

罐式集装箱跌落仿真与试验

王威涛¹, 杨献朝², 陈荣昌², 刘晨², 石宁¹, 王奎升¹

(1.北京化工大学, 北京 100029; 2.交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘要: **目的** 研究裙座与鞍座 2 种连接结构的罐式集装箱在长侧面跌落情况下的应力状态以及结构薄弱点。**方法** 基于有限元软件对 2 种结构的罐式集装箱进行仿真模拟分析, 制作 2 种结构的罐式集装箱试件, 并进行 2.8 m 高度的跌落试验, 对比分析仿真模拟结果与试验分析结果。**结果** 端梁发生了屈服变形, 罐体与框架连接处结构承受了较大应力, 并发生损坏。**结论** 试验与仿真模拟结果基本一致, 为罐式集装箱改进设计提供了理论依据。

关键词: 罐式集装箱; 有限元分析; 跌落仿真; 应力测试

中图分类号: TB485.3; O347.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0079-05

Drop Simulation and Experiment on Tank Containers

WANG Wei-tao¹, YANG Xian-zhao², CHEN Rong-chang², LIU Chen², SHI Ning¹, WANG Kui-sheng¹

(1.Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2.China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

ABSTRACT: The work aims to study the stress status and structural weakness of the skirt type and saddle type tank containers in the case of long-side dropping. Based on the finite element software, the two types of tank containers were simulated and analyzed. In addition, the two structural forms of tank container specimens were produced for drop test at 2.8 m height. The results of simulation and test analysis were comparatively analyzed. The yield deformation of the end beam occurred, and the junction structure of tank and frame was damaged because of the large stress borne. The experimental results are in accordance with the simulation results, which provides theoretical basis for improving the design of tank containers.

KEY WORDS: tank container; finite element analysis; drop simulation; stress test

近年来,随着我国工业化进程的加快,危险化学品沿长江流域的运输量不断增加,这给长江水域带来了很大的安全隐患^[1]。危险化学品包装方式主要有桶、罐、箱、瓶等^[2],但对于运量较大的高毒性危险化学品的具有较好安全性的罐式集装箱(简称罐箱)作为运输的首选^[3]。在正常运输情况下,罐箱能保证危险化学品安全运输要求。然而,危险化学品罐箱发生碰撞、跌落事故时,易引发罐体破坏造成泄露^[4]。目前,对于罐箱的振动^[5-6]、运动方向碰撞研究较多^[7-8],而

对于事故中罐箱框架及其连接结构在侧翻、跌落等动载荷情况下的相关研究分析较少。

罐箱主要由罐体、框架及安全附件组成^[9],文中选取具有代表性的裙座、鞍座结构为研究对象,利用 Ansys Workbench 15.0 显示动力学模块,分别对裙座和鞍座 2 种连接结构形式的罐箱进行侧翻或吊装情况下长侧面跌落仿真模拟,分析罐箱跌落情况下的应力状态,找出结构上的薄弱点,为罐箱的改进设计提供理论依据与参考。为了对模拟结果进行验证,制作裙座和鞍座 2 种结构形式的罐箱试件,并进行跌落试验。

收稿日期: 2017-01-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAG20B03)

作者简介: 王威涛(1991—),男,北京化工大学硕士生,主攻高毒性危险货物包装。

通讯作者: 王奎升(1955—),男,北京化工大学教授,主要研究方向为机械设备设计。

1 裙座与鞍座

文中所探讨的罐式集装箱型号为 ICC, 该集装箱设计符合《国际海运危险货物规则》、GB 150—2011《压力容器》和 TSG R0005—2011《移动式压力容器安全技术监察规程》的有关规定。罐箱设计压力为 2 MPa, 工作温度为 -19 ~ 55 °C, 罐体直径为 2100 mm, 罐体壁厚为 14 mm。裙座型罐箱充装介质质量为 15 t, 总质量为 21.2 t。鞍座型罐箱充装介质质量为 15 t, 总质量为 21.3 t。依据 JB/T 4710—2005, 裙座式为圆筒形裙座, 内径为 2000 mm, 壁厚为 14 mm。根据 JB/T 4712.1—2007, 选取鞍座型式为 A2100-S。

