# 食品自发热剂产氢检测方法的建立

刘崇歆,薛 雁,魏文松,艾 鑫,邢利婷,张春江\*

(中国农业科学院农产品加工研究所,农业部农产品加工重点实验室,北京 100193)

**摘 要:目的** 建立一种通用、快捷测定食品自发热剂产氢量的方法,并对广泛应用的铝系和镁铁系自发热剂的产氢特性进行测定。方法 通过单因素实验和正交实验进行检测条件的优化,并利用该方法对 10 种市售 食品自发热剂的产氢特性进行检测。结果 优化后的检测条件为:样品质量 0.5 g,料液量比 1:5(*m/m*),反应时 间 20~30 min。在室温 20 ℃条件下,不同类型的发热剂样品产氢量差异显著。镁铁系自发热剂产氢量为 539.95~567.06 mL/g,铝系自发热剂产氢量为 225.32~510.95 mL/g。结论 本文建立的检测方法,预期可以为 食品自发热剂品质评价的定量分析提供技术支撑,并为食品自发热剂的安全合理使用提供技术保障。 关键词: 食品自发热剂;产氢量; 定量分析

# Establishment of detection method for hydrogen production characteristics of food self-heating agent

LIU Chong-Xin, XUE Yan, WEI Wen-Song, AI Xin, XING Li-Ting, ZHANG Chun-Jiang\*

(Institute of Food Science and technology CAAS/Comprehensive Key Laboratory of Agro-products processing, Ministry of Agricultural, Beijing 100193, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a general and fast method for determining the hydrogen production of food self-heating agents, and determine the hydrogen production characteristics of widely used aluminum-based and magnesium-iron-based self-heating agents. **Methods** The single factor experiment and orthogonal experiment were used to optimize the detection conditions, and the hydrogen production characteristics of 10 kinds of self-heating agents were detected. **Results** The optimization conditions were as follow: the sample weight was 0.5 g, the material-liquid ratio was 1:5(*m/m*), and the reaction time was 20–30 min. The hydrogen production of different types of heat-generating samples was significantly different at room temperature of 20 °C. Hydrogen generated by the magnesium-iron-based self-heating agent was 539.95–567.06 mL/g, and hydrogen generated by the aluminum-based self-heating agent was 225.32–510.95 mL/g. **Conclusion** The established detection method can provide technical support for the quality evaluation and quantitative analysis of food self-heating agents, and the safety use of food self-heating agents.

**KEY WORDS:** food self-heating agent; hydrogen production; quantitative analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0400505)

Fund: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFD0400505)

<sup>\*</sup>通讯作者:张春江,副研究员,主要研究方向为食品工程化技术与装备研究。E-mail: chjiang1976@126.com

<sup>\*</sup>Corresponding author: ZHANG Chun-Jiang, Associate Professor, Institute of Food Science and technology CAAS, Comprehensive Key Laboratory of Agro-products processing, Ministry of Agriculture, No. 2 Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: chjiang1976@126.com

# 1 引 言

自热食品是指将食品原材料按照一定工艺,进行原料处理、调制、熟化、包装、灭菌等加工,制造出的便于携带、营养丰富、使用便捷,具有一定货架期的主食(米饭、面条等)、菜肴、汤羹、饮品等方便食品<sup>[1-3]</sup>。自热食品最初为满足军事需求而研发,广泛应用于军队执行任务过程中的饮食供应与保障。由于其具有非明火加热、产品品质呈现度高、使用方便的特点,而且契合当今快节奏生活的优势,在民用市场上广受欢迎,产品种类和数量呈爆发式增长,市场迅速扩大<sup>[4-6]</sup>。食品发热包应用了化学反应放热原理<sup>[7]</sup>实现对食品的加热,随之而来的使用安全性问题成为人们关注的焦点<sup>[5.8]</sup>。

食品自发热剂是自热食品加热装置的核心组成部分, 根据发热原理的不同,主要分为铝系自发热剂与镁铁系 自发热剂两大类<sup>[9,10]</sup>。金属铝粉与水混合后在接触面发生 反应,生成具有疏松多孔结构的氢氧化物<sup>[11-13]</sup>,并产生 氢气<sup>[14-16]</sup>,反应过程伴有热量产生。同时有研究<sup>[17]</sup>表明 Al(OH)<sub>3</sub>在铝与水的反应过程中可以作为催化剂起到加快 反应速率的作用,相应的化学反应原理<sup>[18-20]</sup>为:

$2Al+4H_2O\rightarrow 2AlOOH+3H_2\uparrow$	(1)
$2Al+6H_2O\rightarrow 2Al(OH)_3+3H_2\uparrow$	(2)
金属镁也可以与水在接触面发生反应产生氢气。	,释

放出大量的热能,化学反应原理<sup>[21-23]</sup>为:

$$Mg+2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2+H_2\uparrow$$
(3)

由于在密闭空间里氢气燃爆极限为体积浓度 4.0%~75.6%,具有一定安全风险,因此有必要对食品自发 热剂反应产生的氢气量进行检测。鉴于目前尚未有适用于 自热食品发热剂材料产氢能力的测定方法,本研究利用低 通透性包装对于水和气体具有良好阻隔性的特点,定向收 集生成的氢气,采用排水法和浓度测定法<sup>[24,25]</sup>实现对氢气 的定量测定。通过单因素实验与正交试验对自发热剂与水 发生反应的条件进行优化<sup>[26-28]</sup>,建立一种自发热剂产氢特 性等定量分析的方法,并对市场上主流食品自发热剂的产 氢特性进行了测定,旨在为自热食品相关行业标准建立与 自加热包生产质量控制提供参考依据。

### 2 材料与方法

#### 2.1 材料与试剂

#### 2.1.1 自热包样品

实验样品取自市场应用广泛具有代表性的 10 种品牌 自加热包,其编号分别为 F1(QL)、F2(TN)、F3(XL)、 F4(SSB)、F5(SBC)、F6(HS)、F7(TN)、F8(FJZC)、F9(XX)、 F10(ZD),其中样品 F1、F2 为镁铁系自发热包,样品 F3~F10为铝系自发热包,且均为一月内最新生产的产品。 根据发热剂生产厂家提供的信息,镁铁系自发热包中镁元 素占比为 6.3%~77.7%, 铁元素占比为 6.7%~7.4%, 铝系自 发热包中铝元素占比为 46.2%~65.4%。

#### 2.1.2 材料与试剂

镀 SiO<sub>2</sub> 聚酯/聚酰胺/高温聚丙烯(SPET/PA/RCPP)透明食品包装袋(阻隔性:透水率为 0.2 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,透氧率 为 0.27 mL·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)(无锡江阴宝柏包装有限公司); 医用一次性无菌注射器(上海康德莱企业发展集团股份有限公司); 超纯水为实验室自制。

#### 2.1.3 实验仪器

TA449F3 Jupiter<sup>®</sup> 同步示差扫描量热重分析 (differential scanning calorimetr thermogravimetric analysis, DSC-TG)热分析仪、QMS 403 Aëolos® Quadro 四级杆质 谱(耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司); MSE224S-000-DU 电子分析天平(德国赛多利斯称重技术 有限公司); V-380G型 TOSEI 真空包装机(北京日上包装 机械有限公司); MS400-H2-RD1型便携式四合一气体检测 仪(深圳市逸云天电子有限公司); Aquaplore3 型超纯水机 (美国艾科浦国际有限公司)。

#### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 产氢定性分析

采用同步热分析仪与四极杆质谱联用的方法,对发 热剂与水反应过程中所生成的气体进行定性分析。首先对 设备进行连接调试,设定反应外部温度条件为室温 (20±2)℃,气体氛围条件为N2输送速率20和50mL/min。 然后称取5~8mg发热剂样品于坩埚中,向其中加入50µL 超纯水使样品浸润。最后将准备好的样品放入同步热分析 仪开始反应,采集数据进行分析。

2.2.2 定量分析样品制备

准确称取 0.2、0.4、0.5、0.6、0.8 g F10 食品自发热剂 样品,记为*m*,装入中阻隔包装袋底部;真空包装机设定真空 度为 99.8%,包装袋抽真空并封口。每个处理设定 5 个重复。 2.2.3 反应产气过程

用医用注射器按照特定的料液质量比(1:4、1:5、1:6、 1:8、1:10、1:20)称取一定量超纯水,注入真空包装的自发 热剂中,用胶带粘封好注射针孔,使其封闭不漏气。将包 装袋置于室温下反应,反应放热并产生气体使真空包装袋 膨胀。袋体不再有气泡产生后静置,待温度降至室温,体 积稳定不再变化后进行测定。通过实验确定,整个反应产 气过程所用时间为 20~30 min。

