周欣怡, 胡钢亮, 吴红宇, 等. 食用胶-再制奶酪 3D 打印特性及分子相互作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 129−138. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070373

ZHOU Xinyi, HU Gangliang, WU Hongyu, et al. Edible Colloids-Processed Cheese: 3D Printing Characteristics and Molecular Interactions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 129−138. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070373

· 研究与探讨 ·

食用胶-再制奶酪 3D 打印特性及分子相互作用

周欣怡[1], 胡钢亮[2], 吴红宇[2], 陈　凯[1], 方若思[1], 肖功年[1,*]

（1.浙江科技大学生物与化学工程学院, 浙江杭州 310023;
2.杭州千岛湖康诺邦健康产品有限公司, 浙江杭州 311700）

摘　要: 本研究以提升再制奶酪的 3D 打印适印性为目标，探究不同食用胶（黄原胶、瓜尔豆胶、可得然胶）种类及添加量（0.1%~0.5%）对样品成型性能的影响。以安佳奶酪为基料，通过添加食用胶制备再制奶酪体系，结合 3D 打印成型效果评估，并采用旋转流变仪、差示扫描量热仪（differential scanning calorimetry，DSC）、傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR）及扫描电子显微镜（scanningelectron microscopy，SEM）等分析手段，系统表征其流变特性、热力学行为和微观结构。流变结果表明：所有样品均表现出典型的剪切变稀特性；当可得然胶添加量为 0.4% 时，样品在剪切速率 0.1 s^{-1} 下的黏度达到 40 Pa·s，且储能模量（G'）始终高于损耗模量（G"），表现出优异的弹性响应。3D 打印测试表明：当可得然胶添加量为 0.4% 时，打印样品呈现最佳成型精度与结构稳定性（60 min 内形态保持完整），显著优于其他胶体体系。综上，0.4% 可得然胶可有效提升再制奶酪的 3D 打印成型质量，为乳制品 3D 打印技术提供理论参考。

关键词: 3D 打印, 再制奶酪, 可得然胶, 打印精确性, 稳定性

中图分类号: TS252.53　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0129−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070373　　本文网刊:

Edible Colloids-Processed Cheese: 3D Printing Characteristics and Molecular Interactions

ZHOU Xinyi[1], HU Gangliang[2], WU Hongyu[2], CHEN Kai[1], FANG Ruosi[1], XIAO Gongnian[1,*]

（1.College of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2.Hangzhou Qiandao Lake Kangnobond Health Products Limited Company, Hangzhou 311700, China）

Abstract: This study aimed to improve the 3D printability of processed cheese by investigating the effects of different colloids (xanthan gum, guar gum, and curdlan) and addition level (0.1%~0.5%) on sample molding properties. Using Anchor processed cheese as the base material, processed cheese was prepared by incorporating edible colloids. The 3D printing performance rheological properties, thermal behavior, and microstructure were systematically characterized by using a rotational rheometer, differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy. Rheological results showed that all samples exhibited typical shear-thinning behavior. At a curdlan concentration of 0.4%, the sample reached an apparent viscosity of 40 Pa·s under a shear rate of 0.1 s^{-1}, and the storage modulus consistently exceeded the loss modulus, which indicated a dominant elastic response. 3D Printing tests demonstrated that samples with 0.4% curdlan exhibited the highest printing accuracy, structural stability (the morphology remained intact within 60 minutes), and structural integrity, which was significantly superior to other colloids systems. In summary, 0.4% curdlan could effectively enhance the 3D printing quality of processed cheese, providing a theoretical refer-

收稿日期: 2025−07−30

基金项目: 湖州市科技计划项目（2024GN02）; 湖州市“南太湖精英计划”领军型创业团队（2022）B 类。

作者简介: 周欣怡（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 乳制品加工, E-mail: 2965412717@qq.com。

*** 通信作者:** 肖功年（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 乳制品加工, E-mail: xiaogongnian@126.com。

ence for 3D printing technology in dairy products.

Key words: 3D printing; processed cheese; curdlan gum; printing precision; stability

3D 打印技术凭借其数字化与精准化制造能力，为实现个性化营养与可持续食材（如替代蛋白、副产品）的零浪费利用提供了革命性方案，有望推动食品系统向更负责任的生产-消费范式转型[1−2]。为实现这一愿景，该领域的研究正从单一材料开发迈向对复杂体系的构建与多工艺的融合。具体而言，在原料方面，研究者致力于挖掘新型可持续资源，如 Keerthana 等[3] 利用香菇纤维素开发高纤维休闲食品，以丰富产品功能。在材料性能调控方面，研究重点在于通过复合配方优化打印性能，例如 Wu 等[4] 构建的鱼糜-南瓜糊复合体系，从流变学角度保障了打印的可行性。进而，在打印工艺层面，Rodríguez-herrera 等[5] 对玉米-鹰嘴豆多材料打印的探索，则展示了通过精密控制实现结构-功能一体化的潜力。这些研究共同表明，天然生物大分子基食品的 3D 打印正从基础筛选走向面向应用的产品定制化新阶段。

奶酪作为一种高营养价值的乳制品，富含优质蛋白质、必需脂肪酸、矿物质及多种功能性成分，具有抗炎、免疫调节等健康益处[6−7]。全球奶酪产业规模持续扩大，年产量约 2480 万吨，预计 2022~2031 年间将增长 10.4%[8]。相比之下，中国奶酪市场仍处于成长期，2023 年人均消费量仅为 0.2 kg，远低于日本（1.8 kg）等国家，消费总量不足全球 1%，显示出巨大的发展潜力[9]。为推进奶酪产业升级，中国奶业协会提出至 2025 年全国产量力争 50 万吨、零售规模突破 300 亿元的发展目标。

在此背景下，3D 打印技术因其在食品形状、质构与营养个性化定制方面的独特优势，为奶酪产品的创新开发提供了新途径[10]。通过该技术可实现奶酪的再制与风味改良，拓展其在特殊膳食、儿童食品、餐饮装饰等场景的应用。然而，奶酪原料本身的流变特性与质构性能是否满足 3D 打印的工艺要求，成为制约其实际应用的关键技术瓶颈。因此，系统研究奶酪材料的打印适应性，并通过配方优化或工艺调控改善其挤出性、堆叠性与成型稳定性，对推动奶酪高附加值产品开发具有重要意义。

食用胶（多糖或蛋白质基亲水聚合物）凭借胶凝、增稠等功能特性，成为调控食品体系流变行为的关键组分[11−12]。研究表明，瓜尔豆胶可优化酸奶流变特性[13]，黄原胶能显著影响淀粉糊化行为[14]，而可得然胶复配体系可提升乳制品稳定性[15]。因此本研究聚焦瓜尔豆胶、黄原胶及可得然胶对再制奶酪 3D 打印性能的调控机制，旨在为开发兼具营养适配性与成型稳定性的功能性乳制品提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

安佳奶油奶酪　上海恒天然商贸有限公司；可得然胶　江苏一鸣生物股份有限公司；黄原胶　新疆梅花氨基酸有限公司；瓜尔豆胶　北京瓜尔润科技股份有限公司；多聚磷酸钠、焦磷酸钠　浙江诺一生物科技有限公司；β-巯基乙醇　上海麦克林生化科技股份有限公司；PBS 缓冲液　广州和为医药科技有限公司；尿素　生工生物工程（上海）股份有限公司；所用试剂均为分析纯。

