

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.002

# 风荷载作用下 LNG 储罐混凝土外罐力学性能分析

翟希梅<sup>1</sup>, 高嵩<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 中国建筑设计院有限公司, 100044 北京)

**摘要:** 为获得大型全容式 LNG 储罐混凝土外罐在风荷载作用下的响应特性, 以有限元软件 ANSYS 为分析平台, 针对一 160 000 m<sup>3</sup> LNG 储罐实际工程建立了静力风荷载及顺风向脉动风荷载作用下的精细化有限元模型。通过对比国外学者提出的傅里叶解析式表达圆柱体表面的风压分布和中国《建筑结构荷载规范》给出的旋转壳体周向体型系数, 以及中美规范关于风压高度变化系数的规定, 表明中国《建筑结构荷载规范》确定风压分布对结构影响更为不利; 对比了不同风向向下储罐外罐的内力及变形模拟结果, 获得了各风向对储罐响应的影响程度及规律; 采用拟定常假设, 来流风速谱取 Davenport 谱, 储罐外罐的风振响应分析结果表明: 顺风脉动风荷载作用下, 结构的位移及环向应力的变化趋势与静力风荷载作用下相近, 但应力及位移的极值响应结果约为静力风荷载作用 2 倍; 与静力荷载下储罐结构的响应结果对比表明, 静力风荷载及顺风向脉动风荷载对 LNG 储罐混凝土外罐的受力及变形影响皆不大。

**关键词:** LNG 储罐; 风荷载; 顺风向; 有限元分析; 风振响应

中图分类号: TU378.7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)06-0009-06

## Mechanical behavior of LNG concrete outer tank under wind

ZHAI Ximei<sup>1</sup>, GAO Song<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. China Architecture Design & Research Group, 100044 Beijing, China)

**Abstract:** In order to obtain the response characteristics of LNG (liquefied natural gas) containment tanks under wind load, an accurate model of a 160 000 m<sup>3</sup> LNG tank is established based on practical engineering. Finite element analysis via ANSYS is conducted considering static wind and along-wind vibration. Comparison is made between the Fourier series for wind pressure distribution of cylinders supposed by foreign scholars and shape coefficients for wind pressure distribution of circular section structures adopted by Chinese load code for the design of building structures. Wind pressure height coefficients are also compared between Chinese code and U.S code. It is proved that the coefficients adopted by Chinese load code are more adverse for the LNG tank. The results of deformation and stress in different wind directions are analyzed and reveals how wind directions affect the response of LNG tanks under wind load. The analysis of wind-induced response is carried out, adapting quasi-steady assumption and Davenport spectrum. The results show that under along-wind fluctuating wind load, the changing trend of deformation and stress is close to the result under static wind but the extreme response is twice. Compared to the response under other static loads, static wind load and along-wind fluctuating wind load have little influence on LNG tanks.

**Keywords:** LNG tank; wind load; along-wind; finite element analysis; wind induced response

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)以其可大量储存、方便长途运输且为高效清洁能源等优势,正在成为世界油气工业新的热点。目前,

对大型 LNG 储罐在风荷载作用下的研究尚处于初级阶段。杨涛<sup>[1]</sup>进行了 150 000 m<sup>3</sup> LNG 储罐在静力风荷载作用下进行了屈曲性能分析,认为 LNG 储罐外罐不存在风致静力屈曲问题。穆春生<sup>[2]</sup>在其研究基础上进行了静力性能分析,得到了 LNG 储罐外罐罐壁在静风风压作用下的应力

收稿日期: 2014-07-17.

