

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.039

热泵干燥南美白对虾品质特性与玻璃化转变关系研究

石启龙 赵 亚 魏彦君

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000)

摘要: 针对南美白对虾热泵干燥过程中常出现物理、化学反应导致虾肉品质下降,而其机理又尚未明确的问题,采用静态称量法研究了南美白对虾肉的解吸等温线,利用差示扫描量热仪测定了虾肉的玻璃化转变温度(T_g)。分别采用 GAB 模型与 Gordon – Taylor 方程拟合水分吸附与 T_g 数据。虾肉在热泵干燥温度 35℃、风速 1.5 m/s 下进行干燥,每隔 1.0 h 取样,分析虾肉品质特性(色泽、收缩程度、硬度与韧性和虾青素质量比)。基于玻璃化转变理论,阐明虾肉热泵干燥品质变化机制。结果表明,虾肉热泵干燥过程中,基质处于橡胶态,体系流动性增加,导致干制品品质下降。

关键词: 南美白对虾; 热泵干燥; 品质特性; 解吸等温线; 玻璃化转变温度

中图分类号: TS254.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0297-06

Relationship between Quality Change and Glass Transition during Heat Pump Drying of *Penaeus vannamei* Meat

SHI Qilong ZHAO Ya WEI Yanjun

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: During heat pump drying (HPD) of *Penaeus vannamei* meat physical and chemical changes are destined to occur which result in a decreased quality attributes. However, the mechanism of quality degradation was not explicated. The gravimetric method and differential scanning calorimetry were employed to investigate the moisture desorption isotherm and the glass transition temperature (T_g) of *Penaeus vannamei* meat, respectively. GAB model and Gordon – Taylor equation were selected to fit the experimental data of desorption isotherm and T_g , respectively. *Penaeus vannamei* meat was dehydrated at 35℃ and 1.5 m/s air velocity by using HPD. The quality attributes (such as hardness, toughness, shrinkage, total color difference and astaxanthin content) were analyzed at time interval of 1.0 h during HPD. The mechanism of quality degradation was explicated based on glass transition theory. The results showed that at the present drying conditions, *Penaeus vannamei* meat sample was in a rubbery state, characterized by a great mobility and remained this state until the end of drying process. The quality attributes were changed as drying continued, which can be related to the rubbery state of matrix during HPD.

Key words: *Penaeus vannamei*; heat pump drying; quality attributes; moisture desorption isotherm; glass transition temperature

引言

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)营养丰富并具有一定的保健功能,但其含水率高,极易腐败变质^[1-2]。水产干制品是我国出口水产品的重要组成部分。目前,水产品干燥主要采用晒干与热风干燥,但其存在干燥效率低、能耗高、品质差等缺点^[3]。

热泵是一种从低温热源中吸收热能,并将热能在较高温度下有效利用的装置。热泵干燥具有能效高、温度低、参数易于控制等优点,特别适用于热敏性原料的干燥^[4-6]。近年来,水产品热泵干燥研究多集中在干燥动力学与干燥前后品质特性方面,而对于干燥过程中品质变化动力学及其机制研究较少^[7-10]。水产品干燥过程中常出现物理变化(例如

表面硬化、收缩、裂纹、固形物迁移、复水能力下降等)与化学变化(例如酶促反应、非酶促反应、脂肪氧化、蛋白质变性、营养素损失等),进而导致水产干制品品质下降。这些受分子扩散运动控制的变化反应与玻璃化转变理论密切相关。玻璃化转变是指非晶态聚合物(包含晶态聚合物的非晶态部分)由玻璃态到橡胶态或者由橡胶态到玻璃态的转变,对应的温度称为玻璃化转变温度(T_g)^[11]。当体系温度 $T < T_g$ 时,基质处于玻璃态,体系黏度较高,各种受分子扩散运动控制的变化反应显著降低;反之,当 $T > T_g$ 时,基质则处于橡胶态,各种受分子扩散运动控制的变化反应显著提高^[12]。 T_g 与食品体系的平均分子质量、含水率密切相关。水产品热泵干燥过程中,样品的含水率逐渐降低,进而导致 T_g 变化;与此同时,物料在干燥过程中所发生的各种受分子扩散运动控制的变化反应也会随 T_g 变化而改变,这些理化反应进而引起品质特性发生变化。因此,构建干燥过程中样品温度、 T_g 与品质特性变化关系对于阐明干燥过程中品质变化机理尤为重要。基于此,本文测定解吸平衡后虾肉样品的玻璃化转变温度并进行模型拟合;分析南美白对虾热泵干燥过程中品质特性(色泽、收缩程度、硬度与韧性和虾青素含量);基于玻璃化转变理论,揭示南美白对虾热泵干燥品质变化机理。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活南美白对虾:购于淄博市海盛水产品批发市场。

