

TG 酶对再制奶酪 3D 打印特性的影响

邓亦秋¹, 杜黎丹², 董欣琳¹, 吕欣³, 李玲^{1,2}, 肖功年^{1,2*}

¹浙江科技学院生物与化学工程学院 杭州 310023

²浙江省市场局乳及乳制品监管重点实验室 杭州 310006

³西北农林科技大学食品科学与工程学院 陕西杨凌 712100)

摘要 为改善再制奶酪的 3D 打印特性,探究不同谷氨酰胺转氨酶(TG 酶)添加量对再制奶酪 3D 打印特性的影响。以市售奶油、奶酪为主要原料,采用旋转流变仪、差示扫描量热仪、傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜对再制奶酪的流变特性、热力学特性及微观结构进行表征,构建模型,进行 3D 打印成型效果分析。结果表明:不同 TG 酶添加量的再制奶酪均表现出剪切变稀性;随着 TG 酶含量的增加,物料黏度和储能模量呈上升趋势;过多的 TG 酶添加量会使物料中蛋白质交联过度,降低打印样品的黏度及外观顺滑度;TG 酶添加量为 0.04%时,3D 打印 45 min 前、后样品的坍塌率最低(0.26%,0.33%),再制奶酪 3D 打印成型效果最佳。通过 3D 打印适宜性及成型效果对比分析,证实 TG 酶能够显著提高 3D 打印再制奶酪的成型稳定性。

关键词 3D 打印; 谷氨酰胺转氨酶; 再制奶酪; 稳定性

文章编号 1009-7848(2023)09-0120-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.09.013

3D 打印技术作为一项新兴的先进技术被广泛应用于各行业,其突出的个性化风味营养定制优势,日益受到食品科研界的关注^[1-2]。由 3D 打印制作的食品口感、滋味与原材料高度相似,且可以创造出各种独特、精美的外形,能够按照各年龄层消费者的口感喜好或营养需求进行特别定制^[3]。近年来,国内外研究者对食品 3D 打印技术进行了研究,如 Tian 等^[4]探索保温温度对 3D 打印中蜂蜡-卡拉胶-黄原胶混合凝胶体系力学和结构性能的影响,为新型混合凝胶体系在 3D 打印中的开发和应用提供了一种研究方法。Chen 等^[5]研究了以蛋清、豌豆蛋白和结冷胶为主要原料,利用 3D 打印技术制备适合特定人群的人造牛排。食品 3D 打印为个性化健康饮食提供了技术支撑,在未来食品工业中有着良好的发展前景^[6]。

奶酪又被称为“奶黄金”,是种类最为丰富的乳制品之一^[7-8]。根据近 40 年在消费升级下城镇居民家庭奶酪消费的分析显示,我国以奶酪为主的干乳制品占总乳制品的消费比重逐年提升^[9]。消费

层次从追求数量向质量发展,消费者从解决温饱向注重营养丰富转变,国内奶酪市场已走进黄金发展阶段,然而仍无法与发达国家相比^[10]。2020 年,相比于奶酪消费量高出几十倍的西方国家,中国人均奶酪的年消费量仅 0.2 kg^[11]。这主要是由于国内消费者对西式奶酪风味接受度较低等原因,导致奶酪生产、消费占比较低。对奶酪进行再制,改善其风味,是拓宽奶酪国内市场的主要方式。3D 打印技术的利用,有利于推进个性化风味及营养的实现,增加奶酪产品的吸引力。然而,大部分奶酪原料本身或再制后并不适用于 3D 打印,需通过改善其流变特性、质构特性等来提高奶酪的适印性。

谷氨酰胺转氨酶(TG 酶)作为食品加工中常用的增稠剂,可通过蛋白多肽链上的酰基转移反应促进蛋白质之间的交联,形成紧密的网状凝胶结构^[12-13]。目前,利用 TG 酶来改善食品质构及流变特性的相关研究已有很多,且在鱼肉制品、乳制品、植物蛋白制品等多种食品中得到应用^[14]。然而,鲜见有关使用 TG 酶来改善再制奶酪 3D 打印特性的研究报道。本试验以市售奶油、奶酪为主要原料,利用 TG 酶改良再制奶酪,开发适宜 3D 打印的再制奶酪体系,探究 TG 酶对再制奶酪 3D 打印特性的影响规,为 3D 打印再制奶酪的生产应用

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 浙江省市场监管局“雏鹰计划”培育项目
(CY2022345)

第一作者: 邓亦秋,女,硕士生

通信作者: 肖功年 E-mail: xiaogongnian@126.com

提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

奶油、奶酪(蛋白质 15%、脂肪 57%、碳水化合物 1%、钠 14%),食品级,上海恒天然商贸有限公司;TG 酶,食品级,合肥博美生物科技有限公司;乳化盐(多聚磷酸钠、焦磷酸钠),食品级,浙江诺一生物科技有限公司;其它常规实验室试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