HH-4 数显恒温水浴锅　国华电器有限公司；FOODBOT-S2 食品 3D 打印机　杭州时印科技有限公司；DHR-2 旋转流变仪　美国 TA 仪器公司；CM-5 分光色差仪　日本柯尼卡美能达公司；SU1510 扫描电子显微镜　日本日立公司；V70 IR Spertrometer 傅里叶变换红外光谱仪　德国布鲁克公司；DSC-300 差示扫描量热仪　德国耐驰公司。

1.2 实验方法

1.2.1 再制干酪的制备　称取 50 g 安佳奶酪，加入 0.75 g 多聚磷酸钠和焦磷酸钠以及 25% 的蒸馏水，置于 80 ℃ 的恒温水浴锅中加热搅拌 20 min，后用均质机搅拌均匀。再分别添加 3 种食用胶（可得然胶、黄原胶、瓜尔豆胶），每种胶的添加量均设置为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 五个水平，置于 80 ℃ 恒温水浴锅中搅拌融化 30 min，装入离心管或料筒中在 4 ℃ 冰箱内储藏 24 h，用于后续实验[16]。

1.2.2 流变特性分析　通过流变仪测定奶酪样品的流变特性。平板直径 40 mm，间隙 1 mm，温度 25 ℃，剪切速率扫描范围 0.1~100 s^{-1}，记录其表观黏度随剪切速率增加的变化情况。在角频率 0.1~200 rad/s 内进行动态频率扫描，记录其储能模量和损耗模量随振荡频率增加的变化情况。

1.2.3 3D 打印成型效果对比　制成的奶酪样品使用 3D 食品打印机进行打印。建立长 37 mm、宽 36 mm、高 12 mm 的瓢虫模型。3D 打印机参数设置：喷嘴直径 0.8 mm、喷嘴温度 25 ℃、填充密度为 20%，打印速率为 50 mm/s。根据预设计的模型和参数得到不同奶酪的打印样品，测量其高度（H）和边长（L），所得测量尺寸与预设模型的理想数值进行对比，数值越接近证明打印成型效果越好。打印精确性和稳定性按式（1）~式（2）计算[17]。

$$\text{打印精确性}(\%) = \left(1 - \left|\frac{L_S - L_m}{L_m}\right|\right) \times 100 \qquad \text{式（1）}$$

$$\text{打印稳定性}(\%) = \frac{H_{60\ min}}{H_{0\ min}} \times 100 \qquad \text{式（2）}$$

式中：L_s 代表成品边长，mm；L_m 代表预设边长，mm；$H_{0\ min}$ 代表打印结束后静置 0 min 时样品的高度，mm；$H_{60\ min}$ 代表打印结束后静置 60 min 时样品的高度，mm。

1.2.4　色泽分析　通过色差仪测定样品的 L^*、a^*、b^*值进行色泽分析。L^*值为亮度，数值越高则越白；a^*值表示样品的红绿度，正值表示颜色偏红，负值表示偏向绿色；b^*值表现了样品的黄蓝度，正值表示偏黄，负值表示偏蓝，其绝对值越大则颜色倾向越显著[18]。

1.2.5　官能团测定　样品在−80 ℃ 冰箱中过夜冷冻后，取出进行真空冷冻干燥 48 h，冻干后的奶酪样品研磨成粉末，与 KBr 按照 1∶100 比例混合，用傅里叶红外光谱仪对样品在 4000~500 cm^{-1} 的波数下扫描，分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 32。

1.2.6　微观结构观察　取少量真空冷冻干燥后的样品用电导胶固定在铜板上，进行喷金处理。在 600 倍的放大倍数和 15 kV 的加速电压下，观察样品的微观结构。

1.2.7　热稳定性　称 5 mg 奶酪样品于铝制坩埚中，用压样机将坩埚密封。并放置一个空的密封坩埚作为空白对照。在 DSC 扫描期间，将样品以 10 ℃/min 的速率升温至 50 ℃，并在该温度下平衡 2 min。然后，继续以 10 ℃/min 的速率将样品加热至 300 ℃[19]。

1.2.8　分子相互作用　将 5 g 样品分别浸入蒸馏水（对照组）、尿素（6 mol/L）、β-巯基乙醇（β-ME，0.2 mol/L）和磷酸盐缓冲液（PBS，0.01 mol/L，pH7.4）中 2 h，分别破坏氢键、二硫键和静电相互作用。浸泡后，将样品在 8000 r/min 下离心 15 min，并使用流变仪对浸泡样品进行扫频测量。根据式（3）记录 ΔG'的变化[20]。

$$\Delta G'(\%) = \frac{G_0' - G_1'}{G_0'} \qquad 式（3）$$

式中：G_1'代表尿素浸泡后奶酪样品的储能模量（Pa）；G_0'对应于蒸馏水浸泡后奶酪样品的储能模量（Pa）；ΔG'代表氢键对奶酪样品的贡献程度。

1.3　数据处理

所有实验重复三次，数据测定值以平均值±标准差的形式来表示。通过 SPSS 16.0 软件对数据进行单因素方差分析，采用 Duncan 检验进行显著性分析，显著性水平为 $P<0.05$。采用 OriginPro 2025 进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　食用胶对再制奶酪流变特性的影响

2.1.1　对表观黏度的影响　由图 1 可知，奶酪样品的表观黏度在剪切速率不断增加的条件下呈现不断下降的趋势，这表明样品是一种极具代表性的假塑性流体[21]。在低剪切速率下，添加适宜浓度的瓜尔豆胶、黄原胶、可得然胶均能明显提高奶酪的表观黏度。以剪切速率为 0.1 s^{-1} 时为例，当添加 0.4% 瓜尔豆胶时，奶酪的表观黏度提升至 120 Pa·s；当添加 0.5% 黄原胶时，奶酪的表观黏度达到 108 Pa·s；当添加 0.4% 可得然胶时，奶酪的表观黏度达到 40 Pa·s。由此可见，黄原胶、瓜尔豆胶和可得然胶均具有良好

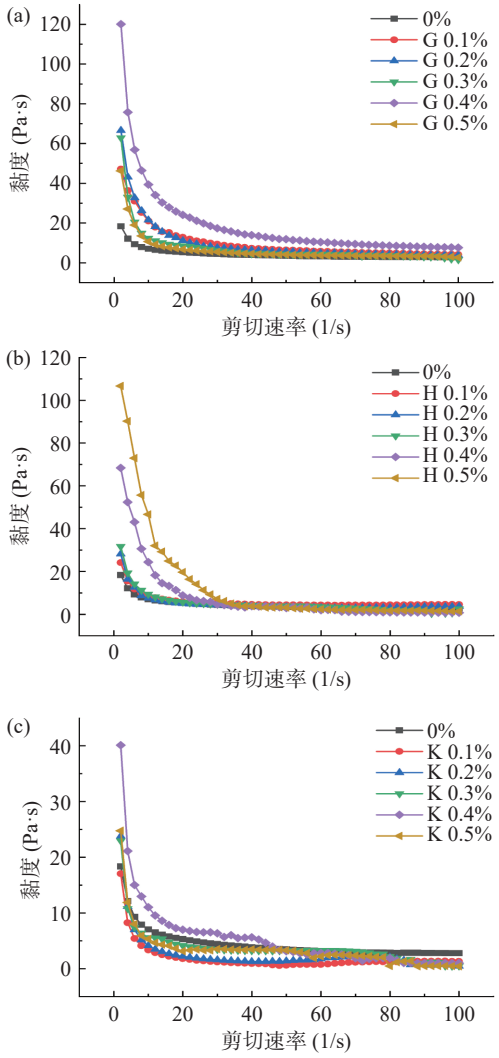


图 1　不同种类及添加量的食用胶下奶酪的流变特性

Fig.1　Rheological properties of cheese under different types and dosages of edible colloids

