

文章编号: 1000-8241(2013)04-0376-05

大型浮顶油罐应力测试及数值模拟

富东慧¹ 刘发安² 杨志宇³ 李轩¹

1. 天津大学机械工程学院力学系, 天津 300072; 2. 中国石油集团工程设计有限责任公司华北分公司, 河北任丘 062552;
3. 天津市建工工程总承包有限公司, 天津 300072

摘要: $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 浮顶油罐是我国目前广泛采用的大型储油设施, 为获得关键部位的应力分布情况, 并检验设计的合理性和运行的安全性, 对其进行现场充水应力测试并进行有限元模拟计算。采用电测法, 将振弦式应变计与电阻应变片结合使用。测试结果表明: 罐体在水深为 20.2 m 工况下达到最大工作应力, 最大环向应力出现在罐壁 3[#] 板上部和 4[#] 板下部, 测试值与模拟计算值基本一致。按分析设计标准对油罐进行评定, 结果表明: 该油罐设计合理, 在正常操作条件下应力水平完全满足强度要求。测试方法及结果可为今后 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 及更大体积油罐的设计和测试提供参考。(表 3, 图 6, 参 13)

关键词: 油罐; 应力测试; 振弦式应变计; 电阻应变片; 数值模拟

中图分类号: O348.2

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.04.007

Stress test and numerical simulation of large-scale floating roof oil tank

Fu Donghui¹, Liu Fa'an², Yang Zhiyu³, Li Xuan¹

1. Department of Mechanics, College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072;

2. PetroChina Engineering Huabei Company, Renqiu, Hebei, 062552;

3. Tianjin Construction Engineering Main Contracting Company Limited, Tianjin, 300072

Abstract: Capacity at $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ floating roof oil tank is a kind of large-scale oil storage device used widely in China. To obtain stress distribution in key positions and check design rationality and operation safety, the field water filling stress test and finite element simulation calculation are carried out. The electrometric method is used through the combination of vibrating wire strain gauge and resistance strain gauge. As shown from the test results, the tank body reaches the maximum working pressure at the depth of 20.2 m, maximum circumferential stress occurs on the No.3 plate and below the No.4 plate of tank wall and testing value is basically consistent with the simulated calculation value. The oil tank is evaluated based on analysis design standard to show the oil tank is reasonably designed and its stress level can fully meet strength requirements under normal operating conditions. Testing methods and results can provide a reference to the design and testing of future $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ and larger oil tanks. (3 Tables, 6 Figures, 13 References)

Key words: oil tank, stress test, vibrating wire strain gauge, resistance strain gauge, numerical simulation

随着我国对石油消费需求量的不断增长, 大型浮顶储油罐的建造数量逐年增加^[1-2]。在石油长期储存过程中, 储油罐由于石油内压、环境因素等影响, 易发生破裂, 造成严重后果。因此, 评定大型储油罐设计合理性和运行安全性显得尤为重要。张泽盛等^[3-4]对储油罐在地震中的稳定性进行了研究, 为储油罐抗震设计提供了重要参考。但是, 储油罐在长期使用过程中, 更多时间承受的是油压静载荷, 对储油罐在静载作用

下力学响应开展研究更有意义。根据储油罐在使用过程中的应力分布特点, 陈志平等^[5]利用数值模拟方法研究了储油罐的安全性。白生虎等^[6-7]对储油罐静态应力进行了测试, 但其采用的电阻应变片方法受环境影响较大, 需要温度补偿。

以目前广泛应用的 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 大型浮顶油罐为例, 采用振弦式表面应变计与电阻应变片相结合的方法, 测试其在各种工况下的应力分布, 以评定其运行安

