DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.06.018

有裂纹立式杀菌锅的力学特性与可靠性研究

Study of mechanical characteristics and reliability on cracked vertical retort

李荆礼[1] 张丽梅[1] 吴 丹[1] 齐 兵[2]

LI Jing-li[1] *ZHANG Li-mei*[1] *WU Dan*[1] *QI Bing*[1]

(1. 北京工商大学人工智能学院,北京 100048;2. 河北养元智汇饮品股份有限公司,河北 衡水 053000)

(1. *School of Artifical Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing* 100048, *China*; 2. *Heibei Yangyuan Zhihui Co., Ltd., Hengshui, Hebei* 053000, *China*)

摘要:以连续无篮杀菌生产线上的立式杀菌锅为研究对象,在考虑温度、水压等情况下,分析有裂纹杀菌锅的力学特性;并将裂纹设置为随机变量,采用随机有限元法分析各影响因素对杀菌锅可靠性的影响。先采用 SolidWorks 建几何模型,再运用有限元软件 Ansys 计算,分析其力学特性和可靠性。结果表明:温度相对水压力来说对杀菌锅力学特性影响大;在有裂纹的情况下,应力和位移受裂纹深度影响较大;根据 Ansys 中的拉丁超立方法分析得出杀菌锅可靠度为 96.7%。

关键词:立式杀菌锅;裂纹;力学特性;随机有限元;可靠性

Abstract: Taking the vertical retort on a continuous basket-less sterilization production line as the research object, analyzed the cracked retort considering the temperature and water pressure. At the same time, the cracks were set as a random variable and the influence factors on the reliability of the retort were analyzed by the random finite element method. Firstly, the geometric model was built by SolidWorks, then the mechanical properties and reliability were calculated by ANSYS. The results showed that: compared with the water pressure, the temperature had a great influence on the mechanical properties of the retort. To the cracked retort, the crack depths greatly affected the stress and displacement. According to the Latin superposition method in ANSYS, the reliability degree of the retort can reach 96.7%.

Keywords: vertical retort; crack; mechanical properties; random finite element method; reliability

罐装液体饮料的杀菌多采用整罐体的蒸汽加压杀菌方法,常见的卧式杀菌锅多采用篮装罐体后整体推入锅内的方式杀菌,这在一定程度上增加了工作量同时工作效率低。新型的无篮杀菌锅不使用杀菌篮,并可以多个杀菌锅同时工作,大大提高了生产效率。这种生产线通常采用立式杀菌锅,罐体进入后升温、加压,杀菌结束后注冷水降温。由于杀菌温度、水压力、杀菌工序等的影响,杀菌锅盖体易出现裂纹,但带裂纹的立式杀菌锅的工作可靠性目前尚无定论。

杀菌锅属于一种压力容器,目前已有很多关于压力容器裂纹和可靠性的研究。Kannan 等[1]建立内压作用下含裂纹压力容器模型,分析了不同倾角以及交错角情况下裂纹应力强度因子的变化规律,判断压力容器在表面裂纹增长情况下失效引起泄漏的可能性;Dwivedi 等[2]基于整个厚度上的平均等效塑性应变,通过弧长方法估计失效位置,进而分析了压力容器的塑性破坏载荷;汤占歧等[3]将工作压力、屈服极限、球壳厚度和直径当作服从正态分布的随机变量,计算水压下球罐壳体可靠度和各随机变量的灵敏度,判断其可靠性;张文涛等[4]采用概率论、有限元法和蒙特卡罗法对球型储罐结构中的载荷应力、尺寸等参数进行抽样分析,得到球壳结构的灵敏度和可靠性结果;李文震等[5]将球罐的几何尺寸、载荷及屈服强度等参数作为随机输入变量,建立极限状态函数,选用蒙特卡罗法对使用中的球罐进行抽样计算,得到球罐可靠度,并确定影响其可靠性的主要因素和可靠度对各随机参数的敏感性;彭翠玲等[6]基于 ANSYS 的 PDS 模块,通过输入筒体的壁厚、载荷及弹性模量等随机变量,以蒙特卡罗法对其进行可靠性分析,得到了该筒体的应力位移分布特征及可靠度的敏感因素;胡瀚元等[7]通过建立高压球罐有限元模型,结合可靠性理论和蒙特卡罗法,在基于 ANSYS 软件中 PDS 模块对其进行可靠性分析,结

