

纤维素纳米晶/明胶双层乳液的制备及其稳定性研究

邓千禧, 季思梦, 邓鹏鹏*

(湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:利用硫酸水解法制备硫酸酯基改性的纤维素纳米晶(CNC),通过静电层层自组合法将质子化明胶(带正电)组装到带负电 CNC 稳定的乳液液滴表面,形成 CNC/明胶(CNC-Gel)双层乳液。研究表明:随着明胶浓度的增加,CNC-Gel 乳液的粒径呈先降低后增加的趋势,乳液稳定性呈先增强后降低的趋势;当明胶浓度为 0.75%时,CNC-Gel-0.75 乳液具有最小的粒径和最佳的稳定性。储藏 30 d 后,CNC-Gel-0.75 保持稳定,具有良好的储藏稳定性。此外,CNC-Gel-0.75 展现出优异的温度、离子强度和 pH 稳定性,适用于食品复杂的加工场景。本研究为提升 CNC 乳液的稳定性提供了新的研究思路,拓展了 CNC 乳液的应用范围。

关键词:纤维素纳米晶;明胶;双层乳液;稳定性

中图分类号:TB324

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0190-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.032

Study on the fabrication and stability of cellulose nanocrystal/gelatin bilayer emulsions

DENG Qian-xi, JI Si-meng, DENG Peng-peng*

(School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract:In this study, sulfate ester-modified cellulose nanocrystals (CNC) were prepared via sulfuric acid hydrolysis. Protonated gelatin (positively charged) was then assembled onto the surfaces of negatively charged CNC-stabilized emulsion droplets using the electrostatic layer-by-layer self-assembly method, forming CNC/gelatin (CNC-Gel) bilayer emulsions. The results demonstrated that the droplet size of CNC-Gel emulsions first decreased and then increased with increasing gelatin concentration, while the emulsion stability initially increased followed by a decrease. At a gelatin concentration of 0.75%, the CNC-Gel-0.75 emulsion exhibited the smallest droplet size and the optimal stability. In addition, the CNC-Gel-0.75 emulsion remained stable after 30 days of storage, indicating excellent storage stability. Furthermore, CNC-Gel-0.75 exhibited robust stability against temperature variations, ionic strength changes, and pH fluctuations, demonstrating its viability for complex food processing operations. This study proposes a novel strategy to enhance the stability of CNC-based emulsions while broadening their application scope.

Key words: cellulose nanocrystals; gelatin; bilayer emulsion; stability

Pickering 乳液是一类通过固体颗粒稳定的新型乳液,与传统乳液相比,两亲性固体颗粒不可逆吸附在油水界面形成刚性物理屏障,具有优异的界面稳定性,能有效阻止液滴的聚集,显著提高乳液稳定性^[1-3]。目前,Pickering 乳液在脂肪替代、食品功能因子的封装和递送、3D 打印食品等领域具有广阔的应用前景,已成为当今研究的热点^[4-5]。纤维素纳米晶是从天然纤维素中提取的棒状纳米颗粒,具有优异的生物相容性、生物降解性、两亲性和长径比可调等优点,在 Pickering 乳液领域受到广泛关注^[6-7]。然而,纳米纤维素的强亲水性导致其油-水界面吸附行为易受环境因素(离子强度、pH 和温度等)的

干扰;此外,CNC 在油水界面处的界面覆盖不完全,会产生间隙等结构缺陷,导致乳化液油相中的活性物质容易与氧气接触,从而引起氧化变质,限制了纤维素纳米晶乳液在复杂食品体系、复杂环境中的应用^[8-9]。

近年来,通过静电逐层自组合法将带相反电荷的聚电解质吸附在乳状液滴表面,构建双层乳液,可有效提高乳液的界面致密性、厚度和电荷密度,改善乳液的界面黏弹性,提升乳液对环境压力(如酸碱度、温度和离子强度等)的耐受性,显著增强了乳状液的稳定性^[10-13]。明胶(Gelatin)是从动物皮肤、骨骼、软骨等组织中提取的天然大分子亲水胶体,具

收稿日期:2025-07-11;修回日期:2026-03-18

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划中青年人才项目(Q20248405)

作者简介:邓千禧(1999-),女,硕士生,研究方向为天然高分子材料,3476382986@qq.com;邓鹏鹏(1993-),男,博士,讲师,研究方向为天然高分子材料,通讯联系人,dengpp@whu.edu.cn。

