

结构设计制造

集装箱液体包装袋有限元分析及优化设计

黄兆阁, 高荣彬, 王裕成, 雍占福

(青岛科技大学, 青岛 266042)

摘要: **目的** 研究液袋的长度、厚度及装载不同粘度的液体对液袋撕裂行为的影响。**方法** 利用 CATIA 软件, 建立不同长度、厚度和装载不同粘度液体的集装箱液袋模型; 基于 ABAQUS 软件, 在静态和动态下对集装箱液袋进行模拟。**结果** 经过模拟分析, 得到了液袋的应力、应变、应变能密度和最大撕裂能。正交分析选出最佳方案后, 计算出静态下最大应变为 0.064 77, 最大应变能密度为 $0.1928 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$, 最大撕裂能为 0.1868 J/mm^3 ; 动态下最大应变为 0.063 04, 最大应变能密度为 $0.1885 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$, 最大撕裂能为 0.1828 J/mm^3 。**结论** 结晶度较低 PE 膜的撕裂主要与薄膜的最大撕裂能有关, 通过增大液袋长度可相应降低 PE 层顶部的最大撕裂能, 提高液袋的安全性能。动态下液袋 PE 层顶部的撕裂破损是液袋损坏的主要原因。

关键词: 集装箱液袋; CATIA; ABAQUS; 有限元分析

中图分类号: TB482.2; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)09-0096-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.016

Finite Element Analysis and Optimization Design of Flexitank

HUANG Zhao-ge, GAO Rong-bin, WANG Yu-cheng, YONG Zhan-fu

(Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

ABSTRACT: This work aims to study the effects of length, thickness and different viscosity liquid of film on tearing of flexitank. CATIA software was used to establish a flexitank model with different lengths, thicknesses and different liquid viscosity. The flexitank was simulated under static and dynamic conditions with the ABAQUS soft. After simulation analysis, data on stress, strain, strain energy density and maximum tear energy of the flexitank were obtained. After selecting the best solution by orthogonal analysis, the maximum strain under static was 0.064 77, the maximum strain energy density was $0.1928 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$, the maximum tear energy was 0.1868 J/mm^3 , and the maximum strain under dynamic was 0.063 04. The strain energy density was $0.1885 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$ and the maximum tear energy was 0.1828 J/mm^3 . The tear of the PE film with lower crystallinity is mainly related to the maximum tearing energy of the film. Increasing the length of the flexitank can reduce the maximum tearing energy at the top of the PE layer and improve the safety performance of the flexitank. The tearing at the top of the PE layer of the flexitank under dynamic conditions is the main cause of damage to the flexitank.

KEY WORDS: flexitank; CATIA; ABAQUS; finite element analysis

集装箱液体包装袋(简称液袋)作为一种新型的 包装形式,主要用来运输非危险液体和相关的化学制

收稿日期: 2019-01-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51803104)

作者简介: 黄兆阁(1968—),男,青岛科技大学副教授,主要研究方向为高分子材料高性能化。

通信作者: 雍占福(1975—),男,博士,青岛科技大学副教授,主要研究方向为高分子材料疲劳机理。

品^[1-4]，目前比较常用的液袋规格有 20，24，26 m³。相比于罐车，液袋具有不空跑、不需要清洗、成本低、装卸方便等优势^[5-6]，近年来发展迅猛，已广泛应用于各类食品、石油以及化工制品等相关领域^[7-8]。当然，液袋也存在一定的安全问题，由于产品生产工艺、产品相关尺寸、阀门的安全性、运输车况、装载液体的种类等因素均会对液袋的安全性能产生影响，导致液袋在运输过程中易发生泄漏，严重的甚至导致其撕裂。液袋的泄漏、撕裂已成为制约其长远发展的重要问题。

针对上述问题，文中拟对容积为 24 m³ 的液袋取 3 个因素进行研究。利用 CATIA 软件，建立不同长度、不同 PE 层厚度和装载不同粘度液体的液袋模型（文中所研究的液袋共分为 2 层，由外层 PP 编织层和内层 PE^[9]膜组成）；随后基于 ABAQUS 有限元软件，采用 CEL 模式，利用显式分析，在静态（仅施加重力）和动态（施加 5 m/s² 的水平加速度，模拟运输过程中的加速状况）2 种状态下，模拟装水液袋的受力和变形情况。以期根据相关结果，得到尺寸变化对液袋相关性能的影响规律，进而提高液袋的使用安全性

