

# 中高温干燥对发酵挂面品质的影响

何瑾璇, 刘翀\*, 郑学玲

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州, 450001)

**摘要:** 为解决发酵挂面在发酵过程中产生多孔结构破坏面筋网络结构且低温干燥过程无法引起蛋白质变性、面筋网络较好地交联造成其易断、不耐煮等问题。该研究旨在了解中高温干燥对发酵挂面品质的影响及机制。中高温干燥可以促进面筋蛋白交联, 改善面条品质。在对应不同产品水分含量(高、中或低)的低温干燥过程的不同阶段(初、中和后期)分别升温至 65 或 80 °C 进行干燥, 测定了干挂面的水分含量、色泽、抗弯特性以及煮后面条的质构和拉伸特性, 进一步分析了淀粉糊化特性、动态流变学特性以及谷蛋白大聚体、游离巯基含量的变化。相比对照组, 高温干燥可提高干挂面抗弯强度(最高达 39.72%); 中、高温干燥增加了煮后面条干物质吸水率(最高达 27.73%), 增强了熟面条的硬度(最高达 9.21%), 降低了表面粘性(最高达 59.16%)。结果表明高温干燥促进蛋白质交联, 有助于增强面筋网络结构, 减少淀粉的膨胀和颗粒的崩解。相关结论对于提升发酵挂面的品质具有重要的指导意义。

**关键词:** 发酵挂面; 高温干燥; 品质特性; 糊化特性; 流变特性; 蛋白质聚集

文章编号: 1673-9078(2022)10-227-234

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1364

## Effects of Medium-high Temperature Drying on the Quality of Fermented Dried Noodles

HE Jinxuan, LIU Chong\*, ZHENG Xueling

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the porous structure of fermented vermicelli during fermentation destroys the gluten network structure, the low-temperature drying process can not cause protein denaturation, and the gluten network is well cross-linked, which makes it easy to break and not resistant to cooking. The effect and mechanism of medium-high temperature drying on the quality of fermented dried noodles was investigated. Medium-high temperature drying could promote gluten protein cross-linking and improve noodle quality. The temperature was raised to 65 or 80 °C at different stages (beginning, middle and end) of the low-temperature drying process corresponding to different moisture contents of the products (high, medium or low), respectively. The moisture content, colour and flexural properties of the dried noodles were determined, as well as the texture and tensile properties of the cooked noodles. The pasting properties and dynamic rheological properties of starch as well as the changes in the contents of gluten macromers and free sulfhydryl groups were further analysed. Compared with the control group, high temperature drying could improve the flexural strength of dry noodles (up to 39.72%); medium-high temperature drying increased the water absorption of the dry matter in the cooked noodles (up to 27.73%), increased the hardness of the cooked noodles (up to 9.21%) and decreased the surface viscosity (up to 59.16%). The results indicated that high temperature drying promoted protein cross-linking, strengthened the gluten network structure, and reduced starch swelling and granule disintegration. The findings have important implications for improving the quality of fermented noodles.

**Key words:** fermented noodles; high temperature drying; quality characteristics; pasting properties; rheological properties; protein aggregation

引文格式:

何瑾璇,刘翀,郑学玲.中高温干燥对发酵挂面品质的影响[J].现代食品科技,2022,38(10):227-234

HE Jinxuan, LIU Chong, ZHENG Xueling. Effects of medium-high temperature drying on the quality of fermented dried noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 227-234

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102110079); 河南工业大学自然科学创新基金一般项目基金项目(2020ZKCJ12)

作者简介: 何瑾璇(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉加工理论与技术, E-mail: 1146543347@qq.com

通讯作者: 刘翀(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淀粉加工理论与技术, E-mail: liuachong@haut.ed.cn

发酵挂面是近年出现的营养风味型挂面新产品,但是酵母发酵产生的多孔结构引起易断、不爽滑、不耐煮等缺点需要改善。干燥过程作为发酵空心挂面的关键工序,对其品质的影响至关重要。目前发酵挂面主要采用低温干燥的方式,但低温干燥后的挂面仍然存在上述质量问题<sup>[1]</sup>。相比于低温干燥,高温干燥应用于挂面干燥过程研究较少。近年有研究对挂面产品(水分含量<15%)进行高温干蒸处理,显著提高了挂面的耐煮性,然而其机制有待进一步分析<sup>[2]</sup>。在国外,高温干燥工艺逐渐取代了35~50℃的传统低温干燥应用于意大利面的生产过程<sup>[3-5]</sup>。高温干燥(60~90℃)促进面筋蛋白的交联,强化了面筋网络对淀粉颗粒的包裹作用,可抑制淀粉颗粒在蒸煮过程中的过分溶胀和破裂,降低意大利面的蒸煮损失,增加其弹性和耐煮性<sup>[6-8]</sup>。但是研究也发现,当面条水分含量较高时候(20%~30%)进行升温干燥,会造成面条表面的淀粉糊化度过高,引起蒸煮损失和表面粘性的增加,因此,需要将面条干燥到较低的水分含量(<16%)时,再升温干燥。这是由于在产品水分含量较低时进行高温处理,有点类似于淀粉的湿热改性(Heat-moisture Treatment, HMT),可以保留淀粉颗粒完整性而不会引起其糊化<sup>[9]</sup>。高温干燥除了改善意大利面的蒸煮和质构品质之外,还可缩短干燥时间、提高生产率、改善微生物安全性、钝化脂肪氧化酶利于面条长期储藏。当然,干燥的条件需要小心控制,是由于高温干燥引发的美拉德反应可能会使面条的色泽加深<sup>[10]</sup>。