#### 2.2.4 测量分析

采用排水法测定载气包装袋体积 V<sub>l</sub>(单位 mL)。利用 氢气浓度检测仪探针检测载气包袋中氢气浓度。将检测器 抽气针头扎入包装袋中,记录 2 min 内袋中氢气浓度变化, 仪器每 2 s 记录一次浓度。记录完成后,取最高浓度前后 30 s 时间范围内浓度值,取平均值,即为载气包装袋中氢 气浓度,记为 P。载气包装袋内气体排出,包装袋连同反应 剩余物进行真空封口,排水法测定真空包装袋体积,记为 V<sub>2</sub>(单位 mL)。食品自发热剂的产氢能力 Q(单位: mL/g)按照 以下公式进行计算(m 所代表的是发热剂材料的质量, g)。

$$Q = \frac{(V_1 - V_2) \times F}{m}$$

2.2.5 数据分析

采用 Excel2016、SPSS18.0 软件对实验数据进行统计 分析,并进行差异显著性水平(P<0.05)分析。

# 3 结果与分析

#### 3.1 自发热剂产气组分定性检测

0

5

10

热重-质谱联用分析结果如图 1 所示, 在自发热剂样

品与水反应产生的气相产物中,存在有H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、 CO等气体成分。自发热剂是由镁、铝等金属粉末和其他 多种盐类及氧化物混合而成,存在多种化学反应,气体 组分中H<sub>2</sub>主要由金属粉体与水反应生成;CO<sub>2</sub>与O<sub>2</sub>是由 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaHCO<sub>3</sub>以及Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等物质反应产生;H<sub>2</sub>O在发 热剂放热过程中既是反应物质,又作为最主要的传热介 质<sup>[29,30]</sup>,组分中的H<sub>2</sub>O来自于反应体系水分;各组分均为 工业级原材料,含有部分杂质,因此气体组分中微量的 CO可能源自于发热剂中的含碳杂质。



注: A 为镁铁系自发热剂; B 为铝系自发热剂。 图 1 自发热剂产气组分鉴定 Fig.1 Identification of gas generating components of self-heating agent

20

25

30

15

时间/min

#### 3.2 自发热剂产氢条件优化

#### 3.2.1 单因素实验

(1) 料液质量比对产氢能力的影响

图 2 为料液质量比对发热剂产氢能力的影响。由图 2 可以看出,在发热剂用量(0.6 g)和反应环境温度(20 °C) 确定的情况下,料液质量比为 1:6 时,发热剂产氢能力较高。当料液质量比在 1:6~1:20 之间时,反应结束后会有较大量液体存留,不利于计算测量值 V<sub>2</sub>,因此确定料液比应保持在 1:4~1:6 之间。自发热剂为多种物质混合物,存在颗粒粒度差别大,不易混匀的情况,一定程度上加大了实验误差。



图 2 料液比对发热剂产氢能力的影响(n=5) Fig.2 Effect of material-liquid ratio on hydrogen-producing ability of heating agent(n=5)

#### (2)发热剂用量对产氢能力的影响

通过预实验发现,每克发热剂产气量超过 200 mL, 为使产气体积便于测量,发热剂取样范围确定为 0.4~0.8 g 之间。由图 3 可知,在料液比(1:5)和反应环境温度确定的 情况下,发热剂的用量为 0.4~0.6 g 时,产氢能力最高,其 他用量条件自发热剂产氢能力均有所下降。因此发热剂用 量应保持在 0.4~0.6 g 之间。



图 3 发热剂用量对产氢能力的影响(n=5) Fig.3 Effect of material amount on hydrogen production capability of heating agent(n=5)

#### 3.2.2 正交实验

在单因素实验的基础上,采用两因素三水平正交实 验进一步优化发热剂用量和料液比。正交实验设计和结果 见表 1 和 2。在表 1 中,由极差分析可以看出因素 B(样品 量)对发热剂产氢能力影响最大,其次是因素 A(料液比), 即 B>A。由方差分析可以看出因素 A(料液比)与因素 B(样 品量)对于发热剂产氢能力均有显著影响(P<0.05)。由表 1 可知,在因素 A(料液比)列, k<sub>2</sub>达到最大值,说明料液比在 1:5时更有利于发热剂反应生成氢气;在因素 B(样品量)列, k<sub>2</sub>达到最大值,产氢效果最佳。综上分析,可以得到食品自 发热剂产氢的最优条件为:样品用量 0.5 g,料液质量比 1:5。本测定方法,不需要复杂的化学试剂和昂贵的仪器设 备,反应时间在 20~30 min 完成,可以同时处理大量样品, 分析测试成本低,具有通用、快捷、高效的优点。