有来源广泛、生物相容性好和生物可降解性能等优点,在食品、化妆品和生物医药等领域具有广泛的应用^[14-15]。明胶是一种富含大量氨基和羧基的两性聚电解质,水溶性优异,在酸性条件下,明胶中的氨基发生质子化而带正电荷^[16]。我们猜想质子化明胶可以通过静电相互作用吸附在带负电的 CNC 乳液液滴表面,形成双层乳液,显著提高乳液的界面厚度和黏弹性,改善 CNC 乳液的稳定性,拓展 CNC 乳液在复杂食品加工场景中的应用。

本研究利用硫酸水解法制备带负电的硫酸酯基改性 CNC,采用静电逐层自组装法将带正电的明胶分子链组装到带负电的 CNC 乳液液滴的表面,构建具有双层界面结构的 CNC-Gel 乳液,系统探究了明胶浓度对乳液微观结构、pH、离子强度和温度稳定性的影响规律。

1 材料与试剂

1.1 材料

微晶纤维素、明胶、浓硫酸、玉米油、尼罗红、氯化钠、氢氧化钠和盐酸等试剂均购自上海麦克林生化科技有限公司。

1.2 设备与仪器

恒温水浴锅,湖南力辰仪器科技有限公司;RWD50 型电动搅拌器,上海沪析实业有限公司;RE-52AA 型旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;FE28-Meter 型 pH 计,梅特勒托利多科技有限公司;LGJ-60A 型真空冷冻干燥机,上海豫明仪器有限公司;CR21N 型高速冷冻离心机,日立(HITACHI)公司;Dimension Icon 型原子力显微镜,布鲁克公司;FA25 型均质机,上海弗鲁克科技有限公司;ZEN3600 型纳米粒度及电位分析仪,英国马尔文仪器公司;Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪,英国马尔文仪器公司;H600L 型偏光显微镜,日本尼康有限公司;Turbiscan Tower 型稳定性分析仪,法国 Formulacion 公司。

2 实验方法

2.1 CNC 的制备

将 20 g 微晶纤维素分散在硫酸溶液(质量分数 64%, 200 mL)中,在 50℃ 下机械搅拌 30 min。然后,用 400 mL 去离子水稀释反应溶液,离心(8 000 r/min)洗涤数次。最后,将悬浮液用去离子水透析 5 d,得到 CNC 悬浮液。

2.2 CNC 的微观结构表征

将 CNC 悬浮液(0.01 mg/mL)滴在云母片上,室温干燥后,利用原子力显微镜观察 CNC 的微观形态,利用 NanoScope Analysis 1.8 软件进行图像分析。

2.3 CNC 的尺寸分布和 Zeta 电位测试

将 CNC 悬浮液的浓度稀释至质量分数为 0.1%,利用动态光散射仪测定其尺寸分布和 Zeta 电位。

2.4 CNC 和 Gel-1 乳液的制备

将 CNC 悬浮液(90 mL, pH = 4, 质量分数 1.0%)与玉米油(10 mL)混合,利用均质机以 10 000 r/min 的转速将混合液均质 2 min,获得 CNC 乳液。将明胶溶液(90 mL, pH = 4, 质量分数 1.0%)与玉米油(10 mL)混合,利用均质机以 10 000 r/min 的转速将混合液均质 2 min,获得 Gel-1 乳液。

2.5 CNC/明胶(CNC-Gel)双层乳液的制备

将 CNC 悬浮液(20 mL, pH = 4, 质量分数 2.5%)和玉米油(5 mL)混合,利用均质机以 10 000 r/min 的转速将混合液均质 2 min 形成 CNC 乳液;然后,在均质的条件下,将明胶溶液(25 mL, pH = 4)缓慢滴加到 CNC 乳液(25 mL)中,均质 2 min 后,形成 CNC-Gel 双层乳液。通过调控明胶与 CNC 的质量比(0.25、0.5、0.75 和 1),得到 4 种组成不同的双层乳液,分别命名为 CNC-Gel-0.25、CNC-Gel-0.5、CNC-Gel-0.75 和 CNC-Gel-1。

2.6 乳液的微观结构

使用尼罗红(0.1%, 质量体积比)对乳液的油相进行染色,在黑暗条件下染色 30 min,利用倒置荧光显微镜观察乳液的微观结构。利用光学显微镜观察 CNC、Gel-1 和 CNC-Gel 乳液液滴的微观形貌。

2.7 乳液液滴的尺寸分布与 Zeta 电位

利用激光粒度分析仪在 25℃ 条件下测定乳液的粒径分布;利用动态光散射仪测定乳液的 Zeta 电位。

2.8 乳液稳定性分析

在 25℃ 下采用稳定性分析仪测量乳液稳定性,以稳定性指数(TSI)来评估乳液的分散稳定性;扫描频率和扫描时间分别设定为 30 min/次和 12 h。

2.9 乳液的流变行为研究

将乳液置于流变仪的锥板与底盘之间,测试温度设定为 25℃。在 0.1~100 s⁻¹的剪切速率范围内进行稳态剪切扫描,测定乳液黏度随剪切速率的变化曲线。在 0.1~100 rad/s 的频率范围内进行动态