关于高温干燥对意大利面条蒸煮特性和质构特性的影响已经有不少研究。然而,高温干燥对于挂面品质,尤其是对于发酵挂面品质的影响及其内在机制,相关研究尚未见报道。为了明确中高温干燥对发酵挂面品质的影响及分子机制,对不同水分含量(高、中或低)的发酵挂面分别升温至65或80℃进行干燥,研究中高温干燥对发酵挂面的品质特性的影响,进一步分析高温干燥后挂面的淀粉和蛋白质特性,以揭示高温干燥对发酵挂面品质影响的机理。该研究对于指导发酵挂面的生产具有重要的意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 原料

试验所用小麦粉由河北五得利面粉集团提供。食盐,中盐河南省盐业总公司生产。即发酵母(低糖型),广西丹宝利酵母有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

JHMZ型针式和面机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;JMTD 168/180型试验面条机,北京东方孚德技术发展中心;SPX型生化培养箱,北京鑫润科诺仪器仪表有限公司;TA-XT型质构仪,英国Stable Micro Systems公司;SYT-030智能挂面干燥试验台,中国包装和食品机械有限公司;RVA-4型快速黏度分析仪,澳大利亚Newport Scientifi公司;Satake mini color grader便携式测色仪,日本佐竹公司;Haake RS6000型流变仪,德国赛默飞世尔科技有限公司;Foss Kjeltec 8400全自动凯氏定氮仪,福斯分析仪器公司;UV762紫外分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 发酵挂面制作

称取400g面粉(湿基13.4wt%),加入1%的酵母,加入蒸馏水(面团最终含水率为33.0wt%)和0.5wt%食盐,用针式和面机和面7min。将面絮放入自封袋,在SPX型生化培养箱醒发(30℃,30min)。用压面机经4道复合压延至3.0mm厚面带,再经9道单向压延,制成厚1.0mm、宽3.0mm的鲜面条,悬挂于挂面干燥平台中干燥。为使面条充分发酵且外观形态较好,预干燥阶段条件为T30℃/RH85%,干燥时间为90min。随后主干燥区的温度设定参照Zweifel<sup>[11]</sup>的方法略作改动。主干燥阶段条件分别为:先在T50℃/RH80%干燥10min,使面条水分含量达到28%,为高水分含量(High Moisture, HM);在T50℃/RH80%干燥25min,使面条水分含量达到22%,为中水分含量(Moderate Moisture, MM);在T50℃/RH80%干燥55min,使面条水分含量达到16%,为低水分含量(Low Moisture, LM)。然后将不同水分含量的面条分别在65℃中温(Moderate Temperature, MT)、80℃高温(High Temperature, HT)进行升温干燥250min,得到MT-HM、MT-MM、MT-LM、HT-HM、HT-MM、HT-LM六个样品。低温50℃、相对湿度80%及产品水分含量33%干燥的发酵挂面作为对照样品。完成干燥阶段条件统一为T30℃/RH65%,干燥时间100min。

#### 1.3.2 产品最终水分含量测定

发酵空心挂面产品最终水分含量参照GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定。

#### 1.3.3 色泽测定

采用便携式测色仪对挂面粉进行色泽测定,选择CGV(Dry)模式,测试前用白板校正。称取6g提前磨好的挂面粉于石英皿中,并使样品均匀平整地覆盖在石英皿底部,记录测定的 $L^*$ (代表亮度)、 $a^*$ (代

表红绿, +表示偏红, -表示偏绿)、 $b^*$ 值(代表黄蓝, +表示偏黄, -表示偏蓝)。测定三次取平均值。

### 1.3.4 干挂面抗弯强度测定

干挂面抗弯强度参照王杰<sup>[12]</sup>的方法, 略作改动, 选取厚度相同的干挂面, 截成长度 18 cm, 垂直放于物性测定仪专用平台上, 用探头 (Spaghetti Flexure A/SFR) 将挂面以 1.00 mm/s 的速度下压, 直至挂面被折断, 每份样品重复测量 5 次, 结果取平均值。

### 1.3.5 蒸煮特性测定

蒸煮特性参照刘健飞等<sup>[13]</sup>的方法, 略作改动。称取约 10 g 面条, 放入 500 mL 沸水中煮至最佳蒸煮时间(从 2 min 开始每隔 10 s 取一根面条置于两玻片间挤压, 至面条内部白芯完全消失), 在 300 mL 冷水中浸泡 30 s 后于滤纸上吸水晾置 5 min, 将面汤和冷却水倒入 1 000 mL 容量瓶中定容后量取 50 mL 于恒重铝盒中, 在 105 °C 烘箱中烘至恒重计算面条的干物质吸水率及蒸煮损失率, 公式如下:

$$X = \frac{m_1 - m_0}{m_0 \times (1 - w)} \times 100\% \quad (1)$$

$$Z = \frac{m \times 20}{m_0 \times (1 - w)} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$X$ ——干物质吸水率, %;

$Z$ ——蒸煮损失率, %;

$w$ ——挂面水分含量, %;

$m$ ——50 mL 面汤干物质质量, g;

$m_0$ ——煮前面条质量, g;

$m_1$ ——煮后面条质量, g。

### 1.3.6 质构、拉伸特性测定

煮后空心挂面的质构特性测定参数参照张蕴华等<sup>[14]</sup>的方法。

TPA 试验: 选择 HDP/PFS 型探头, 测前速度 2 mm/s, 测中速度 0.8 mm/s, 测后速度 0.8 mm/s, 触发力为 Auto-10.0 g, 压缩程度 75%, 两次压缩时间间隔 5 s, 每个样品至少测 5 次。

拉伸试验: 选择 A/SPR 型探头, 测前速度 2 mm/s, 测中速度 2 mm/s, 测后速度 10 mm/s, 最大拉伸距离为 120 mm, 起始距离 35 mm, 触发力为 Auto-5.0 g, 每个样品至少测 5 次。

