DOI: 10.3901/JME.2020.16.061

基于实测的倾斜沉降储罐结构性能分析*

余 进^{1,2} 陈 炜^{1,2} 胡久韶^{1,2} 周 杨^{1,2} 蒋金玉^{1,2} 程 伟^{1,2}

(1. 合肥通用机械研究院有限公司 合肥 230031;

2. 国家压力容器与管道安全工程技术研究中心 合肥 230031)

摘要: 根据实测数据,验证数值分析大型储罐结构响应的可靠性及有效性。在此基础上,对空载储罐展开屈曲分析,结果显示现实中不存在令空载储罐结构失稳的倾斜沉降。进一步地,变液位分析临界倾斜沉降,随着液位升高,临界沉降值也会变化,其中满载液位临界沉降最低但高于现行标准。不同液位,临界沉降对应的最大变形区域大相径庭,最大应力及位置也存在差别。综合分析,低液位时,储罐的倾斜沉降主要表现为刚体转动,因而径向变形与倾斜沉降为线性关系,最大应力值和区域变化不大;高液位时,因倾斜导致的静压差产生附加弯矩使罐体径向变形区不再对称,且最大应力不断升高,且出现位置也与低液位有所不同。鉴于此,不但应结合工程实践适时修订倾斜沉降控制范围,还应使储罐液位保持合理水平,以确保其完整性。

关键词: 实测数据; 数值分析; 屈曲; 倾斜沉降; 变液位; 临界沉降

中图分类号: TG156

Plane-tilt Tanks' Structural Analysis Based on Measured Data

YU Jin^{1,2} CHEN Wei^{1,2} HU Jiushao^{1,2} ZHOU Yang^{1,2} JIANG Jinyu^{1,2} CHENG Wei^{1,2}

(1. Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031;

2. National Safety Engineering Technology Research Center for Pressure Vessels and Pipelines of China, Hefei 230031)

Abstract: Based on the measured data, the reliability and effectiveness of the numerical analysis on the response of large tank structure are verified. Base on this, the buckling analysis of no-liquid storage tank is carried out, and the results show that there is no tilt settlement to destabilize the structure of no-load storage tank in reality. Furthermore, the critical tilt settlement is analyzed in variable liquid levels. Meanwhile the liquid level rises, the critical settlement value will also change, among which the critical settlement of full-liquid level is the lowest but even higher than the specification-value. At different liquid levels, the maximum deformation region corresponding to the critical settlement is quite different, and the maximum stress and position are also different. According to the comprehensive analysis, when the liquid level is lower, the tilt settlement of the storage tank is mainly manifested as rigid body rotation, so the radial deformation and tilt settlement are linear, and the maximum stress value and region change little. At high liquid level, the additional bending moment caused by the static pressure difference caused by tilt causes the radial deformation zone of the tank to be no longer symmetrical, and the maximum stress keeps rising, and the position is different from that of the lower liquid level. In view of this, not only the control scope of inclined settlement should be revised timely in combination with engineering practice, but also the tank liquid level should be kept at a reasonable level to ensure its integrity.

Key words: measured data; numerical analysis; buckling; tilt settlement; variable liquid levels; critical settlement

0 前言

大型浮顶储罐的壁厚与内径比值较低,属于典型悬臂薄壳,结构性能复杂^[1-2]。出于石油储存和

运输便利的考虑,我国石油储备基地多建于沿海。这些地区土壤松软,在土壤沉积和外载荷作用下,储罐常出现不同类型和程度的沉降。

储罐沉降根据形态可分 3 类,分别为整体沉降、倾斜沉降与不均匀沉降。现有研究成果认为,整体沉降与倾斜沉降对储罐完整性基本不存在影响,关注重点多集中于不均匀沉降导致的结构响应^[3]。然而,来自工程技术人员的经验表明,储罐发生的倾斜沉降