频率扫描,测定乳液的弹性模量(G')和黏性模量(G'')随角频率的变化曲线。

2.10 乳液稳定性表征

pH 稳定性:将 CNC-Gel-0.75 乳液中 pH 分别调整为 2、4、6 和 8,在 25℃ 放置 24 h 后,测量乳液的外观、液滴尺寸分布和 Zeta 电位。

离子强度稳定性:将 CNC-Gel-0.75 乳液中 NaCl 浓度分别调整为 0、50、100、200 mmol/L 和 300 mmol/L,在 25℃ 放置 24 h 后,测量乳液的外观、液滴尺寸分布和 Zeta 电位。

温度稳定性:将 CNC-Gel-0.75 乳液在水浴(30、50、70、90℃)中孵育 30 min,室温冷却并储存 24 h,测定乳液的外观、液滴尺寸和 Zeta 电位。

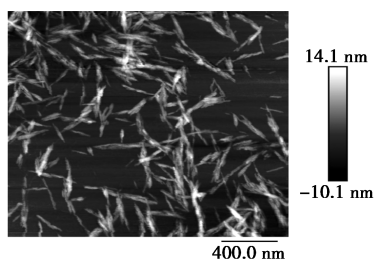
2.11 统计分析

每组实验至少重复 3 次,利用 SPSS 软件(17.0)对数据进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 代表实验数据具有统计学意义。

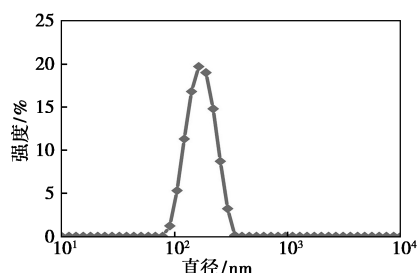
3 结果与分析

3.1 CNC 的制备和结构表征

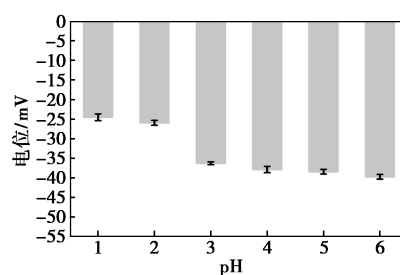
利用硫酸水解法将微晶纤维素水解成 CNC,在 CNC 表面引入大量带负电的硫酸酯基^[17]。利用原子力显微镜(AFM)观察 CNC 的微观结构,结果如图 1(a)所示。CNC 呈现出典型的短棒状结构,长度和宽度分别为 (210 ± 2.6) nm 和 (24 ± 3.4) nm,长径比为 8.8。利用动态光散射研究了 CNC 的流体力学半径,结果如图 1(b)所示。CNC 的粒径呈单峰分布,服从正态分布,尺寸比较均匀,水合粒径为 (197.3 ± 2.3) nm。我们进一步研究了 CNC 在不同 pH 条件



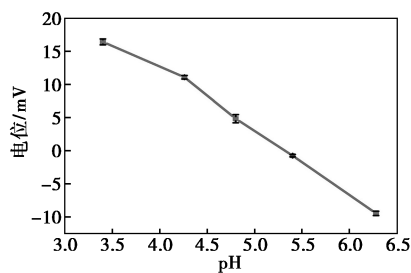
(a) AFM 代表性图片



(b) 尺寸分布图



(c) 不同 pH 条件下 CNC 的 Zeta 电位



(d) 不同 pH 条件下明胶的 Zeta 电位

图 1 CNC 的结构表征图及 Zeta 电位图

下的 Zeta 电位[图 1(c)],随着 pH 的增加,CNC 的 Zeta 电位逐渐增加,在 pH = 1~6 范围内,CNC 均带有强负电荷,证明 CNC 可以在较宽的 pH 范围内与阳离子型聚电解质产生强静电相互作用^[18]。