注：(a)瓜尔豆胶；(b)黄原胶；(c)可得然胶。

的增稠效果。该现象可能与食用胶的亲水特性有关：胶体分子通过水合作用促进蛋白质分子间的交联反应，进而与基质蛋白协同构建更为致密的三维网状结构体系[22]。但可得然胶和瓜尔豆胶在 0.5% 时，呈下降趋势，可能是因为胶体分子与蛋白交联过度，破坏了凝胶网络结构。

2.1.2　对动态流变特性的影响　图 2 流变学研究表明，适用于 3D 打印的食品基材需同时满足两个关键流变参数：适宜的流动性（体现为较低的表观黏度）以确保通过挤出喷嘴顺畅成型，以及较高的储能模量（G'）来维持打印制品的三维结构完整性。该双重流变特性约束条件构成了食品 3D 打印材料设计的核心准则[23]。

储能模量（G'）作为材料弹性响应的表征参数，反映了体系储存及恢复形变能的能力；损耗模量（G"）则表征黏性耗散特性，其物理本质对应周期性形变中能量耗散速率。如图 2 所示，样品的G'与G"均呈不同程度的上升趋势，表明胶体的加入可有效增强物料的弹性和黏性。当瓜尔豆胶、黄原胶、可得然胶添加

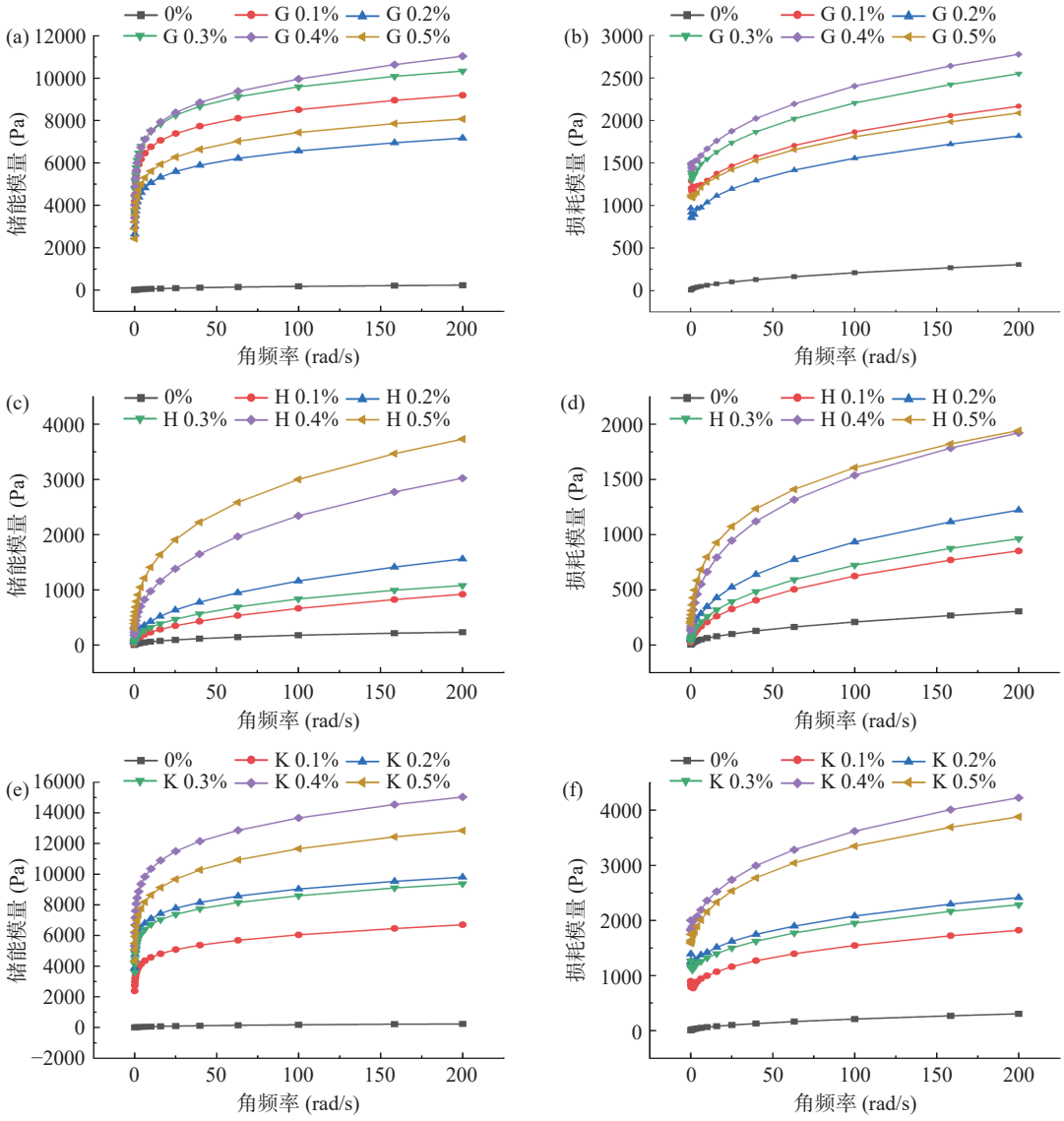


图 2　不同种类及添加量食用胶对奶酪样品黏弹性模量的影响

Fig.2　Effects of different types and amounts of edible colloids on the viscoelastic modulus of cheese samples

注:(a)瓜尔豆胶储能模量曲线;(b)瓜尔豆胶损耗模量曲线;(c)黄原胶储能模量曲线;(d)黄原胶损耗模量曲线;(e)可得然胶储能模量曲线;(f)可得然胶损耗模量曲线。

量分别为 0.4%、0.5%、0.4% 时,G'与G"达到峰值,此规律与图 1 中表观黏度随食用胶添加量增加的变化趋势一致,且在线性黏弹性区间内,所有体系的G'值系统性高于G"值,说明样品具有更多的弹性性质和类似固体的特征[24],此特性可有效提升打印过程中物料的抗形变能力。

2.2　食用胶对再制奶酪打印特性的影响

图 3 展示了不同比例黄原胶、瓜尔豆胶及可得然胶对再制奶酪 3D 打印瓢虫模型成型效果的影响。打印形状和自支撑性是评价其适印性最直观的指标,其打印品质的好坏也与再制干酪的流变特性、分子间作用力等众多指标密切相关。打印瓢虫模型样品可以直观地看出,随着添加量的增加,打印纹理越来越清晰,层次分明。当三种胶体的添加量都为 0.1% 时,打印样品表面粘连,打印纹路不清晰,其中黄原胶的自支撑性最差。当可得然胶添加量在 0.4% 时,物料展现出较好的打印外观,并且打印精确性和稳定性最高(表 1),因为此时的样品具有较低的黏度和较高的G',使其容易从喷头中挤出还能维持打印后形状。相较于可得然胶 0.4% 的打印样品,黄原胶 0.5% 和瓜尔豆胶 0.4% 的 3D 打印样品表面有由于断条而产生的小洞,这是因为黄原胶 0.5% 和瓜尔豆胶 0.4% 的样品黏度过高,导致物料在挤出过程中容易堵住喷头而断丝,这与 2.1 的流变结果相印证。

2.3　食用胶对再制奶酪色泽的影响

食品色泽作为消费者感官接受度的关键评价指标,其品质优化对产品市场竞争力具有重要影响。表 2 为分别添加不同比例的瓜尔豆胶、黄原胶和可得然胶对 3D 打印奶酪色泽的影响。未添加食用胶的再制奶酪 L^*值为 91.31,a^*值为−1.33,b^*值为 10.18。结果表明天然食品胶的加入能够降低样品的 L^*,可能是天然胶体与蛋白质结合后改变了凝胶

