

大型原油储罐的静力数值分析*

孙建刚** 王 凯 蒋 峰 赵晓磊 张荣华
(大连民族学院土木建筑工程学院) (大庆石油学院土木建筑工程学院)

孙建刚 王 凯等:大型原油储罐的静力数值分析,油气储运,2009,28(8) 20~26。

摘 要 建立了大型储罐的有限元模型,其静力问题采用空间有限元分析,地基用弹簧单元模拟,罐壁用壳单元模拟,液体用三维流体单元模拟。分析了储罐液位高度和地基模量对储罐应力的影响。分析结果表明,储罐液位越高,其根部和底板边缘区域内的环向应力、径向应力及轴向应力越大;地基模量对储罐外壁轴向应力和环向应力的影响主要集中在第一圈板的下部。对于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 原油储罐,正锥和倒锥底板储罐的应力和变形相似。

主题词 大型原油储罐 应力 锥度 有限元方法 数值分析

一、前 言

对于非锚固大型油罐,罐壁的最大应力发生在罐下部(一般在第一圈或第二圈罐壁上),同时该区域也是最容易发生“象足”屈曲的位置。在底板靠近边缘的部分,应力存在突变。可见,研究储罐下部和底板边缘的受力特点十分必要。

二、有限元模型的建立和参数设置

1、 单元网格划分

兼顾计算精度和计算量的要求,采用试算的方法确定网格密度。考虑到储罐壁下部受力比较复杂的特点,网格采用上疏下密的方式划分,划分之后的有限元模型见图 1。

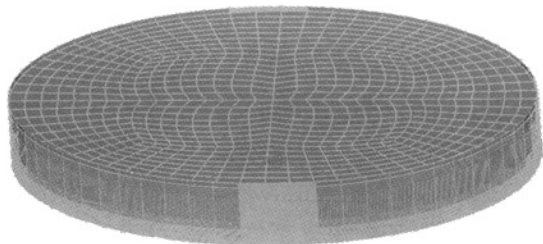


图 1 立式钢制储罐有限元模型

2、 地基单元的模拟

采用弹簧单元模拟地基,弹簧单元的概念化模型见图 2。可以通过储罐半径、储液密度、地基的剪切波速、土壤密度等参数计算地基总的等效刚度和

阻尼。

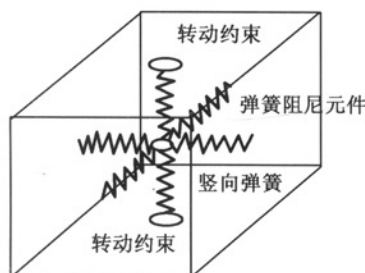
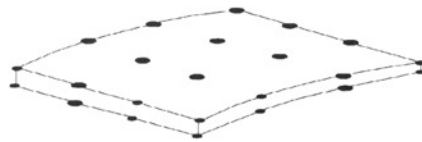


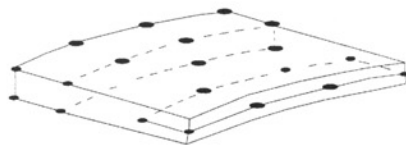
图 2 地基弹簧单元概念化模型

3、 壳单元和液体单元的选取⁽¹⁾

由于壳单元可以用来模拟厚壳或薄壳结构,因此储罐壁和底板均采用 8 节点等参单元进行模拟,见图 3。液体采用三维流体单元进行模拟,采用势流理论进行计算,其液体表面为自由面单元,其他为流体面单元,见图 4。



(a) 内外面的描述



(b) 由壳单元向实体单元的转变

图 3 壳单元

* 建设部研究开发项目(2007-K3-1)。

** 116600,辽宁省大连市经济技术开发区辽河西路 18 号;电话:(0411)87656202。

三、静力分析

1、有限元分析结果与实测值的比较^(2,3)

以 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐为例,在充水高度分别为 6.13、10.54、15.72、19.00 m 时,比较实测值与有限元分析结果。图 5 为在四种充水高度下,储罐外壁的实测轴向应力与有限元分析轴向应力分布曲线的对比,可见实测应力值分布在有限元分析曲线附近。

2、水位对储罐应力的影响

图 6 为储罐在不同水位下采用有限元法计算得到的外壁的应力分布曲线。不同水位下的轴向应力在每一圈壁板都有一个汇聚点,第一圈壁板上的会聚点在距底板上表面 625 mm 处;第二圈壁板的汇聚点在距底板上表面 4 511 mm 处。壁板上的轴向应力主要由边缘弯矩和边缘剪力产生,具有衰减性,从第三圈壁板开始,轴向应力在零应力值附近波动,最后趋于零,见图 6(a)。