* 国家重点研发计划(2017YFF0207101, 2016YFC0802102)资助项目。
20190905 收到初稿,20200228 收到修改稿

超过一定水平也会带来较大危害。倾斜沉降会使壁板产生大幅倾斜(即径向变形),影响浮盘升降和密封装置的正常运行,造成储罐的功能完整性失效^[4]。因此《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB50341—2014 要求:“浮顶外边缘板与罐壁之间的环形空间径向间距偏差为 ± 100 mm 时,密封装置应仍能保持良好密封效果”^[5],《立式圆筒形钢制焊接油罐操作维护修理规程》SY5921—2017 也规定:底圈罐壁 1 m 以上的壁板半径偏差不得高于 96 mm^[6]。研究人员针对大型储罐在沉降条件下结构响应展开的分析多以罐底沉降作为变量研究径向变形,尽管也提出了不少富有建设性的观点,但缺乏壁板实测倾斜度的验证,这在一定程度上也影响了结论有效性,同时,对于不同液位下罐体结构响应的变化也未能进行更系统和详细的阐释^[7-9]。鉴于此,将储罐结构数值分析结果与实测数据展开比对确认数值分析方法可靠性,再基于这一前提讨论引发储罐径向变形超标的临界倾斜沉降值,并结合罐内储液位置变化分析储罐的结构性能,从有效确保储罐完整性的角度具有重要意义。

1 沉降的分析与控制标准

为准确分析储罐在沉降条件下的结构响应,需要先得出罐底任意位置的沉降。工程实践中根据储罐体量,将罐底沿环向均分成若干份,并在相应角度设置沉降观测点,测量这些观测点相对标准高度点位置的高程差,以期用离散点的沉降值拟合出罐体实际沉降^[10]。但是具体如何由离散点的沉降值体现罐底及至储罐整体的变形是一个值得研究的问题。关于这个问题,各国研究者经过不懈努力取得了丰硕成果。DEBEER^[11]于 20 世纪 60 年代提出通过手工绘图获得罐底沉降曲线的方法。这种方法容易实现,但精确性难以保证。作为这种方法的补充和改进^[12-14],其他研究者提出采用最小二乘法拟合出储罐沉降的表达式

$$u = a + b \times \cos(\theta + c) \text{ 或 } u = a + b \times \sin(\theta + c) \quad (1)$$

式中, a 、 b 、 c 是常数, θ 是各沉降观测点的角度。考察式(1)准确有效的依据是沉降函数与实测值间的相关系数 R

$$\begin{cases} R^2 = \frac{S_{yy} - SSE}{S_{yy}} \\ S_{yy} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - u_i \right) \\ SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - u_i)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 为沉降观测点数; y_i 为第 i 个观测点的实测沉降值; u_i 为第 i 个观测点的沉降函数值。 $R^2 \geq 0.9$ 时方可认定沉降曲线有效。式(1)、式(2)一直被国内外储罐技术标准,如 API 653、EEMUA PUB No. 159 及 SY/T 5921 等沿用至今。基于以上研究成果, MALIK 于 1977 年建立了储罐变形控制方程

$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{2}{D} \times \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} = 0 \quad (3)$$

式中, w 为罐顶径向变形; D 为储罐内径; u 为底部沉降,并于 1982 年正式提出储罐沉降的谐波化分析方法,该方法以谐波函数(即傅里叶级数)描述储罐沉降

$$u = u_0 + \sum_{k=1}^n (u_k \cos k\theta + v_k \sin k\theta) \quad (4)$$

式中, $n=0$ 表示储罐发生了整体沉降; $n=1$ 表示储罐发生了倾斜沉降; $n \geq 2$ 表示储罐出现了不均匀沉降。

此后众多研究者均采用式(4)分析储罐沉降并在此基础上提出了不同的控制标准。例如, DEBEER 认为储罐不均匀沉降的临界值 $\Delta S_{\max} \leq \frac{L}{450}$ 。其中, $\Delta S = S_i - \frac{1}{2} \times (S_{i+1} + S_{i-1})$, S_{i-1} 、 S_i 、 S_{i+1} 分别是罐底周向上三个连续沉降观测点, L 则是相邻两个观测点间弧长,取 10 m^[11]。这一指标被我国《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》GB50341—2014 修正并采纳。GB50341 规定罐底 10 m 弧长内沉降差小于等于 25 mm 即 $\Delta S_{\max} \leq \frac{L}{400}$ ^[5]。其他控制指标还有, $\Delta S_{\max} \leq 30$ mm、 $\Delta S_{\max} \leq 40$ mm 等^[13], ΔS 意义如前所述。与不均匀沉降控制范围不同,各技术标准对于倾斜沉降方面的控制指标反倒比较接近。现将各相关技术标准中 100 000 m³ 储罐倾斜沉降的控制范围罗列如下,展开对比,如表 1 所示^[5-6, 15-16]。

