

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.04.021

紫外线照射对炼乳空桶杀菌效果及其动力学研究

Germicidal effects of ultraviolet on condensed milk barrel and its dynamic

张微微¹ 孙艳辉¹ 韦海阳²ZHANG Wei-wei¹ SUN Yan-hui¹ WEI Hai-yang²贾小丽¹ 刘淑兰¹ 顾海洋¹JIA Xiao-li¹ LIU Shu-lan¹ GU Hai-yang¹

(1. 滁州学院生物与食品工程学院, 安徽 滁州 239000; 2. 安徽达诺乳业股份有限公司, 安徽 滁州 239514)

(1. College of Biological and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou, Anhui 239000, China;

2. Anhui Danuo Dairy Industry Co., Ltd., Chuzhou, Anhui 239514, China)

摘要:以杀菌率为指标,采取多因素试验设计法,在 4 种照射强度、5 种照射时间和 3 种照射距离的条件下,探讨紫外线对空桶杀菌的效果及其动力学参数。结果表明,照射剂量越高,杀菌效果越好;紫外灯管越接近桶底,杀菌效果愈强;照射时间越长,微生物数量明显减少,杀菌效果显著增强。当菌落数 $\leq 10^4$ CFU/cm²,在同一装置照射强度下(紫外线杀菌灯为石英型,照射强度 $\geq 90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$),紫外线杀菌细菌反应级数约为 1.00~1.04,一级杀菌速率常数为 $0.34\sim 0.37 \text{ cm}^2/(\text{mW}\cdot\text{s})$,且 90 s 细菌的杀灭对数值 ≥ 3.00 ,杀菌后空桶内微生物符合商业无菌的标准,说明紫外线照射对炼乳桶起到有效杀菌作用。

关键词:紫外;杀菌;炼乳空桶

Abstract: An innovation UV irradiation device was used to detect the germicidal efficacy of UV irradiation on microorganisms inside the condensed milk barrel. In terms of germicidal rates, experiments were conducted to investigate the disinfecting feasibility and the effectiveness of ultraviolet under 60 experimental conditions, which were formed by $4\times 5\times 3$ factorial combinations of radiant intensity, radiant time and radiant distance. The results indicated the germicidal rate was positively correlated with the radiant intensity, radiant time and radiant distance. Meanwhile, it was up to 99.9% for 90 second by UV irradiation in the same light with the radiant intensity above $90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, when the initial consistence of bacteria in the barrel is about 10^4 CFU/cm². It also showed the bacteria reaction order was among 1.00 and 1.04.

基金项目:安徽省科技重大专项项目(编号:16030701083);滁州学院博士后基金(编号:bsh0003)。

作者简介:张微微,女,滁州学院讲师,博士

通信作者:孙艳辉(1978—),男,滁州学院教授,博士。

E-mail: syh20070626@126.com

收稿日期:2019-02-01

The ultraviolet disinfection process can be viewed as first order kinetics of optical biochemistry. The first sterilization rate constant of bacteria equals to $0.34\sim 0.37 \text{ cm}^2/(\text{mW}\cdot\text{s})$. The killing logarithm value was higher than 3.00. These results showed the device is effective in sterilizing.

Keywords: UV; germicidal; condensed milk barrel

随着食品工业发展,作为一种优良的乳品工业原料,炼乳已被广泛应用到糖果、糕点、餐饮和乳品饮料行业中。炼乳富含蛋白质、脂肪和糖等营养物质,极适合微生物生长繁殖^[1-2]。产品包装能使炼乳免受微生物污染,减少环境温湿度、光照和氧气等对其品质的影响,在保持食品品质和安全的同时,延长产品货架期^[2-4]。包装材料,一般采取集中生产、部分配送给各个罐装生产线的物流方式。由于在运输及储备过程中存在一定的污染可能,因此它的杀菌效果直接影响了相关产品的质量,成为生产中非常重要的一环。包装材料的杀菌在食品无菌技术中至关重要^[1,4-6]。

国内外包装材料的杀菌可分为热杀菌和冷杀菌 2 种。热杀菌主要利用各种微生物对高温的敏感反应,以此达到消毒的目的,但消毒设备复杂,能耗较高,不符合节能高效的可持续发展政策^[7]。且有研究^[8]指出金属包装容器经高温灭菌工艺会产生有害物质危害人体健康等。因此,冷杀菌成为食品行业中重点关注的新型杀菌技术。作为一种物理冷杀菌方式,紫外线杀菌主要依靠紫外线照射使得细胞内 DNA 发生交联,组织 DNA 解旋复制,从而达到抑制微生物的繁殖^[1,8-10]。紫外线杀菌具有工艺简单、无药剂残留、效率高、维修费用低等特点,被广泛应用于空气^[11]、物体表面^[12]、水^[13-14]等领域,成为广大学者们的研究热点。