V70 IR Spertrometer 傅里叶变换红外光谱仪,德国布鲁克公司;MCR 301 旋转流变仪,德国 Anton Paar 公司;DSC-60 差示扫描量热仪,日本岛津公司;SU1510 扫描电子显微镜,日本日立公司;DL91200 数显游标卡尺,上海得力有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅,国华电器有限公司;FOODBOT-S2 食品 3D 打印机,杭州时印网络科技有限公司等。

1.3 试验方法

1.3.1 再制奶酪的制备 称取 50 g 奶油、奶酪样品,加入质量分数为 1.5%的焦磷酸钠、聚磷酸钠(体积比 1:1)乳化盐及 25%的蒸馏水放置于 80 °C 的恒温水浴锅中加热融化 20 min,均质至外观均匀无颗粒感,冷却至室温再分别添加不同含量的 TG 酶(0%,0.02%,0.04%,0.06%,0.08%),置于 55 °C 恒温水浴锅中 30 min 后,85 °C 灭菌 30 min,最后冷却灌装,-4 °C 冰箱内储藏 24 h,用于样品检测分析。

1.3.2 模型及参数设置 通过食品 3D 打印机图库构建一个空心长方体,长宽高为 30 mm×30 mm×15 mm 的几何形状。3D 打印机参数设置如下:喷嘴直径 0.8 mm、喷嘴温度 25 °C、填充率为 10%,打印速率为标准。

1.3.3 流变特性分析 测定不同 TG 酶添加量对奶酪样品流变特性的影响,得到表观黏度曲线,用于分析再制奶酪 3D 打印的适印性。选取直径 40 mm 的平板,间隙设置为 1 mm,剪切速率扫描范围 0.1~100 s⁻¹,测试温度 25 °C,记录表观黏度随剪切速率增加的变化。在角频率 0.1~100 rad/s 内进行动态频率扫描。测量前,样品先从-4 °C 冰箱内取出

在平台上静置 1 min 以达到设置温度^[15-16]。

1.3.4 3D 打印成型效果 根据预设的模型及参数得到不同 TG 酶添加量的再制奶酪 3D 打印样品,用数显游标卡尺(分辨力 0.01、测量精度≤±0.03)测量样品的高度 h_1 (打印 0 min 后的高度)、 h_2 (打印 45 min 后的高度),计算样品坍塌率。

1.3.5 热力学特性分析(DSC) 测定不同 TG 酶添加量对奶酪样品热力学特性的影响,计算蛋白质变性温度、焓变值等。称取 5~10 mg 的奶酪样品于铝制坩埚中,用压样机将坩埚密封后用于试验上样。样品在 30 °C 平衡 5 min,以 5 °C/min 的速度升温至 150 °C,每个样品测定时均放置空坩埚作为空白对照。氮气作为保护气体,计算奶酪凝块的相变起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)和焓变(ΔH)^[17-18]。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱分析(FT-IR) 将不同 TG 酶添加量的奶酪样品放置于-80 °C 冰箱内冷冻 24 h,取出进行真空冷冻干燥,冻干完成的奶酪样品研磨成粉末,与 KBr 按照适当比例(体积比 1:100)混合,室温下测定其红外光谱^[19]。

1.3.7 微观结构分析(SEM) 采用扫描电子显微镜观察再制奶酪的微观结构,从打印好的奶酪样品中切取 2~5 g 的凝块,加入体积分数 2.5%戊二醛及 pH 为 7.4 的磷酸缓冲溶液中,25 °C 静置 2 h,然后分别用 70%,80%,90%,100%质量分数的乙醇进行梯度脱水 10 min,真空冷冻干燥后,将样品固定在铜板上,进行喷金处理。在 1 000 倍的放大倍数和 15 kV 的加速电压下,得到奶酪样品的微观结构照片^[20]。

1.4 数据处理

整理试验数据,采用 origin 9.1 进行作图。

2 结果与分析

2.1 流变特性

2.1.1 TG 酶对再制奶酪表观黏度的影响 不同 TG 酶添加量的再制奶酪表观黏度曲线如图 1 所示。再制奶酪样品的表观黏度均随着剪切速率的增加而逐渐下降,说明不同 TG 酶添加量的再制奶酪都表现出类似的剪切变稀现象,具有剪切变稀性,满足食品 3D 适印性。

