

# 基于 ANSYS Workbench 的带夹套卧式储罐分析

## Analysis of horizontal tank with jacket based on ANSYS Workbench

贾明霞 钟佩思 杨梅 张晓东 吝伟伟 吕晓东

JIA Ming-xia ZHONG Pei-si YANG Mei ZHANG Xiao-dong LIN Wei-wei LV Xiao-dong

(山东科技大学先进制造技术研究中心, 山东 青岛 266590)

(Advanced Manufacturing Technology Center, Shandong University of Science and  
Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**摘要:**以带夹套的卧式储罐为研究对象,应用 ANSYS Workbench 有限元分析软件,通过静力分析方法,得出在充满物料、雪载荷下,加强筋对储罐的作用非常显著,其变形及应力分布相似;通过响应谱分析方法,得到在 seismic 载荷下,储罐在鞍座处出现应力最大值,低于材料的许用应力。验证储罐的可靠性,并提出优化方法。

**关键词:**夹套;加强筋;静力分析;响应谱分析;应力

**Abstract:** Targeting at the horizontal tank with jacket from a certain project as the research subject, applying the finite element software ANSYS Workbench, the structural static analysis showed that under the full load and the snow condition the deformation and stress were similar and the reinforced rib had significantly effect on the tank. Meantime, the response spectrum analysis told that under the seismic condition the maximum stress occurred in the saddle, which was lower than the allowable stresses of the materials. The reliabilities of the tank were validated, and optimization method was presented.

**Keywords:** jacket; reinforced rib; structural static analysis; response spectrum analysis; stress

在食品储存、加工过程中,某些仪器设备中存在大量的压力容器<sup>[1]</sup>。压力容器的结构直接影响着其强度、刚度和承压能力。在工作压力不同的工况下,应力分布对整个容器结构的稳定性和安全性起着决定性的作用<sup>[2]</sup>。在酿酒行业中,钢制储罐得到了广泛的应用。由于酿酒工艺的需要,通常采用添加夹套和加强筋的方法以达到换热、保温和加固的目的,然而带夹套容器的内筒壳体(筒体、封头等)需要同时承受内压力和夹套外压力的作用。在操作时容器内筒和夹套内的压力大小不同,可能会出现多种危险状态,使内筒壳体的受力状态十分复杂<sup>[3]</sup>。本研究拟以带夹套的卧式储罐为

模型,分析其在多种工况下的应力和变形,从而验证其可靠性。

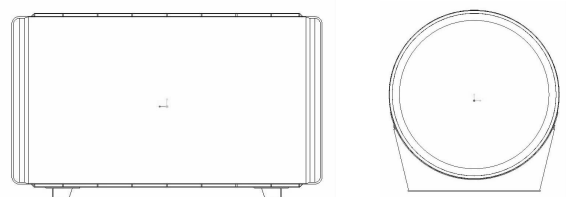
### 1 模型建立

本试验所分析的 60 m<sup>3</sup>带夹套的卧式储罐(以下简称储罐),采用平盖封头,内筒和夹套之间通循环冷却用水,在内筒和夹套之间设有加强筋,可防止工作时因内筒和夹套变形而使部分区域无冷却水。储罐具体结构如图 1 所示,内筒长 6 000 mm,内径 3 600 mm,厚度 8 mm,材质 304;夹套长 5 700 mm,内径 3 740 mm,厚度 10 mm,材质 Q235-A;内筒和夹套之间有 7 根加强筋,厚度 20 mm,材质 Q235-A;封头按 GB 150.3—2011 选用平盖,厚度为 37 mm,材质 Q235-A;鞍座按 JB/T 4712.1—2007 选用鞍式支座,包角为 150°,高度为 250 mm,材质 Q235-A。夹套封闭件为锥形封闭件。

采用 Pro/E 软件进行三维建模,为后面划分网格和计算方便,在不影响分析结果的前提下,简化模型,忽略法兰、人孔、接管等附件,保留筒体、夹套、加强筋、封头、鞍座和内筒与夹套的封闭件。对上述主要受力部件分别建模,最后组装成一个装配体,各部件之间视为刚性连接。