作者简介: 翟希梅(1971—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 翟希梅, xmxzhai@hit.edu.cn

分布和变形规律,但罐壁处未考虑扶壁柱的影响。国外学者<sup>[3-7]</sup>对薄壁钢罐的风致屈曲问题做了大量研究,获得了薄壁钢罐半径与高度的比值以及半径与厚度的比值对结构缺陷敏感度的影响规律。本文以 160 000 m<sup>3</sup> LNG 储罐混凝土外罐为研究对象,建立了 LNG 混凝土外罐精细化有限元模型;获得静力风荷载作用下储罐的风压分布;对不同风向下的储罐结构进行内力与变形分析以及最不利风向下的结构风振特性分析。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 工程概况

160 000 m<sup>3</sup> LNG 储罐预应力混凝土外罐内壁直径 82 m,外壁直径 83.6 m,罐壁厚 800 mm,内壁高度 38.55 m,穹顶半径 82 m,矢高 10.98 m,穹顶厚度 600 mm,底板厚度 900 mm,半径 44 m,基础为桩基。罐壁顶部环梁截面为 1.05 m×1.56 m,沿罐壁每隔 90°设置截面尺寸 4.2 m×1.4 m 的扶壁柱,结构剖面见图 1。外罐采用 C40 混凝土,钢筋为 HRB400 级普通钢筋与后张法有粘结预应力钢绞线(直径 15.2 mm,抗拉强度标准值 1 860 MPa)。

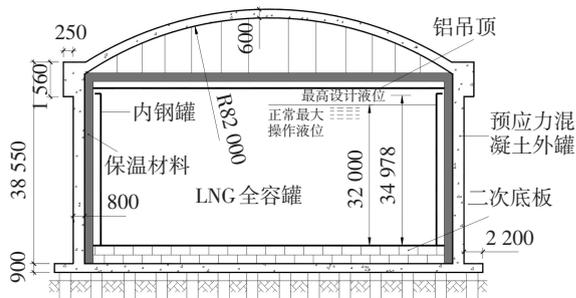


图 1 LNG 全容罐示意 (mm)

### 1.2 混凝土外罐有限元模型

本文选用壳单元 shell181 作为结构分析单元,并采用四边形划分方式。通过赋予壳单元不同厚度来实现环梁、扶壁柱、罐壁、穹顶及底板的模拟。按照桩基础的实际位置,在底板桩位处施加固定约束。LNG 储罐混凝土外罐的有限元模型见图 2。混凝土本构模型采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[8]</sup>建议的公式。

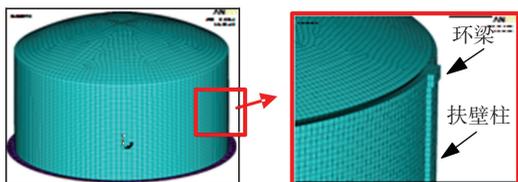


图 2 LNG 储罐混凝土外罐有限元模型

## 2 静力风荷载的施加

中国 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[9]</sup>(以下简称《荷载规范》)给出的风荷载标准值  $w_k$  计算式为

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$$

式中:  $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数,静力计算取  $\beta_z = 1$ ;  $\mu_s$  为风荷载体型系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $w_0$  为基本风压,按照 GB/T20368—2006《液化天然气(LNG)生产储存和装运》<sup>[10]</sup>的规定,应选取 100 年一遇的基本风压进行计算,本文取  $w_0 = 0.75 \text{ kN/m}^2$ 。

### 2.1 竖向风压分布

美国规范 ASCE/SEI 7—10《建筑物和其它结构设计最小荷载》<sup>[11]</sup>给出了与高度和地形条件有关的地形影响系数  $K_z$ ,相当于中国《荷载规范》中的风压高度变化系数  $\mu_z$ 。美国规范规定的 D 类地貌与中国规范的 A 类地貌相似,两者  $\mu_z$  对比结果见图 3,可知,同一高度时中国规范采用的风压高度变化系数  $\mu_z$  偏大,本文按中国《荷载规范》给出的  $\mu_z$  取值。