试剂: LiCl、CH₃COOK、MgCl₂·6H₂O、K₂CO₃、Mg(NO₃)₂·6H₂O、NaNO₂、NaCl、(NH₄)₂SO₄、K₂CrO₄、BaCl₂·2H₂O、百里酚、丙酮、石油醚、甲苯等均为分析纯。

1.2 主要试验仪器

SK3310LPC 型超声波清洗器(上海科导超声仪器有限公司);DW-FL253 型低温冰箱(中科美菱低温科技有限责任公司);SPX-250B-Z 型生化培养箱(上海博迅实业有限公司);DHG-9623A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);1HP-5 型热泵干燥机(青岛欧美亚科技有限公司);TMS-2000 型物性分析仪(美国食品技术公司);7230G 型可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司);HP-2132 型色差计(上海汉谱光电技术有限公司);Q100 型差示扫描量热仪(DSC)(美国 TA 公司);LabSwift 型水分活度 a_w 测定仪(瑞士 Novasina 公司);PL203 型分析天平(梅特勒-托利多

仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 样品准备

南美白对虾去头、去壳,在质量分数为 2% 的氯化钠溶液中沸水烫漂 1 min。将虾肉按质量比 1:4 加入蒸馏水中,然后将含有虾肉与蒸馏水的烧杯放入超声波清洗器中处理(超声波功率 90 W,频率 35 kHz,超声波处理时间 30 min)。超声波处理后的虾肉取出,沥干表面水分后一部分进行解吸等温线试验,另一部分进行热泵干燥试验。

1.3.2 解吸等温线

精确称取 1.000 g 虾肉样品放于称量瓶中(1 式 2 份),然后将其置于底部含有不同饱和盐液的干燥器中,密封后置于温度(25 ± 1)℃ 的恒温箱中平衡。LiCl、CH₃COOK、MgCl₂·6H₂O、K₂CO₃、Mg(NO₃)₂·6H₂O、NaNO₂、NaCl、(NH₄)₂SO₄、K₂CrO₄、BaCl₂·2H₂O 等饱和盐液在温度为 35℃ 时的平衡相对湿度见文献[13]。样品平衡过程中,为防止高水分活度下样品微生物生长繁殖,将 1 个含有适量百里酚的小烧杯放在干燥器的隔板上。测定平衡后样品的含水率和 T_g 。

1.3.3 玻璃化转变温度测定

采用 DSC 测定不同含水率样品的 T_g 。采用铟与蒸馏水校正仪器的温度与灵敏度^[14]。称取 6 ~ 10 mg 样品密封于坩埚内,置于样品池内,以空坩埚作为对照。载气为 50 mL/min 高纯 N₂,液氮用于样品冷却。采用单扫描程序测定含非冻结水样品的 T_g 。对含冻结水样品,采用退火处理,其扫描程序参见文献[15]。采用仪器内置软件分析热流密度曲线,可得样品的玻璃化转变温度,包括初始温度 T_{gi} 、中点温度 T_{gm} 和终点温度 T_{ge} ,取 T_{gm} 作为样品的玻璃化转变温度。

1.3.4 热泵干燥

超声波处理后的虾肉平铺在热泵干燥料盘上,将仪器温度传感器插入虾肉内部(3 根探头分别插入虾肉不同部位)。然后启动热泵干燥装置,温度与风速分别设定为 35℃ 与 1.5 m/s,直至样品含水率为 40% 左右结束。干燥过程中,采用巡检仪每隔 1 s 检测虾肉温度并通过计算机在线采集。此外,干燥过程中每隔 1.0 h 取样,测定样品含水率与品质指标(色泽、收缩程度、硬度与韧性和虾青素质量比),样品温度(T_p)通过传感器检测并利用巡检仪采集。

