

高内相乳液的制备及在食品中的应用

卫 姣, 陈雨露, 高彦祥, 毛立科, 袁 芳*
(中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083)

摘要 高内相乳液为分散相体积分数在 74.05% 以上的乳液, 在食品、化妆品、制药、材料和石油工业上被广泛应用。近年来, 以生物大分子和固体颗粒代替小分子表面活性剂来稳定高内相乳液的方法引起研究人员的注意。其中, 探索生物来源的固体颗粒是该领域的研究热点之一。此外, 高内相乳液作为功能因子的传递体系表现出独特的优势, 可有效提高功能因子的稳定性和生物利用度。本文在以往研究的基础上, 综述稳定高内相乳液的乳化剂种类, 制备方法及在食品领域的应用情况, 并展望其发展前景。

关键词 高内相乳液; 皮克林乳液; 生物来源固体颗粒; 制备; 食品应用

文章编号 1009-7848(2022)04-0418-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.041

乳状液(Emulsion), 简称乳液, 是由两种液相组成的热力学不稳定体系, 其中被分散的相称为分散相(Dispersed phase), 分散其它相的物质的相称为连续相(Continuous phase)^[1]。通常为了稳定乳液需加入第 3 种组分——乳化剂, 其可降低混合体系中各组分的界面张力, 从而阻碍分散相的聚集, 获得更加稳定的乳液^[2]。乳液通常分为水包油(O/W)、油包水(W/O)及多重乳液等类型, 在食品、化妆品、工业和医药等领域应用广泛。特别是在食品领域中, 一些由两种不互溶的液相或假液相组成的食品, 均可看作是乳化体系, 如牛奶、乳饮料、沙拉酱、蛋黄酱、冰淇淋和巧克力等可看作 O/W 乳状液^[3]; 黄油、人造黄油和奶油等可看作 W/O 乳状液。

高内相乳液(High internal phase emulsions, HIPEs)又称作超浓乳液, 是指分散相体积分数在 74.05% 以上的乳液^[4]。这一概念由 Lissant 于 20 世纪 60 年代提出。高内相乳液和普通乳液一样, 主要包括水包油(O/W)^[5]、油包水(W/O)^[6]和超临界 CO₂(C/W)^[7]3 种类型。如图 1 所示, 一般乳液的分散相体积分数为 30%~50%, 以互不相连的球形液滴分散在连续相中; 当分散相的体积分数达到

74.05% 的临界密度时, 分散相液滴将紧密堆积成相互连接的球形; 进一步增大分散相体积分数, 分散相液滴将相互挤压、变形成为多边形, 此时的乳液即 HIPEs^[8]。近年来 HIPEs 成为食品、化妆品、组织工程、制药和石油工业领域的研究热点^[9-14]。

当使用小分子表面活性剂作为乳化剂稳定 HIPEs 时, 由于小分子表面活性剂本身的动力学不稳定性, 导致其在油-水界面黏附作用弱, 容易流失, 因此一般需要大量的乳化剂来稳定 HIPEs^[15]。此外, 小分子表面活性剂的潜在毒性和生物相容性等问题也不容忽视。近年来小分子表面活性剂逐渐由双亲性生物大分子和有机或无机固体颗粒所取代^[16]。由固体颗粒稳定的乳液称之为皮克林(Pickering)乳液, 由 Ramsden^[17]于 1903 年首次提出, 随后由 Pickering^[18]首次公开描述这一现象。与传统的小分子表面活性剂稳定的 HIPEs 相比, Pickering 乳液具有以下优点: 1) 颗粒不可逆地吸附在油-水界面上或在油-水界面上自组装, 形成阻碍液滴合并、奥斯瓦尔德熟化和结霜的刚性层^[19-20]; 2) Pickering 乳液非常稳定, 保质期稳定在几个月到几年之间^[21-23]; 3) 与表面活性剂相比, 胶体颗粒对人体的毒性要小得多, 且更环保^[24-25]。基于上述研究背景, 本文综述稳定高内相乳液的乳化剂种类, 尤其是稳定食品级 HIPEs 的颗粒种类(多糖、蛋白和多糖-蛋白)及其研究现状, 简述高内相乳液的制备方法及其在食品领域的应用和前景。

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: “十三五”国家重点研发计划专项
(2016YFD0400804)

作者简介: 卫姣(1997—), 女, 硕士生

通信作者: 袁芳 E-mail: yuanfang0220@163.com

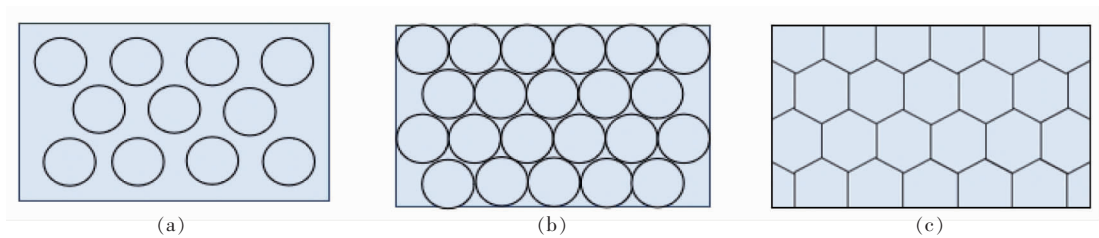


图 1 (a) 分散相体积分数 $\varphi = 30\% \sim 50\%$; (b) 分散相体积分数 $\varphi = 74.05\%$; (c) 分散相体积分数 $\varphi \geq 74.05\%$ ^[8]

Fig.1 (a) volume fraction of dispersed phase $\varphi = 30\% \sim 50\%$; (b) volume fraction of dispersed phase $\varphi = 74.05\%$; (c) volume fraction of dispersed phase $\varphi \geq 74.05\%$ ^[8]

1 表面活性剂稳定的高内相乳液

1.1 小分子表面活性剂

传统上 HIPEs 由小分子的表面活性剂所稳定,主要有十二烷基硫酸钠(Sodium dodecyl sulfate, SDS)、司盘 80(Span 80)、十六烷基三甲基溴化铵 (Hexadecyl trimethyl ammonium bromide, CTAB)等^[15]。由于小分子表面活性剂本身的动力学不稳定性,一般需要较高浓度(20%左右)的表面活性剂用于稳定 HIPEs。过量的非食品级乳化剂的使用会对人体健康造成危害,在后续使用中必须除去,以免影响之后乳液的应用。因此,小分子表面活性剂逐渐被生物大分子和固体颗粒所取代。