### 1.3.7 糊化特性测定

采用 Rapid Visco 分析仪 (RVA) 测定, 具体方法参照 GB/T 24853-2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法》。

### 1.3.8 动态流变学特性测定

动态流变学特性测定参照李明菲<sup>[15]</sup>的方法。采用

Haake 流变仪测定挂面粉中淀粉的流变学特性, 参照刘琳<sup>[16]</sup>的方法配制待测 10% ( $m/m$ ) 悬浮液。

温度扫描: 用移液枪将 1 mL 的悬浮液滴至测定台, 选用 PP35Ti 转子, 间隙 1 mm。流变仪采用控制应变 (CS) 模式, 温度从 25 °C 以速率为 3.25 °C/min 升温至 90 °C, 在 90 °C 时保持 10 min, 然后以速率 3.25 °C/min 降温至 25 °C。应变 1%, 频率 1.0 Hz。

频率扫描: 采用哈克流变仪选择频率扫描模式, 将上述降温结束后得到的样品进行频率扫描, 条件为频率 ( $f$ ) 0.1~10 Hz, 温度 25 °C, 应变 1%。

应变扫描: 用哈克流变仪对频率扫描得到的样品进行应变扫描, 应变范围为 0.01~1 (1/S), 频率为 1 Hz, 温度为 25 °C。得到 HMT 样品的弹性模量 ( $G'$ ) 和粘性模量 ( $G''$ ) 随应变的变化曲线。

### 1.3.9 谷蛋白大聚体 (GMP) 含量测定

取冻干研磨之后的面片样品 (1.0 g) 于离心管中, 加入 20 mL 1.5% ( $m/V$ ) SDS 溶液, 漩涡震荡 30 s 混合均匀, 室温下振荡 1 h 后于 15 500 g 下离心 15 min, 弃上清液, 沉淀再次溶解于 20 mL 1.5% ( $m/V$ ) SDS 溶液, 重复上述步骤两次。最终用凯氏定氮法测定沉淀中的蛋白含量近似作为 GMP 含量 ( $N$  的折算系数为 5.7), 每个样品重复 3 次。

### 1.3.10 游离巯基 (-SH) 含量测定

游离巯基含量的测定参照 Chen<sup>[17]</sup>的方法稍作修改: 冻干面片样品 (240 mg) 溶解于 9 mL A 液 [8 mol/L 尿素, 3 mmol/L EDTA, 1% SDS, 0.2 mol/L Tris-HCl (pH 值 8.0)] 中, 漩涡振荡混匀, 室温下振荡 1 h 后, 再向其中加入 0.9 mL B 液 [10 mmol/L DTNB, 0.2 mol/L Tris-HCl (pH 值 8.0)], 继续振荡 1 h, 随后在 13 600 g 下离心 15 min, 取上清液在 412 nm 下测定吸光度, 游离巯基含量计算见式 (3), 每个样品重复测定 3 次。

$$C = A/\epsilon b \quad (3)$$

式中:

$C$ ——游离巯基 (-SH) 含量;

$A$ ——测定吸光度;

$\epsilon$ ——消光系数;

$b$ ——比色皿宽度。

### 1.3.11 共聚焦激光扫描显微镜 (CLSM)

共聚焦激光扫描根据 Silva<sup>[18]</sup>的方法稍作修改, 将约 1 cm 的冷冻熟面条包裹在徕卡胶中, 用冷冻切片机切成 20  $\mu$ m 切片。将切片转移到载玻片上, 并用 0.25% ( $m/m$ ) 荧光素 5-异硫氰酸酯 (FITC) 和 0.025% ( $m/m$ ) 罗丹明 B 以 1:1 比例的混合溶液染色。FITC 和罗丹明 B 用于淀粉 (绿色) 和蛋白质 (红色) 的非共价标

记。染色 10 min 后,用少量去离子水冲洗样品,用滤纸吸走多余的液体,然后用盖玻片覆盖。以 1 024×1 024 像素分辨率获得的 CLSM 图像,以确定煮熟面条的微观结构。

### 1.4 数据分析方法

使用血管网络分析软件 (Angio Tool) 处理 CLSM 图像,采用 Origin 8.0 进行制图,SSPS 25 统计分析软件进行数据处理和统计分析,以  $p < 0.05$  为显著性标准。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干燥过程发酵挂面脱水曲线

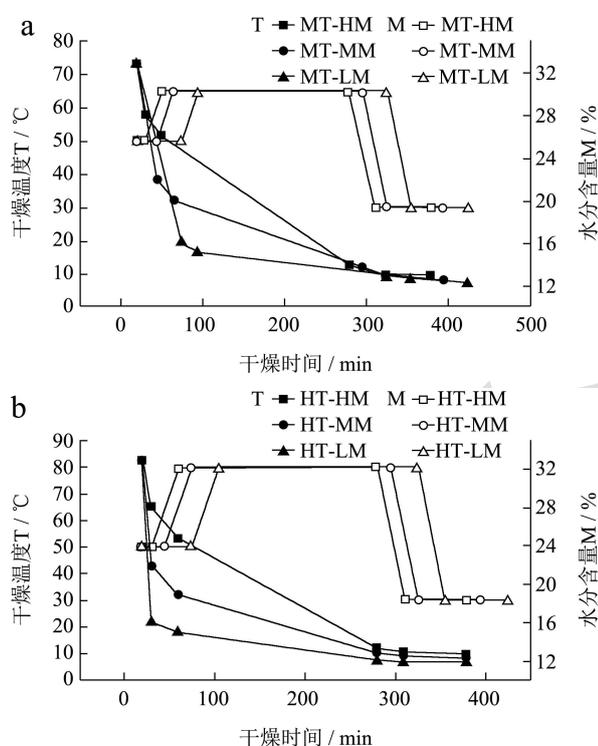


图 1 发酵面条在中 (a)、高温 (b) 干燥温度曲线和脱水曲线

Fig.1 Drying temperature curve and dehydration curve of fermented noodles at medium (a) and high temperature (b)