1.3.5 模型拟合

1.3.5.1 吸附等温线模型拟合

水分活度 a_w 与干基含水率的关系采用 GAB 模

型^[16]拟合

$$X_{ws} = \frac{X_m CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \tag{1}$$

式中 X_{ws} ——干基含水率, g/g
 X_m ——单分子层干基含水率, g/g
 C 、 K ——模型参数

模型拟合精度采用决定系数 R^2 、平均相对误差模量 P 、标准差 D_{SE} 、残差分布等统计参数确定。 R^2 越高、 P (小于 10%) 与 D_{SE} 越低, 残差分布越随机, 模型拟合精度越高^[2]。 P 和 D_{SE} 计算式分别为

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{ei} - X_{pi}|}{X_{ei}} \tag{2}$$

$$D_{SE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{pi})^2}{N - n}} \tag{3}$$

式中 X_{ei} ——试验所得干基含水率, g/g
 X_{pi} ——模型预测干基含水率, g/g
 N ——试验次数
 n ——模型中常数个数

1.3.5.2 玻璃化转变温度模型拟合

玻璃化转变温度与湿基含水率 X_w 关系采用 Gordon - Taylor 方程^[17]拟合

$$T_{gm} = \frac{X_s T_{gs} + kX_w T_{gw}}{X_s + kX_w} \tag{4}$$

式中 T_{gs} ——溶质的玻璃化转变温度, °C
 T_{gw} ——水的玻璃化转变温度, 取 -135°C
 X_s ——溶质湿基质量分数, %
 k ——模型参数

1.3.6 指标测定

1.3.6.1 色泽

采用色差计测定干燥前后样品的色泽, 每次分别随机测定 3 只虾仁 12 个部位的参数值, 用 L 、 a 、 b 值表示, 干燥前后色泽变化计算式^[9]为

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \tag{5}$$

式中, 下标 0 表示虾肉干燥前色泽参数值。

1.3.6.2 收缩程度

采用甲苯置换法测定干燥前后虾肉体积变化, 虾肉收缩程度采用干燥前后体积比 V_R 计算

$$V_R = \frac{V_1}{V_0} \tag{6}$$

式中 V_0 ——样品干燥前体积, mL
 V_1 ——样品干燥后体积, mL

1.3.6.3 质构

采用物性分析仪测定虾肉的硬度和韧性^[18]。试验中机头运行速度为 50 mm/min, 记录最大剪切力与抗压力。其中, 剪切力是产品韧性指标, 抗压力

是产品硬度指标。

1.3.6.4 虾青素质量比

采用分光光度计法测定样品虾青素质量比^[19]。

2 结果与分析

2.1 解吸等温线

南美白对虾肉在温度为 35°C 时的解吸等温线如图 1 所示。可以看出, 虾肉解吸等温线为Ⅲ型, 其干基含水率随水分活度增加而增加。采用 GAB 模型拟合数据, 得到模型评价参数 $R^2 = 0.998$, $P = 2.60\%$, $D_{SE} = 0.0087$, 且残差呈随机分布 (图略)。因此, GAB 模型拟合精度较高, 适用于描述南美白对虾肉的水分解吸特性。采用 Matlab 7.0 软件中非线性拟合程序分析数据, 得到 GAB 模型参数 $C = 64.46$, $K = 0.9843$, $X_m = 0.07132$ g/g。