能，为集装箱液袋产品在包装行业的大范围应用提供相关技术参考。

1 集装箱液袋有限元模型的建立

容积为 24 m³ 的液袋实际模型见图 1a。在实际情况中，当液袋充满液体后，液袋会贴近集装箱侧壁以及前门挡板，依靠集装箱侧壁和前门挡板进行约束。相应简化后的有限元模型见图 1b。依据公司实际生产中常用的尺寸，提出合理的变量水平，并选择对试验指标有较大影响的 3 种因素设定三因素三水平，其中 3 因素分别为液袋的长度（*A*）、PE 层厚度（*B*）和装载液体粘度（*C*），随后利用正交设计试验安排，共建立了 9 种不同的液袋有限元模型，具体方案设计见表 1，表中的水平 *A*₁ 表示外层编织层长度为 7500 mm，内层 PE 膜长度为 7500 mm，记为 PP7500 mm+PE7500 mm，则水平 *A*₂ 及 *A*₃ 为 PP7700 mm+PE7700 mm 和 PP7900 mm+PE7900 mm，*B*₁，*B*₂ 及 *B*₃ 分别为 0.1，0.15，0.2 mm，*C*₁，*C*₂ 及 *C*₃ 分别为 1，65，190 mPa·s。

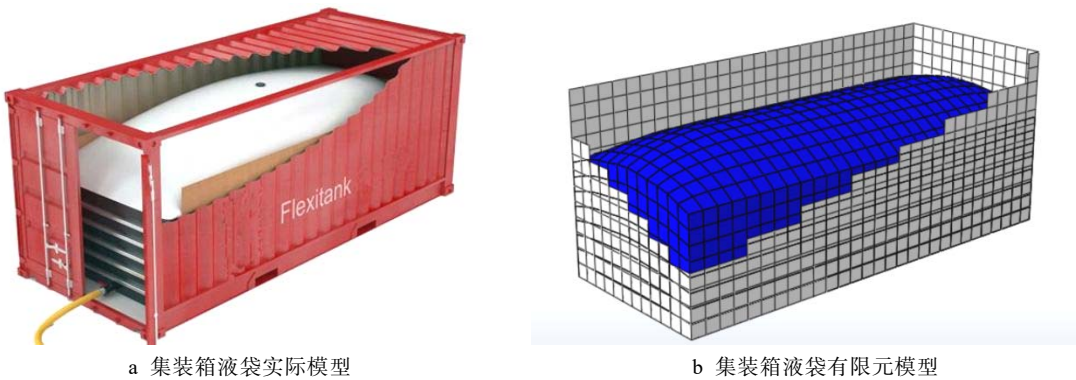


图 1 集装箱液袋模型
Fig.1 Model of flexitank

表 1 正交试验方案
Tab.1 Scheme of orthogonal experiment

试验号 /因素	<i>A</i> /mm	<i>B</i> /mm	<i>C</i> /(mPa·s)
1 [#]	PP7500+PE7500	0.10	1
2 [#]	PP7500+PE7500	0.15	65
3 [#]	PP7500+PE7500	0.20	190
4 [#]	PP7700+PE7700	0.10	65
5 [#]	PP7700+PE7700	0.15	190
6 [#]	PP7700+PE7700	0.20	1
7 [#]	PP7900+PE7900	0.10	190
8 [#]	PP7900+PE7900	0.15	1
9 [#]	PP7900+PE7900	0.20	65

注：长度为液袋平铺时的长度，在一定范围内，液袋的尺寸不受集装箱尺寸的限制

1.1 建立模型

基本参数的设定是有限元分析成功的关键^[10-12]。

1) 集装箱基本参数的设定。设其为解析刚体，网格单元为 R3D4，网格数量为 1332，尺寸规格为 5800 mm×2350 mm×2380 mm。

2) 液袋基本参数的设定。PP 层和 PE 层设为可变形壳体，PP 和 PE 层的网格单元为 S4R，网格数量为 1352，且在仿真模拟中将复合材料的液袋考虑为均质材料，采用弹塑性材料属性。

3) 水模型基本参数的设定。将水设置为欧拉体，网格单元为 EC3D8R，网格数量是 9600。

假设液袋四周与集装箱箱壁贴合完好，PE 层和水、PE 层和 PP 层以及 PP 层和集装箱之间均设为无摩擦的接触属性。

1.2 工况施加

在静态下, 将集装箱固定, 限制其 x , y , z 等 3 个坐标轴的平移自由度和旋转自由度, 对 PP 层、PE 层和欧拉域施加重力; 动态时, 在静态的基础上, 保持 PP 层、PE 层和欧拉域施加的重力不变, 释放集装箱 y 坐标轴的平移自由度, 对集装箱沿 y 方向施加水平加速度, 设置加速度为 5 m/s^2 。

