

绝热层对大型 LNG 储罐动力特性影响分析

陈叔平¹, 马志鹏¹, 任金平¹, 刘福录², 李延娜¹, 任永平²

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 兰州 730070)

摘要: 为了研究绝热层对大型 LNG 储罐动力特性的影响, 基于 ANSYS 有限元软件, 分别建立有绝热层和无绝热层的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐模型, 对这两种模型分别进行模态分析和地震响应分析, 得到自振特性和动力响应情况。研究表明: 有绝热层储罐模态振型主要发生在拱顶, 无绝热层储罐在罐壁, 绝热层的存在增大了储罐的固有频率, 改变了储罐位移变形量、变形发生的部位及储罐的应力分布, 并且减小了等效应力, 对罐壁底部发生局部失稳具有很好改善作用。

关键词: 大型 LNG 储罐; 绝热层; 模态分析; 地震响应分析

Analysis on the influence of thermal insulation layer on the dynamical characteristic of large - scale LNG storage tank

Chen Shuping¹, Ma Zhipeng¹, Ren Jinping¹, Liu Fulu², Li Yanna¹, Ren Yongping²

(1. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Lanpec Technology Limited, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the influence of thermal insulation layer on the dynamical characteristic of large - scale LNG storage tank, LNG storage tank models of $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ with thermal insulation layer and without thermal insulation layer were built, respectively, and modal analysis and seismic response analysis of these two models were carried out to obtain the vibration characteristics and dynamic response based on ANSYS finite element software. The results show that the modal shapes of the storage tank with thermal insulation layer occurs in the vault and without thermal insulation layer occurs in the tank wall. The thermal insulation layer increases the inherent frequency of the storage tank and changes the displacement deformation, the deformation position as well as the stress distribution. In addition, the thermal insulation layer also reduces the equivalent stress and effectively improves the occurrence of the local bucking on the tank wall near the bottom.

Keywords: Large - scale LNG storage tank, Thermal insulation layer, Modal analysis, Seismic response analysis

1 引言

液化天然气(Liquefied Natural Gas, 以下简称 LNG) 储罐是存储、使用 LNG 过程中所用到的重要设备, 地震会导致其丧失使用功能, 且爆炸、火灾及环境污染更会引发灾难性的后果, 这些破坏所导致的损失远远超过储罐本身及储液的经济价值^[1-3]。根据国内外地震震后调查表明, 罐壁局部失稳是储罐最常见的破坏形式, 包括象足失稳和菱形失稳^[4-6]。随着储罐容积的增大, 地震对其安全性的影响也越来越严重, 因此, 对大型储罐在地震工况下的动力响应研究显得尤为重要。

地震载荷作用下储罐的动力特性是由储罐自身的振动特性和地震激励共同决定的^[7]。绝热层作为储罐主要的组成部分, 其作用是减小储罐漏热。目前, 绝热层的研究大都集中在保温方面, 对大型储罐结构影响的研究很少有报道, 而地震载荷作用下的绝热层对大型 LNG 储罐结构的影响研究更是少之甚少。本文从预应力模态分析和地震响应分析两方面研究绝热层对大型 LNG 储罐动力特性的影响, 分别建立有绝热层和无绝热层的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐三维模型, 应用 ANSYS 有限元软件首先进行预应力模态分析, 确定储罐的固有频率和振动型式, 其次进行地震响应分析,

收稿日期: 2015 - 02 - 02

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划项目(1203GKDA001)。

作者简介: 陈叔平(1964 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事低温储运与传热的研究。

得到地震激励下储罐动力响应情况,对防止地震载荷作用下储罐稳定性的破坏具有指导意义。

2 大型 LNG 储罐有限元模型

2.1 储罐几何参数及材料属性

以国内某地 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 单容储罐为研究对象,外罐内径 35m,高 27.612m,材料为 Q345R,罐壁从上到下分为 14 层。内罐内径 33m,高 26.010m,材料为 S30408,罐壁从上到下分为 13 层。拱顶梁材料为 Q345R,径向梁为 56 根 HN300 \times 150b 的 H 钢,径向梁之间有 5 道 22b 的环向槽钢;拱顶蒙皮材料为 Q235B,厚度 6mm。夹层绝热层材料为膨胀珍珠岩,厚度 1000mm;底部绝热层材料为泡沫玻璃砖,厚度 750mm。储罐的材料属性见表 1。

