

文章编号: 1000-8241(2017)10-1128-05

大型非锚固变壁厚外浮顶原油储罐的应力测试

石磊^{1,2} 帅健¹ 许葵¹ 傅伟庆³ 吴龙平³1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院;
2. 中国石油化工股份有限公司抚顺石油化工研究院; 3. 中国石油天然气管道工程有限公司

摘要: 大型原油储罐多为非锚固变壁厚结构,在液压作用下,地基沉降会引起底板边缘板翘曲及壁厚变化处的应力波动等复杂现象。为了研究大型储罐卸载后各圈壁板、底板的应力大小及其分布规律,采用电阻应变测量技术对水压试验中 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的外浮顶原油储罐(直径 80 m、罐高 21.8 m)进行现场应力测试,得到储罐底板及壁板的应力数据,分析储罐关键部位的应力水平、分布特征及其原因。结果表明:在最高液位下,储罐底板主要表现为径向弯曲应力;储罐壁板根部主要为轴向弯曲应力,随测点高度升高,罐壁在水压作用下发生膨胀变形,主要表现为环向薄膜应力。该研究结果为储罐运行的安全评定提供了参考依据。(图 5,表 1,参 20)

关键词: 大型非锚固油罐; 变壁厚; 应力测试; 应力分布; 大角焊缝

中图分类号: TE821

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.10.004

网络出版时间: 2017-7-12 9:06:23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20170712.0906.002.html>

Stress testing on large-scale unanchored tapered oil storage tanks with external floating roof

SHI Lei^{1,2}, SHUAI Jian¹, XU Kui¹, FU Weiqing³, WU Longping³

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing); 2. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals; 3. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation

Abstract: Large-scale oil storage tanks are mostly unanchored and tapered, so complicated phenomena will emerge on the tanks as the foundation settles under hydraulic pressure, such as the warping of edge plate at the bottom and the stress fluctuation at the shell thickness changing zones. To investigate the level and distribution of stress at the shell and bottom board of large-scale loaded tanks, field stress testing was performed on an external-floating-roof oil storage tank with a capacity of $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ($D=80 \text{ m}$, $H=21.8 \text{ m}$) during the hydrostatic testing by using the resistance strain measurement technology. Based on the stress measured at the tank shell and bottom board, the levels and distribution characteristics of stress at key parts of storage tank and their causes were analyzed. It is indicated that radial bending stress is dominant at the tank bottom while the liquid level is the highest. Axial bending stress is dominant at the root of tank shell. With the rising of measurement point height, the tank shell suffers swelling deformation under the effect of hydraulic pressure, and the circumferential membrane stress is dominant. The research results can be used as the reference for the operation safety assessment of storage tanks. (5 Figures, 1 Table, 20 References)

Key words: large-scale unanchored oil storage tanks, tapered, stress testing, stress distribution, shell-to-bottom fillet weld

随着国家战略石油储备建设的深入开展,中国已有近 7 000 座大型原油储罐,单座储罐的最大罐容为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储罐已屡见不鲜^[1]。随着储罐罐容和直径的不断增大,储罐作为短圆柱薄壳结构的特性也随之退化^[2-4]。由于加工制造、焊接变

形、地基沉降及内压等载荷的影响,储罐结构的力学性能随之改变,应力状态非常复杂^[5-8]。如何对储罐这种大型结构进行应力测试,快速准确地获得其关键位置的应力与应变分布,实现在役设备的强度评估,是石油石化企业目前面临的重要问题。应力测试技术始于

20世纪30年代,目前已有10多种测试方法^[9-11]。全尺寸结构静力试验的应变和挠度测量主要采用电测法,即在试件上粘贴电阻应变片,并布置电位移计。电测法具有理论完善、技术成熟、测量精度高等优点,目前已广泛应用于现场测试中。零构件静力试验采用电测法、光测法及机械法,较先进的测试方法有光弹性法、激光全息法(包括全息光弹性)及X射线测残余应力法等。

大型储罐体积庞大,结构复杂,现场环境恶劣,危险性高,测试时间长,工作量大。为了获得大型储罐受载后各圈壁板、底板的应力大小及分布规律,评估设计方法的合理性和储罐运行的可靠性,采用电测法对储罐关键部位进行力学分析。以中国某油库 $10\times 10^4\text{ m}^3$ 大型储罐为例,对水压试验中储罐壁板和底板的关键区域进行应力测试,获得其应力分布规律并进行数据分析,从而为储罐的安全评定提供参考。

