

石油技术

超低温作用下 LNG 储罐外壁变形分析

张云峰 刘晓丽* 余亚辉 王伟勋¹

(大庆石油学院土木建筑工程学院,大庆 163318 河北建设勘察研究院有限公司,石家庄 050000)

摘要 当 LNG 储罐内罐泄漏时低温液体直接与外罐混凝土接触,使外罐内壁与外壁之间形成明显的温差。分析了超低温作用引起的内外温差对整个结构内力的影响,得到了储罐外壁在超低温作用下温度分布规律及其变形规律。结果表明:超低温作用下 LNG 储罐外壁温度分布由内而外呈线性分布,罐壁的温度分布比较均匀;低温作用罐壁的变形比理想状态增大很多,且随内外温差的增大变形有所增长。

关键词 LNG 储罐 泄漏 超低温 变形规律

中图分类号 TE85 **文献标志码** A

预应力液态天然气(Liquefied Natural Gas,简称 LNG)储罐是国际上积极推动的液化天然气储备的存储方式。如果储罐内罐泄漏,低温液体直接与外罐混凝土接触,使外罐内壁与外壁之间形成温差,同时内部超低温又引起混凝土和钢材各项性能发生极大的变化,对结构会产生较大的影响。本文通过对 LNG 外罐进行有限元分析,得出其在内罐泄漏条件下储罐外壁在超低温作用下的温度分布规律及变形规律。

1 工况条件

本文以 LNG 事故备用站的一座 LNG 储罐为研究对象。储罐属于地上式全容罐,要求在 -160°C 的低温储存 LNG,可承受 230 mPa 气压^[1]。

在内罐泄露,泄露液位为正常储液位时,对储罐外壁在理想状态(一般说来也就是不考虑温度应力

作用,假设 LNG 预应力外罐始终处于正常室外气温)下预应力外罐不会有任何温度应力,其荷载组合为预应力+重力+顶压+液压+气压,将该工况定义为工况 1。

考虑到季节对室外温度的影响,造成储罐内外温差的不同,根据实际工程要求分别取冬季 6.9°C 、夏季 27.5°C 作为两种工况进行分析,分别定义为工况 2 和工况 3。

2 有限元分析

2.1 实例模型的具体计算参数

储罐外壁内径为 $54\ 800\text{ mm}$,壁厚 690 mm ,外径 $56\ 100\text{ mm}$;穹顶内径 $54\ 800\text{ mm}$,矢高 $7\ 342\text{ mm}$,穹顶厚度 400 mm ;内壁高 $29\ 300\text{ mm}$,最大液体溢出高度 $23\ 670\text{ mm}$ 。

2.2 常温时材料的基本性能参数

用于外罐的材料主要为混凝土、预应力钢筋、普通钢筋,罐壁采用 C40 混凝土,预应力筋采用 $7\ 5\text{ mm}$ 的钢绞线,普通钢筋采用 HRB400 详细材料参数参见文献[2]。

储罐用 ANSYS9.0 进行内力计算和分析,罐

2009 年 10 月 23 日收到 黑龙江省自然科学基金重点项目 (ZD200805),黑龙江省教育厅科学技术研究面上项目 (11541102)资助
第一作者简介:张云峰(1966-),男,博士,教授,研究方向:预应力混凝土结构。

* 通信作者简介:刘晓丽,女, E-mail lixiaoli20020@163.com

壁和穹顶均采用 SOLID45 实体单元;基础对储罐的作用为罐壁底部的固定约束。储罐的计算模型见图 1。

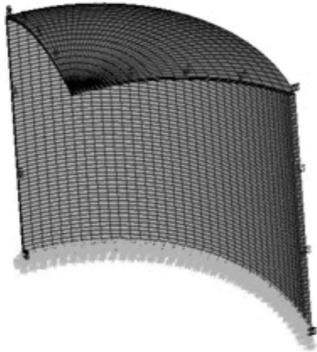


图 1 LNG 预应力储罐计算模型

2.3 低温时模型的分析

对于超低温作用下的储罐,本文采用间接耦合法对预应力钢筋混凝土储罐实例模型进行热-结构耦合有限元分析,由于低温引起材料性能发生变化,所以材料参数较常温时有所变化,具体参数参见文献 4。通过有限元计算分析得出数据结果。

2.4 工况 1 预应力外罐变形的有限元分析

经 ANSYS 有限元计算后处理,罐壁在工况 1 荷载组合作用下的变形图如图 2 所示,工况 1 是储罐在设计最大储液位考虑气压作用的储罐变形图,由图可知储罐沿高度整体内缩,底部固定约束端都没有发生变形,沿高度向上储罐内缩逐渐增大,到达罐壁高度三分之二处内缩变形达到最大值,沿高度继续向上变形以一定的趋势减小。