### 2 网格划分

ANSYS 软件是一款大型通用有限元分析软件,它能与多数 CAD 软件接口,实现数据的共享和交换。在 Pro/E 中



(a) 储罐剖视图 (b) 储罐右视图

图 1 储罐结构简图

Figure 1 The tank structure sketch

**作者简介:**贾明霞,女,山东科技大学在读硕士研究生。

**通讯作者:**钟佩思(1966—),男,山东科技大学教授,博士。

E-mail:pszhong@163.com

收稿日期:2015-12-10

建立与 ANSYS Workbench 的关联,直接就可将三维模型导入到 Workbench 中并建立分析项目<sup>[4]</sup>,设置材料属性并划分网格。本试验中内筒材质为 304,其它均为 Q235-A,由文献<sup>[5]</sup>查得材料属性见表 1。

表 1 材料属性

Table 1 Material attribute

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	许用应力/ MPa
304	1.99 × 10 <sup>5</sup>	0.3	7 933	137
Q235-A	2.10 × 10 <sup>5</sup>	0.3	7 850	140

对于 3D 几何体,Workbench 划分网格的方法有自动划分法、四面体单元划分法、六面体单元为主法、扫略划分法、多域扫略法。将形状规则的内筒、夹套、加强筋采用扫略划分法,产生六面体单元,将封头、鞍座、内筒与夹套的封闭件采用四面体单元划分法,产生四面体单元,并对各个部件进行尺寸限制。划分结果见图 2。

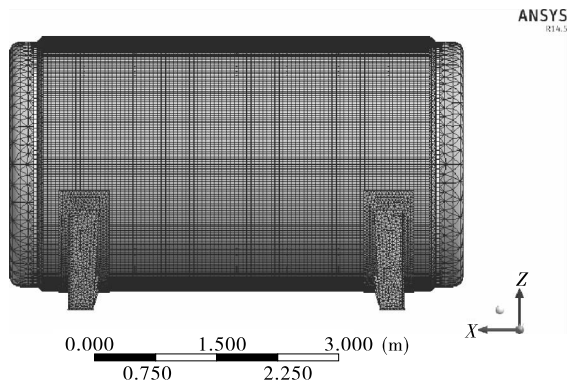


图 2 有限元模型

Figure 2 Finite element model

### 3 充满物料时的工况分析

本储罐的功能是存储液体,筒内是液体物料,密度为 1 350 kg/m<sup>3</sup>,夹套内循环冷却水,压力 0.15 MPa。分析最恶劣的工况即充满物料时储罐的变形及应力情况。

#### 3.1 载荷与约束

根据给出的条件,分析此储液罐在充满的情况下所受的载荷为筒内部液体物料的压力(非线性)、夹套内冷却水的压力(非线性)、夹套压力、自身的重力;约束施加在两鞍座的底面上,方向垂直于鞍座底面。

#### 3.2 分析结果

由于整个储罐模型和施加载荷的对称性,所得的结果均是对称的。

3.2.1 变形情况 储罐的变形情况见图 3,线框为原始形状,色带框为变形后的形状。图 3(a)中将变形放大了 100 倍,由于采用了平盖封头,变形最大处为封头中心部位,为 4.1 mm。为将内筒和夹套的变形显示得更加明显,把图 3(b)、(c)中的变形放大了 500 倍,从图 3 中可以看出,在