表 1 各标准中 100 000 m 储罐倾斜沉降的控制指标

标准编号	标准名称	评价指标	控制范围
GB50341—2014	立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范	对径沉降差	$\leq 0.003 5D$
SH/T 3528—2014	石油化工钢制储罐地基与基础施工及验收规范	对径沉降差	$\leq 0.003 5D$
SH/T 3123—2017	石油化工钢制储罐地基	倾斜沉降	$\leq 0.003 2D$
SY/T 5921—2017	立式圆筒形钢制焊接原油罐修理规程	对径沉降差	$\leq 0.003 5D$

储罐内径 $D = 80\ 000$ mm。由表 1 可知,大多数标准中倾斜沉降的控制指标均在 0.003 5D 即

280 mm，只有 SH/T3123—2017 规定这一指标为 0.003 2*D* 即 256 mm，这些指标能否有效控制罐体变形超标(≥ 100 mm 或 96 mm)，应予进一步探讨。

2 基于实测的数值模拟

对于储罐在沉降条件下的结构响应，常以实测结合数值模拟的方法展开研究。两类手段可互为补充与印证。现对储罐沉降实测数据进行谐波化分析并基于沉降谐波函数展开数值模拟，得出罐体变形结果后再同实测变形对比确定可靠性。如数值模拟方法可靠性得到确认，再进一步展开讨论。

选取某石油储备基地 6 号储罐为研究对象，采用 Ansys Workbench 展开分析。首先按照储罐设计资料建立几何模型，罐体内径 $D=80$ m，高 $H=21.5$ m，模型不包含底板，储罐罐壁由多层不等厚的壳体构成，底层罐壁的厚度最大，由罐底向罐顶，罐壁厚度逐次递减，并包含抗风圈。根据 GB50341—2014 要求抗风圈为截面积 $100\times 100\text{ mm}^2$ ，厚 10 mm 的 L 型钢^[5]。具体结构参数如表 2 所示。

表 2 105 m 浮顶储罐结构、材质主要参数

	材质	弹性模量 $E/\times 10^5\text{MPa}$	泊松 比 μ	壁厚 t/mm	高度 h/mm	许用应力 S_m/MPa
1 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	32	2 420	226
2 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	27	2 420	226
3 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	22	2 420	226
4 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	19	2 420	226
5 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	15	2 420	226
6 层 壁板	12MNNiVR	2.01	0.3	12	2 420	226
7 层 壁板	Q235B	2.01	0.3	12	2 420	148
8 层 壁板	Q235B	2.01	0.3	12	2 380	148
9 层 壁板	Q235B	2.01	0.3	12	2 380	148
抗风圈	Q235B	2.01	0.3	10	100	148

综合考虑模型尺度、几何特征与计算资源，按 8 节点 Solid 单元划分网格，基于网格的无关性检测最小单元长度取 20 mm，网格的质量平均值约 0.79，符合数值模拟要求，整个模型共包含有限元

节点约 350 000 个。其中，储罐的模型及网格划分情况如图 1 所示。

图 1 储罐模型及网格情况

根据现场检测情况，罐底沉降及各层壁板倾斜度(径向变形)如图 2 所示。

结合图 2a 中的实测沉降，按照式(4)得到沉降函数表达式

$$u_6 = 30.72 \times \sin(\theta - 20.3) \quad (5)$$

式中, θ 依次对应 1~26 号观测点的角度(5、6 点间为正南方向), 相关系数 $R^2=0.85$ 接近 0.9, 可认为函数基本符合有效性要求, 储罐沉降类型属于倾斜沉降, 倾斜沉降差约 62 mm。6~19 号观测点位置对应的直径出现了倾斜。

图 2b 中的罐壁变形则表明, 第 6 层 24#壁板位置 55 mm; 靠近顶部的第 8 层 17#位置内倾较为严重, 约 65 mm。

于是, 可基于储罐的实测液位、并以式(5)为底部轴向变形展开数值模拟, 并将数值分析得到的变形同图 2b 对比。

图 2 6 号储罐实测变形

储罐实际液位约 18 m, 罐内储液按照轻质油约 635 kg/m^3 。液柱静压 $p = \rho g \times (h_{ls} - Y)$ 。 ρ 为原油密度, g 为重力加速度, $h_{ls}=18 \text{ m}$, Y 为轴向坐标。

