

冲压式空投气囊着陆缓冲性能仿真研究

张纪平, 刘守君, 齐明思, 赵奇, 孙亮, 张峰

(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 以冲压式空投气囊为研究对象, 对气囊的着陆缓冲过程进行有限元仿真, 以研究其缓冲性能。 **方法** 使用SolidWorks软件建立了气囊和装备的几何模型, 导入到有限元分析软件Ansys/LS-DYNA中划分网格, 加载并进行求解, 并用后处理软件Ls-prepost对仿真结果进行分析, 得出了气囊的体积和压力变化曲线, 以及空投装备的位移、速度和加速度的变化曲线。 **结果** 气囊在着陆缓冲过程中的最大压力为0.198 MPa, 空投装备的着陆冲击加速度峰值为175 m/s² (17.9g)。 **结论** 空投装备的最大冲击过载是17.9g, 装备最大过载 $A_{\max} < \text{允许过载 } 20g$, 气囊满足性能要求。气囊内压力峰值对于气囊的设计有重要影响, 以气囊峰值压力0.198 MPa为参考标准, 在气囊材料选取和气囊加工方面要确保气囊能承受相当的峰值压力, 以避免缓冲时气囊发生爆裂。

关键词: 冲压式; 空投气囊; 缓冲; 仿真

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)23-0083-05

Simulation Research on the Landing Cushion Performance of Ram Airdrop Airbag

ZHANG Ji-ping, LIU Shou-jun, QI Ming-si, ZHAO Qi, SUN Liang, ZHANG Feng

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: This paper took the ram airdrop airbag as the research object, and simulated its landing process to research its cushion performance. The paper established a geometric model of the airbag and equipment through SolidWorks software, which was then imported into the finite element analysis software Ansys/LS-DYNA and meshed, loaded and solved. The simulation results were analyzed using the post-processing software Ls-prepost. The variation curves of volume and pressure of the airbag as well as the displacement, velocity and acceleration of the airdrop equipment were obtained. During the landing process, the maximum pressure of the airbag was 0.198 MPa, and the landing impact acceleration peak value of the airdrop equipment was 175 m/s² (17.9g). The biggest impact overload of the airdrop equipment was 17.9g, and the maximum overload $A_{\max}$ of the equipment was smaller than the allowed overload of 20g, meeting the performance requirements. The airbag internal pressure peak value was important to the design of the airbag, with the airbag peak pressure of 0.198 MPa as the reference standard, it should be ensured that the airbag could bear the corresponding peak pressure in respect of airbag material selection and airbag processing, in order to avoid buffer balloon burst.

KEY WORDS: ram; airdrop airbag; cushion; simulation

气囊缓冲技术是最主要的着陆缓冲技术之一, 已广泛应用于无人机回收、航天器的着陆和回收、设备空投和深空探测器着陆等领域^[1-3]。气囊不但具有结

构简单、工作性能良好、成本低廉、生产加工方便快捷等优点, 而且气囊重量小、体积小、易于折叠, 能够有效降低着陆装备的负载^[4-6]。缓冲气囊的缓冲原理是

收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51275486)

作者简介: 张纪平(1972—), 男, 山西吕梁人, 博士, 中北大学讲师, 主要研究方向为机械系统动态测试与仿真、缓冲技术。

气囊在空投装备着陆时受到压缩,以吸收着陆冲击能量,从而达到缓冲目的^[7-8]。空投是目前部队投送及物资补给的重要手段,物资装备空投着陆时会受到强烈冲击,为避免装备损坏,必须采取有效的防护措施,减小其冲击加速度峰值^[9-10]。

国内外对缓冲气囊的仿真研究做了大量工作,有限元仿真的优势在于能够对气囊的全向缓冲特性进行分析,可以更真实地模拟各种着陆环境,得到着陆装备的速度、加速度、位移和气囊的内压、排气量、应力等力学量,可以减少试验次数和设计周期,从而降低研制成本。随着计算机技术和有限元技术的高速发展,有限元法已经越来越多地用于缓冲气囊的设计与分析,主要有控制体积法(CV法)和任意拉格朗日欧拉法(ALE法)^[11-12]。文中以冲压式空投气囊为研究对象,空投装备为精密仪器,建立气囊和装备的有限元模型,对气囊的缓冲性能进行仿真分析。

