

文章编号: 1000-8241(2021)01-0033-06

# 小型航煤储罐的吸瘪机理

刘小川<sup>1</sup> 刘硕<sup>2</sup> 顾成曦<sup>2</sup> 许晶禹<sup>2</sup>

1. 中国航空油料有限责任公司; 2. 中国科学院力学研究所

**摘要:** 针对新疆某 100 m<sup>3</sup> 航煤储罐的吸瘪事故, 采用数值仿真技术, 通过高阶壳单元有限元模型进行了特征值屈曲分析和非线性屈曲分析, 对小型航煤储罐的吸瘪机理进行了详细探讨。通过储罐运行参数确定罐体承受负压范围, 通过模态分析确定无缺陷罐体承受的极限负压, 对比了不同工况下储罐的变形和受力分布, 确定了有缺陷储罐极限负压。研究表明, 单纯负压并不能导致储罐吸瘪, 初始缺陷和呼吸不畅引发的负压共同导致储罐吸瘪, 同时可根据临界载荷确定吸瘪时的储罐呼吸阀通气量。研究成果可为储罐的修复及后续安全生产提供参考。(图 8, 表 2, 参 20)

**关键词:** 储罐; 特征值屈曲分析; 非线性屈曲分析; 缺陷; 有限元

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.01.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Collapse mechanism of small aviation kerosene tank

LIU Xiaochuan<sup>1</sup>, LIU Shuo<sup>2</sup>, GU Chengxi<sup>2</sup>, XU Jingyu<sup>2</sup>

1. China National Aviation Fuel Co. Ltd.; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

**Abstract:** In order to investigate the reason for collapse of a 100 m<sup>3</sup> aviation kerosene storage tank in Xinjiang, eigenvalue buckling analysis and nonlinear buckling analysis were conducted with the numerical simulation technology based on the finite element model (FEM) of a high-order shell unit, and the collapse mechanism of small aviation kerosene was discussed in detail. According to the operation parameters of the tank, the bearing capacity of negative pressure was determined for the tank, and through modal analysis, its ultimate bearing capacity of negative pressure was determined for the tank without any defect. The deformation and stress distribution of the tank under various working conditions were compared, and the ultimate bearing capacity of negative pressure for the defective tank was determined. The study shows that only the negative pressure itself could not have led to the collapse of tank, but the initial defect together with the negative pressure caused by unsmooth breathing could result in collapse of tank. Additionally, the ventilation rate of the breathing valve at the moment the tank collapses can be determined based on the critical load. The study results could provide reference for the repair and subsequent safe operation of the tank. (8 Figures, 2 Tables, 20 References)

**Key words:** storage tank, eigenvalue buckling analysis, nonlinear buckling analysis, defect, finite element

管道运输是民用航空器供油的主要方式。作为航空煤油存储和收发的关键环节, 储罐的安全对整个航煤供给系统的生产安全有着至关重要的影响。近 20 年来, 由于储罐的建造成本高昂、储罐失效对经济和环境会产生巨大破坏, 学者们对立式储罐的结构行为和屈曲问题展开了详细研究<sup>[1]</sup>。航煤供给系统中常用的储罐设计压力较低, 且壁厚较薄, 当罐内负压突然达到某一临界值后, 罐壁壳体突然失去原来的形状, 出现压扁或波纹, 瞬时负压卸载后, 储罐

形状亦不能恢复, 证明罐体发生了屈曲变形。

对于常压储罐屈曲问题, 许多学者进行了相关研究, 发现造成储罐屈曲的原因有多种, 包括风载荷<sup>[2-4]</sup>、地震载荷<sup>[5-6]</sup>、沉降<sup>[7]</sup>、储罐吸气量超过呼吸阀通气量<sup>[8]</sup>、焊接与腐蚀造成的缺陷<sup>[9-10]</sup>等。苏文献等<sup>[8]</sup>结合真实案例和规范经验公式验证有限元算法模拟储罐吸瘪的准确性, 探讨了静水压法恢复吸瘪储罐的可行性。张浩<sup>[11]</sup>对浮顶罐在沉降和风力作用下的屈曲行为展开了实验研究和数值模拟, 在验证数值模拟分析可行

的基础上,发现 100 000 m<sup>3</sup> 储罐极限罐底倾斜沉降量大于规范计算值。孙颖等<sup>[12]</sup>采用数值模拟方式研究了浮顶罐在三湘地震机理下的动力屈曲行为,证实基础隔震可有效提高储罐的抗震性能。宫建国<sup>[13]</sup>探讨了谐波沉降下立式储罐的屈曲行为,通过设计实验证实了数值模拟分析储罐谐波沉降的可靠性。Griffin<sup>[14]</sup>研究了储罐吸瘪现象,提出了临界泄放量计算方法及对应的泄压设备。