1 测试方案

实验应力分析是解决工程强度问题的重要手段,在此采用电阻应变测量法获得储罐在载荷作用下的应力分布^[12-15]。测试系统由电阻应变仪、电阻应变计、计算机及连接导线等组成(图1)。应变仪采用4套DH3816N静态应变测试系统,其属于全智能化巡回数据采集系统。根据 $10\times 10^4\text{ m}^3$ 大型非锚固变壁厚外浮顶原油储罐的应力测试实验制定其测试方案:应变仪采用1/4接线法,补偿片贴在与储罐材质相同的钢板上,放置在工作片附近,以消除温度影响。罐内底板采用防水应变计TJ120-4AA,电阻值 $120\pm 0.1\ \Omega$;储罐外壁采用日本进口的WFLA-6-11-3LT型防水自补偿单向应变计,电阻值 $120\pm 0.5\ \Omega$ 。多次现场测试结果表明,所选的同型应变计性能较稳定。



图1 DH3816N静态应变测试分析系统示意图

为了避免计算机故障引起数据丢失而影响测量数据的准确性,实验采用4台品牌计算机,每台计算机控制1台电阻应变仪,通过网线可靠连接。为了满足小

信号和抗干扰性的要求,将导线沿储罐外壁保温层支架固定,以降低实验过程中可能发生的意外(导线的拉扯、碾压、晃动等),减少现场交叉施工和复杂环境对测试产生的影响。根据需要对应变计进行机械防护和防潮处理,尤其罐内的水下应变计,需要进行多重保护。在测试中,罐外壁的应变计防护采用Three Bond 1521B合成橡胶类粘合剂涂刷3次;罐内应变计首先采用AZ-709胶防护,并覆盖SB硅橡胶保护层,最后再用Three Bond 1521B进行防水保护。

在应变测量中,为了降低温度对测试结果的影响,采用双应变片法进行温度补偿。由于油罐体积巨大,不同区域的温度可能有所不同,故补偿块放置在测试区域附近,与测点温度保持一致。同时,将调零和数据采集放在日出之前或日落之后进行,因为此时油罐各处温差较小。对于罐内测点,采用水下补偿的方法,将补偿块置于水中,使测点与补偿片的温度基本一致。此外,连接工作片与补偿片的导线应尽可能等长,材质相同,温度环境相同,以实现导线的温度补偿。

2 测点布置

以中国某油库 $10\times 10^4\text{ m}^3$ 储罐为测试对象,其直径80 m,罐壁高21.8 m,设计液位高19.8 m,罐底板呈中间高、四周低的锥形,锥度为8/1 000(表1)。

表1 某油库 $10\times 10^4\text{ m}^3$ 储罐罐体的主要参数

板材名称	板厚/mm	板高/mm	板材型号	屈服强度/MPa
罐底中幅板	12.0	—	Q235-B	235
罐底边缘板	20.0	1 980(宽)	08MnNiVR	490
罐底圈板	32.0	2 420	08MnNiVR	490
第2层壁板	27.0	2 420	08MnNiVR	490
第3层壁板	21.5	2 420	08MnNiVR	490
第4层壁板	18.5	2 420	08MnNiVR	490
第5层壁板	15.0	2 420	08MnNiVR	490
第6层壁板	12.0	2 420	08MnNiVR	490
第7层壁板	12.0	2 420	08MnNiVR	490
第8层壁板	12.0	2 380	16MnR	345
第9层壁板	12.0	2 380	Q235-B	235

综合考虑大型储罐的结构特征和现场情况,参照有限元计算结果^[16-20],测试内容主要包括2个部分:①罐壁板的应力应变测定,主要测量底圈和第2~6圈外壁板的应力及其分布规律,测量相邻罐壁因壁厚差

引起的不连续应力;②罐底板的应力应变测定,主要测量罐底边缘板的应力及其分布规律,了解罐壁与罐底连接部位(即大角焊缝)的应力变化情况。

选取大型油罐的120个测点,每个测点粘贴2个应变计,分别沿储罐壁板的轴向和环向,或沿底板的径向和环向,整个储罐共使用240个应变计。为了获得准确、可靠的实验数据,在储罐外壁,选取弧长间距为6m的2条母线的截面测试其应力变化,以预防部分测点的失效,并且对测试结果进行对比验证。罐内底板的测试亦如此。