近年来,随着强力紫外线灯的开发,紫外线杀菌的应用范围越来越广^[15-16],逐渐成为食品加工厂与制药厂不可或缺的杀菌设备^[9,17],而且在肉制品工业、鲜切蔬菜保鲜等方面亦有广泛的应用^[18-20]。研究^[21-22]发现紫外线杀菌在保证食品在商业无菌的前提下,不造成营养流失,对于包装容器的灭菌效果显著,但对乳制品金属容器中的研究尚未涉及。

本研究拟将紫外线照射应用于炼乳桶,结合杀菌效果和动力学研究,探明紫外线设备杀菌可行性,建立杀菌数学模型,并通过试验对模型进行验证分析杀菌性能,以期紫外线技术在乳制品企业无菌包装技术中的应用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

炼乳桶:25 cm×25 cm×35 cm(长×宽×高),桶口直径 6 cm;

大肠杆菌、金黄色葡萄球菌:由本院微生物实验室提供;

平板计数琼脂、孟加拉红培养基:北京陆桥技术股份有限公司。

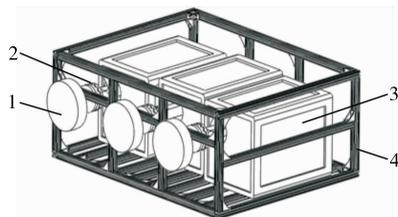
1.2 主要设备

紫外线灯:ZW30Z18Y 型,长度分别为 15, 17, 19, 20 cm,照射强度分别为 74.0,91.2,112.6,145.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,螺旋式,杭州亚光照明灯饰有限公司;

紫外杀菌装置(图 1):由紫外线杀菌装置和铝合金框架组成,紫外线杀菌装置主要是螺旋式紫外线灯管和灯座及其插座组成,紫外线灯管,灯座固定安装在铝合金固定架子上,四周为镂空结构的测试台,紫外线可照射桶内表面和外表面,桶可以自由伸缩,且尽可能地避免紫外线暴露。

1.3 试验设计

紫外杀菌试验:操作在微生物无菌室中进行,将炼乳桶置于杀菌装置中,分别选择 4 种照射强度紫外线(74.0, 91.2,112.6,145.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)、5 种照射时间(30, 60, 90, 120,150 s)和 3 种照射距离(紫外线灯嵌入桶内垂直距离



1. 底座 2. 紫外线灯 3. 空桶 4. 铝合金外框

图 1 炼乳空桶紫外杀菌装置

Figure 1 Ultraviolet sterilization device for condensed milk barrel

15,17,19 cm),进行 $4 \times 5 \times 3$ 多因素设计,形成 60 组试验条件,每个组合重复 3 次。采样后进行活菌计数培养,计算平均杀菌率。

1.4 测定指标与方法

(1) 微生物取样与培养:该操作在生物安全柜中进行。被测定容器表面积 $>100 \text{ cm}^2$,用无菌棉捻子均匀涂抹 100 cm^2 面积范围,并转动捻子,除手接触部位,再将捻子放入 10 mL 灭菌生理盐水试管中,对采集样品进行充分震荡,根据污染程度,进行适当稀释。

(2) 菌落总数检测:按 GB/T 4789.2—2016 执行。

(3) 金黄色葡萄球菌检测:按 GB/T 4789.10—2016 执行。

(4) 大肠杆菌检测:按 GB/T 4789.3—2016 执行。

(5) 杀菌率 T 按式(1)计算:

$$T = \frac{N_0 - N_t}{N_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

T ——杀菌率, %;

N_0 ——桶内初始菌数, CFU/L;

N_t ——照射时间 t 时刻的剩余菌体数, CFU/L。

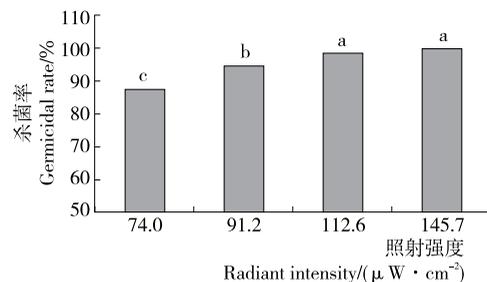
1.5 数据分析

试验中数据以平均值±标准差表示,通过 SAS 9.2 统计分析软件进行分析处理,多重比较进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 照射强度对紫外线杀菌效果的影响