基金项目:北京工商大学研究生科研能力提升计划项目(2020 年)

作者简介:李荆礼,男,北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:张丽梅(1979—),女,北京工商大学教授,博士。E-mail: zhanglimei@btbu.edu.cn

收稿日期:2021-02-01

果显示屈服强度和工作压力对球罐可靠性的影响较大；唐勇等[8]利用 ANSYS 的 PDS 概率分析模块对球罐罐体进行可靠度研究，结果表明可靠性设计能在确保结构达到规定的可靠性指标下，同时保证设计的经济性；陈森强等[9]通过 ANSYS 对球罐进行了应力分析，研究了球壳厚度、托板厚度和上支柱高度对球罐应力的影响规律，并进行优化设计，提高了其可靠性。

研究拟以有裂纹的立式杀菌锅为研究对象，根据实际生产情况，研究立式杀菌锅在温度、水压等因素影响下的力学特性；并采用随机有限元法，设定一定的温度、压力，将裂纹设置为随机变量，分析带有随机裂纹的杀菌锅的可靠性，以期为立式无篮杀菌锅的设计和使用提供参考。

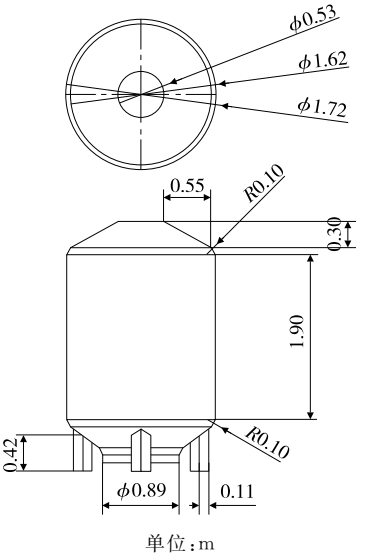
1　立式杀菌锅模型

利用 SolidWorks 软件建立杀菌锅的实体几何模型，尺寸如图 1 所示，罐体外直径 1.72 m，高 2.89 m，4 个支柱高 0.50 m，长宽各 0.15 m。

采用有限元软件 ANSYS 进行分析，选取实体单元 Solid185[10]，锅体材料为 304 不锈钢，弹性模量 2.06×10^5 GPa，密度 7 850 kg/m^3，泊松比 0.3，热膨胀系数1.2×10^{-5} ℃$^{-1}$，有限元模型如图 2(a)所示。裂纹设在杀菌锅上部盖体，裂纹处网格加密，模型如图 2(b)所示。

2　立式杀菌锅的力学特性分析

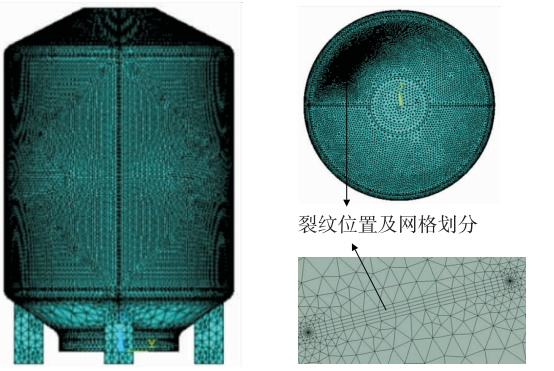
考虑实际杀菌过程，设定载荷工况：① 工况 1 杀菌锅只受重力作用；② 工况 2 杀菌锅充满水；③ 工况 3 根据实际杀菌温度 121 ℃，对杀菌锅进行热分析；④ 工况 4 为有裂纹杀菌锅内充满水的情况；⑤ 工况5为有裂纹杀菌