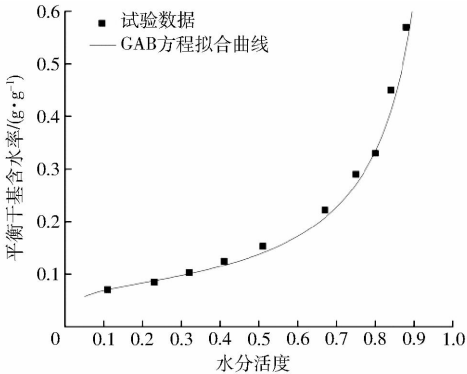


图 1 南美白对虾肉的解吸等温线

Fig.1 Moisture desorption isotherm of *Penaeus vannamei* meat

2.2 玻璃化转变温度

对于含非冻结水虾肉, 其玻璃化转变温度随湿基含水率变化曲线如图 2 所示。随着南美白对虾含水率降低, 玻璃化转变温度逐渐增加。采用式 (4) 对 T_{gm} 数据进行非线性拟合, 得到虾肉的 T_{gs} 与 k 分别为 59.84°C 和 5.36。对于含冻结水虾肉, 其玻璃化转变温度随湿基含水率增加而降低, 但降低幅度不显著。当虾肉湿基含水率为 41%、45%、49%、52%、57%、61%、65% 和 78% 时, 其对应 T_{gm} 分别为 -57.0、-57.9、-59.2、-60.0、-62.5、-63.5、-64.3、-65.5°C。

2.3 南美白对虾热泵干燥品质特性

2.3.1 色泽

南美白对虾热泵干燥过程中样品温度 (T_p)、玻璃化转变温度 (T_g)、色泽变化与含水率的关系见图 3。随着干燥过程的进行, 虾肉色泽变化逐渐增加。干燥过程中, 当虾肉含水率由 78.0% 降低至 41.0% 时, ΔE 由 0 增加至 18.25。 T_p 由室温 (约 22°C) 升至 32.55°C, 而 T_g 则由 -66.5°C 升高至 -57.0°C。干燥初期, ΔT (即 $T_p - T_g$) 较大, ΔT 增加幅度较快; 随

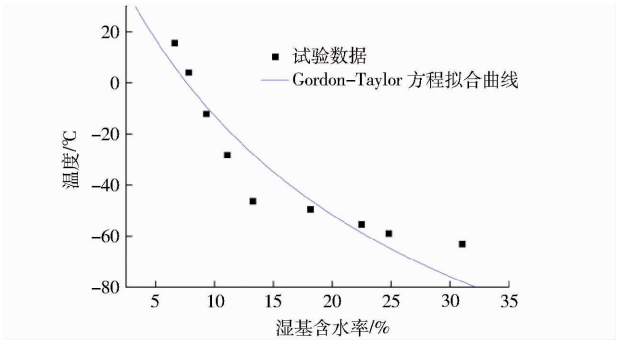


图 2 南美白对虾肉 T_g 与湿基含水率关系
Fig.2 Variation of T_g as a function of moisture content for *Penaeus vannamei* meat

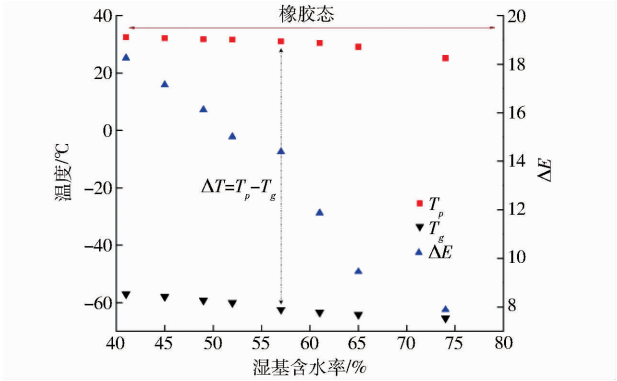


图 3 热泵干燥过程中玻璃化转变温度 (T_g)、样品温度 (T_p)、虾肉色泽变化与含水率之间的关系

Fig.3 Relationship between glass transition temperature (T_g), product temperature (T_p), total color difference of *Penaeus vannamei* meat with moisture content during heat pump drying

着干燥的不断进行, ΔT 逐渐缩小, 而 ΔE 增加的幅度随着 ΔT 缩小而降低。例如, 虾肉含水率由 74% 降低至 65% 时, ΔT 约为 93.35℃, ΔE 增加了 65%; 而当虾肉含水率由 49% 降低至 45% 时, ΔT 约为 90.05℃, ΔE 增加了 45%。

