

文章编号: 1000-8241(2011)10-0000-04

LNG 储罐预应力混凝土外罐应力分布与裂缝形态

程旭东 朱兴吉 胡晶晶 于晓玮

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266555)

程旭东等. LNG 储罐预应力混凝土外罐应力分布与裂缝形态. 油气储运, 2011, 30(10): 748 - 751.

摘要: LNG 储罐的外罐主要是由预应力混凝土建造而成, 混凝土作为一种复杂的非线性材料, 其受力特点为抗压不抗拉。应用 ADINA 有限元软件, 建立钢筋混凝土分离式模型, 通过应力云图及裂缝开展图, 研究 LNG 储罐在正常使用状态及内罐完全泄漏状态下预应力混凝土的应力分布、裂缝开展情况及破坏形态。结果表明: 在正常使用状态下, 外罐上下两固定端第一主应力最大; 在内罐泄漏状态下, 底部约 1/4 高度第一主应力最大, 此三处为外罐最易产生裂缝的部位, 破坏形态均为混凝土受拉破坏。研究结果为国内 LNG 储罐的自主设计与建造提供了理论依据。

关键词: LNG 储罐; 混凝土; 非线性; 裂缝; 破坏形态

中图分类号: TE85

文献标识码: A

DOI: CNKI:13-1093/TE.20111011.1957.001

LNG 储罐的外罐一般为预应力混凝土结构, 由于钢筋和混凝土的非线性特征, 使得 LNG 储罐的预应力钢筋混凝土外罐呈现明显的结构非线性。混凝土作为一种典型的抗压不抗拉材料, 在多数情况下均会带裂缝使用。LNG 储罐允许 LNG 从内罐泄漏进入外罐, 但决不允许通过外罐进入环境。在使用过程中, 裂缝开展过大不仅会使混凝土内的钢筋受腐蚀, 而且极易造成重大事故。因此, 研究钢筋混凝土外罐的结构非线性、分析裂缝大小与开展情况十分必要。

1 荷载工况组合与材料本构关系

1.1 外罐所受荷载组合

外罐所受主要荷载包括重力、预应力、液压和气压, 正常使用阶段的顶部活荷载可忽略不计^[1]。正常使用阶段, 荷载组合为重力+预应力; 水压测试阶段, 荷载组合为重力+预应力+水压力; 内罐泄漏时, 荷载组合为重力+预应力+液压+气压。

内罐泄漏时, 由于泄漏后剩余的储液量不同, 故对外罐施加的压力也不同, 以内罐满罐时泄漏形成的液压最大。充水预压时, 水对外罐底部施加的最大压力与内罐满罐时泄漏形成的液压大小相等, 但充水高度仅为内罐高度的一半, 此时外罐的变形程度及裂缝均较小。因此, 最不利工况为正常使用阶段预应力对混

凝土的破坏和满罐情况下内罐完全泄漏时气压及液压对外罐的影响。针对这两种工况, 采用 ADINA 软件研究外罐的应力、应变和裂缝开展情况。

1.2 钢筋混凝土结构的本构模型与破坏准则

1.2.1 钢筋数学模型与破坏准则

在钢筋混凝土有限元模型中, 钢筋的主要表示方式有 3 种: 分离式模型、埋藏式模型和分布式模型^[2]。所谓分离式模型是将混凝土和钢筋作为不同的单元处理, 且各自均划分为矩形或者三角形单元, 若忽略钢筋的横向抗剪强度, 可将其作为线性单元处理, 其首尾与二维单元结点相连。该模型的主要优点是简单, 且在钢筋与混凝土之间可以插入联结单元来模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移。

钢筋材料通常采用 Von Mises 屈服准则, 即当 $|\sigma_e| \geq f_y$ (σ_e 为等效应力, f_y 为材料的剪切屈服强度) 时, 钢筋进入塑性阶段。在钢筋混凝土结构的非线性分析中, 对于有明显屈服点的普通钢筋, 一般采用双线性理想弹塑性的应力-应变关系; 对于没有明显屈服点的预应力钢筋, 屈服应力一般取 0.2% 应变所对应的应力值。

