

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.011

复合结构罐顶安全性数值模拟及结构优化

张瑾^{1,2}, 汪云家^{1,2}, 李风^{1,2}, 王亭沂^{1,2}, 胥成亮^{1,2}, 任京文³

[1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司技术检测中心, 山东东营 257000; 2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田检测评价研究有限公司, 山东东营 257000; 3. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东青岛 266500]

摘要: 传统玻璃钢储罐罐顶质量大, 稳定性差。出于减重和增加罐顶稳定性的目的设计了含夹芯结构的新型纤维增强复合结构罐顶。由于复合结构罐顶受力复杂且缺少相关的设计和校核标准, 因此以直径为11 m的立式储罐罐顶为例, 采用ANSYS有限元分析方法, 对根据HG/T 20696-2018标准设计的纤维增强复合结构罐顶进行安全性分析, 根据安全系数求解罐顶设计的最小厚度和最小质量, 并根据分析结果对罐顶进行结构优化。研究表明: HG/T 20696-2018标准无法适用于复合结构罐顶的设计; 相比于该标准设计下的复合结构罐顶, 加入加强筋的罐顶厚度可减少12%, 质量再减少10%, 而采用加强筋后, 罐顶厚度可减少42%, 罐顶质量可减少40%; 加强筋下沿区域应力集中明显, 为首要失效位置。所得结论可为纤维增强复合结构罐顶的设计和改进行提供指导。

关键词: 立式储罐; 安全系数; 夹芯结构; 玻璃纤维; 复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0070-08

Safety Numerical Simulation and Structural Optimization of Composite Tank Roof

Zhang Jin^{1,2}, Wang Yunjia^{1,2}, Li Feng^{1,2}, Wang Tingyi^{1,2}, Xu Chengliang^{1,2}, Ren Jingwen³

[1. Technical Testing Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China;

2. Shengli Oilfield Testing and Evaluation Research Co., Ltd., Sinopec, Dongying 257000, China;

3. College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266500, China]

Abstract : The traditional glass fiber reinforced plastic tank has high roof weight and poor stability. In order to reduce the weight and increase the stability of the tank roof, a new type of fiber reinforced composite structure tank roof with sandwich structure was designed. Due to the complex force on the roof of the composite structure tank and the lack of relevant design and verification standards, the roof of the vertical storage tank with a diameter of 11 m was taken as an example, and the ANSYS finite element analysis method was used to conduct safety analysis on the roof of the fiber reinforced composite structure tank designed with HG/T 20696-2018 standard and solve the minimum thickness and minimum mass of the tank roof design according to the safety factor. According to the analysis results, the structure of the tank top was optimized. The results show that HG/T 20696-2018 standard is not suitable for the design of composite structure tank roof. Compared with the composite structure tank top under the standard design, the thickness of the tank top can be reduced by 12% and the mass can be reduced by 10% before adding the reinforcing bars, while the thickness of the tank top can be reduced by 42% and the mass of the tank top can be reduced by 40% after using the reinforcing bars. The stress concentration is obvious along the area under the reinforcement, which is the primary failure position. The conclusion can provide guidance for the design and improvement of fiber-reinforced composite tank roof.

Keywords : vertical storage tank ; safety factor ; sandwich structure ; glass fiber ; composite materials

目前, 国内外现有储罐主要以铝合金储罐或玻璃钢储罐为主^[1], 针对上述材料储罐, 国内外学者开

展了大量的研究工作。例如蒋华云等^[2]进行了玻璃钢储罐应用现状及前景的分析, 得出了玻璃钢储罐

基金项目: 中国石化股份公司材料处项目(420075-1)

通信作者: 任京文, 硕士研究生, 从事复合材料力学方面的研究

收稿日期: 2023-03-02

引用格式: 张瑾, 汪云家, 李风, 等. 复合结构罐顶安全性数值模拟及结构优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 70-77.

Zhang Jin, Wang Yunjia, Li Feng, et al. Safety numerical simulation and structural optimization of composite tank roof[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 70-77.