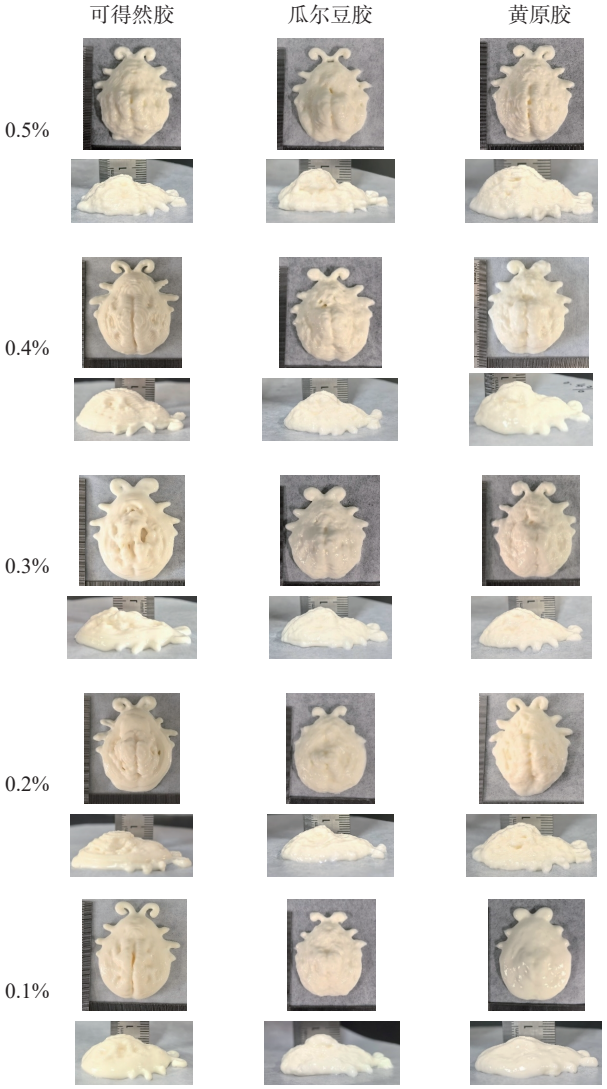


图 3　不同种类及添加量食用胶的 3D 打印奶酪效果

Fig.3　3D Printing effects of cheese with different types and amounts of edible colloids

表 1　不同种类及添加量食用胶对 3D 打印奶酪精确性及稳定性的影响

Table 1　Effects of different types and amounts of edible colloids on the accuracy and stability of 3D printed cheese

指标	添加量(%)	可得然胶	瓜尔豆胶	黄原胶
打印精确性	0.1	91.67±0.13^{g}	90.08±0.43^{h}	89.23±0.37^{i}
	0.2	95.04±0.22^{d}	89.36±0.11^{i}	92.50±0.29^{f}
	0.3	96.30±0.19^{c}	94.57±0.20^{de}	94.42±0.32^{e}
	0.4	98.62±0.03^{a}	97.54±0.24^{b}	96.27±0.19^{c}
	0.5	96.55±0.09^{c}	96.72±0.36^{c}	97.36±0.17^{b}
打印稳定性	0.1	94.28±0.13^{e}	92.71±0.27^{g}	91.39±0.14^{i}
	0.2	95.54±0.17^{d}	92.25±0.11^{h}	93.56±0.22^{f}
	0.3	96.70±0.13^{c}	94.57±0.29^{e}	95.60±0.15^{d}
	0.4	98.71±0.07^{a}	95.66±0.23^{d}	96.75±0.12^{c}
	0.5	97.59±0.21^{b}	96.68±0.17^{c}	97.69±0.16^{b}

注：表中同一指标中不同字母表示差异性显著(P<0.05)，表2同。

网络结构，降低体系对光的反射，以及胶体本身颜色对测量的影响[25]。随着可得然胶和瓜尔豆胶的添加量从 0.1% 增加到 0.5%，3D 打印奶酪的 L^*值呈现先下降后升高的趋势。对于奶酪样品 a^*值，a^*值为正，则颜色偏红；a^*值为负，则颜色偏绿。可得然胶是三种胶体中唯一能使样品 a^*值接近或达到正值的胶体(0.3% 时略负，其他添加量为正)，表明其能有效抑制奶酪的绿色调，使产品呈现中性或略带红色。而黄原胶在所有添加量下 a^*值均为负值，但随着添加量增加，a^*值逐渐向 0 趋近，绿色调减弱。添加可得然胶的 3D 打印奶酪的 b^*值稳定在 14.84~15.19 之间，显著高(P<0.05)于瓜尔豆胶(最大值 10.94)和黄原胶(最大值 14.13)。这是因为可得然胶本身的螺旋结构具有旋光性，其晶体结构中的大量氢键促使其结合更多水分，故而达到提升样品 b^*值的效果[26]。

表 2　不同种类及添加量食用胶对 3D 打印奶酪色泽的影响

Table 2　Effects of type and amounts of edible colloids on the color of 3D printed cheese

食用胶种类	添加量(%)	L^*	a^*	b^*
可得然胶	0.1	91.11±0.12^{a}	0.44±0.08^{b}	15.07±0.13^{b}
	0.2	91.01±0.02^{a}	0.40±0.06^{b}	15.19±0.04^{a}
	0.3	90.72±0.07^{bc}	−0.01±0.18^{d}	14.84±0.05^{d}
	0.4	91.20±0.09^{a}	0.37±0.05^{c}	15.07±0.11^{b}
	0.5	91.12±0.14^{a}	0.52±0.02^{a}	14.98±0.13^{c}
瓜尔豆胶	0.1	89.27±0.03^{h}	−1.55±0.18^{i}	10.94±0.05^{g}
	0.2	89.25±0.12^{h}	−1.66±0.06^{k}	10.42±0.02^{i}
	0.3	89.51±0.07^{gh}	−1.58±0.11^{j}	9.99±0.13^{l}
	0.4	89.67±0.09^{fg}	−1.60±0.07^{jk}	10.18±0.18^{j}
	0.5	89.98±0.04^{ef}	−1.51±0.02^{i}	10.61±0.07^{h}
黄原胶	0.1	87.59±0.09^{i}	−1.73±0.15^{l}	8.27±0.11^{m}
	0.2	90.77±0.11^{b}	−1.36±0.16^{h}	10.03±0.09^{k}
	0.3	90.41±0.23^{cd}	−1.22±0.09^{g}	11.64±0.04^{f}
	0.4	90.29±0.19^{d}	−1.07±0.13^{f}	11.66±0.06^{f}
	0.5	90.26±0.16^{de}	−0.78±0.11^{e}	14.13±0.07^{e}

2.4　食用胶对打印样品官能团的影响

图 4 为含有不同种类及添加量食用胶的奶酪样品的 FT-IR 光谱，所有样品显示出相同的吸收带，但强度不同，且未观测到新特征峰生成，这表明食用胶的加入没有产生新的光谱带，证实食用胶与乳蛋白间以物理相互作用(氢键/范德华力)为主导，未形成共价键合[27]。所有样品在 1160、1396、1634、2922 和 3305 cm^{-1} 附近处有吸收峰。其中，在 3200~3400 cm^{-1} 范围内的谱带与样品中水分子的(O-H)伸缩振动和氢键的形成有关，而在 2800~3000 cm^{-1} 光谱范围内发现的三重态带与蛋白质和脂质中甲基(-CH_3)和亚甲基(-CH_2)的(C-H)伸缩振动相关[28]。在 1634 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于 C=O 键的伸缩振动、1396 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于-CH_2 键的伸缩振动、1160 cm^{-1} 附近的吸收峰归因于糖苷键 C-O-C 键的伸缩振动[29]。但是，随着食用胶添加量的增加，红外光谱在波数 3256~3315 cm^{-1} 之间发生波动。添加可得然胶的奶酪样品在 3305 cm^{-1} 处出现明显红移，这证实了其 O-H 伸缩振动增强，意味着形成了更强的氢键网络[30]。而添加瓜尔豆胶和黄原胶的样品仅引起该波数的微小波动，说明其促进氢键形成的能力弱于可得然胶。