1.2 生物大分子

利用蛋白质的双亲性、多糖的增稠性可稳定

HIPEs。蛋白质的分子结构两端有亲水和疏水基团,分散在乳液的油水界面起乳化剂的作用。常用作乳化剂的蛋白为植物蛋白,与动物蛋白相比,植物蛋白更健康、更环保,并且具有多种生理保健功能,如降低胆固醇、抗氧化和降血压等^[26]。一些具有双亲性的多糖或多糖进行改性之后也可作为乳化剂或增稠剂,降低油水表面张力或提高水相的黏度,从而提高乳液的稳定性。在最近一项研究中,以豌豆蛋白为乳化剂,8 种多糖为稳定剂,葵花籽油为油相制备 O/W HIPEs($\varphi=80\%$),研究了植物蛋白和不同多糖在稳定乳液中的协同作用,通过分析贮藏稳定性、流变和粒径等性质,得出由豌豆蛋白和卡拉胶、黄原胶、塔拉胶稳定的 HIPEs 最为稳定,并且在食品配方中有作为脂肪替代物的应用前景^[5]。

表 1 由生物大分子稳定的 HIPEs
Table 1 HIPEs stabilized by biomolecules

乳液类型	乳液组成	内相体积分数	结论	参考文献
W/O	油相:葵花籽油、聚甘油蓖麻醇酯:卵磷脂	0.75	当卵磷脂:聚甘油蓖麻醇酯的质量比为 0.5:1.5 和 1.0:1.0 时,由于增强了黏弹性界面层,动力稳定性更好	[6]
	水相:去离子水			
	油相:菜籽油、蜂蜡、单甘酯	0.8	该体系可输送疏水性和亲水性两种物质: β -胡萝卜素	[27]
	水相:卡拉胶		和花青素	
O/W	油相:葵花籽油	0.8	由豌豆蛋白和卡拉胶、黄原胶、塔拉胶所稳定的 HIPEs	[5]
	水相:豌豆蛋白、8 种多糖		可作为脂肪替代物	
	油相:山茶油	0.75	增加 WPI 的浓度和添加葡萄糖内酯可明显改善	[28]
	水相:乳清分离蛋白、葡萄糖内酯		HIPEs 的稳定性、黏度、持水性等,包埋 β -胡萝卜素,可提高其化学稳定性和生物利用度	
	油相:中链甘油三酸酯(含多甲氧基黄酮)	0.82	与中链甘油三酸酯中的含多甲氧基黄酮相比,HIPEs	[29]
	水相:乳清分离蛋白和低甲氧基果胶		中橘皮素和蜜桔黄素生物利用率提高了 5 倍和 2 倍。	
	油相:十二烷	0.8	高分子量的壳聚糖更利于形成稳定的 HIPEs;当京尼	[30]
	水相:京尼平交联壳聚糖		平交联壳聚糖质量分数为 0.1%时,可以负载 2%的 β -胡萝卜素	

2 固体颗粒稳定的高内相乳液

固体颗粒的种类主要可分为无机颗粒和有机颗粒^[31]。无机颗粒中主要包括改性二氧化硅^[32-34]、羟基磷灰石^[35]、二氧化钛颗粒^[36]、石墨烯^[37]和氧化锌^[38]等。虽然由无机颗粒稳定的 Pickering HIPEs 的稳定性得到改善,但是生物相容性较差,限制了其在生物医药、食品等领域的应用。生物来源的固体颗粒具有环境友好、可再生、可生物降解等优

点,固体颗粒性质的研究及新型固体颗粒的研发是目前的研究热点。生物来源的固体颗粒主要分为:1)多糖颗粒:纤维素纳米晶^[39-40]、淀粉^[41-42]、壳聚糖^[30]等;2)蛋白质颗粒:乳清蛋白^[43]、醇溶蛋白^[44-47]、大豆蛋白^[48-50]、小麦面筋蛋白^[51]、牛血清白蛋白^[52-53]、玉米肽^[54]、卵转铁蛋白^[55-56]等;3)多糖-蛋白质复合颗粒^[57-59]。

表 2 由颗粒稳定的 Pickering HIPEs
Table 2 Pickering HIPEs stabilized by granules

颗粒类型	颗粒组成	油相体积分数	结论	参考文献
多糖	纤维素纳米晶	大豆油(0.8)	显著提高了乳液的表面疏水活性,在颗粒质量分数为 0.1%,可制备稳定的 Pickering HIPEs	[40]
	淀粉纳米晶	大豆油(0.85)	相对于天然玉米淀粉,淀粉纳米晶具有更高的结晶度和疏水性,增加颗粒浓度有利于形成稳定的、呈凝胶状的 HIPEs	[41]
	柑橘纳米纤维-单宁酸	鳄梨油(0.75)	颗粒在油水界面形成致密的网络结构,使其稳定的 Pickering HIPEs 具有良好的物理和氧化稳定性	[60]
蛋白	小麦醇溶蛋白	玉米油(0.8)	小麦醇溶蛋白颗粒质量浓度为 20 g/L 时可以制备得到稳定的 Pickering HIPEs,放置 2 个月后,无破乳现象	[45]
	大豆分离蛋白	大豆油(0.8)	稳定油相体积分数为 80% 的 HIPEs 所需颗粒质量分数最低为 0.6%。随着颗粒浓度的增大,油滴粒径逐渐减小且呈均匀分布,黏弹性能逐渐增大。	[48]
	小麦面筋蛋白	葵花籽油(0.75)	当小麦面筋蛋白的颗粒质量分数为 1.0% 时,HIPEs 具有良好的热稳定性、流变性,可作为蛋黄酱替代品	[51]
复合颗粒	牛血清白蛋白-纤维素纳米晶	大豆油(0.8)	制得了抗聚结效果较好、非常稳定的凝胶状 Pickering HIPEs, HIPEs 的刚度和微观结构可通过蛋白和多糖浓度调节	[53]
	酪蛋白磷酸肽-壳聚糖	亚麻籽油(0.8)	复合颗粒在油水界面形成了界面层,抑制了亚麻籽油的氧化,赋予乳液黏弹性和理想的触变性,提高了 HIPEs 的稳定性	[57]
	麦醇溶蛋白-阿拉伯胶	玉米油(0.85)	复合颗粒稳定的 HIPEs 拥有更高的表观黏度和储能模量,且对于 pH 值、温度和离子强度的变化相对稳定	[61]

