

文章编号:2095-7386(2023)06-0018-04

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2023.06.003

食品膨化过程的热力学分析

王 威¹, 周娜娜²

(1. 江苏恒瑞医药股份有限公司, 连云港 222000; 2. 江苏康缘药业股份有限公司, 连云港 222000)

摘 要:为了得到食品膨化过程的热力学机理以控制食品膨化的质量,基于广义热机模型,发现食品膨化过程中热量的传递与转换蕴含着热力学耦合机制,即自发传热过程驱动着非自发的食品膨化过程。食品膨化程度与食品和环境间的温差、热量释放的强度有关,增大温差或热量释放强度可以促进食品的膨化。研究可为提高食品膨化效果提供理论依据。

关键词:食品膨化;孤立系统;热力学耦合

中图分类号:TS 201.1

文献标识码:A

Thermodynamic analysis of food expansion process

WANG Wei¹, ZHOU Nana²

(1. Jiangsu Hengrui Pharmaceutical Co., Ltd., Lianyungang 222000, China;

2. Jiangsu Kangyuan Pharmaceutical Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: In order to get the thermodynamic mechanism of food puffing process and control the quality of food puffing, based on the generalized thermo-mechanical model, it is found that the transfer and conversion of heat during food puffing process contains a thermodynamic coupling mechanism, which is the spontaneous heat transfer process driving the non-spontaneous food expansion process. The degree of food puffing is related to the temperature difference and heat release intensity between food and environment. Increasing the temperature difference or heat release intensity can promote food puffing. The research can provide theoretical basis for improving the effect of food bulking.

Key words: food expansion; isolated system; generalized heat engine model

1 前言

膨化食品作为具有广阔发展前景的产品,研究其膨化机理和影响因素有利于加工原料和工艺条件的合理选择,可以有效控制食品膨化的质量,是目前相关领域重点关注的一个技术课题,国内外学者对此进行了大量的研究和试验。胡光耀等^[1]通过试验

发现,含水量越大,食品的膨化率越高;王明友等^[2]针对挤压膨化设备进行试验,发现含水量、膨化温度均会影响食品的膨化率,食品膨化率随着含水量或膨化温度的升高而增大;余涛等^[3]总结了国内外微型膨化机的发展现状,试验后发现温度和含水量会影响食品的膨化率;王丹丹等^[4]利用压差膨化技术探讨了食品成分对膨化率的影响,发现食品膨化率

收稿日期:2023-10-18.

作者简介:王威(1989—),男,硕士,助理工程师, E-mail:wei.wang.ww65@hengrui.com.

将式(8)代入式(6)可得

$$\frac{ds}{dt} = J_q \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{1}{T} J_q \right) \quad (9)$$

在由离开模口后的食品与环境所构成的孤立系统中,熵流 $ds_g = 0$,即

$$\frac{ds_g}{dt} = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{T} J_q \right) = 0 \quad (10)$$

当孤立系统内无耗散时,由式(9)和式(10)可知

$$\frac{ds}{dt} = \frac{ds_i}{dt} = J_q \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = 0 \quad (11)$$

根据孤立系统的全相位熵产率方程^[11],由式(11)可得

$$\frac{ds_i}{dt} = J_{q_0} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + (J_q - J_{q_0}) \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = 0 \quad (12)$$

式中, J_{q_0} 为低温热源吸收的热流率,单位为 W; J_q 为高温热源释放的热流率,单位为 W; $(J_q - J_{q_0})$ 为热能与弹塑性变形功间的转换功率,单位为 W,对应的热力学过程是一个做广义功的过程。

由式(12)可知,在离开模口后的食品与环境所构成的孤立系统内,食品释放热流率可以分为两个部分:

①低温热源吸收的热流率,对应的热力学过程为熵产率大于零的自发传热过程,因此有

$$J_{q_0} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) > 0 \quad (13)$$

②热能与弹塑性变形功之间的转换率,对应的热力学过程为熵产率小于零的非自发的广义做功过程,具体表现为食品膨化的过程,因此有

$$(J_q - J_{q_0}) \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) < 0 \quad (14)$$

