

包装技术与工艺

危险品包装用桶的跌落仿真分析

张晓川¹, 任春华², 计宏伟^{1,2}, 冯智劼³

(1.天津商业大学, 天津 300134; 2.天津大学, 天津 300072;

3.天津出入境检验检疫局, 天津 300201)

摘要: 目的 研究提梁开口塑料桶和无提梁开口塑料桶等 2 类危险品包装用桶的跌落力学响应。
方法 建立含有液体内盛物的 2 类塑料桶跌落有限元模型, 并获得 2 类塑料桶在不同跌落高度下的应力场。
结果 提梁塑料桶的易渗漏位置位于桶顶, 无提梁塑料桶的易渗漏位置位于桶体与地面接触处; 无提梁塑料桶抗跌落冲击的性能优于提梁塑料桶。
结论 在设计开口塑料桶过程中, 应关注桶顶的形状与尺寸设计, 以减少液体冲击桶顶引起的应力集中。

关键词: 塑料桶; 跌落; 有限元方法; 应力场

中图分类号: TB485.3; O347.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0116-05

Dropping Simulation Analysis of Dangerous Goods Packaging Buckets

ZHANG Xiao-chuan¹, REN Chun-hua², JI Hong-wei^{1,2}, FENG Zhi-jie³

(1.Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2.Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3.Tianjin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Tianjin 300201, China)

ABSTRACT: This study aims to investigate the mechanical response of bucket with a handle and bucket without a handle in different dropping conditions. The finite element models of the two kinds of buckets with fluid were established. And the stress fields of the buckets were obtained at different dropping heights. The easily leak location of the bucket with a handle was located on its top, and that of the bucket without a handle was located on the contact point between the bucket and the ground; the resistance to dropping impact of the bucket without a handle was superior to that of the bucket with a handle. In the design process of the opening plastic bucket, the size and the shape of the bucket top should be paid more attention to so as to reduce the stress concentration caused by the fluid impact.

KEY WORDS: plastic bucket; dropping; finite element method; stress field

对危险品进行有效包装以保证其储运安全是目前包装领域的研究热点之一^[1-3]。塑料桶具有不易碎、不生锈、质量轻、耐油、耐强腐蚀等优点, 因此广泛应用于各种危险液体的包装、储存与运输^[4-5]。在跌落工况下, 塑料桶是否发生严重变形甚至渗漏是评价塑料桶质量的一个重要标准^[6-9]。由此可见, 采用实验或数值方法分析危险品包装用

桶在跌落工况下的力学响应, 对预测桶体易发生渗漏位置和优化设计桶体结构具有重要意义。

利用实验方法研究危险品包装用塑料桶的跌落力学行为存在如下局限: 需要购置多个塑料桶进行多组实验, 研究成本较高; 为防止危险品泄漏引起安全事故, 需用非危险品作为桶内盛物, 不能完全体现桶的实际工况。随着有限元技术的发展, 计

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 2012 年国家质检总局科技计划 (2012IK212)

作者简介: 张晓川 (1985—), 男, 河北乐亭人, 博士, 天津商业大学讲师, 主要研究方向为光测力学、包装动力学。

算机数值模拟仿真分析已逐渐成为研究构件跌落冲击力学响应的重要手段^[10-15]。利用该方法实现危险品包装用桶在跌落工况下的渗漏点预测和桶体优化设计可行且可靠。文中首先建立内装液体危险品的 2 种 20 L 开口塑料桶的有限元模型，然后利用商业有限元软件 ABAQUS 对模型的不同跌落高度冲击响应进行仿真分析，最后对仿真结果进行讨论，预测渗漏点位置，评价桶体抗跌落冲击性能。

1 有限元模型

1.1 桶体及内盛物参数

2 种开口塑料桶（20 L）的主要尺寸见图 1。2 种塑料桶均由高密度聚乙烯材料制成，其主要力学性能参数：密度 ρ 为 0.95 g/cm^3 ，弹性模量 E 为 1.51 GPa ，泊松比 μ 为 0.38 ，屈服极限 σ_s 为 28.16 MPa ，强度极限 σ_b 为 35.63 MPa 。在跌落仿真过程中，利用桶体材料标准拉伸试验测得的工程应力-应变关系计算出桶体材料的真实应力-应变关系，并输入 ABAQUS 有限元软件，基于 Mises 屈服准则判断材料是否进入塑性阶段。当桶体材料进入塑性阶段时，按照塑性应力应变关系进行仿真计算。