发酵挂面的脱水曲线如图 1 所示。随着升温过程的进行,挂面水分含量呈先急剧下降的趋势,当达到指定的温度后,水分含量的下降速率相比于升温阶段下降,降温阶段,水分含量呈平缓下降趋势,在整个干燥过程高温干燥速率高于中温干燥且水分先达到要求的含量。在干燥初始阶段,高水分含量样品的干燥速率高于低水分含量样品,这一趋势随着温度的升高更加明显。可能是由于面条水分含量高,水分从面条内部向表面转移速率大于表面蒸发速率,表面蒸发速率为限制因素,干燥温度越高,面条表面水分蒸发越快,面条干燥速率越高,面条水分含量低,面条内部水分向

表面转移扩散的速度低于面条表面水分蒸发的速度,水分内部扩散过程称为干燥的速率限制因素,导致高水分含量面条的干燥速率高于低水分含量面条。

### 2.2 干燥条件对发酵挂面色泽的影响

干燥条件引起发酵挂面色泽的差异从表 1 可知。MT-LM 的  $L^*$  值显著高于对照和 MT-HM,其他干燥条件之间无显著差异。MT-LM、HT-HM、HT-MM 的  $a^*$  值显著高于 MT-LM,其他干燥条件之间无显著差异。HT-MM、HT-LM 的  $b^*$  值显著高于对照和中温干燥。可能由于高温干燥使得脂氧化酶失活,导致面条黄度增加,还可能是因为在高温条件下对低水分含量的面条进行干燥,可以促进美拉德反应和红棕色类黑素物质产生<sup>[10,18]</sup>。

表 1 不同条件发酵挂面的色泽

Table 1 Color of fermented noodles under different drying conditions

样品	$L^*$	$a^*$	$b^*$
对照	90.35±0.15 <sup>b</sup>	0.70±0.10 <sup>ab</sup>	12.55±0.15 <sup>d</sup>
MT-HM	90.40±0.10 <sup>b</sup>	0.85±0.05 <sup>a</sup>	13.10±0.00 <sup>cd</sup>
MT-MM	90.85±0.35 <sup>ab</sup>	0.70±0.10 <sup>ab</sup>	13.25±0.55 <sup>cd</sup>
MT-LM	90.55±0.05 <sup>a</sup>	0.55±0.05 <sup>b</sup>	13.10±0.10 <sup>cd</sup>
HT-HM	90.70±0.10 <sup>ab</sup>	0.80±0.10 <sup>a</sup>	13.50±0.00 <sup>bc</sup>
HT-MM	90.95±0.05 <sup>ab</sup>	0.80±0.10 <sup>a</sup>	14.20±0.50 <sup>a</sup>
HT-LM	90.70±0.00 <sup>ab</sup>	0.65±0.05 <sup>ab</sup>	14.25±0.25 <sup>ab</sup>

注:同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。下表同。

### 2.3 干燥条件对发酵挂面弯折特性的影响

表 2 不同干燥条件发酵挂面的抗弯特性

Table 2 Bending resistance of fermented noodles under different drying conditions

样品	弯折强度/g	弯折距离/mm	折断功/J
对照	30.97±2.44 <sup>b</sup>	8.54±1.93 <sup>a</sup>	260.23±50.56 <sup>a</sup>
MT-HM	39.04±2.98 <sup>ab</sup>	6.07±0.90 <sup>bc</sup>	237.21±40.33 <sup>a</sup>
MT-MM	39.50±1.49 <sup>ab</sup>	5.81±1.14 <sup>bc</sup>	228.92±43.46 <sup>a</sup>
MT-LM	30.69±1.84 <sup>b</sup>	7.31±0.51 <sup>ab</sup>	224.12±19.91 <sup>a</sup>
HT-HM	42.69±1.95 <sup>a</sup>	6.35±0.65 <sup>bc</sup>	270.90±28.28 <sup>a</sup>
HT-MM	42.05±1.58 <sup>a</sup>	4.63±0.62 <sup>c</sup>	194.71±28.26 <sup>a</sup>
HT-LM	43.27±2.26 <sup>a</sup>	5.06±0.93 <sup>c</sup>	218.86±42.36 <sup>a</sup>

干燥条件下发酵挂面弯折特性如表 2 所示。在中温干燥下,MT-LM 的弯折强度 30.69 g 显著低于其他两组,弯折距离和折断功在不同起始水分含量间无显著差异。在高温干燥下,弯折强度、弯折距离和折断距离在不同起始含水量间无显著差异。在低起始水分

含量时, 高温干燥的发酵挂面弯折强度显著高于中温干燥和对照组, 其中 HT-LM 最高达 43.27 g, 弯折距离 5.06 mm 显著低于中温干燥和对照组。说明高温引起蛋白质变性交联, 增强面条的抗弯强度。与弯折强度相反, 提高温度会降低挂面的弯折距离。但除了 MT-LM 外, 弯折距离随温度和水分含量变化不显著。折断功在不同干燥条件下无显著性差异。

## 2.4 干燥条件对发酵挂面蒸煮特性的影响

表 3 不同干燥条件发酵挂面的蒸煮特性

Table 3 Cooking characteristics of fermented noodles under different drying conditions