2.1 多糖颗粒

大多数多糖为亲水性生物大分子,通常情况下需要对其进行疏水修饰才能应用于稳定 Pickering HIPEs。Yang 等^[41]使用硫酸水解天然糯玉米淀粉制备淀粉纳米晶作为 O/W HIPEs 的有效稳定剂,在颗粒质量分数为 1.0%,内相体积分数为 75%~85% 时,可形成稳定性较好、硬度良好的 HIPEs,颗粒浓度与凝胶状乳液的硬度成正比。此外,Capron 等^[39]也成功地在 50 mmol/L NaCl 中制

备了仅由纤维素纳米晶稳定的 HIPEs。除了淀粉和纤维素纳米晶外,壳聚糖也可作为固体颗粒稳定 HIPEs,使用京尼平交联壳聚糖微凝胶稳定 HIPEs,当壳聚糖的分子质量为 50,100,150 ku 时,壳聚糖与京尼平的所有质量比都能用于形成稳定的 HIPEs^[30]。

2.2 蛋白质颗粒

大多数蛋白都为颗粒状,具有高营养价值,且基本为双亲性生物大分子,具有良好的乳化性能,

可以吸附在油水界面,在生产稳定的、可生物降解的食品级 Pickering HIPEs 具有双重优势。其中,球状蛋白质是水包油乳液良好的乳化剂和稳定剂,当它吸附在油水界面时,趋于发生结构展开和重排,形成了黏弹性界面膜^[26]。在最近一项研究中,以 β -伴大豆球蛋白颗粒作为乳化剂制备了以十二烷为油相的 O/W HIPEs($\varphi=80\%$),如图 2 所示,通常以三聚体形式存在的 β -伴大豆球蛋白可作为 HIPEs 稳定剂,其原因是 β -伴大豆球蛋白在油水界面发生亚基解离,再进行有序堆积形成稳定的 Pickering HIPEs,使得制备的 HIPEs 为凝胶网络状,且在加热或延长储存时间长达 60 d 后都非常稳定^[49]。

2.3 复合颗粒

与单独使用多糖和蛋白质相比,多糖和蛋白质复合颗粒同时具有多糖和蛋白质的优点,如良好的乳化特性和较强的空间稳定性。对于多糖颗粒,与蛋白质的络合可以增强液滴堆积效应和界面桥联影响,大大提高其乳化性能^[52]。另一方面,对于使用单一蛋白质颗粒稳定的 HIPEs,与多糖(如果胶)的络合也可以改进乳化性能和界面稳定性^[62]。以牛血清白蛋白和海藻糖复合稳定 HIPEs,在海藻糖存在下,牛血清白蛋白的界面稳定性得到显著改善,促进了桥联液滴的形成,当海藻糖质量分数为 40%时,在蛋白核心周围形成了核-壳纳米结构,极大地促进了界面的稳定性^[52]。单一的玉米醇溶蛋白颗粒由于疏水性太强不能有效附着在油水表面,通过添加多糖可改善其乳化性能。吴滋灵^[58]通过简单的反溶剂方法制备了玉米醇溶蛋白和果胶的复合颗粒,并制备了油相高达 80%的 HIPEs,该 HIPEs 能够稳定 4 个月以上,能够耐受较大离心力而不破乳,具有较强的凝胶网络结构。

除了多糖与蛋白的复合颗粒外,溶菌酶也可提高由蛋白质稳定 HIPEs 的稳定性,Wei 等^[55]制备由卵转铁蛋白和溶菌酶形成的复合颗粒稳定 HIPEs,当 pH 值为 9.3 时,卵转铁蛋白/溶菌酶比例为 8:1 的卵转铁蛋白-溶菌酶颗粒满足 Pickering 稳定剂的基本要求,可稳定油相体积分数为 75%的 HIPEs。

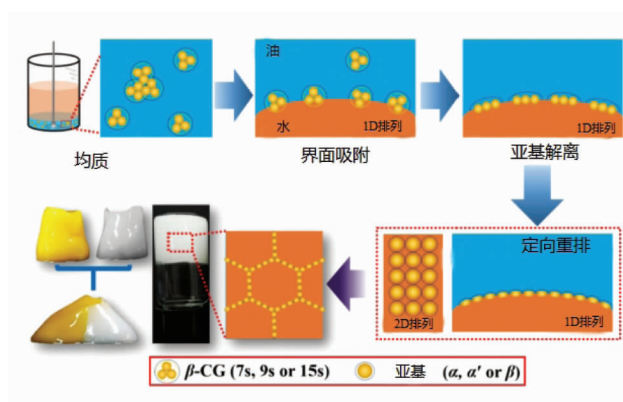


图 2 β -伴大豆球蛋白稳定 Pickering HIPEs 的机理^[49]

Fig.2 Mechanism of Pickering HIPEs stabilization with soy globulin^[49]

3 高内相乳液的制备方法

高内相乳液的制备方法主要包括一步乳化法、两步乳化法和浓缩法,其中一步乳化法制备 HIPEs 操作简便,简单易行,为最常用的制备方法^[63]。

3.1 一步乳化法

一步乳化法制备 HIPEs 包括高速剪切均质、超声处理及手摇/涡旋等,其中高速剪切均质为最常用的制备方法^[63]。将分散相一次性加入到连续相中,使用高速剪切机对混合物进行剪切均质,通过控制剪切速率和剪切时间制备得到稳定的 HIPEs。Yang 等^[41]将淀粉纳米晶的水悬浮液和大豆油混合后,在 13 500 r/min 转速下剪切 120 s,制备得到均匀的凝胶状 O/W HIPEs。对于内相体积分数较高的 HIPEs,在剪切过程中将分散相逐渐加入连续相中更易制备得到 HIPEs,不易发生相转。在最近一项研究中,在 14 000 r/min 的转速下,使用蠕动泵将水相以 2.5 mL/min 的流速滴加到油相中,在水相完全并入乳液后,在 11 000 r/min 下剪切 4 min,可制备得到均匀的内相体积分数为 75%的 W/O HIPEs^[6]。在使用高速剪切机均质的过程中,剪切速率和剪切时间会通过影响乳液粒径的大小、分散性和界面吸附性来影响乳液的流变学行为和稳定性。Tripathi 等^[64]探究了剪切时间对 HIPEs 流变学行为和稳定性的影响,试验证明,剪切速率的提高和剪切时间的延长会减小液滴粒