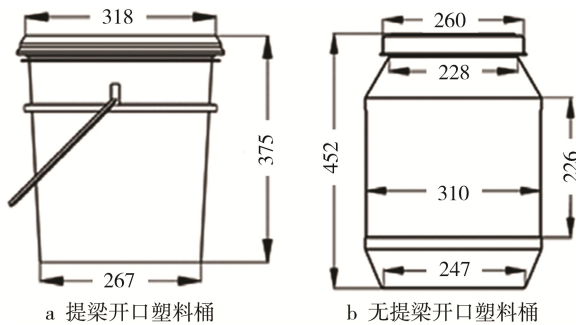


图 1 桶体主要尺寸
Fig.1 Main dimensions of buckets

塑料桶常用于盛装液体危险品，文中将内盛物设置为理想流体。其属性设置：液体密度为 1000 kg/m^3 ，液体体积为容器最大量程（20 L）的 98%。

1.2 单元设置

首先对桶体进行网格划分，单元类型为四边形单元和少量三角形单元。容量 20 L 提梁开口塑料桶和无提梁开口塑料桶的网格划分结果见图 2。

包装容器在跌落过程中，特别是与地面发生冲击的过程中，内部的危险液体由于惯性作用将会发生晃动，从而冲击包装容器壁及容器顶（底）部。

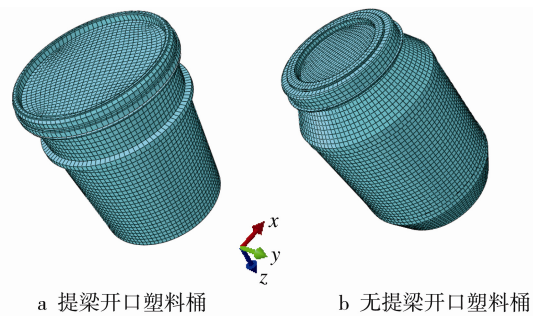


图 2 桶体网格划分
Fig.2 Meshing of buckets

该类冲击的剧烈程度受到包装体的几何形状、装液高度、跌落高度等因素的影响。为了保证计算精度并兼顾计算效率，以 ABAQUS 为平台，采用欧拉-拉格朗日耦合（Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL）方法实现危险液体与包装容器的流固耦合。文中 2 类桶体均采用拉格朗日单元模拟，而桶内液体采用欧拉体单元模拟，其单元类型为 EC3D8R。

桶体和内装液体均被欧拉体所包围，同时定义相互间显式通用接触行为。欧拉方法的实现基于流体体积方法，材料在网格中流动的轨迹通过计算每个单元中的欧拉体积分分数来确定，即如材料完全充满 1 个单元，则体积分分数为 1；如单元中材料为空，则体积分分数为 0。整个模型包括 59 319 个欧拉单元和 22 953 个四面体单元，见图 3。

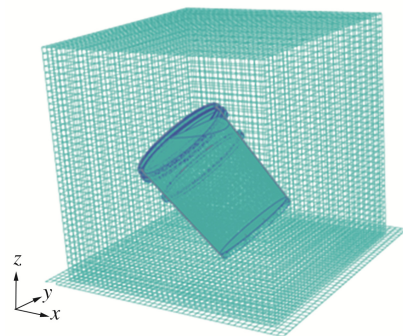


图 3 流固耦合模型
Fig.3 Fluid-solid coupling model

1.3 载荷与边界条件

文中包装容器的跌落姿态均为容器轴线与地面呈 45° 夹角的角跌落，分为桶盖朝下跌落和桶底朝下跌落。依据不同包装类型^[6]（I，II，III 类包装），跌落高度分别设 I 类包装为 1.8 m ，II 类包装为 1.2 m ；III 类包装为 0.8 m 。包装容器的整个跌落过程包含一系列的能量转换。首先，包装容器从高度 h 下落，势能转换为动能，当容器与地面发生冲击时，动能转换为弹性势能。包装从高度 h 处自由下落，