熵产率大于零的自发传热过程推动着熵产率小于零的非自发食品膨化的进行,使高温热源释放的一部分无序的热能转换为膨化食品中有序的变形势能。换句话说,食品与环境间热量的传递和热能与弹塑性变形功的转换共同影响了食品中热量的变化。正是由于自发传热过程驱动下非自发广义做功过程的进行,食品才会膨化变形,这就是其中蕴含的热力学耦合机制。

3 传热过程与食品膨化过程间的相互作用

食品膨化过程的本质就是食品与环境间自发的传热过程驱动着非自发的食品膨化过程的进行,即非自发的广义做功过程在自发的传热过程驱动下进行。而自发的传热过程与非自发的食品膨化过程间所蕴

含的热力学耦合机制是食品膨化的热力学本质。

在由离开模口时的食品与环境所构成的孤立系统中,食品与环境间自发的传热过程驱动着非自发的广义做功过程,导致食品产生了膨化变形,因此对式(12)取体积分,从而得到系统的熵产率,如下所示。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_i &= \iiint_V \left[J_{q_0} \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + (J_q - J_{q_0}) \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \right] dV \\ &= \iiint_V \frac{1}{T} J_q \cdot dS + \iiint_V \frac{1}{T} (J_q - J_{q_0}) \cdot dS \\ &= \int_1^2 \frac{1}{T} \delta \dot{Q}_0 + \int_1^2 \frac{1}{T} \delta (\dot{Q} - \dot{Q}_0) \\ &= \left(\frac{\dot{Q}_0}{T_0} - \frac{\dot{Q}_0}{T} \right) + \left(\frac{\dot{Q}_0 - \dot{Q}_0}{T_0} - \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_0}{T} \right) \\ &= \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \dot{Q}_0 - \frac{\Delta \dot{W}}{T} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

由上式变形可得

$$\Delta \dot{W} = \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \dot{Q}_0 \quad (16)$$

式中, $\Delta \dot{W}$ 为热能与弹塑性变形功间的转换率,即做广义功的功率,单位为 W; T 为高温热源的温度,即离开模口时食品的温度,单位为 K; T_0 为低温热源的温度,即环境的温度,单位为 K; $\dot{Q}_0$ 为单位时间食品向环境传递的热流量,单位为 W。

高温热源释放的热量一部分传递给了低温热源,另一部分转换为食品的变形势能,这是一个做广义功的过程,导致了食品发生膨化变形,因此由式(16)可得

$$\Delta \dot{W} = \left(\frac{T - T_0}{T_0} \right) \dot{Q}_0 = \frac{d}{dt} \int \sigma d\epsilon \quad (17)$$

式中, σ 为应力矢量; ϵ 为应变矢量。

由式(17)可知,食品膨化的程度不仅与离开模口时食品与环境的温差有关,还和食品与环境间热量释放的强度有关。当温差或热量释放的强度越大,则食品膨化变形的程度越严重。

由于离开模口时的食品处于高温高压状态,此时环境为常温、常压,因此食品中的一部分热量会传递至环境中,热量传递的方式主要分为温度梯度驱动下的热量传递及食品与环境间的相变传热,因此有

$$\dot{Q}_0 = \frac{d}{dt} (m_1 c_p \Delta T) + \dot{m}_2 A r \quad (18)$$

式中, m_1 为食品的质量,单位为 kg; c_p 为食品的定压比热容,单位为 J/(kg · K); ΔT 为导热引起的食品温度变化,单位为 K; $\dot{m}_2$ 为水分蒸发速率,单位为 kg/(m² · s); A 为食品与环境的接触面积,单位为 m²; r 为汽化热值,单位为 J/kg。

将式(18)代入式(17)可得

$$\left(\frac{T-T_0}{T_0}\right)\left[\frac{d}{dt}(m_1c_p\Delta T)+\dot{m}_2Ar\right]=\frac{d}{dt}\int\sigma d\epsilon \quad (19)$$