针对储罐屈曲的研究方法,除了 API 650-2014《钢制焊接石油储罐》、SH 3046-1992《石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范》外,还有理论推导、实验研究、数值仿真等。在理论推导研究方面,徐英等<sup>[15]</sup>提出了罐壁许用临界压力低点计算方法,通过简化阶梯状罐壁截面形状,将风力稳定问题转变为圆柱壳体在均匀侧压下的临界压力问题。宫建国<sup>[13]</sup>通过类比圆柱壳体的轴压屈曲,得到了储罐在谐波沉降下的屈曲理论公式。在数值仿真方面,不少学者通过有限元仿真软件对储罐屈曲行为进行了详细研究。苏文献<sup>[8]</sup>结合具体工程实例,通过壳单元建立罐壁模型对储罐吸瘪进行了分析,发现采用隔震浮顶储罐可有效提高储罐抗震安全度。林寅<sup>[16]</sup>通过有限元方法分析了影响储罐风致屈曲的一系列因素,并对其进行了具体的量化。赵慧磊<sup>[17]</sup>通过壳单元对储罐的风致屈曲进行了详细的有限元分析,发现设置加强圈后的储罐临界失稳外压是无加强圈的 16 倍以上。

在现行储罐屈曲有限元研究中,学者们<sup>[2,8,11,18-19]</sup>一般通过特征值屈曲获得罐壁屈曲的特征值载荷和屈曲模态,以屈曲模态乘以比例因子作为初始缺陷施加到罐壁有限元模型中,以特征值载荷作为载荷参考值,进行后续的非线性屈曲分析。尽管该方法应用较为普遍,但也存在一些问题。以负压导致的储罐吸瘪变形屈曲为例,通过特征屈曲分析得到的屈曲模态是沿罐壁壳体中心对称分布的多波屈曲。以多波屈曲为初始缺陷进行非线性屈曲分析得到的储罐屈曲形状同样为沿多波分布形状,与实际工程中吸瘪储罐的屈曲形状<sup>[16]</sup>存在较大差异。此外,现有储罐屈曲数值仿真中,模型一般只包含罐壁以及局部关注的结构,并未考虑罐顶承受外压对罐壁屈曲行为的影响。同时,以往的工作并未和实际工程现场的具体参数紧密结合到一起。基于此,紧密结合新疆某航煤储罐的吸瘪事故,建立包含罐顶的储罐整体有限元模型,通过对不同工况

储罐力学行为的分析,详细探讨小型航煤储罐吸瘪的原因及机理。

## 1 吸瘪事故

2017年11月,新疆乌鲁木齐机场某 100 m<sup>3</sup> 储罐在收发油过程中发生了吸瘪事故:19:05:00,储罐开始发油,通过流量计测定的实时流量为 110 m<sup>3</sup>/h; 19:19:00,该罐的呼吸阀(最大通气量 100 m<sup>3</sup>/h)发出异常声音,安全阀低温失效,储罐吸瘪。吸瘪位置在第 2 圈和第 3 圈壁板之间,最大吸瘪深度为 10 cm,吸瘪区域直径约 1.5 m。为了对后续修复储罐提供技术支持并保障安全生产,现需对造成储罐吸瘪的原因进行详细分析,了解其屈曲形成机理。

### 1.1 储罐参数

吸瘪储罐(图 1)直径为 5.4 m,总体高度 5 m,其中罐壁部分高 4.35 m,由 3 圈层罐壁(表 1)围成,拱顶高度 0.65 m、拱顶半径 6 m、锥形罐底高度 1.5 m。经计算,储罐总容积为 118.67 m<sup>3</sup>。储罐材质为 Q235B 钢,弹性模量  $2 \times 10^5$  MPa,泊松比 0.3,数值仿真中采用的钢材本构关系为双线性本构关系,屈服强度为 235 MPa。