样品	蒸煮时间/s	干物质吸水率/%	蒸煮损失率/%
对照	280.50±4.50 <sup>ab</sup>	149.86±2.25 <sup>e</sup>	5.57±0.00 <sup>a</sup>
MT-HM	238.00±2.00 <sup>d</sup>	160.10±3.07 <sup>d</sup>	5.63±0.08 <sup>a</sup>
MT-MM	272.00±1.00 <sup>c</sup>	160.20±2.32 <sup>d</sup>	5.57±0.03 <sup>a</sup>
MT-LM	269.00±1.00 <sup>c</sup>	153.37±1.77 <sup>e</sup>	5.56±0.15 <sup>a</sup>
HT-HM	277.00±1.00 <sup>b</sup>	180.31±1.80 <sup>b</sup>	5.00±0.07 <sup>c</sup>
HT-MM	264.50±1.50 <sup>c</sup>	166.61±1.22 <sup>c</sup>	4.84±0.02 <sup>c</sup>
HT-LM	281.50±2.50 <sup>ab</sup>	191.41±0.41 <sup>a</sup>	5.19±0.10 <sup>b</sup>

干燥条件引起面条蒸煮特性的差异如表 3 所示。在中温干燥下, MT-HM 的最佳蒸煮时间 238.00 s 显著低于其他两组, MT-LM 的干物质吸水率 153.37% 显著低于其他两组, 蒸煮损失率无显著差异; 在高温干燥下, HT-LM 的最佳蒸煮时间 281.50 s 和干物质吸水率

191.41% 显著高于其他两组, 干物质吸水率随起始水分含量的降低呈先下降后上升的趋势。对照组和 HT-LM 的最佳蒸煮时间 280.50 s、281.50 s 显著高于其他干燥条件。高温干燥下发酵挂面的干物质吸水率显著高于中温干燥和对照组。高温干燥下发酵挂面的蒸煮损失率显著低于中温干燥和对照组。可能是由于高温可促进面筋网络交联, 抑制了直链淀粉溶出, 面筋网络紧密包裹淀粉颗粒, 使面条的网络结构增强, 提高面条的吸水率<sup>[19,20]</sup>。

## 2.5 干燥条件对发酵挂面质构及拉伸特性的影响

淀粉和蛋白质作为面条的主要组分, 高温可引起淀粉和蛋白质理化性质的改变, 进而影响面条的结构和质地<sup>[21]</sup>。干燥条件引起煮熟面条质构特性差异如表 4 所示。在相同起始水分含量时, 煮后面条的硬度和粘附性随干燥温度升高而降低; 拉伸力随干燥温度升高而上升。在中温干燥下, MT-MM 面条的硬度 5 301.85 g 显著低于其他两组, 粘附性随起始水分含量下降呈先下降后上升的趋势, MT-LM 面条的咀嚼性 4 155.21 和拉伸力 38.86 g 显著高于其他两组, 弹性和拉短距离无显著差异。在高温干燥下, HT-HM 面条的硬度 4 978.58 g 和拉伸力 39.29 g 显著低于其他两组, HT-LM 面条的粘附性 72.90 g·sec 和咀嚼性 3 824.23 显著高于其他两组, 弹性和拉伸距离无显著差异。

表 4 不同干燥条件发酵挂面的质构和拉伸特性

Table 4 Texture and tensile properties of fermented noodles under different drying conditions

样品	硬度/g	粘附性/g·sec	弹性/%	咀嚼性	拉伸力/g	拉伸距离/mm
对照	5 127.08±285.30 <sup>bc</sup>	101.77±29.16 <sup>bc</sup>	0.93±0.01 <sup>a</sup>	3 496.91±147.47 <sup>b</sup>	35.13±1.51 <sup>c</sup>	40.84±3.91 <sup>a</sup>
MT-HM	5 599.70±234.52 <sup>ab</sup>	86.64±17.01 <sup>b</sup>	0.90±0.06 <sup>a</sup>	3 764.75±429.16 <sup>ab</sup>	36.13±2.35 <sup>bc</sup>	40.56±4.34 <sup>a</sup>
MT-MM	5 301.85±227.21 <sup>abc</sup>	72.33±8.28 <sup>ab</sup>	0.95±0.02 <sup>a</sup>	3 726.26±175.91 <sup>ab</sup>	36.87±1.40 <sup>bc</sup>	40.71±2.24 <sup>a</sup>
MT-LM	5 784.08±151.66 <sup>a</sup>	129.16±31.69 <sup>c</sup>	0.94±0.02 <sup>a</sup>	4 155.21±71.01 <sup>a</sup>	38.86±0.33 <sup>abc</sup>	43.41±0.61 <sup>a</sup>
HT-HM	4 978.58±495.20 <sup>c</sup>	41.56±13.98 <sup>a</sup>	0.89±0.09 <sup>a</sup>	3 366.24±324.55 <sup>b</sup>	39.29±2.27 <sup>ab</sup>	34.47±3.36 <sup>a</sup>
HT-MM	5 116.68±20.62 <sup>bc</sup>	41.67±11.32 <sup>a</sup>	0.89±0.06 <sup>a</sup>	3 471.90±377.04 <sup>b</sup>	43.36±1.78 <sup>a</sup>	40.28±4.49 <sup>a</sup>
HT-LM	5 532.08±167.57 <sup>abc</sup>	72.90±8.85 <sup>ab</sup>	0.87±0.03 <sup>a</sup>	3 824.23±75.36 <sup>ab</sup>	41.23±0.34 <sup>a</sup>	36.53±3.08 <sup>a</sup>

## 2.6 干燥条件对淀粉糊化特性的影响

不同干燥条件对淀粉糊化特性的影响如图 3 所示, 从图中可以看出高温干燥样品中淀粉的峰值黏度显著高于对照组和中温干燥, 糊化温度显著低于对照组和中温干燥, 可能是由于高温干燥会促进蛋白交联, 形成弹性、强度更高的网络, 使得淀粉在溶胀过程中难以破裂, 具有更大的溶胀度, 另外, 高温也可能造成