2 罐式集装箱受力分析与模拟

2.1 几何模型的建立

通过 Ansys Workbench 中 Design Modeler 模块对罐箱进行建模, 该模拟仿真的重点是罐箱的框架, 裙座、鞍座及其与罐体相连接部位, 忽略非主要承载结构以及非关键特征, 如安全阀、接头等^[10-12], 但保留对罐体结构强度影响较大的人孔。实体建模接近实际工程结构, 且能显示仿真分析重点关注结构的局部细节受力情况, 因此, 采用 solid 186 单元进行实体建模, 薄壁厚度方向分为 4 层。为提高计算速度和保证计算的精度, 灵活运用 Slice 功能和拓扑重组功能对复杂结构进行规则的六面体网格划分^[13], 网格划分后的模型见图 1。裙座型罐箱节点数为 1 689 083, 单元数为 350 336, 网格质量 Skewness 平均值为 0.2487; 鞍座型罐箱节点数为 2 160 590, 单元数为 445 584, 网格质量 Skewness 平均值为 0.1799。各结构连接处接触类型为绑定接触。

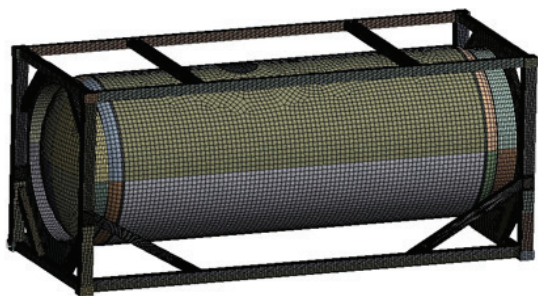


图 1 网格划分后的模型
Fig.1 Schematic diagram of model grid

2.2 各构件材料的选择

文中模型的罐体、裙座材料为 Q370R, 鞍座材料为 Q235A, 立柱材料为 Q415NH, 角件材料为 Q345B, 其他结构材料为 Q355NH。材料密度均为 7850 kg/m³, 弹性模量均为 206 GPa, 泊松比均为 0.3, 切变模量均为 79 GPa。

2.3 重力加载与边界条件

罐箱长侧面与冲击板表面平行, 罐箱自由跌落过程中施加重力加速度, 方向指向刚性冲击板, 冲击板全约束^[14], 2 种类型罐箱跌落边界条件的设置相同。由于 2 种结构罐箱的罐体尺寸相同, 故等效密度相等。罐体质量 m_1 为 4591 kg, 最大充装介质质量 m_2 为 15 t, 罐体密度 ρ_1 为 7850 kg/m³, 罐体等效密度的计算为:

$$\rho_2 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 / \rho_1} \quad (1)$$

通过式(1)得到罐体等效密度 ρ_2 为 33 498.01 kg/m³。

2.4 仿真参数的选取

参考罐车运输时罐箱的重心高度, 这里侧向跌落高度取 2.8 m, 长侧面平跌。由于 Ansys 动态分析耗时长、占用内存大, 且跌落碰撞前的自由落体过程不是研究重点, 因此, 为了缩短计算时间, 建模时设置罐箱与冲击板无摩擦接触在一起。根据机械能守恒定律可计算出罐箱接触冲击板时的速度, 见式(2)。对跌落的罐箱设定初速度 v 为 7411.88 mm/s, 方向指向刚性冲击板; 碰撞时间设定为 0.03 s; 载荷步数设定为 100; 时间步安全系数设定为 0.9。

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

式中: m 为罐式集装箱质量(kg); g 为重力加速度(m/s²); h 为跌落高度(m); v 为冲击速度(m/s)。

2.5 结果分析

将上述条件及参数输入软件中进行仿真模拟分析, 得到罐箱的整体应力云图, 见图 2。根据图 2 可知, 裙座型罐箱与鞍座型罐箱跌落时框架都发生了屈服变形, 其主要屈服变形部位为端梁。各端梁的屈服变形具有相似的规律, 靠近冲击板一端所受应力较大, 发生了屈服。在有斜撑的部位结构得到加强, 端梁应力值减小。较为明显的是端梁下端所受应力值大于端梁上端所受应力值, 表明下端损坏较为严重。

对于鞍座型罐箱, 鞍座底板等效应力云图见图 3a, 屈服部位为底板两端角部区域, 所受最大应力值为 769.88 MPa, 即发生屈服变形。除两端角部区域外, 底板所受应力值迅速减小。裙座的等效应力云图见图 3b, 裙座圆周方向所受应力变化规律为: 与端梁相连接部位应力较大, 最大值为 664.38 MPa, 发生屈服变形; 与立柱连接处应力较小, 且在裙座跌落底部出现一小部分应力区域。与裙座相连接罐体的封头在跌落底端出现应力极大值 545.22 MPa, 上端所受的最大应力值约为 106.62 MPa, 表明以 2.8 m 高度跌落时, 与裙座连接处的罐体受到损坏, 裙座跌落底部结构应当加强。