2.3.2 收缩程度

南美白对虾热泵干燥过程中 T_p 、 T_g 、收缩程度与含水率的关系见图 4。随着干燥过程进行, 虾肉体积比 V_R 逐渐降低。干燥过程中, 当虾肉含水率由 78.0% 降低至 41.0% 时, 体积比由 1.0 降低至 0.395。 T_p 由室温 (约 22℃) 升至 32.55℃, 而 T_g 则由 -66.5℃ 升高至 -57.0℃。干燥初期, ΔT 较大, 体积收缩幅度较快; 随着干燥的不断进行, ΔT 逐渐缩小, 而体积收缩的幅度随着 ΔT 缩小而降低。例如, 虾肉含水率由 74% 降低至 65% 时, ΔT 约为 93.35℃, 体积比降低了 22.4%; 而当虾肉含水率由 49% 降低至 45% 时, ΔT 约为 90.05℃, 体积比降低了 2.8%。

2.3.3 质构

南美白对虾热泵干燥过程中 T_p 、 T_g 、质构 (硬度

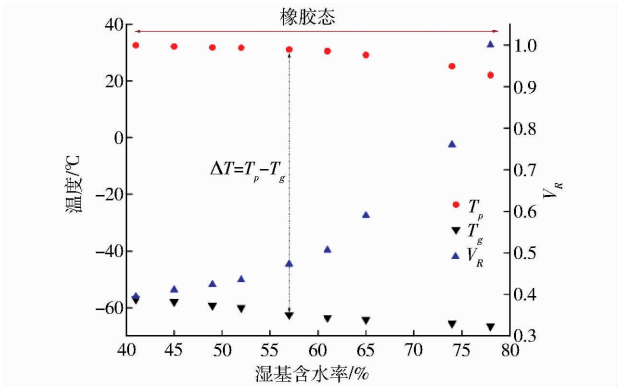


图 4 热泵干燥过程中玻璃化转变温度 (T_g)、样品温度 (T_p)、虾肉体积比与含水率之间的关系

Fig.4 Relationship between glass transition temperature (T_g), product temperature (T_p), volume ratio of *Penaeus vannamei* meat with moisture content during heat pump drying

与韧性)与含水率的关系见图 5。随着干燥过程的进行, 虾肉硬度与韧性逐渐增加。干燥过程中, 当虾肉含水率由 74.0% 降低至 41.0% 时, 硬度由 547.77 kN/m² 增加至 2 017.83 kN/m²; 而韧性由 414.67 kN/m² 增加至 3 698.85 kN/m²。 T_p 由室温 (约 22℃) 升高至 32.55℃, 而 T_g 则由 -66.5℃ 升高至 -57.0℃。干燥初期, 硬度与韧性较小, 随着干燥

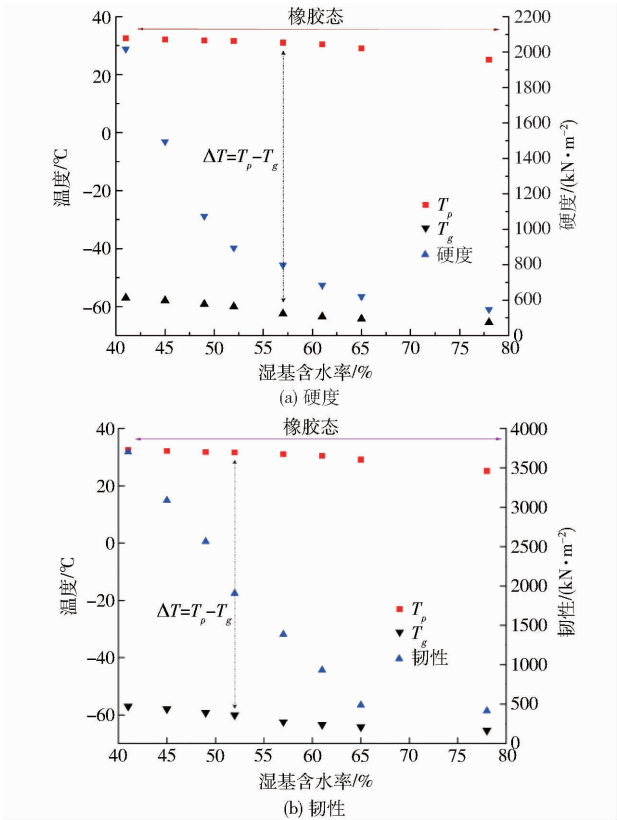


图 5 热泵干燥过程中玻璃化转变温度 (T_g)、样品温度 (T_p)、质构与含水率之间的关系

Fig.5 Relationship between glass transition temperature (T_g), product temperature (T_p), texture of *Penaeus vannamei* meat with moisture content during heat pump drying