3.2 乳液的制备和性质表征

进一步研究了明胶在不同 pH 条件下的 Zeta 电位,结果如图 1(d)所示。在明胶的等电点为 5.3、 $\text{pH} < 5.3$ 的条件下,明胶带正电;当 $\text{pH} > 5.3$ 时,明胶带负电。将溶液 pH 调至 4,明胶上的氨基发生质子化;通过静电逐层自组装技术将带正电的明胶分子链组装到带负电荷的 CNC 乳液液滴表面,制备具有双层界面结构的 CNC-Gel 乳液。利用光学显微镜和荧光显微镜研究了乳液的微观形貌和乳液类型,结果如图 2(a)、(b)所示。利用尼罗红染料对乳液的油相进行染色,可以明显看出尼罗红染色的油滴均匀地分散在水相中,证明 CNC、Gel-1 和 CNC-Gel 乳液均为 O/W 型。CNC 乳液液滴比较大,分布不均匀,出现明显的聚结现象,这主要是由于 CNC 的亲水性过强,界面吸附稳定性不佳,导致乳液的稳定性降低。随着乳液中明胶浓度的增加,乳液液滴尺寸呈先降低后增加的趋势,CNC-Gel-0.75 乳液的液滴尺寸最小,分布最均匀,进一步证明明胶的引入有利于改善乳液液滴的尺寸,提升液滴尺寸分布的均匀性。我们进一步利用激光动态光散射仪定量研究了乳液液滴的尺寸,结果如图 2(c)所示。CNC 乳液的粒径为 47.58 μm ,随着明胶浓度的增加,CNC-Gel 双层乳液的粒径呈先降低后增加的趋

势。明胶浓度为 0.75% 时,双层乳液的粒径最小,仅有 12.6 μm ,进一步证明明胶可以显著降低 CNC 乳液的液滴尺寸。

TSI 是评定乳液物理稳定性的重要参数之一,*TSI* 值越小,表明乳液的稳定性越好^[19]。如图 2(d) 所示,测试 12 h 后,明胶乳液 *TSI* 值最大,证明明胶稳定的乳液出现明显的失稳现象。和 CNC 乳液相比,12 h 后的 CNC-Gel 乳液的 *TSI* 值呈先减小后增加的趋势,表明随着明胶浓度的增加,乳液的稳定性先降低后增强。当明胶的浓度为 0.75% 时,乳液最稳定,*TSI* 值低至 1.08%。当明胶的浓度增加至 1% 时,CNC-Gel-1 乳液的 *TSI* 值高达 13.07%,极大降低了乳液的稳定性,这主要是由于过量明胶的界面竞争吸附行为,破坏了乳液双层界面结构的稳定性,导致乳液物理稳定性变差。我们进一步研究了明胶的界面吸附行为对乳液表面电位的

影响规律,结果如图 2(e) 所示。CNC 单层乳液的表面电位低至 -48.57 mV, Gel-1 乳液的表面电位为正值。随着明胶浓度的增加,CNC-Gel 双层乳液的表面电荷逐渐增加。当明胶的浓度增加到 1% 时,双层乳液的电位逐渐增加至 -14.7 mV,证明带正电的明胶吸附在 CNC 乳液的液滴表面,增加了乳液的表面电位。将乳液避光储藏 30 d,结果如图 2(f) 所示。仅由 CNC 或明胶稳定的乳液出现了严重的分层现象,证明 CNC 或明胶稳定的乳液稳定性不佳。明胶引入到 CNC 乳液中,CNC-Gel 双层乳液的稳定性得到了提升。当明胶的浓度为 0.75% 时,CNC-Gel-0.75 乳液未出现水相和油相分离现象,进一步证明 CNC-Gel-0.75 乳液具有良好的储藏稳定性。这是因为 CNC 与明胶形成了具有双层界面的乳液,有效抑制液滴聚集,显著提升了乳液的稳定性^[12]。

