

文章编号:1004-4574(2012)04-0216-07

含体积型缺陷加筋球壳拱顶的稳定性分析

徐蕾,崔立富,杜篷娟,蒋峰

(大连民族学院 土木建筑工程学院,辽宁 大连 116600)

摘要:当大型储罐拱顶出现体积型缺陷时,最常见的破坏形式是拱顶外压失稳破坏。因此,针对含体积型缺陷的加筋拱顶,对其缺陷发生的最不利位置及拱顶稳定性进行了大量的有限元计算,提出了含缺陷加筋拱顶临界失稳载荷的实用计算公式,以供建立含缺陷加筋拱顶的安全评定方法参考。

关键词:大型拱顶储罐;加筋球壳;体积型缺陷;临界失稳载荷

中图分类号:P315.952

文献标志码:A

Stability analysis of reinforced spherical shell cap with volume type defects

XU Lei, CUI Lifu, DU Pengjuan, JIANG Feng

(School of Civil & Architectural Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China)

Abstract: The instability failure under external pressure is the most common failure mode of large-scale storage tank's arch top with volume type defects. So a great deal of stability analysis was carried out for the arch top with volume type defects in the paper, and the most unfavorable positions of defects were determined. On the basis of these, a practical formula of stability critical load for the arch top was deduced. The research results of the paper could provide a reference to stability evaluation of the storage tanks' reinforced arch top with volume type defects.

Key words: large-scale storage tanks with arch top; reinforced spherical shell; volume type defect; stability critical load

建设大型储罐是我国石油储备发展长远战略的必然要求,目前我国在役的大型储罐大多采用加筋球壳拱顶的结构形式。这类储罐在长期使用过程中会不可避免地出现不同程度的腐蚀减薄缺陷和裂纹缺陷。如果不对这些缺陷进行科学的评估和及时有效的修复,不仅可能造成设备的损坏,还易发生跑油事故,引发火灾等。因此对这类储罐的拱顶缺陷进行安全性评价,对于大型储罐的安全使用和确定有效的维修措施具有重要意义。

目前,国内外对于腐蚀减薄和裂纹缺陷出现在罐体的研究已经比较成熟,建立了相应的评估理论和评估方法,而对于含缺陷球壳拱顶安全评价的研究尚很少见,尤其对含缺陷加筋拱顶的研究,一直未见相关报道^[1-2]。拱顶是主要承受外压的构件,其存在缺陷时,最常发生的是拱顶失稳破坏,因此含缺陷拱顶的稳定性评估是安全性评估最基本、最关键的问题之一^[3]。

收稿日期:2012-01-15; 修回日期:2012-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(510780631E0808)

作者简介:徐蕾(1975-),女,副教授,博士,主要从事结构抗火研究. E-mail: xulgb@163.com

基于以上原因,本文以大型储罐加筋球壳拱顶为研究对象,建立了储罐无肋拱顶及加筋拱顶外压失稳的有限元分析方法,进一步针对含体积型缺陷的加筋拱顶,对其缺陷发生的最不利位置及拱顶稳定性评价进行了大量的有限元理论研究,在此基础上,得出了含缺陷带肋拱顶临界失稳载荷的实用计算公式。本文研究对于建立含缺陷加筋拱顶的安全评定方法,为实际工程的安全设计和确定已有储油罐的维修措施提供了理论基础。

1 大型储罐外压失稳的有限元建模及验证

本文采用 ADINA 大型通用有限元软件计算含体积型缺陷的加筋球壳储罐临界失稳压力。为了正确建立含缺陷加筋球壳储罐的分析模型,本文首先将 ADINA 模型结果与规范结果和国内外相关的有限元分析结果和实验结果进行了对比。

刘江华等^[4]对无肋球壳拱顶进行了计算,本文针对相同的工况,利用 ADINA 建立了拱顶储罐的有限元模型,如图 1 所示。储罐罐底、无肋拱顶和罐壁均采用四节点壳单元。边界条件:忽略储罐基础弹性的影响,假设储罐与基础为固定连接。

加载过程:采用增量加载方法。加载过程中,罐体内液压始终按 100% 施加,沿罐壁高度为三角形分布,底部液压最大。拱顶外压从给定的很小的初值开始逐步增加,根据当前增量步的迭代收敛特性自动调整加载步长,直至程序不再收敛,拱顶发生屈曲破坏,对应的荷载为外压作用下拱顶的临界失稳荷载。