过程进行,硬度与韧性增加的幅度呈先增加后降低趋势。例如,虾肉含水率由 74.0% 降低至 65.0% 时,韧性增加了 17.5%;当含水率降低到 61.0% 时,韧性增加了 91.6%;当含水率继续降低至 57.0% 时,韧性增加了 48.6%。虾肉硬度变化趋势与韧性基本一致,当虾肉含水率由 49.0% 降低至 45.0% 时,硬度增加率达到最高(39.2%);而当含水率继续降低至 41.0% 时,硬度增加了 34.9%。而干燥过程中, ΔT 呈逐渐减小趋势,干燥后期尤为明显。

2.3.4 虾青素质量比

南美白对虾热泵干燥过程中 T_p 、 T_g 、虾青素质量比与含水率的关系见图 6。随着干燥过程进行,虾肉虾青素质量比逐渐降低。干燥过程中,当虾肉含水率由 74.0% 降低至 41.0% 时,虾青素质量比由 56.11 $\mu\text{g/g}$ 降低至 4.29 $\mu\text{g/g}$ 。 T_p 由室温(约 22 $^{\circ}\text{C}$) 升至 32.55 $^{\circ}\text{C}$,而 T_g 则由 -66.5 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 -57.0 $^{\circ}\text{C}$ 。干燥初期, ΔT 较大,虾青素降低幅度较快;随着干燥的不断进行, ΔT 逐渐缩小,而虾青素质量比降低幅度随着 ΔT 缩小而降低。例如,虾肉含水率由 57.0% 降低至 52.0% 时, ΔT 约为 93.55 $^{\circ}\text{C}$,虾青素质量比降低了 51.2%;而当虾肉含水率由 49.0% 降低至 45.0% 时, ΔT 约为 90.05 $^{\circ}\text{C}$,虾青素质量比降低了 23.7%。

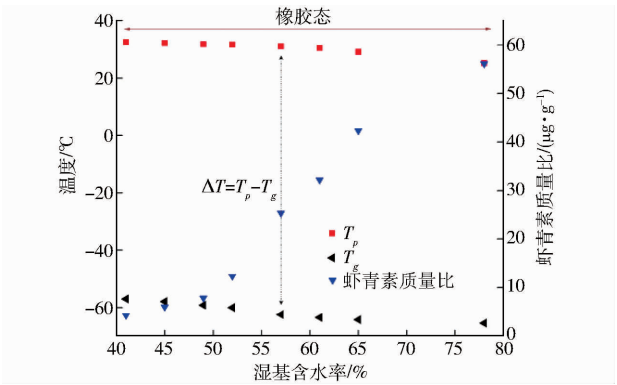


图 6 热泵干燥过程中玻璃化转变温度(T_g)、样品温度(T_p)和南美白对虾虾青素质量比与含水率之间的关系
Fig. 6 Relationship between glass transition temperature (T_g), product temperature (T_p) and astaxanthin content of *Penaeus vannamei* meat with moisture content during heat pump drying

3 讨论

南美白对虾热泵干燥过程中品质特性发生了显著变化,这些品质变化与玻璃化转变理论密切相关。由图 3~6 可以看出,南美白对虾在热泵干燥过程中,虾肉温度 T_p 一直高于其玻璃化转变温度 T_g 。因此,在整个干燥过程中虾肉组织均呈橡胶态。因此,根据玻璃化转变理论,干燥过程中与扩散运动相关的理化反应(例如酶促褐变、非酶褐变、氧化反应、

