

葡萄糖氧化酶和过氧化氢酶对面团与面包品质的影响

邓家璐, 陆利霞, 姚丽丽, 林丽军, 熊晓辉

(南京工业大学食品与轻工学院, 江苏南京 210009)

摘要: 本文研究了葡萄糖氧化酶 (glucose oxidase, 简称 GOD)、过氧化氢酶 (catalase, 简称 CAT) 及其复合酶对面团发酵体积以及面团和面筋持水率、巯基、二硫键及微观结构的影响, 进而将其对面包的质量、比容、感官指标及质构指标的影响进行了比较分析。研究表明 GOD 添加量为 15 mg/kg 时, 面包比容从 4.33 mL/g 显著增加到 5.52 mL/g。GOD 添加量为 20 mg/kg 时, 面包硬度、胶粘性和咀嚼性分别为 233.33 g、141.00 mJ 和 704.82 mJ, 与空白组相比具有显著性 ($p < 0.05$) 差异。而添加 GOD 的面包的内部聚性无显著差异。当 CAT 添加量为 10 mg/kg 时, 面包比容显著增加到 4.98 mL/g。CAT 浓度为 15 mg/kg 时, 面包硬度、胶黏性和咀嚼性显著降低, 而内部聚性显著增强。复合添加 GOD、CAT 使面团发酵体积增大, 且优于添加单一酶的效果。添加 GOD 可以促进面团持水率增加到 64.38%, 而 CAT 及复合酶组间显著 ($p < 0.05$) 降低面团及面筋持水率。添加 GOD、CAT 可显著降低 ($p < 0.05$) 面团中巯基含量, 增加二硫键含量, 其中复合酶组变化率最大。从面团及面筋微观结构上, 添加 GOD、CAT 与空白组相比, 可促进面团中面筋网络的改善, 并使面筋结构孔洞更均一, 面筋网络更完整、连续。

关键词: 葡萄糖氧化酶; 过氧化氢酶; 面包; 品质

文章编号: 1673-9078(2019)12-28-40

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.12.005

Effects of Glucose Oxidase and Catalase on Dough and Bread Quality

DENG Jia-luo, LU Li-xia, YAO Li-li, LIN Li-jun, XIONG Xiao-hui

(College of Food Science and Light Industry, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The effects on fermentation volume of dough and the water holding rate, sulfhydryl group, disulfide bond and microstructure of dough and gluten were analyzed by adding glucose oxidase (GOD), catalase (CAT) and their complex enzymes. Then the effects on the weight, specific volume, sensory index and texture index of bread were compared and clarified. The results showed that when the concentration of GOD was at 15 mg/kg, the specific volume of the bread was increased from 4.33 mL/g to 5.52 mL/g. Then, when the concentration of GOD was at 20 mg/kg, the hardness, stickiness and chewiness of the bread were the lowest, such as 233.33 g, 141.00 mJ and 704.82 mJ, which was significant difference ($p < 0.05$) with the control group. However, adding GOD has no significant difference in internal cohesion. The concentration of CAT was at 10 mg/kg, the specific volume of the bread was increased to 4.98 mL/g. When the concentration of CAT was at 15 mg/kg, the hardness, adhesive viscosity and chewiness of the bread were reduced significantly ($p < 0.05$), while cohesion was significantly enhanced. The volume of dough fermentation was increased by complex GOD and CAT. The effects of complex enzyme on the volume of the dough were better than that of single enzyme. The water-holding rate of dough could be increased to 64.38 percent by adding GOD, while it was significantly ($p < 0.05$) reduced by adding CAT and complex enzyme in the water-holding rate of dough and gluten. The content of sulfhydryl group in dough was significantly reduced but increased in the content of disulfide bond of the dough by adding GOD and CAT. While the change rate of sulfhydryl group and disulfide bond was the largest in complex enzyme group. About the microstructure of the dough and gluten by adding GOD and CAT, gluten network was improved and more even, unbroken and continuous than that in the control group.

Key words: glucose oxidase; catalase; bread; quality

随着生活水平的提高, 人们对面包等面制食品的需求

收稿日期: 2019-07-17

基金项目: 江苏省科技厅社会发展项目 (BE2016803)

作者简介: 邓家璐 (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 陆利霞 (1972-), 女, 副教授, 研究方向: 食品安全、食品生物技术

需求大幅增加, 且越来越关注面制食品的品质问题。而我国国产小麦存在品种多、质量差别大等问题^[1], 生产出来的面粉“高筋不强, 低筋不弱”, 达不到优质面粉的标准。因此, 研究开发高效、安全的面粉改良剂是十分必要的。溴酸钾是一种高效的面粉改良剂, 因为存在致癌问题^[2]在国内外已经被禁用。目前国内

使用较多的改良剂是偶氮甲酰胺,其最大使用量为 45 mg/kg,且日本、欧盟等国家或地区曾出现过安全事故,被禁止在食品行业使用。酶制剂作为绿色、天然、安全的食品添加剂,具有广泛的应用前景。合理使用酶制剂,可有效改善国产小麦生产面制食品的质量。

葡萄糖氧化酶(glucose oxidase,简称 GOD)广泛应用于畜牧^[3,4]、食品^[5-7]、医药^[8,9]和酿酒^[10]等领域。其中,GOD 对于面制品优秀的改良效果也逐渐受到人们的关注。有研究表明^[11-13],在面粉中添加 GOD,可以将面团中的巯基氧化为二硫键,从而改良面团网络结构,显著提高面团机械性能和面包品质,是未来面粉改良剂的有力候选之一。但单一酶的使用效果有限,且用量较大,可能导致成本过高^[14]。且 GOD 对不同面粉及与不同酶制剂的复合效果也有差异^[15,16]。而过氧化氢酶(catalase,简称 CAT)极少应用在烘焙面制品中,目前仅有个别报道它可改善面包品质^[17,18],但对其改善面包品质的作用机理尚不清楚^[19]。

本研究在向面团中添加不同浓度的 GOD 或 CAT 后,评价二者单独使用对面包品质的改良效果,并通过试验初步探索两种酶制剂直接复配的改良效果。同时通过分析发酵面团和面筋持水率、巯基和二硫键含量以及对比面团和面筋微观结构的变化,探讨这两种酶制剂对发酵面团品质的改良机制,以期 GOD 和 CAT 在面包烘焙等相关产业的复配使用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 样品与试剂

葡萄糖氧化酶(Glucose oxidase, GOD, 5 万 U/g),河南明瑞食品添加剂有限公司;过氧化氢酶(Catalase, CAT, 20 万 U/g),山东隆科特酶制剂有限公司;面包用小麦粉,江苏南顺食品有限公司;安琪高活性干酵母,安琪酵母股份有限公司;糖、食盐、脱脂奶粉、黄油等原辅料,市售;缓冲溶液 1:每升溶液含 10.4 g Tris, 6.9 g 甘氨酸, 1.2 g EDTA,用 0.1 mol/L 的盐酸调 pH 8.0;缓冲溶液 2:每升溶液含 10.4 g Tris, 6.9 g 甘氨酸, 1.2 g EDTA, 480 g 尿素, pH 8.0;缓冲溶液 3:每升溶液含 10.4 g Tris, 6.9 g 甘氨酸, 1.2 g EDTA, 600 g 尿素, pH 8.0;Ellman's 试剂:0.2 g DTNB (5, 5'-二硫代双)溶于 50 mL 缓冲溶液 1 中;12% TCA(三氯乙酸):每升溶液含 120 g 三氯乙酸。

其他化学试剂均为分析纯及以上。

1.2 仪器与设备

SM-50 搅拌机,新麦机械(无锡)有限公司; SM-32F 醒发箱,新麦机械(无锡)有限公司; SM-636 电动分块机,新麦机械(无锡)有限公司; SM-603T 电烤炉,新麦机械(无锡)有限公司; TMS-Pro 质构仪,美国 FTC 公司; GL-20G-II 型冷冻离心机,上海安亭科学仪器厂; IKA®T25 digital ULTRA-TURR AX®,上海珂淮仪器有限公司; S-4800 场发射扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 面包制作工艺

参照 GB/T 14611-2008 配方制作面包,制作方法:先将除黄油外的原料混合均匀,加水搅拌成团后加入黄油,继续搅拌至面筋网络结构成型,此时面团表面光滑,质地柔软,拉开可成透明的薄膜。搅拌完成后整形,然后切块,将面团搓圆整形置于面包模具中,于温度 30 °C、85%湿度的醒发箱中发酵 90 min。将发酵后的面包于烤箱(上火温度 210 °C,下火温度 200 °C)焙烤 10 min,将制备好的面包于无菌操作台冷却 1 h,装入食品级密封包装袋保存、待测。