当剪切速率 1~10 s⁻¹ 范围内,再制奶酪的表

观黏度下降明显;当剪切速率从 10 s^{-1} 继续增加到 40 s^{-1} 时,表观黏度的下降速率逐渐变慢,曲线局部趋于平缓;当剪切速率仍然继续增大,表观黏度无限接近于 $0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,即此时再制奶酪无限接近于牛顿流体^[21]。且由于TG酶的加入,相对于未添加TG酶的再制奶酪样品的表观黏度均有所增加。当TG酶添加量为0.04%时,表观黏度最大。当TG酶添加量继续增加时(0.06%,0.08%),物料中蛋白质交联过度,黏度下降。物料的黏度对其3D打印特性及产品的稳定性有重要影响。

2.1.2 TG酶对再制奶酪动态流变特性的影响 不同TG酶添加量对再制奶酪动态流变特性结果如图2a、2b所示,通常储能模量 G' 也称弹性模量,表达了物料弹性的大小,损耗模量 G'' 也称黏性模量,表达了物料黏性的大小。

由图2a可知,随着TG酶含量的增加,再制奶酪 G' 呈上升趋势,说明TG酶的加入提高了物料的弹性。由图2b可知,随着TG酶含量的增加,再制奶酪 G'' 呈先上升后下降的趋势,在TG酶添加量为0.04%时最大,这也图1中表观黏度随剪切

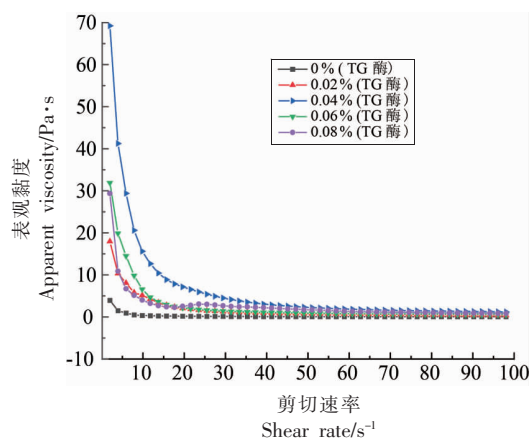


图1 不同TG酶添加量再制奶酪的表观黏度曲线
Fig.1 Apparent viscosity curve of processed cheese with different TG addition

速率增加的变化原因相一致。且在所有的样品组中 G' 始终大于 G'' ,说明再制奶酪表现出更多的弹性,形成了稳定的蛋白交联弹性结构。而这种弹性结构在外力作用下能够保持相对稳定,有利于食品3D打印在沉积打印平台上时各层之间的抗形变能力。

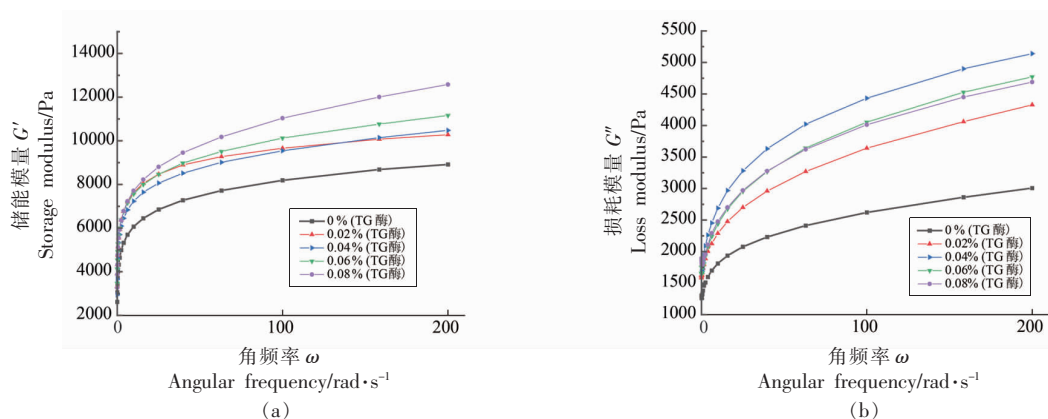


图2 不同TG酶添加量再制奶酪的动态流变曲线

Fig.2 Dynamic rheological curves of processed cheese with different TG addition

2.2 打印成型效果分析

根据试验方法中3D打印再制奶酪预设的打印参数及模型,打印样品是长宽高约为 $30 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}\times 15 \text{ mm}$ 的空心长方体,不同TG酶添加量对再制奶酪的3D打印成型效果如图3所示。

可以看出,打印0 min和打印45 min后高度随着TG酶添加量的增加而越来越接近预设值的模型高度,整体外形越来越接近预设值的空心长

方体形状,说明TG酶的添加提高了3D打印再制奶酪的成型稳定性。

当TG酶添加量为0.04%时,3D打印成型效果最佳,可以很好挤出成型,且各层之间堆叠紧密,未出现明显塌陷,表面光滑,打印45 min后样品高度视觉上无明显偏差,抗形变能力良好,能较好的维持样品最初打印形态。当TG酶添加量为0.02%时,打印样品与预设值模型存在一定的差