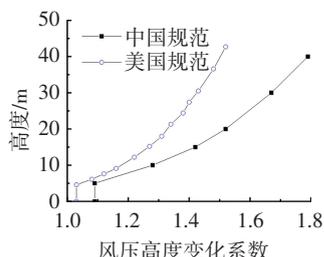


图 3 风压高度变化系数对比

### 2.2 周向风压分布

Rish<sup>[12]</sup>对圆柱烟囱在风荷载作用下的研究中,提出用傅里叶级数表示周向风压分布,该式在圆柱形薄钢罐风致屈曲研究中被多次采用:

$$p = \lambda \sum_{i=0}^7 c_i \cos(i\theta)$$

式中:  $P$  为风压;  $\lambda$  为荷载放大系数;  $\theta$  为周向展开角;  $c_i$  为傅里叶系数,学者 Rish<sup>[12]</sup>和 ACI-ASCE<sup>[13]</sup>给出的取值方法较典型,见表 1。

表 1 傅里叶系数取值<sup>[12-13]</sup>

$C_i$	Rish	ACI-ASCE
$C_0$	0.387	0.276 5
$C_1$	-0.338	-0.341 9
$C_2$	-0.533	-0.541 8
$C_3$	-0.471	-0.387 2
$C_4$	-0.166	-0.052 5
$C_5$	0.066	0.077 1
$C_6$	0.055	0.003 9
$C_7$	—	-0.034 1

中国《荷载规范》针对圆截面构筑物采用体型系数  $\mu_s$  来表示风压分布特点,并通过不同角度下的一组离散数值来表达,见表 2。国外学者提出

的周向风压分布的解析形式与中国《荷载规范》给出的风压分布对比见图 4, 结果显示两者的变化趋势相同, 且后者给出的风荷载体型系数数值偏于安全, 因此本文的分析按中国《荷载规范》给出的周向风荷载体型系数取值, 其周向风压分布示意图见图 5。

表 2 圆截面构筑物周向风荷载体型系数<sup>[9]</sup>

周向展开角 $\theta/(^{\circ})$	体型系数 $\mu_s$	周向展开角 $\theta/(^{\circ})$	体型系数 $\mu_s$
0	+1.0	105	-1.2
15	+0.8	120	-0.7
30	+0.1	135	-0.5
45	-0.7	150	-0.4
60	-1.2	165	-0.4
75	-1.5	180	-0.4
90	-1.7		

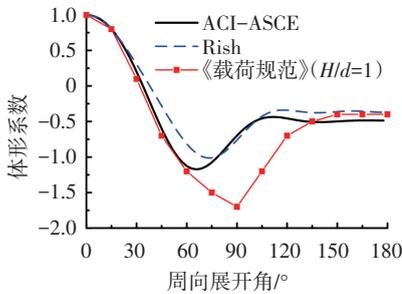


图 4 体型系数对比

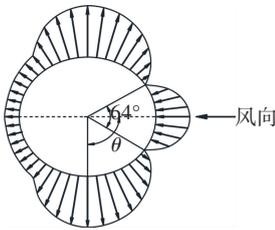


图 5 体型系数对比

LNG 储罐穹顶处的风压分布按下式计算<sup>[9]</sup>, 其风压分布见图 6。

$$\mu_s = -\cos^2 \varphi.$$

至此, LNG 储罐混凝土外罐全部所需的风压分布已确定, 在接下来的 ANSYS 有限元模拟中, 使用 APDL 语言, 完成有限元模型静力风荷载的施加。

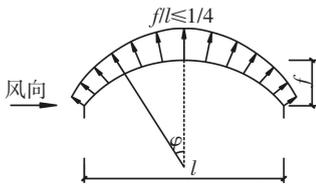
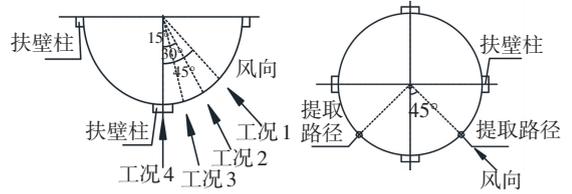