1.3.2 面团发酵力测定

将成型的面团分割出 3 个 100 g 的小面团,搓圆后放入带刻度的高型烧杯中,并将顶部压平,使面团贴合烧杯内壁,无空隙。记录初体积,再放入醒发箱中发酵。发酵条件为温度 30 °C、85%湿度。分别记录 0、30、60、90、120 min 时的面团体积。取三个面团体积平均值为最终面团发酵体积。

1.3.3 面团成分及特性分析

分别选取 GOD、CAT 和 GOD+CAT 最适浓度作为优化组,并将其与不加酶的空白组相比较,分析研究 GOD 和 CAT 对面团与面筋成分及特性的影响。

1.3.3.1 面团和面筋持水率测定

面团持水率测定。准确称取 20.00 g 制备好的面团,称量湿面团质量 $W_{\text{湿}}$ 。湿面团于烘箱中 100 °C 烘干至恒重,在干燥器中冷却至室温称重,得到干面团重量 $W_{\text{干}}$ 。计算面团持水率,计算公式(1)。

$$\text{面团持水率}(\%) = \frac{W_{\text{湿}} - W_{\text{干}}}{W_{\text{干}}} \times 100\% \quad (1)$$

面筋持水率测定。参考孔晓雪等^[6]的方法,并做适当修改。准确称取 15.00 g 制备好的发酵面团手动揉洗,洗涤结束后在面筋表面滴加碘液,如不变色,则将面筋置于 7700 r/min 条件下,离心脱水 2 min,称量湿面筋质量 $M_{\text{湿}}$,如果滴加碘液后变蓝色,则继续揉洗至不变色为止。湿面筋于烘箱中 100 °C 烘干,在干燥器中冷却至室温称重,得到干面筋重量 $M_{\text{干}}$ 。计算

面筋持水率, 计算公式 (2)。

$$\text{面筋持水率 (\%)} = \frac{M_{\text{湿}} - M_{\text{干}}}{M_{\text{干}}} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.3.2 面团游离巯基 (-SH) 与二硫键 (-SS) 含量测定

参照马涛等^[20]的方法, 并做适当修改。称取 75.0 mg 的面团, 加入 10.0 mL 蒸馏水, 均质 1 min 使其分散均匀。加 4.0 mL 缓冲溶液 2。

还原前巯基的测定: 取上述均质液上清液 1.0 mL, 再加入 2.0 mL 缓冲溶液 2 及 0.02 mL Ellman's 试剂, 常温放置 5 min, 用紫外可见分光光度计在 412 nm 下测定吸光值, 并以不加面团的 Ellman's 试剂为空白对照。此时计算出的-SH 为还原前巯基数 N_1 。

还原后巯基的测定: 取上述均质液上清液 0.2 mL, 加入 1.0 mL 缓冲溶液 3 和 0.02 mL 巯基乙醇, 常温放置 1 h, 5800 r/min 离心 20 min, 沉淀用 5.0 mL 的 12% TCA 悬浮, 离心 2 次(5800 r/min, 20 min), 沉淀溶于 3.0 mL 缓冲溶液 1, 加入 0.05 mL Ellman's 试剂, 于 412 nm 下测吸光值。此时计算出的-SH 为还原后巯基数 N_2 。

巯基计算公式:

$$SH(\mu\text{mol/g}) = \frac{73.53 \times A_{412} \times D}{C} \quad (3)$$

式中: A_{412} —412 nm 下测得的吸光值; D (总-SH)=76.25; C —面团均质后的浓度, 75 mg/mL。

$$\text{二硫键计算公式: } SS(\mu\text{mol/g}) = \frac{N_2 - N_1}{2} \quad (4)$$

式中: N_1 : 还原前的巯基数($\mu\text{mol/g}$); N_2 : 还原后的巯基

数($\mu\text{mol/g}$)。

1.3.3.3 面团微观结构观察

参照郑学玲等^[21]的制样方法, 添加 GOD、CAT 及空白组发酵面团和面筋蛋白样品于 -70 °C 冰箱进行速冻, 然后将样品真空冷冻干燥处理。将冻干后的样品, 切取薄片, 粘贴于样品台上, 进行喷金镀膜, 并迅速将样品放入电镜载物腔内抽至真空, 加压, 然后进行观察、拍照。

1.3.4 面包品质评价

1.3.4.1 面包比容的测定

以 GB/T 20981-2007《面包》中体积置换的方法, 测定面包样品的体积和质量: 取一个待测面包样品, 称量后放入一定容积的容器中, 将小米加入容器中, 完全覆盖面包样品并摇实填满, 用直尺将填充剂刮平, 取出面包, 将填充剂倒入量筒中测量体积, 容器体积减去填充剂体积得到面包体积。

$$\text{面包比容 } P \text{ 计算公式: } P = \frac{V}{m} \quad (5)$$

式中: P —面包比容, 单位为 mL/g; V —面包体积, 单位为 mL; m —面包质量, 单位为 g。

1.3.4.2 面包感官品质评价

参考 GB/T 14611-2008 中面包烘焙品质评分标准和美国谷物化学师协会(AACC)审批方法, 结合面包的特点, 制定了面包的感官品质评价表, 见表 1。将制备好的面包于无菌操作台室温冷却 1 h 后进行感官评价。本试验组织 15 名品评人员进行感官评价, 结果取平均值。

表 1 面包感官评价评分表

Table 1 Sensory evaluation score for the bread

评分项目	指标要求	得分
表皮 色泽 (8)	表皮色泽呈金黄色, 均匀一致, 没有斑点和条纹, 有光泽	8
	色泽不均匀, 颜色太浅或太深, 有较少光泽	7
	色泽不均, 有斑点, 有条纹, 光泽度不够	6
	色泽不均匀, 且有斑点, 有条纹, 无光泽	5
	色泽焦黑, 不均匀, 有皱纹、有斑点, 无光泽	4
外表 形状 (8)	外形完整匀称, 没有高低不平的现象	8
	中间低或一边低, 两边低, 不对称; 或顶部过于平坦	6
	不对称, 顶部过于平坦, 收缩变形	4
表皮 质地 (4)	表皮柔软均匀, 没有粗糙、起顶和破裂现象	4
	表皮较厚、较硬	2
	表皮粗糙, 且太厚太硬	1

转下页

接上页		
	颗粒大小一致, 气孔小且呈拉长形状, 气孔壁薄、透明, 无不规则的大孔洞	15
横切面颗粒	颗粒粗糙、弹性较差, 气孔大	14
和气孔 (15)	颗粒粗糙无弹性, 气孔大且多,	13
	颗粒粗糙无弹性, 气孔大、不规则且多, 不均匀	12
	内部颜色呈洁白或乳白色并有丝样光泽	10
内部	内部颜色呈洁白或乳白, 光泽度不够	9
颜色 (10)	内部颜色呈灰白, 光泽度不够	8
	内部颜色不白较深, 没有光泽	7
	内部颜色发黑, 阴暗无光泽	5
	有强烈的烘烤及发酵面包香气、芳香, 无异味	15
香味 (15)	具有烘烤及发酵面包香气、芳香, 无异味	14
	有较淡的香气、芳香, 无异味	13
	香味不足, 有生面粉味或陈腐味、酸味	11
	没有香味, 只有生面味、陈腐味、酸味, 异味大	9
	略有咸味, 口感松软适口, 有弹性有嚼劲	20
口味和	口味平淡或太咸, 比较松软, 有一定弹性和嚼劲	18
口感 (20)	松软度不足, 弹性欠缺, 嚼劲不足	15
	较干硬或局部干硬, 有酸味, 有点粘牙	13
	口感很硬, 明显掉渣、粘牙	10
	组织均匀, 颗粒和气孔大小一致均匀, 无大孔洞, 柔软细腻, 纹理清晰完整呈海绵状, 疏松度好	20
组织	气孔大小较均匀, 纹理较清晰结构较完整, 比较细腻	18
结构 (20)	气孔多, 且有大有小, 纹理不太清晰, 结构较少缺损	15
	气孔大小不太均匀, 又不太规则的纹理, 结构部分缺损, 局部粗糙, 较疏松	13
	气孔大小极度不均, 有明显大孔, 结构破损, 弹性差, 粗糙	10

1.3.4.3 面包质构检测

面包在室温下冷却 1 h 后, 放入密封袋中密封, 并放置在恒温恒湿 (30 °C, 湿度 70%) 的发酵箱内。当天对面包进行质构分析。面包去掉表皮后, 切成高 25 mm、直径 50 mm 的长方体, 待测。质构仪参数: P36R 圆柱形平地探头。测试方式为 TPA, 测前速度为 5 mm/s, 测试速度为 1 mm/s, 测后速度 5 mm/s、压缩程度为 50%。