3 应力分析

水压试验的充水过程历时34天,试验开始后,每天记录液位高度、采集各测点的应变数据,直至水位达到储罐的设计液位19.76m,在最高水位下多次读取应变测量值,当各测点应变值基本保持不变而相对稳定时,则视为测试结束。在测试过程中,采取早晚时间段进行数据采集,以避免施工、温度变化等因素对测试数据的影响。由于恶劣的测试环境受多种因素影响,导致部分测量数据异常,无法真实反映测点的应变值,在处理数据时将其作为无效测点进行剔除。从测试开始至结束,储罐内部有效测点17个,存活率为56.6%;储罐外壁有效测点82个,存活率达91%。

3.1 储罐外壁

在储罐外壁测点的布置方案中,两个相邻截面在同一高度的应变变化趋势及大小相近,因此,选取其中某一截面的测量数据进行分析即可。将测点的应变值经虎克定律换算得到储罐外壁在不同水位作用下的轴向应力分布曲线(图2)。在底板与壁板连接的大角焊缝处,轴向受压,随着水位升高,压应力增大,最高水位时最大压应力在距底板上表面60mm处,达

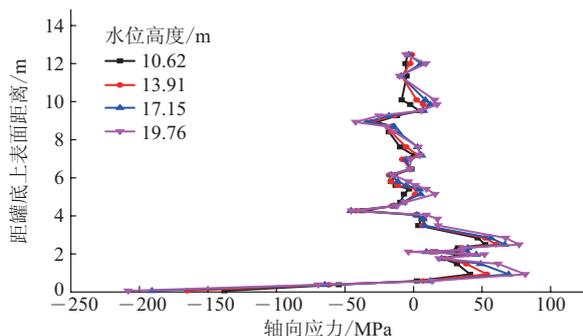


图2 不同水位下储罐外壁实测轴向应力曲线

到-208.16MPa;同时,随测点位置上升,轴向应力迅速由负变正,此后一直在零轴线附近进行小幅度波动,其应力波动主要是由壁板的壁厚变化引起的。

根据储罐外壁的实测环向应力分布曲线(图3)可知,由于受底板约束和水压作用,环向应力在壁板大角焊缝处为负,随测点高度升高,罐壁主要表现为水压作用下的膨胀变形,因此,环向应力迅速变为正值。在最高水位下,环向应力在距底板上表面2.84m处达到最大值278.52MPa,并存在一定的阶跃现象,其原因是该高度在壁板第1圈环焊缝(2.42m)附近,受壁板厚度变化与截面变化的影响。

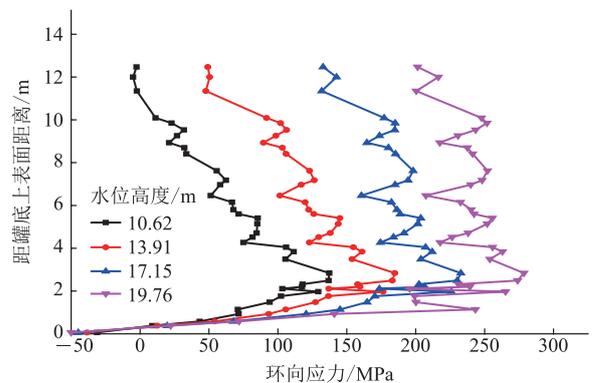


图3 不同水位下储罐外壁实测环向应力曲线

根据储罐外壁不同高度测点的应力随水位的变化趋势(图4)可知,罐壁的轴向应力和环向应力随水位呈单调变化关系,而非线性变化。虽然水位线性变化,但是压力分布是不断变化的,载荷位置也在不断变化。罐壁轴向应力主要为弯曲应力,由薄壳理论可知,轴向弯曲应力与弯矩成正比,而弯矩随水位变化并非线性,因此轴向应力随水位不是线性变化。环向应力由环向薄膜应力与泊松效应引起的环向应力组成,虽然环向薄膜应力随水位呈线性变化,但组合后的环向应力与水位变化不是线性关系。

3.2 储罐底板

根据不同水位下储罐底板环向应力及径向应力的变化趋势(图5)可知,储油罐底板径向应力在大角焊缝内侧最大,在最高液位下达到386.37MPa,然后沿储罐底板内外两侧边缘板的径向迅速衰减,其中,内边缘板的应力变化趋势是由正变负,随着与罐壁距离的增加,底板应力值逐渐平缓,最后趋于0。该趋势与底板的非锚固结构相关,在水压作用下,底板外边缘板发生翘曲,大角焊缝处底板悬空,不再与地基接触,同时壁板根部发生向外的弯曲变形,因此大角焊缝处应力