对不同紫外线照射强度的 5 种照射时间和 3 种照射距离的杀菌率数据进行综合平均,获得紫外线对炼乳桶的杀菌率(图 2)。在试验选用的紫外线照射强度范围内,紫外线照射强度为 $74.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,紫外线对桶内细菌总数的杀菌率为 $(87.21 \pm 10.68)\%$,可能是在该照射强度下,不同紫外线照射时间和紫外线垂直照射距离杀菌率差异较大,也反映了该照射强度紫外线杀菌效果较差。但当照射强度从 $74.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 升高到 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$,紫



不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 2 不同照射强度下紫外线杀菌率

Figure 2 Germicidal rates of ultraviolet with different radiant intensity

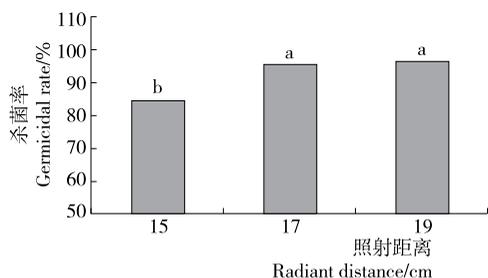
紫外线杀菌效果显著增强 ($P < 0.05$), 此时其杀菌效果提高了 4.7%。随着照射强度增加, 紫外线的杀菌率超过了 99%, 且与其他处理组杀菌率存在显著差异 ($P < 0.05$)。当照射强度达到一定值后, 杀菌率与照射时间和垂直照射距离不再呈显著变化, 该现象与目前紫外线用于食品表面微生物杀菌研究^[12]结果保持一致。分析可能是桶内表面不平整地方的微生物难以在短时间内被完全杀灭; 其次, 不同微生物对于紫外线的抵抗力呈不同的敏感性。考虑装置的耗电成本, 建议照射强度在 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 左右即可满足商业无菌要求。

2.2 照射距离对炼乳空桶内微生物的杀菌率影响

对不同照射距离的 5 种照射时间和 4 种照射强度的紫外线杀菌率数据进行综合平均, 获得紫外线杀菌率如图 3 所示。当紫外灯装置垂直进入桶内 15, 17, 19 cm 时, 其杀菌率分别为 $(84.40 \pm 9.06)\%$, $(95.58 \pm 6.78)\%$, $(96.42 \pm 6.43)\%$ 。显然, 装置伸入桶内 17, 19 cm 时, 其杀菌率显著 $> 15 \text{ cm}$ ($P < 0.05$), 主要原因在于照射强度为 $74.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外线装置本身长度为 15 cm, 当该装置伸入桶内距离桶底部与其他装置一样高度时, 紫外灯离炼乳桶瓶口就会有一段距离, 导致照射不完全, 使得杀菌率降低, 而高强度紫外灯装置其垂直照射均 $> 15 \text{ cm}$, 若要距离桶底一样的距离, 其杀菌率较高, 但显然会有紫外线暴露在外引起照射浪费。因此, 为确保杀菌效果的前提下, 更经济地照射, 本研究的紫外线装置进入桶内的最佳距离为 17 cm。

2.3 照射时间对炼乳空桶内微生物的杀菌率影响

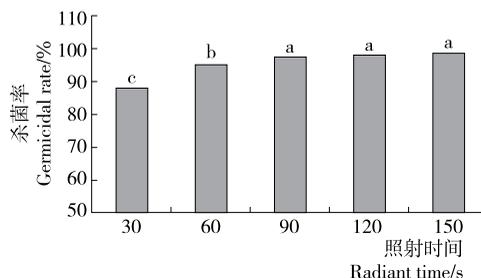
对不同照射时间的 4 种紫外灯和 3 种照射距离的紫外线杀菌率数据进行综合平均, 结果如图 4 所示。随着照射时间的增加, 紫外线的杀菌效果逐渐增强, 当照射时间从 30 s 增加至 60 s 时, 紫外线杀菌率显著增强 ($P < 0.05$), 从 $(87.98 \pm 11.54)\%$ 增加到 $(95.32 \pm 3.54)\%$ 。但当照射时间从 90 s 增加至 150 s 的过程中, 紫外线杀菌率在不同照射时间之内的紫外线杀菌率变化不显著 ($P > 0.05$)。当照射时间为 90 s, 其平均杀菌率为 $(97.66 \pm$