对于含凹坑缺陷的无肋拱顶储罐,文献[1]在分析中将储罐拱顶的凹坑看作局部轴对称的圆形凹坑,对该圆形区域进行均匀减薄处理。因此,本文建模时也假定在拱顶中心发生均匀减薄的局部缺陷。表 1 为利用上述 ADINA 模型计算结果与文献[4]计算结果的对比情况。

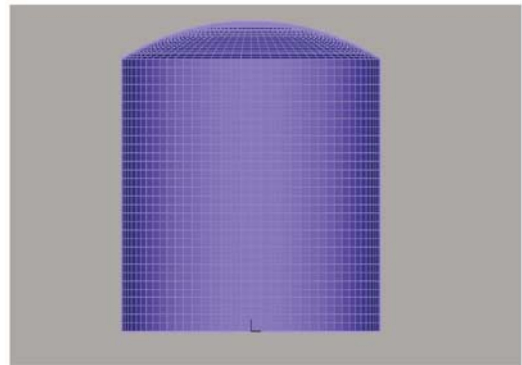


图 1 无肋拱顶储罐有限元模型

Fig. 1 Finite element model of arch top without rib

表 1 储罐整体失稳临界荷载计算结果对比

Table 1 Comparison of storage tank's overall stability critical load results from calculation

模型描述	加载情况	整体失稳外压荷载/ P_{cr}	
		文献[4]结果	ADINA 计算结果
灌顶无缺陷	罐体施加 100% 油压 + 拱顶外压	20 468	18 950
	罐体施加 0% 油压 + 拱顶外压	20 150	18 465
	不考虑罐壁及罐内油压的影响	20 199	18 600
拱顶中心圆形腐蚀减薄缺陷; 减薄区直径 1.0 m, 厚度 0.001 m	罐体施加 100% 油压 + 拱顶外压	10 245	10 507
	罐体施加 0% 油压 + 拱顶外压	10 254	10 513
	不考虑罐壁及罐内油压的影响	10 244	10 506

由表 1 可见:(1)油压及罐壁变形对无肋拱顶储罐的失稳临界荷载影响很小,可忽略不计;(2)由于罐壁的影响可以忽略,因此,进行储罐拱顶失稳计算时,可去掉罐壁,直接将储罐拱顶看作底边固定的扁球壳;(3)ADINA 计算结果与文献[4]中的分析结果吻合较好。

清华大学尹晔昕^[5]等利用有限元对 20 000m³ 的大型拱顶储罐在外压作用下的稳定性进行了分析计算。本文利用 ADINA 软件对该储罐在外压作用下的临界荷载也进行了计算。

文献[5]给出了储罐采用无肋拱顶和加筋球壳的两种工况,本文分别利用 ADINA 程序对两种储罐的失稳临界外压进行对比计算。

针对无肋拱顶储罐建立有限元分析模型,罐底、罐壁和拱顶单元采用四节点壳单元。

边界条件:储罐在使用过程中,罐壁下部的底板边缘会发生抬离,边界条件非常复杂。考虑到计算方便,

在本算例分析时将边界条件简化为底板边缘部位约束 y 方向位移,底板中心约束 x, y, z 三个方向的位移。

荷载情况:考虑储罐运行时,承受外压和液柱静液压。失稳载荷的求取仍采用增量加载的方法。

对上述储罐,文献[5]中一阶失稳临界载荷计算结果为: $P_{cr} = 4.59 \text{ KPa}$,本章中利用 AINA 软件的有限元计算结果为 4.32 kPa 。

对于拱顶加肋的情况,按照文献[5]给出的力学模型,拱顶蒙皮厚度为 $\delta = 5 \text{ mm}$,环向肋取等边角钢 $\angle 70 \times 6$,经向肋取工字钢 I20a。纬向肋间距 $l_1 = 5\ 000 \text{ mm}$,经向肋间距 $l_2 = 3\ 800 \text{ mm}$ 。