单位：m

图 1　立式杀菌锅几何模型

Figure 1　Model of vertical retort



（a）整体模型　　（b）有裂纹的上部盖体

图 2　有限元模型

Figure 2　Finite element model

锅温度 121 ℃的杀菌情况；⑥ 工况 6 裂纹 0.010 m×0.002 m×0.001 m，重力载荷；⑦ 工况 7 裂纹 0.010 m×0.002 m×0.004 m，重力载荷；⑧ 工况 8 裂纹 0.020 m×0.002 m×0.004 m，重力载荷。分别分析每种情况下杀菌锅的力学特性并对比。

2.1　完好结构的力学特性

工况 1 完整杀菌锅只受重力作用；工况 2 锅内充满水时，根据式(1)计算水压力并设定水压；工况 3 根据实际杀菌温度 121 ℃，对杀菌锅进行热分析，温度施加在杀菌锅内表面。3 种工况的变形和应力计算结果如图 3～图 5 所示。

$$p=\rho g h, \tag{1}$$

式中：

p——水压力，Pa；

ρ——水的密度，1 000 kg/m^3；

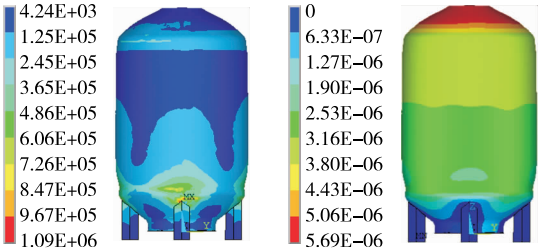
g——重力加速度，9.8 m/s^2；

h——杀菌锅高度，m。

从图 3～图 5 可以看出：① 工况 1 重力作用下，上端变形最大，为 5.840×10^{-6} m；最大应力出现在底部支撑与锅体连接部位，为 1.120×10^6 Pa。② 工况 2 水满载时，杀菌锅底面变形最大，为 1.850×10^{-4} m，最大应力出现在底部支撑与锅体连接部位，值为 2.660×10^7 Pa，比工况 1应力增加。③ 工况 3 温度 121 ℃，位移最大值在杀菌锅上部，为 2.053×10^{-3} m，应力最大值出现在杀菌锅底内表面，为 2.380×10^8 Pa，与工况 2 相比增加了 10 倍。因此，温度对杀菌锅力学特性影响大。④ 由于杀菌锅几何构造、整体计算中荷载的作用位置和位移与应力应变间的函数关系等原因导致了最大变形并未产生在应力最大的部位，这一现象仅体现局部力学特性，不影响对杀菌锅整体的分析。

2.2　有裂纹杀菌锅的力学特性

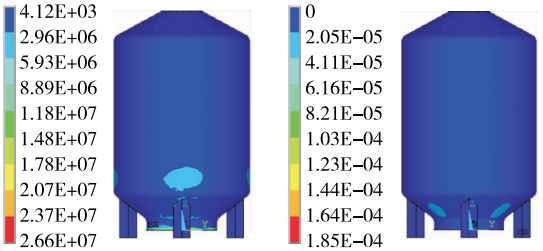
杀菌锅在使用过程中有上部出现裂纹的现象，故将裂纹设置在上部盖体进行模拟并且每次只考虑单条裂



（a）应力　（b）位移

图 3　工况 1 的杀菌锅力学特性

Figure 3　Mechanical characteristics of vertical retort under condition 1



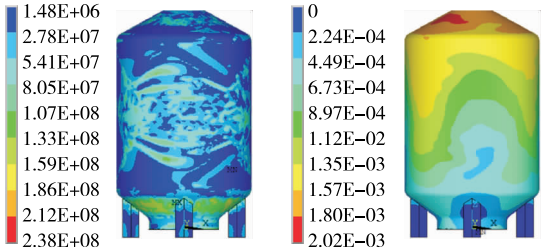
（a）应力　（b）位移

图 4　工况 2 的杀菌锅力学特性

Figure 4　Mechanical characteristics of vertical retort under condition 2

纹，裂纹中心位置坐标为(−0.470 m，0.450 m，2.585 m)。

从图 6～图 8 可以看出：① 在满载情况下，有裂纹的工况 4 比完好的工况 2 节点最大位移增加了 1.74 倍。② 在121 ℃下，完好的工况 3 和有裂纹的工况 5 最大应力位置发生改变。③ 从工况 6 到工况 7，裂缝深度增加了 0.004 m，应力和变形改变微小。④ 从工况7到工