了淀粉的轻微糊化, 使得起始糊化温度降低。在高温干燥过程中, 不同的起始产品水分含量引起面条中淀粉糊化特性的差异, 低起始水分含量的峰值黏度显著低于高、中起始水分含量, 糊化温度显著高于高、中起始水分含量, 这是由于水分含量较高时, 淀粉颗粒受到水分和热能的双重作用吸水膨胀<sup>[9]</sup>, 随着淀粉颗粒持续吸水膨胀, 部分淀粉颗粒最终胀破, 使得损伤淀粉含量升高, 导致其峰值黏度上升, 糊化温度下降<sup>[22]</sup>。

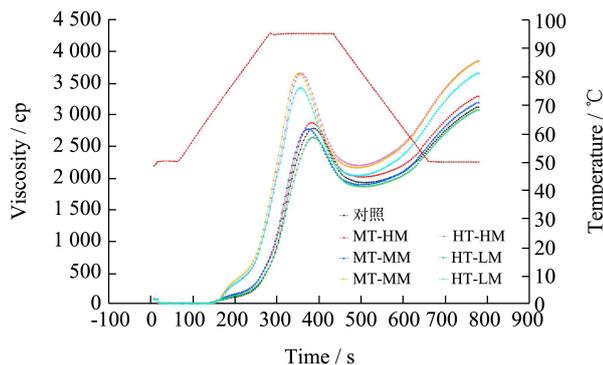


图2 不同干燥条件发酵挂面的糊化特性

Fig.2 Gelatinization characteristics of fermented noodles under different drying conditions

### 2.7 干燥条件对发酵挂面中淀粉动态流变学特性的影响

从图3a中可看出,经过高温干燥后的样品与对照组样品相比,开始加热时 $G'$ 没有明显变化,在温度加热到95℃并保温一段时间后, $G'$ 迅速上升。这是由于在升温过程中淀粉颗粒吸水膨胀且体积增大,直链淀粉从淀粉颗粒中溶出与淀粉颗粒缠绕形成网络结构,使得 $G'$ 和 $G''$ 增加<sup>[22]</sup>。当到达冷却阶段后, $G'$ 持续上升。在降温阶段时,不同干燥条件样品的 $G'$ 达到最大值。在此后温度降低至25℃的冷却阶段中, $G'$ 开始下降。表明凝胶结构在长时间加热过程中被破坏,可能是进一步加热使膨胀的淀粉颗粒中残留的结晶区域融化,淀粉颗粒变形、破裂、崩解,分子流动性增加,导致链间相互作用减弱<sup>[23]</sup>。同一干燥温度下的样品, $G'$ 随样品水分含量降低而升高,这可能是由于低产品水分干燥过程限制的淀粉颗粒吸水膨胀。与对照组和中温高、中产品水分的样品相比,高温干燥后样品的弹性模量 $G'$ 与粘性模量 $G''$ 均高于前者,这可能是由于高温使蛋白变性,导致通道堵塞且阻止水分进入颗粒内部,最终造成淀粉颗粒糊化过程中无法充分吸水膨胀<sup>[24]</sup>。在降温阶段 $G'$ 先上升后下降可能是因为淀粉开始老化造成的,氢键互相结合重新形成微结晶束。

从图3b中可看出,随着扫描频率的增大, $G'$ 与 $G''$ 均随着频率的增大而增大且 $G'$ 始终大于 $G''$ ,这表明所有样品以弹性性质为主。在中温干燥时, $G'$ 和 $G''$ 随着起始产品水分含量的降低呈先上升后下降趋势。在高温干燥时, $G'$ 和 $G''$ 随着起始产品水分含量的降低而降低。中、高温干燥的样品 $G'$ 和 $G''$ 均高于对照组,这表明干燥温度的升高使样品粉的黏性和弹性均增强,可能是由于高温使得样品粉中淀粉颗粒的晶体结构破坏,导致其凝胶柔韧性提高<sup>[25]</sup>。

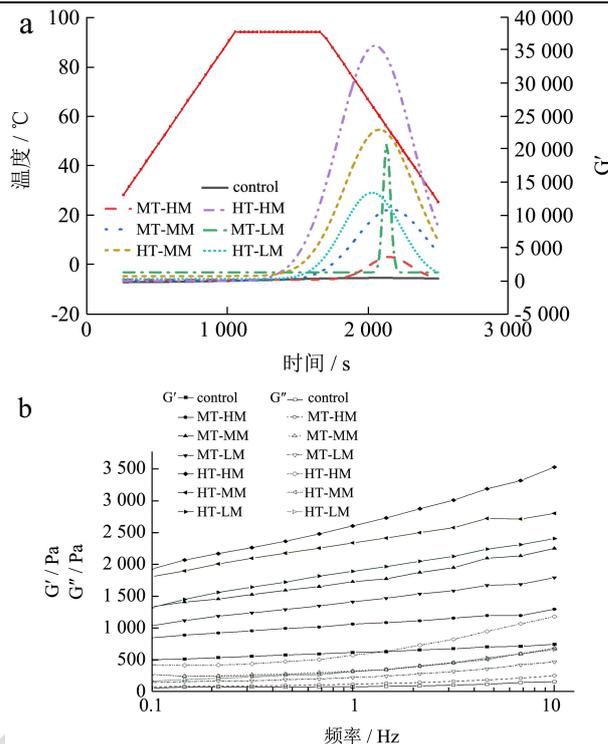


图3 不同干燥条件发酵挂面的温度扫描(a)和频率扫描(b)  
Fig.3 Temperature scan (a) and frequency scan (b) of fermented noodles under different drying conditions