全性。利用组合圆柱壳法^[8-10]的理论计算值可对试验测试结果进行验证,但其计算过程繁琐。

以下采用有限元数值模拟方法对试验结果进行验证,结果表明:试验结果与数值模拟结果具有很好的一致性,表明该方法实测应力结果的准确性和整体应力测试工作的有效性。

1 油罐结构参数

油罐直径 80 m,底板直径 80.264 m,高 21.8 m,最高液位高度 20.2 m。油罐罐壁由不同厚度和材质的 9 块钢板焊接而成,由下至上编号 1[#]~9[#](表 1)。

表 1 油罐参数

板类型	板号	高度 /mm	壁厚 /mm	材质
罐壁板	1	2 420	32	12MnNiVR(08MnNiVR)
	2	2 420	27	12MnNiVR(08MnNiVR)
	3	2 420	22	12MnNiVR(08MnNiVR)
	4	2 420	19	12MnNiVR(08MnNiVR)
	5	2 420	15	12MnNiVR(08MnNiVR)
	6	2 420	12	12MnNiVR(08MnNiVR)
	7	2 420	12	Q345R
	8	2 380	12	Q235-B
	9	2 380	12	Q235-B
底板	边缘板	1 908	20	12MnNiVR(08MnNiVR)
	中幅板	—	11	Q235-B

2 应力测试

2.1 测试方法

对油罐进行注水试验,在静态水压的载荷条件下,采用电测法测试其表面的应力分布。首先分析应力状态,以确定贴片方案。油罐主要承受静水压力,罐体内外壁的应力状态基本为单向应力(环向应力)状态,底板内表面和外表表面基本为两向应力状态。

罐体内外壁及罐内底板边缘板的应变测试使用 TFL-S-BM15 振弦式表面应变计。单向应力状态的每个测点沿应力方向安装一支振弦式表面应变计,两向应力状态的每个测点安装两支。测试参数为频率和温度,由便携式振弦式频率测试仪采集数据,根据频率计算应变,并对温度影响进行修正^[11]。由于底板外伸板外伸尺寸小,采用粘贴 BE350-2FB 电阻应变片的

方法进行测试。底板外伸表面为两向应力状态,每个测点沿两个应力方向粘贴应变片,采用全桥连接法,并设置温度补偿片。测试参数为表面应变,由 YJ28A-P10R 静态电阻应变仪测量。

2.2 测点分布

测试重点是储油罐罐壁的环向应力沿纵向分布情况,同时测试储油罐底板等应力较大部位的应力分布。测试共安装振弦式应变计 108 个,粘贴电阻应变片 32 片。测点分别选择油罐罐壁板外表面、底板边缘板外伸表面、罐壁板内侧,罐内底板边缘板表面。

2.2.1 罐壁外侧

罐壁壁板最上面的 8[#] 和 9[#] 钢板因受水压力较小未设置测点,1[#]~7[#] 钢板沿纵向设置测点。沿罐壁外侧对称选择 3 个截面(3 个截面对应位置测点相同),分别以 A、B、C 表示。每个截面的最上与最下两个测点分别距离上、下焊缝 40 mm,其余测点在两者之间均布(图 1)。