表 1 储罐材料属性

Tab. 1 Material properties of storage tank

材料	密度/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比
Q345R	7850	2.06×10^5	0.3
S30408	7860	2.14×10^5	0.278
Q235B	7850	2.10×10^5	0.25
膨胀珍珠岩	60	5×10^4	0.12
泡沫玻璃砖	145	1.25×10^3	0.25

2.2 有限元模型

不考虑附件的影响,对空罐结构进行简化,运用 ANSYS 有限元软件,分别建立有绝热层和无绝热层储罐有限元模型,如图 1 和图 2 所示。

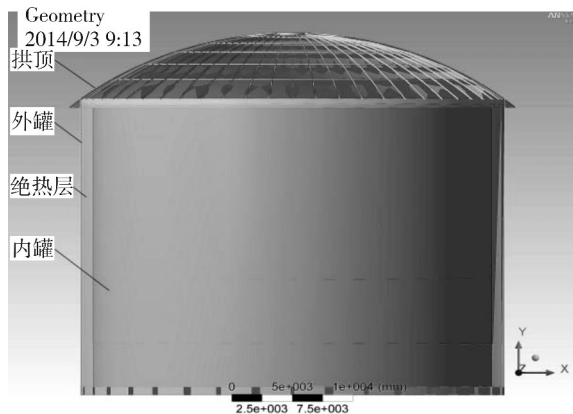


图 1 有绝热层储罐有限元模型

Fig. 1 Finite element model of storage tank with heat insulation layer

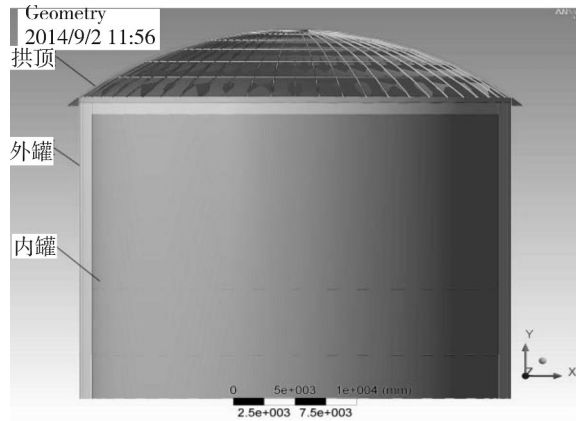


图 2 无绝热层储罐有限元模型

Fig. 2 Finite element model of storage tank without heat insulation layer

整个模型网格划分采用自适应网格划分方法,并控制网格大小。有绝热层储罐模型划分后单元总数 250366 个,节点数 482903 个;无绝热层储罐模型划分后单元总数 181467 个,节点数 354540 个。储罐采用锚固连接,罐底视为固定端,施加固定约束;拱顶无约束,视为自由端。

3 模态分析

3.1 模态分析理论

模态分析即自由振动分析,主要用于确定结构的固有频率和振动型式,是解决谐响应分析、瞬态动力学分析以及响应谱分析等复杂动态问题的基础。模态分析的最终目标是识别出系统的模态参数,其主要应用可归纳为:评价现有结构系统的动态特性、在新产品设计中进行结构动态特性的预估与优化设计、诊断及预报结构系统的故障、控制结构的辐射噪声、识别结构系统的载荷^[8]。

模态分析方程如下:

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\Phi_i\} = 0 \quad (1)$$

式中 ω_i 为第 i 阶模态的固有频率; $[M]$ 为结构的质量矩阵; $[K]$ 为结构的刚度矩阵; Φ_i 为第 i 阶模态的振型向量。

受不变载荷作用产生的应力可能会影响结构固有频率,尤其对某一个或两个尺度很薄的结构,在执行模态分析时需要考虑预应力的影响。

预应力模态分析公式:

$$([K + S] - \omega_i^2 [M]) \{\phi_i\} = 0 \quad (2)$$

式中, $[S]$ 为结构的应力刚度矩阵。

3.2 LNG 储罐模态分析

对两种有限元模型进行模态分析,计算后提取前 30 阶模态固有频率以及部分模态振型图,分别如图 3、图 4 所示。

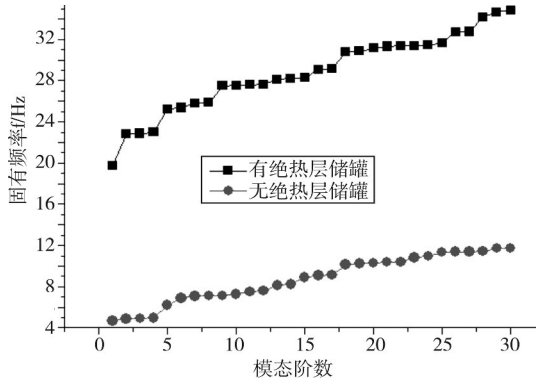
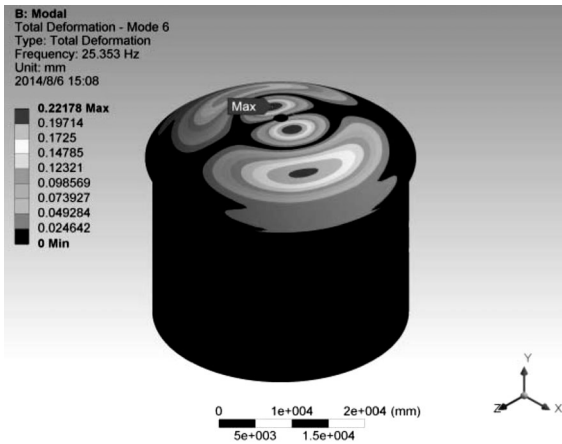


图 3 模态阶数与固有频率曲线图

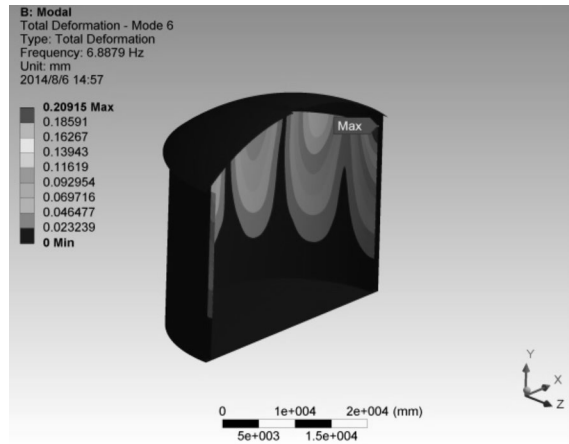
Fig. 3 Modal order and inherent frequency figures

图 3 为两种模型的模态阶数分别所对应的固有频率曲线图,从图中可以看出:两种模型随着模态阶数的增大,对应的固有频率均呈现逐渐增大的趋势,且有绝热层储罐固有频率增大的较快;但是对于某一种模型来说,相邻两阶模态之间的固有频率变化并不是很大;模态阶数相同时,有绝热层储罐的固有频率高于无绝热层储罐,出现这种现象的原因是由于绝热层的存在增大了储罐整体刚度,而刚度越大振动频率越高。

图 4 为两种储罐模型的部分模态振型图,由图可以看出,对于有绝热层的储罐,低模态阶数时,位移变形主要发生在拱顶处,且位移变形呈现环状的特点,变形量沿环状径向逐渐减小,环状位置分布呈现对称的特征。随着模态阶数的增大,拱顶的位移变形量最大值逐渐减小。第十八阶,