1 冲压式空投气囊模型的建立

气囊缓冲系统由16个小的气囊单元缝合而成,气囊单元为边长500 mm的立方体壳体。气囊缓冲系统整体呈长方体形状,尺寸为:长2000 mm、宽2000 mm、高500 mm,气囊的壁厚为20 mm。各个相邻的气囊单元之间通过隔膜连接在一起,隔膜的厚度也为20 mm,隔膜上有一个圆孔,气体可以通过隔膜上的圆孔在各个气囊单元之间流动,并最终达到平衡。在气囊缓冲系统的中间4个气囊单元的底面,各有一个直径为150 mm的进气孔,在侧面的中间2个气囊单元侧面上,各设置有一个直径为100 mm的排气孔。在SolidWorks环境下设计出了气囊缓冲系统的三维图,对气囊的各棱边进行了倒圆角,这样可以降低气囊在着陆冲击时的应力集中问题,气囊底面的进气孔也进行了倒圆角,方便下落时气体进入时更顺畅,见图1。

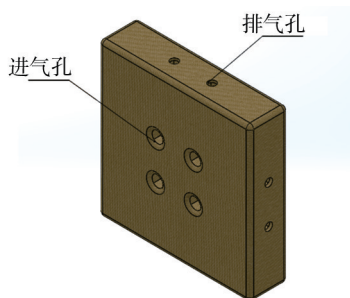


图1 冲压式空投气囊模型

Fig.1 Model of ram airdrop airbag

冲压式空投气囊是一种自充气式气囊,气囊底部设置有进气孔,空投时气囊借助下落速度从进气孔冲压集气。在整个下落过程中,排气孔是封闭的,进气孔是开启的,在着地瞬间通过控制使进气孔关闭^[13]。当装备着陆受到冲击时,气囊内的气体受到压缩,当囊压达到一定值时气囊排气孔的搭扣被冲开,气囊开始排气,直到气囊内的气体被全部排完,着陆缓冲过程完成。气囊缓冲过程中所有的缓冲单元构成一个缓冲系统,以实现缓冲功能^[14]。

2 有限元模型建立

2.1 气囊缓冲过程仿真假设

在整个着陆缓冲过程中,涉及的影响因素复杂繁多,为了突出仿真计算的结果和气囊缓冲效果,对缓冲过程作如下近似处理:着陆缓冲过程持续时间很短,不考虑和外界进行热交换,因此认为气囊压缩为绝热压缩过程;气囊材料气密性良好,在仿真过程中,认为气囊是完全不透气的;为提高仿真速度,假设装备及货台是刚体,并且地面也是刚体^[15]。

2.2 系统有限元模型的处理

气囊是安装在货台底部的,货台上放置着物资装备,为了减小模拟仿真的计算量,几何实体建模时将货台和装备简化成一个长方体壳体,长方体的长、宽、高分别为2000,2000,600 mm,壳厚20 mm,此长方体即是简化的着陆装备。着陆装备下方固连着冲压式空投气囊,气囊进气孔面积为 0.071 m^2 ,排气孔的面积为 0.067 m^2 ,进、排气孔的面积是理论计算值,在建立模型时并不建立物理上的进、排气孔。

着陆装备的质量为920 kg,气囊距离刚性地面的距离是1 m,装备距离地面1.5 m,装备下落初速度为 -6.5 m/s ,气囊触地时速度达到 -7.8 m/s ,以 z 轴正向为速度正方向,着陆装备的最大过载要小于 $20g$ 。模型用Ansys/LS-DYNA划分网格,着陆装备和气囊采用常用的映射网格划分,着陆面用LS-DYNA中的刚性墙模拟,划分网格后的整体有限元模型见图2,模型网格划分细密,单元形状良好,有利于提高计算精度。给模型加载和定义结果输出都是通过关键字定义,定义装备和气囊的连接用关键字*CONSTRAINED_EXTRA_NODES实现,选取气囊顶面上的若干节点与装备固连在一起,以实现装备与气囊的固连;壳单元的实常数设置是通过关键字*