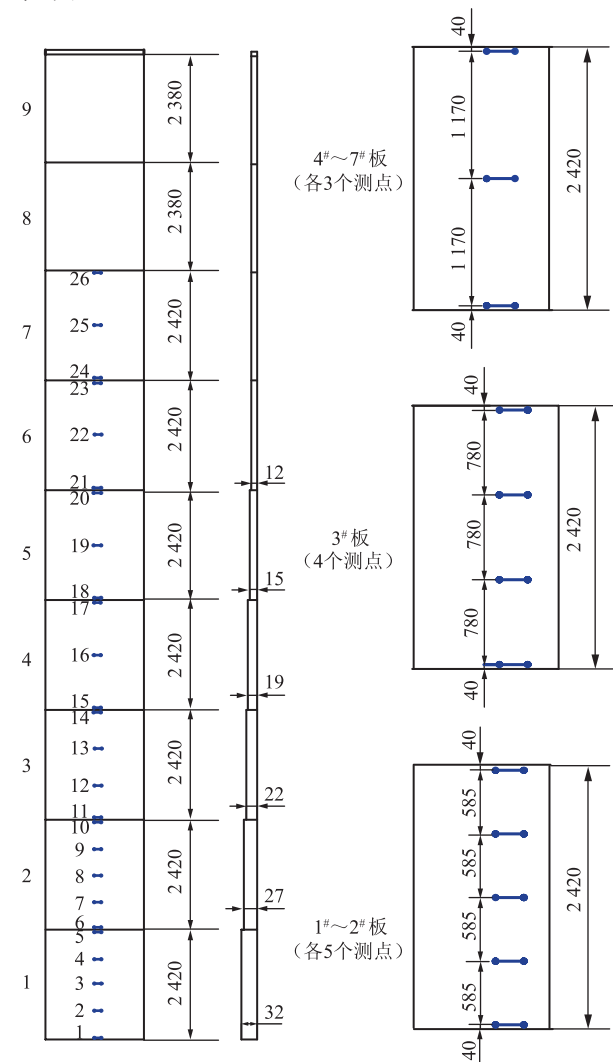


图 1 罐壁外侧测点分布示意图

2.2.2 罐壁内侧与罐内底板的边缘板

考虑无水状态下浮顶位置限制,罐壁内侧仅在1#板测试其环向应力。罐内测试时,由于振弦式应变计是在静水压力和长期浸泡的工况下工作,被破坏的可能性很大。为保证测试数据的完整准确,在相邻的位置(距离1.5 m)设置两组测点(图2)。

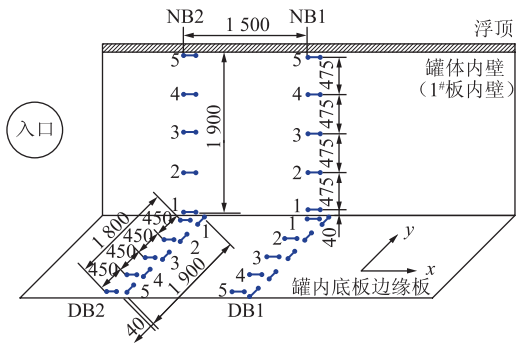


图2 罐壁内侧与罐内底板边缘板的测点分布示意图

2.2.3 罐外底板的外伸表面

在罐外底板的外伸部位沿其外伸宽度方向布置2个测点,每个测点均需测试径向应力和环向应力。设置两组,共计4个测点(图3)。

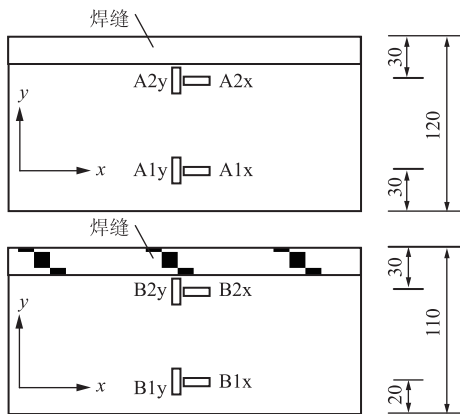


图3 罐外底板外伸表面的测点分布示意图

2.3 测试过程

试水前,按照测点分布焊接振弦式应变计和粘贴电阻应变片,并完成接线工作和仪器调试,再进行振弦式应变计初值测定和电阻应变计的调零工作。试水后,按照不同水位高度分为多种工况,分别测试相应工况下所有测点的应变值,以计算当前工况的应力。整个测试过程历时60 d。

3 测试结果与分析

对不同工况下的参数测试,得到了不同测点应变

值,采用虎克定律将所测应变值换算成应力值。结果表明:各个测点应力与注水高度呈线性关系,应力随水位增高而增大,在20.2 m工况下达到最大值。以下按测点分布对测试数据进行具体分析。