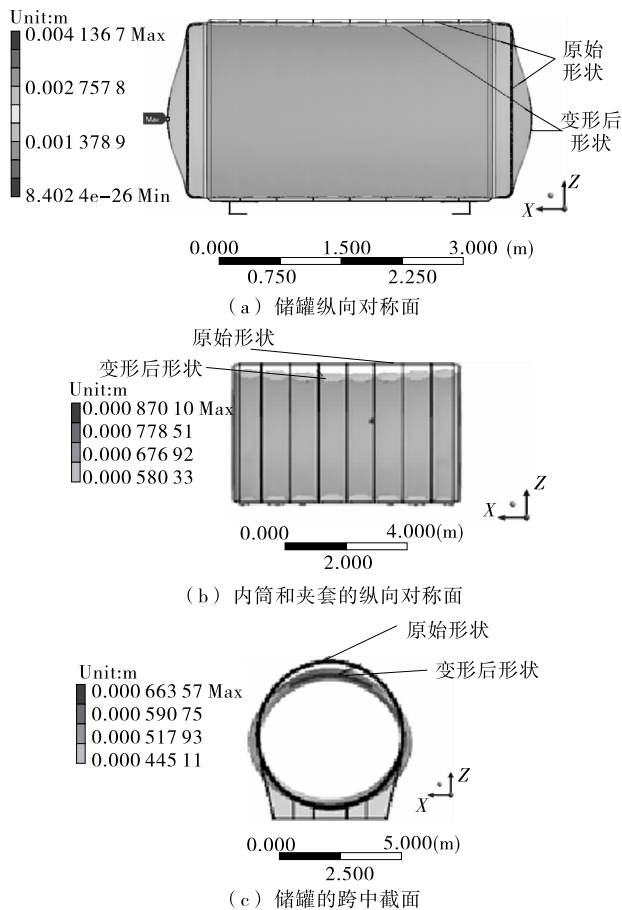


图 3 储罐的变形情况

Figure 3 The deformation of the tank

跨中截面附近,内筒和夹套的扁平变形较为明显,由于外压和加强筋的作用,内筒的最大变形处位于第 3 根和第 4 根加强筋的中间,最大变形值为 0.87 mm;而夹套的最大变形处位于跨中截面上,最大变形值为 0.66 mm。

3.2.2 应力分布 储罐的应力分布云图见图 4。由图 4 可知,因鞍座平面上有加强筋,等效应力最大处发生在鞍座上(腹板与垫板的接触部位),最大值为 72.86 MPa,由于加强筋位于内筒和夹套之间,封头对内筒、夹套封闭件对内筒和夹套均具有加强作用,内筒和夹套的应力呈一节一节分布,内筒的轴向应力在加强筋之间较小,在加强筋处较大,切向应力则相反;夹套的应力分布与内筒的应力分布相同。内筒的轴向应力最大值位于端面的外侧,为 45.96 MPa,夹套的轴向应力最大值位于夹套与封闭件接触面的内侧,为 57.50 MPa;因夹套封闭件为锥形,故夹套封闭件对内筒的加强作用较弱,对夹套的加强作用较强,内筒的切向应力最大值位于最外侧加强筋与夹套封闭件之间,为 36.99 MPa,夹套的切向应力最大值位于夹套与封闭件接触面的外侧,为 35.51 MPa。对比表 1 中材料的许用应力,储罐的各项应力值符合要求。由上述变形和应力数据可知,加强筋对内筒和夹套的加强作用非常明显,充满物料时储罐安全可靠,在实际情况中,可适当减少加强筋的个数或减小加强筋的厚度。