1.2.2 混凝土数学模型与破坏准则

混凝土的重要特征之一是其抗拉强度较低, 大多情况下是带裂缝使用的。由于裂缝的存在, 其周围的应力会发生突变且刚度降低, 在混凝土非线性分析中

需要重点关注。在 ADINA 软件中,采用分离式裂缝模型将裂缝处理为单元边界,一旦出现裂缝即调整节点位置或增加新的节点,并重新划分单元网格,使裂缝处于单元边界与边界之间。这样由裂缝引起的非连续性可以得到清晰地描述,裂缝的位置、形状、宽度也可以得到明确地表达。

混凝土的基本属性为:当主拉应力达到最大允许值时,混凝土被拉坏;在较高应力的作用下,混凝土被压溃;混凝土压溃后应变软化,直至极限应变而被完全破坏,前两种状态由拉压破坏包络线决定。采用 LNG 储罐的三维实体模型,其应力状态接近于双轴状态^[3],故在混凝土材料模型的破坏曲线中采用 Kupfer 模型(图 1)。

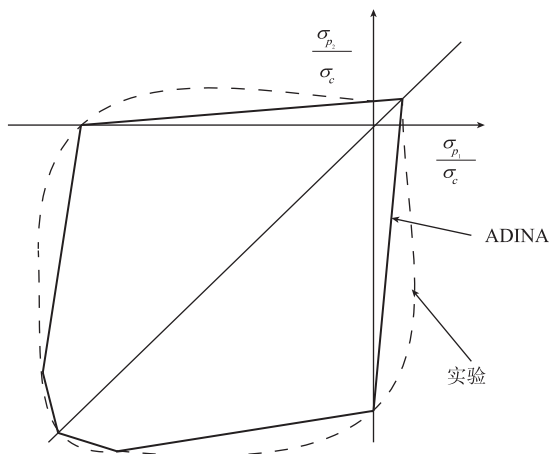


图 1 双轴混凝土受压破坏包络线

表 1 LNG 储罐外罐主要材料参数

材料	强度标准值(设计值)/(N·mm ⁻²)	公称截面面积/mm ²	弹性模量/(10 ⁴ N·mm ⁻²)	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
C40 混凝土	轴心抗拉	2.39(1.71)	—	0.17	2 500
	轴心受压	26.8(19.1)			
预应力钢筋	1 860(1 320)	139	19.5	0.3	7 800
普通钢筋	400(360)	615.8	20.0	0.3	7 800

2 外罐应力、裂缝及破坏形态分析

以某 LNG 事故备用站的 LNG 储罐(5×10⁴ m³)为研究对象(表 1),储罐内径 54.8 m,外径 56.2 m,壁厚 0.7 m,高 29.3 m,根据对称性,对外罐的 1/4 建模。罐壁采用 C40 混凝土,预应力筋采用 7×φ5 钢绞线,环向每 0.5 m 布置 6 根,纵向每 1.5° 布置 6 根钢绞线,施加 1 170 N/mm² 的预应力;普通钢筋采用 φ28 的 HRB400 钢筋,环向每 0.5 m 布置 1 条,纵向每 1° 布置 1 条。设计液位 23.6 m,要求可承压 2.3×10⁴ Pa,罐底最大压力为 134 014 Pa。

2.1 正常使用状态

2.1.1 应力和裂缝

在正常使用状态下,外罐只受重力和预应力的作用。依照混凝土变形及第一主应力分布云图(图 2)可知:在预应力的作用下,外层混凝土全部处于受拉状态,靠近上下两固定端的拉应力较大,已超过混凝土的抗拉强度。下部固定端已产生横向裂缝,说明此处纵向的第一主应力已超过混凝土的抗拉强度;而上部固定端不仅产生了横向裂缝,还产生了一排纵向裂缝,说明此处的横向主应力也已超过混凝土的抗拉强度。紧靠固定端,因为应力集中,一小部分内侧的混凝土产生了最大压应力(图 3)。在正常使用状态下,上下两固定端处是储罐的相对危险部位。

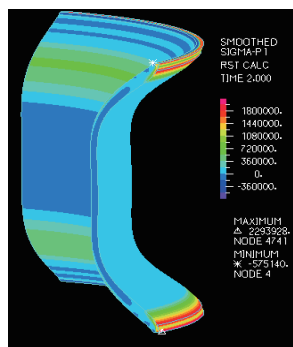


图 2 正常使用状态下第一主应力分布云图(×3 000)