对罐底节点, 首先约束径向、环向位移: 令 $dx = 0$, $dz = 0$ 。轴向位移即坐标轴 Y 方向位移: $dy = u_6$ 。按载荷步方式逐步提高倾斜程度, 最终达到实测水平。于是得出储罐径向变形情况, 如图 3 所示。

图 3a 中给出的储罐最大径向变形 $W_{\max}$ 值随底部倾斜沉降水平线性递增, 最高可至 66 mm。图 3b 中数值模拟的变形最大值即外倾最大值 49 mm 对应节点的轴向坐标约 15 300 mm, 实测为第 6 层壁板, 高度约 15 000 mm, 位置接近, 且数值相当; 变形最小值即内倾最大值 -66 mm 节点位于罐顶位置约 21 000 mm, 实测位于第 8 层壁板约 19 500 mm, 位置也相当接近, 数值基本一致。另有罐体变形云图, 如图 4 所示。

图 3 6 号罐变形的数值模拟结果

(a) 轴侧视角

(b) 俯视视角

图 4 数值模拟变形云图(mm)

图 4 中结果按柱坐标形式显示, 最大外倾的变形区接近正南, 最大内倾的变形区位于东南方。

数值分析与几何形体实测反映的储罐结构响应基本一致, 据此可认为数值模拟能有效、准确地反映储罐结构性能。

3 倾斜沉降下的屈曲分析

基于数值模拟结果的可靠性, 沿用 Ansys workbench 和类似的加载方式继续讨论储罐在倾斜沉降条件下的结构性能。储罐作为典型薄壳结构, 存在较大柔性。当罐体的倾斜沉降达到较高水平时, 罐体在自重以及较大位移载荷等外载荷作用下将发生整体性弯曲变形, 导致结构屈曲。因此需要分析展开屈曲分析, 确定倾斜沉降的极限值。载荷极限值是指导致结构发生屈曲载荷的极值, 当结构承受的载荷超过这一水平时, 就会突然失去原有几何形状, 发生大幅形变。确定结构发生屈曲时极限载荷的过程就是屈曲分析。屈曲分析方法包括线性分析方法和非线性分析两类。区别在于, 非线性方法基于结构的大挠度假设, 需要考虑结构的几何、材料非线性, 而线性方法基于线弹性理论, 基本忽略结构的非线性。一般认为, 非线性分析可以近似为若干个线性分析叠加的结果。

针对储罐展开非线性分析。非线性屈曲分析采用“弧长法”。“弧长法”最初由 RISK 提出, 经过多年研究逐渐得到完善, 是目前结构非线性分析中鲁棒性较好, 效率较高的方法^[17]。“弧长法”的基本控制方程为

$$\mathbf{K}(\delta_i^j) \cdot \delta \delta_{i+1}^j = \lambda_{i+1}^j \cdot \mathbf{P} - \mathbf{F}(\delta_i^j) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{K}(\delta_i^j)$ 为刚度矩阵, λ_{i+1}^j 是载荷比例因子, $\mathbf{P}$ 是应力张量, 而 $\mathbf{F}(\delta_i^j)$ 是外加载荷。求解时, 载荷因子不断增加或减小逼近极限。若有 n 个取值则可联立 n 个不同的线性方程, 将非线性问题转化为线性方程组的求解。载荷比例因子的取值越多, 则求解结果越精确, 但是无限制地增加求解次数会增加计算成本, 因而必须在结果的准确性与计算效率间合理取舍。

针对上述 100 000 m³ 浮顶储罐, 首先需要分析的问题就是其空载状态下面临倾斜沉降条件的结构响应, 因此根据式(4)在罐底外圈施加初始沉降载荷 $dy = 1 \times \cos\theta$ mm, 并约束以上位置的径向、环向位移, 令 $dx = 0$ 、 $dz = 0$ 。这意味着储罐初始倾斜沉降差最高 2 mm。同时对罐体施加自重, 且保持内外壁不受力。于是有储罐在 2 mm 倾斜时的

径向变形情况, 如图 5 所示。

图 5 2 mm 倾斜时的径向变形(mm)