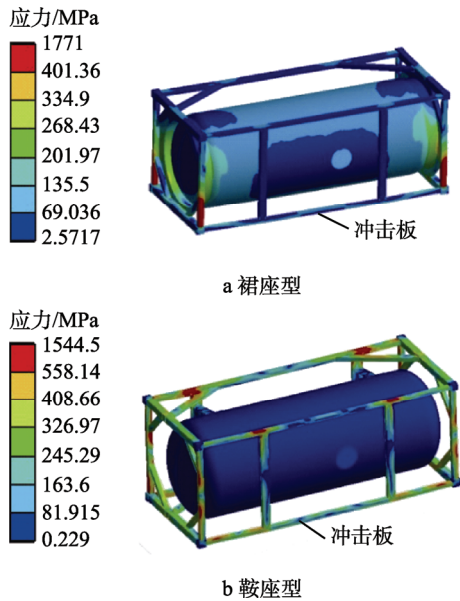


图 2 罐箱跌落应力云图
Fig.2 Drop stress cloud of tank containers

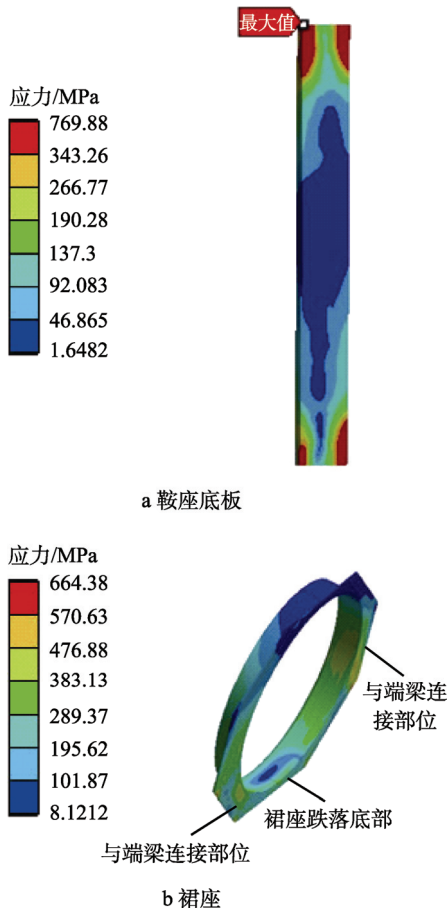


图 3 应力云图
Fig.3 Equivalent stress

3 罐式集装箱试件试验

为了对罐箱模拟仿真结果提供辅助验证, 进一步了解 2 种结构类型罐箱的框架、裙座、鞍座及其与罐体相连接部位的屈服变形规律, 参考 GB150—2011

《压力容器》, 研制了设计压力为 2 MPa, 罐体直径为 133 mm, 材料为 304 不锈钢罐箱试件。裙座型罐箱试件质量为 4.2 kg, 总质量为 14.3 kg; 鞍座型罐箱试件质量为 4.3 kg, 总质量为 14.4 kg, 罐箱试件外形尺寸为原模型尺寸的 1/15。跌落碰撞时间短暂, 为了完整地记录碰撞过程, 试验采用 MDR 移动数据记录系统, 设定记录系统的采样频率为 10 kHz。

3.1 测量点应变计的布置

结合仿真结果, 选择危险部位及重要结构处进行测量^[15], 见图 4, 在侧梁 (A, B 点) 和鞍座底板两端外侧 (C, D 点) 布置单向应变片; 在鞍座侧向肋板受拉压处 (E, F 点)、裙座型罐箱试件罐体 (H, I 点)、裙座 (G, J, K 点) 处布置 45°型三向应变片。