针对该储罐建立 ADINA 有限元分析模型,罐底、罐壁和拱顶单元采用四节点壳单元,经向肋和纬向肋均采用矩形截面的梁单元。

ADINA 计算一阶失稳临界载荷结果为 5.63 kPa ,按规范计算值为 3.92 kPa 。

2 含体积型缺陷加筋拱顶稳定性的有限元分析

对于容积在 $1\ 000 \sim 10\ 000 \text{ m}^3$ 之间的储罐,采用加筋拱顶是比较经济的形式。因此,本文以工程中常用的 $1\ 000 \text{ m}^3, 2\ 000 \text{ m}^3, 3\ 000 \text{ m}^3, 5\ 000 \text{ m}^3$ 和 $10\ 000 \text{ m}^3$ 大型加筋拱顶储罐为研究对象,对其缺陷下拱顶的稳定性展开研究。

2.1 缺陷发生的最不利位置

大型储罐在实际使用过程中,可能在拱顶的任意位置发生腐蚀减薄缺陷,不同部位的缺陷对拱顶稳定性的影响也将有所差别。因此,本文首先利用上述 ADINA 模型对工程常用的无缺陷大型加筋拱顶储罐进行有限元分析,进而确定加筋球壳拱顶发生体积型缺陷对稳定性影响的最不利位置。

(1) 分析模型

上述五种大型储罐的基本参数和尺寸数据,依据《大型储罐基础设计与地基处理》^[6]确定。肋板的布置按照《拱顶油罐图集 02R112》^[7]中相应储罐建立,图 2 所示为 $3\ 000 \text{ m}^3$ 储罐肋板的布置情况。

由上节的分析:进行储罐拱顶失稳计算时,可去掉罐壁,直接将储罐拱顶看作底边固定的扁球壳。故模型中仅取拱顶进行分析,边界条件为底边固定。

拱顶板采用四节点壳单元,加强肋采用梁单元,建立的有限元模型如图 3 所示。拱顶仅承受外压作用,采用增量加载的方式,直至拱顶发生失稳破坏。

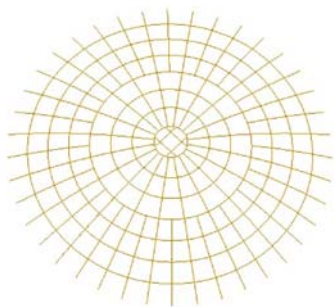


图 2 大型储罐拱顶肋板布置示意图

Fig. 2 Sketch of arrangement of ribs at arch top of large-scale storage tank

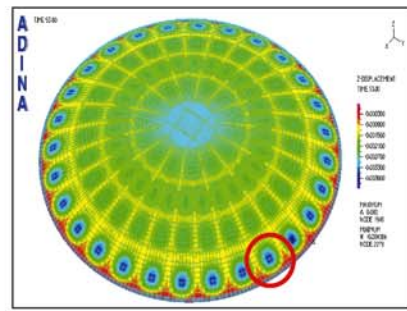
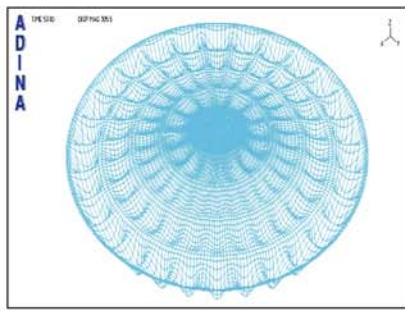


图 3 带肋拱顶储罐有限元分析网格图

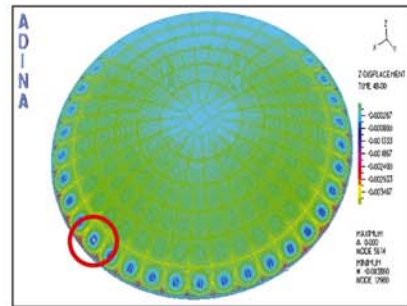
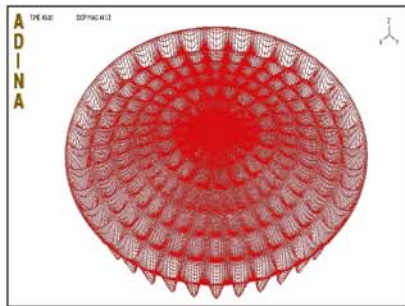
Fig. 3 Meshes used in finite element analysis of storage tank with ribs at arch top