图 6 穹顶周向风压分布示意

### 3 静力风荷载作用下计算结果分析

对不同风向下 LNG 储罐外罐结构在静力风荷载作用下的计算结果进行对比讨论, 具体分 4 种工况: 风向与扶壁柱夹角为 45° (工况 1); 夹角为 30° (工况 2); 夹角为 15° (工况 3); 夹角为 0°

(工况 4). 各工况风向示意及结果数据提取位置示意图见图 7. 另外, 结果中径向位移为正值代表向罐外膨胀, 为负表示向内收缩; 环向应力为正值代表受拉, 为负表示受压。



(a) 不同工况风向示意 (b) 工况 1 风向及提取数据位置

图 7 风向示意

#### 3.1 工况 1 有限元分析结果

工况 1 径向位移结果见图 8. 由图 8(a)~(e) 可知, 罐壁在正迎风面处 (0° 迎风面) 发生向罐壁内侧方向的最大收缩位移; 侧迎风面中心处 (±90° 侧风面) 附近, 罐壁产生最大膨胀径向位移; 180° 背迎风面位移较小。

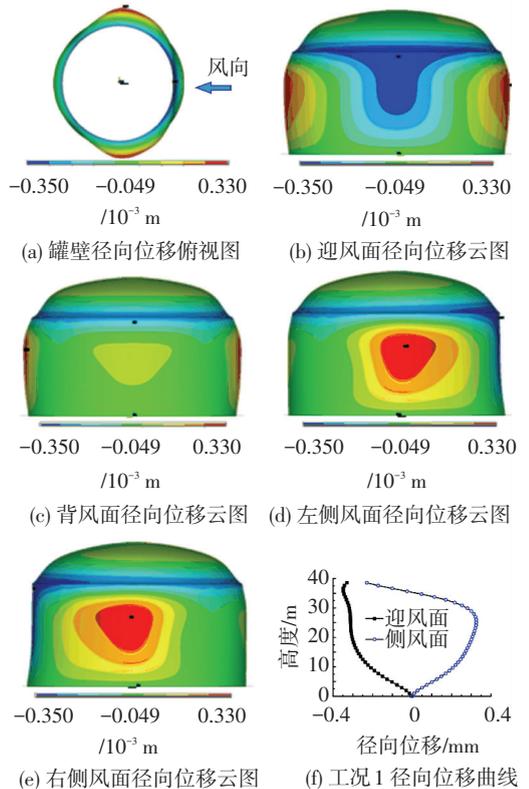


图 8 工况 1 径向位移结果

迎风面和侧风面的径向位移结果见图 8(f), 结果表明, 罐壁在 90° 侧风面位置处径向位移随高度的增大而增大, 约 26 m 高度处达到位移最大值 (0.33 mm), 35 m 处位移减小为 0, 之后罐体位移向内回缩, 罐顶处回缩值为 0.23 mm. ±90° 侧风面罐壁中部发生向罐外方向位移是由于该处受到较大风吸力作用 (见图 5), 而顶部转为向罐内方向位移是受到穹顶向上变形的影响; 0° 迎风面处由于罐壁受到压力风的作用, 整体发生向罐壁内

侧的位移,并且随着高度的增大位移逐渐增大,罐壁顶部位移最大(-0.35 mm)。

径向位移发生在工况 3 下,为-0.35 mm,占储罐跨度(82 m)的 0.43%。说明静力风荷载对 LNG 储罐的径向位移影响很小。各工况间最大径向位移相差 0.024 mm,发生在工况 3 与工况 4 之间,占该处工况 4 位移的 7.2%,所以风向对迎风面径向位移影响不大。在 90°侧风面结果提取处,工况 1、2、3 径向位移相差不大,最大径向位移出现在工况 2 中,为 0.34 mm。最大位移相差值的最大值发生在工况 2 与工况 4 之间,最大值为 0.06 mm,占该处工况 4 位移的 21%,所以风向对 90°侧风面径向位移影响较大。