1.4 分析方法

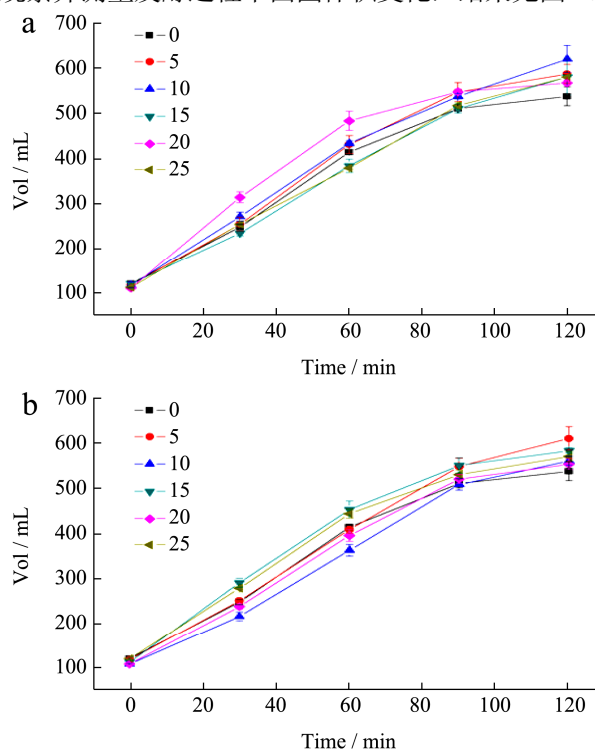
实验数据处理采用 Microsoft excel 2007 和 Origin 8.0, 采用 SPSS 20.0 和 Design-Expert 软件进行数据统计分析, 运用 ANOVA 法进行方差分析, 显著性差异水平选取 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度 GOD 和 CAT 对面团发酵力影响

发酵力是衡量酵母性能以及面包持气性能的重要指标, 发酵力高的面团能获得更大的面包体积。在面

粉中添加不同浓度 (0~25 mg/kg) 的 GOD 或 CAT, 观察并测量发酵过程中面团体积变化, 结果见图 1。



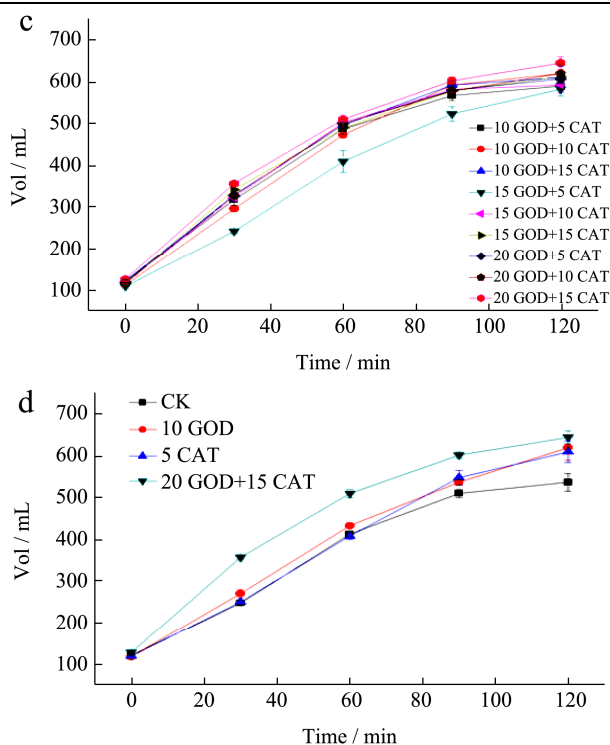


图1 添加 GOD (a)、CAT (b) 和复合酶 (c) 等对面团发酵体积影响及各组最大发酵力比较 (d)

Fig.1 Effects of adding GOD (a), CAT (b) and complex enzyme (c) on dough fermentation volume and comparison of maximum fermentation force of each group (d)

从图 1 可知, 面团发酵开始之前, 各组面团体积小, 而随着发酵时间的延长, 面团体积逐渐增加。发酵早期 (0~60 min), 面团体积增加速度快, 发酵后期 (90~120 min), 面团体积增加速度逐渐变慢, 并达到最大发酵体积。这是因为在发酵早期, 面团中的酵母经过活化、增殖后, 进行有氧呼吸, 释放大量的 CO_2 (二氧化碳), 而面团中的面筋网络能阻止其逸出, 使面团体积快速增大。而在发酵后期时, 一方面因为面团中酒精含量和酸度过高, 酵母活性受到抑制, 另一方面面筋网络被破坏, 部分 CO_2 逸出, 所以面团体积增速变慢。这与豆康宁等^[22]报道的 0~90 min 面团体积快速增加, 90~180 min 面团体积缓慢增加的变化趋势一致。从图 1a 分析发现, 加入不同浓度 GOD 后, 与对照组相比, 面团发酵 120 min 时体积均显著增加。其中, 以 GOD 酶浓度为 10 mg/kg 面团的发酵体积最大, 为 560 mL, 且为面团初体积的 5 倍以上, 高于豆康宁等^[22]报道的 3 倍增加量, 这是因为本研究中使用的干酵母用量为 1.8%, 高于豆康宁等^[22]研究中的 1.0% 干酵母用量。分析图 1b 加入不同浓度 CAT 后, 与对照组相比, 面团发酵 120 min 时, 体积均增加。其中, 以 CAT 浓度为 5 mg/kg 时面团的发酵体积最大, 为初始面团体积的 5 倍以上。从图 1c、1d 可知, GOD 与

CAT 复合添加时, 也能显著增加面团发酵体积, 最大面团体积为 645 mL, 且效果优于添加单一酶制剂的效果。同时, 从图 1 可知, 适当添加 GOD 或 CAT 等酶制剂, 可以在一定程度上, 加快面团发酵。

添加 GOD、CAT 面团发酵 120 min 虽然可以获得最大发酵体积, 但是存在过度发酵等问题。实验中发现面团发酵时间过长, 导致面筋网络结构破坏更大, 发酵面团更软黏, 烘焙冷却后, 面包表皮褶皱, 形态不饱满, 外观不佳。且面团中酒精含量和酸度过高, 导致烘焙后面包风味不佳, 感官品质下降。因此, 综合品质、发酵体积等各方面因素, 选取 90 min 为最佳发酵时间。Vemulapalli 等^[23]研究表明经过 90 min 发酵的面团烘焙而来的面包具有更大的面包体积和更均一的面包芯结构, 而 Bonet 等^[24]也以 90 min 作为面团发酵时间。

2.2 添加 GOD 和 CAT 对面团与面筋持水率测定

表 2 添加 GOD 和 CAT 对面团与面筋持水率的影响

Table 2 Effects of adding GOD and CAT on water holding rate of dough and gluten

指标	面团持水率/%	面筋持水率/%
空白组	62.45±0.38 ^b	242.85±19.53 ^b
GOD 优化组	64.38±0.87 ^c	214.21±15.50 ^b
CAT 优化组	60.94±0.13 ^a	177.93±1.35 ^a
复合酶优化组	59.69±1.22 ^a	167.78±4.14 ^a

注: 同一列中不同字母, 表示存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

下表同。

从表 2 可知, GOD 优化组使面团持水率显著增加了 1.93%, 而对面筋持水率无显著影响。江志坚等^[25]研究表明加入 GOD 可显著增加面团水相得率, 这主要与可溶性木聚糖氧化凝胶有关。而孔晓雪等^[6]则认为添加 GOD 对面筋蛋白的水合作用没有显著影响。持水率变化是因为加入 GOD 并非通过改变面筋蛋白持水性来影响面团持水性, 而是通过促进可溶性木聚糖中阿魏酸的氧化交联凝胶作用显著增加面团持水性^[25], 甚至可能因为凝胶持水性过强而抢夺面筋吸附的水分, 改善面团性质。而可溶性糖凝胶形成的网络结构也增加了面筋结构弹性, 这一点与 GOD 优化组显著增加的面包弹性结果一致。也说明添加 GOD 有助于提高面包质量, 增加出品率, 与表 5 对面包影响结果一致。而添加 CAT 优化组则显著降低了面团和面筋的持水率, 可能是因为添加 CAT 催化面筋蛋白的半胱氨酸残基、酪氨酸残基、面筋蛋白和阿魏酸之间交联

增多,且作用过快^[26],导致面筋蛋白上的亲水基团被包被,从而使得面筋、面团持水性降低。从持水率角度看,可能 CAT 作用处于主要的功能地位,且添加 CAT 的效果要远远强于 GOD。添加 GOD 和 CAT 都是通过形成凝胶来影响面团和面筋的持水率,但凝胶的形成,对面团影响是有益的,能够改善其网络结构,通过增加交联改善面团流变性^[27]。

2.3 添加 GOD 和 CAT 对游离巯基与二硫键含量影响

表 3 添加 GOD 和 CAT 对面团中巯基与二硫键含量的影响
Table 3 Effects of adding GOD and CAT on the content of sulfhydryl and disulfide bond in dough