3.1 罐壁外侧

根据最危险工况(水深20.2 m)下3组截面上各测点的应力情况(图4),罐壁外部测点的环向应力均为拉应力,应力最大区域较为集中地出现在14#~16#测点。经分析可得:①从整体受力上,罐内受到20.2 m的静水压力,越向下部,水压越大,因此罐壁受力越大,测点16#~26#的应力数值符合罐壁受力趋势,测得的应力分布趋势体现了油罐容器受静水压力的受力特点。②16#测点以下至4#测点,分别位于4#板至1#板,随着板厚增加,罐壁承载能力进一步增强,因此应力数值并未随水压的进一步增加而增长。尽管应力值仍较高,但呈现下降趋势。3#测点以下,应力值下降趋势更为明显,在受力上充分体现了边界条件的影响。③应力数值超过300 MPa的点出现在4#~16#测点。这些测点分布在1#板的上半部位、2#~4#板的下半部位,即以底板为基准,高度为1.5~9.5 m范围内是罐壁受力较大的区域,受力最大的区域为3#板上部和4#板下部,高度在7~9 m范围内。A截面的16#测点为该工况下测得的最大应力值,达到362.91 MPa。

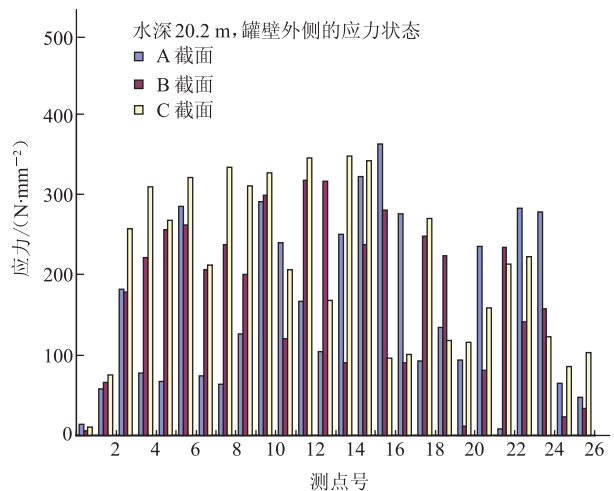


图4 危险工况下罐壁外侧的应力状态

3.2 罐壁内侧与罐内底板的边缘板

根据最危险工况下罐壁内侧与罐内底板边缘板的应力测试结果(表2)可知,罐内侧壁均为拉应力,应力数值较小,最危险工况下应力值量级较小,内壁的变形程度和环向拉应力数值远小于储罐罐壁外侧对应蓄所位置。

罐内底板的边缘板部分,无论是径向还是环向,均包含拉、压应力,说明其受力状态复杂,但应力数值均较小。在 20.2 m 深水压的作用下,最大环向应力为 12.82 MPa,说明其受到地基的刚性支承和周边焊接的良好边界条件影响。与环向应力相比,径向应力数值有所增加,特别是靠近壁板焊缝的 1[#] 测点,受水压和边界条件共同影响,有明显向下弯曲的趋势,径向拉应

力最大达到了 105.36 MPa。另外,由于罐内条件苛刻,应变计损毁较多。

3.3 罐外底板的外伸表面

根据不同工况下罐外底板外伸表面的应力测试结果(表 3,由电阻应变片测得),罐外底板边缘的外伸部位受到内部边缘板受力变形带来的附加影响和焊缝边界条件的共同作用,应力状态较复杂。