到达地面,根据能量守恒定律:

$$mgh = \frac{1}{2}mv_{mp}^2 \Rightarrow v_{mp} = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中: v_{mp} 为冲击速度(m/s); m 为跌落物质量(kg); g 为重力加速度(m/s^2)。

由式(1)即可求出不同跌落高度下,包装容器及其内盛物在冲击地面前瞬时冲击速度 v_{mp} 。包装容器跌落过程的模拟需要在包装容器有限元模型的基础上建立一个刚性跌落目标面。该刚性目标面采用直接法建模。首先建立节点,而后基于节点形成单元。刚性跌落目标面为水泥混凝土,材料模型设置为 rigid material model,其密度为 $2750 kg/m^3$,弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.2。以 20 L 提梁开口塑料桶 45°桶顶端跌落为例,刚性目标面、桶体及内装液体模型见图 4。

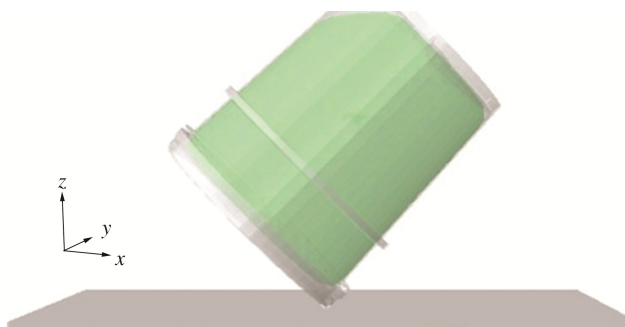


图 4 整体有限元模型
Fig.4 Global FEM model

2 结果与讨论

2.1 应力场仿真结果

分析应力场分布规律,可直观得出危险品包装用桶在跌落冲击过程中易发生渗漏位置及最大应力值。提梁开口塑料桶在 3 类包装高度跌落过程中出现最大应力时的 Mises 应力场见图 5,无提梁开口塑料桶在 3 类包装高度跌落过程中出现最大应力时的 Mises 应力场见图 6。

2.2 易渗漏点位置讨论

最大应力发生的位置,即可认为是易渗漏点位置。图 5 表明,提梁开口塑料桶桶顶跌落时,地面的冲击载荷引起最大应力,易渗漏点位于桶顶与地面接触处;提梁开口塑料桶桶底跌落时,内盛液体对桶顶的冲击载荷引起最大应力,易渗漏点位于桶