相对于钢制储罐具有耐腐蚀性好、质量轻、运输吊装方便、力学性能合理、绝缘性优良、保温效果好等优点。倪平平^[3]优化设计了大型缠绕成型玻璃钢容器的,介绍了玻璃钢材料的优缺点,并针对其强度高而刚度不足的问题,对立式缠绕成型玻璃钢罐进行了结构优化。陶保林等^[3]进行了3 000 m³玻璃钢储罐有限元分析,使用有限元分析软件ANSYS对某油田开发工程中所使用的3 000 m³玻璃钢储罐建模,重点分析了储罐在设计内压、罐内液压、地震载荷、风载、雪载及集中载荷组合下的整体强度、刚度,并根据相应标准对结构的安全性进行了评价。

由于玻璃纤维增强复合材料的弹性模量较低、刚性差易变形,导致玻璃钢罐顶易发生稳定性失效。而含夹芯层复合结构相比于普通的玻璃纤维增强复合材料层合板结构,在相同的质量下刚度更高。因此采用复合结构罐顶是解决玻璃钢罐顶稳定性差的有效路径。夹芯技术当前主要应用于双层储罐的设计工作和金属罐顶的修复工作中^[5-6]。复合结构罐顶大大增加储罐的保温性能^[7],减轻了罐顶的质量,提高了罐顶的稳定性,而与之相应的也会导致罐顶强度的降低,因此需要对含夹芯层复合结构罐顶进行强度分析和稳定性校核,以确保满足标准设计要求。目前国内外并没有适用于复合结构罐顶的设计校核标准,按照玻璃钢储罐设计标准进行复合结构罐顶设计的可行性有待考究,因此通过数值仿真模拟的方法对复合结构罐顶的结构进行优化分析和可行性分析显得尤为必要。

1 复合结构罐顶基本参数

1.1 复合结构铺层设计

复合结构罐顶主要由外表面层、碳纤维层、上层玻璃纤维层、夹芯层、下层玻璃纤维层、内衬层组成。复合结构如图1所示,夹芯层如图2所示。

玻璃纤维层为主要的受力层;夹芯层用于实现罐顶的轻量化,并提升罐顶的保温性、整体性和稳定性;碳纤维层用于释放静电,消除安全隐患;内衬

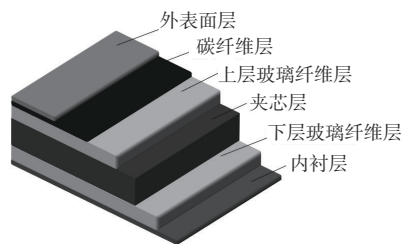


图1 复合结构罐顶铺层结构

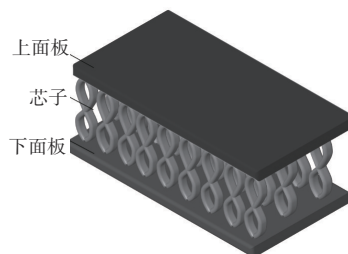


图2 夹芯材料层示意图

层和外表面层起到防腐防晒作用。玻璃纤维层合板以玻璃纤维布为增强材料,环氧乙烯基树脂为基体;夹芯材料层采用中空织物复合材料,上下面板各1 mm,芯子厚度8 mm。

针对玻璃纤维增强乙烯基复合材料进行纵向拉伸试验、纵向压缩实验、层间剪切试验、面内剪切试验;针对夹芯层进行平压实验、剪切试验;对夹芯层的上下面板进行拉伸试验。

试验参照标准有 GB/T 1446-2005, GB/T 1447-2005, GB/T 5258-2008, GB/T 1448-2005, GB/T 3355-2014, GB/T 32376-2015, GB/T 1450.1-2005 等国家标准,根据以上标准确定试样的尺寸和试验条件。