SECTION_SHELL定义;装备和气囊的初速度通过关键字 * INITIAL_VELOCITY_NODE定义;系统重力加速度用关键字 * LOAD_BODY_Z定义;着陆地面用关键字 * RIGIDWALL_PLANAR定义;计算终止时间用关键字 * CONTROL_TERMINATION定义;气囊内的压力、体积变化等参数的输出通过关键字 * DATABASE_ABSTAT实现;计算结果的输出间隔用关键字 * BINARY_D3PLOT定义。

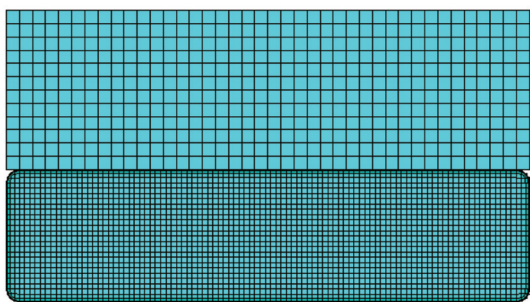


图2 整体有限元模型示意

Fig.2 The whole finite element model

3 仿真结果与分析

3.1 着陆装备位移分析

着陆装备的位移曲线是考察气囊对其缓冲性能的一个很重要的指标,因为从装备下落位移曲线可以知道装备有没有发生反弹,反弹容易导致装备发生二次撞击,图3是仿真计算得出的装备下落位移曲线,见图3。从图3可以看出,0.15 s之前装备在重力作用下加速下落,之后气囊触地开始压缩以对装备起到减速作用,装备的位移曲线变缓,在0.35 s和0.45 s左右分别出现了微小反弹和波动,可能是由于气囊排气速率的不稳定造成的,可以忽略,0.53 s后位移变为0,装备成功着陆。

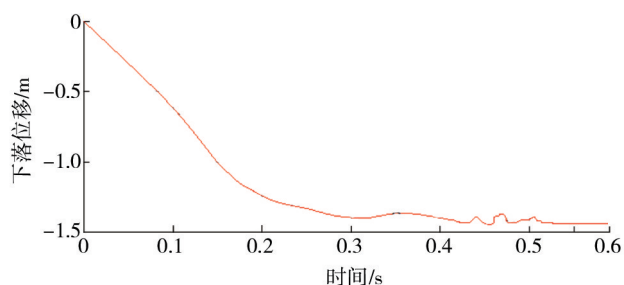


图3 着陆装备位移变化曲线

Fig.3 The displacement variation curve of airdrop equipment

3.2 着陆装备速度分析

仿真计算得出的着陆装备下落的速度变化曲线见图4。从图4可知,着陆装备的初速度为-6.5 m/s,在重力作用下加速下落,0.15 s气囊触地时速度达到-7.8 m/s,之后继续加速,速度达到最大后在气囊缓冲作用下开始急剧减速,减速到0后有了反向速度,说明装备发生了反弹,但幅度很小,反弹的最大速度也没有超过1 m/s,是可以接受的。装备在0.43 s左右发生了速度的波动,之后又恢复到速度为0的平衡状态,装备着陆成功。