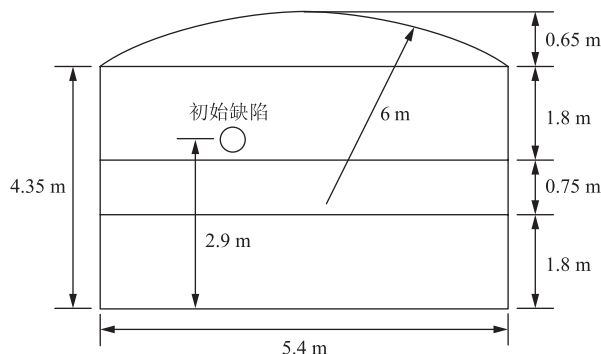


图 1 新疆乌鲁木齐机场某储罐几何模型图

表 1 新疆乌鲁木齐机场某罐壁参数表

罐壁圈层	高度/m	壁厚/mm
1	1.80	8
2	0.75	6
3	1.80	6

### 1.2 数学模型

储罐结构丧失稳定性称为储罐的屈曲。目前,主要通过特征值屈曲分析和非线性屈曲分析方法获得储罐的屈曲临界载荷<sup>[17]</sup>。特征值屈曲分析适用于预测理想弹性结构的理论失稳强度(或分叉),通过应力刚度矩阵弱化结构固有刚度矩阵,对矩阵进行奇异化处

理获得特征值和特征向量。在具体的数值仿真中,首先对结构施加单位载荷,获取应力矩阵;然后以带系数(特征值)的应力矩阵弱化原有结构刚度矩阵,最后对弱化后矩阵奇异化处理,获得特征向量和特征值。特征值即临界载荷,特征向量即临界模态<sup>[17]</sup>。非线性屈曲分析方法相对于特征值分析更准确<sup>[19]</sup>,其中弧长法<sup>[19]</sup>是结构非线性分析中稳定高效的迭代控制方法之一,在追踪结构加载路径上具有独特优势。弧长法通过给定初值(位移和载荷因子),以线性搜索的方式,基于约束方程不断迭代求解下一步位移和载荷因子,因其迭代路径为一圆弧,因此可求解下降段曲线。

## 2 模型建立

### 2.1 有限元模拟

由于航煤储罐为锥底罐,底部采用混凝土浇筑的方式作为基础,且储罐直径为5.4 m,尺度较小,因此,罐底屈曲的影响可以忽略,模型中省略了罐底部分。基于储罐几何模型,建立储罐的有限元模型(图2)。边界条件设置为:基于混凝土约束锥底的形式,罐壁底部采用全约束。

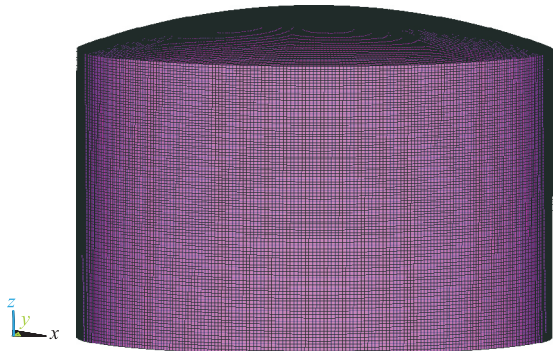


图2 航煤储罐有限元模型图

在屈曲分析中,采用高阶板单元(shell181)模拟罐壁。该种单元是一种4节点非线性单元,每个节点具有6个自由度,分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴3个方向的平动和转动自由度,适用于对具有一定厚度的壳体进行非线性计算,已被不少学者用来进行储罐的屈曲分析<sup>[2,8,11,18]</sup>。在几何模型划分单元的过程中,需要考虑单元密度的影响:过于粗糙的单元容易影响结算结果,过于密集的单元则容易造成计算成本的浪费。研究中给定4种不同的单元划分方案(表2),对比相同加载下的模态特征值变化,可得最佳的单元划分方案为方案3,即模型包含39 920个单元、40 041个节点。

表2 不同单元划分方案参数

单元划分方案编号	单元数	节点数	特征值
1	4 224	4 273	43.17
2	13 056	13 153	41.53
3	39 920	40 041	41.21
4	65 649	65 472	41.10

### 2.2 工况设置

发油作业开始时刻,满罐罐内航煤容积 $100\text{ m}^3$ ,结合储罐规格、形状、尺寸,此时罐内的空置空间为 $18.67\text{ m}^3$ 。满罐工况下以 $110\text{ m}^3/\text{h}$ 流量外输14 min后,外输 $25.67\text{ m}^3$ 航煤,考虑储罐形状,可确定此时储罐液位高度为2.72 m。根据现场状况确定储罐的两个重要参考压差:①呼吸阀通气量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ ,以标准大气压为参考,罐内负压为11.2 kPa;②假定呼吸阀通气量为0,以标准大气压为参考,罐内负压为58.0 kPa。基于以上两个重要参考压差,设置以下5种工况进行数值:①工况1,无初始缺陷储罐特征值屈曲分析;②工况2,无初始缺陷储罐在极限屈曲载荷下的力学行为研究;③工况3,无初始缺陷储罐在负压11.2 kPa下的力学行为研究;④工况4,有初始缺陷储罐在极限屈曲载荷下的力学行为研究;⑤工况5,有初始缺陷储罐在负压11.2 kPa下的力学行为研究。