试验得到了上下面板的拉伸弹性模量 E_n 和拉伸强度 σ_n 。根据式(1)、式(2)计算得出夹芯材料的拉伸弹性模量 E_1 和拉伸强度 σ_1 。所得各材料参数见表1。

$$E_1 = \frac{2h_f}{2h_f + h_c} E_n \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{2h_f}{2h_f + h_c} \sigma_n \quad (2)$$

表1 铺层材料力学性能参数

材料类型	拉伸弹性模量/MPa		泊松比		剪切弹性模量/MPa		拉伸强度/MPa		压缩强度/MPa		剪切强度/MPa	
	$E_1(E_2)$	E_3	ν_{12}	$\nu_{13}(\nu_{23})$	G_{12}	$G_{13}(G_{23})$	$X_1(Y_T)$	Z_T	$X_c(Y_C)$	Z_C	S_{12}	$S_{13}(S_{23})$
玻璃纤维层	21 000	2 000	0.11	0.35	3.6	3.5	374	300	177	290	132	40
夹芯层	4 200	3.46	0.11	0.75	0.07	2.8	74.8	15	35	0.84	26	0.25

注:1和X代表织物的某一纤维方向,2和Y代表与1和X垂直的织物纤维方向,3和Z代表层合板厚度方向,12表示层合板面内参数,13和23表示层合板面外参数。

式中: E_1 表示夹芯层弹性模量,MPa; σ_1 表示夹芯层抗拉强度,MPa; E_n 表示面板弹性模量,MPa; σ_n 表示面板拉伸强度,MPa; h_f 表示上(下)面板厚度,mm; h_c 表示芯子厚度,mm。

1.2 罐顶结构尺寸设计

根据中华人民共和国化工行业标准 HG/T 20696-2018 规定,设备的安全系数应按式(3)、式(4)计算:

$$K = S_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \quad (3)$$

$$F = S_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \sqrt{K_5} \quad (4)$$

式中: K —内压安全系数;

F —组合载荷安全系数;

S_0 —与材料无关的基本安全系数;

K_1 —材料性能试验验证的分项安全系数;

K_2 —化学环境的分项安全系数;

K_3 —设计温度和树脂变形影响的安全系数;

K_4 —动载荷分项安全系数;

K_5 —层合板长期性能的分项安全系数。

根据标准规定,结合罐顶实际情况,对各项安全系数取值。计算得出内压安全系数为6.0,组合载荷安全系数为5.3。

罐顶设计压力为1 500 Pa,储罐内径11 000 mm,层合板许用拉应力21 MPa,锥顶母线与水平线夹角为15°,带入公式(5)计算得出锥顶承载层厚度为15 mm。因此按照该设计标准计算得出玻璃纤维层厚度分别为7.5 mm,夹芯结构层厚度选为10 mm,复合结构总厚度为25 mm。

$$h = \frac{pD}{2[\sigma] \sin \theta} \quad (5)$$

式中: h 为锥顶承载层厚度,mm; p 为罐顶的设计压力,MPa; D 为储罐内径,mm; $[\sigma]$ 为层合板许用拉应力,MPa; θ 表示锥顶母线与水平线夹角,°。

根据 HG/T 20696-2018 纤维增强塑料化工设备技术规范,设计制作直径为11 m的复合结构立式储罐罐顶。罐顶采用锥顶的结构形式,分瓣设计加工,由12片独立的瓜皮板连接而成,瓜皮板与瓜皮板翻边后采用环氧树脂基树脂黏接连接。罐顶整体结构尺寸如图3所示。

圆角与立边区域的夹芯材料层由玻璃纤维层填充取代,因此该区域的玻璃纤维层厚度为25 mm。翻边黏接区域不含夹芯材料层。具体的立边剖面图如图4所示,黏接区域如图5所示。