径,增加液滴的分散性,从而增加乳液的储能模量和黏度等流变行为,影响乳液的稳定性。

3.2 两步乳化法

两步乳化法是先以高能量输入的方式(微射流、高压均质、超声等)制备内相体积分数较低的初始乳液,再以低能量输入的方式(高速剪切)在初始乳液中增加分散相的体积分数剪切制备得到 HIPEs。在最近一项研究中,陈业宝^[65]对比了一步乳化法和两步乳化法对 HIPEs 流变及稳定性的影响,结果表明两步乳化法明显增强了 HIPEs 的凝胶网络结构,并且微射流的高能量输入影响了蛋白的疏水性,使得更多的蛋白吸附在油水界面,从而影响了 HIPEs 的冻融稳定性。此外,两步乳化法也显著提高了 HIPEs 的储藏稳定性和热稳定性,微观结构表明初始乳液中形成的大量微乳滴可以吸附在大乳滴界面上,增加蛋白的界面吸附,在一定程度上可以起到 Pickering 颗粒的作用,对乳液的稳定性起到了协同作用^[66]。然而当初始乳液的粒径小到一定程度时,对于同体积的初始乳液,微乳滴的数量会剧增,从而超过 HIPEs 桥联絮凝的颗粒浓度阈值,使其转变成流动性更强的空缺絮凝状态,弹性和稳定性反而会下降。

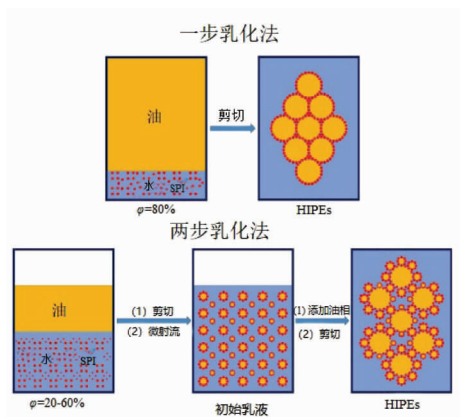


图3 采用一步乳化法和两步乳化法制备 HIPEs 的机理图^[65]

Fig.3 The mechanism diagram of HIPEs prepared by one-step and two-step emulsification^[65]

3.3 浓缩法

浓缩法制备 HIPEs 是先通过高速剪切、高压均质等方式制备出内相分数较低的初始乳液,后将初始乳液经过高速离心、真空蒸发等方式除去

多余的外相来制备 HIPEs,计算确定最终的内相体积分数。Matos 等^[67]采用膜乳化法制备了 O/W 初始稀乳液($\varphi=16\%$),后将初始乳液采用真空蒸发法除去水分,制备得到稳定的 O/W HIPEs ($\varphi=75\%$)。Zou 等^[49]先使用高速剪切机在 20 000 r/min 的转速均质 2 min 制备 O/W 初始乳液($\varphi=50\%$),后将初始乳液在 2 000~7 000 $\times g$ 下高速离心 10 min,除去多余水相,增加油相的体积分数,收集制备得到 O/W HIPEs,使用二乙醚将 O/W HIPEs 的油水相分离,计算得到油相的体积分数($\varphi=72\%\sim 87\%$)。浓缩法相对于一步乳化法操作复杂,油水相体积分数不易确定,目前应用较少。

4 高内相乳液在食品领域中的应用

近年来,对于分散相体积分数大于 74% 的 HIPEs,其高负载能力和特殊的流变学行为在食品及生命科学领域备受关注^[68]。此前,以 HIPEs 为模板,通过不同的路线合成多孔材料已得到较大的发展,HIPEs 聚合得到的多孔材料称为 PolyHIPEs^[69],可通过改变 HIPEs 中表面活性的种类、浓度或两相组成及比例控制 PolyHIPEs 的结构和物理性质,使其具有高孔隙率、极低泡沫密度、高比表面积等独特性能,PolyHIPEs 已在气体吸附^[70-71]、分离^[72]、组织工程^[73]、传感^[74]、储能^[75]和催化剂载体^[76]等领域应用广泛。近年来,使用淀粉、蛋白质、纤维素等生物来源的、生物相容性高、环境友好、无毒的天然高分子物质稳定 HIPEs 成为研究热点,食品级 HIPEs 作为活性物质的传递体系或作为脂肪替代物都具有巨大的潜力。与其它乳液体系相比,O/W HIPEs 的含水量较低,因此具有较长的保质期^[77]。

4.1 递送功能成分

HIPEs 在食品中的一个广泛应用是包埋和传递功能性成分,如 β -胡萝卜素、酚类物质及益生菌等。一些生物活性物质由于其水溶性和稳定性差等原因导致其生物利用度低,HIPEs 的封装可以有效解决上述问题。此外,由于 HIPEs 内相体积较高,可提高活性物质的负载量,同时具有更好的贮藏稳定性和保质期。

4.1.1 类胡萝卜素 β -胡萝卜素是一种脂溶性物质,具有抗氧化、抗癌等生理作用。然而天然类胡

萝卜素的水溶性较低,不饱和共轭双键的存在,使其遇光、热、氧气易发生氧化分解,使得天然类胡萝卜素的生物利用度较低,最终限制了其在食品领域的应用。已有研究证实,使用脂质体、环糊精、微胶囊等食品传递体系封装 β -胡萝卜素可以有效解决上述难题^[78]。

Li 等^[30]用京尼平交联壳聚糖微凝胶稳定的 HIPEs 显著提高了 β -胡萝卜素的载量,仅用 0.1 wt% 微凝胶乳化剂的载量可达 2wt%。在乳化剂用量远小于常规用量(约 10wt%)的情况下, β -胡萝卜素在乳状液体系中的负载量比文献报道的提高了 10 倍以上,同时包埋之后的 β -胡萝卜素对紫外光照射、热处理、铁离子和过氧化氢的稳定性也有显著提高。此外,通过构建体外消化模型可模拟在体内的生物利用率,最近一项研究采用预热的乳清分离蛋白和葡萄糖内酯稳定 O/W HIPEs 以期提高 β -胡萝卜素的稳定性和生物利用率,在添加葡萄糖内酯之后, β -胡萝卜素保留率和生物利用率得到显著提高(88.34%±0.77%)。同时,HIPEs 的凝胶网络结构也延缓了 β -胡萝卜素在胃肠道中的降解^[28]。