异,这是因为物料硬度、弹性不足,下层的塌陷和细丝之间的中间距离导致上层的细丝由于缺乏支撑而塌陷,打印 45 min 样品高度也明显降低,抗形变能力较差。当 TG 酶添加量为 0.06%,0.08% 时,因蛋白质交联过度,导致物料弹性增加过度,黏度下降,而成型效果不佳、外形较粗糙,可以观

察到虽然打印 0 min 与 45 min 后样品高度无明显变化,但其外形均出现塌陷和缺口,导致空心长方体不完整,细丝挤出时延展性较差,出现断线的现象,使局部上层受到下层的影响,从而导致奶酪成型效果不佳、外形较粗糙。这也验证了 2.1.2 节中流变特性的结果。

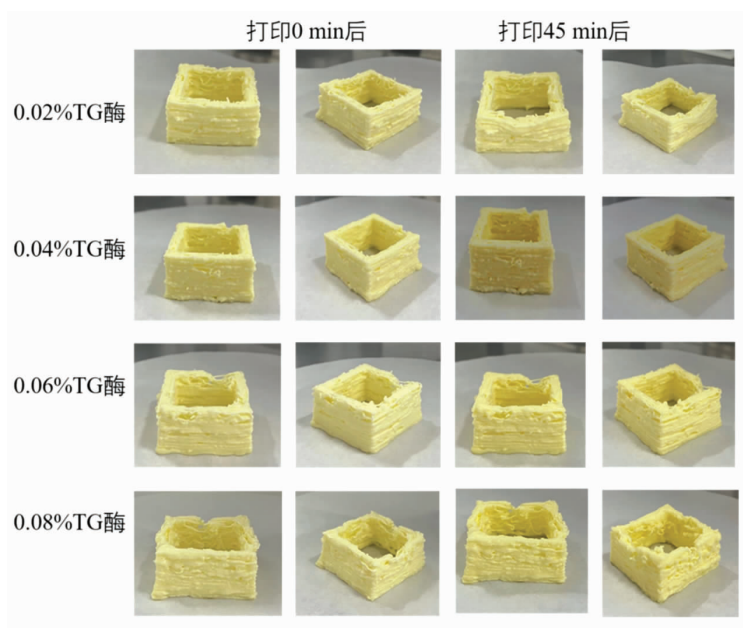


图 3 不同 TG 酶添加量下的打印效果

Fig.3 Printing effect under different TG enzyme addition

表 1 为不同 TG 酶添加量对再制奶酪 3D 打印坍塌程度的数据分析。坍塌率 a 为打印 0 min 高度与模型高度差的绝对值占模型高度的百分比;坍塌率 b 为打印 45 min 后高度与模型高度差的绝对值占模型高度的百分比。

由结合图 3 和表 1 可知,不同 TG 酶添加量的 3D 打印样品坍塌率差异显著,TG 酶的加入能够改善其坍塌率,从而使打印样品的抗形变能力

得到提高。当 TG 酶添加量为 0.04% 时,打印 45 min 前后坍塌率最小 (0.26%,0.33%),3D 打印成型效果最佳;TG 酶添加量为 0.02% 时,打印 45 min 前后坍塌率最大 (8.86%,16.53%),导致样品成型效果最差;随着 TG 酶添加量的增加,因再制奶酪凝胶体系交联过度,使得样品的坍塌率相比于 TG 酶添加量为 0.04% 时有所增加,样品成型效果偏差。

表 1 不同 TG 酶添加量对再制奶酪 3D 打印坍塌程度的影响

Table 1 Effects of different TG enzyme additions on the degree of collapse of 3D printing of reconstituted cheese

TG 酶添加量/%	模型高度/mm	高度 h_1 /mm	坍塌率 a /%	高度 h_2 /mm	坍塌率 b /%
0.02	15.00	13.67	8.86%	12.52	16.53%
0.04	15.00	14.96	0.26%	14.95	0.33%
0.06	15.00	14.93	0.46%	14.92	0.53%
0.08	15.00	14.65	2.30%	14.61	2.60%

2.3 热力学特性

不同 TG 酶添加量的再制奶酪热分析如图

4a~4e 所示, $a\sim e$ 分别代表 TG 酶添加量为 0%,0.02%,0.04%,0.06%,0.08% 的再制奶酪。

可以看到曲线中出现的吸收峰,是由于蛋白质加热处理发生变性所导致^[22]。而随着TG酶的添加出现了新的小吸收峰,说明在此出峰温度下有一稳定的结构存在,可认为是由于TG酶的加入对再制奶酪的蛋白质网络结构起到一定的修饰作用,这也与已报道的芝麻分离蛋白会对奶酪蛋白