2 分析结果与讨论

结晶态高聚物通常包含晶区和非晶区两部分, 非晶区的分子运动虽然在不同程度上受晶区的限制, 但仍具有非晶态高聚物分子运动的特点, 存在 3 种力学状态, 即玻璃态、高弹态和黏流态。由于达到玻璃化转变温度后, 非晶区的链段处于运动状态, 结晶区的链段不能运动, 因而聚合物在此区域的高弹态表现为韧而硬的“皮革态”。在“皮革态”下的高聚物表现为既有一定柔性又有一定刚性, 常温下液袋所用的 PE 薄膜就处于这种状态。

文中的 PE 膜主要是由低密度聚乙烯和茂金属线性低密度聚乙烯制成的结晶度较低、PE 表现柔软的皮革态, 非晶区为高弹态, 晶区为结晶态。从配方上看, 几乎没有添加无机填料, 所以其疲劳破坏并不是发生在无机粒子与高分子的界面, 而是发生在晶体与高聚物的界面。

分别在静态下和动态下对装水的液袋进行模拟分析。结晶度较低的 PE 膜撕裂主要与薄膜的最大撕裂能有关, 其最大撕裂能的表达式见式 (1) [13]。

$$T_{\max} = 2 \frac{\pi}{\sqrt{1+\varepsilon}} L E_0 \quad (1)$$

式中: $T_{\max}$ 为最大撕裂能; ε 为应变; L 为薄膜内部的裂纹长度, 由薄膜自身决定; E_0 为应变能密度。

考虑膜的撕裂破坏主要与其产生的最大撕裂能 (用 $\frac{E_0}{\sqrt{1+\varepsilon}}$ 值表示) 有关, 最大撕裂能又与其最大应变能密度 [14] 和最大应变有关, 此外, PP 层的拉伸撕裂强度远大于 PE 层, 且在实际中液袋的破损主要源于内 PE 层顶部的损坏, 而 PP 编织层几乎不存在撕裂损坏, 故在分析液袋的撕裂破坏问题时, 以 PE 层的最大撕裂能为主要参考。为排除边角部位单元过度变形对模拟结果的影响, 文中只对液袋 PE 顶部部位 (事故常发部位) 的模拟结果进行分析。

2.1 静态工况下

通过有限元软件分析, 获得了各方案的目标结果, 随后对所得数据进行极差分析, 结果见表 2。表中 K_i 表示任意列上水平号为 i 时所对应的试验结果之和, 由 K_i 大小可判断各因素水平最优工艺方案。 R 为试验指标平均值的极差, 反映了当各因素水平变动时, 试验优化指标的变动幅度。 R 越大说明该因素对试验指标的影响越大, 根据的 R 大小可判断因素的主次顺序。对于液袋 PE 层, 3 号液袋顶部的最大撕裂能最大、2 号液袋次之、7 号液袋顶部的最大撕裂能最小, 由 R 得 $A>B>C$, 即影响最大撕裂能的因素的主次顺序为 $A>B>C$ 。

从表 2 可以看出, 在各水平中, 液袋 PP 层长度为 7900 mm 和 PE 层长度为 7900 mm 时, 最大撕裂能最小, 结果最佳; 液袋的最大撕裂能随着 PE 层厚度增加而增加, PE 层厚度为 0.1 mm 时, 最大撕裂能最小, 结果最佳; 当装载液体粘度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时, 液袋的最大撕裂能最小, 结果最佳。

表 2 静态下液袋 PE 分析结果
Tab.2 Analysis results of flexitank PE under static conditions

试验号	A/mm	B/mm	C/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	最大应力/ MPa	最大应变	最大应变能密度 ($\times 10^{-3}$)/($\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$)	最大撕裂能/ ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$)
1#	PP7500+PE7500	0.1	1	5.875	0.090 32	0.2696	0.2582
2#	PP7500+PE7500	0.15	65	6.310	0.093 28	0.3086	0.2951
3#	PP7500+PE7500	0.2	190	6.453	0.086 68	0.3338	0.3202
4#	PP7700+PE7700	0.1	65	5.459	0.066 78	0.2439	0.2361
5#	PP7700+PE7700	0.15	190	5.645	0.069 56	0.2608	0.2522
6#	PP7700+PE7700	0.2	1	5.749	0.071 67	0.2703	0.2611
7#	PP7900+PE7900	0.1	190	4.797	0.063 26	0.1847	0.1791
8#	PP7900+PE7900	0.15	1	4.958	0.066 19	0.1962	0.1900
9#	PP7900+PE7900	0.2	65	5.181	0.069 39	0.2375	0.2297
$K_1/3$	0.2912	0.2245	0.2364				
$K_2/3$	0.2498	0.2458	0.2536				
$K_3/3$	0.1996	0.2703	0.2505				
R	0.0916	0.0459	0.0172				