（a）应力　（b）位移

图 5　工况 3 的杀菌锅力学特性

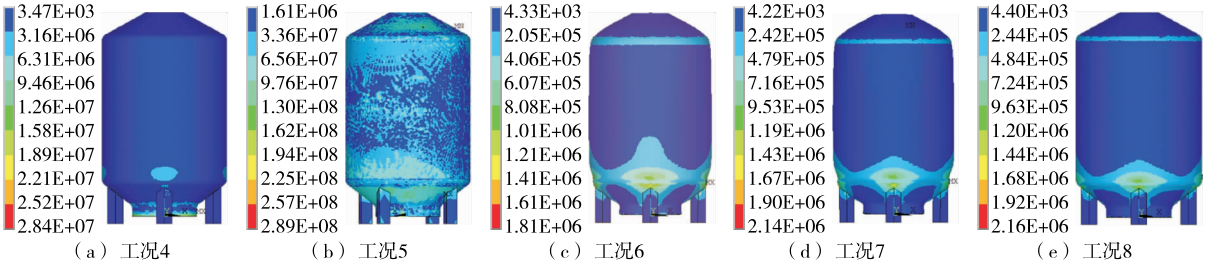
Figure 5　Mechanical characteristics of vertical retort under condition 3

况 8，裂纹长度增加了 0.010 m，但其最大应力和变形增加更缓慢，所以裂纹方向的变化对应力的影响各不相同。因此，从裂纹长度、环向宽度、深度三方面设定变量对杀菌锅的可靠度及灵敏度进行研究。

3　立式杀菌锅可靠性分析

结构可靠度是定量描述可靠性的量度，但实际中结构体型复杂，影响因素多，采用容许应力法已无法准确判断结构是否安全。结构可靠度可以用概率特征进行描述。

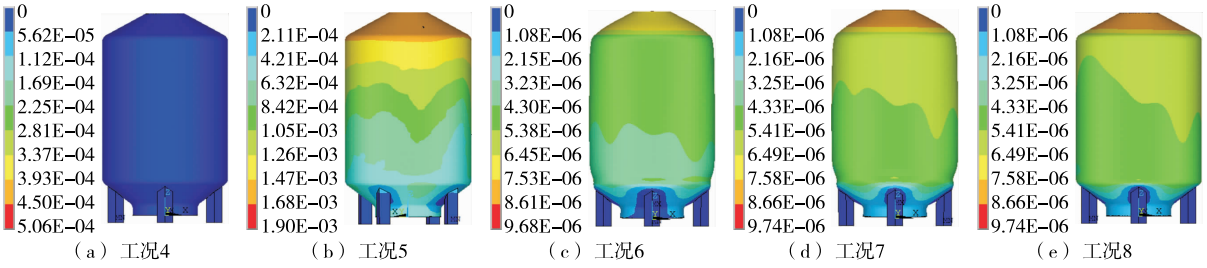
随机有限元法[11]是在传统有限元法基础上发展起来用于解决随机问题的一种有效的数值方法。它将蒙特卡罗法(Monte-Carlo)[12]与有限元法结合，对随机样本使用传统确定性有限元程序进行计算，并对计算结果进行统计分析。它结合了有限元法和概率分析理论，可以有效处理结构分析中所涉及参数的随机性，从而对结构可靠性进行比较准确、合理的估计。因此采用随机有限元法