4.1.2 酚类物质 酚类物质广泛存在于水果、蔬菜及谷物中,具有降低冠心病和其它慢性疾病的作用,而酚类物质较低的水溶性,在肠胃道环境中的不稳定性,及其被动扩散进入细胞的方式,降低了其在人体中的生物利用度。有研究学者使用卵转铁蛋白和溶菌酶复合颗粒稳定的 O/W HIPEs ($\varphi=75\%$) 可作为姜黄素的有效载体,与中链甘油三酸酯中的脂解程度(32.1%)相比,O/W HIPEs 中姜黄素的脂解程度(71.5%)提高了 39.4%,其生物利用度也从 16.1%提高到 38.3%,表明该 HIPEs 可作为姜黄素的有效载体^[55]。此外,在壳聚糖-酪蛋白磷酸肽纳米颗粒稳定 O/W HIPEs 中,姜黄素的生物利用度也提高到 40.91%^[57]。

Wei 等^[56]通过京尼平交联卵转铁蛋白颗粒制备的 Pickering HIPEs 对橙皮苷进行包埋,与菜籽油中橙皮苷的生物利用度(54.5%)相比,京尼平交联卵转铁蛋白颗粒的生物利用度(61.9%)提高了 13.6%,显著改善了脂解程度和生物利用度。HIPEs 也被证明适合作为黄酮类化合物的传递体系,通过制备乳清分离蛋白-低甲氧基果胶复合物稳定

的 HIPEs 用于包埋黄酮类化合物,与 MCT 油相比较,橘皮素和蜜桔黄素的生物利用度分别增加了 5 倍和 2 倍^[29]。

4.1.3 益生菌 益生菌因其对宿主肠道菌群有积极的生理作用而在功能食品中受到广泛的欢迎,由于其活性较低,使其应用受到限制,通过对益生菌进行包埋是一种理想的解决办法。有研究表明,将鼠李糖乳杆菌包埋到油包水的凝胶乳液中,此时益生菌的活力大于 77%,在未添加凝胶剂的油包水乳液中,益生菌的活力下降到 66%,油包水体系能有效地保护益生菌免受口服和胃环境的侵害,并能安全地将益生菌输送到小肠,该研究说明使用油包水凝胶乳液可以提高益生菌的活力,为 HIPEs 作为益生菌的传递体系奠定基础^[79]。Su 等^[80]使用微凝胶稳定的 HIPEs 包埋植物乳杆菌可以成功地提高巴氏杀菌后细胞存活率。通过 HIPEs 包埋益生菌,可以显著提高益生菌的活性,而目前关于此方面的研究较少,通过 HIPEs 对益生菌进行包埋以提高其活性的研究还需要进一步探索。

4.2 脂肪替代品

高内相乳液是一种半固体的材料,可以用来仿制饱和脂肪酸的质构特性,用于制备低脂食品。生活中常见的蛋黄酱是以植物油作为油相,蛋黄、食醋以及一些调料作为水相制备而成,可看作一种典型的 O/W HIPEs。在蛋黄酱成分中,蛋黄对乳液的稳定性和感官特性起着至关重要的作用^[81],然而蛋黄中高水平的胆固醇和饱和脂肪会增加肥胖的风险,且不适合一些患有高胆固醇血症的人群食用。此外,动物蛋白的供应难以跟上不断增长的世界人口,集约化畜牧业又会破坏生态环境,使用植物蛋白代替饮食中的动物蛋白可以应对上述问题并促进食品的可持续发展^[82]。

在最近一项研究中,以小麦面筋蛋白为原料制备了稳定的 O/W HIPEs($\varphi=75\%$),与蛋基蛋黄酱相比,HIPEs 表现出与其非常相似的液滴尺寸分布、流变行为、近乎完美的触变恢复率和摩擦学性能,表明 HIPEs 和蛋黄酱具有相似的感官特性和质地,如奶油味、平滑度和黏稠度,HIPEs 的热稳定性也远优于蛋黄酱^[51]。此外,HIPEs 代替蛋黄酱也改善了蛋黄酱较差的冻融稳定性,使用大豆分离蛋白热聚集颗粒稳定 O/W HIPEs,当其

100%替代湿蛋黄液时,可制备得到冻融稳定性良好的类蛋黄酱,将其与市售的蛋黄酱相比,在冻融稳定性较好的情况下又降低了胆固醇的含量(图4)^[63]。除了使用植物蛋白稳定的 HIPEs 外,在植物蛋白中加入膳食纤维也可作为蛋黄酱的替代品,

以柑橘纤维和玉米肽为基础制备的 HIPEs ($\varphi=75\%$)作为蛋黄酱的替代品,不仅提高了乳制品中膳食纤维的含量,又表现出超低摩擦特性,与以鸡蛋为基础的蛋黄酱相比,可以提供更多的奶油味和平滑度^[54]。

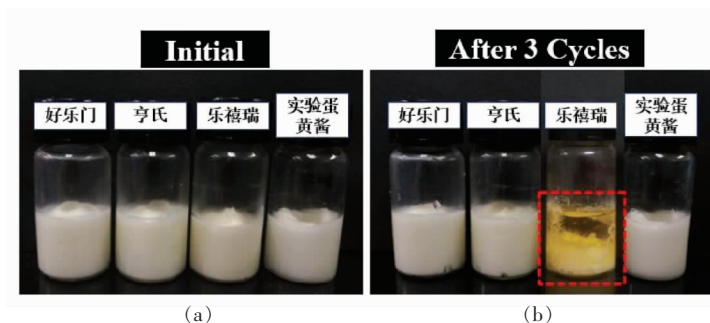


图4 商业蛋黄酱与实验蛋黄酱经过3次冻融循环后的外观^[54]

Fig.4 Appearance of commercial and lab mayonnaise initial and after three freeze-thaw cycles^[54]

除了作为蛋黄酱的替代品外,HIPEs 还可作为部分氢化植物油 (Partially hydrogenated oils, PHOs)的替代品。加工食品中的反式脂肪酸大多来源于 PHOs,人造反式脂肪酸的主要来源为人造黄油、起酥油、烘焙食品和油炸快餐等^[83]。美国食品药品监督管理局于2018年禁止在食品生产中使用 PHOs,因此,寻求零反式脂肪酸的 PHOs 替代品已经成为现代食品产业亟待解决的问题。具有绿色标签的 HIPEs 与人造黄油相似,可作为人造黄油(含 PHOs)的替代品。使用醇溶蛋白/壳聚糖复合颗粒作为乳化剂的 HIPEs,形成的3D网络结构使 HIPEs 具有独立的黏弹性,开辟了液态油转化为零反式脂肪酸的黏弹性软固体的路径,可作为 PHOs 的潜在替代品^[84]。今后对于 HIPEs 在真实食品中的性能及其取代 PHOs 的感官特性也需要进一步研究。