从上述分析结果中可以看出,液袋的最大撕裂能虽随着 PE 层厚度的增加而增加,液袋 PE 层越薄,结果越好,但实际并不如此,因为在实际生产中,一般认为材料的破坏是由于材料内部存在缺陷引起的,这种缺陷一般是由几何、材料、载荷不连续造成的应力集中。比如不同组分的凝聚体之间存在界面,这些界面往往存在应力集中。从弹性力学的角度来分析,比如一个平板中带有椭圆孔,见图 2, a 、 b 分别为椭圆的长轴与短轴。其最大应力见式 (2) [15]。

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + \frac{2\sqrt{a}}{\sqrt{\rho}} \right) \quad (2)$$

式中: a 为椭圆的长轴; ρ 为椭圆最小曲率半径。

由式 (2) 可知,当 ρ 越小时,其最大应力越大,材料越容易破坏。在静态试验中,液袋装载粘度为 1 mPa·s 的液体,PE 膜的裂纹电镜照片见图 3。在实际

生产中,液袋的厚度越小,对裂纹影响的越大,因此需要根据理论计算和实际情况来综合确定厚度。装载液体的粘度与最大撕裂能之间不存在单调增减规律,液体粘度最优为 C_1 , 即 1 mPa·s。

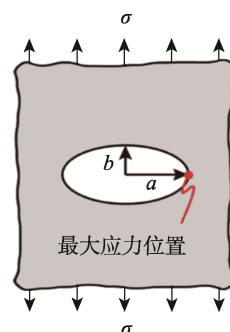
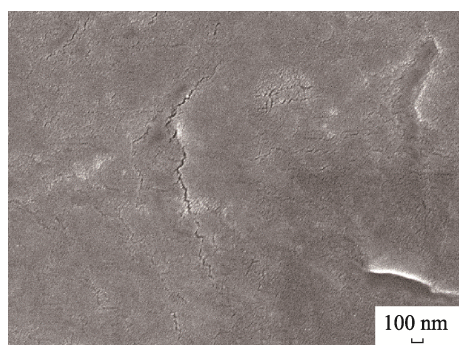
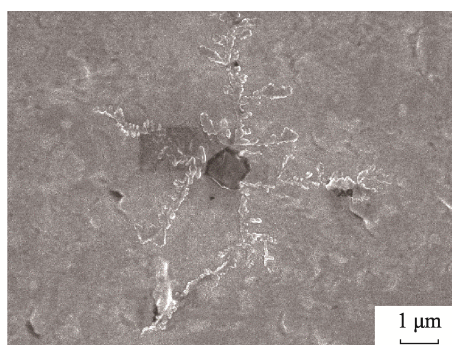


图 2 带有椭圆孔平板的受力
Fig.2 Force diagram of an elliptical hole plate



a 30 000倍放大



b 10 000倍放大

图 3 不同放大倍数液袋 PE 膜的 SEM 照片
Fig.3 SEM images of flexitank PE film of different magnification

运用有限元软件,设置最佳方案,即 PP 层长度为 7900 mm、PE 层长度为 7900 mm、PP 层厚度为 0.1 mm 和装载液体粘度为 1 mPa·s,计算出来最大应变为 0.064 77、最大应变能密度为 $0.1928 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3$,随后带入 $\frac{E_0}{\sqrt{1+\varepsilon}}$ 得到最大撕裂能为 0.1868 J/mm^3 。可知,该方案的撕裂能与表 2 中最小的撕裂能 (0.1791 J/mm^3) 相差不大。静态下最佳方案液袋的应变能密度分布见图 4。

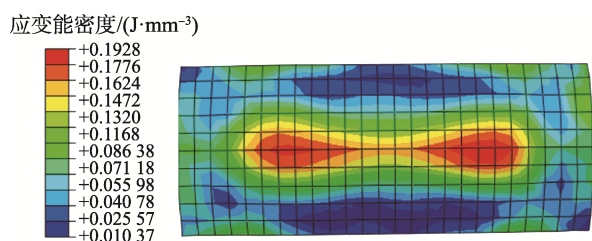


图 4 静态下最佳方案液袋的应变能密度分布
Fig.4 Scattergram of strain energy density of best solution for flexitank under static conditions