表 2 危险工况下罐壁内侧与底板边缘板的应力测试结果

板号	测点	应力 /MPa	板号	测点	应力 /MPa
内壁二组板	NB2-5	56.27	内壁一组	NB1-5	37.71
	NB2-4	35.10		NB1-4	42.81
	NB2-3	37.25		NB1-3	31.79
	NB2-2	21.28		NB1-2	20.31
	NB2-1	6.56		NB1-1	—
底板二组环向	DB2-1x	6.83	底板一组环向	DB1-1x	—
	DB2-2x	6.20		DB1-2x	8.03
	DB2-3x	-6.19		DB1-3x	8.43
	DB2-4x	-4.97		DB1-4x	-7.13
	DB2-5x	5.85		DB1-5x	12.82
底板二组径向	DB2-1y	105.36	底板一组径向	DB1-1y	93.52
	DB2-2y	-33.49		DB1-2y	-29.94
	DB2-3y	-32.66		DB1-3y	27.39
	DB2-4y	-18.71		DB1-4y	-21.07
	DB2-5y	11.94		DB1-5y	-6.02

表 3 不同工况下底板外伸表面的应力测试结果

水深 /m	A1_σ _x /MPa	A1_σ _y /MPa	A2_σ _x /MPa	A2_σ _y /MPa	B1_σ _x /MPa	B1_σ _y /MPa	B2_σ _x /MPa	B2_σ _y /MPa
无水	9.9	8.3	4.3	2.2	11.9	14.1	12.2	6.5
5.5	16.4	10.2	10.4	12.6	21.3	32.7	26.0	17.6
11.0	18.8	12.2	12.4	13.6	26.1	34.9	29.4	5.9
15.2	19.2	11.5	3.9	-12.0	21.5	31.9	21.2	-18.9
20.2	12.0	6.3	-18.5	-72.1	15.9	28.8	3.0	-73.5

当水深低于 15.2 m 时,径向与环向应力均为拉应力,数值很小。当水深在 15.2 m 以上时,靠近焊缝的测点径向应力变为压应力,最大值为 73.5 MPa。拉、压应力数值均较小,有较高的安全系数保证。

4 有限元分析

为了考察实测应力值的准确程度,应用 ANSYS 软件对罐体的静水压受力模型进行有限元计算。油罐受到罐体自身重力及静水压力两种载荷作用,因其属于轴对称结构,故采用常用的轴对称有限单元划分整

个罐体^[12-13]。罐体内部水深为 20.2 m,将水压作用转换为荷载施加在罐体内部与水接触的部位,罐体底部施加均布面荷载,侧边施加沿罐体内水深变化的面荷载(图 5、图 6)。

通过有限元分析,可以得到油罐环向应力沿侧壁高度呈规律性变化,侧壁 2[#] 板位置的应力数值最大,达到 256.9 MPa(图 6)。对比实测应力分析结果,模拟计算得到了与之相同的应力变化趋势,但数值略有不同,实测应力值略高于模拟计算结果。由此可以确定实测应力结果的准确性和整体应力测试工作的有效性,同时体现了实际工程结构的复杂性。

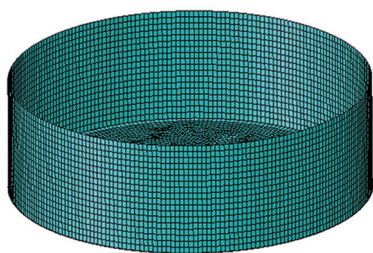


图5 罐体划分网格图

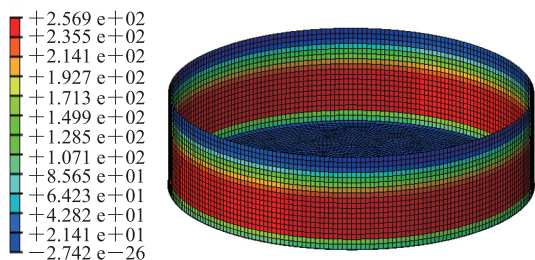


图6 环向应力场模拟计算结果

5 结论

(1) 整个罐体在水深为 20.2 m 的工况下达到最大工作应力, 此时的应力分布状态为: 罐壁外侧距底板高度约 7~9 m 的范围为环向拉应力的最大区域, 其最大环向应力为 362.91 MPa; 罐壁内最大环向拉应力为 56.27 MPa, 测点距底板高度 1.94 m; 罐内底板边缘环向应力远小于径向应力, 最大径向应力为 105.36 MPa, 测点在底板上距罐壁 40 mm; 罐外底板边缘板的外伸表面环向应力小于径向应力, 径向应力为压应力, 最大径向应力为 73.5 MPa, 测点距罐壁为 30 mm。