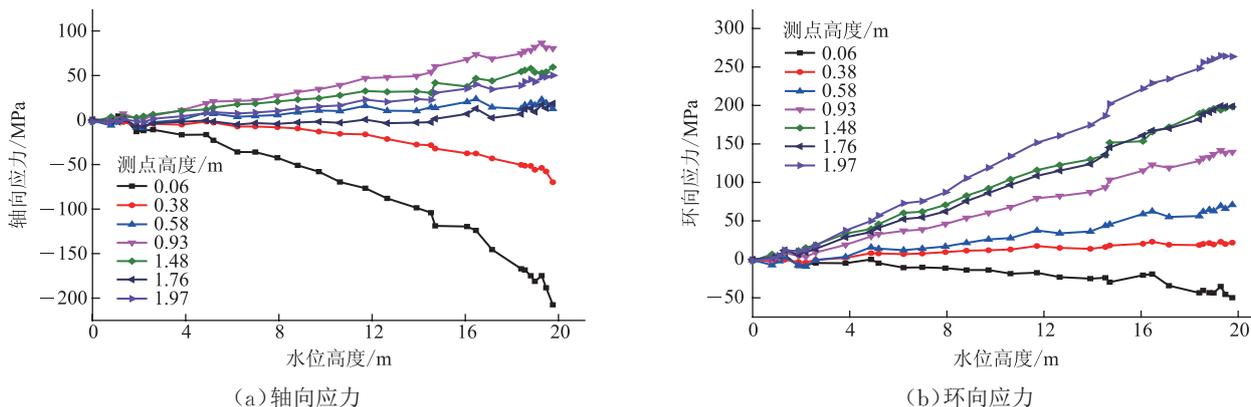


图4 储罐外壁不同高度测点应力随水位的变化曲线

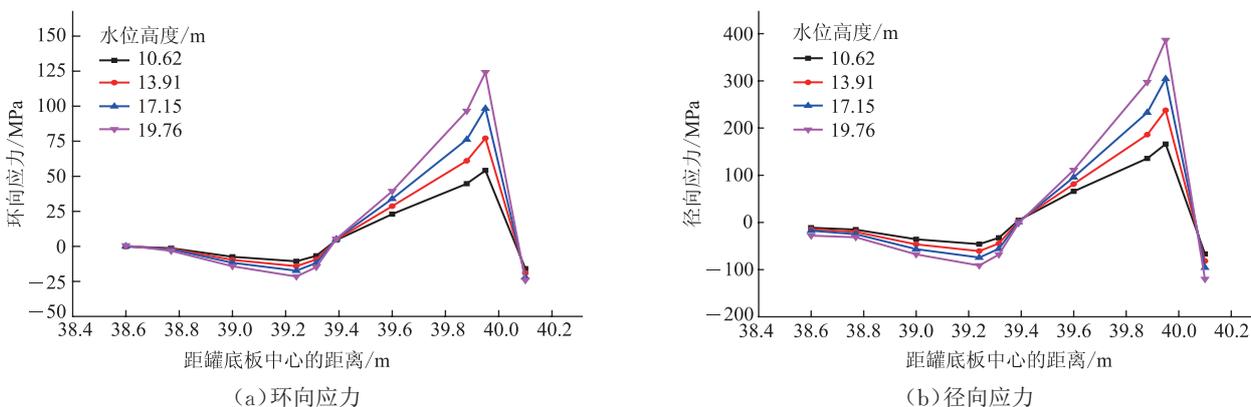


图5 不同水位下储罐底板实测应力曲线

最大,底板内外两侧径向应力迅速降低。对比储罐底板环向应力及径向应力的变化趋势可知:底板主要以径向应力为主,环向应力均较小;底板应力均随水位升高而增大。

4 结论与建议

为了分析大型储罐运行中的应力分布规律,采用实验方法对水压试验中 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 外浮顶原油储罐进行现场应力测试,获得储罐底板及壁板的应力实测数据,为储罐设计、安全监测与检测提供了参考。

(1)在最高液位下,储罐底板主要表现为径向弯曲应力;储罐壁板根部主要为轴向弯曲应力,随测点高度升高,罐壁在水压作用下发生膨胀变形,壁板主要表现为环向薄膜应力。

(2)在储罐结构中,底板大角焊缝处应力最大,在最高液位下,底板径向应力可以达到 386.37 MPa。建议在储罐设计时,对内、外边缘板及地基参数进一步分析,尽量降低大角焊缝处应力,同时在储罐运行中应该对此位置进行重点监测与定期检测。

(3)储罐壁板应力随水位升高而单调增加,但由于载荷位置不断变化以及轴向弯曲应力的存在,储罐壁板应力随水位并非呈线性变化。

(4)在最高液位下,距储罐底板上表面约 60 mm 处,壁板轴向应力最大,达到 -208.16 MPa ;距储罐底板上表面约 2.84 m 处,壁板环向应力最大,达到 278.52 MPa 。因此,在储罐设计时应该充分考虑壁板厚度变化及截面变化的影响。

参考文献:

[1] LEI S, JIAN S, KUI X. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 278: 529-538.

