, and functional characteristics of 3D-printed cheesecake containing guava leaf, green tea, and barley sprout powders[J]. Food Biosci, 2022, 47: 101634.
- [66] TENG X X, ZHANG M, BHANDRI B. 3D printing of cordyceps flower powder[J]. J Food Process Eng, 2019, 42(6): e13179.
- [67] KEAN S, TREVANICH S, JITTANIT W. Cinnamon essential oil microcapsules made using various meth-

- ods: Physical properties and antimicrobial ability[J]. T Asabe, 2022, 65(1): 169–178.
- [68] LI J H, SHEN Y M, ZHAI J L, et al. Enhancing the oxidative stability of algal oil powders stabilized by egg yolk granules/lecithin composites [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128782.
- [69] ERATTE D, DOWLING K, BARROW C J, et al. *In-vitro* digestion of probiotic bacteria and omega-3 oil co-microencapsulated in whey protein isolate-gum Arabic complex coacervates[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 129–136.
- [70] FARD S G, LOH S P, TURCHINI G M, et al. Microencapsulated tuna oil results in higher absorption of DHA in toddlers[J]. Nutrients, 2020, 12(1), 248.

The Composition and Preparation of Powder Oil and Its Application in Food

Wu Chao^{1,2}, Liu Zhe¹, Tian Yanjie^{1,3}, Zhi Lanyi¹, Liu Hongzhi¹, Shi Aimin^{1,2*}, Wang Qiang^{1,2}

(¹Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193

²College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei

³College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong)

Abstract Powder oil is a functional lipid food ingredient prepared by microcapsule technology, which can well protect core oil from the influence of the external environment. Compared with unembedded oil, it has the advantages of improving oxidation stability, extending shelf life, controlling release, and improving food quality. In this paper, the composition and preparation technology of powder oil, the influence on the physicochemical properties of microencapsulated powder oil and its application in food were systematically reviewed, and the review could provide the reference for the preparation of powder oil and its application in food industry.

Keywords powder oil; preparation process; stability; application characteristics; Pickering emulsion