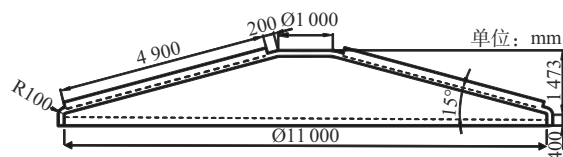


图3 复合结构罐顶主视图

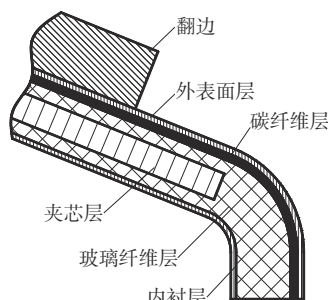


图4 立边处局部剖面图

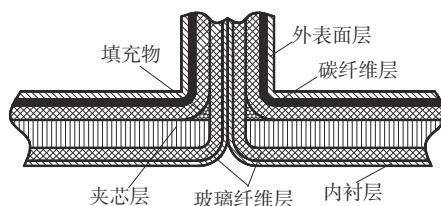


图5 翻边黏接区域剖面图

2 复合结构罐顶有限元分析

2.1 建立仿真模型

建立复合结构罐顶铺层面模型,采用四边形网格进行网格划分。网格划分共产生了19 291个节点,5 893个单元。采用Solid185实体单元输出直径为11 m的复合结构罐顶有限元仿真模型。复合结构铺层简化为玻璃纤维层-夹芯材料层-玻璃纤维层三层结构。玻璃纤维层以0°/90°双向纤维布为增强体,纤维方向为瓜皮板径向和环向两个方向。为简化模型减少计算量,认为瓜皮板间黏接强度足够,瓜皮板与瓜皮板间采用绑定接触,仿真模型如图6所示。

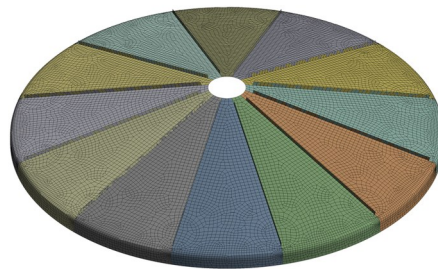


图6 罐顶有限元分析模型

2.2 施加载荷

载荷的加载方式分为组合载荷加载和内压加载。组合载荷包括风载、雪载、负压、三人维修载荷

和自重。内压加载方式为正内压和自重。约束设置为立边固定约束。载荷加载方式如图7所示。

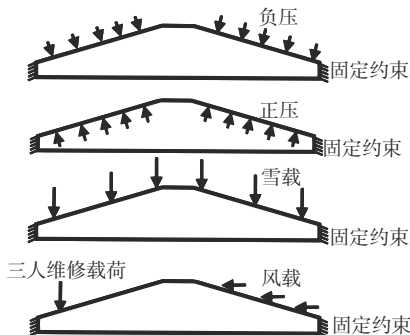


图7 复合结构罐顶载荷加载方式

根据 HG/T 20696-2018, 参考 GB/T 50009-2019 建筑结构荷载规范, 结合地理环境因素, 确定外载为风载、雪载、三人维修载荷, 根据储罐的设计参数确定内压为 1 500~500 Pa, 正内压加载方向垂直于罐顶向外, 负内压的加载方向为垂直于罐顶向内。以 50 年为重现期, 查得该地区基本风压为 0.45 kN/m², 基本雪载为 0.4 kN/m², 通过公式计算得, 风载为 300 N/m², 雪载为 616 N/m²。雪载的加载方向为自上向下重力方向加载, 风载为水平方向加载。三人维修载荷为 2 100 N, 加载区域位于安全系数最低位置周围 1 m² 范围内。罐顶整体的质量为 3 321.6 kg, 因此罐顶自身重力载荷为 32 552 N。

2.3 仿真分析

(1) 标准设计下的罐顶承载能力分析。

采用 3D-Puck 失效准则和 Sandwich 失效准则, 对罐顶承载能力进行分析。组合载荷作用下的罐顶失效云图如图 8 所示, 屈曲变形云图如图 9 所示, 内压加载作用下的失效云图如图 10 所示^[8-13]。