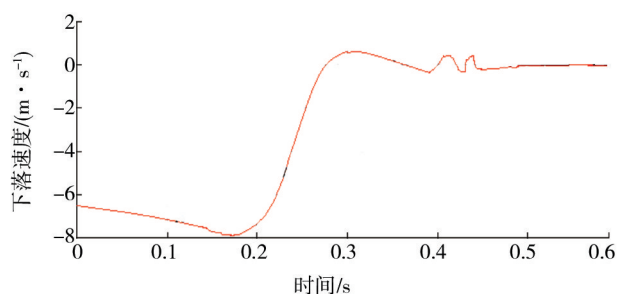


图4 着陆装备速度变化曲线

Fig.4 The velocity variation curve of airdrop equipment

3.3 着陆装备加速度分析

着陆装备的最大过载是否在许可范围内,是衡量气囊缓冲性能的最主要的标准,装备的过载是将其下落的加速度表示成重力加速度的倍数形式,仿真计算得出的着陆装备下落的加速度变化曲线见图5。从图5可以看出,着陆装备竖直下落的初始加速度为重力加速度,0.15 s气囊接触地面后,在气囊缓冲作用下,着陆装备竖直下落的加速度值减小到0,之后反向迅速增大到峰值 175 m/s^2 ($17.9g$),随后又急剧减小至 -9.8 m/s^2 ,后来在装备的微小反弹及竖直方向位移波动时,加速度均出现了反向加速度,但峰值都远小于第一次加速度峰值。文中中着陆装备的最大过载为 $17.9g$,设备最大过载 $A_{\max} < \text{允许过载 } 20g$,因此气囊满足缓冲要求。

3.4 缓冲气囊工作状态分析

经过仿真计算,得出气囊在着陆缓冲过程中的体积和内压的变化曲线,见图6—7。由图6可知,气囊初始体积为 1.91 m^3 ,0.15 s触地后被压缩,达到一定内压后排气孔打开,体积急剧减小,0.35 s后气囊体积逐渐平稳,最后气囊剩余体积 0.1 m^3 。由图7可知,气囊初

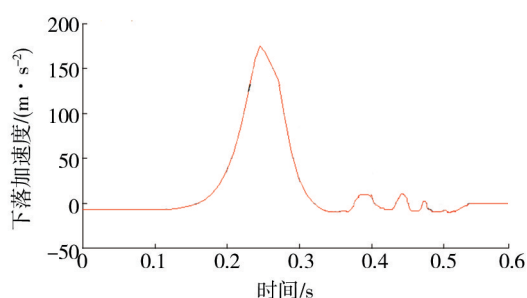


图5 着陆装备加速度变化曲线

Fig.5 The acceleration variation curve of airdrop equipment

始内压为0.1013 MPa,气囊接触地面后,气囊内压急剧增大到峰值0.198 MPa,随后迅速减小并趋于稳定在一个大气压。气囊缓冲过程中的内压峰值对于气囊的设计有重要影响,在气囊材料选取和气囊加工方面要确保气囊能承受相当的峰值压力,以避免缓冲时气囊发生爆裂。