（a）工况4　（b）工况5　（c）工况6　（d）工况7　（e）工况8

图 6　不同工况的杀菌锅应力云图

Figure 6　Von mises stress of vertical retort under condition 4，5，6，7，8



（a）工况4　（b）工况5　（c）工况6　（d）工况7　（e）工况8

图 7　不同工况的杀菌锅节点位移云图

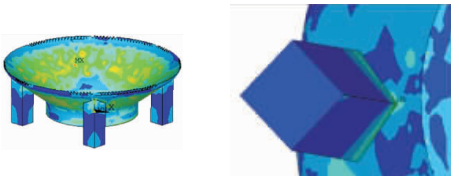
Figure 7　Node displacement of vertical retort under condition 4，5，6，7，8

进行立式杀菌锅的可靠性研究。首先设定随机变量，然后采用 Monte-Carlo 法获取随机抽样，接着采用随机有限元法对每个样本进行计算，进而判断杀菌锅可靠性。

3.1 随机变量和载荷的设定

杀菌锅内部受均匀压力（0.1 MPa）和常载荷（100 ℃）。通过对杀菌锅力学特性的分析可知，裂纹径向、环向和深度方向对杀菌锅力学特性有不同的影响，同时考虑裂纹深度、宽度对最大应力、位移灵敏度的影响，因此设定4个均匀分布的变量为随机参数：① 径向长度变化（BIANA）服从 U(0.00 m，0.01 m)；② 垂直于裂纹的边变化（BIANB）服从 U(0.0°，0.3°)；③ 垂直裂纹的另一条边变化（BIANC）服从 U(0.0°，0.5°)，见图 9；④ 裂纹深度变化（BIAND）服从 U(−0.002 m，0.002 m)。

在裂纹位置随机选取 8 个关键点，坐标见表 1（极坐标）。设定条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为 2.05×10^8 Pa，将杀菌锅等效应力按升序排列并提取最大等效应力 S_{max}，定义结构函数 $Z=\sigma_{0.2}-S_{max}$，杀菌锅可靠度就是求 $Z\geqslant0$ 也就是 $\sigma_{0.2}\geqslant S_{max}$ 的概率。



（a）工况3　　（b）工况5

图 8　工况 3、5 的最大应力位置云图

Figure 8　Maximum stress position under condition 3，5

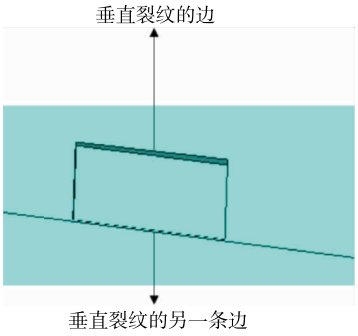


图 9　BIANB 和 BIANC 变化的方向

Figure 9　Change direction of BIANB and BIANC

表 1　随机关键点坐标

Table 1　Random key point coordinates

坐标	X	Y	Z
1	0.629	0.6+BIANC	2.583+BIAND
2	0.629	0.0+BIANB	2.583+BIAND
3	0.614 − BIANA	0.0+BIANB	2.593+0.5BIANA+BIAND
4	0.614 − BIANA	0.6+BIANC	2.593+0.5BIANA+BIAND
5	0.629	0.6+BIANC	2.59
6	0.629	0.0+BIANB	2.59
7	0.614 − BIANA	0.0+BIANB	2.6+0.5BIANA
8	0.614 − BIANA	0.6+BIANC	2.6+0.5BIANA

3.2 可靠性分析

采用拉丁超立方 Monte-Carlo 法进行 500 次抽样模拟，其中 BIANA 样本图和样本均值图如图 10～图 11 所示，通过对每个样本的杀菌锅进行有限元计算，得出杀菌锅的最大等效应力和节点位移，提取最大节点位移和等效应力，进而得出杀菌锅的最大等效应力样本图和节点位移样本图（图 12～图 13）。由图 11 可知，Monte-Carlo 法的抽样次数充足。以杀菌锅的最大等效应力样本小于其最大等效应力常数值的频率表示杀菌锅的最大等效应力分布的概率图，见图 14。以样本均值代替样本期望计算随机输入变量和随机输出变量的相关系数，见表 2。灵敏度是基于所有随机输入变量与随机输出参数之间的相关系数，正数代表随机输入变量与输出变量呈正比，负数则代表呈反比。由图 15 可以看出：BIAND 对杀菌锅的最大等效应力的影响较大，呈正比关系，BIANB 对杀菌锅的最大等效应力的影响其次，呈反比关系；由图 16 可以看出：BIAND对节点最大位移影响较大，呈正比关系，