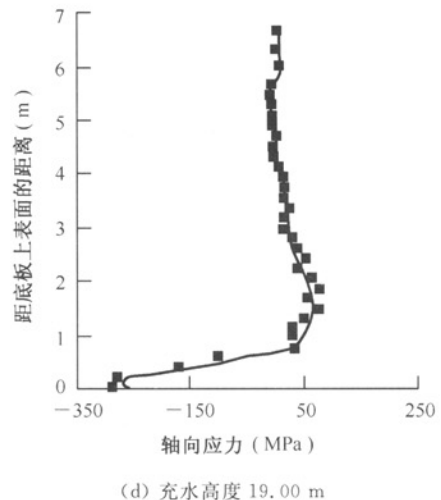
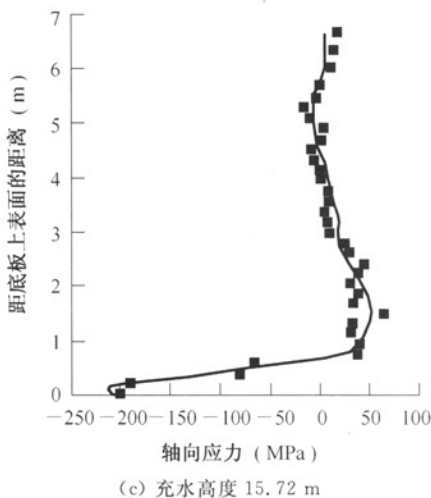
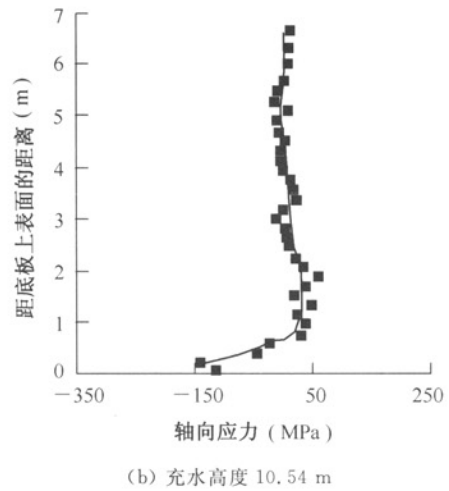
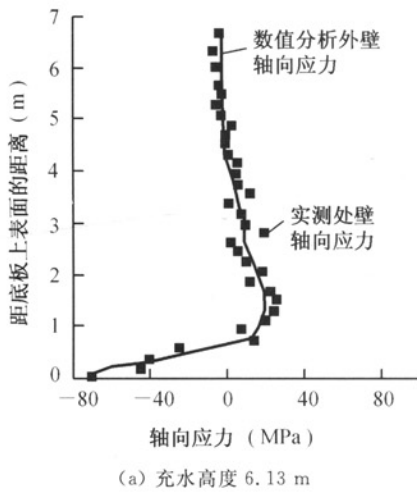
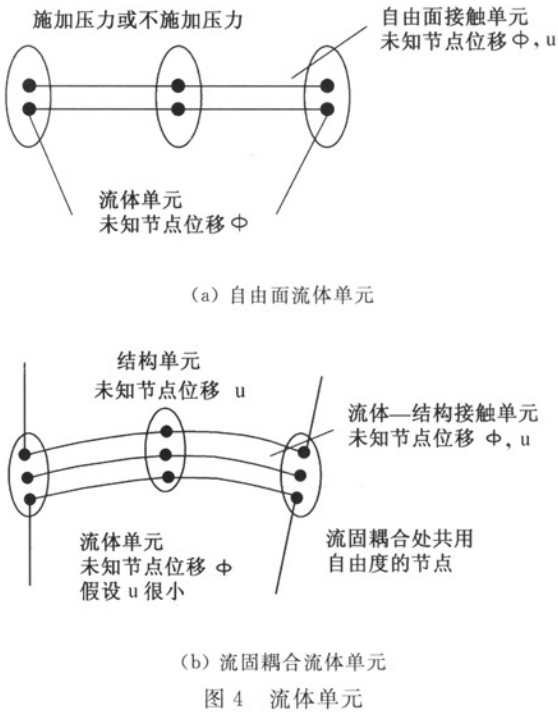
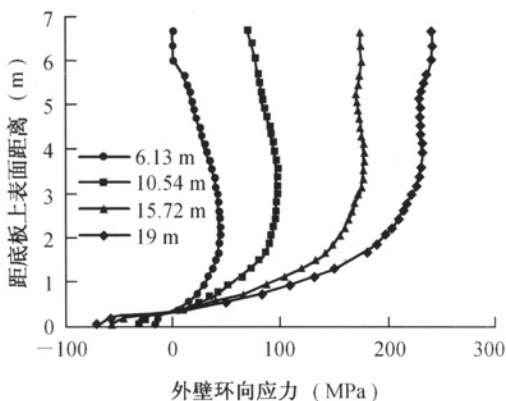
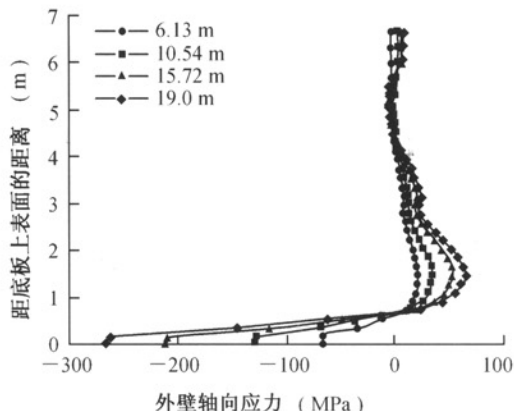