(2) 有限元分析

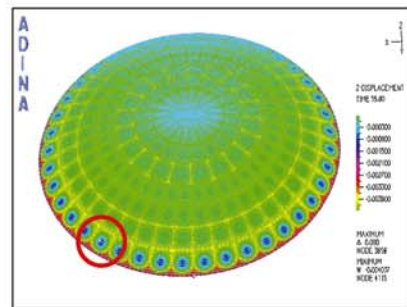
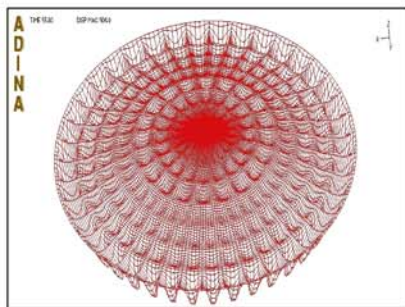
利用上述模型,对容积为 $1\ 000\text{m}^3, 2\ 000\text{m}^3, 3\ 000\text{m}^3, 5\ 000\text{m}^3$ 和 $10\ 000\text{m}^3$ 的无缺陷大型储罐进行了稳定性分析,储罐拱顶失稳模态和 Z 向位移云图如图 4 所示。由图 4 可以得出:(1)完整加筋拱顶储罐的失稳模态均为波纹状的屈曲;(2)所研究的 5 种储罐,外压作用下发生失稳时,最大的 Z 向位移发生在如图圈示部位,经观察发现,5 种储罐的圈示位置均为加强肋与拱顶边缘所围成的区域,该处也是整个拱顶肋间面积最大处。



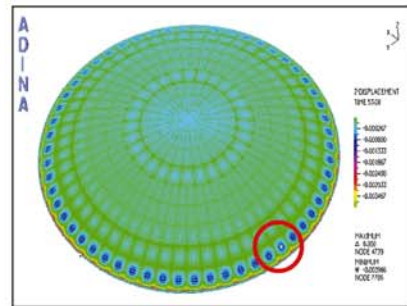
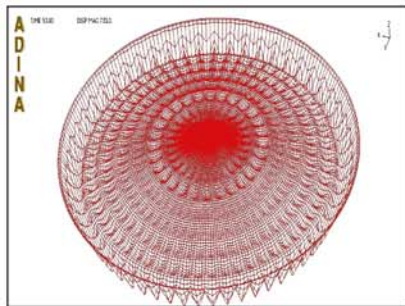
(a) 1000 m³储罐拱顶失稳模态和Z向位移云图



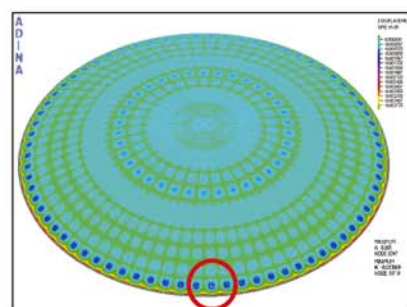
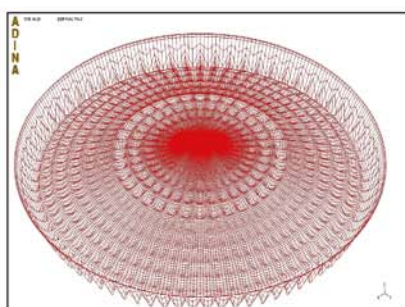
(b) 2000 m³储罐拱顶失稳模态和Z向位移云图



(c) 3000 m³储罐拱顶失稳模态和Z向位移云图



(d) 5000 m³储罐拱顶失稳模态和Z向位移云图



(e) 10000 m³储罐拱顶失稳模态和Z向位移云图

图 4 储罐加筋拱顶整体失稳模态

Fig. 4 Overall instability mode of reinforced arch tops of storage tank

(3) 带肋拱顶体积型缺陷的最不利位置

由前面的分析可知,工程中常用的完整大型带肋拱顶储罐,缺陷发生最敏感的区域在最外圈环肋、拱顶边缘和经向肋所围区域,此时,最外圈环肋与拱顶边缘之间的区域面积为全部肋间面积最大处。但是,当实际工程中采用的加强肋布置方式变化时,也可能出现如图 5 所示的圈定区域内肋间所围面积最大。经分析可知,此时 Z 向最大位移发生在图 6 中的圈定区域,即为图 5 中圈定的肋间面积最大部位。综上所述,对加筋球壳拱顶,缺陷最不利位置在肋间所围面积最大处。