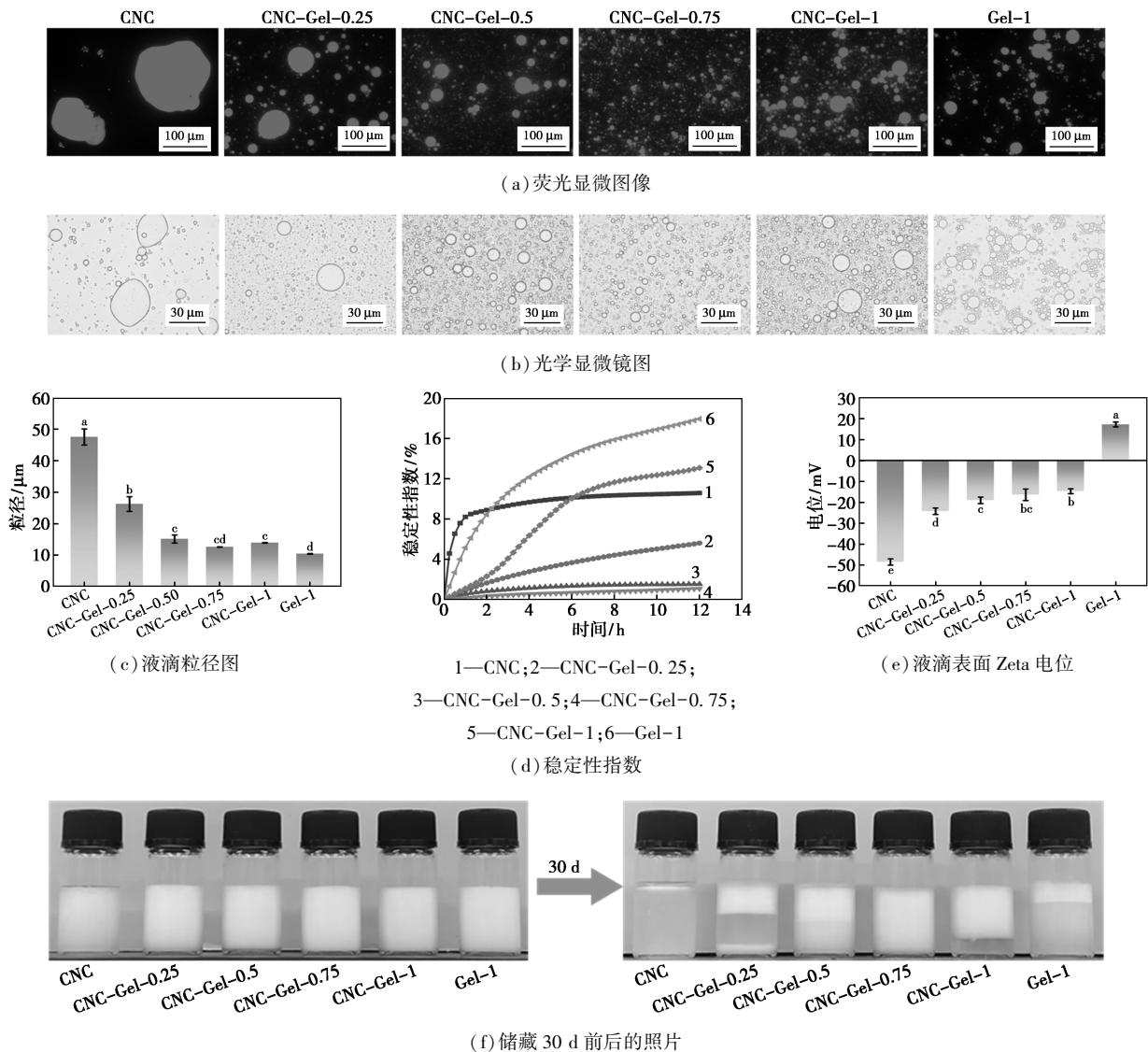
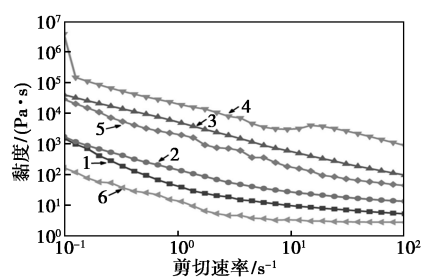


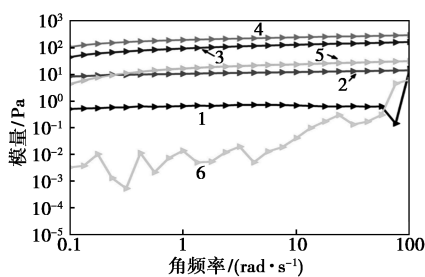
图 2 CNC 乳液和 CNC-Gel 双层乳液的性质表征图

3.3 乳液流体力学行为

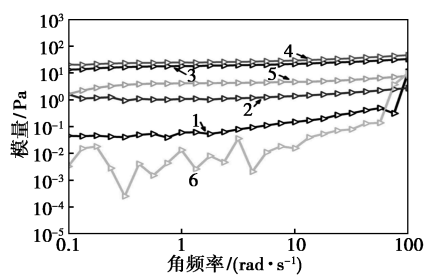
利用旋转流变仪研究了明胶浓度对 CNC 乳液流体力学行为的影响规律(图 3)。乳液的表观黏度均随剪切速率的增加而降低,具有剪切稀化的特点,属于假塑性流体^[20]。随着明胶浓度的增加,乳液的表观黏度呈先增加后降低的趋势,CNC-Gel-0.75 乳液的黏度最大。这是由于明胶吸附在 CNC 乳液液滴表面,可显著提高 CNC 乳液的界面厚度和黏弹性,部分游离的明胶与乳液液滴之间形成三维网络结构,显著增加了乳液的黏度。当明胶浓度为 1% 时,双层乳液中明胶浓度过高,明胶在油水界面发生竞争性吸附行为,破坏了乳液双层界面结构的稳定性,导致乳液黏度降低。角频率在 0.1~100 rad/s 范围内,所有乳液的储能模量(G')明显大于损耗模量(G''),说明乳液形成了以弹性为主的凝胶网络结构。乳液的 G' 和 G'' 的变化趋势与黏度一致,随着明胶浓度的增加,乳液的 G' 和 G'' 呈先增加后降低的趋