表 1 正交实验设计和结果 Table 1 Orthogonal test design and results(n=2)

Table 1 Orthogonal test design and results $(n-2)$					
处理号	A 料液比	B样品量/g	产氢能力平均值		
1	1(1:4)	1(0.4)	469.5202399		
2	1(1:4)	2(0.5)	500.6746603		
3	1(1:4)	3(0.6)	466.0803354		
4	2(1:5)	1(0.4)	485.9988012		
5	2(1:5)	2(0.5)	522.3474052		
6	2(1:5)	3(0.6)	488.8992674		
7	3(1:6)	1(0.4)	473.5519960		
8	3(1:6)	2(0.5)	505.4949010		
9	3(1:6)	3(0.6)	479.4870086		
$k_1$	478.7584119	476.3570124			
$k_2$	499.0818246	509.5056555			
$k_3$	486.1779685	478.1555371			
R	20.32341273	33.14864313			

注: k 值代表每个因素、水平下所求得的产氢能力平均值; R 值(极差)代表 k 值的变异范围。

# 3.3 食品自发热剂商品产氢定量测定

根据优化的试验参数(样品用量 0.5 g,料液质量比 1:5),对市场上 10 种品牌的食品自加热包(F1~F10)的产氢能力进行测定,结果见表 3。由表 3 可以看出,10 种自发热剂的产氢能力在 225.32~567.06 mL/g 之间,不同发热剂样品产氢能力差异显著,且在相同条件下镁铁系发热剂样品产氢能力显著高于铝系发热剂。

目前市场上一份自热食品所需加热包重量一般不超 过 80 g/份<sup>[31]</sup>,通过最优条件假设,发热包中发热剂产氢能 力按照 500 mL/g 计算,且该自加热包中发热剂与水反应完 全,则一份自热食品在使用过程中产生氢气体积为 80 g× 500 mL/g= 40000 mL = 40 L,结合氢气的爆炸极限浓度, 消费一份自热食品时保证氢气安全性所需的最小体积为 40 L/4.0% =1000 L=1 m<sup>3</sup>。因此为保证自热食品消费过程中 的安全性,每份装配有 80 g 及以下重量的自加热包的自热 食品应该在非密闭条件下使用,或至少应在 1 m<sup>3</sup> 以上的空 间内使用。因此,消费者在按照说明合理规范的使用自加 热包,可以有效避免危险事故的发生。

表 2 正交实验方差分析 Table 2 Variance analysis of orthogonal test

Tuble 2 Variance analysis of orthogonal cest						
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	<i>P</i> 值	显著性
料液比	634.600428	2	317.300214	36.296632	0.002727	*
样品量	2084.897155	2	1042.448577	119.247863	0.000272	*
误差	34.967455	4	8.741864			
修正后总计	2754.465037	8				

注:\*差异显著(P<0.05)。

表 3 市售不同品牌自加热包样品中发热剂的产氢能力 Table 3 Commercially available different brands of self-heating pack samples for hydrogen generating capacity

	•	01 1 1	00011
样品编号	产氢量/(mL/g)	样品编号	产氢量/(mL/g)
F1	$539.95{\pm}19.46^{\rm f}$	F6	294.43±25.46 <sup>cd</sup>
F2	$567.06{\pm}10.08^{\rm f}$	F7	$315.39{\pm}19.22^{d}$
F3	365.74±16.34°	F8	270.82±5.59 <sup>bc</sup>
F4	$244.34{\pm}10.02^{ab}$	F9	225.32±5.99 <sup>a</sup>
F5	367.11±17.15°	F10	$510.95{\pm}8.91^{\rm f}$

注:标准差数值右侧的不同字母上标表示差异显著性

# 4 结 论

本研究采用单因素实验和正交实验优化出了影响食品自发热剂产氢反应条件,最佳产氢条件为:料液质量比1:5,发热剂材料用量0.5g。利用该条件对10种食品自发热剂进行检测,不同品牌产品的产氢量处于较高水平,产氢能力差异显著,其中镁铁系自发热剂产氢量为539.95~567.06 mL/g,铝系自发热剂产氢量为225.32~510.95 mL/g。食品自发热包使用中会产生氢气,自加热包的生产储运应用过程中一定要注意安全控制。同时食品自加热包的放热性能与食品的复热效果密切相关,下一步需要对食品自发热剂的放热性能进行定量测定,从而可以对食品自加热包进行热效能和安全性的综合评价。

#### 参考文献

 李国峰, 孟春玲, 梁韬, 等. 自热米饭传热过程的仿真研究[J]. 食品科 技, 2014, 39(6): 160–163.