由上式可知,食品膨化的程度不仅和食品与环境间的温差有关,还与食品的定压比热容、水分蒸发速率以及水的汽化热值有关,因此式(19)可作为描述食品膨化过程的表达式。

4 食品膨化过程的影响因素分析

由式(19)可知,影响食品膨化过程的因素主要可概括为三个方面。

(1)食品与环境之间的温差。温差的大小主要是由食品的温度决定的,食品温度越高,则食品膨化的程度越大。

(2)食品与环境间导热方式进行热量扩散的强度。作为表征食品热传导能力的重要参数,导热系数与定压比热容存在间接的联系,其热量扩散的强度随着导热系统的增大而加强,例如应合理选择食品种类和成分来控制导热系数,从而影响食品膨化的程度。

(3)食品与环境间相变传热的强度。相变传热的强度主要与水分的蒸发速率有关,由于所处环境基本不变,因此水分蒸发速率主要与食品的温度、压力和含水量有关,水分蒸发速率越大,则相变传热的强度越大。

综上,增大食品与环境的温差、食品与环境以导热方式进行热量扩散的强度以及相变传热强度都会提高食品的膨化程度,这可为寻找合理控制食品膨化效果的措施提供理论指导。

5 结论

在离开模口后的食品与环境构成的孤立系统中,发现食品所处高温热源释放的热流率一部分传递到了低温热源,此为自发的传热过程,另一部分转换为弹塑性变形功,为非自发的广义做功过程,具体表现为食品膨化过程,其中蕴含了自发传热驱动非自发广义做功的热力学耦合机制。影响食品膨化过程的因素主要分为食品与环境间的温差、食品与环境间热量释放的强度,温差或热量释放的强度越大,则食品膨化的程度越高。影响食品膨化效果的因素十分复杂,如食品成分、温度、含水量、压力、水分蒸发速率等参数,但其本质上皆是由于影响了温差、以热传导进行热量释放的强度和相变传热的强度,因此可从这三个角度出发系统地描述现有食品膨化的

影响因素,也为进一步寻找控制食品膨化的措施提供理论指导。

通过对食品膨化过程的分析,建立了热能与食品弹塑性变形功间的关系表达式,定性分析了影响食品膨化的因素,但这是在系统无耗散的基础上得到的,未来将进一步考虑在系统有耗散时,定量分析温差或热量释放强度对食品膨化效果的影响。

参考文献:

- [1] 胡光耀,易有金,聂灿华,等. 红薯豆粕挤压膨化食品工艺优化[J]. 食品工业,2018,39(02): 111-114.
- [2] 王明友,宋卫东,丁天航,等. 香菇双螺杆挤压膨化机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(05):293-301.
- [3] 余涛,叶岩,姚鑫森,等. 微型食品膨化机的应用设计研究[J]. 农机使用与维修,2021(09): 8-10.
- [4] 王丹丹,汪兰,李江涛,等. 鱼糜-淀粉脆片压差膨化加工工艺研究[J]. 食品工业科技,2022,43(16):211-219.
- [5] 王婷,王琰鑫,王晓涵,等. 挤压膨化技术在食品工业的研究进展[J]. 食品工程,2022(04): 16-20.
- [6] 李光磊,章银,魏楷东,等. 挤压膨化对膨化米粉品质特性的影响研究[J]. 中国粮油学报,2023,38(08):67-74.
- [7] 张艳,田海娟,张传智. 杂粮粉挤压膨化工艺的优化[J]. 食品安全导刊,2023,(30):134-136.
- [8] 张文刚. 藜麦紫薯挤压膨化食品加工工艺优化及品质分析[J]. 农产品加工,2023,(12):29-33.
- [9] Wang J T. Modern Thermodynamics[M]. Beijing: Science press,2012.
- [10] Wang J. Thermodynamics Coupling Model for Activated Low-Pressure Diamond Growth [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg,2011.
- [11] 卢小平,郭丹丹,俞树荣. 热力学耦合的相位描述及其最小耗散原理[J]. 甘肃科学学报,2015,27(1):15-17.
- [12] 卢小平. 热交叉现象广义场协同与热力学耦合[D]. 兰州:兰州理工大学石油化工学院,2016.