图 5 储罐外壁轴向应力实测曲线与有限元分析曲线的对比

四种水位下,轴向拉应力的最大值基本出现在相同的高度,距底板 1 450 mm 处,即在抗震设计时容易出现“象足”的位置。水位越高,边缘应力越大。图 7 为储罐在不同水位下外壁环向应力随高度变化的曲线。壁板与底板连接处受底板的约束作用,环向应力为负值,水位越高,约束作用越强,应力的绝对值越大;沿着罐壁向上,环向应力逐渐增大,在距

底板上表面 370 mm 处相交;过了该点后,环向应力沿着罐壁向上继续增大,水位越高,环向应力越大,达到最大值后开始减小或波动。由于每圈壁板连接处因变截面而产生的弯矩和剪力使得每圈壁板最下端的环向力减小,因而每圈壁板应力的最大值不在最下端,而是在距每圈壁板下端以上的某一位置,见图 6(b)。



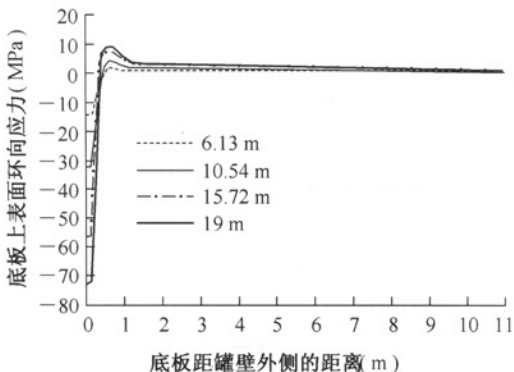
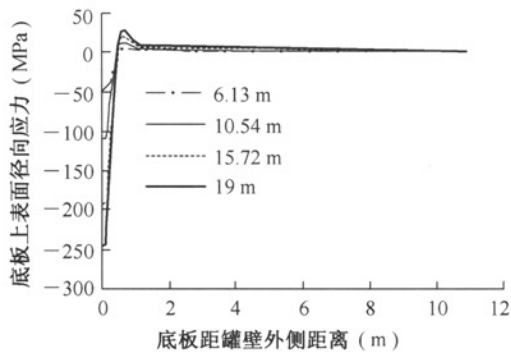
(a) 径向应力

(b) 环向应力

图 6 不同水位下储罐外壁的应力分布曲线

图 7 为储罐在不同水位下径向应力和环向应力的分布曲线。径向应力和环向应力在靠近底板处发

生突变,由受压变成受拉;随着与壁板距离的增加,应力逐渐衰减;水位越高,应力的绝对值越大。



(a) 径向应力

(b) 环向应力

图 7 不同水位下储罐底板上表面的应力分布曲线

3、地基对储罐应力的影响^[4,5]

采用有限元分析方法,比较储罐在不同地基下的应力。按照《抗震规范》的要求,根据剪切波速的不同,选取坚硬土、中硬土、中软土、软弱土四种地基场地进行分析(对应的剪切波速分别为 700 m/s、350 m/s、200 m/s、100 m/s)。