以上工况中,每种工况都考虑了液位导致的静水压力对储罐力学行为的影响。对于工况1,先进行无压差液位静力分析,再将分析结果产生的变形更新到有限元模型中,进行特征值屈曲分析。对于工况4和工况5,缺陷点位于储罐吸瘪变形最大点附近区域(图1的初始缺陷位置),距离罐底2.9 m。建造中卷板焊接工序和可能的重物撞击造成该区域产生一定的几何形变。为此,在储罐吸瘪大变形的中心位置施加1 kPa面载,将节点位移数据放大后更新到有限元模型中形成初始缺陷。文献[11]表明,有初始缺陷的储罐在进行非线性屈曲分析时,临界值小于特征值屈曲分析得到的临界载荷。同时,在非线性屈曲分析中,外载荷高于特征值临界载荷25%左右。因此,工况4中施加的载荷为50 kPa。除工况1采用特征值屈曲分析外,其余工况均采用弧长法<sup>[20]</sup>进行非线性屈曲分析。

## 3 问题求解及讨论

### 3.1 特征值屈曲分析

对工况1进行特征值屈曲分析,得到储罐屈曲的

模态和特征值载荷(图3)。结合特征值确定特征值屈曲储罐的临界载荷为41.2 kPa。储罐的屈曲变形主要发生在罐壁上,由储罐变形轴向分布图(图3a)可见,储罐屈曲后形成了沿中心对称分布的波状变形。屈曲变形沿储罐高度分布不同(图3b),靠近罐底的位置变形较小;罐壁中、上部第2节和第3节节筒变形较大,这与储罐吸瘪后变形的的位置接近;受罐顶约束的影响,与罐顶连接的罐壁处变形较小,仍然保持圆形截面。综上,在无缺陷状况下,储罐在41.2 kPa负压下即发生吸瘪屈曲。假定呼吸阀完全失效,形成58.0 kPa负压,储罐在无初始缺陷状况下即会出现吸瘪现象。