2.2 动态工况下

在静态的基础上,对集装箱体施加沿图 5 中箭头方向的加速度,设置加速度方向和速度方向相同,对液袋进行动态模拟,模拟结果见表 3。

由表 3 可知,与静态下液袋各层顶部数值的变化相比,动态下 PE 层顶部的最大应力、最大应变、最大应变能密度和最大撕裂能均相应的增大。说明动态状态对液袋各 PE 层顶部的状态影响很大,导致其顶部撕裂的可能性增大。由此可得,在 PP 层足够安全的情况下,动态时液袋 PE 层顶部撕裂损坏的概率远大于静态时液袋 PE 层顶部的损坏概率,因此动态状态下液袋 PE 层顶部的损坏是液袋损坏的主要原因。

从表 3 可以看出,9 号液袋顶部的最大撕裂能最大,6 号液袋次之,7 号液袋顶部的最大撕裂能最小。分析极差 R 可得 $B > C > A$,即影响最大撕裂能因素主次顺序为 $B > C > A$ 。在各水平中,液袋 PP 层长度为 7900 mm、PE 长度为 7900 mm 时,最大撕裂能最小,结果最佳;虽然随着液袋厚度增大,液袋的最大撕裂能

表 3 动态下液袋 PE 分析结果
Tab.3 Analysis results of flexitank PE under dynamic conditions

试验号	A/mm	B/mm	C/(mPa·s)	最大应力/ MPa	最大应变	最大应变能密度 ($\times 10^{-3}$)/(J·mm $^{-3}$)	最大撕裂能/ (J·mm $^{-3}$)
1 [#]	PP7500+PE7500	0.1	1	7.242	0.095 29	0.3587	0.3427
2 [#]	PP7500+PE7500	0.15	65	5.926	0.088 13	0.2878	0.2759
3 [#]	PP7500+PE7500	0.2	190	7.033	0.095 45	0.4137	0.3953
4 [#]	PP7700+PE7700	0.1	65	4.806	0.054 65	0.1919	0.1869
5 [#]	PP7700+PE7700	0.15	190	6.712	0.086 46	0.3695	0.3545
6 [#]	PP7700+PE7700	0.2	1	7.471	0.102 10	0.4571	0.4354
7 [#]	PP7900+PE7900	0.1	190	5.295	0.064 96	0.1887	0.1829
8 [#]	PP7900+PE7900	0.15	1	6.026	0.086 37	0.3131	0.3004
9 [#]	PP7900+PE7900	0.2	65	7.812	0.131 60	0.4910	0.4616
$K_1/3$	0.3380	0.2375	0.3595				
$K_2/3$	0.3256	0.3103	0.3081				
$K_3/3$	0.3150	0.4308	0.3109				
R	0.0230	0.193	0.0514				

随之增大,但液袋厚度的选择依旧需要根据理论计算和实际情况来综合确定;装载的液体粘度与最大撕裂能之间不存在单调增减的规律,液体粘度最优为 C_2 ,即 65 mPa·s。

运用有限元软件,设置最佳方案,即 PP 层长度为 7900 mm、PE 层长度为 7900 mm、PE 层厚度为 0.1 mm、装载液体粘度为 65 mPa·s,计算出来最大应变为 0.063 04、最大应变能密度为 0.1885×10^{-3} J/mm,

随后带入式 $\frac{E_0}{\sqrt{1+\varepsilon}}$ 得到最大撕裂能为 0.1828 J/mm 3 ,与表 3 展示的撕裂能相比,此方案的撕裂能是最小的。该方案下液袋的应变能密度分布见图 5。

由图 5 可知,液袋 PE 层顶部的最大应变能密度区域位于与加速度方向相反的左端部,该区域 PE 层的最大撕裂能相对较大,说明液袋在该区域附近容易产生损坏。同时,该位置与液袋在实际中破损的位置相近,进而也验证了模拟结果的准确性。

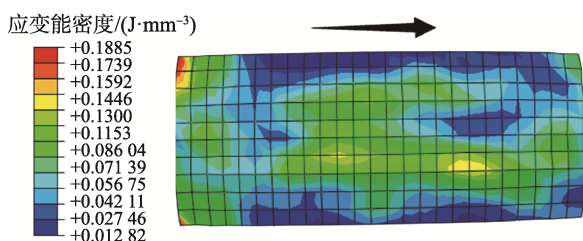


图 5 动态下最佳方案液袋的应变能密度分布

Fig.5 Scattergram of strain energy density of best solution for flexitank under dynamic conditions