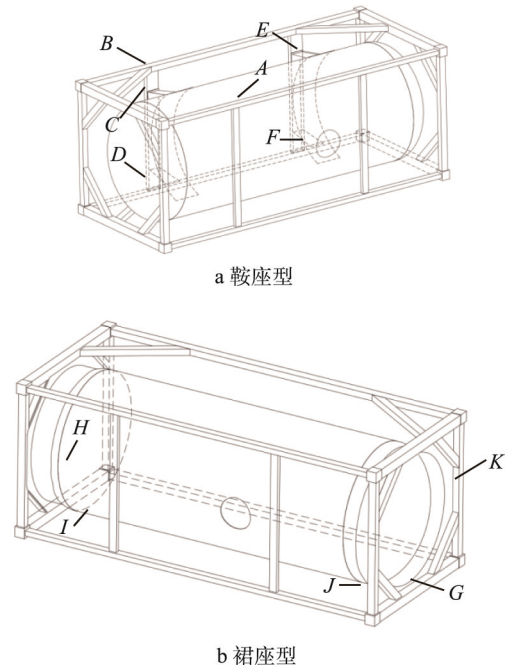


图 4 罐箱测量点分布
Fig.4 Measuring point distribution of tank container

3.2 测试结果

根据结构模型试验量纲分析法, 罐箱试件应力转换关系见式(3):

$$\frac{m_p g A_m}{m_m g A_p} \sigma_m - K \sigma_p = 0 \quad (3)$$

式中: σ_p 和 σ_m 分别为原型罐箱应力和罐箱试件应力; m_p 和 m_m 分别为原型罐箱质量和罐箱试件质量; A 为截面受力面积; g 为重力加速度; K 为动态载荷系数。裙座型罐箱与鞍座型罐箱 A_p 均为 $3.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, A_m 均为 $2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, K 均为 4.5。可得鞍座型罐箱 $\sigma_p = 2.42 \sigma_m$; 裙座型罐箱 $\sigma_p = 2.41 \sigma_m$ 。测量结果 σ_p 值见表 1。

3.3 测试结果分析

鞍座型罐箱试件跌落后鞍座底板两端角部区域

表 1 罐箱试件测量结果

Tab.1 Measurement results of tank specimens MPa

测量点	测量值	模拟值
A	287	364
B	293	360
C	496	122
D	485	101
E	67.06	75
F	42.18	54
G	63.42	76
H	299	356
I	92.68	117
J	364	413
K	418	491

发生屈服变形, 见图 5, 对比图 3, 试验结构变形与模拟分析情况吻合。通过表 1 中测量点 C 和 D 的试验测量值与模拟值对比, 再结合图 5 可知, 造成测量值大于模拟结果的原因是仿真分析中测量点显示的是“点”结果, 而试验中应变计基座具有一定的长度与宽度(基底尺寸为 6.6 mm×3.3 mm), 显示的是“面”结果, 由于应变计受到鞍座底板两端角部区域变形的影响, 导致测量值大于模拟结果。裙座型罐箱试件跌落裙座损坏情况见图 6, 对比仿真图 3b, 试验结果与模拟分析结果吻合。对测量点一一进行校核与审查, 通过仿真分析结果可知, 结构所受应力变化趋势与仿真模拟结果相一致。

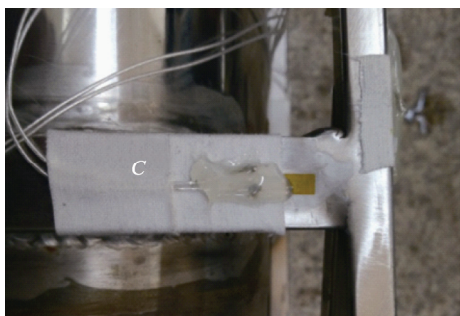


图 5 鞍座底板屈服变形

Fig.5 Yielding deformation of saddle base plate

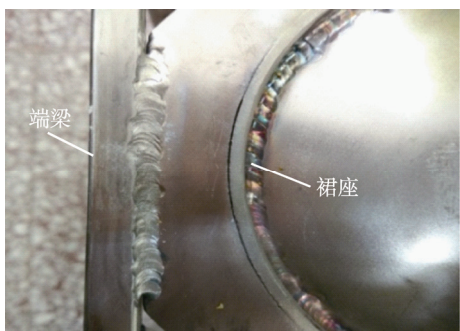


图 6 裙座损坏情况

Fig.6 Yield damage of skirt

罐箱在侧向跌落时会产生较大的瞬时应力, 合理的吸震设计可以避免罐体的破坏, 结合仿真与试验结果, 其中端梁与端梁斜撑的设计建议优先选择塑性较好的材料。对于裙座型罐箱, 在端梁与裙座连接处, 可以使用 V 字型结构对裙座进行结构加强, 使屈服变形主要发生在端梁两端。鞍座型罐箱在跌落时, 罐体所受应力值小于裙座型罐箱罐体, 但是在罐体与框架连接处的变形较大, 说明较少的连接结构支撑罐体使得连接处变形增大。