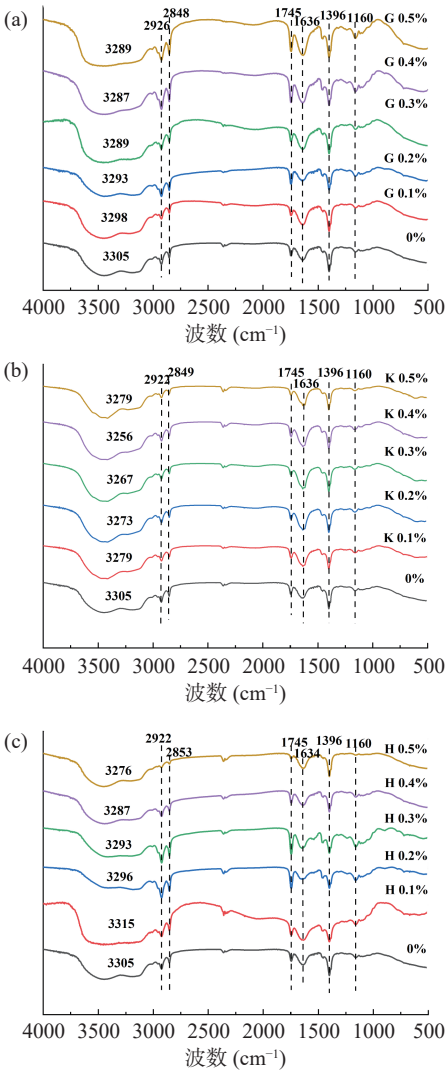


图 4　不同种类食用胶及添加量下奶酪 3D 打印样品的红外光谱图

Fig.4　FTIR spectra of 3D-printed cheese samples with varying types and concentrations of edible colloids

注: (a)瓜尔豆胶; (b)可得然胶; (c)黄原胶。

2.5　食用胶对打印样品微观结构的影响

微观结构分析能够直观表征 3D 打印食品材料的结构特性[31]。如图 5 所示, 未添加食用胶的样品呈现松散凝胶网络, 表面存在明显褶皱与孔隙, 持水能力较弱且结构稳定性不足, 导致打印成品易发生形变塌陷。添加食用胶后, 蛋白质网络致密性逐渐增强, 表面球状颗粒减少, 结构趋于均匀紧实。该结构上的变化, 与流变学测试中观测到的储能模量增加相一致, 共同表明了样品三维网络结构的增强, 这通常意味着分子间交联作用的强化。尽管瓜尔豆胶与黄原胶的增量添加可减少表面颗粒, 但其网络交联致密性仍存在缺陷, 致使打印精度与结构维持能力受限。相比之下, 0.4% 可得然胶的添加使样品表面更为光滑平整, 同时有效强化了蛋白质与胶体间的分子交联作用, 这与图 3 打印效果图一致。

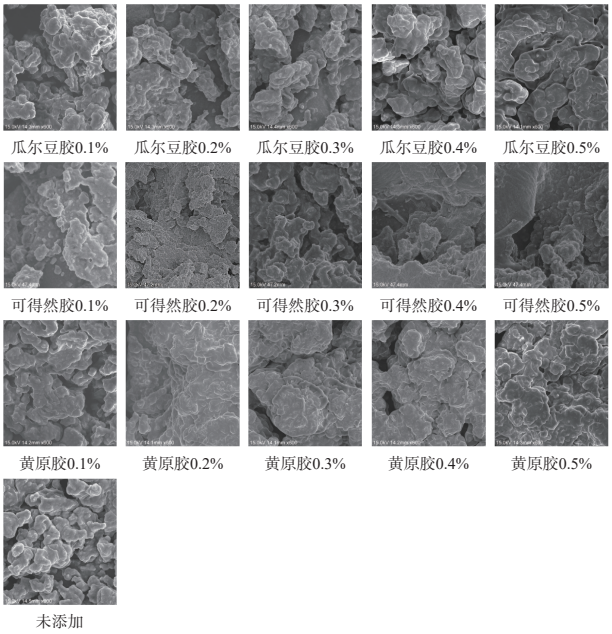


图 5　不同食用胶及添加量下打印样品的微观结构(600×)

Fig.5　Microstructure of printed samples under different edible colloids and dosage (600×)

2.6　食用胶的添加对样品热稳定性的影响

如图 6 所示, 以可得然胶组为例, 在 100℃ 附近观察到一个微弱的吸热趋势, 推测为特定乳蛋白组分(如肽、多肽及球蛋白肽)的变性过程; 第二个吸热峰出现在 175~225 ℃ 之间, 可能由结合水的解吸作用引发, 同时该温度区间也可能伴随酪蛋白变性的吸热反应, 但因峰形重叠难以明确区分[32]。由于酪蛋白网络对水分的强束缚作用, 需升温至约 200 ℃ 方可完全脱除体系中的结合水。最终, DSC 曲线在 250 ℃ 后维持平稳吸热状态, 聚合物骨架可能在此温度段发

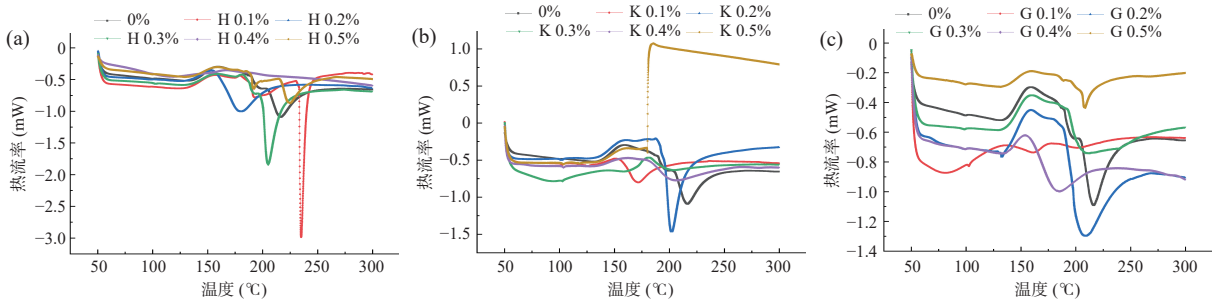


图 6　不同食用胶及添加量的样品的 DSC 曲线

Fig.6　DSC curves of samples with different edible colloids and dosages

注: 向上为放热方向; (a)黄原胶; (b)可得然胶; (c)瓜尔豆胶。

生热分解，化学键断裂[33]。黄原胶组仅在 200 ℃ 以上出现宽放热峰。

添加食用胶后的奶酪样品的热变性温度和焓变如表 3 所示。添加食用胶后的奶酪样品，在 170~240 ℃ 之间都出现了吸热峰，且随着胶体的添加量的增加，峰值温度上下波动。良好的热稳定性可确保材料在打印及加工过程中维持物化特性稳定，从而保障最终产品的食用安全性与品质[34]。