指标	巯基含量/(mmol/g)	二硫键含量/(mmol/g)
空白组	4.09±0.67 ^b	6.64±2.55 ^a
GOD 优化组	2.82±0.34 ^a	23.97±4.41 ^{bc}
CAT 优化组	2.47±0.27 ^a	22.64±0.22 ^b
复合酶优化组	2.34±0.11 ^a	26.27±0.41 ^c

研究发现^[13,27],添加 GOD 后可以催化面团中葡萄糖,生成葡萄糖酸内酯和 H₂O₂ (过氧化氢),而后者能氧化面团中的巯基形成二硫键,从而增强了面筋网络结构。表 3 中巯基与二硫键含量变化的比较,添加 GOD、CAT 及复合酶优化组均可以促进面团中二硫键的形成,减少面团中巯基的含量,巯基含量分别减少了 31.10%、39.64%和 42.70%,二硫键含量分别增加了 17.33 mmol/g、16.00 mmol/g 和 19.63 mmol/g,更说明了添加 CAT 后可以促进二硫键的形成。也反映在面包弹性指标(表 10、表 11)变化,添加 CAT 更促进面包弹性的增加,也体现在表 12 中复合酶弹性比单一酶更高。更高强度的面筋结构也是面包比容显著增大的主要原因,进而使得面包气孔均匀整齐、硬度降低、弹性良好,能够获得更高的感官评分。研究表明添加 CAT 可以加速催化酶及酵母菌产生的 H₂O₂ 分解^[28,29],进而促进了面团中分子态氧及自由基的产生,使得面筋蛋白中半胱氨酸、酪氨酸交联,引发半胱氨酸残基之间二硫键的形成,从而增强面团网络结构^[26,30-32]。Nishimura 等^[33]发现当添加超氧化物歧化酶降低自由基含量时,会减少面筋中二硫键的含量,间接证明了自由基促进面筋中二硫键的形成。

2.4 添加 GOD 和 CAT 对微观结构影响

添加 GOD、CAT 对面团及面筋微观结构的影响,通过扫描电镜进行观察并拍照,结果见图 2。

图 2a、图 2c、图 2e 为面团扫描电镜照片,图 2b、

图 2d、图 2f 为面筋扫描电镜照片。分析图 2 照片,空白组面团电镜照片图 2a,其中淀粉颗粒数量较多,且大部分暴露在外,被面筋包埋部分较少;面筋蛋白不连续,断裂处较多。而图 2c 和图 2e 中,添加 GOD、CAT 的面团中,淀粉颗粒被面筋包裹更严密,且面筋蛋白结构更连续、均匀,断裂较少。其中,添加 CAT 优化组的面团优于 GOD 优化组的面团,这一点也印证了面团中巯基与二硫键的数量变化。比较图 2b、图 2d、图 2f 对面筋结构的影响,添加 GOD、CAT 后面筋中小孔更细密,且添加 CAT 组孔洞更均一,显示面筋网络更完整、连续,而空白组图 2b 中存在大量无面筋连接的大孔洞,这些孔洞大小不一,断裂处较多,结构不连续。Zhang 等^[30]报道认为,随着 CAT 添加量的增加,面筋蛋白的网络结构更明显,表明 CAT 有助于面筋网络结构的形成。因此说明添加 GOD、CAT 由于促进面筋网络结构的形成而有利于面包质构、流变特性的改善。研究中观察所制作面包的横切面,可以发现添加 GOD、CAT 后面包芯孔洞分布均匀,孔洞比对照组增多、增大,也说明了添加 GOD、CAT 有利于面筋网络的形成,也有利于其持气性增加,从而使得面包体积和比容增加,与表 4~6 结果一致。

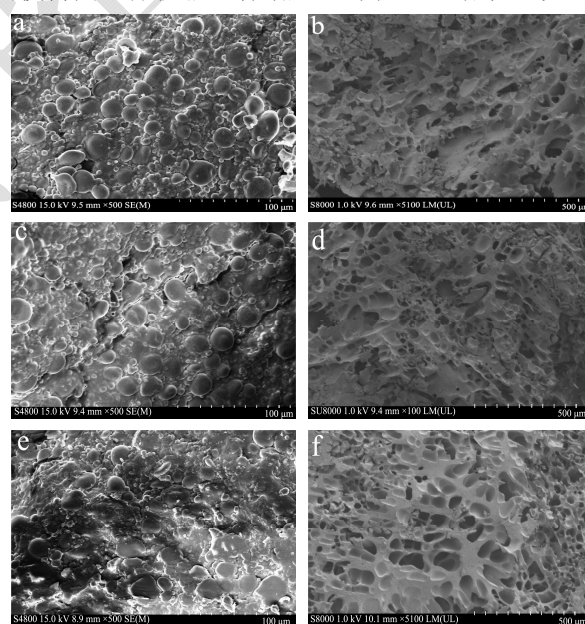


图 2 添加 GOD、CAT 对面团及面筋微观结构影响

Fig.2 Effects of adding GOD and CAT on the microstructures of dough and gluten

注: a: 空白组面团; b: 空白面筋; c: GOD 优化组面团; d: GOD 优化组面筋; e: CAT 优化组面团; f: CAT 优化组面筋。

通过 GOD 与 CAT 的复配实验可以发现,这两种酶制剂虽然各自对面团品质都有较显著的改善效果,且复配时也有一定的叠加效果,但是二者对过氧化氢

的作用存在一定的冲突, GOD 通过产生 H_2O_2 来发挥改良作用, 而 CAT 对 H_2O_2 却有极强的催化作用, 且复配时, CAT 处于主要功能地位。针对这一点, 笔者认为可以通过固定包埋其中一种酶制剂的方式来达到缓释的效果^[34,35], 从而避免两种酶制剂作用时发生直接冲突, 而影响对面团的改良效果。

2.5 添加 GOD 和 CAT 对面包品质影响

2.5.1 对面包比容的影响

面包比容反映面团体积膨胀程度及保持能力, 直接影响到成品面包的外形、口感和内部组织^[36]。添加不同浓度 GOD 对面包体积、质量和比容的影响结果见表 4。

表 4 添加 GOD 对面包体积、质量和比容的影响

Table 4 Effects of adding GOD on the volume, weight and specific volume of bread

酶浓度/(mg/kg)	质量/g	体积/mL	比容/(mL/g)
0	90.80±1.06 ^a	393.33±15.28 ^a	4.33±0.22 ^a
5	93.77±0.51 ^{bc}	508.33±20.82 ^c	5.41±0.21 ^c
10	93.30±0.46 ^b	451.67±32.53 ^b	4.84±0.33 ^b
15	94.27±0.61 ^{bc}	520.00±8.66 ^c	5.52±0.07 ^c
20	93.20±0.26 ^b	505.00±5.00 ^c	5.42±0.06 ^c
25	94.73±0.42 ^c	433.33±5.77 ^b	4.58±0.07 ^{ab}

由表 4 可知, 添加 5~25 mg/kg GOD 可显著增加面包体积、质量和比容, 提高面包产品的出品率, 最高增加了 4.3%。这主要与淀粉糊化及面筋网络膨胀形成有关。结合表 2、3, GOD 增加了面团持水率, 有利于淀粉的糊化, 而二硫键的增加和面包的体积增大, 也说明添加 GOD 利于面筋网络结构的形成及稳定, 从而影响面包的比容。Chaudhary^[37]研究认为, 面包比容的增加是由于面筋网络的强度增加所致, 比容增大可以解释为面筋网络在面包制作过程中对产生的 CO_2

的固定能力增加。添加 GOD 对面包质构的影响(表 10)也说明其有利于改善面筋网络结构。同时由于 GOD 可以催化产生过氧化氢, 后者有利于面包体积的增大^[38]。从表 4 可见添加 5~20 mg/kg GOD 可使得面包比容显著增加($p<0.05$), 最大比容为 5.52 mL/g。综合面包体积、质量和比容三方面因素, 添加 15 mg/kg 时在体积、质量和比容方面均显著高于空白组。Bonet 等^[24]的研究结果表明 GOD 最佳用量为 0.001%, 此时面包比容增加 27.75%, 与本研究中 27.48% 的增长率相似。

表 5 添加 CAT 对面包体积、质量和比容的影响

Table 5 Effects of adding CAT on the volume, weight and specific volume of bread

酶浓度/(mg/kg)	质量/g	体积/mL	比容/(mL/g)
0	90.80±1.06 ^a	393.33±15.28 ^a	4.33±0.22 ^a
5	93.27±0.81 ^b	435.00±5.00 ^{cd}	4.66±0.03 ^{bc}
10	94.93±0.06 ^c	473.33±15.28 ^e	4.98±0.16 ^d
15	92.63±0.23 ^b	443.33±7.64 ^d	4.78±0.07 ^{cd}
20	92.90±0.61 ^b	421.67±2.89 ^{bc}	4.54±0.06 ^{ab}
25	93.37±0.55 ^b	410.00±10.00 ^{ab}	4.39±0.10 ^a