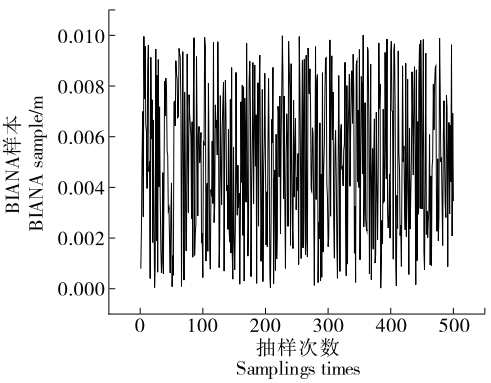


图 10　BIANA 样本图

Figure 10　BIANA sample plot

BIANA、BIANB、BIANC 对杀菌锅的最大节点位移影响较小,呈反比关系。分析杀菌锅的最大等效应力样本和累积分布函数可以得出条件屈服强度大于等于杀菌锅的最大等效应力的概率为 96.7%(在置信度 95%情况下)。

4　结论

试验针对连续无篮杀菌生产线上的立式杀菌锅展开研究,建立完好和有裂纹情况下的杀菌锅模型,按照杀菌流程分析自重、水满载、121 ℃等工况下结构的力学特性。结果表明:① 水压力作用下应力和位移分布比较均匀,温度 121 ℃时应力分布比较分散,与水压力相比温度对杀菌锅力学特性影响较大。② 基于随机有限元法蒙特卡罗法,采用 ANSYS 的 PDS 模块,设定 4 个随机变量,用拉丁超立方 Monte-Carlo 法采集样本 500 个,用样本均值代表期望,求得样本变量和因变量之间的相关系数,结果表