2.7　打印样品中的分子相互作用力

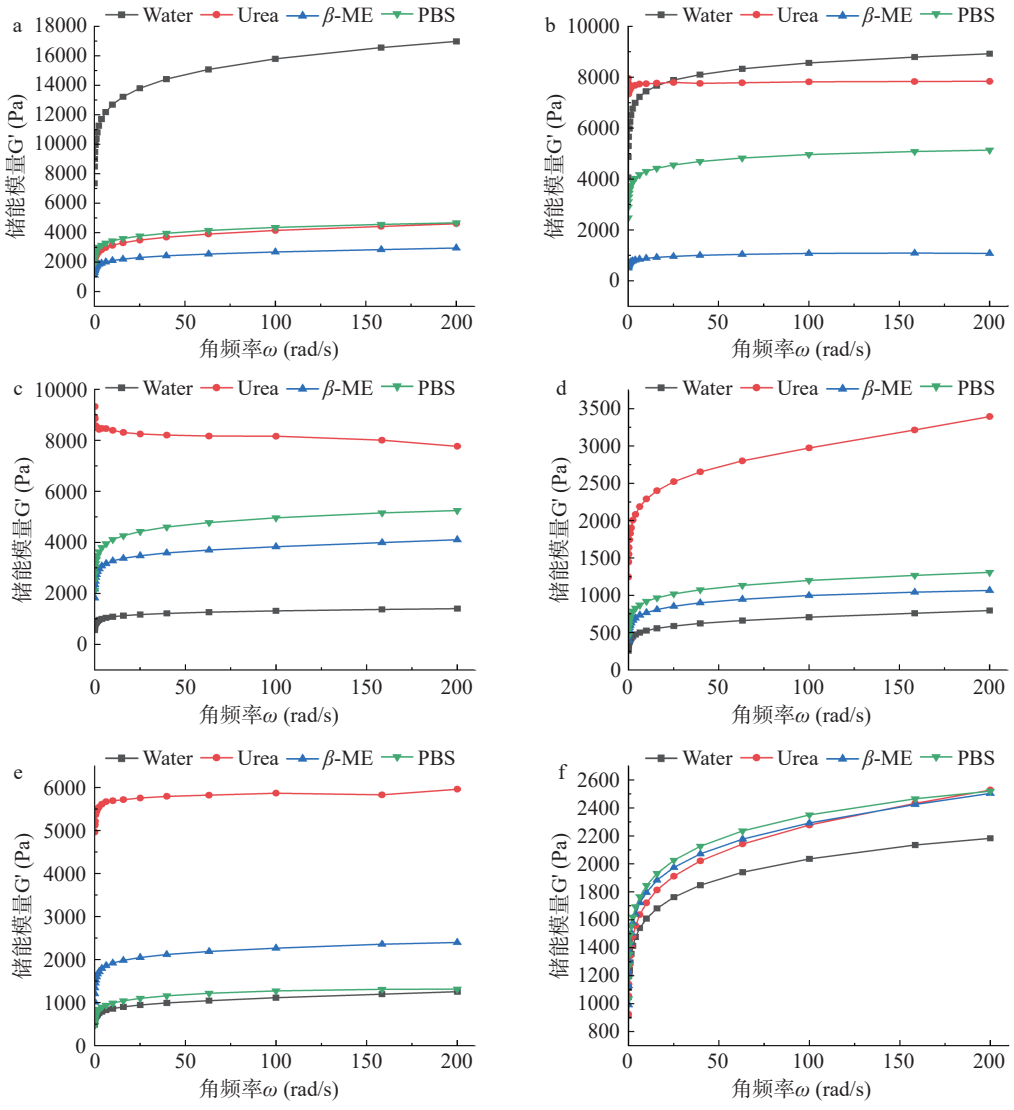
为了评价不同食用胶制备的奶酪样品的内部凝胶强度，分别采用尿素（Urea）、β-ME 和 PBS 中的分子相互作用力破坏氢键、二硫键和静电相互作用。如图 7 所示，使用这些解离剂后进行频率扫描测试以测定弹性模数。奶酪样品中食用胶类型和添加量的不同导致样品相互作用的内力在图 7a~图 7o 中显著变化。瓜尔豆胶样品（a~e）中，随着添加量的增加，主要是氢键对G'的影响大，与其半乳甘露聚糖链上丰富的游离羟基直接相关[35]。黄原胶样品（f~j）中静电相互作用对G'的影响最大，源于其阴离子特性（含 -COO⁻、-OH 等极性基团）引发的电荷络合作用。可得然胶样品（k~o）中，随着添加量的增加，尿素对G'的

表 3　不同种类及添加量食用胶对 3D 打印奶酪热力学特性的影响

Table 3　Effects of different types and addition levels of edible colloids on the thermodynamic properties of 3D-printed processed cheese

食用胶种类	添加量(%)	热变性温度(℃)	焓变(J/g)
瓜尔豆胶	0	214.72±1.36^{c}	89.39±0.14^{c}
	0.1	–	–
	0.2	205.86±1.47^{de}	115.10±0.23^{a}
	0.3	207.33±1.28^{d}	58.46±0.38^{g}
	0.4	181.77±1.53^{g}	54.53±0.33^{h}
	0.5	207.79±1.32^{d}	12.67±0.49^{m}
黄原胶	0.1	236.48±0.69^{a}	67.74±0.12^{f}
	0.2	180.08±2.31^{g}	85.79±0.45^{d}
	0.3	203.68±1.76^{ef}	75.30±0.62^{e}
	0.4	–	–
	0.5	223.19±1.88^{b}	39.87±0.46^{j}
可得然胶	0.1	171.33±1.36^{h}	34.42±0.68^{k}
	0.2	202.46±2.39^{f}	99.59±0.27^{b}
	0.3	180.50±1.49^{g}	18.25±0.58^{l}
	0.4	202.64±1.23^{f}	41.48±0.17^{i}
	0.5	–	–