图 8 为储罐在四种场地条件下外壁轴向应力和环向应力的分布曲线。

场地对储罐外壁应力的影响主要集中在第一圈壁板的下部,并逐渐衰减;轴向应力在到达轴向应力受拉区最大值(距底板上表面 678 mm 处)后,环向

应力到第一圈壁板上端处,影响几乎消失;随着地基刚度的增强,在壁板与底板交接处,应力先减小后增大。

图 9 为储罐在四种场地条件下底板上表面径向应力和环向应力的分布曲线。

在靠近壁板处,地基的刚度越大,应力的绝对值越大;距壁板 267.8 mm(径向应力曲线)和 285.6 mm(环向应力曲线)处,四种场地的应力曲线汇交于一点;当与壁板的距离大于 1 537 mm(径向应力曲线)和 2 876 mm(环向应力曲线)时,地基刚度越大,径向应力越小。

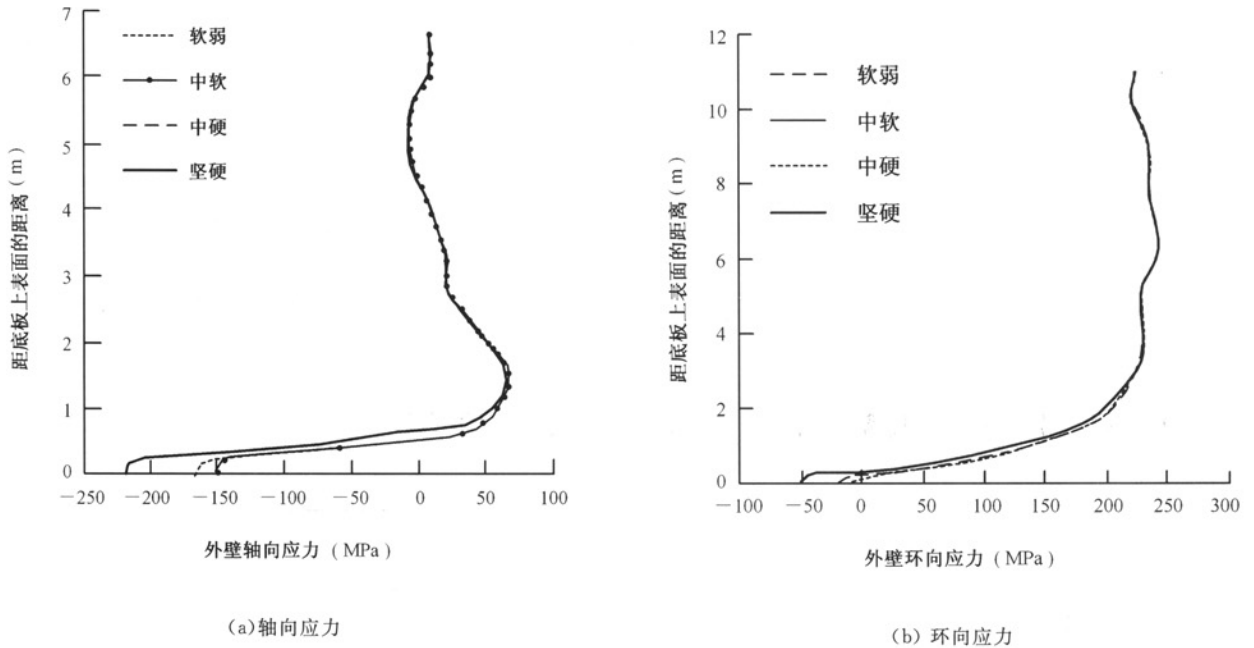


图 8 储罐外壁的应力分布曲线

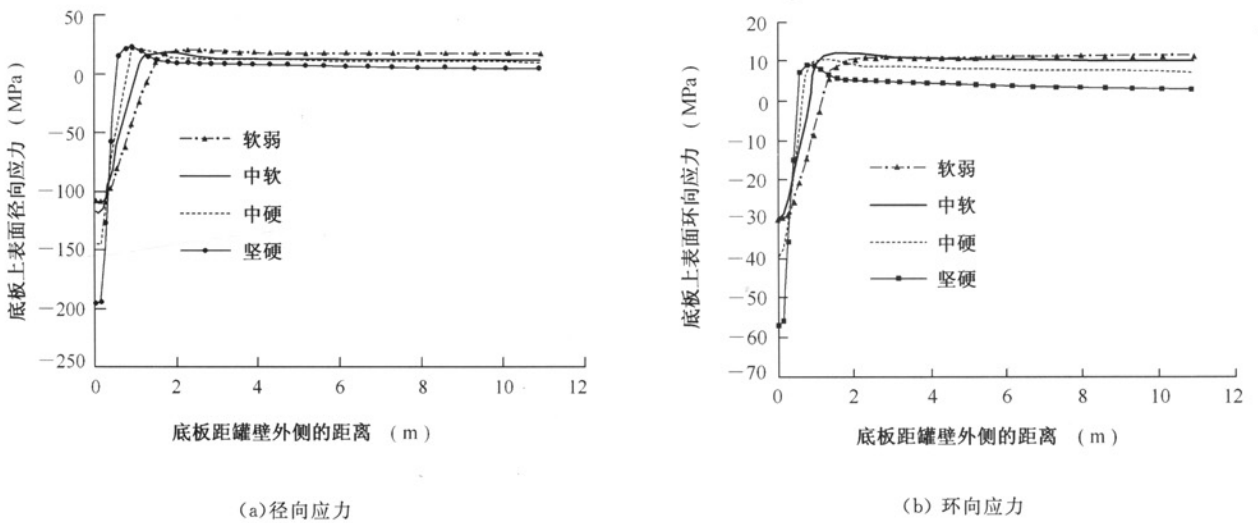


图 9 储罐底板上表面的应力分布曲线

4、储罐内壁、外壁、中面应力特点分析