### 2.8 干燥条件对谷蛋白大聚体(GMP)含量的影响

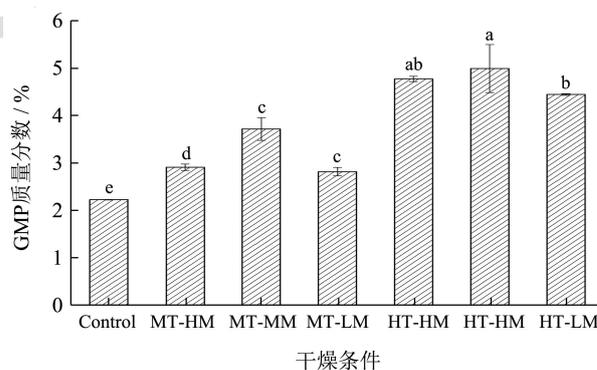


图4 不同干燥条件谷蛋白大聚体的含量

Fig.4 Glutenin macropolymer content in fermented noodles under different drying conditions

GMP是指不溶于1.5% SDS溶液的麦谷蛋白,在面筋网络的形成过程中起重要作用<sup>[26]</sup>。从图4中可以看出,高温干燥发酵挂面中GMP质量分数4.76%、4.99%、4.45%显著高于对照组2.23%和中温干燥2.92%、3.72%、2.82%,是由于高温诱导蛋白质变性,加强面筋网络的交联,使淀粉吸收更少的水,增加面条的硬度并且降低其粘性<sup>[27]</sup>。低水分含量进行升温的发酵挂面GMP含量显著低于中水分含量,水分含量

成为了另一个影响谷蛋白聚集的重要因素<sup>[28]</sup>,水分含量过高或者过低都会影响蛋白质的水合作用,导致GMP含量下降。

## 2.9 干燥条件对游离巯基(-SH)含量的影响

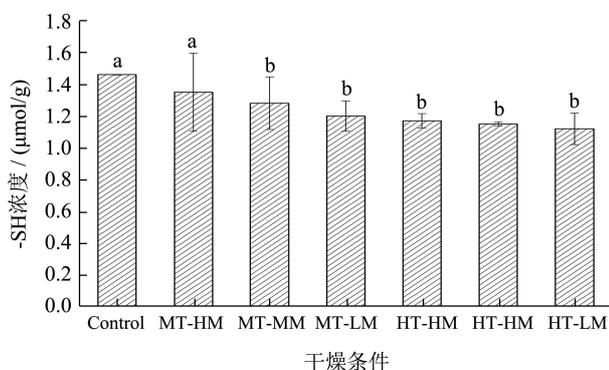


图5 不同干燥条件发酵挂面游离巯基的含量

Fig.5 Content of free sulfhydryl group in fermented noodles under different drying condition

谷蛋白中游离巯基含量的变化是谷蛋白分子链通过二硫键聚集程度的重要指标<sup>[29]</sup>。可通过测定面筋蛋白

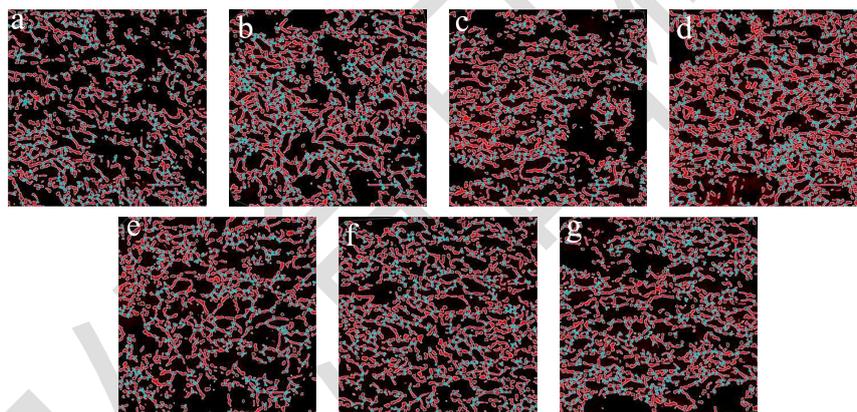


图6 不同干燥条件煮熟发酵挂面的 CLSM

Fig.6 CLSM of fermented dried noodles cooked under different drying conditions

注: a: control; b: MT-HM; c: MT-MM; d: MT-LM; e: HT-HM; f: HT-MM; g: HT-LM。

## 3 结论

高温干燥促进面筋网络交联,抑制了直链淀粉的扩散,在面条内部,连续的面筋网络抵抗了淀粉膨胀对面条品质带来的负面影响,使面条的网络结构增强,提高面条的吸水率且面条更加柔软,故煮前 HT-LM 面条的抗弯强度 43.27 g 最高,煮后 HT-HM、HT-MM 面条的干物质吸水率 180.31%、166.61% 较高且硬度 4 978.58 g、5 116.68 g 较低,煮后面条的蒸煮损失率 5.00%、4.84% 显著低于其他干燥条件。高温低水分含量干燥使淀粉部分重排,降低了其溶胀能力,增强了面筋网络结构,使得煮后 HT-MM、HT-LM 面条的拉断力 43.36 g、41.23 g 显著高于其他样品。本研究对于

中游离巯基的含量评价面筋蛋白分子链聚集状态<sup>[30]</sup>。从图 5 中可以看出,中、高温干燥样品中游离巯基的含量均低于低温干燥的对照组 1.46%。相同产品水分含量时,游离巯基含量随温度升高呈下降趋势,是由于高温可促进面筋蛋白聚集交联导致游离巯基含量下降。在相同干燥温度时,游离巯基含量随产品水分含量的降低而降低,表明低产品水分含量促进游离巯基氧化形成二硫键并且交联,造成面筋蛋白的聚集<sup>[31]</sup>。