质凝胶体系起修饰作用的原理相同^[23]。如图4a,且结合表2可知,当未添加TG酶时,无新小吸收峰出现,且所需峰值温度(T_{p1})较高;当添加TG酶为0.02%~0.08%时,均出现了新的小吸收峰,且随着TG酶添加量的增加,新的吸收峰峰值温度(T_{p2})逐渐降低。

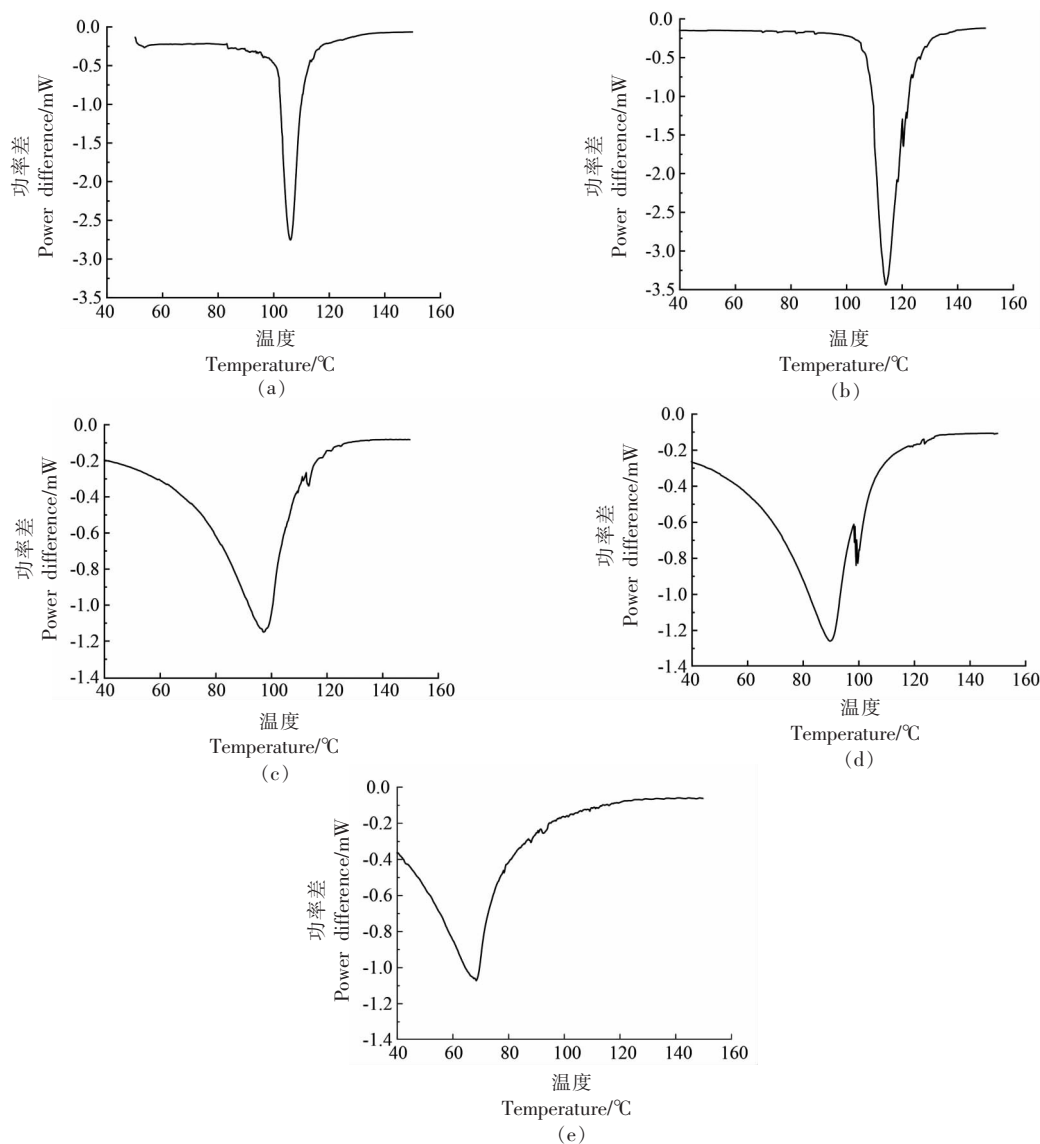


图4 TG酶对再制奶酪DSC变化影响的热分析

Fig.4 Thermal analysis of the effect of TG enzyme on DSC of processed cheese

表2为不同TG酶添加量的热分析数据。表中峰值温度 T_p 为蛋白质变性温度,焓变值 ΔH 正比于曲线面积,为放热量,可通过蛋白质热变性、焓变值来判断再制奶酪的热稳定性。随着TG酶添加量的增加,起始温度 T_0 、峰值温度 T_p 总体呈