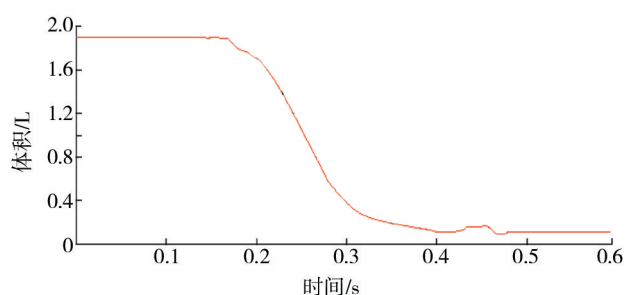


图6 气囊体积变化曲线

Fig.6 The volume variation curve of airbag

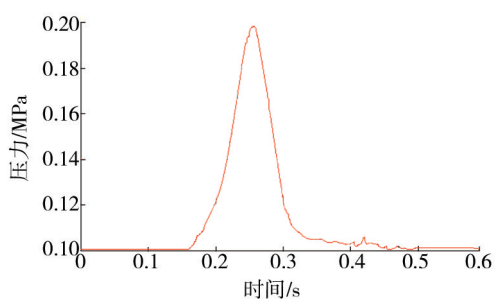


图7 气囊内压变化曲线

Fig.7 The internal pressure variation curve of airbag

4 结语

基于Ansys/LS-DYNA软件对冲压式空投气囊的着陆缓冲性能进行了仿真研究,得到了着陆装备在气囊缓冲条件下的位移、速度和加速度的变化情况,以

及气囊缓冲过程中气囊体积和压力的变化情况,并对这些主要参数进行了分析。装备最大冲击过载和气囊压力峰值是衡量气囊工作性能的关键因素,文中仿真得到的装备最大过载在允许过载范围内,说明冲压式空投气囊满足性能要求,而气囊压力峰值为工程实际提供了参考标准,使气囊在被设计制造时,即能保证气囊自身强度,避免使用时的爆裂。实际的空投着陆缓冲是一个极其复杂的过程,仿真研究可在一定程度上模拟实际工况,为更好地研究冲压式空投气囊的缓冲性能,进行验证试验将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 温金鹏,李斌,杨智春. 缓冲气囊冲击减缓研究进展[J]. 宇航学报,2010,31(11):2438—2447.
WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Progress of Study on Impact Attenuation Capability of Airbag Cushion System [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2438—2447.
- [2] 衣敬强,郝贵祥,王红岩,等. 高原条件下空投设备气囊系统缓冲过程研究[J]. 中国工程机械学报,2012, 10(3): 364—368.
YI Jing-qiang, HAO Gui-xiang, WANG Hong-yan, et al. Cushioning Process Study on Airbag System of On-plateau-airdropped Equipments[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2012, 10(3): 364—368.
- [3] 王新春,马大为,庄文许,等. 某空投装备在不同缓冲装置下的冲击响应分析[J]. 包装工程,2013,34(13):47—51.
WANG Xin-chun, MA Da-wei, ZHUANG Wen-xu, et al. Impact Response Analysis of Airdrop Equipment with Different Buffer Device[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 47—51.
- [4] 李良春,黄刚,李文生,等. 基于ANSYS/LS-DYNA的新型着陆缓冲气囊仿真分析[J]. 包装工程,2012,33(5):16—20.
LI Liang-chun, HUANG Gang, LI Wen-sheng, et al. Simulation Analysis of New Type Landing Cushion Airbag Based On ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 16—20.
- [5] 邵志建,刘志扩. 新型自充气气囊研究[J]. 南京航空航天大学学报,2009, 41(增刊):84—88.
SHAO Zhi-jian, LIU Zhi-kuo. Study on New Self-Inflating Airbag[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S): 84—88.
- [6] 齐明思,刘守君,赵奇,等. 缓冲气囊着陆过程仿真研究[J]. 包装工程,2013,34(23):5—8.
QI Ming-si, LIU Shou-jun, ZHAO Qi, et al. Simulation Research on Landing Process of Cushioning Airbag[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 5—8.

- [7] 饶进军,黄锦辉,冯俊兴. 可空投系留平台空投跌落冲击响应研究[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 20—24.
RAO Jin-jun, HUANG Jin-hui, FENG Jun-xing. Airdropped Impact Effect of Airdropped Tethered Balloon Platform[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(21): 20—24.
- [8] EWING, LIEUTENANT COLONEL BRUCE. Precision Parachute Capabilities and Their Potential Employment in the Land Force[J]. Canadian Army Journal, 2005, 8(3): 83—92.
- [9] WEN Jin-peng, LI Bin, YANG Zhi-chun. Study on Cushioning Characteristics of Soft Landing Airbag with Elastic Fabric[J]. International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanics, 2010, 33(3-4): 1535—1545.
- [10] 徐诚方. 排气式气囊最大过载特性研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(5): 9—15.
XU Cheng-fang. Study of the Characteristics of Peak Overload of Airbag with Vent[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(5): 9—15.
- [11] 吕航. 自充气式缓冲气囊的设计与分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LYU Hang. Research on Ambient Inflated Cushion Airbag Design and Analysis[J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [12] HAULT-DUBRULLE Audrey, ROBACHE Frederic, DRAZE-TIC Pascal, et al. Determination of Pre-impact Occupant Postures and Analysis of Consequences on Injury Outcome—Part II: Biomechanical Study[J]. Accident Analysis And Prevention, 2011, 43(1): 75—81.
- [13] 杨卫, 齐明思, 张皎. 冲压式快速空投硬式气囊缓冲技术研究[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 106—108.
YANG Wei, QI Ming-si, ZHANG Jiao. Research on Punched Quick Airdrop Cushion[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 106—108.
- [14] 齐明思, 于丽娜, 殷强, 等. 基于ANSYS的冲压式快速空投硬式气囊应力分析[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 69—72.
QI Ming-si, YU Li-na, YIN Qiang, et al. Stress Analysis on Ram Rigid Airbag for Quick Airdrop Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 69—72.
- [15] 刘守君, 齐明思, 黄宏胜, 等. 新型自充气式着陆缓冲气囊的理论分析与设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 107—110.
LIU Shou-jun, QI Ming-si, HUANG Hong-sheng, et al. Theoretical Analysis and Design of a New Self-inflating Landing Cushion Airbag[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 107—110.