Li GF, Meng CL, Liang T, *et al.* Simulation study on heat transfer process of self-heating rice [J]. Food Sci Technol, 2014, 39(6): 160–163.

[2] 郭思亚,熊伟,张龙翼,等. 自热烤鱼制品的加热效果分析[J]. 中国调味品,2018,43(7):91-94.

Guo SY, Xiong W, Zhang LY, et al. Analysis of heating effect of self-heating

grilled fish product [J]. China Cond, 2018, 43(7): 91-94.

- [3] 陈明明, 龚彩莲, 殷丹婷, 等. 低碳型自热式牛奶包装盒的研制[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 336–337, 348.
  Chen MM, Gong CL, Yin DT, *et al.* Preparation for the low-carbon type of self-heating milk box [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(12): 336–337, 348.
- [4] 姜炜,李德远. 军用食品自加热技术的民用前景[J]. 食品工业科技, 2006, 27(2): 196–197.
   Jiang W. Li DY. Civil prospects of military food self-heating technology [I]

Jiang W, Li DY. Civil prospects of military food self-heating technology [J]. Sci Technol Food Ind, 2006, 27(2): 196–197.

[5] 郭婷. 自热食品市场火热未来需兼顾营养与安全[J]. 中国食品, 2018, (20): 80-81.

Guo T. Self-heating food market is hot, nutrition and safety need to be balanced in the future [J]. China Food, 2018, (20): 80-81.

[6] 李晨. 方便火锅销售火爆亟需制定相关标准[J]. 中国食品, 2017, (17):
 82-83.

Li C. Convenient hot pot sales hot, and relevant standards need to be developed urgently [J]. China Food, 2017, (17): 82-83.

- [7] 汪宝忠,王兰,弓彦忠. 自热方便食品水合发热剂的研究[J]. 郑州粮食 学院学报, 1997, (3): 41-45.
  Wang BZ, Wang L, Gong YZ. Study on hydrating heating agent of self-heating convenience food [J]. J Zhengzhou Grain Coll, 1997, (3): 41-45.
- [8] 王学辉, 薛风照. 浅谈军用食品的包装及安全[J]. 海军医学杂志, 2013, 34(1): 45-47.

Wang XH, Xue FZ. Talking about the packaging and safety of military food

[9] 刘晓华,韩跃新,任飞. 矿物发热剂的应用与研究现状[J]. 有色矿冶, 2006, (1): 10-11.

Liu XH, Han YX, Ren F. Application and research status of mineral heating agent [J]. Non Ferrous Min Metall, 2006, (1): 10-11.