由 10(c)可知,不同风向下罐壁侧风面的最大外壁环向应力变化不大,工况 4 与工况 3 最大拉应力值相近,但所在高度略有不同,最大环向拉应力为 0.16 MPa。最大拉应力相差值 0.01 MPa,发生在工况 1 与工况 3 之间;由 10(d)可知,不同风向下 90°侧风面处内壁最大环向拉应力小于外壁,各工况下罐壁侧风面的最大内壁环向应力在顶部相差较大,顶部最大压应力相差值 0.051 MPa,出现在工况 2 与工况 4 之间,占该处工况 4 压应力的 40.5%。各工况在罐壁的中部及下部的应力曲线变化不大,最大拉应力值相差值出现在工况 1 与工况 3 之间,最大值相差 0.012 MPa,出现在 25 m 罐壁高度处。

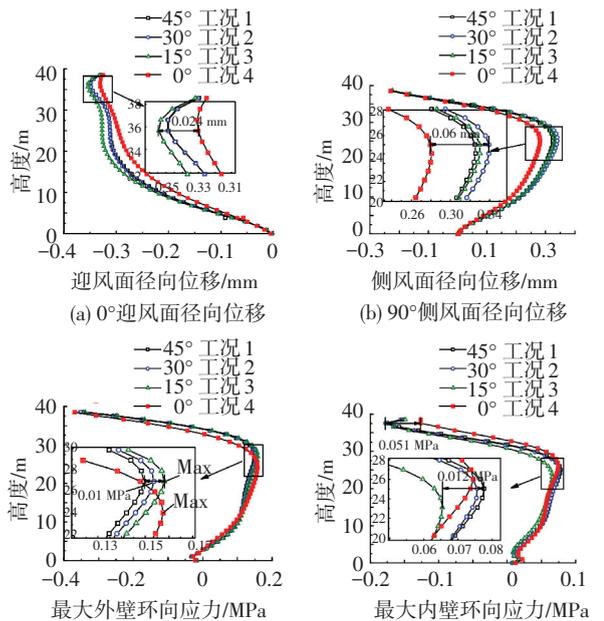


图 10 不同风向下有限元分析结果对比

综上所述,静力风荷载最不利工况作用下,最大环向拉应力仅为 0.16 MPa,占 C40 混凝土轴心抗拉强度设计值(1.71 MPa)的 9.36%。因此,静力风荷载对 LNG 混凝土外罐不会带来开裂影响。

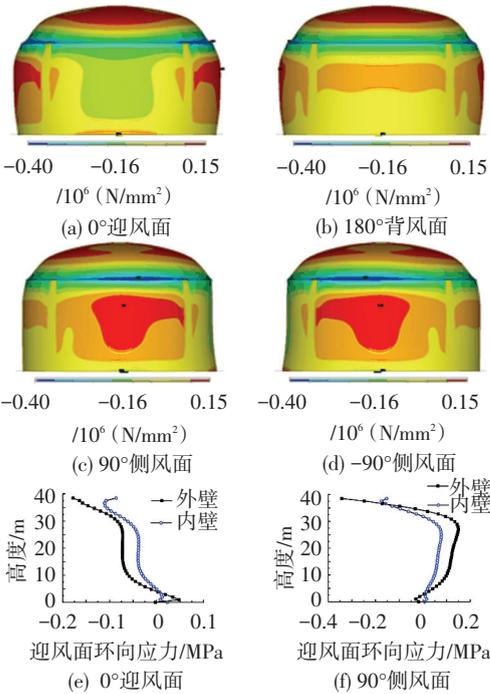


图 9 工况 1 环向应力结果

静力风荷载作用下,LNG 储罐外罐结构的环向应力结果见图 9。由图 9(a)~(d)可知:环向应力关于迎风子午线对称分布,其中穹顶及罐壁的±90°侧风面环向应力较大。同时提取迎风面 0°处和侧风面 90°处的环向应力曲线。由图 9(e)可知,迎风面主要承受环向压应力,外壁压应力随高度增大而增大,罐壁顶部达到压应力最大值-0.18 MPa。由图 9(f)可知,侧风面外壁底部受拉,环向应力随着高度增大而增大,10~30 m 之间数值稳定在 0.1 MPa 左右,最大拉应力在 27 m 处,为 0.15 MPa。30 m 到环梁处拉应力减小至 0 并开始受压。内壁与外壁环向应力结果相近,两者最大应力相差不到 0.1 MPa。