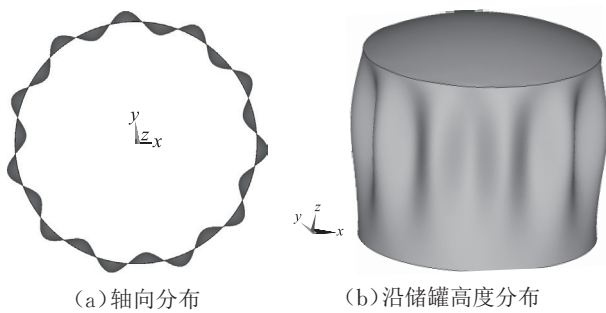


图3 工况1下储罐特征值屈曲分析变形示意图

### 3.2 无初始缺陷的储罐屈曲分析

对工况2的储罐进行有限元分析,得到储罐的节点位移和应力分布云图(图4)。可见,计算结果不收敛,载荷因子为0.87,说明无缺陷储罐承受的最大屈曲

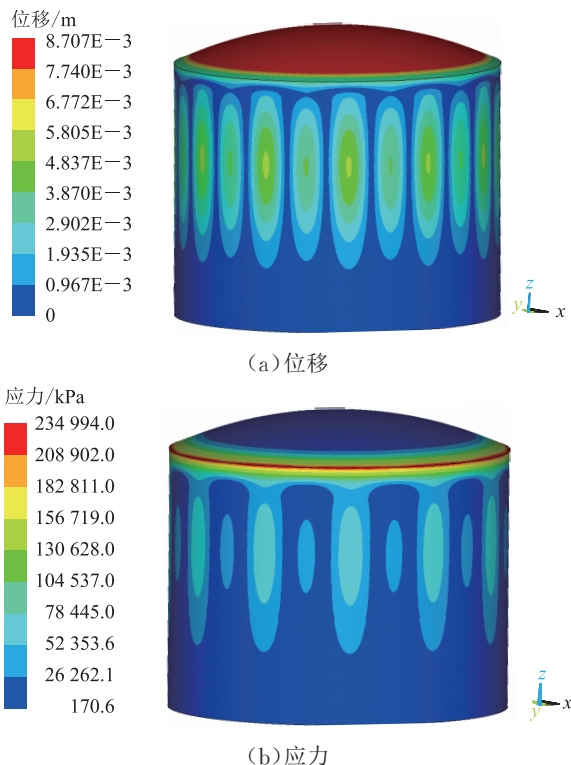


图4 工况2下储罐节点位移和应力分布云图

载荷为43.5 kPa。在该工况下,储罐罐壁沿周向出现了中心对称分布的波状变形,最大变形为0.8 cm,与实际储罐吸瘪现场的变形形式、尺寸不符。同时,在该工况下,储罐的最大应力为235 MPa,储罐进入弹塑性区间,出现了应力重新分布现象。

对工况3进行类似的非线性分析,得到储罐的节点位移和应力分布云图(图5)。可见,计算结果收敛,证明无缺陷储罐可以承受11.2 kPa的负压,且不发生屈曲。储罐的最大变形发生在罐顶,为1.7 mm。在该工况下,储罐的最大应力发生在罐顶与罐壁的交汇位置。

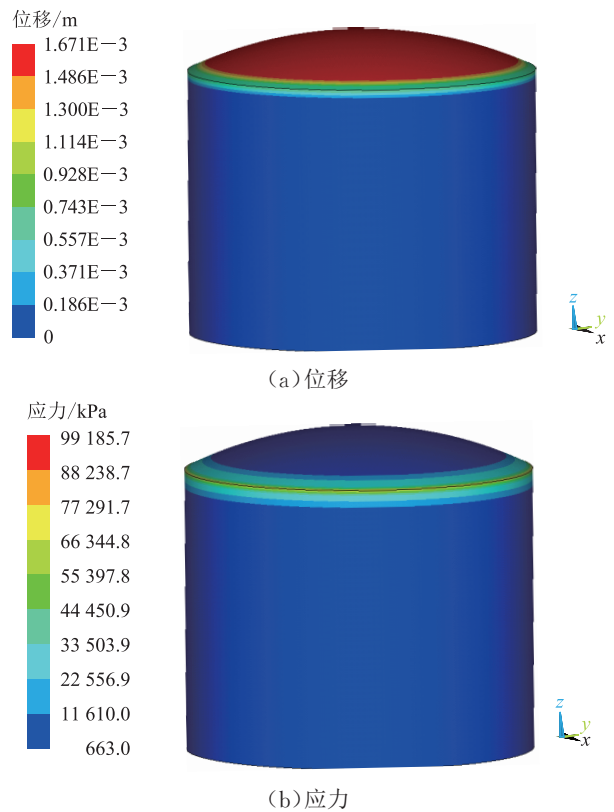


图5 工况3下储罐节点位移和应力分布云图

通过以上两个无初始缺陷的储罐在参考压力下的力学性能分析可见,无缺陷储罐在压力范围内的变形状况与现场实际情况不符,说明实际现场的储罐存在着初始缺陷。

### 3.3 有初始缺陷储罐屈曲分析

对于工况4进行非线性屈曲分析,得到储罐的节点位移和应力分布云图(图6)。可见,计算并未收敛,载荷因子最大值为0.634。说明存在初始缺陷工况下,储罐屈曲的临界载荷为外载荷的0.634倍,也就是31.7 kPa,远小于特征值屈曲载荷。储罐的最大节点位移为9.5 cm,变形最大点、大变形范围与储罐吸