5 结语与展望

高内相乳液由于其高负载能力和特殊的流变学行为在材料、食品、化工、生命科学和石油工业等领域应用广阔。近年来,由生物来源的大分子物质或固体颗粒稳定的 HIPEs 在食品领域取得了较大的发展,使用多糖和蛋白稳定的 O/W HIPEs 内

相体积分数可达到85%以上,并且具有较好的物理和储存稳定性,作为传递体系负载脂溶性活性物质(β -胡萝卜素、酚类物质),可以显著提高脂溶性活性物质的稳定性和生物利用度。然而,利用生物来源的大分子或固体颗粒制备 W/O HIPEs 还处于起步阶段,由于水相和油相的黏度较低且乳化剂有限,W/O HIPEs 内水相体积分数较低,容易发生相反转,稳定性较差等问题有待解决。

因此,今后关于高内相乳液的研究可侧重以下方面:1)可通过在油水两相中添加结构剂形成凝胶,提高两相黏度,以期提高 W/O HIPEs 乳液的稳定性,或对固体颗粒进行加热、物理或化学改性,改变固体颗粒的湿润性,探索更多、更适合稳定 W/O HIPEs 的固体颗粒;2)深入探索 HIPEs 稳定性的影响因素,改善由于内相体积的增加引起的相反转现象;3)HIPEs 作为功能因子的传递体系,提高功能因子的包埋率、稳定性和生物利用度也具有一定的挑战性,此外可建立全方位的体外消化模型、细胞模型,来检测不同功能因子的生物利用度;4)将 HIPEs 作为脂肪替代品或取代 PHOs 的稳定性、流变、感官特性和风味也有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] HOFFMANN H, REGER M. Emulsions with unique properties from proteins as emulsifiers[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 205: 94–104.
- [2] ZEEB B, HERZ E, MCCLEMENTS D J, et al. Impact of alcohols on the formation and stability of protein-stabilized nanoemulsions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 433: 196–203.
- [3] CALDERO G, LLINAS M, JOSE GARCIA-CELMA M, et al. Studies on controlled release of hydrophilic drugs from W/O high internal phase ratio emulsions [J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2010, 99(2): 701–711.
- [4] PARK C I, CHO W G, LEE S J. Emulsion stability of cosmetic creams based on water-in-oil high internal phase emulsions[J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2003, 15(3): 125–130.
- [5] VELEZ-ERAZO E M, BOSQUI K, RABELO R S, et al. High internal phase emulsions (HIPE) using pea protein and different polysaccharides as stabilizers[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105775.
- [6] OKURO P K, GOMES A, COSTA A L R, et al. Formation and stability of W/O-high internal phase emulsions (HIPEs) and derived O/W emulsions stabilized by PGPR and lecithin[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 252–262.
- [7] GAO H, HU G, LIU K. High internal phase Pickering emulsions stabilized with graphene oxide in supercritical CO₂ system[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2020, 155: 104654.
- [8] WIJAYA W, VAN DER MEEREN P, DEWETTINCK K, et al. High internal phase emulsion (HIPE)-templated biopolymeric oleofilms containing an ultra-high concentration of edible liquid oil[J]. *Food and Function*, 2018, 9(4): 1993–1997.
- [9] WU Y, ZHANG T, XU Z, et al. High internal phase emulsion (HIPE) xerogels for enhanced oil spill recovery[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(5): 1906–1909.
- [10] BUSBY W, CAMERON N R, JAHODA A B C. Tissue engineering matrixes by emulsion templating [J]. *Polymer International*, 2002, 51(10): 871–881.
- [11] TAN H, SUN G, LIN W, et al. gelatin particle-stabilized high internal phase emulsions as nutraceutical containers[J]. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 2014, 6(16): 13977–13984.
- [12] ARIYAPRAKAI S, TANANUWONG K. Freeze-thaw stability of edible oil-in-water emulsions stabilized by sucrose esters and Tweens[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 152: 57–64.
- [13] CALDERO G, PATTI A, LLINAS M, et al. Diffusion in highly concentrated emulsions [J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2012, 17(5): 255–260.
- [14] LISSANT K J, PEACE B W, WU S H, et al. structure of high internal phase ratio emulsions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1974, 47(2): 416–423.
- [15] 冯雪艳, 马贵平, 姚立. 表面活性剂稳定的高内相乳液的研究进展[J]. *化学通报*, 2016, 79(10): 891–896.
- FENG X Y, MA G P, YAO L. Progress of high internal phase emulsion stabilized by surfactant [J]. *Hua Xue Tong Bao*, 2016, 79(10): 891–896.
- [16] TAVERNIER I, WIJAYA W, VAN DER MEEREN P, et al. Food-grade particles for emulsion stabilization [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2016, 50: 159–174.
- [17] RAMSDEN W. Separation of solids in the surface-layers of solutions and ‘Suspensions’ (Observations on surface-membranes, bubbles, emulsions, and mechanical coagulation). Preliminary Account [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1903, 72(479): 156–164.
- [18] PICKERING S U. Emulsions [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1907, 91: 2001–2021.
- [19] AVEYARD R, BINKS B P, CLINT J H. Emulsions stabilised solely by colloidal particles[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, 100(1): 503–546.
- [20] BINKS B P. Particles as surfactants-similarities and differences[J]. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2002, 7(1/2): 21–41.
- [21] BERTON-CARABIN C C, SCHROEN K. Pickering emulsions for food applications: Background, trends, and challenges[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015, 6: 263–297.
- [22] CALABRESE V, COURTENAY J C, EDLER K J, et al. Pickering emulsions stabilized by naturally derived or biodegradable particles[J]. *Current Opinion*