下降的趋势,焓变值 ΔH 在未添加TG酶的基础上均增加,说明TG酶的加入在一定程度上提高了再制奶酪的热稳定性。当TG酶添加量为0.08%时,焓变值最小。

表 2 TG 酶对再制奶酪 DSC 变化的热分析数据

Table 2 Thermal analysis data of DSC changes of processed cheese by TG enzyme

奶酪样品	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_{p2}/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H/J \cdot \text{g}^{-1}$
a	101.6	104.8	—	110.2	502.8
b	109.2	113.2	118.7	119.9	892.2
c	77.2	96.8	113.3	112.4	794.0
d	68.5	89.5	98.9	98.4	867.7
e	56.1	88.2	92.4	76.0	212.6

2.4 傅里叶变换红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱可以检测氢键存在并可间接比较其强度，其波数越低表明成分之间的相互作用越强^[24]。

不同 TG 酶添加量的再制奶酪的傅里叶变换红外光谱如图 5 所示，所有样品在红外谱图中都具有相同的特征峰，说明添加 TG 酶后没有产生新的官能团。在 $3\ 297\sim 3\ 405\ \text{cm}^{-1}$ 周围出现的吸收峰是由于分子缔合羟基振动产生的。未添加 TG 酶时，样品红外吸收光谱在羟基振动处吸收峰波数最大，为 $3\ 405\ \text{cm}^{-1}$ 。随着 TG 酶添加量增加向较短波数偏移，当 TG 酶添加量为 0.08% 时，样品红外吸收光谱在羟基振动处吸收峰波数达最小为 $3\ 297\ \text{cm}^{-1}$ 。说明 TG 酶加入使氢键强度变强，3D 打印的再制奶酪样品能维持稳定结构。

2.5 微观结构分析

图 6a~6e 显示了 TG 酶添加量依次为 0%，0.02%，0.04%，0.06% 和 0.08% 的再制奶酪的扫描电镜图。可以看出，在不同 TG 酶添加量下再制奶酪的微观结构差异显著。

如图 6a 所示，未添加 TG 酶的再制奶酪凝胶网络结构松散，表面褶皱和空洞比较明显，导致持水力差而变得不稳定^[25]，使得 3D 打印后的成品形状容易出现塌陷的现象。而随着 TG 酶的添加，奶酪样品蛋白质网络结构逐渐变得紧密。当 TG 酶添加量为 0.02%，0.04% 时，样品的微观结构仍呈现一定的球状颗粒感，与未添加 TG 酶的样品相比，出现了一定的蛋白质交联性，样品结构更加平整、致密；当 TG 酶添加量为 0.06%，0.08% 时，奶酪的微观结构呈现紧密的片状网络结构，与未添加 TG 酶的奶酪有显著差异。说明 TG 酶的加入起到交联蛋白质的作用，形成较高机械强度的奶酪凝胶体系，提高了样品打印形状的成型稳定性。

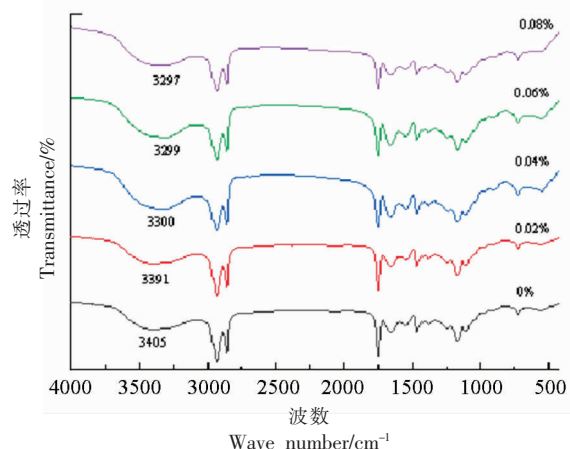


图 5 不同 TG 酶添加量再制奶酪的红外吸收光谱
Fig.5 Infrared absorption spectra of reconstituted cheese with different TG enzyme addition

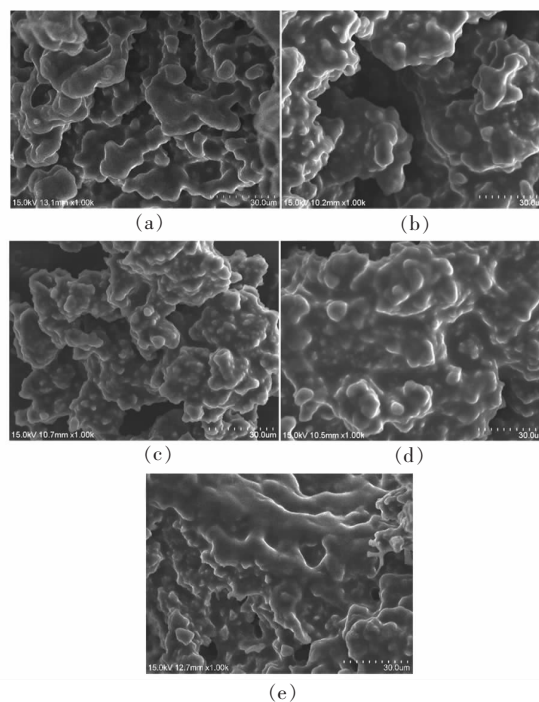


图 6 不同 TG 酶添加量再制奶酪的微观结构
Fig.6 Microstructure of reconstituted cheese with different TG enzyme addition