图 2 工况 1 变形图

注:黑色外轮廓网格代表变形前罐体,弯曲实体代表变形后罐体

2.5 热分析

由于前文的实例模型是采用常温材料参数所建立的,因此在热分析过程中的模型需要在定义单元类型,材料特性以及实常数做一定程度的修改,其他的部分几乎没有发生很大的变化。考虑到耦合的因素,单元类型方面选择了热分析实体单元 SOLID70 和杆单元 LNK 33。其中 SOLID70 和 LNK 33 单元分别与结构单元中的 SOLID45 和 LNK 8 有对应的转换关系,替换单元调整命令流后生成 LNG 预应力储罐热分析模型。假定整个模型的导热系数恒定不变。

图 3 是工况 2 温差作用下罐壁热分析的温度分布云图,为了更清晰地进行数值分析,沿着罐壁的厚度,沿节点 158 到节点 2459 作为一条路径,见图 4 对这条路径上的温度值进行映射得到罐壁温度沿厚度的分布图,如图 5 图 6 分别为工况 2 和工况 3 温度分布图,可以看出,温度分布由内而外呈线性分布,说明罐壁的温度分布比较均匀。

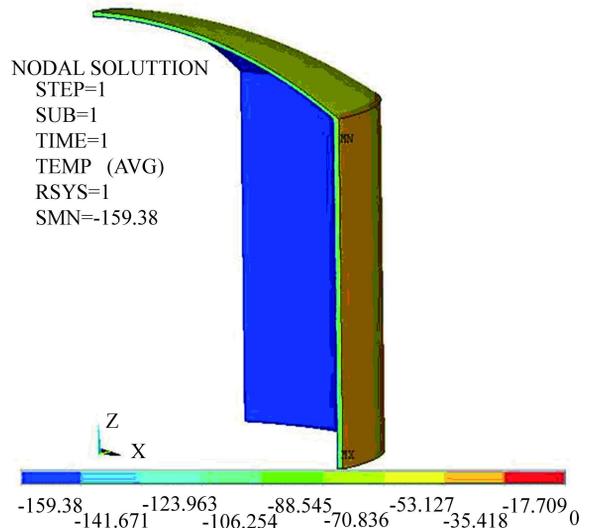


图 3 工况 2 罐壁温度分布云图

注: NODAL SOLUTION: 节点计算; STEP= 1 第一个计算步; SUB= 1: 第一计算步的第一子步; TME= 1 时间是 1 s
TEMP: 平均温度; RSYS= 1 柱坐标系, SMN= - 159.38 温度最小解为 - 159.38C