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)
图 3 不同照射距离下紫外线杀菌率

Figure 3 Germicidal rates of ultraviolet with different radiant distance

$2.34)\%$, 无法达到杀菌要求, 但当其与照射强度和照射距离条件相结合, 可使其符合要求。紫外灯照射强度为 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 装置置入桶内 15 cm 时, 杀菌率为 $(95.6 \pm 1.34)\%$, 无法满足条件, 当该装置置入桶内 17 cm, 杀菌率显著提高, 可使其达到商业无菌要求。综合考虑, 该装置距离以置入桶内 17 cm, 照射时间 $\geq 90 \text{ s}$ 为宜。



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)
图 4 不同照射时间下紫外线杀菌率

Figure 4 Germicidal rates of ultraviolet with different radiant time

2.4 紫外线杀菌动力学模型

如上所述, 照射强度为 $91.2 \sim 145.7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 照射时间为 90~150 s, 桶内的微生物可达到商业无菌的要求。但考虑到实际生产中经济运算, 选择照射强度 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 照射时间 90 s, 作为本装置杀菌参数。为更好地说明该装置杀菌进程, 对以上数据进行进一步分析, 探讨其动力学模型。

确定速率方程的关键是确定反应级数。紫外线杀菌的实质是光化学反应, 其杀菌速率方程 $\frac{-dN}{dt} = kN^n$ 变形为:

$$\lg\left[\frac{-dN}{dt}\right] = n \lg N_t + \lg k I, \quad (2)$$

式中:

N_t ——照射时间 t 时刻的桶内剩余菌体数, CFU/L;

k ——杀菌速率常数, $\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})$;

n ——反应级数;

I ——紫外线平均照射强度, mW/cm^2 ;

t ——照射时间, s。

本研究中以桶中菌落总数为依据数据指标, 对方程进行回归分析, 结果见表 1。

表 1 反应级数回归方程

Table 1 Regression equation of reaction order

初始菌落总数/(CFU · L ⁻¹)	回归方程	R ²
13 300	$y = 1.020 6x - 0.260 1$	0.99
32 000	$y = 1.039 3x - 0.204 0$	0.99
60 000	$y = 1.008 0x - 0.098 7$	0.99

由回归方程可以看出,在该装置下紫外线杀菌的反应级数为 1.00~1.04,该杀菌过程可近似看作一级光化学反应。

根据一级化学反应模型 $N_t = N_0 e^{-kt}$,变形后为 $\ln N_t = -kt + \ln N_0$, (3)

式中:

k ——一级杀菌速率常数, $\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})$;

N_0 ——初始时刻的菌体数, CFU/L 。

对方程进行回归,结果见表 2。计算获取一级杀菌速率常数 k 分别为 0.37, 0.34, 0.34 $\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})$ 。菌落总数的 k 值不同,可能是由于不同空桶菌落总数的菌群种类与分布不一致,不同种类微生物对紫外线的敏感程度不同。

表 2 速率回归方程

Table 2 Rate regression equation

初始菌落总数/($\text{CFU} \cdot \text{L}^{-1}$)	速率方程	R^2
13 300	$y = -0.033 5x + 8.37$	0.98
32 000	$y = -0.031 2x + 8.95$	0.99
60 000	$y = -0.031 0x + 9.13$	0.98

2.5 验证实验结果与讨论

为更好地理解紫外线杀菌效果,对已合格的空桶进行验证实验,将大肠杆菌和金黄色葡萄球菌作为试验菌株,对应培养基稀释成 10^{-4} CFU/mL 供染菌用,按 1.4 进行采样及计算,并进行验证研究,其杀菌效果、回归方程与分析测定分别见表 3、4 和图 5。

表 3 不同作用时间的杀菌对数值

Table 3 Germicidal value for different time

作用时间/s	大肠菌群	金黄色葡萄球菌
30	0.99	0.80
60	1.29	1.23
90	3.00	3.12
120	3.60	3.42
150	3.93	3.82

试验结果证明:在照射强度为 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外灯装置下,紫外照射大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的杀菌效果比较接近。紫外照射 30, 60 s, 杀菌对数值 < 3.00 ; 紫外照射 ≥ 90 s, 杀菌对数值 ≥ 3.00 。从能耗角度分析,紫外照