(a) 黏度曲线



(b) 频率-储能模量曲线



(c) 频率-损耗模量曲线

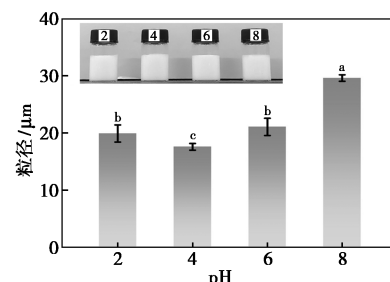
1—CNC; 2—CNC-Gel-0.25; 3—CNC-Gel-0.5; 4—CNC-Gel-0.75; 5—CNC-Gel-1; 6—Gel-1

图 3 乳液的流体力学表征

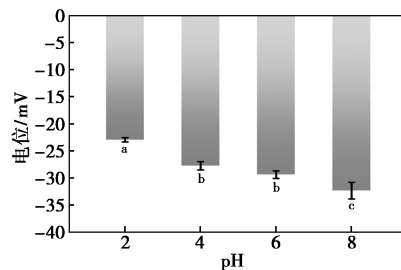
势,CNC-Gel-0.75 乳液表现出最高的 G' 和 G'' ,进一步证明 CNC 与明胶之间的相互作用最强,形成稳定的界面结构^[21-22]。

3.4 乳液的稳定性分析

乳液体系在不同 pH 条件下的稳定性对乳液在食品复杂加工体系中的应用具有重要影响^[23]。图 4 展示了 CNC-Gel-0.75 乳液在不同 pH 下的外观、平均粒径和 Zeta 电位。CNC-Gel-0.75 乳液在 pH 为 2~8 范围内均未出现明显的分层现象,证明乳液可以在较宽的 pH 范围内维持稳定。pH 由 2 升高到 4 时,平均粒径从 19.9 μm 降低至 17.59 μm ,这主要是由于 CNC 分子在强酸性环境中表面电荷密度降低,明胶与 CNC 之间的静电相互作用减弱,导致乳液在 pH 为 2 的环境中粒径增大。在 pH 为 6~8 范围内,乳液的尺寸明显增加,这主要是由于在中性和弱碱环境中,明胶分子上的氨基去质子化,乳液双层界面结构解离,导致双层乳液粒径变大。此外,随着 pH 的逐渐增加,CNC-Gel-0.75 乳液的表面电位逐渐降低,这主要是由于明胶去质子化,导致乳液电位的逐渐降低。



(a) 粒径分布图

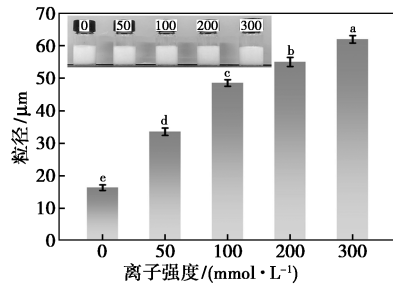


(b) Zeta 电位图

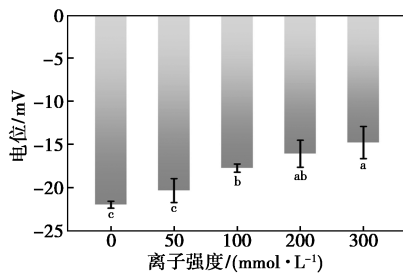
图 4 不同 pH 条件下 CNC-Gel-0.75 的粒径分布图和 Zeta 电位图

食品中富含大量的电解质,离子强度对乳状液中的带电粒子具有静电屏蔽作用,乳液的离子强度稳定性是决定乳剂产品加工方式和应用场景的重要因素^[24]。我们进一步探究了不同离子强度对 CNC-Gel-0.75 乳液稳定性的影响规律(图 5)。从乳液状态图中可以明显看出,随着离子强度的逐渐

增加,乳液保持稳定,未发生明显的分层现象,证明乳液可以在较高的离子强度下维持稳定。随着氯化钠浓度从 0 mmol/L 增加到 300 mmol/L,乳液粒径仅从 16.3 μm 增加到 61.9 μm ,乳液 Zeta 电位的绝对值略微下降,这主要是因为 NaCl 的静电屏蔽效应降低了 CNC 与明胶之间的静电相互作用,导致乳液表面电位降低,尺寸略微增加^[25]。