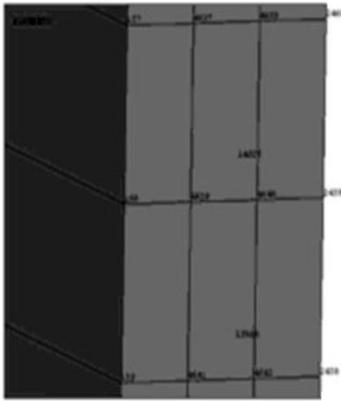


图 4 罐壁厚度方向路径示意图

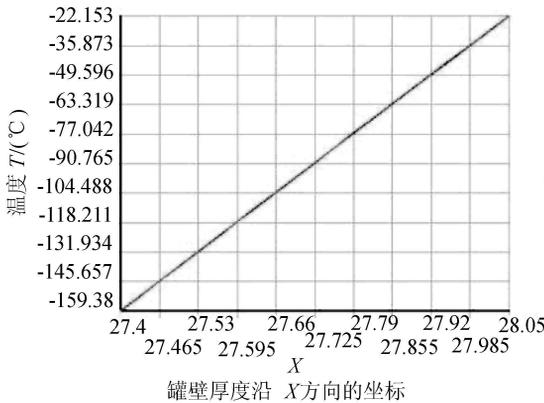


图 5 工况 2 温度沿罐壁厚度分布图

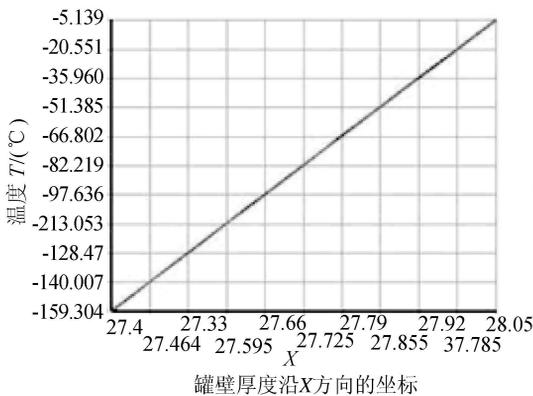


图 6 工况 3 温度沿罐壁厚度分布图

2.6 热 - 结构耦合有限元分析

重新进入前处理, 转换单元类型并调整相关数据设置, 重新定义结构分析中的材料随温度变化的各参数, 然后, 施加节点温度载荷, 并设置初始温度

为室外气温 $n^{\circ}\text{C}$, 施加前文工况 1 的结构荷载, 完成耦合分析计算。可以得出工况 2 3 两种工况的分析结果。

混凝土为单向受压状态的混凝土, 其本构关系的具体数学模型采用混凝土设计规范 GB 50010^[3] 建议的公式。混凝土的各项指标随温度的变化和相对湿度有很大关系, 本文取相对湿度为 50% 时对混凝土外罐进行研究, 在此相对湿度下, 具体各项参数随温度的变化关系参见文献 [4] ~ 文献 [6]。依据上述参数和本文采用的混凝土本构关系, 得到热 - 结构耦合分析混凝土的本构关系图 7。

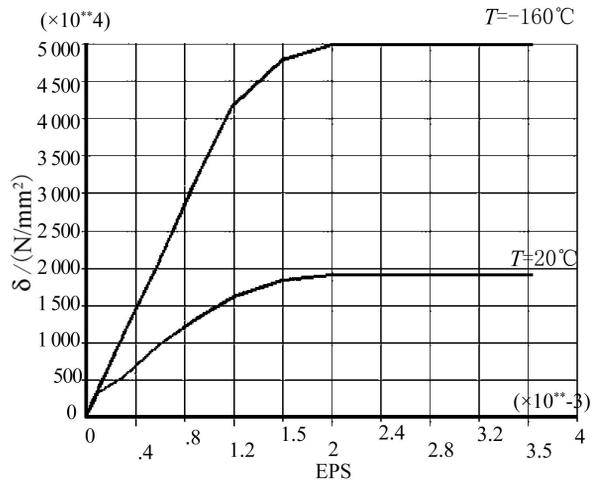


图 7 混凝土的本构关系示意图

2.7 各工况的变形分析

由于实际变形不是很明显, 为了便于观察将变形图全部放大 300 倍。由图 8 图 9 图 10 对比可以看出: 考虑低温作用罐壁的变形比理想状态增大很多, 且随内外温差的增大变形有所增长, 说明温度对罐壁影响很大, 可以作为影响其受力的控制荷载之一。



图 8 工况 1 罐壁的变形图



图 9 工况 2 罐壁的变形图



图 10 工况 3 罐壁的变形图

3 结语

在超低温作用下, 预应力 LNG 储罐外壁温度分布由内而外呈线性分布, 说明罐壁的温度分布比较均匀。

考虑低温作用罐壁的变形比理想状态增大很多, 且随内外温差的增大变形有所增长, 说明温度对罐壁影响很大, 可以作为影响储罐外壁受力的控制荷载之一。

参 考 文 献

- 1 束廉阶, 顾 炜, 施广明, 等. 大型低温液化天然气钢筋混凝土储罐预应力设计与施工技术. 工业建筑, 2007 (11): 32- 44
- 2 江见鲸, 陆新征, 江 波. 钢筋混凝土基本构件设计 (第 2版). 北京: 清华大学出版社, 2006 280
- 3 GB 50010-2002. 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- 4 Jeon Sejin, Park E-S Daewoo E&C Co. Ltd. Korea. Toward a Design of Larger Above-ground LNG Tank. LNG Journal 2004 4
- 5 Meinen E LNG storage enclosed in prestressed concrete safety wall The Oil and Gas Journal 1979 (5): 117-120.
- 6 Law B LNG storage tanks concrete in an ultra-cold environment Concrete Construction 1983; 28 (6): 465- 466

Morphing Analysis of Outer Wall of LNG Storage Tank Influenced by Ultra Low Temperature

ZHANG Yun-fen, LIU Xiao-li*, YU Ya-hui, WANG Weixun¹

(Civil Engineering College, Daqing Petroleum Institute Daqing 163318 P. R. China)

Hebei Research Institute Construction & Geotechnical Investigation Co. Ltd, Shijiazhuang 050000 P. R. China)

[Abstract] When the triple lining of LNG storage tank diverging, temperature difference is produced between internal and external wall of outer tank for cryogenic liquid contacting with prestressed storage tank. Total structure internal force influenced under temperature difference of ultra low temperature caused is analyzed. Temperature distributed regulation and morphing regulation of outer wall under ultra low temperature is obtained. Result displaying: temperature distributed of outer wall of LNG storage tank under ultra low temperature displays linearity from insider to outside and equal. Morphing of tank wall under low temperature is much bigger than that under ideal situation, and morphing increasing by raising of temperature difference.

[Key words] LNG storage tank, diverge, ultra low temperature, morphing regulation