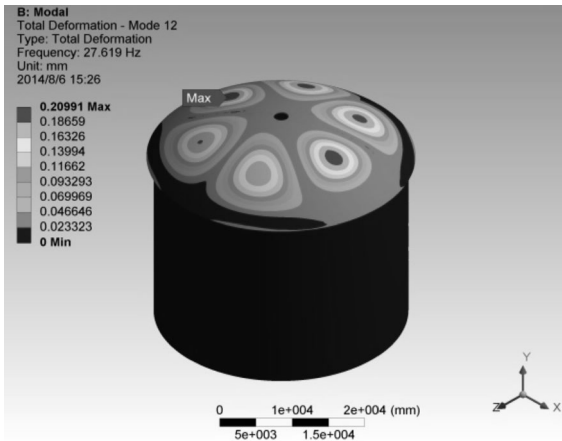
(a) 为有绝热层储罐



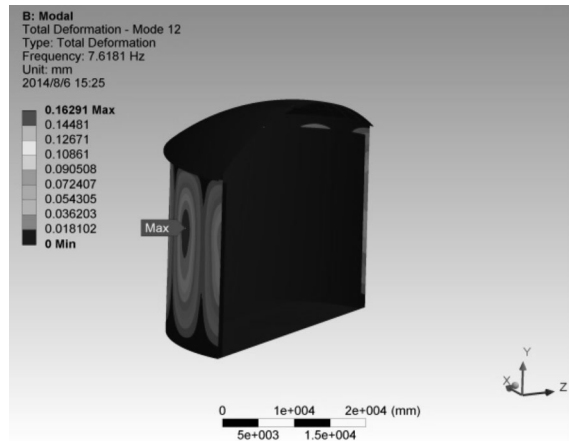
(b) 为无绝热层储罐

I 第六阶

I The sixth order



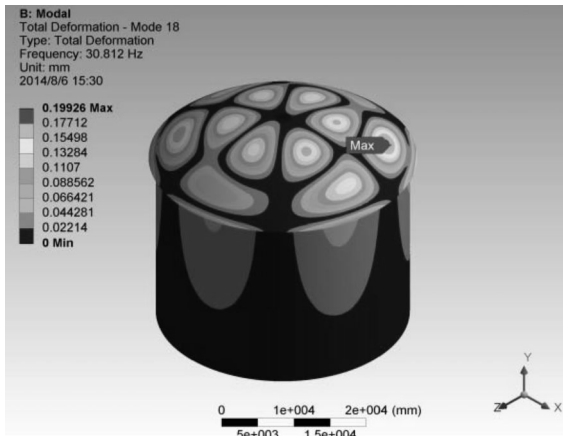
(a) 为有绝热层储罐



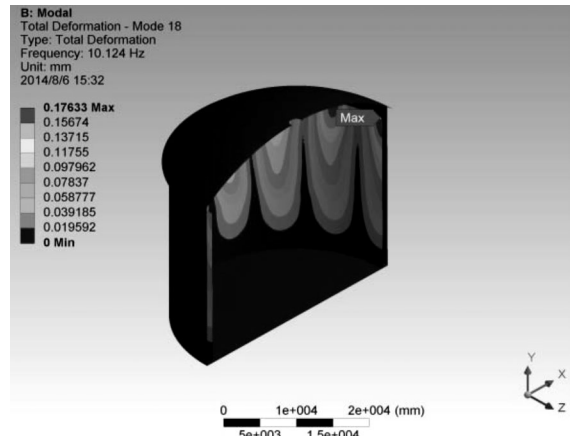
(b) 为无绝热层储罐

II 第十二阶

II The twelfth order



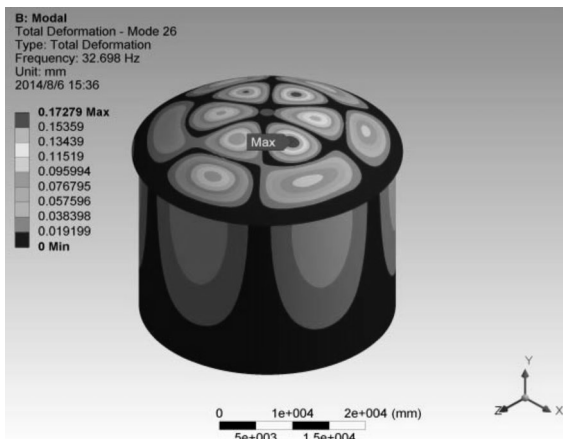
(a) 为有绝热层储罐



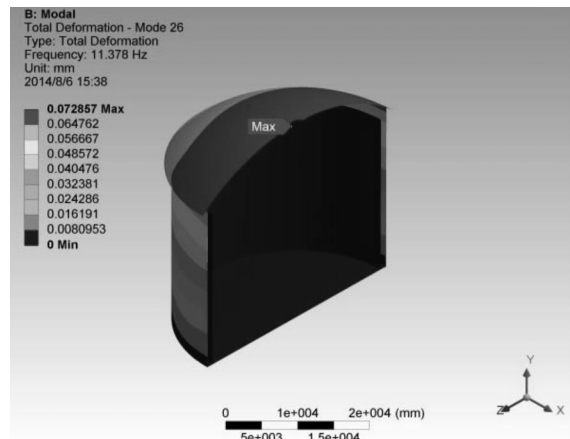
(b) 为无绝热层储罐

III 第十八阶

III The eighteenth order



(a) 为有绝热层储罐



(b) 为无绝热层储罐

IV 第二十六阶

IV The twenty - sixth order

图 4 储罐模态振型图

Fig. 4 Modal vibration mode figure of storage tank

罐壁开始发生位移变形,出现拱顶和罐壁共同振动现象,且随着模态阶数的增大,位移变形范围逐渐扩大,这说明罐壁的固有频率在激发的同时拱顶也在进行固有振动,即两者的固有频率值相近。对于无绝热层储罐,位移变形主要发生在罐壁处,发生在内罐壁。随着模态阶数的增加,位移变形开始在内外罐壁间交替发生,位低模态阶数时主移变形与有绝热层储罐相似也呈现环状的特点,要变形量沿环状径向逐渐减小,环状位置分布呈现对称的特征,而在该过程中拱顶几乎无位移变形。第二十六阶,拱顶开始发生位移变形,出现拱顶和罐壁共同振动现象,说明无绝热层储罐也存在罐壁和拱顶固有频率值相近的情况。对于两种

模型,低模态阶数时位移变形发生的位置不同,高模态阶数时拱顶和罐壁均发生位移变形,有绝热层储罐位移变形量的最大值大于无绝热层储罐,说明绝热层的存在增大了储罐的位移变形量,但最大位移变形量发生部位在拱顶处,这样对储罐安全并不会造成很大的影响。

4 地震响应分析

4.1 响应谱分析理论

响应谱分析是一种将模态分析结果与一个已知的谱联系起来计算模型的位移与应力的分析技术。响应谱分析替代时间-历程分析,主要用于

确定结构对时间变化载荷(如地震、风载、喷气发动机等)的动力响应情况^[9]。

GB 50011 - 2010《建筑抗震设计规范》^[10]中的 5.1.5 部分建立了地震响应系数与结构自振周期的关系式,利用该关系式计算地震响应系数,进而确定施加于结构模型上的水平地震加速度频率响应谱。地震响应系数关系式为:

$$\begin{cases} \alpha = [0.45 + (10\eta_2 - 4.5)T]\alpha_{max} & 0 \leq T \leq 0.1 \\ \alpha = \eta_2 \alpha_{max} & 0.1 < T \leq T_g \\ \alpha = (T_g/T)^\gamma \eta_2 \alpha_{max} & T_g < T \leq 5T_g \\ \alpha = [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)]\alpha_{max} & 5T_g < T \leq 6.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 α 为地震影响系数; α_{max} 为地震影响系数最大值; η_1 为直线下降段斜率调整系数; γ 为衰减指数; T_g 为特征周期, s; η_2 为阻尼调整系数; T 为结构自振周期, s。同时 GB 50011 - 2010《建筑抗震设计规范》中的 5.1.5 部分规定: ①除有专门规定外,结构阻尼比 ζ 取 0.05, η_2 取 1.0, γ 取 0.9, m_1 取 0.02; ②当结构阻尼比 ζ 按有关规定不等于 0.05 时, γ 、 η_1 、 η_2 应按式(3a)、式(3b)、式(3c)计算,并且必须满足 $\eta_1 \geq 0$, $m_2 \geq 0.55$ 。

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta} \quad (3a)$$

$$\eta_1 = 0.02 + \frac{0.05 - \zeta}{4 + 32\zeta} \quad (3b)$$

$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} \quad (3c)$$

4.2 LNG 储罐地震响应分析

4.2.1 地震响应谱分析参数

GB50011 - 2010《建筑抗震设计规范》^[10]中附录 A 规定了该地的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐场地为 III 类,抗震设防烈度 7 度,设计基本地震加速度为 0.15g,设计地震分组为第三组,并由该标准查得阻尼比 $\zeta = 0.05$,地震响应系数最大值 $\alpha_{max} = 0.08$,场地特征周期 $T_g = 0.65\text{s}$ 。由于储罐受到的地震激励是以加速度谱的形式施加的,所以必须先根据响应谱理论关系式计算出地震响应系数,并生成地震加速度频率响应谱,如表 2 所示。