- in Green and Sustainable Chemistry, 2018, 12: 83–90.
- [23] HU Z, BALLINGER S, PELTON R, et al. Surfactant-enhanced cellulose nanocrystal Pickering emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 439: 139–148.
- [24] 孙翠霞, 刘夫国, 杨伟, 等. 生物来源的固体颗粒制备 Pickering 乳液的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(15): 370–375, 381.
- SUN C X, LIU G F, YANG W, et al. Research progress in Pickering emulsions stabilized with biomass – based solid nanoparticles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(15): 370–375, 381.
- [25] ZHOU F Z, YU X H, ZENG T, et al. Fabrication and characterization of novel water-insoluble protein porous materials derived from Pickering high internal-phase emulsions stabilized by gliadin-chitosan-complex particles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(12): 3423–3431.
- [26] HUANG X N, ZHU J J, XI Y K, et al. Protein-Based Pickering high internal phase emulsions as nutraceutical vehicles of and the template for advanced materials: A perspective paper[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(35): 9719–9726.
- [27] LEE M C, TAN C, RAVANFAR R, et al. Ultra-stable water-in-oil high internal phase emulsions featuring interfacial and biphasic network stabilization [J]. Acs Applied Materials and Interfaces, 2019, 11(29): 26433–26441.
- [28] LIU W, GAO H, MCCLEMENTS D J, et al. Stability, rheology, and beta-carotene bioaccessibility of high internal phase emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 210–217.
- [29] WIJAYA W, ZHENG H, ZHENG T, et al. Improved bioaccessibility of polymethoxyflavones loaded into high internal phase emulsions stabilized by biopolymeric complexes: A dynamic digestion study via TNO's gastrointestinal model[J]. Current Research in Food Science, 2020, 2: 11–19.
- [30] LI W, NIAN Y, HUANG Y, et al. High loading contents, distribution and stability of beta-carotene encapsulated in high internal phase emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 300–309.
- [31] 易成林, 杨逸群, 江金强, 等. 颗粒乳化剂的研究及应用[J]. 化学进展, 2011, 23(1): 65–79.
- YI C L, YANG Y Q, JIANG J Q, et al. Research and application of particle emulsifiers[J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(1): 65–79.
- [32] DESTREBATS M, FAURE B, BIROT M, et al. Tailored silica macrocellular foams: Combining limited coalescence-based Pickering emulsion and sol-gel process[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(12): 2642–2654.
- [33] ARDITTY S, SCHMITT V, GIERMANSKA-KAHN J, et al. Materials based on solid-stabilized emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 275(2): 659–664.
- [34] IKEM V O, MENNER A, BISMARCK A. High internal phase emulsions stabilized solely by functionalized silica particles[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2008, 47(43): 8277–8279.
- [35] WANG A-J, PATERSON T, OWEN R, et al. Photocurable high internal phase emulsions (HIPEs) containing hydroxyapatite for additive manufacture of tissue engineering scaffolds with multi-scale porosity [J]. Materials Science and Engineering C-Materials for Biological Applications, 2016, 67: 51–58.
- [36] IKEM V O, MENNER A, BISMARCK A. High-porosity macroporous polymers synthesized from titania-particle-stabilized medium and high internal phase emulsions[J]. Langmuir, 2010, 26(11): 8836–8841.
- [37] YIN G, ZHENG Z, WANG H, et al. Preparation of graphene oxide coated polystyrene microspheres by Pickering emulsion polymerization[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 394: 192–198.
- [38] ZHAO Y, YIN G, ZHENG Z, et al. Preparation of polymer hollow microspheres covered by polymer solid particles via two polymerization steps[J]. Journal of Polymer Science Part a-Polymer Chemistry, 2011, 49(24): 5257–5269.
- [39] CAPRON I, CATHALA B. Surfactant-free high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals [J]. Biomacromolecules, 2013, 14(2): 291–296.
- [40] CHEN Q H, ZHENG J, XU Y T, et al. Surface modification improves fabrication of pickering high internal phase emulsions stabilized by cellulose nanocrystals[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 125–130.

- [41] YANG T, ZHENG J, ZHENG B S, et al. High internal phase emulsions stabilized by starch nanocrystals[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 230–238.
- [42] WANG C, PEI X, TAN J, et al. Thermoresponsive starch-based particle-stabilized Pickering high internal phase emulsions as nutraceutical containers for controlled release[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 146: 171–178.
- [43] PATEL A R, RODRIGUEZ Y, LESAFFER A, et al. High internal phase emulsion gels (HIPE-gels) prepared using food-grade components[J]. *Rsc Advances*, 2014, 4(35): 18136–18140.
- [44] HU Y Q, YIN S W, ZHU J H, et al. Fabrication and characterization of novel Pickering emulsions and Pickering high internal emulsions stabilized by gliadin colloidal particles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 300–310.
- [45] 胡亚琼. 小麦醇溶蛋白胶体颗粒稳定的 Pickering 乳液、高内相乳液的制备及特性[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- HU Y Q. Fabrication and characterization of Pickering emulsions and Pickering high internal emulsions stabilized by gliadin colloid particles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [46] ZOU Y, YANG X, SCHOLTEN E. Tuning particle properties to control rheological behavior of high internal phase emulsion gels stabilized by zein/tannic acid complex particles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 163–170.
- [47] BOOSTANI S, HOSSEINI S M H, GOLMAKANI M-T, et al. The influence of emulsion parameters on physical stability and rheological properties of Pickering emulsions stabilized by hordein nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105520.
- [48] 金银霜. 天然大豆分离蛋白稳定高内相乳液的制备及表征[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 55–61, 41.
- JIN Y S. Fabrication and characterization of high internal phase emulsions stabilized by natural soy protein isolates[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2019, 35(8): 55–61, 41.
- [49] XU Y T, LIU T X, TANG C H. Novel pickering high internal phase emulsion gels stabilized solely by soy beta-conglycinin [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 88: 21–30.
- [50] HAO Z Z, PENG X Q, TANG C H. Edible pickering high internal phase emulsions stabilized by soy glycinin: Improvement of emulsification performance and pickering stabilization by glycation with soy polysaccharide[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105672.
- [51] LIU X, GUO J, WAN Z L, et al. Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 168–175.
- [52] XU Y T, TANG C H, BINKS B P. Ultraefficient stabilization of high internal phase emulsions by globular proteins in the presence of polyols: Importance of a core-shell nanostructure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107(33): 105968.
- [53] LIU F, ZHENG J, HUANG C H, et al. Pickering high internal phase emulsions stabilized by protein-covered cellulose nanocrystals[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 96–105.
- [54] RUAN Q, YANG X, ZENG L, et al. Physical and tribological properties of high internal phase emulsions based on citrus fibers and corn peptides[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 53–61.
- [55] WEI Z, CHENG Y, HUANG Q. Heteroprotein complex formation of ovotransferrin and lysozyme: Fabrication of food-grade particles to stabilize Pickering emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 190–200.
- [56] WEI Z, CHENG Y, ZHU J, et al. Genipin-crosslinked ovotransferrin particle-stabilized Pickering emulsions as delivery vehicles for hesperidin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 561–573.
- [57] HUANG X N, ZHOU F Z, YANG T, et al. Fabrication and characterization of Pickering high internal phase emulsions (HIPEs) stabilized by chitosan-caseinophosphopeptides nanocomplexes as oral delivery vehicles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 34–45.
- [58] 吴滋灵. 玉米醇溶蛋白胶体颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液制备及其营养输送特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- WU Z L. Fabrication of high internal Pickering emulsions stabilized by zein colloid particles and the research of its nutrient transport characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [59] YANG T, LI X T, TANG C H. Novel edible pickering high-internal-phase-emulsion gels efficiently