储罐壁板的厚度与半径的比值远小于 20,属于薄壳,薄壳体内平分厚度的面称为中面。壳在自重和水压的共同作用下,存在薄膜内力和弯曲内力,导致内外壳的应力状态不同。为此重点研究外壳、内壳以及中面的受力特点。

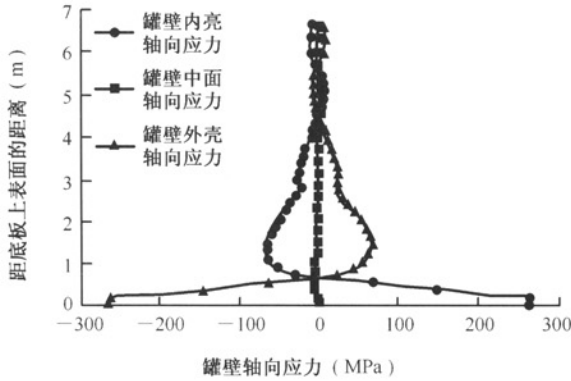
图 10 为罐壁内、外壳及中面轴向应力和环向应力的分布曲线。

沿着罐壁的高度,内、外壳轴向应力呈对称分布,中面的应力较小,接近于零。

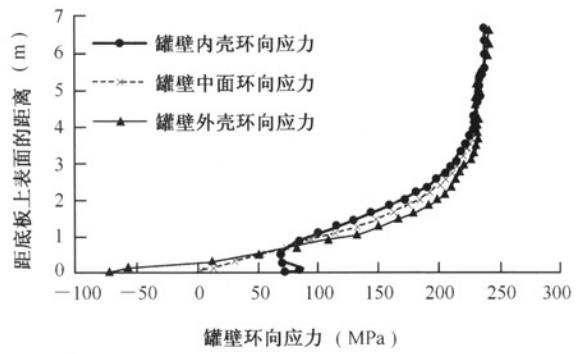
沿着罐壁的高度方向,三者的环向应力受力状

态在靠近底板处差别较大,外壳是先受压,后受拉,内壳及中面始终以拉应力为主。在到达距底板 746 mm 处,内壳、外壳及中面环向应力交汇于一点。之后三者的应力状态相同,均以拉应力为主,外壳最大,中面次之,内壳最小。

图 11 为罐底板内、外壳及中面径向应力和环向应力的分布曲线。在靠近罐壁处,内、外壳径向应力和环向应力呈对称分布,中面的应力比较小,以拉应力为主;在到达距壁板 921 mm(径向应力曲线)处和 1 113 mm(环向应力曲线)处后,三者的应力大小基本相等,都趋于零。