注：“–”表示未检测到明显吸热峰或放热峰，即该样品在DSC扫描范围内没有出现可识别的热转变现象。



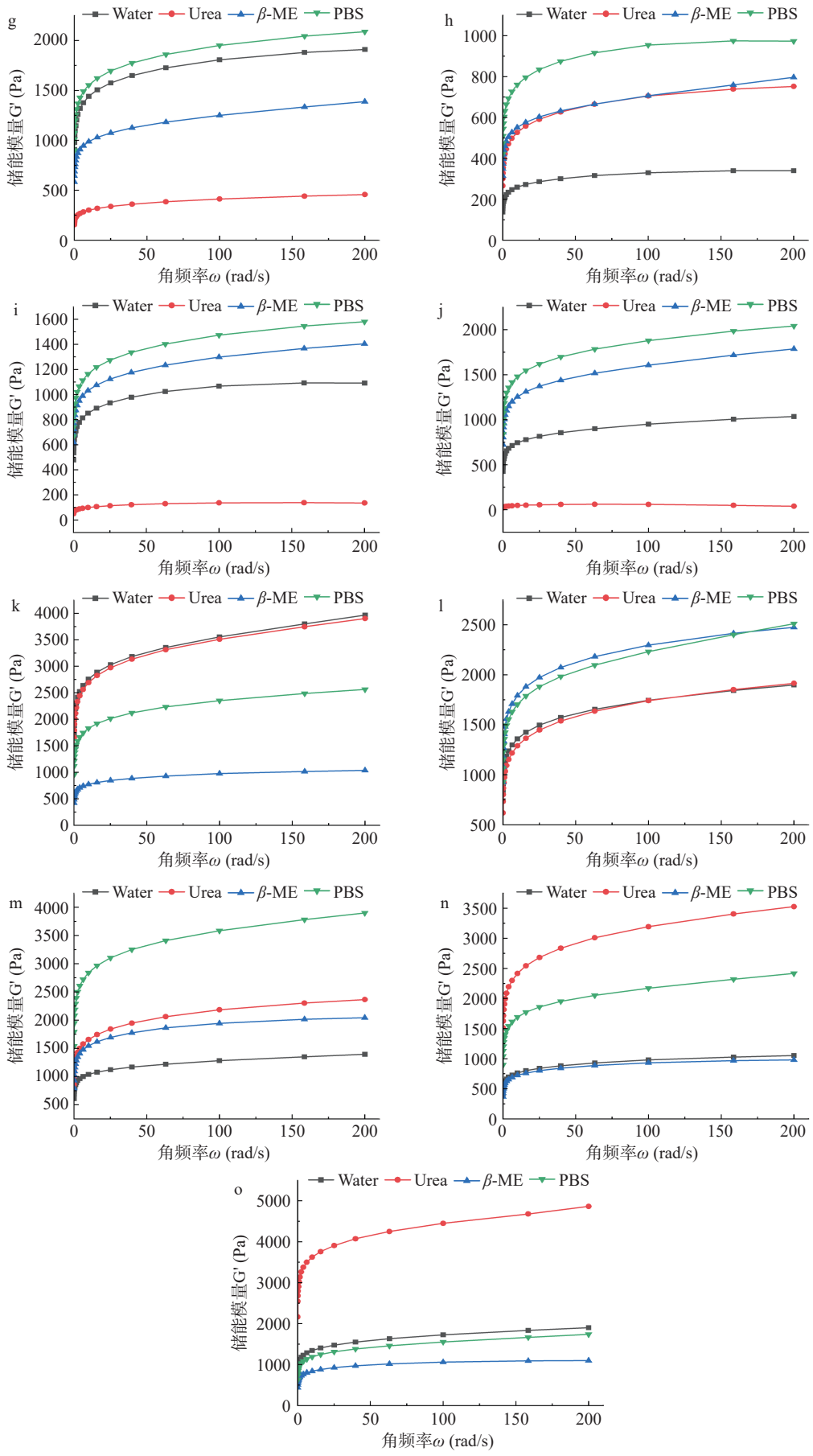


图 7　不同食用胶及添加量下奶酪样品的分子间作用力

Fig.7　Intermolecular forces of cheese samples under different edible colloids and dosage levels

注：a~e 为添加 0.1%~0.5% 瓜尔豆胶的奶酪样品；f~j 为添加 0.1%~0.5% 黄原胶的奶酪样品；k~o 为添加 0.1%~0.5% 可得然胶的奶酪样品。

影响先降低后增加，得出氢键对G'的影响随添加量的增加先降低后增加，归因于其 β-1,3-葡聚糖分子中 C-2、C-4 及 C-6 位羟基的强供体能力，可与蛋白质酰胺基形成多重氢键[36]。

在氢键对G'的影响的结果中，观察到在图 8 中由添加 0.4% 可得然胶制备的奶酪样品中ΔG'的变化最为明显。氢键对奶酪样品的贡献大小顺序为：可得然胶>黄原胶>瓜尔豆胶。作为中性多糖，可得然胶无法通过静电作用参与分子交联，其三维网络构建主要依赖羟基与蛋白质酰胺基的氢键作用[37]。

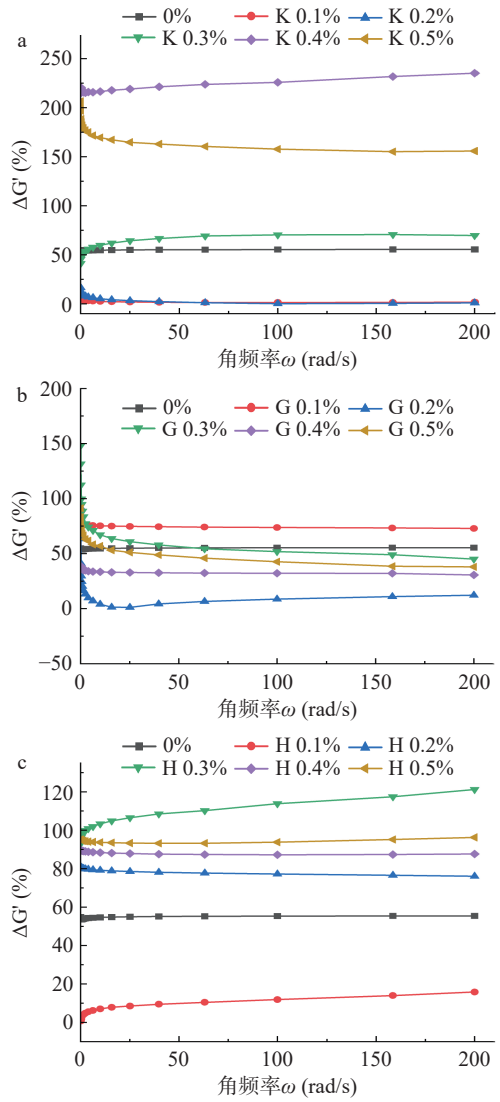


图 8　氢键破坏对奶酪样品弹性模量的影响

Fig.8　Effect of hydrogen bond breaking on the elastic modulus of cheese samples

注：a 为可得然胶；b 为瓜尔豆胶；c 为黄原胶。

3　结论

本研究通过引入不同种类及添加量的食用胶改良再制奶酪的 3D 打印性能，系统评估了其流变特性、分子间作用力、热力学行为及微观结构特征。实验结果表明，在优化条件下，0.4% 可得然胶的添加使体系表现出最佳打印适配性，打印后 60 min 内样品形态维持率最高。同时，随着可得然胶添加量增至 0.4%，体系黏度、储能模量(G')及分子间氢键作用呈现协同增强趋势。相比之下，黄原胶与瓜尔豆胶因网络交联致密性不足，导致打印成品表面粗糙度显著增加，尺寸精度与结构稳定性下降。综上，适量可得然胶的引入可有效提升再制奶酪的打印品质，为功能性乳制品 3D 打印技术提供了理论支撑。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] HAMILTON A N, MIRMAHDI R S, UBEYITOGULLARI A, et al. From bytes to bites: Advancing the food industry with three - dimensional food printing[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13293.

[2] RINSHANA P F, MURUGESAN B, KIM Y H, et al. Advances in 3D food printing technology: Innovation and applications in the food industry[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(2): 403−421.

[3] KEERTHANA K, ANUKIRUTHIKA T, MOSES J A, et al. Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: A study on button mushroom[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 287: 110116.

[4] WU J, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Improving 3D printability of pumpkin pastes by addition of surimi[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17127.

[5] RODRÍGUEZ-HERRERA V V, UMEDA T, KOZU H, et al. Formation and texture analysis of extrusion-based 3D printed foods using nixtamalized corn and chickpea flours: Effect of cooking process[J]. Applied Sciences, 2024, 14(16): 7315.

[6] AH J, TAGALPALLEWAR G P. Functional properties of Mozzarella cheese for its end use application[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54: 3766−3778.

[7] 吴志杰, 傅祥炜, 张黎, 等. 奶酪摄入与自身免疫性疾病的因果关系：一项两样本孟德尔随机化研究[J]. 海南医科大学学报, 2025, 31(8): 608−616. [WU Z J, FU X W, ZHANG L, et al. Causal relationship between cheese intake and autoimmune diseases: A two-sample Mendelian randomization study[J]. Journal of Hainan Medical University, 2025, 31(8): 608−616.]