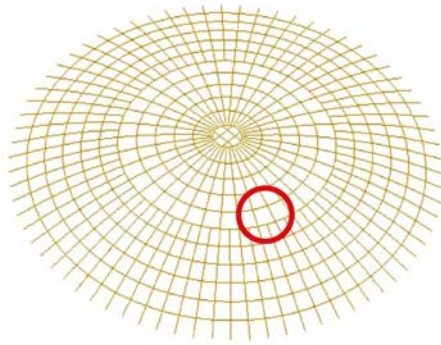


图 5 拱顶肋间面积最大处

Fig. 5 Places with largest area bounded by ribs in arch top

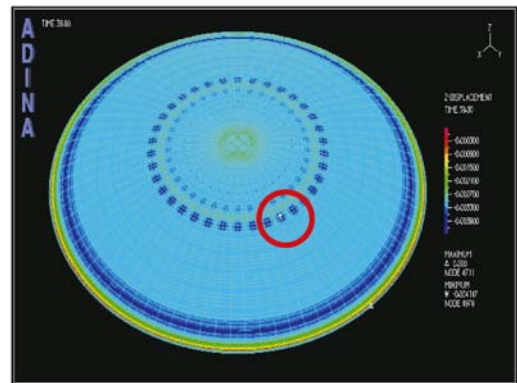


图 6 Z 向位移云图

Fig. 6 Nephogram of displacement in z-direction

2.2 含体积型缺陷带肋拱顶临界失稳荷载的实用计算公式

(1) 含体积型缺陷带肋拱顶有限元模型的建立

在进行有腐蚀凹坑缺陷的带肋拱顶稳定性分析时,将腐蚀缺陷看作是均匀圆形凹坑。根据我国《在用含缺陷压力容器安全评定》^[8]的规定:凹坑深度 Z 应小于计算厚度 h_e 的 60%,且坑底最小厚度 $(h_e - Z)$ 不小于 2 mm;凹坑长度 $2X \leq 2.8 \sqrt{RB}$,其中, R 是拱顶板半径;凹坑宽度 2Y 不小于凹坑深度 Z 的 6 倍,据此,本文设定相应储罐的腐蚀缺陷尺寸范围。

由前所述,根据《拱顶油罐图集 02R112》给出的方式布置储罐的加强肋,对工程中常用的 1 000 m³, 2 000 m³, 3 000 m³, 5 000 m³ 和 10 000 m³ 的大型拱顶储罐,其 Z 向位移最大区域均发生在最外圈环肋与拱顶边缘之间,因此,在该处设定均匀圆形局部减薄凹坑。

按照前面所述方法建立大型拱顶储罐有限元分析模型,在最外圈环肋与拱顶边缘之间设定圆形局部减薄。

(2) 含体积型缺陷拱顶的许用外压

引入表面凹坑缺陷的无量纲参数 G_0 作为基本参数,分析其对拱顶储罐临界失稳荷载的影响。 G_0 按公式(1)计算。

$$G_0 = \frac{Z}{h_e} \cdot \frac{X}{\sqrt{Rh_e}} \tag{1}$$

定义 ξ 为带肋拱顶许用外压折减系数,令 $\xi = \frac{P'_{cr}}{P^0_{cr}}$,其中 P'_{cr} 为有体积型缺陷拱顶的临界失稳荷载计算值; P^0_{cr} 为无缺陷拱顶的临界失稳荷载计算值。

利用有限元模型对 1 000 m³, 2 000 m³, 3 000 m³, 5 000 m³ 和 10 000 m³ 有凹坑缺陷拱顶进行有限元分析,结果表明 G_0 与 ξ 之间基本呈线性关系,如图 7 所示。

在大量参数分析基础上,推导了带肋拱顶许用外压折减系数 ξ 的计算公式:

$$\xi = 1 - a \cdot G_0, \tag{2}$$

其中, a 为待定系数。通过有限元分析表明,在工程常用参数范围内,拱顶厚度 h_e 和折算厚度 h_m 对系数 a 的影响很小,而拱顶半径 R 的影响较大,故考虑 R 的影响,得出:

$$a = 0.006R^2 - 0.228R + 2.939, \tag{3}$$

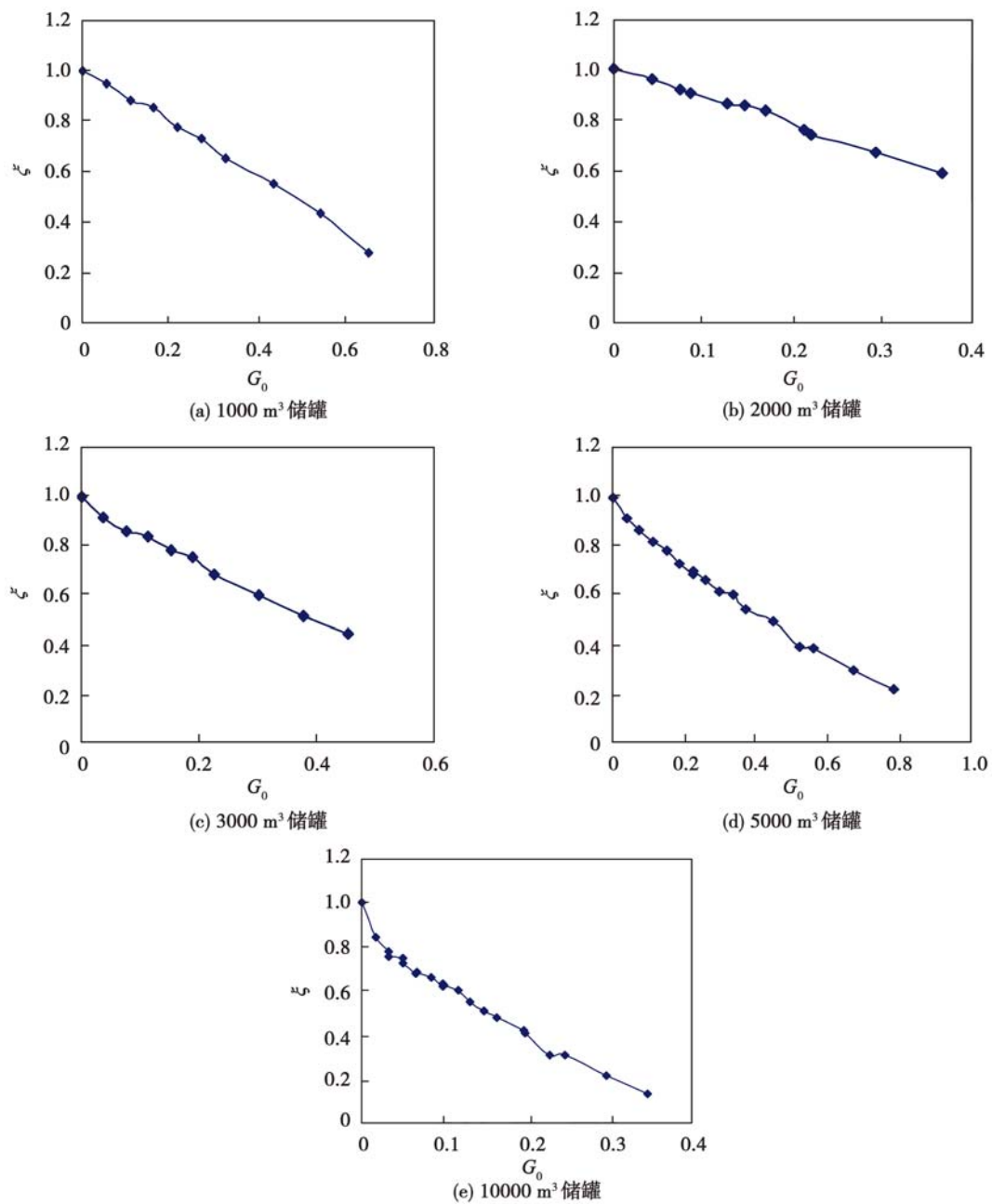


图7 ξ 与 G_0 的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between ξ and G_0

则体积型缺陷情况下带肋拱顶的临界外压为:

$$P'_{cr} = (1 - a \cdot G_0) \cdot P_{cr}^0 \tag{4}$$

图8为按公式(4)计算结果与有限元计算结果对比情况,由图可见,二者吻合较好。

在实际工程中进行拱顶安全评价时,体积型缺陷情况下带肋拱顶的临界外压为:

$$P'_{cr} = (1 - a \cdot G_0) \cdot [P_0] \tag{5}$$

式中, $[P_0]$ 为我国《GB50341-2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》^[9]中规定的完整带肋拱顶的许用外压。