表 4 反应级数回归方程

Table 4 Regression equation of reaction order

试验菌株	回归方程	R^2
大肠杆菌	$y = 1.016 7x - 0.118 1$	0.99
金黄色葡萄球菌	$y = 1.019 1x - 0.021 0$	0.99

射 90 s 即可满足商业无菌要求, $\geq 0.01\%$, 该结果与紫外照射炼乳空桶的研究一致。

在相同条件下,从验证实验回归方程可以看出,在该装置下紫外线杀菌的反应级数为 1.02, 杀菌过程近似一级光化学反应,与试验结果一致。通过模型计算获取一级杀菌速率常数 k 分别为 0.34, 0.35 $\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})$, 与原研究结果一致,且紫外杀菌试验与验证实验研究结果的 k 值基本吻合,说明紫外线具有较好的杀灭细菌效果。

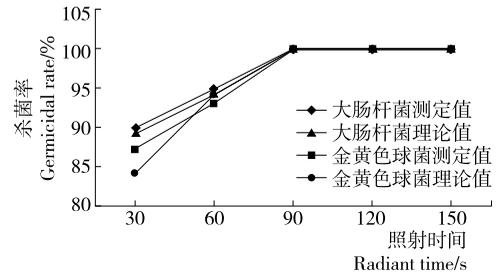


图 5 不同照射时间下杀菌率回归分析理论值与测定值

Figure 5 Germicidal rates of ultraviolet with different radiant time between theory and measurement

由图 5 可知,通过回归方程计算理论值与试验研究测定值相近,无显著差异 ($P > 0.05$)。由此可知,选择照射强度为 $91.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 紫外灯装置对炼乳空桶进行杀菌,完全遵循一级光化学反应模型,且该模型能很好地描述其综合反应进程。

3 结论

利用自行设计的紫外线杀菌装置对炼乳马口铁制空桶进行处理,通过多因素试验和验证实验研究,确定该装置对炼乳空桶的杀菌参数,并对其动力学进行分析。结果表明,当菌落数 $\leq 10^4 \text{CFU}/\text{cm}^2$, 在同一装置强度下(紫外线杀菌灯为石英型,照射强度 $\geq 90 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)照射 90 s, 杀菌率可达 99.9%, 杀灭对数值 ≥ 3.00 , 空桶内微生物符合商业无菌的标准。通过动力学研究结果表明紫外线杀菌反应级数约为 1.00~1.04, 可将其看作一级光化学反应,一级杀菌速率常数为 0.34~0.37 $\text{cm}^2/(\text{mW} \cdot \text{s})$ 。本试验表明在该自行设计装置下紫外线照射对炼乳空桶起到有效杀菌作用,为今后紫外线技术在乳制品企业容器无菌技术的应用提供了技术支持。后期项目可结合扫描电镜、光谱等技术,进一步研究紫外线照射过程中微生物形态结构和功能的变化,从而探索杀菌机理,为紫外杀菌技术深入应用提供理论指导。

参考文献

[1] 马梦晴, 高海生. 食品杀菌与无菌包装新技术综述[J]. 河北科技师范学院学报, 2015, 29(3): 39-44.
 [2] 卓勇贤. 炼乳褐变原因分析及控制措施[J]. 农产品加工, 2006(5): 42-43.