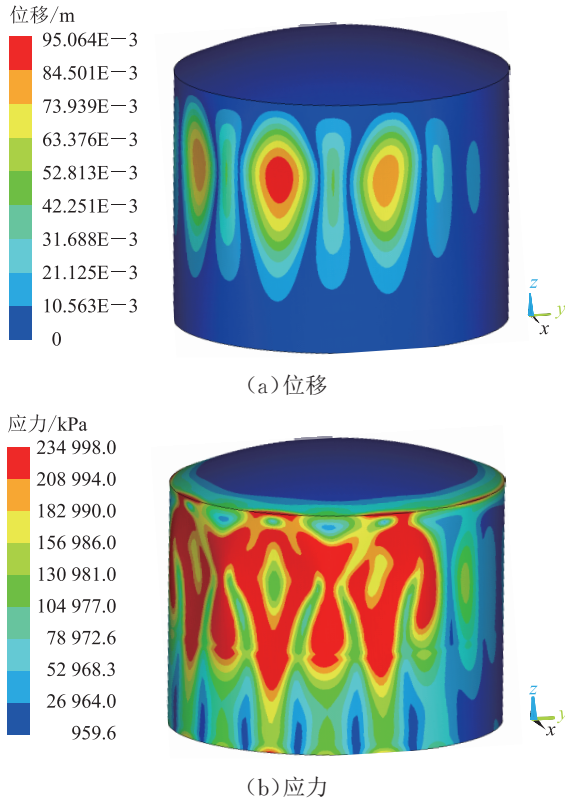


图 6 工况 4 下储罐节点位移和应力分布云图

瘪现场情况接近,位移最大点的高程为 3.08 m,在第 2 节和第 3 节板之间。储罐的应力峰值达到屈服强度 235 MPa,高应力区主要集中在储罐出现吸瘪大变形的一侧。

通过进一步模拟,可得到变形最大点位移随储罐内外压差(负压)的变化曲线(图 7)。在初始阶段,位移随负压逐渐增加而增加;当达到临界负压(31.7 kPa)时,位移继续增加;在后续阶段,由于初始缺陷的影响,载荷随位移增加出现了小幅波动,包含左右、上下浮动,其为缺陷形态和失稳路径所致,与罗珊等<sup>[19]</sup>的球壳屈曲模拟结果类似。

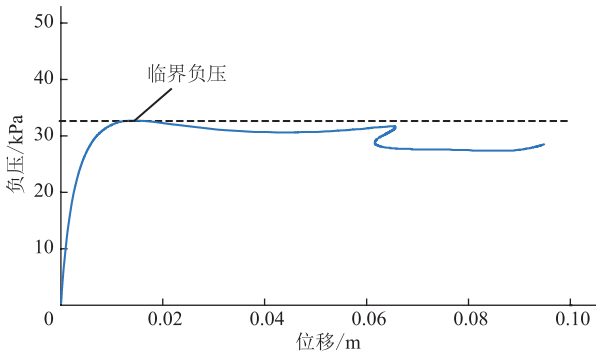


图 7 变形最大节点位移随储罐内外压差的变化曲线

对工况 5 进行非线性屈曲分析,得到储罐的节点位移和应力分布云图(图 8)。可见,计算收敛,说明储

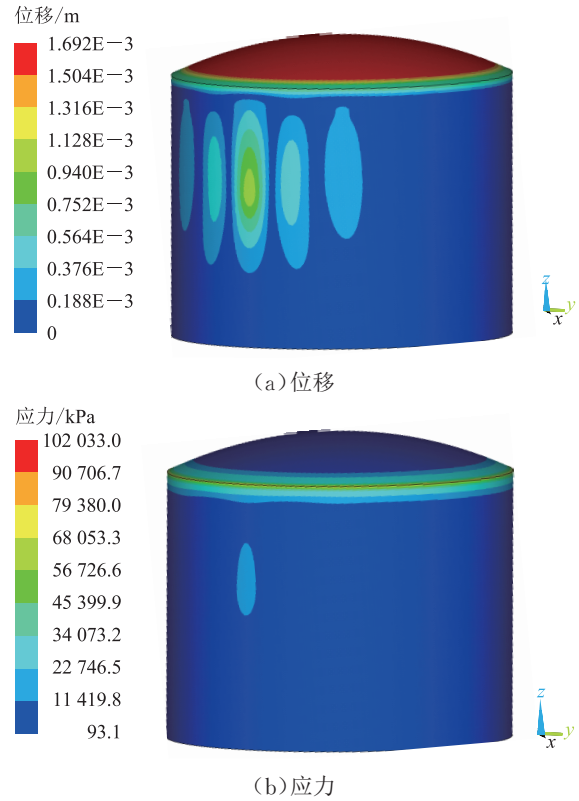


图 8 工况 5 下储罐节点位移和应力分布云图

罐在该种工况下并未发生屈曲。储罐罐壁缺陷变形量最大,为 1.7 mm,远小于现场储罐的变形量。储罐最大应力为 102 MPa,远小于屈服强度 235 MPa,整个储罐处于弹性区间,卸载后变形消失。