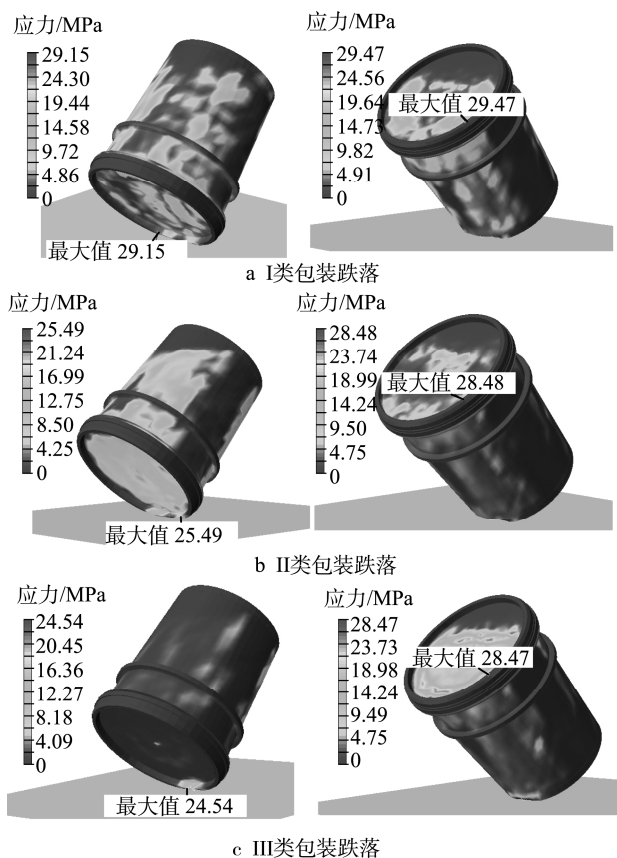


图 5 提梁开口塑料桶 Mises 应力场

Fig.5 Mises stress fields of the opening bucket with a handle

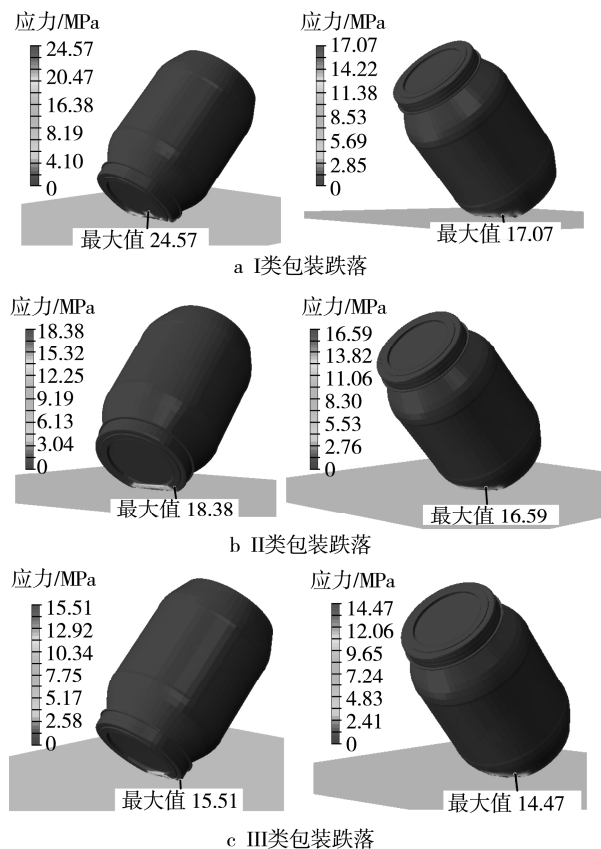


图 6 无提梁开口塑料桶 Mises 应力场

Fig.6 Mises stress fields of the opening bucket without a handle

顶。图 6 表明，无提梁开口塑料桶跌落时，无论桶顶跌落还是桶底跌落，最大应力均由地面的冲击载荷引起，易渗漏点位置位于桶与地面接触处。

2.3 最大应力值讨论

2 类塑料桶在 3 类包装跌落工况下的最大 Mises 应力见表 1。

表 1 最大 Mises 应力值
Tab.1 Maximum Mises stresses

桶类型	跌落高度/m	最大应力/MPa	屈服极限/MPa
提梁开口塑料桶	1.8	29.47	28.16
	1.2	28.48	
	0.8	28.47	
无提梁开口塑料桶	1.8	24.57	
	1.2	18.38	
	0.8	15.51	

表 1 表明，对于提梁开口塑料桶，3 种跌落工况下其最大 Mises 应力均大于屈服极限，因此该类塑料桶不满足包装使用要求。另外，结合图 5 可以看出，桶底跌落时发生该跌落高度下的最大应力，此类桶桶底跌落时更容易发生渗漏，且渗漏位置位于桶顶处。对于无提梁开口塑料桶，4 类跌落高度下最大 Mises 应力均出现在桶底跌落工况下，且均小于屈服极限，这表明该类塑料桶结构设计较为合理，更适合于液体危险品的包装运输。

观察 2 类塑料桶的形状及尺寸，可知 2 类桶最大的区别在于桶盖的设计。提梁开口塑料桶具有较大尺寸的桶盖，且桶身与桶盖连接处缺少过渡圆弧面，这就造成了桶顶附近受内盛物冲击时的应力集中。无提梁开口塑料桶桶盖的形状设计则更为合理，有效地减少了内盛物对桶顶的冲击。

3 结语

利用有限元技术对 2 类危险品包装用塑料桶的跌落冲击进行了仿真分析。利用 ABAQUS 商业软件建立了 2 类塑料桶的有限元模型，并计算其全场 Mises 应力分布。通过对模拟结果进行进一步分析，得出如下结论。

1) 提梁开口塑料桶跌落时最大 Mises 应力总发生在桶顶处；无提梁开口塑料桶跌落时最大 Mises 应力总发生在桶体与地面接触处。

2) 提梁开口塑料桶在 3 种跌落高度下，最大

Mises 应力大于桶体材料屈服极限，因此不满足包装使用要求；无提梁开口塑料桶在 3 种跌落高度下，最大 Mises 应力均小于桶体材料屈服极限，满足包装使用要求。

3) 在危险品包装用塑料桶的设计过程中，应注意合理设计桶盖尺寸，并在桶身与桶盖连接处设计合理的过渡圆弧面。

参考文献：

[1] 周建伟, 王振林. 危险品包装的安全监管与监测技术[J]. 包装工程, 2007, 28(8): 52—55.
ZHOU Jian-wei, WANG Zhen-lin. Safety Supervision and Detection Technology of Dangerous Goods Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 52—55.