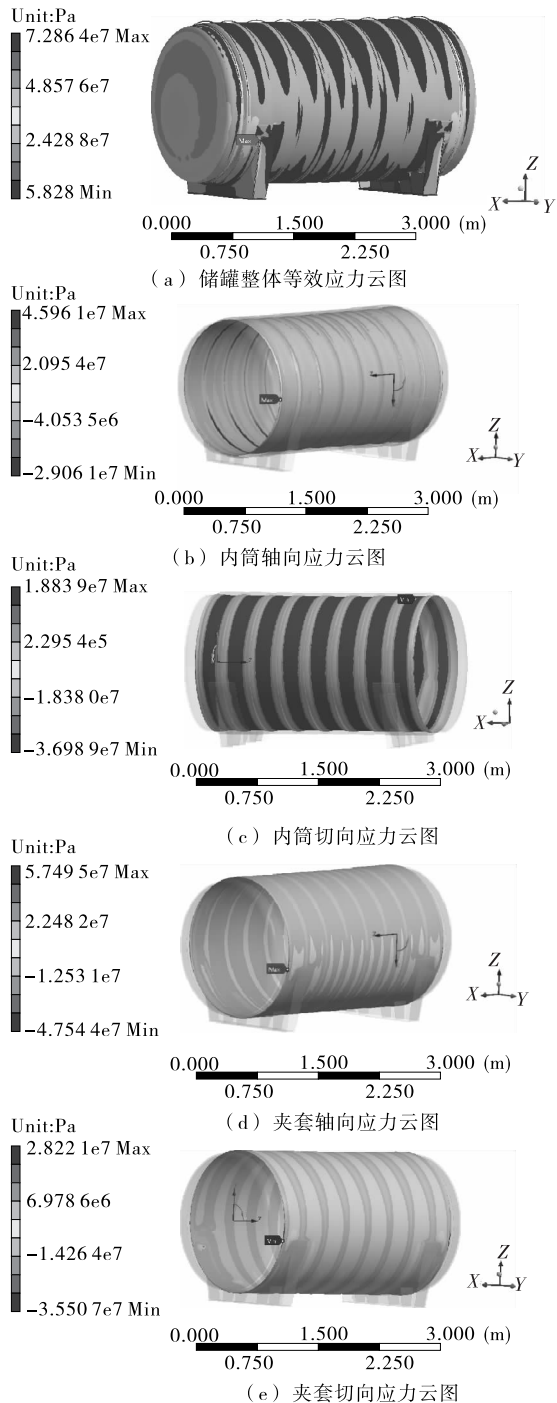


图 4 储罐的应力分布云图

Figure 4 The stress distribution nephogram of the tank

## 4 特殊工况分析

卧式容器上的载荷有长期载荷和短期载荷,长期载荷包括介质压力(内压或外压)、重力(自重、物料或充水重,所有附件及保温材料重);短期载荷包括风载荷、地震载荷及雪载荷等<sup>[6]</sup>。考虑卧式容器高度较低,风载荷与地震载荷相比较小。另外,卧式容器支座在轴线方向的承载能力远小于垂直轴线方向的承载能力,故仅校核鞍座在筒体轴线方向的外载荷。而卧式容器支座在筒体轴线方向的风载荷一般是小于垂直轴线方向的风载荷,故对风载荷予以忽略<sup>[7]</sup>。

### 4.1 地震下的响应分析

地震分析的标准分析方法是响应谱分析,它被应用到各种结构的地震分析中,如核电站、大坝、建筑、桥梁等。任何受到地震或者其它振动载荷的结构或部件都可以用响应谱分析来进行校核。

响应谱分析是一种将模态分析结果和已知谱联系起来,用于计算结构位移、速度、加速度、力、应力的分析方法,用于计算当结构受到时间一历程载荷(如地震载荷、风载荷、海洋波浪、火箭发动机振动等)作用时产生的最大响应,可以认为是瞬态动力学分析的一种可以快速进行的替代方法。谱是谱值和频率的关系曲线,反映了时间一历程载荷的强度和频率之间的关系。响应谱是结构对输入激励谱的总响应,由各阶模态响应的叠加得到,激励总响应的最大值一般由各阶模态响应的最大值组合得到。响应谱分为单点响应谱和多点响应谱。单点响应谱指在模型的一个点集上定义一条响应谱;后者是指在模型的多个点集上定义多条响应谱。本研究将采用单点响应谱,即将储罐看作一个整体,分析在一条地震谱下的响应。

响应谱分析是在模态分析的基础上进行的,所以先进行模态分析,然后进行响应谱分析。由于储罐大部分时间均装有物料,故对储罐进行有预应力状态下的模态分析,考虑最恶劣的情况,预应力设为充满物料时的载荷及边界条件,利用 Workbench 求出储罐的前 10 阶振型及其响应频率见表 2。

表 2 前 10 阶自振频率

Table 2 The first 10th order natural frequencies

阶数	自振频率/Hz	阶数	自振频率/Hz
1	24.930	6	55.863
2	28.417	7	57.381
3	29.078	8	59.650
4	52.365	9	60.294
5	52.495	10	60.390

根据文献[8]计算得出某市 II 类场地地下 8 级地震烈度的地震谱,见表 3。在模态分析的基础上,将表 3 的地震谱带入 Workbench 的响应谱分析过程中,采用单点响应谱平方根法得到分析结果。应力分布见图 5。由图 5 可知,当地震加速度在 X 轴方向时,鞍座和封头受力较大,其中中间筋板、腹板与垫板的接触部位最为明显,应力最大处发生在内侧筋板下部,最大值为 75.69 MPa。

### 4.2 雪载分析

考虑到物料和冷却水对储罐的作用,将在充满物料时的工况下进行雪载荷分析,由文献[9]查得某市的最大雪压为 300 Pa,加载到储罐的上表面,分析得应力结果见图 6。由图 6 可知,相较于充满物料时的工况,储罐在雪载下应力分布变化不大,最大处发生在鞍座的腹板与垫板的接触部位,最大值为 73.44 MPa。