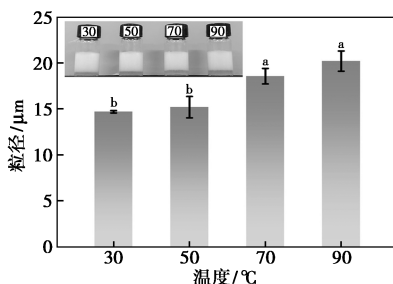
(a) 粒径分布图



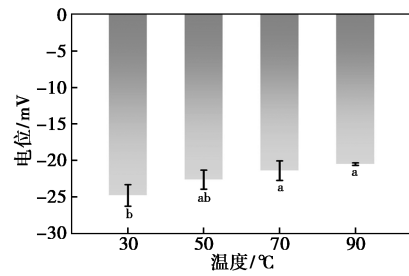
(b) Zeta 电位图

图5 不同离子浓度条件下 CNC-Gel-0.75 的粒径分布图和 Zeta 电位图

食品加工一般需要经过高温处理,可有效杀菌灭菌,保证食品安全。乳液在不同温度下维持稳定对提升乳液制品的加工性能极为重要^[26]。图6显示了不同温度对 CNC-Gel-0.75 乳液外观、液滴尺寸分布和 Zeta 电位的影响规律。乳液在 30、50、70、90 $^{\circ}\text{C}$ 下均未发生明显的分层现象。随着温度的提高,乳液液滴的平均粒径仅从 14.7 μm 增加到 20.2 μm ,Zeta 电位从 -24.8 mV 略微增加到 -20.5 mV。这主要是因为温度升高使分子运动速率加快,碰撞速率提高,导致乳液粒径略微增加。液滴聚集后,乳液的界面性质和电荷分布发生改变,使



(a) 粒径分布图



(b) Zeta 电位图

图6 不同温度条件下 CNC-Gel-0.75 的粒径分布图和 Zeta 电位图

得电位降低。在 90 $^{\circ}\text{C}$ 以下的环境中,乳液稳定性无显著变化,证明乳液对温度变化具有很强的耐受性,可以在较宽温度范围内维持乳液的稳定性。

4 结论

本研究利用硫酸水解法制备带负电的硫酸酯基改性 CNC,利用 CNC 作为乳化剂,制备表面带负电的 CNC 乳液。然后将质子化的明胶通过静电层层自组装法组装到带负电的 CNC 乳液液滴表面,构建 CNC-Gel 双层乳液。研究表明,随着明胶含量的增加,CNC-Gel 双层乳液的稳定性呈先增加后降低的趋势,乳液液滴粒径呈先降低后增加的趋势;当明胶浓度为 0.75% 时,乳液表现出最佳的稳定性和最小的液滴尺寸。CNC-Gel-0.75 乳液展现出优异的储存、pH、离子强度和温度稳定性,证明乳液可以适应多种复杂的加工环境。本研究为提升 CNC 基乳液的稳定性提供了新的研究策略,极大拓展了 CNC 乳液的应用范围。

参考文献

- [1] 窦新林,郭银梅,吉语宁,等.不同类型固体颗粒稳定的食品级 Pickering 乳液研究进展[J].中国食品学报,2024,24(1):475-486.
- [2] 齐亚兵,吴子波,杨清翠.Pickering 乳液制备及稳定性研究进展[J].化工进展,2024,43(4):2017-2030.
- [3] Cui F,Zhao S,Guan X,et al.Polysaccharide-based pickering emulsions:Formation, stabilization and applications[J].Food Hydrocolloids,2021,119:106812.
- [4] 谢欢,胡梓晴,刘晓艳,等.多酚-多糖复合物在食品级 Pickering 乳液中的应用进展[J].食品科学,2024,45(3):247-256.
- [5] Meng W,Sun H,Mu T,et al.Chitosan-based pickering emulsion: A comprehensive review on their stabilizers, bioavailability, applications and regulations [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 304: 120491.
- [6] 温靖,张炜,徐玉娟,等.基于植物基纳米纤维素 Pickering 乳液在递送体系中的应用研究进展[J].南方农业学报,2023,54(2):564-574.