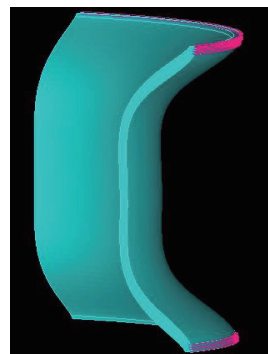


图 3 正常使用状态下外罐混凝土裂缝开展图(×3 000)

2.1.2 破坏形态

在壁厚不变的情况下布置7束预应力筋,每根均施加与原来相等的预应力,随着环向预应力的增加,外罐底部固定端混凝土被进一步拉裂,裂缝开展到预应力钢筋处。此时,外罐仍可以继续工作,但若内罐的LNG发生泄漏,即使产生很小的液压,外罐底部内侧的混凝土也很容易被拉裂而使内外裂缝贯通,导致外罐彻底破坏。

上述情况说明:在正常使用阶段,外罐最危险的部位为下部固定端,此处因环向预应力过大,使纵向预应力筋无法抑制混凝土横向裂缝的开展,破坏形态为混凝土受拉破坏,属于脆性破坏。在工程设计中可以通过合理增加普通钢筋的方法来提高外罐承受环向预应力的能力。这是因为普通钢筋不仅可以承受很大一部分拉应力,而且其与混凝土之间的粘结力也可以在一定程度上抑制混凝土裂缝的开展。

2.2 内罐泄漏状态

2.2.1 应力

在内罐满罐完全泄漏的状态下,外罐受到重力、预应力、液压及气压的作用。依照混凝土变形及第一主应力分布云图(图4)可知:储罐上部在预应力作用下仍向内凹陷,但储罐下部在内压作用下已向外突出。这是因为上部混凝土只受预应力和气压作用,不受液压作用或作用较小,因此与正常使用情况下的应力分布情况相近,大部分混凝土处于受压状态;在储罐底部约1/4高度,外罐产生最大变形,外层混凝土产生很大的拉应力,处于受拉状态,是外罐在液压作用下最易产生裂缝的部位。

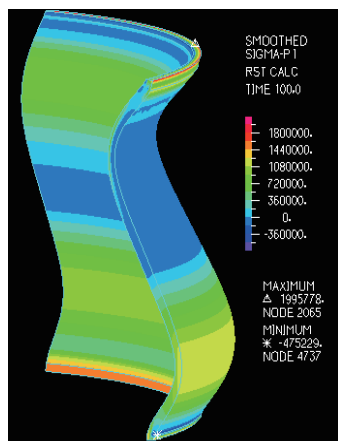


图4 内罐泄漏状态下第一主应力分布云图($\times 3000$)

2.2.2 裂缝

在壁厚不变的情况下布置5束钢绞线,每根施加 975 N/mm^2 的预应力,观察当内罐完全泄漏时外罐的破坏形态。根据其裂缝开展图(图5),发现除底部固定端产生裂缝外,底部1/4高度处也产生了大量纵向裂缝。在此裂缝开展区内,上下两端只在表面产生裂缝并沿厚度方向向内开展;中间处,纵向裂缝几乎贯穿整个外罐,说明该处因环形预应力不足而使混凝土沿纵向开裂;底部内侧混凝土产生横向裂缝,外层混凝土此时受压,正常使用阶段产生的横向裂缝闭合。