通过以上有缺陷储罐在不同参考压力下的非线性屈曲分析,发现吸瘪的储罐在负压 31.7 kPa 下发生屈曲。说明储罐吸瘪的原因不只在初始缺陷,呼吸阀的不正常工作也是造成储罐吸瘪的一个重要原因。基于储罐屈曲的极限载荷 31.7 kPa,结合气体状态方程和储罐内部液位分布,计算得到储罐呼吸阀的呼吸速度为 72.8 m<sup>3</sup>/h,小于设计呼吸速度 100 m<sup>3</sup>/h。事实上在事故发生后,经检测发现,储罐的呼吸阀和安全阀均未采用防冻设计,在当地 11 月低温条件下,呼吸阀功能受损。两者共同作用,导致储罐呼吸速度最大值小于设计值。

### 4 结论

(1)采用 ANSYS 特征值屈曲和非线性屈曲分析方法,对新疆某 100 m<sup>3</sup>航煤储罐吸瘪的机理进行了详细探讨,该方法对储罐结构强度评估和安全生产具有重要参考价值。

(2) 结合现场参数,可以确定储罐的负压范围在11.2~58.0 kPa之间。分析证实无缺陷储罐在该负压条件下不会吸瘪,而是储罐缺陷和负压共同造成此次吸瘪事件。因此,在结构设计、制造工艺、日常维护方面应重视缺陷及规范作业问题。

(3) 根据多种工况下的有限元分析,确定储罐呼吸阀的呼吸速度小于设计值,进一步证实了安全阀和呼吸阀对储罐安全作业的重要性。

### 参考文献:

- [1] GODOY L A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 103(1): 1-21.
- [2] 魏化中, 张占武, 丁克勤, 舒安庆. 大型立式储罐风致静力屈曲分析[J]. *化工装备技术*, 2012, 33(6): 8-12.
- WEI H Z, ZHANG Z W, DING K Q, SHU A Q. Buckling analysis of large vertical type storage tank by static wind load[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2012, 33(6): 8-12.
- [3] YASUNAGA J, YAMAGUCHI T, UEMATSU Y. Effects of wind girders on the buckling and vibration of open-topped oil storage tanks under wind loads[J]. *Journal of Wind Engineering*, 2016, 41(2): 58-67.
- [4] BURGOS C A, JACA R C, LASSIG J L, GODOY L A. Wind buckling of tanks with conical roof considering shielding by another tank[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 84: 226-240.
- [5] 杨宏康, 高博青. 立式圆柱形储液罐屈曲问题研究综述[C]. 天津: 庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会, 2011: 885-891.
- YANG H K, GAO B Q. Review of buckling research of cylindrical liquid storage tank[C]. Tianjin: Celebration on 60 years of teaching of Pr. Liu Xiliang and 11st National Modern Structure Engineering Seminar, 2011: 885-891.
- [6] DJERMANE M, ZAOUÏ D, LABBACI B, HAMMADI F. Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: Numerical evaluation of code provisions[J]. *Engineering Structures*, 2014, 70(9): 181-196.
- [7] GONG J G, TAO J, ZHAO J, ZENG S, JIN T. Buckling analysis of open top tanks subjected to harmonic settlement[J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 63(11): 37-43.
- [8] 苏文献, 韩超. 大型储罐屈曲失效及修复的有限元模拟[J]. *压力容器*, 2011, 28(1): 51-57.
- SU W X, HAN C. Finite element simulation of collapse and restoration of large-size storage tank shell[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2011, 28(1): 51-57.
- [9] RASTGAR M, SHOWKATI H. Buckling behavior of cylindrical steel tanks with concavity of vertical weld line imperfection[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 145: 289-299.
- [10] SHOKRZADEH A R, SOHRABI M R. Buckling of ground based steel tanks subjected to wind and vacuum pressures considering uniform internal and external corrosion[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 333-350.
- [11] 张浩. 10万m<sup>3</sup>浮顶罐在罐底沉降及风载荷作用下的屈曲行为分析与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 46-48.
- ZHANG H. Buckling behavior and experimental research of floating roof tanks subjected to settlement and wind load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 46-48.
- [12] 孙颖, 崔利富, 孙建刚, 赵颖华. 三向地震激励下浮顶储罐动力屈曲[J]. *大连海事大学学报*, 2012, 38(3): 121-125.
- SUN Y, CUI L F, SUN J G, ZHAO Y H. Dynamic buckling of vertical storage tanks with floating roof under 3-D earthquake excitation[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2012, 38(3): 121-125.
- [13] 宫建国. 立式圆柱形钢制储罐在谐波沉降下的屈曲行为及缺陷敏感度研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 109-110.
- GONG J G. Buckling behavior and imperfection sensitivity analyses of vertical cylindrical steel tanks subjected to harmonic settlement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 109-110.
- [14] GRIFFIN M L. Protecting atmospheric storage tanks against vacuum collapse[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(2): 83-89.
- [15] 徐英, 杨一凡, 朱萍. 球罐和大型储罐[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 178-180.
- XU Y, YANG Y F, ZHU P. Spherical and large storage tanks[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 178-180.
- [16] 林寅. 大型钢储罐结构的风荷载和风致屈曲[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 92-110.
- LIN Y. Wind load and wind-induced buckling of large steel tanks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 92-110.
- [17] 赵慧磊. 大型储罐外压稳定性分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2009: 21-22.
- ZHAO H L. Study of stability of large tank subjected to external pressure[D]. Beijing: Beijing University of Chemical