3 结论

本研究探索了再制奶酪的3D打印制备,并利用TG酶来改善其打印特性。利用旋转流变仪、差示扫描量热仪、扫描电镜等对各组分进行3D打印适宜性及成型稳定性对比分析,证实了TG酶能够显著提高3D打印再制奶酪的成型稳定性等。1)在本研究条件下,0.04% TG酶的添加量最适宜于再制奶酪3D打印,且3D打印45 min前后样品的坍塌率最小(0.26%,0.33%);2)在食品安全范围内,随着TG酶的添加量增加至0.04%时,再制奶酪的黏度、G'及氢键强度等均有所增加;3)当TG酶添加量为0.06%,0.08%时,过量的添加TG酶使蛋白交联过度,导致再制奶酪黏度等反而下降,打印样品表面变得粗糙。由本研究结果可知,适度添加TG酶能有效改善再制奶酪的3D打印特性,提高打印产品成型稳定性,这能够为再制奶酪的制备提供新思路。

参 考 文 献

- [1] BHAT Z F, MORTON J D, KUMAR S, et al. 3D printing: Development of animal products and special foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 87-105.
- [2] BAREEN M A, JOSHIA S, SAHU J K, et al. Assessment of 3D printability of heat acid coagulated milk semi-solids 'soft cheese' by correlating rheological, microstructural, and textural properties [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 300: 110506.
- [3] TOHIC C L, O'SULLIVAN J, DRAPALA K P, et al. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 56-64.
- [4] TIAN H, WANG K, QIU R, et al. Effects of incubation temperature on the mechanical and structure performance of beeswax-carrageenan-xanthan hybrid gelator system in 3D printing[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107541.
- [5] CHEN J W, SUN H N, MU T H, et al. Effect of temperature on rheological, structural, and textural properties of soy protein isolate pastes for 3D food printing[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 323: 110917.
- [6] 曹沐曦, 詹倩怡, 沈晓琦, 等. 3D打印技术在食品工业中的应用概述[J]. 农产品加工, 2021, 1: 78-82.
CAO M X, ZHAN Q Y, SHEN X Q, et al. Review on the application of 3D printing technology in the food industry [J]. Farm Products Processing, 2021, 1: 78-82.
- [7] ROSS M, CROWLEY S V, CROTTY S, et al. Parameters affecting the printability of 3D-printed processed cheese[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 72: 102730.
- [8] 蔡琳飞, 李键, 陈炼红. 我国奶酪产品研究现状及分析[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(7): 42-44, 48.
CAI L F, LI J, CHEN L H. Research status and analysis of cheese products in China[J]. China Dairy Industry, 2015, 43(7): 42-44, 48.
- [9] 杨祯妮, 程广燕. 在消费升级下城镇居民家庭奶酪消费分析——基于全国6市奶类消费调查数据[J]. 中国乳业, 2021, 12(2021): 24-29.
YANG Z N, CHENG G Y. Cheese consumption analysis of urban households under consumption upgrading-based on milk consumption survey data of 6 cities in China[J]. China Dairy Industry, 2021, 12: 24-29.
- [10] 陈忠明, 郭庆海, 姜会明. 居民食物消费升级与中国农业转型[J]. 现代经济探讨, 2018(12): 120-126.
CHEN Z M, GUO Q H, JIANG H M. Food consumption upgrading and agricultural transformation in China[J]. Discussion on Modern Economy, 2018(12): 120-126.
- [11] 李竞前, 张书义, 闫奎友, 等. 我国奶酪产业发展现状及对策研究[J]. 中国乳业, 2021, 2: 14-16.
LI J Q, ZHANG S Y, YAN K Y, et al. Research on current situation and countermeasures of cheese industry development in China[J]. China Dairy Industry, 2021, 2: 14-16.
- [12] LI H J, LIU Y, SUN Y J, et al. Properties of polysaccharides and glutamine transaminase used in mozzarella cheese as texturizer and crosslinking agents[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 411-416.
- [13] JOYE I J, LAGRAN B, DELCOUR J A. Use of chemical redox agents and exogenous enzymes to modify the protein network during breadmaking—A review[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 11-21.