(2) 通过有限元方法计算了罐壁外侧的环向应力分布情况, 并将计算应力与实测应力进行比较, 两者总体吻合较好, 计算值略小于实测值。

(3) 相对于 340 MPa 的许用应力值, 绝大部分测点具有较高的安全系数保证。仅罐壁外侧个别测点的环向应力略微超出, 但该板材屈服强度为 470 MPa, 且测点平均环向应力值小于许用应力值, 故油罐设计满足强度要求。

(4) 罐壁外侧的应力分布处于非对称状态, 这与油罐构造和使用次数有关。油罐由不同厚度和材质的钢板焊接而成, 钢板面积大、焊缝数量多, 结构复杂, 应力集中区域较多, 同时基础不均匀沉降也可能导致油罐受力不均匀。此外, 油罐初次承载, 受力不均匀属正常, 在长期、反复受到均匀荷载作用后, 其结构受力将逐渐趋于均匀。

参考文献:

- [1] 李宏斌. 我国超大型浮顶油罐的发展[J]. 压力容器, 2006, 23(5): 42-44.
- [2] 高威, 隋明璋, 黄开佳. 大型原油储罐技术综述[J]. 石油化工设备, 2000, 29(5): 28-31.
- [3] 张泽盛, 王日新, 孟昭寅. 地震作用下石油储罐浮顶强度及稳定性分析[J]. 天津大学学报, 2000, 33(6): 736-739.
- [4] 李长升, 项忠权, 丁景运. 软土地基上储油罐的抗震设计[J]. 天津大学学报, 2001, 34(5): 577-581.
- [5] 陈志平, 曾明, 余维麟, 等. 大型油罐应力分析与屈曲稳定性研究[J]. 油气储运, 2008, 27(12): 7-12, 46.
- [6] 白生虎, 陈志平, 武铜柱, 等. $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 国产钢板浮顶油罐应力测试分析[J]. 石油化工设备技术, 2010, 31(1): 5-8.
- [7] 应宏伟, 杨晓刚, 卞守中, 等. 大型油罐地基现场试验分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 157-161.
- [8] Chen Z P, Duan Y Y, Shen J M. A simplified method for calculating the stress of a large storage tank wall[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2007, 221(3): 119-127.
- [9] Wu T. More accurate method devised for tank-bottom annular plate design[J]. Oil and Gas Journal, 1996, 94(21): 81-83.
- [10] Wu T Y, Liu G R. Comparison of design methods for a tank-bottom annular plate and concrete ringwall[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(9): 511-517.
- [11] 卢伟升, 陈常松, 涂光亚, 等. 振弦式应变传感器的温度影响修正[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(8): 49-51.
- [12] Du Guofeng, Xu Chenxiang, Jia Shanpo. Study on damage performance of oil storage tank in the basis of modal test and FEA[J]. Advanced Materials Research, 2010, 163: 2 507-2 510.
- [13] Wang Jinlong. Simulation study of the oil tank under seismic loads[J]. Advanced Materials Research, 2011, 368: 1 014-1 017.

(收稿日期: 2012-04-13; 编辑: 潘红丽)

作者简介: 富东慧, 工程师, 1973年生, 2010年博士毕业于天津大学固体力学专业, 现主要从事实验固体力学、生物力学等技术方向的研究工作。

电话: 13920452546; Email: testfu@tju.edu.cn

Fu Donghui, Ph.D, engineer, born in 1973, graduated from Tianjin University, solid mechanics, in 2010, engaged in the research of experimental solid mechanics, biomechanics and other directions.

Tel: 13920452546, Email: testfu@tju.edu.cn