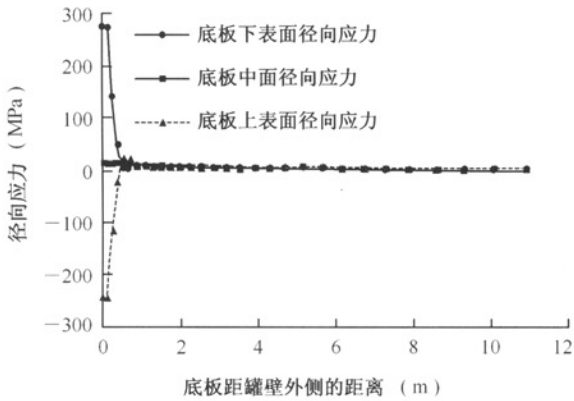


(a) 径向应力

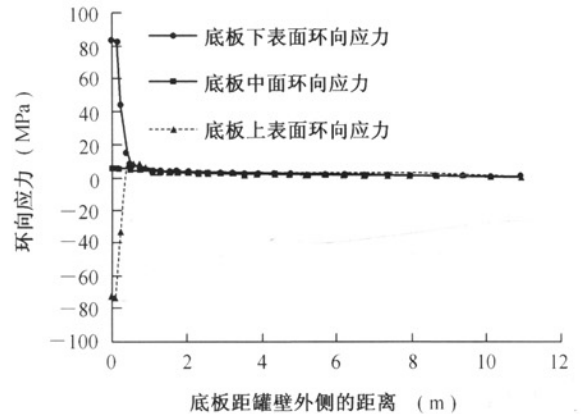


(b) 环向应力

图 10 储罐壁的应力分布曲线



(a) 径向应力



(b) 环向应力

图 11 储罐底板内壳、外壳及中面的应力曲线

5、锥面坡度对储罐应力的影响

(1) 储罐壁板应力分析

基础锥面坡度指基础顶面与地平线的夹角(正夹角即正锥底板工况,负夹角即倒锥底板工况)。选锥面取坡度范围 $-3\% \sim 3\%$ 。正锥基础锥面不同时,对罐壁应力的影响见图 12。正锥坡度对罐壁轴向应力的影响主要集中在距离底板 2 m 以下位置,随着坡度的增加,根部应力减小;最大压应力出现在距离底板 2 m 的位置,见图 12(a)。

随着坡度的不同,管壁根部的环向应力由压变拉;正锥坡度对罐壁环向应力的影响主要集中在距底板 3 m 以下位置,最大拉应力出现在距底板 3 m 的位置,见图 12(b)。

在储罐根部和距储罐底板 2~3 m 的位置,将出现最大拉应力和最大压应力,应是设计考虑的重点部位。

倒锥基础锥面坡度不同时,对罐壁应力的影响见图 13。

倒锥坡度对罐壁轴向应力的影响主要集中在距底板 3 m 以下位置,随着坡度的增加,应力增大。在距储罐底板 1~2 m 处,出现较大的拉应力和较大的压应力,在储罐根部也出现较大的压应力,见图 13(a)。倒锥坡度对储罐罐壁环向应力的影响主要集中在距离底板 1 m 以下,随着坡度的增加应力增大,最大环向应力出现在距离储罐底板 3 m 处,最大压应力发生在储罐壁板根部,见图 13(b)。