[8] LUO H, AKKERMANS S, VERHEYEN D, et al. Tuning and modeling cheese flavor[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(5): e13420.

[9] 杜滨涛, 董闯, 张俊龙, 等. 西藏牦牛淡奶油奶酪加工工艺研究及品质分析[J]. 高原农业, 2025, 9(2): 239−248. [DU B T, DONG C, ZHANG J L, et al. Research on processing technology and quality analysis of Tibetan yak light cream cheese[J]. Plateau Agriculture, 2025, 9(2): 239−248.]

[10] ZHANG J Y, PANDYA J K, MCCLEMENTS D J, et al. Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(17): 4752−4768.

[11] JAYAKODY M M, KAUSHANI K G, VANNIARACHCHY M P G, et al. Hydrocolloid and water soluble polymers used in the food industry and their functional properties: A review[J]. Polymer Bulletin, 2023, 80(4): 3585−3610.

[12] 黄小璐, 丘苑新, 李存港, 等. 添加食用胶对红菌豆腐质构特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 175−182. [HUANG X L, QIU Y X, LI C G, et al. Effect of edible gum addition on the texture characteristics of red fungus tofu[J]. China Food Additives, 2024, 35(4): 175−182.]

[13] LEE Y, CHANG Y H. Influence of guar gum addition on physicochemical, microbial, rheological and sensory properties of stirred yoghurt[J]. International Journal of Dairy Technology, 2016, 69(3): 356−363.
[14] ZHENG Y, SUN W, YANG W, et al. The influence of xanthan gum on rheological properties and *in vitro* digestibility of kudzu (*Pueraria lobata*) starch[J]. Starch-Starke, 2020, 72(3-4): 1900139.
[15] 姜放文, 赵若冰, 赵金瑶, 等. 可得然胶与瓜尔豆胶的复配特性及其在酸奶中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(4): 23−32. [JIANG F W, ZHAO R B, ZHAO J Y, et al. Compatibility characteristics of gelatin and guar gum and their application in yogurt[J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 23−32.]
[16] 邓亦秋, 杜黎丹, 董欣琳, 等. TG 酶对再制奶酪 3D 打印特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 120−128. [DENG Y Q, DU L D, DONG X L, et al. Effect of transglutaminase on the 3D printing properties of processed cheese[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 120−128.]
[17] 黄端颖, 潘燕墨, 刘阳, 等. 食用胶改善虾肉糜 3D 打印特性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(3): 243−250. [HUANG D Y, PAN Y M, LIU Y, et al. Improving the 3D printing properties of shrimp surimi by edible glue[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3): 243−250.]
[18] 张秀玲, 杨宇. 蓝莓含量对涂抹型再制干酪的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(1): 112−117. [ZHANG X L, YANG Y. Effect of blueberry content on spreadable processed cheese[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(1): 112−117.]
[19] ZHANG C, LI X Y, LI J J, et al. The dynamic changes in physicochemical properties, functionalities, and gel properties of the starch-konjac gum mixture during the melting process: Based on three typical melting temperatures of DSC[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110495.
[20] XU M, XU Y, JI S, et al. Investigation of the 3D printability of modified starch-based inks and their formation mechanism: Application in ice cream[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110038.
[21] 郑雪梅, 乞锋辉, 靳晓伟, 等. 三赞胶对玉米变性淀粉糊化、流变特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 76−84. [ZHENG X M, QI F H, JIN X W, et al. Effect of Sanzan gum on pasting, rheological and microstructural properties of modified corn starch[J]. Food Science, 2025, 46(7): 76−84.]
[22] 张根生, 赵金娜, 遇世友, 等. 复配食用胶在肉制品加工过程中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 232−239. [ZHANG G S, ZHAO J N, YU S Y, et al. Research progress on the application of compound edible gums in meat product processing [J]. Food and Machinery, 2021, 37(9): 232−239.]
[23] ZHAO Z, WANG Q, YAN B, et al. Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102546.
[24] JI S, XU T, LI Y, et al. Effect of starch molecular structure on precision and texture properties of 3D printed products[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107387.
[25] 孔玲, 曹建宙, 李新林. 添加亚麻籽胶和瓜尔豆胶对鸭血豆腐食用品质的影响研究[J]. 肉类工业, 2022(10): 20−27. [KONG L, CAO J Z, LI X L. Study on the effect of addition of linseed gum and guar gum on edible quality of duck blood tofu[J]. Meat Industry, 2022(10): 20−27.]
[26] 曹云刚, 胡春杰, 李远征, 等. 可得然胶功能特性及在肉及肉制品中的应用进展[J]. 精细化工, 2024, 41(3): 491-498, 587. [CAO Y G, HU C J, LI Y Z, et al. Functional properties of curdlan and its application progress in meat and meat products[J]. Fine Chemicals, 41(3): 491-498, 587.]
[27] ZHONG Y, ZENG S, LÜ Y, et al. Effect of guar gum on the rheological properties, microstructure and 3D printing performance of egg yolk powder-potato starch composite gel[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110018.
[28] ONG L, PAX A P, ONG A, et al. The effect of pH on the fat and protein within cream cheese and their influence on textural and rheological properties[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127327.
[29] 刘振彬. 马铃薯泥及其淀粉混合凝胶体系的挤出型 3D 打印及后加工适应性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [LIU Z B. Study on extrusion 3D printing and post-processing adaptability of mashed potato and its starch mixed gel system[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
[30] 蔡磊, 冯蕾, 徐亚元, 等. 瓜尔豆胶对紫薯凝胶 3D 打印特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 10−17. [CAI L, FENG L, XU Y Y, et al. Effect of guar gum on 3D printing properties of purple sweet potato gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 10−17.]
[31] 冯蕾, 武敬楠, 李鸣, 等. 山药凝胶体系的 3D 打印特性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 1−7. [FENG L, WU J N, LI M, et al. 3D Printing characteristics of yam gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(23): 1−7.]
[32] ÜCOK G, SERT D. Trial productions of freeze-dried Lactobacillus plantarum culture using dairy by-products as cryoprotectants: Viability and characterization of cultures[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101541.
[33] LOPEZ C, BRIARD-BION V, CAMIER B, et al. Milk fat thermal properties and solid fat content in emmental cheese: A differential scanning calorimetry study[J]. Journal of Dairy Science, 2006, 89(8): 2894−2910.
[34] 董雷超, 陈炫宏, 王赛, 等. 马铃薯淀粉对豌豆蛋白 3D 打印材料结构及特性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 127−133. [DONG L C, CHEN X H, WANG S, et al. Effects of potato starch on the structure and properties of 3D printed materials based on pea protein[J]. Journal of Chinese Food Science, 2020, 20(1): 127−133.]
[35] 张惠琳, 林捷, 郑华, 等. 黄原胶和瓜尔豆胶对鸡血凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 106−114. [ZHANG H L, LIN J, ZHENG H, et al. Effects of xanthan gum and guar gum on the gel properties of chicken blood[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 106−114.]
[36] 潘玉雪, 徐欣东, 张润峰, 等. 凝胶多糖自组装作用及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 265−274. [PAN Y X, XU X D, ZHANG R F, et al. Research progress on the self-assembly of curdlan and its applications[J]. Food Science, 2022, 43(15): 265−274.]
[37] 刘正才, 叶志伟, 李垄清, 等. 可得然胶与生物大分子的相互作用及其研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 52−61. [LIU Z C, YE Z W, LI L Q, et al. Research progress on the interaction between curdlan and biomacromolecules[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 52−61.]