[2] WELTSCHKEV M. Comparison between Material Parameters of Polyethylene Grades and the Test Performance Behaviour of Packaging for the Transport of Dangerous Goods[J]. Packaging Technology and Science, 2011, 24(6): 361—371.

[3] 万敏, 陶强, 崔鹏, 等. 危险品包装的发展及常见质量问题探讨[J]. 包装工程, 2011, 32(3): 103—106.
WAN Min, TAO Qiang, CUI Peng, et al. Development of Dangerous Goods Packaging and Discussion on Common Quality Problems[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 103—106.

[4] 彭国勋. 运输包装[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1999.
PENG Guo-xun. Transport Packaging[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 1999.

[5] 郑海友, 计宏伟, 冯智劫. 开口塑料桶高温堆码强度有限元分析及安全评价[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(3): 34—38.
ZHENG Hai-you, JI Hong-wei, FENG Zhi-jie. Finite Element Analysis and Safety Evaluation of High Temperature Stacking Strength for Opening Plastic Buckets[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(3): 34—38.

[6] GB 18191—2008, 包装容器-危险品包装用塑料桶[S].
GB 18191—2008, Packing Containers-Plastic Drum for Packages of Dangerous Goods[S].

[7] GB 12463—2009, 危险货物运输包装通用技术条件[S].
GB 12463—2009, General Specifications for Transport Packages of Dangerous Goods[S].

[8] 郭长华. 200 L 吹塑桶的堆码及跌落性能评价[J]. 塑料包装, 2011, 21(5): 28—30.
GUO Chang-hua. The Stacking of 200 L Blow Molding Barrels and Its Drop Performance Evaluation[J]. Plas-

- tic Packaging, 2011, 21(5): 28—30.
- [9] 李政, 金先龙, 陈向东. 柔性储液容器跌落碰撞仿真方法的研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 72—75.
- LI Zheng, JIN Xian-long, CHEN Xiang-dong. Crash Simulation of Flexible Fluid-Filled Container Based on Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation Method[J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(8): 72—75.
- [10] 王惠, 张会生. 柔性贮液容器跌落碰撞过程的三维数值模拟[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29(2): 46—50.
- WANG Hui, ZHANG Hui-sheng. Numerical Simulation of Flexible Fluid-Filled Container during the Impact with Ground[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 29(2): 46—50.
- [11] 杨书仪, 赵继云, 刘德顺, 等. 贮液容器跌落冲击的有限元数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 44—47.
- YANG Shu-yi, ZHAO Ji-yun, LIU De-shun, et al. Finite Element Simulation for the Drop Impact of Fluid-Filled Container[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(1): 44—47.
- [12] 刘永辉, 张银. 基于有限元分析的洗衣机跌落冲击仿真及改进设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 164—166.
- LIU Yong-hui, ZHANG Yin. Dropping Simulation and Design Improvement of a Washing Machine Based on Fe Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.
- [13] 杨佳, 赵春玲, 计宏伟, 等. 塑料和钢塑复合包装桶高温堆码强度模拟[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 87—90.
- YANG Jia, ZHAO Chun-ling, JI Hong-wei, et al. Simulation Analysis of High Temperature Stacking Strength for Plastic and Steel-Plastic Bucket[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 87—90.
- [14] 吴彦颖, 郑全成. 运输包装件跌落冲击响应仿真分析[J]. 中国包装工业, 2007(5): 79—81.
- WU Yan-ying, ZHENG Quan-cheng. Simulation Analysis of Shock Response for the Drop Transport Package[J]. China Packaging Industry, 2007(5): 79—81.
- [15] SUVANJUMRAT C, THUSNEYAPAN S, PUTTAPITUKPORN T. A Suitable Mathematical Model of PET for FEA Drop-test Analysis[J]. Science Journal, 2007 (7): 6—17.