从图 8 和图 9 可以看出在组合载荷下, 复合结构罐顶的材料安全系数为 14.7, 在三人维修载荷所在的主加强筋下沿位置最容易发生夹芯层剪切失

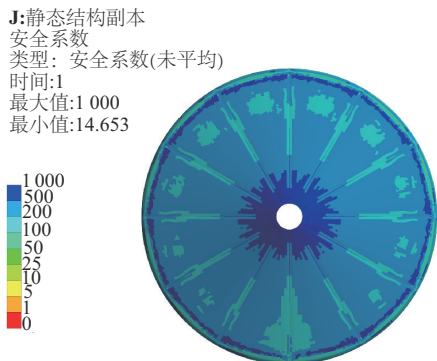


图8 组合载荷下罐顶失效云图

K: 屈曲特征值
总变形
类型: 总变形
加载乘数(线性): 6.837
单位: mm
最大值: 1
最小值: 0

1
0.92
0.81
0.69
0.58
0.46
0.35
0.23
0.12
0

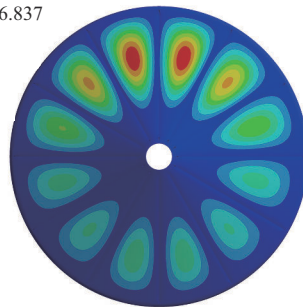


图9 复合结构罐顶线性屈曲变形云图

T: 静态结构副本
安全系数
类型: 安全系数(未平均)
时间: 1
最大值: 1 000
最小值: 15.657

1 000
500
250
100
50
25
10
5
1
0

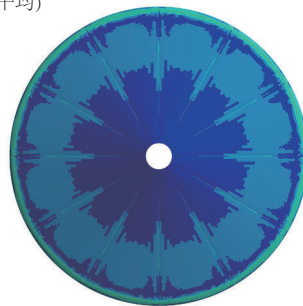


图10 内压加载下罐顶失效云图

效; 复合结构罐顶结构安全系数为 6.8。从图 10 可以看出, 内压作用下, 复合结构罐顶的最小安全系数为 15.7, 在翻边下沿区域最为危险, 易出现夹芯层剪切破坏。

综上所述, 组合载荷下的结构安全系数、材料安全系数、内压下的材料安全系数均满足标准下的安全系数要求, 但三个安全系数均远大于标准规定安全系数(内压材料安全系数 6.0, 组合载荷材料安全系数 5.3, 组合载荷结构安全系数 5.3), 造成罐顶的性能过剩。HG/T 20696-2018 标准增加了罐顶的材料成本, 因此该标准并不适用于复合结构罐顶设计。

(2) 罐顶最小厚度和最小质量计算。

通过响应曲面法, 建立连续上下层玻璃纤维层厚度与组合载荷材料安全系数、组合载荷结构安全系数、内压材料安全系数的连续曲面模型^[14]。其中上下层玻璃纤维层厚度取值范围为 0~10 mm, 上下玻璃纤维层厚度取值数目均为 10。曲面模型建立后, 通过设置罐顶的三个安全系数均大于等于标准规定值, 计算获得罐顶最小质量为 2 963.7 kg, 上下层玻璃纤维层厚度均为 6 mm, 复合结构总厚度为 22 mm。相比于标准设计下的复合结构罐顶, 厚度

减少12%,质量减少10%。

通过对比可以发现,组合载荷下罐顶的结构安全系数首先达到了标准规定的安全系数5.3,而材料安全系数远大于相应的安全系数要求。可见当前罐顶首要的失效形式为稳定性失效。因此应适当提高当前罐顶的刚度,优化罐顶的结构,提高罐顶稳定性,增强罐顶抵抗变形的能力,可进一步减少罐顶的质量和厚度。

3 复合结构罐顶优化及分析

3.1 复合结构罐顶优化

为解决复合结构罐顶稳定性差的问题,在罐顶添加径向加强筋^[15-17]。加强筋分为主加强筋和副加强筋,主副加强筋各12条,均布布置。主加强筋与副加强筋示意图如图11所示。含加强筋罐顶俯视图如图12所示,主加强筋覆盖在翻边上,长度与翻边一致,副加强筋穿插在主加强筋之间,长度为4 400 mm。