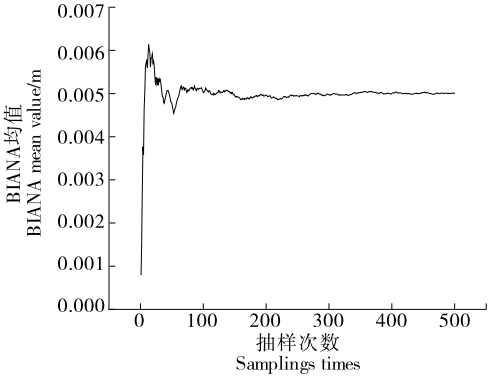


图 11　BIANA 样本均值图

Figure 11　BIANA sample mean plot

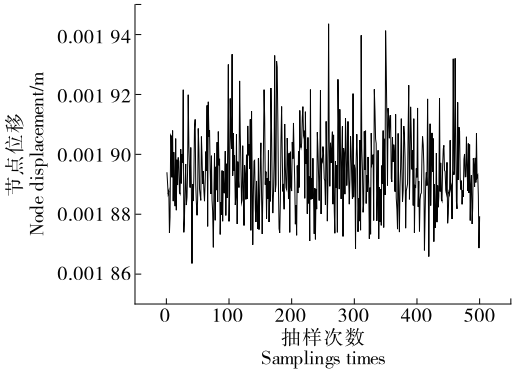


图 12　杀菌锅的最大节点位移样本图

Figure 12　Sample plot of node displacement

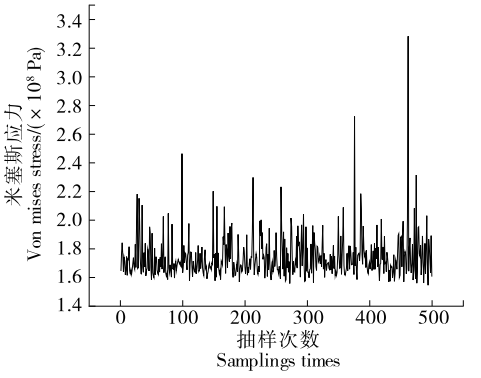


图 13　杀菌锅的最大等效应力样本图

Figure 13　Sample plot of von mises stress

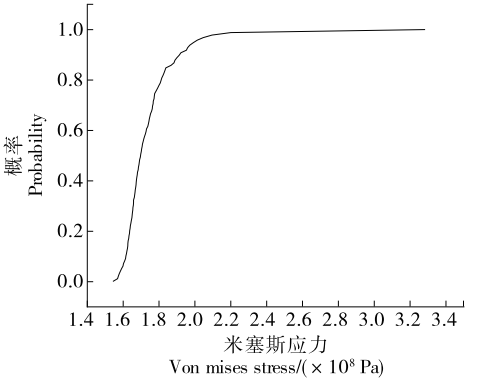


图 14　杀菌锅的等效应力累积分布函数

Figure 14　Von mises stress cumulative distribution function plot

表 2　相关系数表

Table 2　Correlation coefficient table

来源	BIANA	BIANB	BIANC	BIAND
杀菌锅的最大等效应力	0.048	−0.165	0.039	0.337
杀菌锅的最大节点位移	−0.041	−0.101	−0.067	0.281

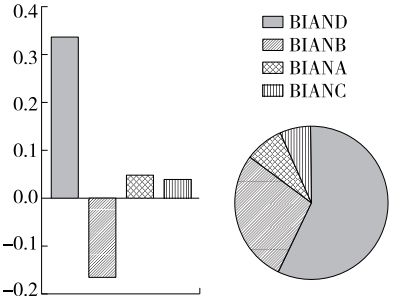


图 15　杀菌锅的最大等效应力的参数灵敏度

Figure 15　Parameter sensitivity plot of equivalent stress

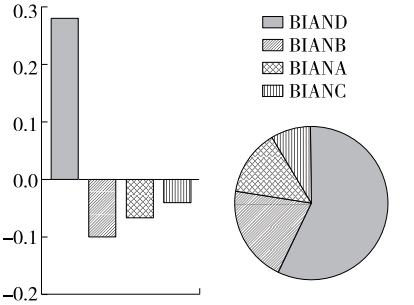


图 16　杀菌锅的最大节点位移的参数灵敏度

Figure 16　Parameter sensitivity plot of node displacement

(下转第 161 页)