4 结语

通过仿真模拟及跌落试验, 了解了 2 种类型罐箱在长侧面跌落情况下各结构的受力状态, 得出结论: 2 种类型罐箱的端梁为主要承受冲击载荷结构, 产生屈服变形且靠近冲击板的一端损坏严重; 罐体与框架连接处的结构都发生了变形、损坏; 裙座与端梁连接部位应力大于材料屈服极限, 而在跌落底部出现一小安全区域, 这表明裙座应当在与端梁连接处进行结构加强。值得注意的是, 在进行侧向跌落测量试验时, 鞍座型罐箱试件发生翻转且翻转方向固定, 而裙座型罐箱试件没有发生此翻转现象, 这表明罐箱受鞍座结构影响, 在碰撞时受不平衡力矩作用发生了转动。

参考文献:

- [1] 祝秋宏. 内河水域剧毒化学品运输可行性分析[J]. 中国水运, 2012, 12(6): 14—15.
ZHU Qiu-hong. Feasibility Analysis of Transporting Highly Toxic Chemicals in Inland Waters[J]. China Water Transport, 2012, 12(6): 14—15.
- [2] 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.
- [3] 许文兵. 开发罐式集装箱的建议[J]. 集装箱化, 2001, 12(12): 30—32.
XU Wen-bing. Suggestion on Development of Tank Containers[J]. Containerization, 2001, 12(12): 30—32.
- [4] 王成银. 移动式压力容器安全性分析与事故应急处置[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(7): 11—13.
WANG Cheng-yin. Safety Analysis and Emergency Disposal of Mobile Pressure Vessel[J]. China Special Equipment Safety, 2012, 28(7): 11—13.
- [5] SINGH S P, SAHA K, SINGH J. Measurement and Analysis of Vibration and Temperature Levels in Global Intermodal Container Shipments on Truck, Rail and Ship[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(3): 149—160.

- [6] 卢军. 任意充液比油罐车液体晃动及整车横向稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
LU Jun. Liquid Sloshing and Transverse Stability Analysis of Tank Truck with Arbitrary Proportional Liquid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [7] 刘凤芹, 闫伟. 基于冲击响应谱法的罐式集装箱冲击试验研究[J]. 中国船检, 2014(4): 80—82.
LIU Feng-qin, YAN Wei. Impulse Test of Tank Container Based on Shock Response Spectrum[J]. China Ship Survey, 2014(4): 80—82.
- [8] TIERNAN S, FAHY M. Dynamic FEA Modelling of ISO Tank Containers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002(4): 126—132.
- [9] 刘刚. 基于流固耦合的罐式集装箱铁路冲击试验仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
LIU Gang. Numerical Simulation of Tank Containers under the Rail Impact Testing by the Fluid-Structure Interaction Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [10] 田静敏, 黄秀玲. 包装件跌落冲击研究现状[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 199—203.
TIAN Jing-min, HUANG Xiu-ling. Status of Package Dropping Impact Research[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 199—203.
- [11] 王长智, 陈文革. 基于Ansys软件的产品跌落分析与耐跌结构设计[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 44—46.
WANG Chang-zhi, CHEN Wen-ge. Drop Simulation Analysis and Structure Design of Product Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 44—46.
- [12] 陈孙艺. 压力容器有限元分析建模中值得关注的几个工程因素[J]. 压力容器, 2015, 32(5): 50—57.
CHEN Sun-yi. Several Notable Engineering Factors on Modeling of Pressure Vessels Finite Element Analysis[J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(5): 50—57.
- [13] 沈鋈. Workbench 在压力容器分析设计中的应用技巧[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(20): 46—48.
SHEN Yun. Application Skill of Workbench in Pressure Vessel Analysis and Design[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2011, 40(20): 46—48.
- [14] 张晓川, 任春华, 计宏伟, 等. 危险品包装用桶的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 116—120.
ZHANG Xiao-chuan, REN Chun-hua, JI Hong-wei, et al. Dropping Simulation Analysis of Dangerous Goods Packaging Buckets[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 116—120.
- [15] 刘道忠, 朱国文, 荆浩明, 等. 黄磷罐式集装箱的强度计算与测试[J]. 压力容器, 2006, 17(5): 33—36.
LIU Dao-zhong, ZHU Guo-wen, JING Hao-ming, et al. Strength Calculation and Test of Yellow Phosphorus Tank Containers[J]. Containerization, 2006, 17(5): 33—36.