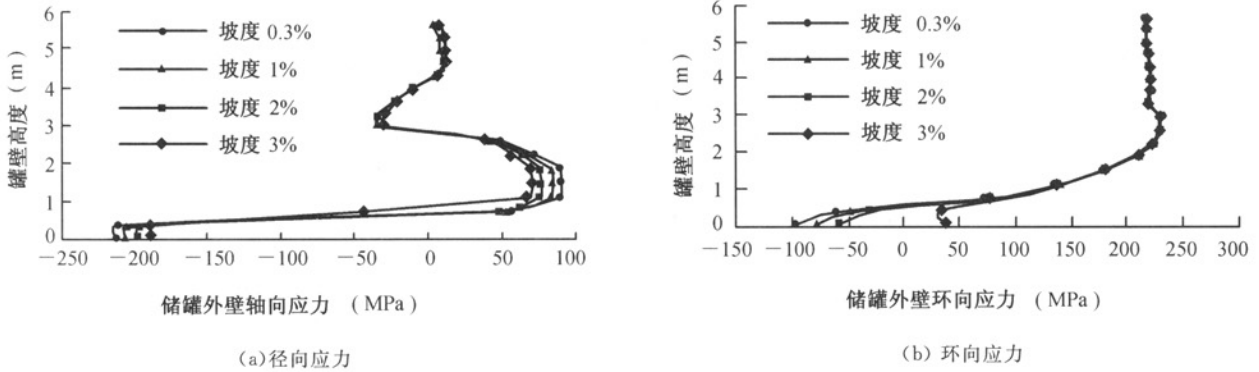


图 12 正锥储罐外壁的应力分布曲线

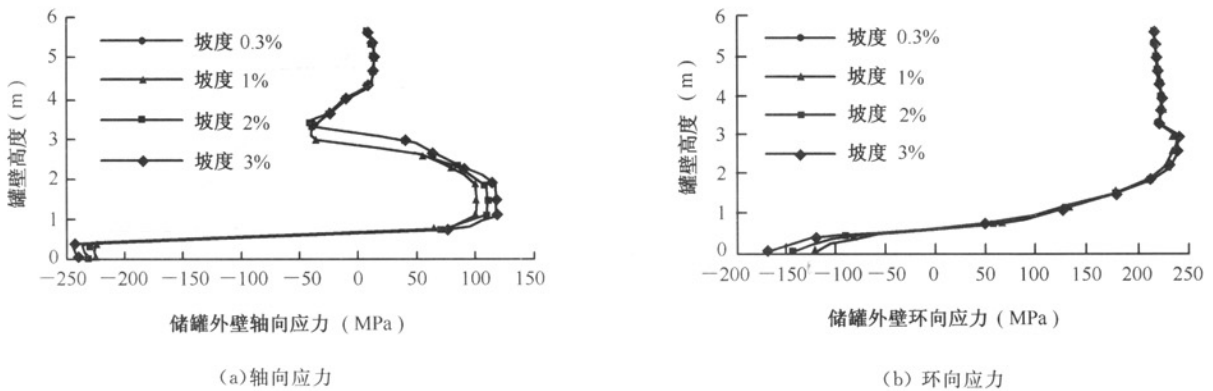


图 13 倒锥罐外壁的应力分布曲线

(2) 储罐底板应力分析

从图 14 和图 15 可以看出,坡度对储罐底板的径向应力和环向应力的影响区域主要集中在距罐壁 4 m 处,即对于中幅板,底板径向和环向应力都很小,只有边幅板应力较大。

最大环向应力约 250 MPa(正锥)和 300 MPa(倒锥)。最大径向应力发生在罐壁根部,最大值在 650 MPa 左右,对储罐受力不利,设计时边幅板应加厚。随着底板坡度的增大,底板环向和径向应力

增大,正锥和倒锥坡度最好控制在 3%。

(3) 底板变形分析

从图 16 可以看出,正锥坡度为 0.3% 和 1% 时,底板变形后的坡度不符合规范规定⁽⁶⁾,为此,坡度应设在 2%~5% 之间。倒锥坡度为 0.3% 和 1% 时,底板变形比较合理,坡度为 2% 时,底板向上变形,坡度为 3% 时,底板相对变形急剧增大,为此,向下锥度应设在 0.3%~1% 之间。

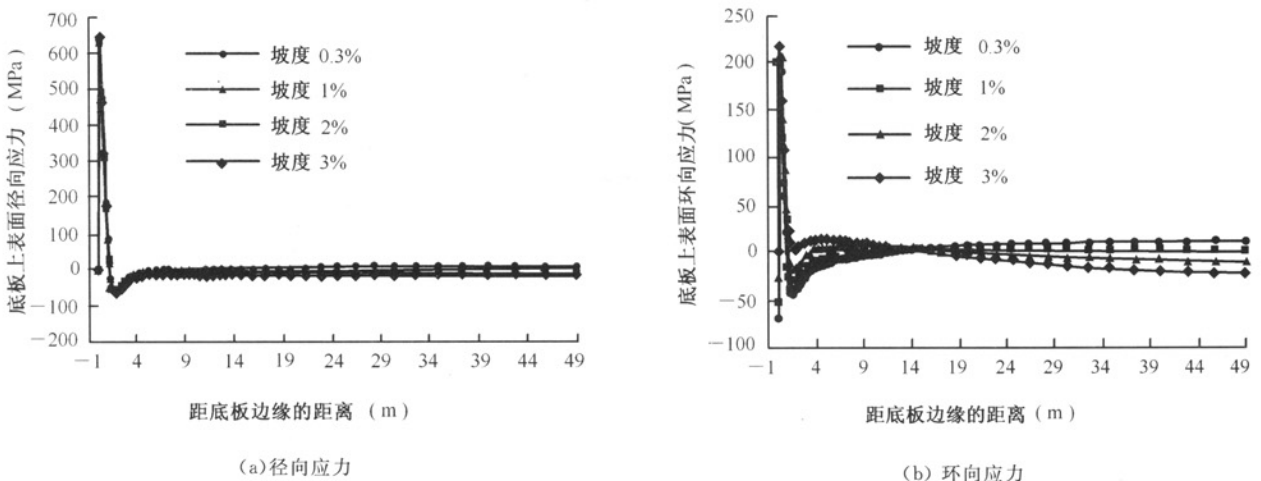
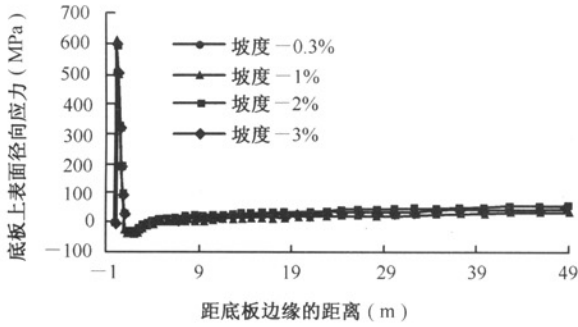
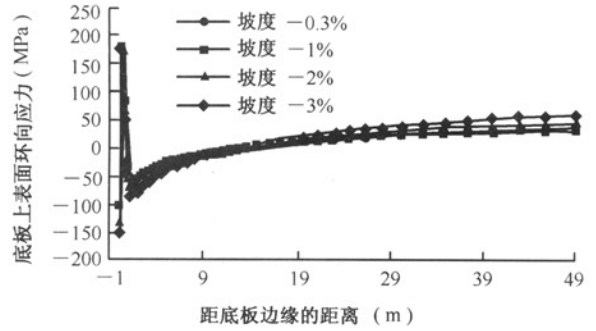