由图 5 可见, 储罐空载时如果只发生 2 mm 水平的倾斜, 罐体变形最高约 0.56 mm(“-”表示方向), 且出现在顶部。基于图 5 结果不断提高沉降载荷展开数值模拟, 可得到储罐倾斜沉降与径向变形的关系曲线, 如图 6 所示。

(a) 全过程沉降变形曲线

(b) 5 000 mm 以上沉降变形

图 6 沉降-变形关系

当沉降差达到 7 000~7 500 mm 时关系曲线发生了翘曲,此时亦即出现了结构屈曲。根据这一结果,得出了 1 阶屈曲时的模态和储罐径向变形,如图 7 所示。

图7 储罐屈曲模态及径向变形(mm)

由图 7a 可知,储罐发生屈曲时顶部将出现凹陷,外凸内陷的形变量约 1 mm,屈曲特征值 $\lambda \approx 3\,680$,这意味着倾斜沉降函数 $dy = \lambda \times \cos\theta$ mm,即罐体倾斜沉降达到近 7 400 mm 时空载储罐才会发生屈曲,此时罐顶变形如图 7b 将达到 2 217 mm。这种情形在工程实际中无论何时也不会发生。

因而只要倾斜水平低于 7.4 m,且罐内存在储液,都可排除储罐发生屈曲的可能。工程实际中,对大型储罐设置安全液位就是基于这一考量。通常,100 000 m³ 储罐的安全液位为 2.5 m。还应注意罐内存在储液时,发生大幅度的倾斜沉降,将致使倾斜的对径位置液柱静压发生失衡,即,往下沉的一侧液柱静压极大,而翘起的一侧液柱静压极小甚至

为零。因此,当倾斜沉降量很大时,不但容易令储罐结构发生屈曲失稳,还会使下沉一侧的壁板及角焊缝受到液柱静压的严重挤压,从而威胁罐体结构的完整性。

4 变液位条件结构分析

4.1 储罐变形分析

基于以上分析结果,继续考察储罐在不同液位条件及倾斜沉降下的结构响应。罐内储液密度、储罐结构、材料参数等条件继续沿用 6 号罐数据。分别按安全液位 2.5 m、5 m、10 m、15 m 及满载 19.5 m 等液位展开对比分析。

罐内液压各参量中液位水平 h_s 分别取 2.5 m、5 m、10 m、15 m 及 19.5 m。罐体施加自重,并约束底部位移 $dx = 0$ 、 $dz = 0$ 。 dy 按 0~400 mm 施加倾斜沉降,即 $dy = u_0 \times \cos\theta$ mm ($0 \leq u_0 \leq 200$ mm)。于是有储罐在 5 种液位条件 $W_{\max}$ 随倾斜沉降的变化情况,如图 8 所示。

由图 8 可知,变液位条件下储罐的沉降-变形关系曲线在竖轴的截距随液位升高依次降低。其中液位 2.5 m 时,截距最大,约 50 mm。随着液位从 5m 升至满载 19.5 m,纵轴截距也从 45 mm 左右降至 27 mm 左右。据此可以认为,液位高低决定了储罐刚发生倾斜沉降时的初始径向变形,液位越高,则变形越小,储液对罐体发生变形具有减缓效果。

5 组沉降-变形关系中 2.5~15 m 液位的 4 组基本呈线性特征,即随着储罐从 0 倾斜到 400 mm,储罐变形呈现出线性递增态势,直线的斜率约 0.27,据此判断,罐体倾斜沉降水平在这个区间时,实际变形方式为刚体转动。同时,这 4 组直线尽管截距存在差距但均在倾斜沉降达到 360~380 mm 时,可令达到约 100 mm,由此可见当液位为 2.5~15 m 时,临界沉降差为 360~380 mm (保守起见取 360 mm,相当于 0.004 5~0.004 7 5D)。

当液位处于满载水平时情况较为特殊:沉降-变形曲线不但在竖轴上方截距最小,而且斜率存在变化。倾斜沉降 0~100 mm 时斜率较低,而沉降超过 100 mm 时斜率又超过了前 4 组沉降-变形曲线。这说明,满载液位条件,当沉降不高于 100 mm 时,储液对变形的作用主要体现为抵消、减缓;当沉降超过 100 mm 后,储液对变形的作用则表现为促进。因此,高液位条件应对储罐发生的倾斜沉降更加重视,一旦沉降超过某一水平,储罐