4.2.2 地震响应分析结果

基于 ANSYS Workbench13.0 中静力分析模块 Static Structural 和模态分析模块 Modal 计算的基础上,关联响应谱分析模块 Response Spectrum,对两种 LNG 储罐模型进行地震响应分析。地震

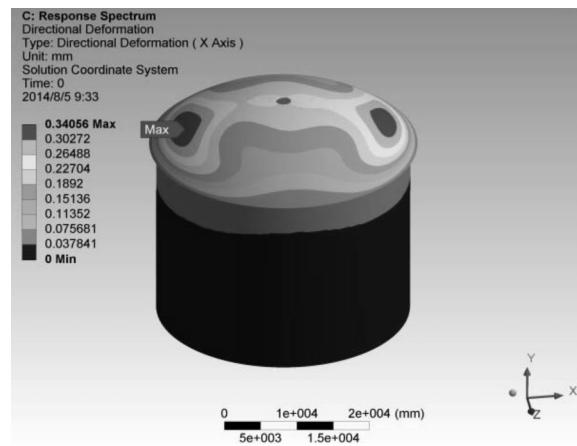
载荷以加速度频率响应谱的形式施加到模型的水平方向上,通过计算分别得到两种模型水平和竖直方向的位移变形量如图 5 和图 6 所示,等效应力结果如图 7 和图 8 所示。

表 2 地震加速度频率响应谱

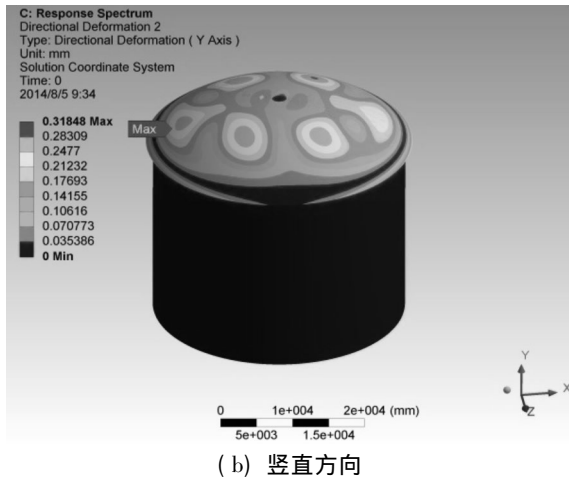
Tab. 2 Frequency response spectrum of seismic acceleration

频率 <i>f</i> /Hz	加速度 α <i>I</i> /(m/s ²)	频率 <i>f</i> /Hz	加速度 α <i>I</i> /(m/s ²)	频率 <i>f</i> /Hz	加速度 α <i>I</i> /(m/s ²)
0.167	0.144	0.408	0.242	2.857	0.800
0.174	0.148	0.444	0.262	3.333	0.800
0.182	0.152	0.448	0.285	4.000	0.800
0.190	0.156	0.541	0.312	5.000	0.800
0.200	0.160	0.606	0.346	6.667	0.800
0.211	0.164	0.690	0.389	10.000	0.800
0.222	0.168	0.800	0.444	11.111	0.756
0.235	0.172	0.952	0.520	12.500	0.712
0.250	0.176	1.176	0.628	14.286	0.668
0.267	0.180	1.538	0.800	16.667	0.624
0.286	0.184	1.667	0.800	20.000	0.580
0.308	0.188	1.818	0.800	25.000	0.536
0.328	0.199	2.000	0.800	33.333	0.492
0.351	0.212	2.222	0.800	50.000	0.448
0.377	0.226	2.500	0.800	100.000	0.404

图 5 为水平地震载荷作用下有绝热层储罐位移变形量图,图 6 为水平地震载荷作用下无绝热层储罐位移变形量图。由图 5 可以看出,在水平地震载荷作用下有绝热层储罐水平和竖直方向位移变形量都主要发生在拱顶处,而罐壁仅上部有很小的变形量,其他部位几乎无变形发生,且拱顶水平和竖直方向最大位移变形量(0.341mm 和 0.318mm)近似相等。由图 6 可以看出,在水平地震载荷作用下无绝热层储罐拱顶和罐壁处均发