表3 水平加速度值

Table 3 Horizontal acceleration

自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值/( $m \cdot s^{-2}$ )	自振周期/s	振动频率/Hz	水平地震谱值/( $m \cdot s^{-2}$ )
0.050	20.000 0	1.136 8	0.400	2.500 0	1.394 2
0.100	10.000 0	1.568 0	0.425	2.352 9	1.321 7
0.200	5.000 0	1.568 0	0.450	2.222 2	1.256 9
0.225	4.444 4	1.568 0	0.475	2.105 3	1.198 5
0.250	4.000 0	1.568 0	0.500	2.000 0	1.145 6
0.275	3.636 4	1.568 0	0.600	1.666 7	0.975 8
0.300	3.333 3	1.568 0	0.800	1.250 0	0.757 5
0.325	3.076 9	1.568 0	1.000	1.000 0	0.622 5
0.350	2.857 1	1.568 0	2.000	0.500 0	0.311 8
0.375	2.666 7	1.475 6	3.000	0.333 3	0.037 4

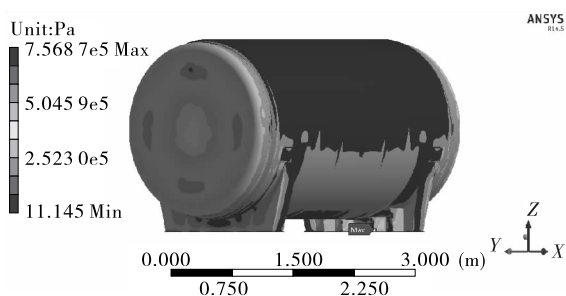


图5 地震响应下储罐的应力分布云图

Figure 5 The stress distribution nephogram of tank under seismic condition

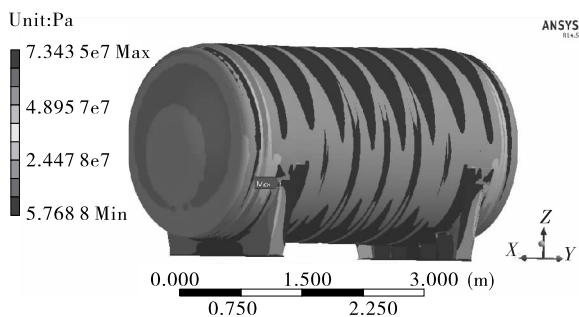


图6 雪载下的应力云图

Figure 6 The stress distribution nephogram of tank under snow condition

## 5 总结

本试验以带夹套的卧式储罐为研究对象,采用 Pro/E 建立模型,导入 ANSYS Workbench 中对其在充满物料的状况、地震载荷、雪载荷下进行有限元分析,得出以下结论: ① 在充满物料时和雪载两种工况下,储罐的变形及应力分布相似,加强筋对内筒和夹套的变形及应力分布影响显著,在加强筋的作用下,内筒和夹套的变形及应力呈一节一节分布。② 在上述几种不同的工况下,储罐应力最大值均发生在鞍座处,其中最大值为 75.69 MPa,即地震载荷下储罐鞍座处的应力值,小于鞍座材料的许用应力值,故该储罐安全

可靠。③ 可以通过减少加强筋的个数、减小加强筋的厚度和采用承载力较低的鞍座进行优化,以降低成本。

## 参考文献

- [1] 麦源,白勇. 食品加工设备中外压容器的稳定性数值分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 137-140.
- [2] 邱放. 基于 ANSYS 的压力容器爆炸事故原因及避免措施分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 93-95.
- [3] 陈延. 外压力容器设计有关问题探讨[J]. 压力容器, 2007(1): 60-62.
- [4] 刘梦飞,郑甲红,高警. 采摘机一核桃树系统的仿真与试验[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 107-110.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. NB/T 47003.1—2009 钢制焊接常压容器[S]. 北京: 新华出版社, 2010: 10-11.
- [6] 向寓华. 化工容器与设备[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 264.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 4731—2005 钢制卧式容器[S]. 北京: 新华出版社, 2005: 44-45.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2008年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 27-30.
- [9] 陈芳,宋樱,刘玉华. 天津市温室结构性能检测方案[J]. 农业工程, 2013, 3(S1): 55.

## 本刊公告

本刊执行主编程云辉教授,2015年起担任长沙理工大学化学与生物工程学院党委书记,因行政、科研、教学任务繁忙,特提出辞去执行主编职务,改担任本刊顾问。特此公告。

《食品与机械》杂志社全体同仁衷心感谢程教授为本刊的发展做出的努力!

《食品与机械》杂志社  
2016年2月6日