从表 5 可知, 添加 5~20 mg/kg CAT 可以显著增加面包体积、质量和比容。但若 CAT 添加量超过 15 mg/kg, 会导致面包体积和比容减小。其中, CAT 浓度为 10 mg/kg 时, 面包质量、体积及比容均最大。比较表 4 与表 5, 从对面包质量的差异上, 添加 GOD 与 CAT 无显著差异, 但在面包体积及比容上, 添加 GOD 更利于面包体积的增大和比容的增加。可能因为添加 CAT 后可以对 H_2O_2 进行分解, 从而促进面筋蛋白网络的形成; 同时 CAT 也可以促进苯酚、甲酸、甲醛和醇的过氧化反应^[39]。因此可以推测, 添加 CAT 可以促进面粉中氨基酸中部分羟基的氧化, 从而利于面筋网络结构的形成及面包体积及比容增加。研究结果表 11 中添加 CAT 对面包质构的影响也证明了这一点。

表 6 添加 GOD 与 CAT 复合酶对面包体积、质量和比容的影响

Table 6 Effects of complex GOD and CAT on the volume, weight and specific volume of bread

酶浓度/(mg/kg)	质量/g	体积/mL	比容/(mL/g)
10GOD+5CAT	92.47±0.55 ^{abc}	428.33±10.41 ^{bc}	4.63±0.09 ^{cd}
10GOD+10CAT	92.37±0.40 ^{ab}	438.33±7.64 ^c	4.75±0.07 ^d
10GOD+15CAT	92.50±0.52 ^{abc}	408.33±7.64 ^{ab}	4.42±0.07 ^{abc}
15GOD+5CAT	93.40±0.56 ^d	433.33±15.28 ^c	4.64±0.15 ^{cd}
15GOD+10CAT	92.90±0.26 ^{bcd}	403.33±12.58 ^a	4.34±0.13 ^{ab}
15GOD+15CAT	93.23±0.32 ^{cd}	400.00±10.00 ^a	4.29±0.11 ^a
20GOD+5CAT	92.63±0.23 ^{bcd}	436.67±10.41 ^c	4.71±0.11 ^d
20GOD+10CAT	92.87±0.12 ^{bcd}	421.67±2.89 ^{abc}	4.54±0.03 ^{bcd}
20GOD+15CAT	91.83±0.50 ^a	436.67±25.17 ^c	4.76±0.26 ^d

表7 添加 GOD 对面包感官品质影响

Table 7 Effects of adding GOD on bread sensory quality

浓度 (mg/kg)	表皮色泽 (8)	外表形状 (8)	表皮质地 (4)	颗粒和气孔 (15)	内部颜色 (10)	香味 (15)	口味和口感 (20)	组织结构 (20)	合计 (100)
0	6.60±1.14	6.00±2.00	3.20±1.10	13.80±0.84	8.80±0.45	13.40±0.55	17.40±1.34	16.40±2.30 ^{ab}	85.60±6.88 ^a
5	6.60±1.67	5.60±1.67	3.60±0.89	13.80±0.84	9.00±0.71	13.60±0.55	18.00±0.00	15.60±1.34 ^a	85.80±5.40 ^a
10	7.00±0.00	7.20±1.10	3.60±0.90	14.20±0.84	9.20±0.84	14.00±0.71	17.80±1.79	16.80±1.64 ^{ab}	89.80±5.40 ^{ab}
15	7.60±0.55	7.60±0.89	4.00±0.00	14.60±0.55	9.20±0.45	14.20±0.45	18.80±1.10	18.80±1.10 ^b	94.80±3.70 ^b
20	7.00±0.71	6.40±1.67	3.60±0.89	14.00±0.71	8.80±0.45	13.80±0.45	17.40±1.34	16.40±2.30 ^{ab}	87.40±6.50 ^{ab}
25	7.20±0.45	5.60±1.67	3.20±1.10	14.20±0.84	8.80±0.45	13.20±1.30	17.40±1.34	15.80±2.17 ^a	83.40±4.34 ^a

表8 CAT 对面包感官品质的影响

Table 8 Effects of adding CAT on bread sensory quality

浓度 (mg/kg)	表皮色泽 (8)	外表形状 (8)	表皮质地 (4)	颗粒和气孔 (15)	内部颜色 (10)	香味 (15)	口味和口感 (20)	组织结构 (20)	合计 (100)
0	6.60±1.14 ^b	6.00±2.00	3.20±1.10	13.80±0.84	8.80±0.45	13.40±0.55	17.40±1.34	16.40±2.30 ^{abc}	85.60±6.88 ^b
5	5.40±0.89 ^a	5.60±0.89	2.20±1.10	13.80±0.45	8.40±0.55	12.80±1.10	16.80±1.64	14.20±1.10 ^a	79.20±3.49 ^a
10	6.40±0.89 ^{ab}	6.40±1.67	2.80±1.10	13.80±0.45	9.00±0.00	13.60±0.55	18.00±0.00	17.40±1.34 ^c	87.40±3.91 ^b
15	6.00±0.71 ^{ab}	6.40±0.89	2.20±1.10	14.00±0.00	8.60±0.55	13.40±0.55	16.20±1.64	16.80±1.64 ^{bc}	83.60±4.61 ^{ab}
20	6.40±0.55 ^{ab}	6.80±1.10	2.00±0.00	14.20±0.84	8.80±0.45	13.40±0.55	17.40±1.34	16.80±1.64 ^{bc}	85.80±3.27 ^b
25	6.60±0.55 ^b	6.00±0.00	2.00±0.00	14.00±0.71	8.60±0.55	13.60±0.55	17.40±1.34	14.80±2.05 ^{ab}	83.00±3.39 ^{ab}

表6为 GOD 与 CAT 进行复合添加对面包质量、体积及比容的影响。由表6可知, GOD 和 CAT 的不同配比对面包质量、体积及比容作用均优于未添加酶制剂对照组,但低于单一添加 GOD、CAT 酶制剂最优实验组。对面包质量增加较多的复合酶组为 15GOD+5CAT、15GOD+15CAT,且该两组体积也较大,从而利于面包比容的增加。比较表4-6结果,复合酶组与单一添加 CAT 结果相近,而低于单一添加 GOD 组的面包质量、体积及比容结果,可能是因为两种酶的对过氧化氢产生相反作用, GOD 促进过氧化氢形成,而 CAT 可以分解过氧化氢,减弱过氧化氢部分作用,导致低于单一添加 GOD 的效果。面粉中也含有 CAT,表明二者分开添加可能更有利,需要进一步研究。

2.5.2 添加 GOD 和 CAT 对面包感官品质分析

感官评分是对最终面包成品色香味等方面的综合评价,反映其可接受度。感官评分越高,表示其越可能被消费者认可。添加不同浓度 GOD 对面包的感官评价结果见表7。

从表7可知, GOD 浓度为 15 mg/kg 时,面包表皮色泽、外观形状、表皮质地、颗粒和气孔、内部颜色、香味、口味和口感等方面性质均有较大改善,而组织结构和总评分方面的改善尤为显著。因此, GOD 可能主要通过改善面团内部组织结构来改善面包感官品质。杨春玲等研究者^[40,41]认为这是因为 GOD 催化葡萄糖产生的过氧化氢能氧化巯基形成二硫键,从而

形成更强的面筋网络,增加面团的弹性和耐机械搅拌特性。而 Wang 等^[42]研究结果表明添加 GOD 对新鲜面团制得的面包感官品质没有显著改善效果,可能是因为两项研究中的评分标准具有较大区别,例如该研究中外观评分占比较低(5分),而体积(45分)和孔结构(35分)评分占比较高,未评价面包香味和口感。

从表8中数据可知,添加 CAT 对面包外表形状、香味、口味和口感、组织结构等方面性质均有轻微改善,但另一方面,添加 CAT 降低了面包表皮色泽和表皮质地得分,可能是 CAT 催化面团内源 H₂O₂,一方面产生 O₂增加了面团体积,另一方面产生自由基,促进酪氨酸或可溶性木聚糖中阿魏酸过氧化形成凝胶^[43,44],且速率比 GOD 更快^[26],从而导致面团中水分不易迁移,进而导致烘焙后的面包表皮干硬,评分降低。加入 CAT 后面包内部颜色略加深,可能是因为对 H₂O₂ 的快速分解作用,减少了对色素类物质的氧化作用,因而颜色会略深,且没有显著差异。随着全麦面包及其他深色面包的开发,这一点上无影响。

分析表9可知,除添加 10GOD+10CAT 和 10GOD+15CAT 两组的表皮色泽有显著差异外,其余各组均无显著差异。其中,添加 10GOD+10CAT、20GOD+5CAT 和 20GOD+15CAT 三组感官评分最高。表皮质地、外表形态、颗粒和气孔、内部颜色、香味、口味及组织结构,各复合酶组间无显著差异。比较表7、表8、表9,复合酶组与单一添加 GOD、CAT 组感官