组织收缩等)都易于发生^[20]。这些理化反应的顺利进行导致虾肉色泽、体积、质构、虾青素质量比等发生变化,进而引起虾肉品质改变。色泽是衡量虾肉品质的指标之一,干燥过程中虾肉出现酶促或非酶褐变,导致虾肉色泽差异变大。虾肉干燥过程中,体积呈逐渐收缩趋势。干燥初始阶段, ΔT 较大,品质特性变化较快;随着干燥进行, ΔT 逐渐减小,分子流动性相应减弱,自由体积减小,各种受分子扩散运动限制的反应速率也相应减缓,因此品质特性下降速率减缓。由于整个干燥过程一直处于橡胶态,所以品质特性随着干燥过程的进行会一直下降。为了更加清晰阐述 T_p 、 T_g 与含水率关系,将 3 个参数外推,得到三者关系曲线(图 7)。可以看出,当热泵干燥温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 时,干燥绝大部分阶段虾肉处于橡胶态,而当虾肉干燥至含水率为 3.8% 时,达到玻璃态与橡胶态交界处;继续干燥,虾肉将处于玻璃态。假定热泵干燥温度为 15 $^{\circ}\text{C}$,干燥绝大部分阶段虾肉也处于橡胶态,而当虾肉干燥至含水率为 6.6% 时,达到玻璃态与橡胶态交界处,继续干燥,虾肉将呈玻璃态。 ΔT 随着干燥进程不断进行而减小;干燥过程中橡胶态所占比例取决于干燥温度。温度越低,橡胶态出现的时间越短,橡胶态所占的比例越少;温度越高,橡胶态出现的时间越长,橡胶态所占比例也越高。综上,可以推测:干燥过程中参数尤其是温度显著影响干燥过程中物料处于玻璃态与橡胶态出现的时间与区域,影响物料中分子流动性、自由体积,进而影响理化反应发生的速度与程度,最终影响干制品品质。食品干燥主要目的是降低能耗、提高干燥效率、获得高品质干制品。因此,未来研究应偏重降低干燥温度、提高原料的玻璃化转变温度(例如添加高分子量物质,如麦芽糊精、蛋白质、食用胶体等),通过降低样品温度 T_p 与玻璃化转变温度 T_g , 进而提高干制品品质。

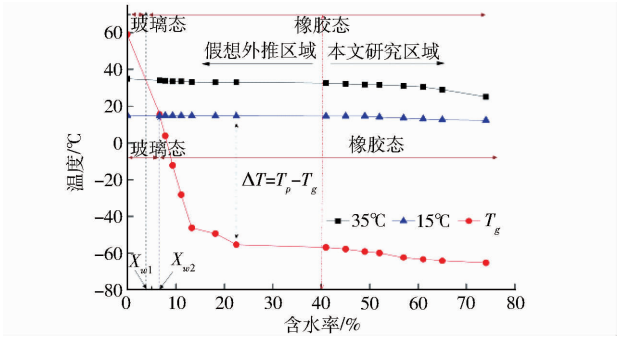


图 7 热泵干燥过程中玻璃化转变温度(T_g)、样品温度(T_p)与含水率之间的关系
Fig. 7 Relationship between glass transition temperature (T_g), product temperature (T_p) and moisture content during heat pump drying

4 结束语

热泵干燥过程中,南美白对虾肉温度始终高于其玻璃化转变温度。因此,虾肉干燥过程中一直处于橡胶态,分子流动性增强,自由体积增加,导致一些受分子扩散运动控制的变化反应加快,进而导致

虾肉品质特性(如色泽、体积比、硬度与韧性、虾青素质量比)下降。虾肉品质特性与干燥过程中样品温度和玻璃化转变温度之间的差值密切相关,未来研究应偏重于降低干燥温度、提高原料玻璃化转变温度的预处理等方面,进而提高干制品品质。