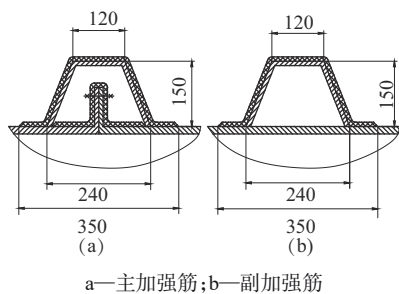


图11 加强筋示意图

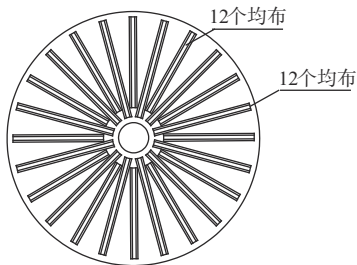


图12 含加强筋罐顶俯视图

3.2 复合结构罐顶优化后分析

通过响应曲面法,建立连续上下层玻璃纤维层厚度、主副加强筋厚度与组合载荷材料安全系数、组合载荷结构安全系数、内压材料安全系数的连续曲面模型。其中上下层玻璃纤维层厚度取值范围为0~10 mm,主副加强筋厚度取值范围为0~5 mm。自变量取值数目均为10。曲面模型建立后,通过设置罐顶的三个安全系数均大于等于标准规定值,计算求得含加强筋复合结构罐顶的最小质量为2 006

kg,相比于无加强筋罐顶的最小质量减少了32%,相比于标准设计下的复合结构罐顶上质量减少了40%;上层玻璃纤维层厚度为3.3 mm,下层玻璃纤维层厚度为1 mm,加强筋厚度为1.25 mm,复合结构总厚度为14.4 mm,相比于无加强筋复合结构罐顶的最小厚度减少了34%,相比于标准设计下的复合结构罐顶厚度减少了42%。

组合载荷下罐顶的材料安全系数为7.4,最易失效位置发生在三人维修载荷所在的主加强筋下沿位置,失效形式为夹芯层剪切失效。罐顶组合载荷下的结构安全系数为5.3,最大变形为1 mm。罐顶在内压作用下的最小材料安全系数为6.0,在主加强筋下沿位置材料安全系数最小,该区域易出现夹芯层剪切破坏。相比于组合载荷作用下,优化后的罐顶在内压下的材料安全系数更小。对整体罐顶的材料安全系数和结构安全系数进行对比分析,绘制安全系数对比柱状图如图13所示。

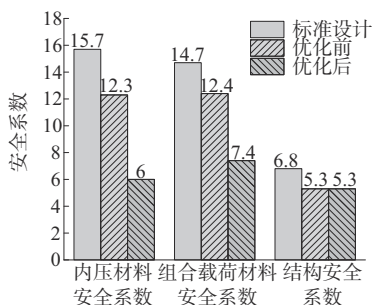
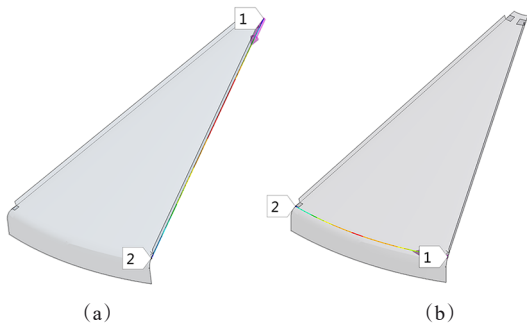


图13 优化前后安全系数对比

由图13通过对比看出:标准设计的复合结构罐顶安全系数过大;优化前复合机构罐顶的结构安全系数达到了安全系数下限,而材料安全系数均远大于相应的安全系数要求;优化后的复合结构罐顶结构安全系数和材料安全系数均达到了安全系数下限。