径向变形将急遽增加,同时,由图 8c 可知,满载条件,临界沉降差约为 320 mm,相当于 $0.004D$,低于较低液位但也高于标准提出的控制范围。

图 8 变液位条件下储罐的沉降-变形关系

进一步地,以云图方式给出临界沉降对应的储罐径向变形,如图 9 所示。

图 9 中不同液位的最大径向变形以极坐标方式给出,±表示方向。其中,2.5~10 m 液位罐顶的大变形区基本对称, x 轴正向一侧的约 7 层以上的壁板偏向负方向, x 轴负方向一侧也是 7 层以上壁板偏向正轴。由此可见,较低液位条件,储罐在倾斜沉降时的变形体现为刚体转动,这与图 8a 中反映的情况基本一致。当液位上升至 15~19.5 m,倾斜导致的大变形区就呈现出不对称的分布,其中,

满载条件最为明显, x 轴正向一侧偏向负方向的壁板约位于 9 层,而 x 轴负向一侧偏向正向的壁板则位于 5 层及以上。之所以存在这一变化就是因为当液位较高时,随着倾斜沉降的出现,倾斜对径

图9 变液位 S_{cr} 值条件下的径向变形(mm)

点两段的液位差过大,对较低层壁板产生了弯矩,使得储罐较低层壁板发生了弯曲,而高层的大变形区域出现了不对称分布。另外,无论大变形区处于什么高度,均已接近或超过了标准要求径向变形的范围,极可能令浮盘上升、下降受阻,影响储罐功能完整性。

4.2 储罐应力分析

临界沉降条件,储罐的应力强度的云图如图10所示。

如图10可见,2.5~5 m液位条件应力强度基本一致,不仅高应力区分布接近,且最大应力强度也相差不大,142~152 MPa,最高应力出现在倾斜值最高的底板附近;10~19.5 m液位,高应力区范围逐渐增大,最大应力强度逐渐升高,最高应力则转至与倾斜沉降最高点逆时针夹角约 100° 方向。

最大应力区域随液位的变化反映了液柱静压与倾斜沉降对储罐结构性能的协同作用方式的变化:当

储罐液位较低时(2.5~5 m),内部的储液不足以令倾斜对径点两端的罐壁出现较大压力差,储罐的结构性能主要因倾斜沉降而变化,即刚体转动。底板抬高一侧受到严重拉扯,因而应力强度较大。但是这一应力强度还是距材质许用应力值存在较大差距,此时,应重点防范储罐倾斜沉降过大造成“卡盘”。

图 10 变液位条件储罐应力强度(MPa)

液位较高时(10~19.5 m), 随着倾斜沉降的增大液柱静压会出现明显差距, 底板被抬高一侧的液柱静压将明显低于下沉一侧。此时, 在倾斜沉降对径两端的液柱静压差与罐底变形的协同作用下, 高层壁板则出现收缩, 底部壁板则因弯矩出现鼓胀。壁板变形前已述及, 而大角焊缝处则因弯矩出现同时受到液柱静压产生的局部薄膜应力和弯矩产生的弯应力。根据分析结果, 高应力区位置同倾斜对径点大致呈 $90^\circ \sim 100^\circ$ 方向, 同时, 应力水平也随储液量的升高而攀升, 如图 10c、10d 和 10e 所示, 当液位达到 15 m 时, 应力强度 271 MPa 已然超过了材质许用应力, 满载时更是高达 335 MPa。参照分析设计标准, 这类应力的极限值为 3 倍许用应力值, 即 678 MPa^[18]。尽管数值分析结果距离这一极限尚存较大差距, 但是, 储罐结构尤其大角焊缝处存在的完整性风险不容忽视。

5 结论

基于实测沉降对大型储罐结构响应展开数值分析, 确认了数值分析方法的有效及可靠性。在此基础上, 对相同体量、结构和材质的储罐展开屈曲分析, 继而考察变液位条件下储罐发生超标变形(≥ 100 mm)时的临界沉降以及临界沉降水平下的变形与应力强度等可得到以下发现。