品质存在一定的差异,复合酶组略低于单一酶制剂组,与面包质量、体积实验结果类似。

表9 添加 GOD 与 CAT 复合酶对面包感官品质的影响

Table 9 Effects of adding complex GOD and CAT on bread sensory quality

浓度 (mg/kg)	表皮色泽 (8)	外表形状 (8)	表皮质地 (4)	颗粒和气孔 (15)	内部颜色 (10)	香味 (15)	口味和口感 (20)	组织结构 (20)	合计 (100)
10GOD+5CAT	6.40±0.55 ^{ab}	6.40±0.89	3.00±1.40	13.80±0.45	8.20±0.45	13.50±0.55	16.80±1.64	15.20±3.27	83.20±6.64
10GOD+10CAT	6.80±0.84 ^b	6.00±0	2.80±1.10	13.80±0.84	8.60±0.55	13.60±0.55	17.80±1.79	16.80±2.79	86.20±7.00
10GOD+15CAT	5.60±0.55 ^a	6.40±0.89	3.20±1.10	14.00±1.00	8.20±0.84	13.00±1.40	16.40±2.30	15.80±3.05	82.60±8.00
15GOD+5CAT	6.20±0.84 ^{ab}	5.60±0.89	2.20±1.10	13.40±0.89	8.40±0.89	13.20±0.45	16.80±1.64	13.80±2.89	79.60±4.81
15GOD+10CAT	6.20±0.84 ^{ab}	6.40±0.89	1.80±0.45	14.00±0	8.20±0.84	13.20±0.45	16.80±1.64	16.80±1.64	83.40±3.37
15GOD+15CAT	6.40±0.89 ^{ab}	6.00±0	2.60±1.34	13.40±0.89	8.40±0.89	13.40±0.55	17.40±2.60	14.20±2.89	81.80±7.00
20GOD+5CAT	6.20±0.84 ^{ab}	6.40±0.89	2.80±1.10	13.80±1.10	9.00±0	13.80±0.45	18.00±0	16.20±1.64	86.20±2.23
20GOD+10CAT	6.40±0.55 ^{ab}	6.00±1.40	3.20±1.10	13.40±0.89	8.80±0.45	13.40±0.55	16.80±1.64	15.40±2.55	83.40±6.45
20GOD+15CAT	6.60±0.55 ^{ab}	6.00±1.40	2.40±0.89	13.80±0.84	8.80±0.45	13.40±0.55	16.20±1.64	17.40±1.34	84.60±5.37

2.5.3 添加 GOD 和 CAT 对面包质构影响分析

质构分析是一种通过模拟咀嚼过程,测试面包特性的分析手段。硬度、胶黏性和咀嚼性与面包品质负相关,数值越大,面包就越硬,缺乏弹性,口感不佳。内聚性和弹性与面包品质正相关,数值越大,面包越柔软,口感劲道,不粘牙^[45]。添加 GOD 对面包质构性质的影响结果见表 10。

从表 10 可知,添加 GOD 为 20 mg/kg 时,面包硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性最低,与对照组具有显著性差异 ($p<0.05$),分别为 170.67 g, 3.89 mm, 108.67 mJ, 429.17 mJ。而添加 GOD 对内聚性无显著差异,且除了弹性指标外,与添加 GOD 15 mg/kg 无显著差异。因此,添加 GOD 浓度为 15~20 mg/kg 时,面包质构特性较佳。张怀子等^[46]研究认为面包品质与 GOD 添加量呈单峰型变化趋势,过量会导致面团干硬,面包品质下降。次顿等^[47]研究表明,在最佳添加量 15 mg/kg 下,面包质构特性均有极大改善。Decamps 等^[38]报道添加 GOD 能促进面筋蛋白之间的交联,从而改善面包的加工质构性能,也能降低面包的胶黏性。

分析表 11 可知,与对照组相比,添加不同浓度 CAT 可使面包硬度、胶黏性、咀嚼性显著降低 ($p<0.05$)。添加 CAT 浓度为 15 mg/kg 时,面包硬度、胶黏性和咀嚼性显著降低,分别为 173.67 g、111.67 mJ 和 690.66 mJ;而内聚性显著增强至 0.65,弹性也显著提高至 6.19 mm。这可能是因为添加 CAT 催化 H_2O_2 分解及产生自由基,进而促使阿拉伯木聚糖氧化形成凝胶和与面筋蛋白的交联,改变面团粘弹性和内聚性等性质^[30,39,48],从而使面包质构特性得到显著改善。Zhang 等^[30]研究结果也表明, CAT 能改善面包硬度、胶黏性和咀嚼性等质构特性。

从表 12 中数据可知,添加 GOD 与 CAT 的不同配比对面包质构性质影响不同。比较表 10、表 11 及表 12,复合酶组硬度指标显著低于单一添加 GOD、CAT 酶实验组,内聚性上差异不显著。其中,添加 20GOD+15CAT 配比的面包硬度、胶黏性和咀嚼性最低,内聚性较高 (0.69),弹性较强 (6.04 mm),且显著优于单一酶制剂优化组和空白对照组。说明从质构性能上,复合酶具有一定的叠加效应,可以对面粉中淀粉及面筋产生有利影响,使得面包硬度降低,弹性提高,改善胶黏性和咀嚼性。

综上,选取添加 GOD 浓度 15 mg/kg、CAT 浓度 10 mg/kg 和 20 mg/kg GOD+15 mg/kg CAT 为优化组。结合表 2、表 3 可知,添加 GOD 和 CAT 主要都是通过凝胶与过氧化氢实现对面团和面包的改善作用。添加 GOD 后可以促进面团中可溶性木聚糖中阿魏酸氧化凝胶,增加持水性,从而促进烘焙过程中淀粉的糊化,改善面包成品的出品率和感官品质。而添加 CAT 后能增加面筋蛋白的半胱氨酸残基、酪氨酸残基、面筋蛋白和阿魏酸之间的交联。这种凝胶结构的形成对面团是有利的,能够改善面团网络结构和流变性。添加 GOD 后通过催化葡萄糖生成过氧化氢,氧化巯基,形成强度更高的二硫键,从而增强面筋网络强度。而添加 CAT 是通过分解面团中的过氧化氢,产生分子态氧和自由基,从而使得面筋蛋白中半胱氨酸、酪氨酸交联,引发半胱氨酸残基之间二硫键的形成。二者对过氧化氢具有相反的作用效果,表明可能分开使用更有利。因此,添加 GOD 和 CAT 的直接复配使用虽然存在一定的叠加效果,但就面包成品整体品质而言,仍存在较大改善空间,需要进行进一步的研究。

表 10 GOD 对面包质构性质的影响

Table 10 Effects of adding GOD on bread texture

GOD 浓度/(mg/kg)	硬度/g	内聚性	弹性/mm	胶粘性 mJ	咀嚼性/mJ
0	477.00±32.51 ^c	0.58±0.03	5.72±0.24 ^c	277.00±27.62 ^c	1591.00±224.64 ^c
5	255.00±28.35 ^b	0.62±0.03	5.28±0.25 ^{bc}	157.67±9.29 ^b	831.86±80.80 ^b
10	196.67±39.53 ^{ab}	0.64±0.02	4.70±0.28 ^{ab}	126.00±21.28 ^{ab}	595.55±127.39 ^{ab}
15	233.33±12.87 ^{ab}	0.60±0.02	4.98±0.76 ^{bc}	141.00±6.56 ^{ab}	704.82±135.68 ^{ab}
20	170.67±23.46 ^a	0.64±0.03	3.89±0.79 ^a	108.67±12.58 ^a	429.17±135.08 ^a
25	248.67±40.82 ^b	0.60±0.03	5.37±0.30 ^{bc}	149.67±16.77 ^{ab}	807.04±135.64 ^b

表 11 CAT 对面包质构性质的影响

Table 11 Effects of adding CAT on bread texture

浓度/(mg/kg)	硬度/g	内聚性	弹性/mm	胶粘性 mJ	咀嚼性/mJ
0	477.00±32.51 ^c	0.58±0.03 ^a	5.72±0.24 ^a	277.00±27.62 ^b	1591.00±224.64 ^b
5	221.00±32.51 ^b	0.59±0.01 ^a	5.68±0.42 ^a	130.00±18.00 ^a	736.49±108.76 ^a
10	187.67±11.50 ^{ab}	0.63±0.03 ^{bc}	6.10±0.22 ^{ab}	117.67±3.79 ^a	718.40±35.05 ^a
15	173.67±7.77 ^a	0.65±0.01 ^c	6.19±0.16 ^b	111.67±4.51 ^a	690.66±33.86 ^a
20	206.33±13.87 ^{ab}	0.63±0.01 ^{bc}	6.09±0.08 ^{ab}	129.67±8.08 ^a	790.61±50.86 ^a
25	215.67±7.77 ^b	0.61±0.01 ^{ab}	5.67±0.13 ^a	131.33±6.43 ^a	746.57±44.27 ^a