- [7] 陈安祥,宗毓东,王金霞,等.纤维素稳定 Pickering 乳液的研究进展及在食品领域的应用[J].食品科学,2023,44(7):303-312.
- [8] Dai H, Wu J, Zhang H, *et al.* Recent advances on cellulose nanocrystals for pickering emulsions: Development and challenge[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 16-29.
- [9] Du Le H, Loveday S M, Singh H, *et al.* Pickering emulsions stabilised by hydrophobically modified cellulose nanocrystals: Responsiveness to pH and ionic strength[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105344.
- [10] 吕沛峰,王迪,高彦祥,等.食品功能因子传递系统—双层乳液研究进展[J].食品科学,2018,39(21):285-292.
- [11] 米红波,王聪,劳敏军,等.静电层层自组装技术及其在脂溶性功能因子中的应用研究进展[J].食品工业科技,2017,38(8):390-394,400.
- [12] Wang T, Wang S, Zhang L, *et al.* Fabrication of bilayer emulsion by ultrasonic emulsification; Effects of chitosan on the interfacial stability of emulsion[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106296.
- [13] Tao H, Fang X H, Chen P, *et al.* Casein/butyrylated dextrin nanoparticles and chitosan stabilized bilayer emulsions as fat substitutes in sponge cakes[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 139043.
- [14] 杨宽,覃准,伍静,等.光交联明胶基载药水凝胶构建及研究进展[J].现代化工,2025,45(5):82-86.
- [15] Wang R, Chang Y, Wang Y, *et al.* Unraveling the complex gelation dynamics of gelatin solutions mixed with various mono-, di-, or trisaccharides: A comparative study based on hydration properties[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 168: 111480.
- [16] Yu K, Zhou L, Huang H, *et al.* The improvement of water barrier property in gelatin/carboxymethyl cellulose composite film by electrostatic interaction regulation and its application in strawberry preservation[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139352.
- [17] Zhao T H, Parker R M, Williams C A, *et al.* Printing of responsive photonic cellulose nanocrystal microfilm arrays[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(21): 1804531.
- [18] Deng P, Liu X, Li Y, *et al.* Konjac glucomannan foams integrated with bilayer phase change microcapsules for efficient heat storage and thermal insulation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 352: 123151.
- [19] Zhang J, Ge D, Wang X, *et al.* Influence of surfactant and weak-alkali concentrations on the stability of o/w emulsion in an alkali-surfactant-polymer compound system[J]. ACS Omega, 2021, 6(7): 5001-5008.
- [20] Deng P, Chen F, Zhang H, *et al.* Conductive, self-healing, adhesive, and antibacterial hydrogels based on lignin/cellulose for rapid mrsa-infected wound repairing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(44): 52333-52345.
- [21] Chen H, Wang Q, Rao Z, *et al.* The linear/nonlinear rheological behaviors of pickering emulsion stabilized by zein and xanthan gum; Effect of interfacial assembly strategies[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109116.
- [22] Wan S, Zeng Q, Yang S, *et al.* In situ characterization and interfacial viscoelastic properties of pickering emulsions stabilized by aie-active modified alginate and chitosan complexes[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(31): 10275-10285.
- [23] Chen X, Pei Y, Li B, *et al.* Interfacial decoration of desalted duck egg white nanogels as stabilizer for pickering emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107858.
- [24] Li M, Sun Y, McClements D J, *et al.* Interfacial engineering approaches to improve emulsion performance; Properties of oil droplets coated by mixed, multilayer, or conjugated lactoferrin-hyaluronic acid interfaces[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107938.
- [25] Zhao G, Wang S, Yang L, *et al.* Stability of electrostatically stabilized pickering emulsion of silica particles and soy hull polysaccharides; Mechanism of pH and ionic strength[J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142804.
- [26] Liao Z, Dong L, Lu M, *et al.* Construction of interfacial crystallized oleogel emulsion with improved thermal stability[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136029. ■

化信中心牵头两项标准荣获 CSTM 标准创新贡献一等奖

日前,2025 年度“CSTM 标准创新贡献奖”获奖名单揭晓。中国化工信息中心(以下简称“化信中心”)作为 CSTM 生物基化工材料标准化技术委员会秘书处,牵头组织编制的《生物降解农用地面覆盖薄膜通用技术评价体系》《食品接触用无氟防油植物纤维基材料评价》两项标准荣获一等奖。

其中,地膜评价标准为农业农村部推动“科学用膜”提供技术支撑,推动全生物降解地膜推广应用面积达到千万

亩,直接创造经济效益超 20 亿元。无氟防油材料评价标准被印尼工业部和标准局列为食品接触材料监管体系参考文件,成为我国标准“走出去”的范例。此外,化信中心作为 CSTM/FC05 秘书处单位,组织申报的 3 项高纯化学试剂标准和 1 项绿色检测方法标准获得三等奖,助力提升基础化工产品质量一致性,解决行业共性检测难题,夯实产业创新发展基础。

(中国化工信息中心)