(1) 通常出现的倾斜沉降不足以令储罐出现结构失稳, 沉降值同最大变形基本呈线性关系。

(2) 临界沉降高于标准, 应结合现场检测等工程实践, 探索并论证修订标准相关内容的可行性。

(3) 不同液位及临界倾斜沉降协同作用下储罐出现的结构响应大不相同, 总体上看, 罐内储液可预防储罐过大径向变形, 但是储液水平过高则会在沉降超过某一水平后令变形增长过快, 并产生较大的静液压力差使底部壁板尤其大角焊缝承受较高应力。因此, 在关注倾斜沉降的同时也要使罐内液位保持合理区间, 避免产生叠加性的不良后果。

参 考 文 献

- [1] CHEN Z P, DUAN Y Y, SHEN J M, et al. A simplified method for calculating the stress of a large storage tank wall[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2007, 221(3): 119-127.
 - [2] ZHAO Yang, LEI Xiang, WANG Zhen, et al. Buckling behavior of floating-roof steel tanks under measured differential settlement[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 70(9): 70-80.
 - [3] MOHAMED R C, NADER Y, HOWARD K Y, et al. Steel storage tank shell settlement assessment based on finite element and API653 analyses[C]// 2008 7th International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineer, 2008: 395-399.
 - [4] FAN H G, CHEN Z P, SHEN J M, et al. Buckling of steel tanks under measured settlement based on Poisson curve prediction model[J]. Thin Walled Structures, 2016, 106: 284-293.
 - [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中国石油天然气集团公司. GB 50341-2014 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, China National Petroleum

- Corporation. GB50341-2014 Code for design of vertical cylindrical welded steel oil tanks[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [6] 国家能源局, 油气储运专业标准化技术委员会. SY/T 5921-2017 立式圆筒形钢制焊接油罐操作维护修理规程[S]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
- National Energy Administration of the People's Republic of China, Oil and Gas Storage and Transportation Professional Standardization Technical Committee of the People's Republic of China. SY/T5921-2017 Specification for operation, maintenance and repair of vertical cylindrical steel welded oil tanks[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [7] 曹庆帅. 大型钢储罐在谐波沉降下的结构性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- CAO Qingshuai. Structural behavior of large steel tanks under harmonic settlement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [8] GONG Jianguo, TAO Jun, ZHAO Jian, et al. Effect of top stiffening rings of open top tanks on critical harmonic settlement[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 65: 62-71.
- [9] 范海贵. 基于检测沉降数据的在役储罐屈曲分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- FAN Haigui. Buckling analysis of in-service tanks based on measured settlement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中国石油天然气集团公司. GB50473-2008 钢制储罐地基基础设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, China's Petrochemical Corporation. GB50473-2008 Code for design of steel tank foundation[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [11] DE BEER E E. Foundation problems of petroleum tanks[J]. Annales de L' Institut Belge du Petrole, 1969, 6: 25-40.
- [12] SULLIVAN R A, NOWICKO J F. Differential settlements of cylindrical oil tanks[C]// Proceedings Conference on Settlement of Structures. British Geotechnical Society, Cambridge, UK, 1974: 420-424.
- [13] MALIK Z, MORTON J, RUIZ C. Ovalization of cylindrical tanks as a result of foundation settlement[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 1977, 12: 339-348.
- [14] KAMYAB H, PALMER S C. Analysis of displacements and stresses in oil storage tanks caused by differential settlement[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 1989, 203(1): 61-70.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. SH/T 3528-2014. 石油化工钢制储罐地基与基础施工及验收规范[S]. 北京: 中国石化出版社, 2014.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. SH/T 3528-2014. Specification for construction and acceptance of steel storage tank subgrade & foundation in petrochemical industry[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014.
- [16] 中华人民共和国工业和信息化部. SH/T 3123-2017. 石油化工钢制储罐地基充水预压监测规程[S]. 北京: 中国石化出版社, 2017.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. SH/T 3123-2017. Monitoring specification of water-fill preloading for steel tanks subgrade in petrochemical industry[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2017.
- [17] MURRAY J C, GREGORY J H. A study of incremental-iterative strategies for non-linear analysis[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, 29: 1365-1390.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. JB4732-1995 钢制压力容器-分析设计标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. JB4732-1995 Steel pressure vessels - Design by analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.

作者简介: 余进, 男, 1983 年出生, 工程师。主要研究方向为承压设备安全运行维护及基于风险的检验。

E-mail: 414364425@qq.com

陈炜(通信作者), 男, 1980 年出生, 教授级高级工程师。主要研究方向为石化装置基于风险的检验(RBI)。

E-mail: 45894114@qq.com