表 12 GOD 与 CAT 复合酶对面包质构性质的影响

Table 12 Effects of adding complex GOD and CAT on bread texture

浓度/(mg/kg)	硬度/g	内聚性	弹性/mm	胶粘性 mJ	咀嚼性/mJ
10GOD+5CAT	152.00±12.29 ^{ab}	0.67±0.01 ^{cd}	6.70±0.08 ^c	102.67±7.57 ^{bcd}	686.63±42.21 ^{bc}
10GOD+10CAT	168.00±23.00 ^{bc}	0.64±0.01 ^{abc}	6.14±0.05 ^{abcd}	106.67±14.57 ^{cdef}	656.43±90.51 ^{bc}
10GOD+15CAT	135.33±11.51 ^{ab}	0.64±0.01 ^{abc}	5.88±0.58 ^{ab}	86.67±6.66 ^{ab}	511.66±81.64 ^a
15GOD+5CAT	199.00±4.00 ^d	0.62±0.02 ^a	5.87±0.26 ^a	122.33±5.13 ^f	717.67±16.91 ^c
15GOD+10CAT	164.67±15.50 ^{bc}	0.66±0.01 ^{bcd}	6.64±0.25 ^{de}	108.33±9.29 ^{def}	717.90±42.75 ^c
15GOD+15CAT	183.67±10.02 ^{cd}	0.63±0.02 ^{ab}	6.09±0.22 ^{abc}	115.67±7.09 ^{ef}	705.07±27.40 ^{bc}
20GOD+5CAT	139.00±22.52 ^{ab}	0.64±0.03 ^{abc}	6.54±0.06 ^{cde}	89.67±9.87 ^{abc}	584.61±70.03 ^{ab}
20GOD+10CAT	144.00±5.57 ^{ab}	0.64±0.01 ^{abc}	6.39±0.35 ^{bcd}	93.00±2.65 ^{abcd}	593.73±22.18 ^{abc}
20GOD+15CAT	122.67±30.24 ^a	0.69±0.04 ^d	6.04±0.39 ^{abc}	82.67±15.95 ^a	503.90±126.44 ^a

3 结论

葡萄糖氧化酶和过氧化氢酶可以显著改善面包团品质。当 GOD 添加量为 15 mg/kg 时, 面包比容从 4.33 mL/g 显著增加到 5.52 mL/g, 出品率增加了 3.82%。感官评分则从 85.60 显著增加到 94.80; 质构特性也有显著改善 ($p<0.05$), 硬度、胶粘性和咀嚼性分别从 477.00 g、277.00 mJ 和 1591.00 mJ 显著下降到 233.33 g、141.00 mJ 和 704.82 mJ, 内聚性和弹性无显著变化, 分别为 0.60 和 4.98 mm。当 CAT 添加量为 10 mg/kg 时, 面包比容显著增加到 4.98 mL/g, 出品率增加了 4.55%。感官评分增加到 87.40; 质构特性也有显著改善 ($p<0.05$), 硬度、胶粘性和咀嚼性分别显著下降到 187.67 g、117.67 mJ 和 718.40 mJ, 内聚性从 0.58 显著增加到 0.63, 弹性从 5.72 mm 增加到 6.10

mm。研究发现 GOD 可将面团持水率从 62.45%显著增加到 64.38% ($p<0.05$), 而不影响面筋持水率。而 CAT 优化组则显著降低了面团和面筋的持水率。对比 GOD 和 CAT 对游离巯基与二硫键含量变化可以发现, GOD 和 CAT 均能显著减少游离巯基, 增加二硫键含量。从面团及面筋微观结构上, 添加 GOD、CAT 可促进面团中面筋网络的增加, 且可促进面筋结构孔洞更均一, 面筋网络更完整、连续。研究表明添加 GOD、CAT 通过促进巯基形成二硫键, 促进微观结构面筋网络结构的形成, 而利于面团及面包体积、比容以及质构特性(弹性、硬度)的改善。

参考文献

- [1] 李静.河南省小麦粉加工业发展现状及对策研究[D].吉林:吉林农业大学,2016

- LI Jing. Research on the current situation and countermeasures of wheat flour processing industry in Henan province [D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2016
- [2] 沈明浩,王月娇,李嘉,等.溴酸钾的毒理学研究[J].食品科学,2008,8:591-593
- SHEN Ming-hao, WANG Yue-jiao, LI Jia, et al. Study on toxicology of potassium bromate [J]. Food Science, 2008, 8: 591-593
- [3] 龚金秋,刘志强,田雯,等.葡萄糖氧化酶的研究进展及其在猪生产中的应用[J].中兽医医药杂志,2018,37(5):34-38.
- GONG Jin-qiu, LIU Zhi-qiang, TIAN Wen, et al. Research progress of glucose oxidase and its application in pig production [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2018, 37(5): 34-38
- [4] 庞家满,王江,李杰,等.葡萄糖氧化酶对黄羽肉鸡生产性能和养分代谢的影响[J].中国畜牧兽医,2013,40(2):72-75
- PANG Jia-man, WANG Jiang, LI Jie, et al. Effects of glucose oxidase on the production performance and nutrient metabolism in yellow-feathered broilers [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2013, 40(2): 72-75
- [5] 陆程,陆利霞,林丽军,等.添加葡萄糖氧化酶对熏煮香肠品质的影响[J].食品工业科技,2018,39(15):1-4
- LU Cheng, LU Li-xia, LIN Li-jun, et al. Effect of adding glucose oxidase on the quality of smoked and cooked sausage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 1-4
- [6] 孔晓雪,李蕴涵,李柚,等.葡萄糖氧化酶和谷氨酰胺转氨酶对发酵麦麸面团加工品质的影响[J].食品工业科技,2019,40(9):85-90
- KONG Xiao-xue, LI Yun-han, LI You, et al. Effects of glucose oxidase and glutamine transaminase on processing quality of fermented wheat bran dough [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 85-90
- [7] 江慧,陈英海.饮料中葡萄糖含量的测定[J].化学工程与装备,2016,11:177-179
- JIANG Hui, CHEN Ying-hai. Determination of glucose content in drink [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016, 11: 177-179
- [8] 马艳.血糖仪和葡萄糖氧化酶法测定血糖的结果比较[J].世界最新医学信息文摘,2018,18(93):124
- MA Yan. Comparisons of blood glucose measurement by glucose glucose oxygenase and glucose glucose mete [J]. World Latest Medicine Information, 2018, 18(93): 124
- [9] 何顺珍,李菲菲,陆一松,等.酶催化荧光猝灭法测定痕量葡萄糖[J].应用化工,2018,47(3):611-613
- HE Shun-zhen, LI Fei-fei, LU Yi-song, et al. Fluorescence quenching analysis of trace glucose using glucose oxidase [J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(3): 611-613
- [10] 毕春元,杜炜,张金玲,等.生物传感器法检测葡萄汁中葡萄糖含量[J].中国酿造,2018,37(10):167-170
- BI Chun-yuan, DU Wei, ZHANG Jin-ling, et al. Determination of glucose content in grape juice by biosensor [J]. China Brewing, 2018, 37(10): 167-170
- [11] NIU Meng, XIONG Li-cheng, ZHANG Bin-jia, et al. Comparative study on protein polymerization in whole-wheat dough modified by transglutaminase and glucose oxidase [J]. LWT, 2018, 90: 323-330
- [12] 史爽. Ana-rLOX 和 rGOx-m 对冷冻非发酵面团的品质影响及其对冷冻面条的应用研究[D].南京:南京农业大学,2015
- SHI Shuang. Effect of Ana-rLOX and RGOx-m on frozen non-fermented dough quality and its application on frozen noodles [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015
- [13] Steffolani M E, Ribotta P D, Gabriela T. Pérez, et al. Effect of glucose oxidase, transglutaminase, and pentosanase on wheat proteins: Relationship with dough properties and bread-making quality [J]. Journal of Cereal Science, 2010, 51(3): 366-373
- [14] 徐皎云,周雪松,郭桦.复合酶制剂对面包品质影响[J].粮食与油脂,2013,6:17-20
- XU Jiao-yun, ZHOU Xue-song, GUO Hua. Effect of compound enzymes on quality of bread [J]. Cereals and Oils, 2013, 6: 17-20
- [15] Tebben Lauren, Shen Yanting, Li Yonghui. Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 10-24
- [16] Altinel B, S S Unal. The effects of certain enzymes on the rheology of dough and the quality characteristics of bread prepared from wheat meal [J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(6): 1628-1637
- [17] Sidsel Langballe Bennedbæk-Jensen Hedehusene, Henrik Ost dal Virum. Process for producing a baked product having increased flavor stability with catalase and phospholipase: US, 9402402B2 [P]. 2016-08-02
- [18] Rezaei M N, Dornez E, Verstrepen K J, et al. Critical assessment of the formation of hydrogen peroxide in dough by fermenting yeast cells [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 183-189
- [19] 张亚萍.小麦过氧化氢酶的表达与性质及其对面粉加工品