(上接第74页)

- [7] 李顺江, 王振永, 张申伟, 等. 聚乳酸基抗菌材料研究进展[J]. 应用化工, 2014, 43(5): 916—918.
LI Shun-jiang, WANG Zhen-yong, ZHANG Shen-wei, et al. Research Process in Antibacterial Materials Based on Poly Lactide[J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(5): 916—918.
- [8] HARDIANSYAH A, TANADI H, YANG M C, et al. Electropinning and Antibacterial Activity of Chitosan-blended Poly (Lactic Acid) Nanofibers[J]. J Polym Res, 2015, 22: 59—69.
- [9] 卢玲妃, 陈建国, 郑连英. 酶法制备壳低聚糖对细菌的抑制作用[J]. 食品与生物技术报, 2008, 27(2): 88—91.
LU Ling-fei, CHEN Jian-guo, ZHENG Lian-ying. Antibacterial Activity of Chit Oligosaccharides Prepared by Enzymolysis[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2008, 27(2): 88—91.
- [10] 赵希荣, 夏文水. 壳聚糖的抗菌防腐活性及其在食品保藏中的应用[J]. 食品研究与开发, 2006(2): 157—160.
ZHAO Xi-rong, XIA Wen-shui. Antimicrobial Activities of Chitosan and Application in Food Preservation[J]. Food Research and Development, 2006(2): 157—160.
- [11] 杨继生. 壳低聚糖对酱油防腐效果的研究[J]. 化学世界, 1998, 39(8): 416—418.
YANG Ji-sheng. The Study on The Preservative Effect of Chitooligosacchrides on Soy Sauce[J]. Chemical Word, 1998, 39(8): 416—418.
- [12] 张纪娟, 王建华, 郭天雨. 羟乙基纤维素/壳聚糖涂膜液对蓝莓的保鲜效果研究[J]. 包装学报, 2015, 7(2): 38—42.
ZHANG Ji-juan, WANG Jian-hua, GUO Tian-yu. Effects of Hydroxyethyl Cellulose/Chitosan Blerding Coating ou Ceuality of Blueberries[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 38—42.
- [13] 梁泽鑫, 苗晓琳, 柯军, 等. 壳聚糖抗菌成膜抑制剂(抑)菌效果的试验观察[J]. 中国消毒学杂志, 2014, 31(10): 1045—1049.
LIANG Ze-xin, MIAO Xiao-lin, KE Jun, et al. Investigation on the Bacteriostatic Effect of Chitosan Antibacterial Spray[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2014, 31(10): 1045—1049.
- [14] 蒋挺大. 甲壳素[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
JIANG Ting-da. Chitin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [15] NGUYEN T T T, CHUNG O H, PARK J S. Coaxial Electropun Poly (Lactic Acid)/Chitosan (Core/Shell) Composite Nanofibers and Their Antibacterial Activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86: 1799—1806.
- [16] BONILLA J, FORTUNATI E, VARGAS M. Effects of Chitosan on the Physicochemical and Antimicrobial Properties of PLA Films[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119: 236—243.