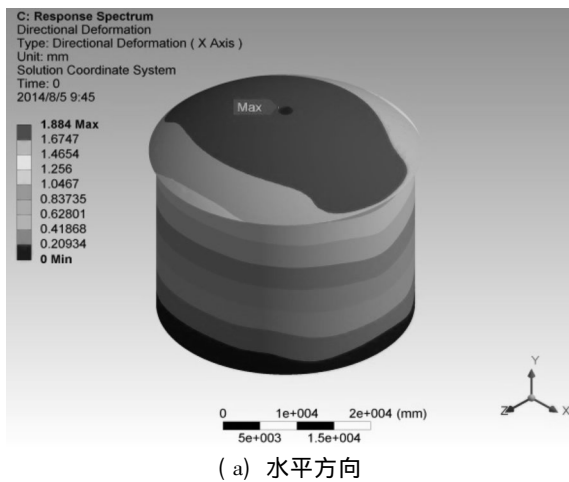


(a) 水平方向

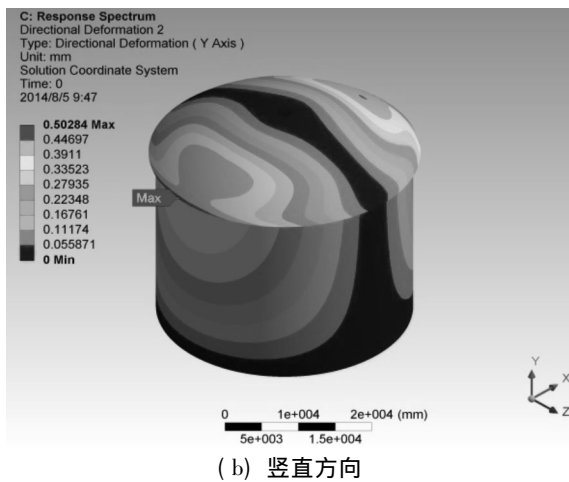


(b) 竖直方向

图 5 有绝热层储罐位移变形量



(a) 水平方向



(b) 竖直方向

图 6 无绝热层储罐位移变形量

Fig. 6 Displacement deformation of storage tank without heat insulation layer

生位移变形,水平方向最大位移变形量(1.884mm)明显大于竖直方向最大位移变形量(0.

503mm),且最大变形程度较竖直方向严重。对于两种模型,有绝热层储罐水平和竖直方向最大位移变形量均小于无绝热层储罐,说明绝热层的存在改变了储罐位移变形发生的部位,并且减少了最大位移变形量。