### 3.2 不同风向下的有限元分析结果

0°迎风面及 90°侧风面的最大径向位移以及 90°侧风面的最大环向应力结果见图 10。结果表明:当风向变化时,0°迎风面和 90°侧风面的径向位移及最大环向应力变化趋势基本不变。由 10(a)、(b)可知:工况 4 风向垂直扶壁柱时,侧风面和迎风面的径向位移最小,这是由于工况 4 下的 0°迎风面和 90°侧风面结果提取处正是扶壁柱所在位置,而扶壁柱处横截面较大、刚度大,因此位移最小。

在 0°迎风面结果提取处,工况 2 和工况 1 的径向位移非常接近,致使两者曲线基本重合;最大

## 4 顺风向风振分析

### 4.1 脉动风荷载的模拟

脉动风荷载分为:顺风向、横风向以及扭转向。一般只有当结构高度大于 300 m 时,横风向的风荷载才会超过顺风向的风荷载<sup>[14]</sup>。本文研究的大型 LNG 储罐高度仅为 49.53 m,因此,仅考虑顺风向脉动风荷载作用下 LNG 储罐的响应性能。风振分析中本文采用拟定常假定,即假设体型系数不随时间变化,风压时程  $p(t)$  计算方法为

$$p(t) = \mu_s \cdot \omega(t) = \mu_s \cdot \frac{1}{2} \rho v^2(t). \quad (1)$$

式中: $\rho$  为空气密度,取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $\mu_s$  为风荷载体型系数,取值同静力风荷载;  $v(t)$  为来流风速时程,来流风速谱取 Davenport 谱<sup>[15]</sup>:

$$\frac{n S_v(n)}{\overline{v_{10}^2}} = \frac{4kx^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, x = 1200 \frac{n}{v_{10}}$$

其中:  $S_v(n)$  为脉动风速功率谱;  $k$  为地面粗糙度系数;  $n$  为脉动风频率;  $\overline{v_{10}^2}$  为标准高度 10 m 处平均风速,各参数取值见表 3。平均风速取大连市重现期为 100 年的最大风速(对应基本风压  $0.75 \text{ kN/m}^2$ )。本文外罐结构自振频率为 4.73 Hz,试算发现采样频率取 10 Hz 较为合适,通过谐波合成法<sup>[16]</sup>,将 Davenport 谱转化为来流风速时程见图 11。

表 3 风速时程求解中的参数取值

平均风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$k$	湍流 强度	时间/s	采样频 率/Hz
34.64	0.001 29	0.12	600	10

将风速时程带入式(1)中,得到结构表面风荷载,采用 ANSYS 有限元软件进行瞬态时程分析,可获得结构的风振响应。

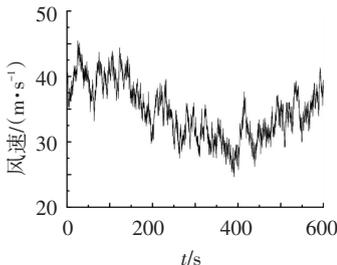


图 11 来流风速时程曲线

### 4.2 顺风向风振分析结果

由 3.2 节静力分析结果可知,风向与扶壁柱夹角为  $15^\circ$  时,外壁的最大环向拉应力最大,因此,风振分析时,取风向与扶壁柱夹角为  $15^\circ$  时的最不利情况。