## 2.10 干燥条件对煮熟面条微观结构的影响

图 6 展示了利用 CLSM 扫描不同干燥条件煮熟面条的微观图。由 FITC 染成绿色淀粉与罗丹明 B 染成红色面筋网络复合形成的网络结构图经 Angio Tool 软件处理后,面筋网络结构可清楚地看出。对照组呈现稀疏且断裂的面筋网络结构。随着干燥温度升高,面筋网络结构呈现较好的连续性,并且高温干燥下淀粉充分糊化溶胀,连续的面筋网络均匀包裹着淀粉颗粒包裹,使得煮熟的面条表面粘附性低于对照组和中温干燥,拉断力高于对照组和中温干燥。

中高温干燥对发酵挂面品质的影响及分子机制进行分析,相关结论有助于提升发酵挂面的品质。

## 参考文献

- [1] 王金荣.空心挂面加工和品质的影响因素研究及机理探讨[D].无锡:江南大学,2021
- [2] 陈克明,朱伟,甘平洋,等.一种挂面干蒸方法及干蒸挂面:CN102578176 A [P]. 2012
- [3] Petitot M, Brossard C, Barron C, et al. Modification of pasta structure induced by high drying temperatures. Effects on the *in vitro* digestibility of protein and starch fractions and the potential allergenicity of protein hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2009, 116(2): 401-412

- [4] D'Amico S, Mäschle J, Jekle M, et al. Effect of high temperature drying on gluten-free pasta properties [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 391-399
- [5] Padalino L, Caliandro R, Chita G, et al. Study of drying process on starch structural properties and their effect on semolina pasta sensory quality [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 153: 229-235
- [6] Resmini P, Pagani A. Ultrastructure studies of pasta: a review [J]. *Food Microstruct*, 1983, 2: 1-12
- [7] Pagani M A, Gallant D J, Bouchet B, et al. Ultrastructure of cooked spaghetti [J]. *Food Microstruct*, 1986, 5: 111-129
- [8] Jacobs H, Delcour J A. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: a review [J]. *Food Chem*, 1998, 46: 2895-2905
- [9] 洪静. 热处理对小麦损伤淀粉的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014
- [10] Acquistucci R. Influence of Maillard reaction on protein modification and colour development in pasta. Comparison of different drying conditions [J]. *Lebens Wiss Technol*, 2000, 33: 48-52
- [11] Zweifel C, Conde-Petit B, Escher F. Thermal modifications of starch during high-temperature drying [J]. *Cereal Chem*, 2000, 77: 645-651
- [12] 王杰. 挂面干燥工艺及过程控制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014
- [13] 刘健飞, 郑学玲, 刘翀. 不同水分对复合压延面片力学性质及面条品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(17): 1-15
- [14] 张蕴华, 汪磊, 陈洁, 等. 酵母种类对空心挂面品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 2(10): 62-67
- [15] 李明菲. 不同热处理方式对小麦粉特性影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016
- [16] 刘琳. 球磨和湿热处理对淀粉结构和理化性质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015
- [17] Chen G, Ehmke L, Miller R, et al. Effect of sodium chloride and sodium bicarbonate on the physicochemical properties of soft wheat flour doughs and gluten polymerization [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(26): 6840-6850
- [18] Silva E, Birkenhake M, Scholten E, et al. Controlling rheology and structure of sweet potato starch noodles with high broccoli powder content by hydrocolloids [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 42-52
- [19] Bruneel C, Buggenhout J, Lagrain B, et al. Redox agents and N-ethylmaleimide affect protein polymerization during laboratory scale dry pasta production and cooking [J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 646-653
- [20] Baiano A, Lamacchia C, Fares C, et al. Cooking behaviour and acceptability of composite pasta made of semolina and toasted or partially defatted soy flour [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 1226-1232
- [21] Zweifel C, Handschin S, Escher F, et al. Influence of high temperature drying on structural and textural properties of durum wheat pasta [J]. *Cereal Chemistry*, 2003, 80(2): 159-167
- [22] Singh J, Singh N. Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian potato cultivars [J]. *Food Chemistry*, 2001, 75(1): 67-77
- [23] Tsai M L, Li C F, Lii C Y. Effects of granular structures on the pasting behaviors of starches [J]. *Cereal Chemistry*, 1997, 74(6): 750-757
- [24] Singh N, Inouchi N, Nishinari K. Structural, thermal and viscoelastic characteristics of starches separated from normal sugary and waxy maize [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(6): 923-935
- [25] 刘培玲. 高静压值淀粉糊化及重结晶过程微观结构的变化及机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012
- [26] Weegels P L, Hamer R J, Schofield J D. Depolymerisation and repolymerisation of wheat glutenin during dough processing II. Changes in composition [J]. *Journal of Cereal Science*, 1997, 25(2): 155-163
- [27] Lamacchia C, Luccia A D, Baiano A, et al. Changes in pasta proteins induced by drying cycles and their relationship to cooking behaviour [J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(1): 58-63
- [28] 郭颖. 不同烘干温度对挂面品质影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015
- [29] Pei W, Chen H, Mohanad B, et al. Effect of frozen storage on physico-chemistry of wheat gluten proteins: studies on gluten-, glutenin- and gliadin-rich fractions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 39: 187-194
- [30] Salmén L, Bergström E. Cellulose structural arrangement in relation to spectral changes in tensile loading FTIR [J]. *Cellulose*, 2009, 16(6): 975-982
- [31] Chen Y, Liang Y, Jia F, et al. Effect of extrusion temperature on the protein aggregation of wheat gluten with the addition of peanut oil during extrusion [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 166(3): 1377-1386