- [3] Caner C, Sorption phenomena in packaged food: Factors affecting sorption processes in package-product systems[J]. *Packaging Technology and Science*, 2011, 24(5): 259-270.
- [4] 邓理, 郭松晴. 食品无菌包装中包装材料的灭菌方法[J]. *农机化研究*, 2001(1): 67-70.
- [5] 刘凤臣, 叶鹏, 尤晨, 等. 新型 PET 瓶盖杀菌系统的研究与开发[J]. *轻工机械*, 2011, 29(3): 76-78.
- [6] 邹平, 李娟, 李忠海. PET 包装材料中紫外吸收剂迁移研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(3): 231-234, 252.
- [7] 张志强. 冷杀菌技术在食品工业中应用的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(11): 141-143.
- [8] 赖红娟, 赖红霞, 谢永萍, 等. 金属食品包装容器内涂层在高温条件下的潜在风险[J]. *涂料工业*, 2017, 47(7): 66-70.
- [9] 丁有生. 紫外杀菌等技术与应用的发展[J]. *灯与照明*, 2015, 39(2): 1-4.
- [10] KIYOSHI Y S, 姜伟. 紫外线杀菌的原理和最新应用[J]. *中国照明电器*, 2005(4): 28-31.
- [11] 孔繁贞, 冯建萍, 魏绍振, 等. 紫外线对微生物消毒效果的影响因素及质控措施[J]. *青海畜牧兽医*, 2017, 47(2): 64-66.
- [12] 陈敏, 兰维杰, 罗惟. 双面紫外照射对鲜切苹果表面微生物及品质的影响[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(9): 3 660-3 666.
- [13] 李同, 董红敏, 陶秀萍. 猪场沼液絮凝上清液的紫外线杀菌效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 165-171.
- [14] 郑荣进, 向坤, 朱松明. 紫外线对水产养殖循环水的杀菌效果[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 257-261.
- [15] 严雅丽, 刘福权, 赵志峰, 等. 花椒羟基- α -山椒素在紫外照射下的降解动力学[J]. *食品与机械*, 2017, 33(9): 26-29.
- [16] 吴永祥, 吴丽萍, 王卫东, 等. 桑白皮多酚的抗氧化和对 UV 辐射致成纤维细胞光老化的修复作用[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 15-18.
- [17] 吴雅静. 非热杀菌技术在食品加工中的应用研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(1): 242-243.
- [18] 胡顺爽, 邵海燕, 吴伟杰, 等. 响应面法优化草莓鲜榨汁紫外杀菌工艺[J]. *食品科学*, 2018, 39(22): 227-234.
- [19] 刘晓燕, 兰维杰, 黄文部, 等. 鲜切果蔬非氯杀菌技术研究进展[J]. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(9): 3 912-3 918.
- [20] BIRMPA A, SFIKA V, VANTARAKIS A. Ultraviolet light and Ultrasound as non-thermal treatments for the inactivation of microorganisms in fresh ready-to-eat foods[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 167(1): 96-102.
- [21] 郭晓峰. 杀菌及包装对烤全羊贮藏期品质的影响及安全评价体系的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016: 9-13.
- [22] 余永涛, 卢立新, 姜权. 基于喷淋热杀菌的 PET 瓶装饮料温度场模拟分析[J]. *包装工程*, 2015, 36(13): 52-55.

(上接第 25 页)

- [21] BINKS B P, LUMSDON S O. Transitional phase inversion of solid-stabilized emulsions using particle mixtures [J]. *Langmuir*, 2000, 16(8): 3 748-3 756.
- [22] RAYNER M, MARKU D, ERIKSSON M, et al. Biomass-based particles for the formulation of Pickering type emulsions in food and topical applications[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 458: 48-62.
- [23] 赵谋明, 孔静, 刘丽娅, 等. 离子强度对亚麻籽胶-酪蛋白乳液稳定性影响[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2012, 44(5): 173-178.
- [24] AVEYARD R, BINKS B P, CLINT J H. Emulsions stabilised solely by colloidal particles[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, 100: 503-546.
- [25] YANG Fei, LIU Shang-ying, XU Jian, et al. Pickering emulsions stabilized solely by layered double hydroxides particles: The effect of salt on emulsion formation and stability[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 302(1): 159-169.
- [26] YANG Fei, NIU Quan, LAN Qiang, et al. Effect of dispersion pH on the formation and stability of Pickering emulsions stabilized by layered double hydroxides particles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 306(2): 285-295.
- [27] FRELICHOWSKA J, BOLZINGER M A, CHEVALIER Y. Effects of solid particle content on properties of O/W Pickering emulsions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 351(2): 348-356.
- [28] VIGNATI E, PIAZZA R, LOCKHART T P. Pickering emulsions: interfacial tension, colloidal layer morphology, and trapped-particle motion[J]. *Langmuir*, 2003, 19(17): 6 650-6 656.
- [29] JUÁREZ J A, WHITBY C P. Oil-in-water Pickering emulsion destabilisation at low particle concentrations [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 368(1): 319-325.
- [30] TANG Chuan-he, LIU Fu. Cold, gel-like soy protein emulsions by microfluidization: emulsion characteristics, rheological and microstructural properties, and gelling mechanism[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 61-72.
- [31] WANG Jin-mei, XIA Ning, YANG Xiao-quan, et al. Adsorption and dilatational rheology of heat-treated soy protein at the oil-water interface: Relationship to structural properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3 302-3 310.