3 结语

1) 液袋主要受力部分是最外层的 PP 编织层,主要变形部分是 PE 层。

2) 动态时液袋 PE 层顶部的最大撕裂能较大,动态状态下液袋 PE 层顶部的撕裂破损是液袋损坏的主要原因。

3) 容积为 24 m 3 的液体包装袋最佳尺寸为 PP 层长度为 7900 mm, PE 层长度为 7900 mm, PP 层厚度为 1 mm, PE 层厚度为 0.1 mm,静态下装载粘度为 1 mPa·s 左右的液体安全性最高,水平加速状态下装载粘度为 65 mPa·s 左右的液体时液袋安全性最高。

参考文献:

- [1] 孙毅明. 集装箱液袋运输及其安全性探讨[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(8): 80—82.
SUN Yi-ming. Discussion on Container Liquid Bag Transportation and Its Safety[J]. Railway Transport & Economy, 2007, 29(8): 80—82.
- [2] FAN J. New Form of Liquid Transport Packaging-flexitank[J]. Packaging Wealth & Wisdom, 2013, 23(1): 48—49.
- [3] 高德胜. 集装箱液体集装袋运输的发展与运用管理[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(1): 89—92.
GAO De-sheng. Development and Application Management of Container Liquid Container Transport[J]. Railway Transport & Economy, 2011, 33(1): 89—92.
- [4] ZHANG Na-na. The Flexitank Valve Body Assembly

- with 6-Dofs Robot Trajectory Planning[J]. International Journal of Science, 2017, 4(2): 154—158.
- [5] LIMA B G, LOPES C P. Container Flexitank's Life Cycle Analysis to Promote Environmental Sustainability[J]. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 2017, 5(5): 128—133.
- [6] 张娜娜. 集装箱液袋阀门自动装配装置的设计与研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
ZHANG Na-na. Design and Research of Automatic Assembly Device for Container Liquid Bag Valve[D]. Qingdao: Qingdao University, 2017.
- [7] 范珺. 液体运输包装新形式-集装箱液袋[J]. 塑料包装, 2013, 23(4): 12—14.
FAN Jun. New Form of Liquid Transportation Packaging-container Liquid Bag[J]. Plastic Packaging, 2013, 23(4): 12—14.
- [8] 中绵集装箱袋(惠州)有限公司. 集装箱液袋: 中国, 200520062752.7[P]. 2006-07-12.
Zhongmian Container Bag (Huizhou) Co, Ltd. Container Liquid Bag: China, 200520062752.7[P]. 2006-07-12.
- [9] ZAPATA P A, PALZA H. Polyethylene-based Bio-and Nanocomposites for Packaging Applications[C]// Polyethylene-Based Biocomposites and Bionanocomposites, John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [10] 康柳, 刘婧, 张佳娟, 等. 基于 SolidWorks 的卡扣快装箱有限元分析[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 65—69.
KANG Liu, LIU Jing, ZHANG Jia-juan, et al. Finite Element Analysis of Snap-on Fast Packing Based on Solid Works[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 65—69.
- [11] 赵子东, 张建礼, 刘兴民, 等. 基于有限元分析的某型弹药包装箱结构优化设计[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 59—62.
ZHAO Zi-dong, ZHANG Jian-li, LIU Xing-min, et al. Optimization Design of a Certain Type of Ammunition Packaging Box Based on Finite Element Analysis[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 59—62.
- [12] NAGASHIMA T. Sloshing Analysis of a Liquid Storage Container Using Level Set X-FEM[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2009, 25(4): 357—379.
- [13] 李佳, 雍占福, 王青春, 等. 橡胶材料疲劳试验机的设计和疲劳寿命模型的建立[J]. 橡胶科技, 2018, 16(3): 12—18.
LI Jia, YONG Zhan-fu, WANG Qing-chun, et al. Design of Fatigue Testing Machine for Rubber Materials and Establishment of Fatigue Life Model[J]. Rubber Science and Technology, 2018, 16(3): 12—18.
- [14] ZINE A, BENSEDDIQ N, NAITABDELAZIZ M. Rubber Fatigue Life under Multiaxial Loading: Numerical and Experimental Investigations[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(10): 1360—1368.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
XU Zhi-lun. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.