图 14 正锥底板的的应力分布曲线

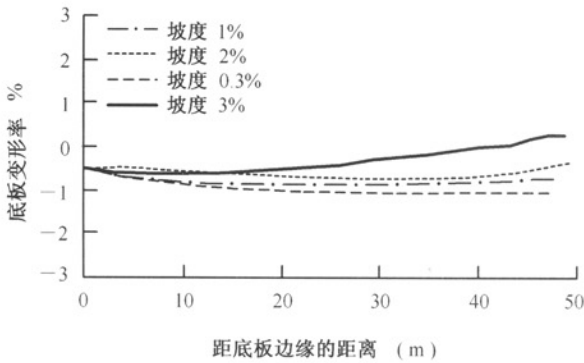


(a) 轴向应力

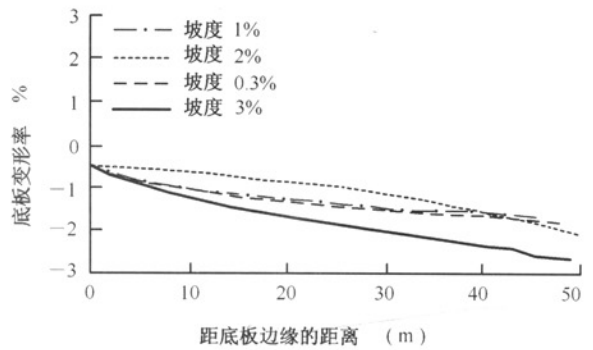


(b) 环向应力

图 15 倒锥底板的应力分布曲线



(a) 正锥



(b) 倒锥

图 16 锥面底板的变形曲线

四、结 论

储罐液位越高,其根部和底板边区域内的环向、径向的轴向应力越大。地基模量对储罐外壁轴向应力和环向应力的影响主要集中在第一圈板的下部,对罐底板上表面环向应力的影响比较大,在靠近壁板处,地基的刚度越大,环向应力的绝对值越大。为此,在设计中,中幅板(距离储罐壁板 4 m 以外)和储罐壁板(距离储罐底板 4 m 以上)可以减薄。

对于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐,正锥与倒锥壁板、底板的受力和变形相似,因此,正锥坡度应设在 2%~5% 之间,倒锥坡度应设在 0.3%~1% 之间。与正锥相比,倒锥能够减少集油和腐蚀破坏。

参 考 文 献

- 曹志远:板壳振动理论,中国铁道出版社(北京),1989。
- 沈建民:大型油罐的静强度及动力响应分析(博士论文),浙江大学,2006。
- 陈志平:大型非锚固储油罐应力分析与抗震研究(博士论文),浙江大学,2006。
- 赵同顺 周 波:大型油罐地基变形特性的研究,岩石力学与工程学报,2004,23(6)。

- 周利剑 孙建刚:立式储罐与地基相互作用动力特性分析,地震工程与工程振动,2006,26(3)。
- GB 50341—2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范。

(修改稿收到日期:2009-04-12)

《管道科学技术论文选集》

文摘(五十八)

超声波管道腐蚀检测器

李建宏

介绍了超声波管道腐蚀检测器的构成、工作原理、主要部件及其功能,给出数据采集、数据压缩和记录、数据处理、存储方式。通过对超声波管道腐蚀检测器的工作性能分析,有助于使用者全面系统地了解超声波技术及设备。