[2] GODOY L A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 103: 1-21.

[3] CHEN S, CHEN X, WANG Y B, et al. Experimental and

- numerical investigations of Q690D H-section columns under lateral cyclic loading[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 268-281.
- [4] ZHAO Q, GUO Z, SHEN X, et al. Test study on residual stress distribution of hybrid steel u-rib stiffened plates[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 261-267.
- [5] GODOY L A, SOSA E M. Localized support settlements of thin-walled storage tanks[J]. *Thin-Walled Structures*, 2003, 41(10): 941-955.
- [6] 石磊, 帅健, 许葵. 基于 FEA 模型和 API 653 的大型油罐基础沉降评价[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(3): 114-119.
SHI L, SHUI J, XU K. Assessment of large-scale oil tanks foundation settlement based on FEA and API 653[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(3): 114-119.
- [7] BURGOS C A, BATISTA A J C, CALABRÓ H D, et al. Buckling estimates for oil storage tanks: effect of simplified modeling of the roof and wind girder[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 91: 29-37.
- [8] SONG C Y, TENG J G, ROTTER J M. Imperfection sensitivity of thin elastic cylindrical shells subject to partial axial compression[J]. *International Journal of Solid and Structures*, 2004, 41(24): 7155-7180.
- [9] YANG L, CHEN Z, CAO G, et al. An analytical formula for elastic-plastic instability of large oil storage tanks[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2013, 101: 72-80.
- [10] BRADLEY D, GASKELL P H. Jet flame heights, lift-off distances, and mean flame surface density for extensive ranges of fuels and flow rates[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164: 400-409.
- [11] SUDHEER S, PRABHU S V. Heat transfer in vertical casks engulfed in open pool fires[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2013, 31(6): 541-562.
- [12] CHEN Z P, SUN B, YU C L, et al. Finite-element analysis of liquid-storage tank foundations using settlement difference as boundary condition[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2009, 223(4): 225-231.
- [13] 石磊, 帅健, 许葵. 大型油罐基础沉降国内外评价标准对比[J]. *油气储运*, 2014, 33(8): 862-868.
SHI L, SHUAI J, XU K. Comparison of evaluation standards for large oil tank foundation settlement in China and abroad[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, 33(8): 862-868.
- [14] 富东慧, 刘发安, 杨志宇, 等. 大型浮顶油罐应力测试及数值模拟[J]. *油气储运*, 2013, 32(4): 376-380.
FU D H, LIU F A, YANG Z Y, et al. Stress test and numerical simulation of large-scale floating roof oil tank[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(4): 376-380.
- [15] WU T Y, LIU G R. Comparison of design methods for tank-bottom annular plate and concrete ring wall[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, 77(3): 511-517.
- [16] 姜国利, 王江涌. 应力测量方法[J]. *材料科学*, 2016, 6(1): 11-25.
JIANG G L, WANG J Y. Methods for stress measurement[J]. *Material Sciences*, 2016, 6(1): 11-25.
- [17] SHI L, SHUAI J, WANG X L, et al. Experimental and numerical investigation of stress in a large-scale steel tank with a floating roof[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 117: 25-34.
- [18] ZINGONI A. Liquid-containment shells of revolution: a review of recent studies on strength, stability and dynamics[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 87: 102-114.
- [19] RONDON A, GUZEY S. Determination of localized stresses in the shell above anchor bolt chairs attachments of anchored storage tanks[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 98: 617-626.
- [20] FATEMI S M, SHOWKATI H, MAALI M. Experiments on imperfect cylindrical shells under uniform external pressure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 65: 14-25.
- (收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2017-07-11; 编辑: 刘朝阳)

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“油气管道及储运设施完整性评价技术研究”, 2016YFC0802105。

作者简介: 石磊, 女, 1985年生, 工程师, 2016年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事管道、储罐等油气储运设施的安全研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 18810510553, Email: misstone@163.com