- stabilized by unique polysaccharide-protein hybrid nanoparticles from Okara [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105285.
- [60] WANG J S, WANG A B, ZANG X P, et al. Physical and oxidative stability of functional avocado oil high internal phase emulsions collaborative formulated using citrus nanofibers and tannic acid[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 248-257.
- [61] MA L, ZOU L, MCCLEMENTS D J, et al. One-step preparation of high internal phase emulsions using natural edible Pickering stabilizers: Gliadin nanoparticles/gum Arabic [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105381.
- [62] ZHOU F Z, HUANG X N, WU Z L, et al. Fabrication of zein/pectin hybrid particle-stabilized pickering high internal phase emulsions with robust and ordered interface architecture[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66 (42): 11113-11123.
- [63] 金银霜. 大豆分离蛋白稳定高内相乳液的制备、特性及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- JIN Y S. Preparation, characteristic and application of high internal phase emulsion stabilized by soybean protein isolate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [64] TRIPATHI S, BHATTACHARYA A, SINGH R, et al. Rheological behavior of high internal phase water-in-oil emulsions: Effects of droplet size, phase mass fractions, salt concentration and aging [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 174: 290-301.
- [65] 陈业宝. 大豆分离蛋白颗粒稳定高内相乳液的冻融稳定性[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- CHEN Y B. Freeze-thaw stability of high internal phase emulsions stabilized by soy protein isolate particles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [66] 张莉丽, 唐传核. 两步乳化法改善蛋白基高内相乳液稳定性[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(11): 180-187.
- ZHANG L L, TANG C H. Improving the stability of protein-based high internal phase emulsions by two-step emulsifying method [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(11): 180-187.
- [67] MATOS M, GUTIÉRREZ G, IGLESIAS O, et al. Characterization, stability and rheology of highly concentrated monodisperse emulsions containing lutein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 49: 156-163.
- [68] LEI L, ZHANG Q, SHI S, et al. High internal phase emulsion with double emulsion morphology and their templated porous polymer systems[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2016, 483: 232-240.
- [69] CAMERON N R, SHERRINGTON D C. High internal phase emulsions (HIPEs)-Structure, properties and use in polymer preparation[J]. *Biopolymers Liquid Crystalline Polymers Phase Emulsion*, 1996, 126: 163-214.
- [70] WANG Q, LIU Y, CHEN J, et al. Control of uniform and interconnected macroporous structure in PolyHIPE for enhanced CO₂ adsorption/desorption kinetics [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(14): 7879-7888.
- [71] ZHU J, WU L, BU Z, et al. Synthesis and CO₂ capture behavior of porous cross-linked polymers containing pendant triazole groups[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2017, 56 (36): 10155-10163.
- [72] ZHANG T, GUO Q. Continuous preparation of poly-HIPE monoliths from ionomer-stabilized high internal phase emulsions (HIPEs) for efficient recovery of spilled oils[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 812-819.
- [73] MA H, HU J, MA P X. Polymer scaffolds for small-diameter vascular tissue engineering [J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(17): 2833-2841.
- [74] ZHAO C, DANISH E, CAMERON N R, et al. Emulsion-templated porous materials (PolyHIPEs) for selective ion and molecular recognition and transport: Applications in electrochemical sensing[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2007, 17 (23): 2446-2453.
- [75] FOULET A, BIROT M, BACKOV R, et al. Preparation of hierarchical porous carbonaceous foams from Kraft black liquor[J]. *Materials Today Communications*, 2016, 7: 108-116.
- [76] PULKO I, WALL J, KRAJNC P, et al. Ultra-high surface area functional porous polymers by emulsion templating and hypercrosslinking: Efficient nucleophilic catalyst supports [J]. *Chemistry-a European Journal*, 2010, 16(8): 2350-2354.

- [77] TAN H, ZHAO L, TIAN S, et al. Gelatin particle-stabilized high-internal phase emulsions for use in oral delivery systems: Protection effect and *in vitro* digestion study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(4): 900–907.
- [78] 王健, 邓苏梦, 戴燕, 等. 不同包埋技术构建的食品级运载体负载 β -胡萝卜素的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 380–385.
- WANG J, DENG S M, DAI Y, et al. Research progress in the food-grade delivery systems in different encapsulating technology loading beta-carotene [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 380–385.
- [79] FRANCO PICONE C S, BUENO A C, MICHELON M, et al. Development of a probiotic delivery system based on gelation of water-in-oil emulsions[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 86: 62–68.
- [80] SU J, WANG X, LI W, et al. Enhancing the viability of *Lactobacillus plantarum* as probiotics through encapsulation with high internal phase emulsions stabilized with whey protein isolate microgels [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(46): 12335–12343.
- [81] MA Z, BOYE J I. Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 648–670.
- [82] VAN DER GOOT A J, PELGROM P J M, BERGHOUT J A M, et al. Concepts for further sustainable production of foods[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 168: 42–51.
- [83] MOZAFFARIAN D, KATAN M B, ASCHERIO A, et al. Medical progress – Trans fatty acids and cardiovascular disease [J]. New England Journal of Medicine, 2006, 354(15): 1601–1613.
- [84] ZENG T, WU Z L, ZHU J Y, et al. Development of antioxidant Pickering high internal phase emulsions (HIPEs) stabilized by protein/polysaccharide hybrid particles as potential alternative for PHOs[J]. Food Chemistry, 2017, 231: 122–130.

Preparation of High Internal Emulsion and Its Application in Food

Wei Jiao, Chen Yulu, Gao Yanxiang, Mao Like, Yuan Fang*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract High internal phase emulsion refers to the emulsion with dispersed phase volume fraction over 74.05%, which has been widely used in food, cosmetics, pharmaceutical, materials and petroleum industries. In recent years, the method of using biological macromolecules and solid particles instead of small-molecule surfactants to stabilize high internal phase emulsions has attracted the attention of researchers. Among them, the exploration of biologically derived solid particles is one of the research hotspots in this field. In addition, High internal phase emulsion as a delivery system of functional factors has shown unique advantages, which can effectively improve the stability and bioavailability of functional factors. Based on previous research, this paper reviews the types of emulsifiers for stabilizing high internal phase emulsions, preparation methods and applications in the food field, and prospects for its development.

Keywords high internal phase emulsion; Pickering emulsion; biogenic solid particles; preparation; food applications