参 考 文 献

- 1 GONZÁLEZ - FÉLIX M L, GATLIN III D M, LAWRENCE A L, et al. Effect of dietary phospholipid on essential fatty acid requirements and tissue lipid composition of *Litopenaeus vannamei* juveniles [J]. *Aquaculture*, 2002, 207(1-2):151-167.
- 2 石启龙,赵亚,曹淑敏,等. 糖类对南美白对虾肉玻璃化转变温度与状态图的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11):236-244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151132&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.032.
- 3 SHI Qilong, ZHAO Ya, CAO Shumin, et al. Effects of different saccharides on glass transition temperature and state diagram of *Penaeus vannamei* meat [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):236-244. (in Chinese)
- 3 RAHMAN M S. Drying of fish and seafood[M]//MUJUMDAR A S. *Handbook of Industrial Drying*. New York: CRC Press, 2006.
- 4 倪超,李娟玲,丁为民,等. 全封闭热泵干燥装置监控系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10):134-139.
- 4 NI Chao, LI Juanling, DING Weimin, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of closed cycles[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10):134-139. (in Chinese)
- 5 陈坤杰,李娟玲,张瑞合. 热泵干燥技术的应用现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2000, 31(3):109-111, 105.
- 5 CHEN Kunjie, LI Juanling, ZHANG Ruihe. Status and prospect of heat pump drying [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(3):109-111, 105. (in Chinese)
- 6 DENG Y, WU J, SU S Q, et al. Effect of far-infrared assisted heat pump drying on water status and moisture sorption isotherm of squid (*Illex illecebrosus*) fillets [J]. *Drying Technology*, 2011, 29(13):1580-1586.
- 7 ZHANG Guochen, SIGURIÓN Arason, SVEINN Víkingur Árnason. Physical and sensory properties of heat pump dried shrimp (*Pandalus borealis*) [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5):235-239.
- 8 ZHANG Guochen, SIGURIÓN Arason, SVEINN Víkingur Árnason. Drying characteristics of heat pump dried shrimp (*Pandalus borealis*) and fish cake [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(9):189-193.
- 9 石启龙,薛长湖,赵亚,等. 热泵变温干燥对竹荚鱼干燥特性及色泽的影响[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4):83-86.
- 9 SHI Qilong, XUE Changhu, ZHAO Ya, et al. Effect of time-varying temperature drying characteristics and color of horse mackerel dried by heat pump dehumidifier [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4):83-86. (in Chinese)
- 10 DENG Y, LUO Y, WANG Y G, et al. Drying-induced protein and microstructure damages of squid fillets affected moisture distribution and rehydration ability during rehydration [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 123(1):23-31.
- 11 RAHMAN M S. State diagram of foods: its potential use in food processing and product stability[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(3):129-141.
- 12 SHI Q L, ZHAO Y, CHEN H H, et al. Glass transition and state diagram for freeze-dried horse mackerel muscle [J]. *Thermochimica Acta*, 2009, 493(1-2):55-60.
- 13 GREENSPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards: Physics and Chemistry*, 1977, 81A(1):89-96.
- 14 SHI Q L, LIN W W, ZHAO Y, et al. Thermal characteristics and state diagram of *Penaeus vannamei* meat with and without maltodextrin addition [J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 616:92-99.
- 15 石启龙,林雯雯,赵亚. 南美白对虾肉玻璃化转变温度测定的影响因素[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(11):48-52, 59.
- 15 SHI Qilong, LIN Wenwen, ZHAO Ya. Factors influencing the determination of glass transition temperature of *Penaeus vannamei* meat[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(11):48-52, 59. (in Chinese)
- 16 VAN DEN BERG C, BRUIN S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects [M]//Rockland L B, Stewart G F. *Water Activity: Influences on Food Quality*. New York: Academic Press, 1981.
- 17 GORDON M, TAYLOR J S. Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. 1. Non-crystalline copolymers [J]. *Journal of Applied Chemistry*, 1952, 2(9):493-500.
- 18 NAMSANGUAN Y, TIA W, DEVAHASTIN S, et al. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying processes[J]. *Drying Technology*, 2004, 22(4):759-778.
- 19 NIAMNUY C, DEVAHASTIN S, SOPONRONNARIT S, et al. Kinetics of astaxanthin degradation and color changes of dried shrimp during storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(4):591-600.
- 20 ROOS Y H. Glass transition temperature and its relevance in food processing [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2010, 1:469-496.