(下转第65页)

- fluorescence spectrometry[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 325(3): 751-756.
- [17] 孟现阳, 张建波, 吴江涛. R600a/矿物油的黏度和密度[J]. 化工学报, 2011, 62(6): 1481-1486.  
MENG X Y, ZHANG J B, WU J T. Viscosity and density of R600a/mineral oil[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2011, 62(6): 1481-1486.
- [18] 冯松, 毕勤成, 刘朝晖, 潘辉, 曹冬冬. 采用双毛细管等流量法测量航空煤油 RP-3 的动力黏度[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(3): 48-53.  
FENG S, BI Q C, LIU Z H, PAN H, CAO D D. Viscosity measurement of aviation kerosene RP-3 using a double-capillary viscometer with equal mass flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(3): 48-53.
- [19] 刘辉. 水分析快速测试仪在单井含水化验中的应用[J]. 石油石化节能, 2020, 10(9): 11-14.  
LIU H. Application of water analysis rapid tester in water cut test of single well[J]. Energy Conservation in Petroleum, 2020, 10(9): 11-14.
- [20] 冯连坤, 任红涛, 陈晓华. 航空煤油水分离指数影响因素分析及对策[J]. 石化技术与应用, 2020, 38(5): 325-327, 331.  
FENG L K, REN H T, CHEN X H. Influencing factors analysis of kerosene water separation index and its countermeasures[J]. Petrochemical Technology and Application, 2020, 38(5): 325-327, 331.
- [21] 王晶, 陈震. 华南沿海黄色粉土石英颗粒的扫描电镜特征及其成因的指示[J]. 电子显微学报, 2020, 39(4): 370-376.  
WANG J, CHEN Z. SEM study of quartz grains of yellow silt in the coastal area of South China and the interpretation of its origin[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2020, 39(4): 370-376.
- (收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2020-10-23; 编辑: 李在蓉)

**作者简介:** 何驰, 男, 1993 年生, 工程师, 2019 年硕士毕业于中国石油大学(北京)机械工程专业, 现主要从事流体机械及工程的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 18810656839。Email: hechicup@163.com

**通信作者:** 李振林, 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 1993 年硕士毕业于中国石油大学(北京)石油与天然气机械工程专业, 现主要从事地面石油设备及天然气计量方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 13601390549。Email: zhenlinli@263.net

(上接第 38 页)

- Technology, 2009: 21-22.
- [18] 高健富, 高炳军, 靳达, 李娜, 宋晞明, 傅建楠. LNG 储罐罐体结构与载荷的关联性[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 321-327.  
GAO J F, GAO B J, JIN D, LI N, SONG X M, FU J N. Relevance between structure and load of LNG storage tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 321-327.
- [19] 罗珊, 王纬波. 基于弧长法的受压球壳稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 161-167.  
LUO S, WANG W B. Stability analysis of spherical pressure hull based on arc length method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 161-167.
- [20] 张翀宇. 原油储罐有缺陷状态下结构稳定性的研究[J]. 装备制造技术, 2016(11): 161-164.  
ZHANG C Y. Study on the structural stability of crude oil tank with defective condition[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(11): 161-164.
- (收稿日期: 2018-09-16; 修回日期: 2020-11-13; 编辑: 张雪琴)
- 作者简介:** 刘小川, 男, 1973 年生, 高级工程师, 1998 年毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料储运专业, 现从事油气储运方向的研究工作。地址: 北京市海淀区马甸路 2 号, 100088。电话: 010-59890340。Email: liuxc@cnaif.com
- 通信作者:** 许晶禹, 男, 1975 年生, 研究员, 2007 年博士毕业于中国科学院力学研究所工程力学专业, 现从事多相流体力学、油气储运理论与技术方面研究工作。地址: 北京市海淀区北四环西路 15 号, 100190。电话: 010-82544179。Email: xujingyu@imech.ac.cn