在风致振动过程中,结构会在平均响应附近

作随机振动,称为脉动响应。其中平均响应表示为  $\mu$ ,取风速总时程 600 s 内每隔 0.1 s 各响应值的算数平均值;脉动响应标准差表示为  $\sigma$ ;则极值响应  $w_p$  为平均响应和脉动响应的叠加:

$$w_p = \mu + g_p \sigma.$$

式中: $g_p$  称为峰值因子,用来表征脉动风响应的放大作用,通常取 3.5。

整个风振过程中罐壁处的环向应力及径向位移等值线从  $180^\circ$  背风面处进行了  $360^\circ$  展开,见图 12。穹顶的纵向位移、罐壁的径向位移及环向应力等值线图,包括应力与位移响应的均值等值线与极值等值线,结果见图 13,图中横纵轴的单位为 m,径向位移单位为 mm,环向应力单位为兆帕 MPa。由图 13 可知,顺风脉动风荷载作用下,结构的位移、环向应力变化趋势与静力风荷载作用下极为相近,由图 13(a)、(b)可知,吸力风作用下(图 6),穹顶在半径 26 m 范围内纵向位移最大,最大纵向位移峰值为 1.90 mm(方向向上),随着半径的扩大纵向位移逐渐减小。

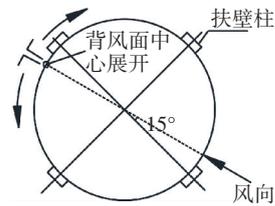


图 12 罐壁展开示意

由图 13(c)、(d)可知,罐壁迎风面受到风压力作用,向内收缩。径向位移峰值变化梯度均匀,最大径向位移峰值为  $-0.7 \text{ mm}$ 。 $\pm 90^\circ$  侧风面受到风吸力作用,向外膨胀。在高度 26~38.55 m 范围内,径向位移峰值变化梯度较大,最大径向位移峰值为 0.65 mm。背风面的径向位移非常微小,最大径向位移峰值仅为 0.1 mm。由图 13(e)、(f)可知,迎风面及背风面环向应力很小,仅在  $\pm 90^\circ$  侧风面环向应力略大,侧风面最大环向拉应力峰值仅为 0.4 MPa。

表 4 为顺风向风振峰值结果与静力风荷载作用下最不利风向工况(工况 3)的响应对比,顺风向脉动风荷载作用下,LNG 储罐混凝土外罐结构的径向位移以及环向应力极值均为静力风荷载作用的 2 倍左右,但响应数值不大,最大环向拉应力仅为 0.4 MPa,罐壁最大径向位移  $-0.7 \text{ mm}$ ,穹顶纵向最大位移 1.9 mm。根据文献[17],上述风振响应下的极值环向应力与极值径向位移占静力荷载最不利工况组合(重力+顶部荷载+液压+气压)最大响应的 4.9% 和 7.6%,表明顺风向脉动风荷载对 LNG 储罐混凝土外罐的影响很小。