- [14] 刘汉灵, 韦梅, 杨彩菊. 高效谷氨酰胺转胺酶(TG酶)产品在食品加工中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2008, S1: 253-258.
LIU H L, WEI M, YANG C J. Application of high efficiency glutamine transaminase (TGase) products in food processing [J]. Chinese Food Additives, 2008, S1: 253-258.
- [15] 刘敏, 赵欣, 阚建全, 等. 黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 45-50.
LIU M, ZHAO X, KAN J Q, et al. Effects of Xanthan gum on gelatinization properties rheology and texture properties of lotus root starch[J]. Food Science, 2018, 39(6): 45-50.
- [16] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 76-82.
- [17] WANG L F, MA Y, CUI J, et al. Thermal properties of yak α -lactalbumin and β -lactoglobulin: a DSC Study[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(12): 2261-2267.
- [18] 胡陵. 酸变性酪蛋白与高酯果胶作用机理的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013.
HU L. Study on the interaction mechanism between acid denatured casein and high ester pectin [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013.
- [19] 郑文祺, 蒙珍妮, 李红波, 等. 木耳-鸡骨粉混合凝胶体系的 3D 打印及质构特性调控[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 1-8.
ZHENG W Q, MENG Z N, LI H B, et al. 3D Printing of fungus-chicken bone powder mixed gel system and its texture modification[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 1-8.
- [20] 姜姝, 腾军伟, 刘振民, 等. 超高压处理对再制奶油干酪质构、流变学特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 84-91.
JIANG S, TENG J W, LIU Z M, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on texture, rheological properties and microstructure of reprocessed cream cheese[J]. Food Science, 2021, 42(5): 84-91.
- [21] 王崑, 杨领, 李学鹏, 等. TG 酶对金线鱼鱼糜 3D 打印效果的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 74-81.
WANG W, YANG L, LI X P, et al. Effect of TG enzyme on 3D printing effect of golden thread surimi[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 74-81.
- [22] 汪立君, 李里特, 张晓峰, 等. 利用 DSC 对大豆蛋白质热变性的研究 [J]. 中国农业大学学报, 2001, 6: 93-96.
WANG L J, LI L T, ZHANG X F, et al. Study on soybean protein heating denaturation by DSC[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6: 93-96.
- [23] 卢晓明, 左芳雷, 郭慧媛, 等. 芝麻分离蛋白对牛乳微观形态及干酪 DSC 特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 110-114.
LU X M, ZUO F L, GUO H Y, et al. Effects of sesame protein isolate on microstructure of milk and DSC characteristics of cheese[J]. Journal of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 110-114.
- [24] SHALVIRI A, LIU Q, ABDEKHODAIE M J, et al. Novel modefide starch-xanthan gum hydrogels for controlled drug delivery: Synthesis and characterization[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(4): 898-907.
- [25] 高飞, 杨畅, 李洪亮. 柠檬酸钾与 TG 酶对牛乳酸凝乳形成的协同作用[J]. 食品工业, 2021, 42(11): 206-210.
GAO F, YANG C, LI H L. The combined effect of potassium citrate and transglutaminase on the texture and microstructures of acid-induced milk gels [J]. The Food Industry, 2021, 42(11): 206-210.

Effect of Transglutaminases Enzyme on Three-dimensional Printing Characteristics of Recast Cheese

Deng Yiqiu¹, Du Lidan², Dong Xinlin¹, Lü Xin³, Li Ling^{1,2}, Xiao Gongnian^{1,2*}

¹College of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023

²Key Laboratory of Dairy Products Supervision of Zhejiang Provincial Market Bureau, Hangzhou 310006

³College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract To improve the three-dimensional (3D) printing characteristics of reproduction cheese and investigate the effects of the addition of different glutamine transaminases (TGase) on these characteristics. Using cream cheese as the main raw material, the rheological properties, thermodynamic characteristics, and microstructure of the reconstituted cheese were studied via rotary rheometry and differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy, and a model was constructed for 3D printing and molding effect analysis. The reproduction cheese with different TG enzyme additions showed shear and thinning properties. Moreover, with the increase in the TG enzyme content, the viscosity, and energy storage modulus of the material also increased; however, when TG enzyme addition was increased to a critical amount, which would cause overlinking of the proteins in the material, thus reducing the viscosity and smoothness of the printed samples. When the amount of the added TG enzyme was 0.04% and the sample collapse rate was minimal for 45 min before and after 3D printing (0.26%, 0.33%), the reconstituted cheese 3D printing and molding effect was the best. Through the comparative analysis of 3D printing suitability and molding effect, it was confirmed that the TG enzyme can significantly improve the molding stability of 3D printed and reproduction cheese.

Keywords 3D printing; glutamine transaminase; recast cheese; stability