参照我国《在用含缺陷压力容器安全评定》中采用的安全系数,带凹坑缺陷拱顶的最高容许工作压力可取:

$$(P'_{cr})_{max} = \frac{P'_{cr}}{1.8} \tag{6}$$

式(6)中的安全系数可根据工程经验及统计数据进行适当调整。

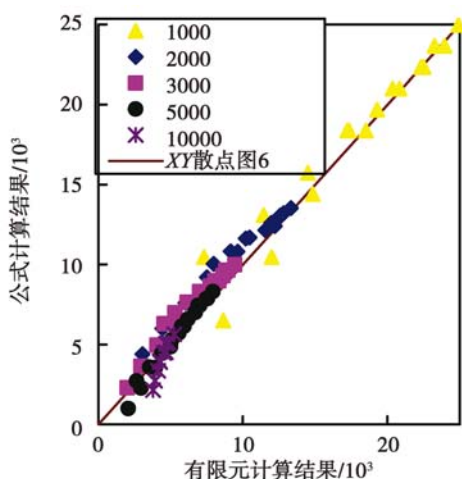


图 8 公式计算结果与有限计算结果的对比

Fig. 8 Comparison of calculation results from formula and finite element analysis

3 结论

通过本文对凹坑缺陷拱顶的有限元分析可以得出以下结论:

(1) 实际工程中,加筋球壳拱顶发生体积型缺陷的部位可能在拱顶的任意位置,基于安全性考虑,均按缺陷发生在拱顶稳定性的最不利位置进行评价。从本文分析可知,拱顶发生体积型缺陷的最不利位置在肋间所围面积最大处。

(2) 进行加筋拱顶安全性评价时,按式(5)计算凹坑缺陷带肋拱顶的临界外压,按式(6)计算带凹坑缺陷拱顶的最高容许工作压力。

基于本文的研究工作,可以进行含体积型缺陷加筋拱顶稳定性的安全评价。

参考文献:

- [1] 李培宁,杨芳毓. 国际压力容器缺陷工程评定技术进展[J]. 压力容器, 1992, 8(2): 3-6.
LI Peining, WANG Fangyu. International advances in the assessment technology of pressure vessels with defects [J]. Pressure Vessels, 1992, 8(2): 3-6. (in Chinese)
- [2] 钟群鹏,武淮生,田永江,等. 我国压力容器安全评定技术的现状和发展[J]. 中国机械工程, 1997, 8(5): 95-100.
ZHONG Qunpeng, WU Huaisheng, TIAN Yongjiang, et al. State-of-the-art development of safety assessment techniques for pressure vessels in China [J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(5): 95-100. (in Chinese)
- [3] 蒋峰. 立式储罐下节点区及拱顶裂纹缺陷安全评定方法研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2010.
JIANG Feng. Vertical Storage Tanks Safety Assessment Methods of Crack Defects in the Vault and the Shell-to-Bottom Joint [D]. DaQing: DaQing Petroleum Institute, 2010. (in Chinese)
- [4] 刘江华,杨智春,李文武等. 局部减薄储罐拱顶非线性稳定性分析[J]. 机械强度, 2009, 31(1): 68-72.
LIU Jianghua, YANG Zhichun, LI Wenwu, et al. stability analysis of local thinned shallow spherical roof of storage tank [J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(1): 68-72. (in Chinese)
- [5] 尹晔昕,王瑜. 大型拱顶储罐的有限元计算[J]. 油气储运, 2003, 22(1): 23-26
YIN Yexin, WANG Yu. FEM calculation on large-scale storage tank with dome roofs [J]. Oil Gas Storage and Transport, 2003, 22(1): 23-26. (in Chinese)
- [6] 徐至钧,许朝铨,沈珠江. 大型储罐基础设计与地基处理[M]. 北京:中国石化出版社, 1999.
XU Zhijun, XU Chaoquan, SHEN Zhujiang. Large storage Tank Foundation Design and Foundation Treatment [M]. Beijing: Chinese Petrochemical Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 国家建筑标准设计. 02R112 拱顶油罐图集[S]. 中国建筑标准设计研究所出版, 2002.
The State Building Standard Design 02R112 Vault Storage Tank Atlas [S]. Published by Architecture Standard Design and Research Institute of China, 2002. (in Chinese)
- [8] GB/T 19624-2004 在用含缺陷压力容器安全评定[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
GB/T 19624-2004 Safety Assessment for in-service Pressure Vessels Containing Defects [S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2005. (in Chinese)
- [9] GB50341-2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
GB50341-2003 Code for Design of Vertical Cylindrical Welded Steel Oil Tanks [S]. Beijing: Chinese Plan Press, 2003. (in Chinese)