图 7 为有绝热层储罐等效应力云图,图 8 为无绝热层储罐等效应力云图。由图 7 可以看出,

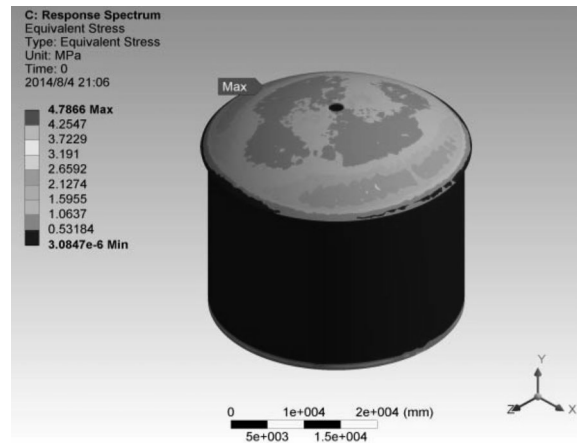


图 7 有绝热层储罐等效应力

Fig. 7 Equivalent stress of storage tank with heat insulation layer

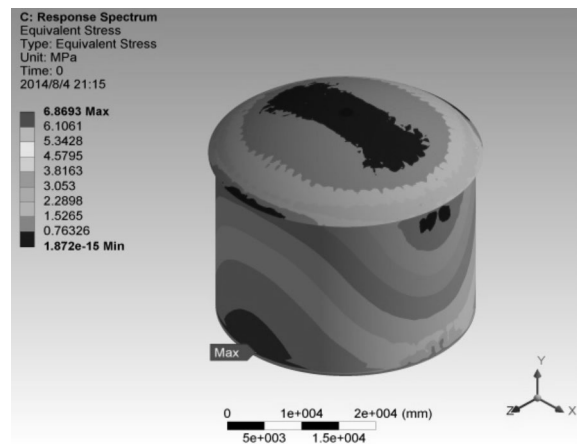


图 8 无绝热层储罐等效应力

Fig. 8 Equivalent stress of storage tank without heat insulation layer

有绝热层储罐应力主要集中在拱顶,最大应力分布在拱顶环向梁处,值为 4.787MPa,而罐壁仅底部有很少的应力分布。由图 8 可以看出,无绝热层储罐拱顶和罐壁均有应力分布,最大应力出现在罐壁底部,值为 6.869MPa。由此说明绝热层的存在有效改变了储罐的应力分布,并且减小了储罐的等效应力,对罐壁底部发生局部失稳具有很好改善作用。

5 结论

通过对有绝热层和无绝热层的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐进行模态分析和地震响应分析,得出以下结论:

(1) 绝热层的存在增大了罐壁整体的刚度,刚度越大振动频率越高,因此有绝热层储罐比无绝热层储罐固有频率高。

(2) 有绝热层储罐的振动主要集中在拱顶,无绝热层储罐的振动主要集中在罐壁,均呈现环状分布的特点,且位移变形量最大值均出现在环状近似中心处,并沿环状径向逐渐减少,而有绝热层储罐最大位移变形量大于无绝热层储罐。

(3) 绝热层的存在改变了地震响应条件下储罐位移变形发生的部位,主要发生在顶部,并且减少了最大位移变形量,罐体部位变形很小,有利于储存安全。

(4) 绝热层的存在有效改变了地震响应条件下储罐的应力分布,并且减小了储罐的等效应力,罐体部位应力很小,对罐壁底部发生局部失稳具有很好改善作用。

(5) 通过地震响应分析可知,绝热层的存在使罐体位移变形及应力发生的部位避开了罐壁底部易发生屈曲破坏的位置,有利于储罐的安全。

参考文献

- [1] 张瑞甫,翁大根,倪伟波,等. 特大型 LNG 储罐抗(减)震研究发展综述[J]. 结构工程师, 2010, 26(5): 164 - 171.
- [2] 张营. 大型全容式 LNG 储罐地震响应数值模拟研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [3] Chalhoub M S, Kelly J M. Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(7): 1451 - 1472.
- [4] Hamdan F H. Seismic behavior of cylindrical steel liquid storage tanks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(3): 307 - 333.
- [5] 沈利英, 沈士明. 大型储罐地震动力响应研究综述[J]. 压力容器, 2008, 25(9): 49 - 53.
- [6] 葛颂, 陈志平, 沈建民, 等. 立式储液罐象足屈曲的准静态数值模拟[J]. 压力容器, 2006, 23(1): 6 - 9.
- [7] 刘佳, 陈叔平, 刘福录, 等. $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐网壳拱顶动力特性分析[C]. 第八届全国压力容器学术会议论文集, 北京: 化学工业出版社, 2013, 587 - 590.
- [8] 凌桂龙, 丁金滨, 温正. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通(第一版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012, 137 - 138.
- [9] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术(第一版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012, 283 - 284.
- [10] GB 50011 - 2010, 建筑抗震设计规范[S].

(上接 35 页)

参考文献

- [1] Keenan B, Klaus Reuter. The design, experience and economic advantage of cryogenic turbo-expanders with active magnetic bearings. American Society of Chemical Engineer Eighth Cryogenic Intersociety Symposium. 1991.
- [2] 江楚标. 透平膨胀机及发展动态[J]. 深冷技术, 2001, 5(1).
- [3] Schweitzer G, Bleuler H, Maslen E H, et al. Magnetic bearings: theory, design and application to rotating machinery [M]. Springer, 2009.
- [4] Kameno H, et al. Application of Active Magnetic Bear-

ings for Helium - Cold Compressor [J]. KOYO Engineering Journal, 2000, 158: 16 - 20.

- [5] 陈龙. 磁力轴承结构参数化设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [6] 朱晓明. 径向磁力轴承结构设计软件系统的开发[J]. 电子设计工程, 2011, 19(19): 55 - 57.
- [7] 文湘隆, 胡业发, 陈龙. 径向磁力轴承定子结构参数的确定[J]. 机械制造, 2006, 44(3): 25 - 27.
- [8] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] 漆新民. 电磁场论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1998.