- [10] 郑志强, 刘嘉喜. 无火焰食品自加热器中原材料对放热性能的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 148-151. Zheng ZQ, Liu JX. Effect of raw material on the exothermal performance of flameless food self-heater [J]. Food Mach, 2012, 28(5): 148-151.
- [11] Wen YC, Huang WM, Wang HW. Kinetics study on the generation of hydrogen from an aluminum/water system using synthesized aluminum hydroxides [J]. Int J Energ Res, 2018, 42(4): 1615-1624.
- [12] Yang BC, Chai YJ, Yang FL, et al. Hydrogen generation by aluminum-water reaction in acidic and alkaline media and its reaction dynamics [J]. Int J Energ Res, 2018, 42(4): 1594-1602.
- [13] Urbonavicius M, Varnagiris S, Milcius D. Generation of hydrogen through the reaction between plasma-Modified aluminum and water [J]. Energy Technol Gre, 2017, 5(12): 2300-2308.
- [14] 仝大明, 蔡水洲, 谢长生, 等. 铝粉与水反应的电化学研究[J]. 含能材 料,2013,21(2):262-267. Tong DM, Cai SZ, Xie CS, et al. Reaction of Al powder and water visa electrochemistry technology [J]. Chin J Energ Mater, 2013, 21(2): 262-267.
- [15] 赵冲, 徐芬, 孙立贤, 等. 铝基材料水解制氢技术[J]. 化学进展, 2016, 28(12): 1870-1879. Zhao C, Xu F, Sun LX, et al. Hydrogen generation by Al-based materials hydrolysis [J]. Prog Chem, 2016, 28(12): 1870-1879.
- [16] 贾艳艳, 沈洁, 孟海霞, 等. Al/NaCl 与水反应制氢[J]. 电源技术, 2013, 37(12): 2138-2140. Jia YY, Shen J, Meng HX, et al. Hydrogen generation by reaction of Al/NaCl with water [J]. Chin J Power Sources, 2013, 37(12): 2138-2140.
- [17] Chen Y, Teng H, Lee T, et al. Rapid hydrogen generation from aluminum-water system by adjusting water ratio to various aluminum/aluminum hydroxide [J]. Int J Energy Environ Eng, 2014, 5(87): 1-6.
- [18] Razavi-Tousi SS, Nematollahi GA, Ebadzadeh T, et al. Modifying aluminum-water reaction to generate nano-sized aluminum hydroxide particles beside hydrogen [J]. Powder Technol, 2013, (241): 166-173.
- [19] Ohmura S, Shimojo F, Kalia RK, et al. Reaction of aluminum clusters with water [J]. J Chem Phys, 2011, 134(24): 244702.
- [20] Paul D, Demitrios S, Edward LD. Hydrogen production by reacting water with mechanically milled composite aluminum-metal oxide powders [J]. Int J Hydrogen Energ, 2011, 36(8): 4781-4791.
- [21] Williams G, Birbilis N, McMurray HN. The source of hydrogen evolved from a magnesium anode [J]. Electrochem Commun, 2013, (36): 1-5.
- [22] Izquierdo J, Fernández-Pérez BM, Filotás D, et al. Imaging of concentration distributions and hydrogen evolution on corroding magnesium exposed to aqueous environments using scanning electrochemical microscopy [J]. Electroanal, 2016, 28(10): 2354-2366.

- [23] Taheri M, Kish JR, Birbilis N, et al. Towards a physical description for the origin of enhanced catalytic activity of corroding magnesium surfaces [J]. Electrochim Acta, 2014, (116): 396-403.
- [24] 朱新强, 王新秀. 在线质谱在氢气准确定量中的应用[J]. 分析仪器, 2018, (1): 94–99.

Zhu XQ, Wang XX. Quantitative analysis of hydrogen by on-line mass spectrometer [J]. Anal Instrum, 2018, (1): 94-99.

- [25] 吴红志. 氢气含量的几种检测方法[J]. 氯碱工业, 2011, 47(4): 34-36. Wu HZ. Determination methods of hydrogen gas content [J]. Chlor Alkali Ind, 2011, 47(4): 34-36.
- [26] 王延瞳, 许开立, 李力, 等. 铝颗粒与水反应产氢影响因素及抑制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 731-735. Wang YT, Xu KL, Li L, et al. Influencing factors and inhibition of hydrogen produced by aluminum and water reaction [J]. J Northeast Univ (Nat Sci Ed), 2018, 39(5): 731-735.
- [27] Li R, Fang Y, Yang T, et al. Influence factor of hydrogen generation from aluminum-water reaction [C]. International Conference on Computer Distributed Control & Intelligent Environmental Monitoring. IEEE, 2011.
- [28] Yavor Y, Goroshin S, Bergthorson JM, et al. Enhanced hydrogen generation from aluminum-water reactions [J]. Int J Hydrogen Energ, 2013, 38(35): 14992-15002.
- [29] 刘嘉喜, 王越鹏, 薛建宇. 单兵自热野战食品的传热分析与优化设计 研究[J]. 中国食品学报, 2003, (z1): 393-399. Liu JX, Wang YP, Xue JY. Optimization of heat transfer for individual self-

heating combat ration [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2003, (z1): 393-399. [30] 马立鹏, 孟春玲, 张文华, 等. 自热米饭传热过程的仿真研究[J]. 食品 工业, 2018, 39(5): 238-242.

Ma LP, Meng CL, Zhang WH, et al. Simulation study on heat transfer process of self-heating rice [J]. Food Ind, 2018, 39(5): 238-242.

[31] 钱平. 软包装米饭、面条罐头自加热效果的影响因子研究[J]. 中国食品 学报 2002 2(4):12-20

Qian P. Study on factors Influencing the self- heating efficiency of the retort pouch rice/noodle [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2002, 2(4): 12-20.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



自加热技术。 E-mail: Chongxin0705@163.com

刘崇歆,硕士,主要研究方向为食品

张春江,博士,副研究员,主要研究方 向为食品工程化技术与装备研究。 E-mail: chjiang1976@126.com