ings on enzymes, cell-membrane integrity, and cell-wall constituents in relation to brittleness and firmness of huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage [J]. Food Chemistry, 2010, 124: 569-575.
[16] 申江, 李超, 王素英, 等. 冰温储藏对荔枝品质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(3): 360-363.
[17] 胡慧慧, 张辉, 张文娜, 等. 冰温贮藏提高新鲜若羌冬枣的品质[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 106-112.
[18] 李慧, 万德慧, 刘志培, 等. 不同保鲜处理对汉江樱桃冰温贮藏效果的影响[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(8): 117-120.
[19] 薛璐, 于继男, 鲁晓翔, 等. 出库方式对冰温贮藏蓝莓货架期品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 328-331, 340.
[20] 林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 冰温贮藏对西兰花保鲜的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 312-316.
[21] 杨慧, 赵守涣, 史冠莹, 等. 近冰温贮藏对香椿嫩芽品质及关键风味物质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(5): 46-52.
[22] 王亮, 张新宪, 赵迎丽, 等. 1-甲基环丙烯和乙烯吸收剂结合冰温贮藏对山楂果实品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 243-249.
[23] LI Rui-rong, ZHENG Qian-wang, LIU Jia-li, et al. Chemical composition and deterioration mechanism of pleurotus tuoliensis during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2020, 338: 127731.
[24] 刘华. 蓝莓贮藏加工技术研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2012: 37-38.
[25] 柳青, 刘继伟, 黄广学, 等. 钼蓝比色法测定特菜中还原型维C含量的研究[J]. 农产品加工, 2019(2): 56-59.
[26] LIU Hui, CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. Evaluation and comparison of vitamin C, phenolic compounds, antioxidant properties and metal chelating activity of pulp and peel from selected peach cultivars[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1 042-1 048.
[27] MOHD F, MARYATI M, ASMAH R, et al. Phytochemicals and antioxidant activity of different parts of bambangan (*Mangifera pajang*) and tarap (*Artocarpus odoratissimus*) [J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 479-483.
[28] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 50-53.
[29] JAYACHANDRAN L E, CHAKRABORTY S, RAO P S. Inactivation kinetics of the most baro-resistant enzyme in high pressure processed litchi-based mixed fruit beverage [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(7): 1 135-1 147.
[30] 贾红玉, 王亚森, 田晓辉, 等. 邻苯三酚自氧化法在SOD活性测定中的应用[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 285-289.
[31] 胡慧慧, 张辉, 古丽丹·塔勒达吾, 等. 冰温保鲜对新疆鲜枣贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(2): 62-67.
[32] 尚海涛, 凌建刚, 朱麟, 等. 葡萄冰点测定及冰温贮藏实验的研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 55-60.
[33] 朱赛赛, 张敏. 温度激化处理对采后果蔬贮藏品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 230-238.
[34] 白国荣, 郭敏瑞, 卢娣, 等. 冰温贮藏对新疆吊干杏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 260-266.
[35] 安瑞丽, 王斌, 魏长庆, 等. 不同贮藏温度对采后伽师瓜果实冷害及品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 196-201.
[36] 潘艳芳, 张继明, 李喜宏, 等. 间歇升温对树上干杏冷藏品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(1): 46-49.

(上接第 113 页)

明深度方向(BIAND)对杀菌锅的最大等效应力和位移影响较大,且呈正相关。③ 从杀菌锅的最大等效应力样本大于条件屈服强度的频率得出杀菌锅可靠度为 96.7%,表明有裂纹的杀菌锅可靠性较好。

试验仅围绕不同工况下杀菌锅的力学特性及裂纹尺寸沿宽度、环向、深度的变化对其力学特性的影响等方面进行了研究,后续将对疲劳、杀菌中热流场分布等问题进行深入分析。

参考文献

[1] KANNAN P, AMIRTHAGADESWARAN K S, CHRISTOPHER T, et al. A simplified approach for assessing the leak-before-break for the flawed pressure vessels [J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 302(Part A): 20-26.
[2] DWIVEDI Nidhi, KUMAR Veerendra, SHRIVASTAVA Ashwani, et al. Burst pressure assessment of pressure vessel using finite element analysis: A review[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135(4): 044502.
[3] 汤占岐, 姜国平, 李瑞秋. 2 000 m^3丙烯球罐壳体水压试验的可靠性分析[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(5): 49-51.
[4] 张文涛, 陈强. 基于ANSYS的球型储罐抗震模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(9): 29-35.
[5] 李文震, 黄思, 徐征南. 基于ANSYS软件PDS模块的压力容器可靠性分析[J]. 机械制造, 2018, 56(12): 14-16.
[6] 彭翠玲, 艾华宁, 刘青松, 等. 基于ANSYS的压力容器可靠性分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 109-111.
[7] 胡瀚元, 谢禹钧, 黄新. 基于有限元法的高压球罐强度可靠性分析[J]. 当代化工, 2015, 44(1): 187-189.
[8] 唐勇, 贺小华. 基于有限元的罐体可靠性分析和设计[J]. 化工机械, 2011, 38(5): 546-549.
[9] 陈森强, 赵辉, 张智亮. ANSYS在大型球罐上的应用[J]. 石油和化工设备, 2008, 11(5): 19-22.
[10] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 237-238.
[11] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 129-136.
[12] 余建星. 工程结构可靠性原理及其优化设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 29-34.