- 质的影响[D].广州:华南理工大学,2018
- ZHANG Ya-ping. Expression and enzymatic properties of wheat catalase and its application on the wheat flour processing quality [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018
- [20] 马涛,周佳,张良晨.谷朊粉在面团中作用机理的研究[J].食品工业科技,2012,33(15): 124-126
- MA Tao, ZHOU Jia, ZHANG Liang-chen. Study on mechanism of wheat gluten added in dough [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012,33(15): 124-126
- [21] 郑学玲,王娜,马森.小麦面粉熟化特性研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2016,3:116-122
- ZHENG Xue-ling, WANG Na, MA Sen. Research progress on the property of wheat flour after-ripening [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 3: 116-122
- [22] 豆康宁,石晓,靳亚静,等.几种酶制剂对面包面团发酵体积的影响研究[J].粮食加工,2018,43(3):67-69
- DOU Kang-ning, SHI Xiao, JIN Yajing, et al. Effects of several enzyme preparations on the fermentation volume of bread dough [J]. Grain Processing, 2018, 43(3): 67-69
- [23] Vemulapalli V, A Miller, C Hosney. Glucose oxidase in bread making systems [J]. Cereal Chemistry, 1998, 75(4): 439-442
- [24] Bonet A, Rosell C M, Caballero P A, et al. Glucose oxidase effect on dough rheology and bread quality: A study from macroscopic to molecular level [J]. Food Chem, 2006, 99: 408-415
- [25] 江志坚,刘丽娅,周素梅,等.酶制剂对全麦馒头面团水相溶液理化性质的影响[J].食品与机械,2018,34(5):38-43,53
- JIANG Zhi-jian, LIU Li-ya, ZHOU Su-mei, et al. Effects of enzyme on physicochemical properties of dough liquor extracted from whole wheat Mantou dough [J]. Food and Machinery, 2018, 34(5): 38-43, 53
- [26] 单丽伟.小麦种子过氧化物酶WP1的研究及其对面团流变学特性的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2010
- SHAN Li-wei. Study on wheat seed peroxidase WP1 and its effects on the mixing properties of dough [D]. Xianyang: North West Agriculture and Forestry University, 2010
- [27] 王雨生,耿欣,陈海华,等.酶制剂对面团流变学特性和面包品质的影响[J].中国食品学报,2012,12(9): 128-136
- WANG Yu-sheng, GENG Xin, CHEN Hai-hua, et al. Effect of enzymes on rheological properties of dough and bread quality [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(9): 128-136
- [28] Liao Y, Miller R A, Hosney R C. Role of hydrogen peroxide produced by baker's yeast on dough rheology [J]. Cereal Chem, 1998, 75: 612-616
- [29] Pescador-Piedra J C, Farrera-Rebollo R R, Calderón-Domínguez G. Effect of glucose oxidase and mixing time on soluble and insoluble wheat flour protein fractions: Changes on SH groups and hydrogen peroxide consumption [J]. Food Sci Biotechnol, 2010, 19: 1485-1491
- [30] Zhang Yaping, Chen Meirong, Chen Yu, et al. Characterization and exploration of recombinant wheat catalase for improvement of wheat-flour-processing quality [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(9): 2660-2669
- [31] Decamps K, Joye I J, DeVos D E, et al. A molecular oxygen and reactive oxygen species in bread-making processes: Scarce, but nevertheless important [J]. Crit Rev FoodSci Nutr, 2016, 56: 722-736
- [32] Xu F. Adsorption of oxygen gas by hydrated wheat flour [J]. LWT-Food Sci. Technol, 2001, 34: 66-70
- [33] Nishimura K. Production of thiyl radical on soluble glutenin by superoxide anion radical [J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(1): 117-122
- [34] 王霞.微胶囊化葡萄糖氧化酶的制备及对小麦粉品质的改良研究[D].无锡:江南大学,2011
- WANG Xia. Preparation of microencapsulated glucose oxidase and the improvement on quality of wheat flour [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [35] 唐乐乐,杨瑞金,华霄,等.用于焙烤工艺中具有缓释效果的葡萄糖氧化酶的制备[C]//中国食品科学技术学会会议论文集.杭州:中国食品科学技术学会,2014:205-206
- TANG Le-le, YANG Rui-jin, HUA Xiao, et al. Preparation of controlled-release glucose oxidase for breadmaking [C]// Abstracts of Annual Meeting of CIFS. Hangzhou: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2014: 205-206
- [36] Mudgil D, Barak S, Khatkar B S. Optimization of bread firmness, specific loaf volume and sensory acceptability of bread with soluble fiber and different water levels [J]. J Cereal Sci, 2016, 70: 186-191
- [37] Chaudhary N, Dangi P, Khatkar B S. Relationship of molecular weight distribution profile of unreduced gluten protein extracts with quality characteristics of bread [J]. Food Chem, 2016, 210: 325-331
- [38] Decamps K, Joye I J, Courtin C M, et al. Glucose and pyranoseoxidase improve bread dough stability [J]. Journal of

- Cereal Science, 2012, 55(3): 380-384
- [39] Vetrano A M, Heck D E, Mariano T M, et al. Characterization of the oxidase activity in mammalian catalase [J]. J Biol Chem, 2005, 280: 35372-35381
- [40] 杨春玲, 杨路加. 葡萄糖氧化酶在改良面包粉中的应用[J]. 粮食储藏, 2013, 42(5): 41-43
YANG Chun-ling, YANG Lu-jia. Application of glucose oxidase in modified bread flour [J]. Grain Storage, 2013, 42(5): 41-43
- [41] 魏巍. 酶制剂对国产面粉烘焙品质和面包老化影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009
WEI Wei. Study on the Effect of Enzyme Preparation on baking quality and bread aging of domestic flour [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009
- [42] Wang Xuan, Pei Du-du, Teng Yue-fei, et al. Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 55(8): 389-398
- [43] Aeschbach R, R Amado, H Neukom. Formation of dityrosine cross-links in proteins by oxidation of tyrosine residues [J]. Biochim Biophys Acta, 1976, 439(2): 292-301
- [44] Fausch H, Kündig W, Neukom H. Ferulic acid as a component of a glycoprotein from wheat flour [J]. Nature, 1963, 199(4890): 287-287
- [45] Kaur A, Shevkani K, Katyal M, et al. Physicochemical and rheological properties of starch and flour from different durum wheat varieties and their relationships with noodle quality [J]. J Food Sci Technol, 2016, 53: 2127-2138
- [46] 张怀予. 枸杞面包复合改良剂优化及其品质的主成分分析法多指标评价[J]. 现代面粉工业, 2019, 33(1): 61-72
ZHANG Huai-yu. Optimization of composite improvers of *Lycium barbarum* bread and multiple variables evaluation of principal component analysis on its quality [J]. Modern Flour Milling Industry, 2019, 33(1): 61-72
- [47] 次顿, 孙术国, 刘振东, 等. 优化复合酶改善面包品质研究[J]. 高原农业, 2018, 2(2): 194-200
CI Dun, SUN Shu-guo, LIU Zhen-dong, et al. Study on the optimization of compound enzymes for improving bread quality [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2018, 2(2): 194-200
- [48] Pescador-Piedra C, Garrido-castro A, Chanona-Pérez J, et al. Effect of the addition of mixtures of glucose oxidase, peroxidase and xylanase on rheological and breadmaking properties of wheat flour [J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(4): 748-765
-
- (上接第 150 页)
- [23] 金蓓, 李琳, 李冰, 等. 啤酒酿造过程对麦芽蛋白结构的影响研究[J]. 酿酒科技, 2009, 3: 21-25
JIN Bei, LI Lin, LI Bing, et al. Effects of brewing process on the structure of malt protein [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2009, 3: 21-25
- [24] Leiper K A, Stewart G G, McKeown I P. Beer Polypeptides and silica gel part II: Polypeptides involved in foam formation [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2015, 109(1): 73-79
- [25] Hao J, Li Q, Dong J, et al. Identification of the major proteins in beer foam by mass spectrometry following sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2006, 64(3): 166-174
- [26] Wu M J, Clarke F M, Rogers P J, et al. Identification of a protein with antioxidant activity that is important for the protection against beer ageing [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, 12(9): 6089-6103
- [27] 顾国贤, 林智平, 冯景章. 提高麦汁还原力对啤酒风味稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2003, 11: 51-54
GU Guo-xian, LIN Zhi-ping, FENG Jing-zhang. Improving wort reducing activities against beer staling [J]. Food and Fermentation Industries, 2003, 11: 51-54
- [28] Stanislava Z G, Miroslav M N, Nebojsa I P, et al. Application of a novel antioxidative assay in beer analysis and brewing process monitoring [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(2): 744-751