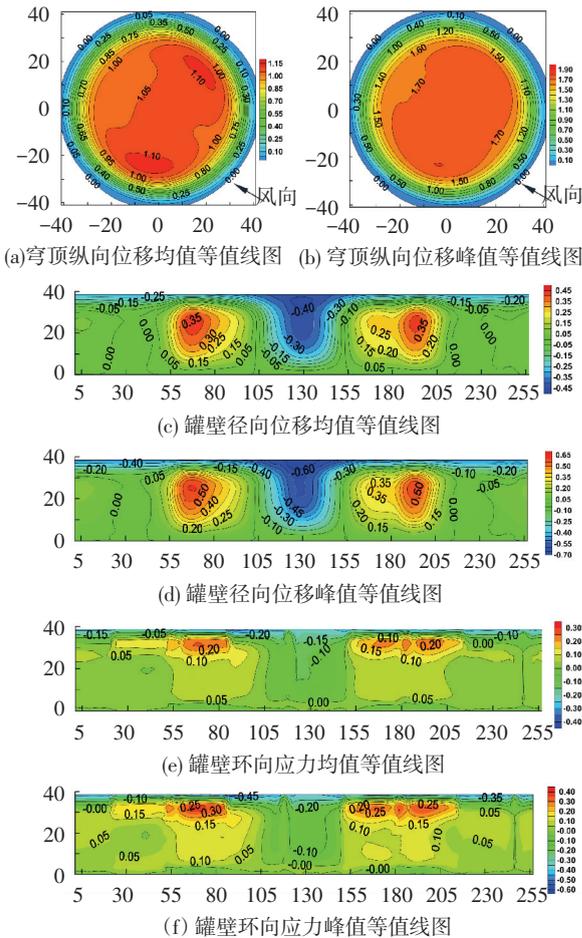


图 13 顺风向脉动风荷载作用下储罐位移及应力等值线图

表 4 顺风向风振结果与静力结果对比

响应比较	穹顶纵向位移/mm	迎风面径向位移/mm	侧风面径向位移/mm	侧风面外壁环向应力/MPa
风振峰值	1.90	-0.70	0.65	0.40
静力工况 3	0.85	-0.35	0.33	0.16

## 5 结 论

1) 建立了 160 000 m<sup>3</sup> LNG 储罐混凝土外罐的精细化有限元模型,通过合理的单元选择及划分、边界条件设置,可实现 LNG 储罐结构在风荷载作用下的结构内力及变形分析。

2) 与国外文献对比分析可知,采用国内现行《建筑结构荷载规范》中给出的风压分布对结构影响更为不利。

3) 静力风荷载作用下,外罐迎风面约 64° 内范围向内收缩,侧风面、背风面以及穹顶由于受到风吸力作用均向外膨胀。最大径向位移为 0.35 mm,占储罐跨度(82 m)的 0.43%;最大环向拉应力为 0.16 MPa,占 C40 混凝土轴心抗拉强度设计值(1.71 MPa)的 9.36%。

4) 风向对 ±90° 侧风面处的最大径向位移影响较大,最大径向位移可增大 21%。

5) 与静力风荷载相比,LNG 储罐外罐结构在脉动风荷载作用下的极值响应约为静力风作用下的 2 倍。相比其它最不利静力荷载作用下结构的环向应力与径向位移,顺风向脉动风荷载作用下,LNG 储罐混凝土外罐的响应结果仅占其不足 10%。

## 参 考 文 献

- [1] 杨涛.LNG 储罐壳体抗风与抗震力学性能研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2010:9-11.
- [2] 穆春生. LNG 储罐在静风和内压作用下受力性能分析[D]. 大庆:东北石油大学,2011:6-8.
- [3] PORTELA G, GODOY L A. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a dome roof [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61:808-824.
- [4] FLORES F G, GODOY L A. Buckling of short tanks due to hurricanes [J]. Engineering Structures, 1998, 20 (8): 752-760.
- [5] GODOY L A, FLORES F G. Imperfection sensitivity to elastic buckling of wind loaded open cylindrical tanks [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2002, 13 (5):533-42.
- [6] GREINER R, DERLER P. Effect of imperfections on wind-loaded cylindrical shells [J]. Thin-Walled Structures, 1995, 23: 271-281.
- [7] LEI Chen, ROTTER J M. Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load [J]. Engineering Structures, 2012, 41: 199-208.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [10] GBT20368—2006液化天然气(LNG)生产储存和装运[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [11] ASCE/SEI 7—10 Minimum design loads for buildings and other structures[S]. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010.
- [12] RISH R F. Forces in cylindrical shells due to wind [J]. Proceeding of the Institute of Civil Engineers, 1967, 36 (4): 791-803.
- [13] ACI-ASCE Committee 334 Reinforced concrete cooling tower shells-practice and commentary[S]. New York: American Concrete Institute (ACI), 1991.
- [14] 黄本才,汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海:同济大学出版社,2008:189-213.
- [15] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372):194-211.
- [16] SURESH K K, STATHOPOULOS T. Computer simulation of fluctuating wind pressures on low building roofs [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 69/70/71:485-495.
- [17] 翟希梅,高嵩,范峰. 低温下 LNG 储罐混凝土外罐的静力性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014, 46 (4):7-12.

(编辑 赵丽莹)