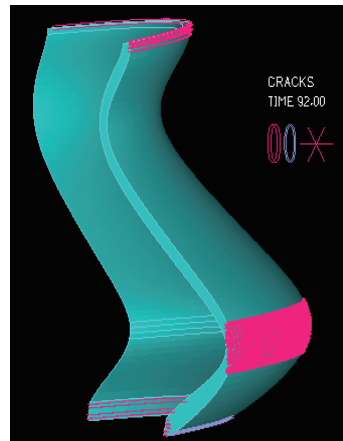


图5 内罐泄漏状态下外罐破坏时混凝土的裂缝开展图

2.2.3 破坏形态

在内罐完全泄漏的状态下,根据外罐破坏时预应力筋的受力情况(图6),纵向预应力筋施加的预应力并未发生较大变化,但环向预应力筋的受力情况有所改变。

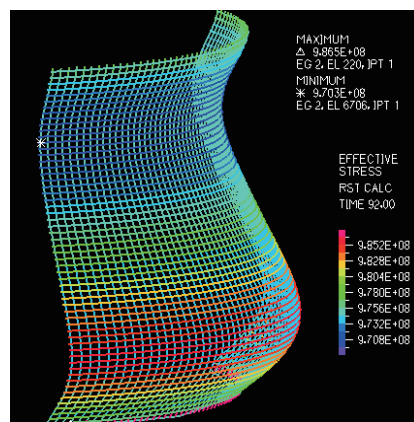


图6 内罐泄漏状态下外罐破坏时预应力筋等效应力云图

在下部外凸处预应力筋拉应力增大,但尚未达到其抗拉强度时混凝土就已破坏,说明内罐泄漏时,外罐

承受的内压主要由环向预应力筋所施加,一旦内压产生的环向应力超过预应力,外罐即破坏。由于外罐的纵向和环向尺寸很大而厚度较小,在受力变形时,虽已产生很大的挠度导致混凝土开裂,但钢筋的应变却仍然很小,故产生的拉应力有限,混凝土只能承受很小的内压。当环向应力超过施加的预应力时,外罐即破坏,破坏形态为混凝土受拉破坏,属于脆性破坏。

综上所述,应用 ADINA 软件对某大型 LNG 储罐预应力混凝土外罐进行应力和裂缝形态分析,得出结论:在正常使用状态下,外罐最危险的部位为底部固定端,该处混凝土易产生横向裂缝,设计时应在整体上减小所施加的环向预应力;在内罐泄漏状态下,外罐最危险的部位为底部约 1/4 高度处,该处混凝土易产生纵向裂缝,承受内压主要为预应力钢筋,设计时可忽略混凝土的承载作用,应在该处局部增加环向预应力筋的数量。

参考文献:

- [1] 王伟玲. 大型 LNG 预应力储罐静力荷载下受力性能研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2009.
- [2] 佟洪江. 钢筋混凝土构件的非线性分析[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [3] 黄晶. 碳纤维高强混凝土预应力扁梁框架结构的拟静力抗震性能研究[D]. 福州:福州大学,2003.

(收稿日期:2010-12-15)

作者简介:程旭东,副教授,1971年生,1994年博士毕业于中国石油大学(华东)工业与民用建筑专业,现主要从事土木工程和油田地面工程结构方面的教学与科研工作。

电话:0532-86981137;Email:chengxd@upc.edu.cn

(上接第 747 页)

根据上述结论,在径厚比(管道外径 D 与管道壁厚 t 的比值)不大于 100 的情况下,对 X65、X70、X80、X100、X120 钢级按直径 1 219 mm、压力 12 MPa 和直径 1 016 mm、压力 10 MPa 计算钢管选用壁厚(表 3)。

综合表 1、表 2 和表 3 数据,可以得出以下结论: X120/L830 钢级钢管基本可用于一级地区和二级地区直径 1 016 mm、压力 10 MPa 的管道,三级地区、四级地区应慎用;直径 1 219 mm、压力 12 MPa 管道应慎用。 X100/L690 钢级钢管基本可用于直径 1 016 mm、压力 10 MPa 管道的一级~四级地区;直径 1 219 mm、压力 12 MPa 管道应慎用。 X80/L555 钢级钢管基本可用于直径 1 016 mm、压力 10 MPa 管道的一级~四级地区;直径 1 219 mm、压力 12 MPa 管道可用在一级地区和二级地区,三级地区和四级地区应慎用。 X70/L485、X65/L450 钢级钢管基本可用于直径 1 016 mm、压力 10 MPa 管道的一级~四级地区;直径 1 219 mm、压力 12 MPa 管道可用在一级~三级地区。

参考文献:

- [1] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB50251—2003 输气管道设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [2] 中国石油天然气集团公司. GB50253—2006 输油管道设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [3] 美国机械工程师协会. ASME B31.8-2007 气体传输和配油管道系统[S]. 北京:兵器工业出版社,2007.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB50028—2006 城镇燃气设计规范[S]. 北京:建筑工业出版社,2007.
- [5] 王仪康. 现代高性能输气管线用钢[C]// 管线钢论坛论文集. 北京:2009.

(收稿日期:2010-05-05)

作者简介:许砚新,工程师,1977年生,2011年毕业于河北工业大学交通土建工程专业,现主要从事长输油气管道线路工程设计。

电话:13931601156;Email:xuyanxin@cppe.com.cn