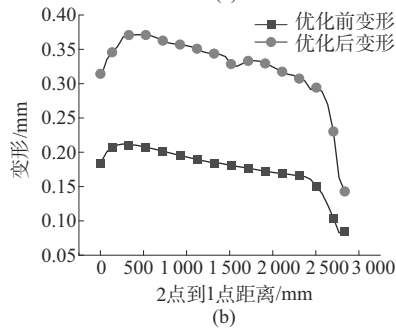
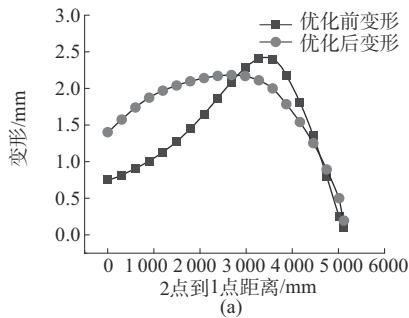
为准确反映加强筋对局部区域的影响程度,对比了分析优化前后的两条路径的变形和等效应力。路径如图14所示,图中点2的位置为三人维修载荷加载区域下沿。组合载荷下的变形与应力对比曲线如图15和图16所示。内压下的变形与应力对比曲线如图17和图18所示。

由图15a和图15b看出,在组合载荷作用下,优化后的复合结构罐顶变形在两条路径上都有不同程度的增加,这表明罐顶的材料安全系数在下降。从1点到2点的变形走势基本没变,变形最大位置



a—路径A;b—路径B

图14 路径位置示意图

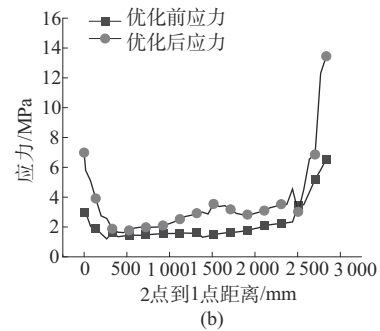
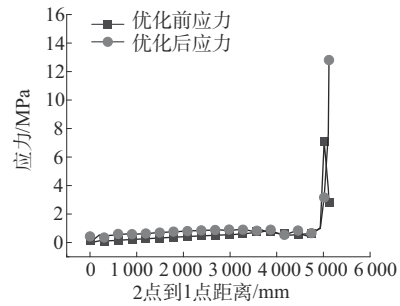


a—组合载荷下路径A变形;b—组合载荷下路径B变形

图15 组合载荷下优化前后变形曲线对比

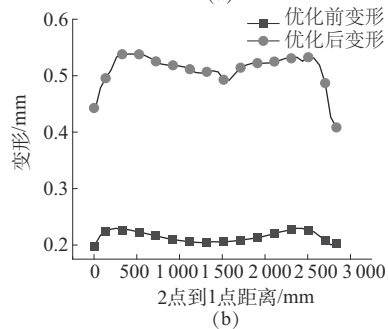
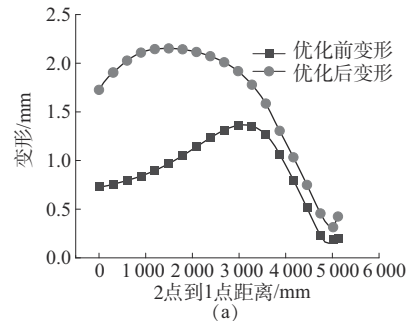
相同。路径A的最大变形发生在三人维修载荷加载的上边缘区域,路径B的最大变形发生在副加强筋下沿位置。优化前后路径B的变形变化较大,优化后的罐顶在路径B上的变形相比于优化前大约增加了75%。

从图16a和图16b可以看出,在组合载荷作用下优化前后的复合结构罐顶在大多数位置应力变化不大。路径A中优化前后在主加强筋位置应力差别最大,优化后此处应力最大增加为原来的2倍。路径B中可以看出,优化后的复合结构罐顶在副加强筋下沿位置应力也有明显增加,应力也近似增加为原来的2倍。因此可以看出优化后的罐顶,由于加入了加强筋,使得在组合载荷作用下加强筋下沿位置出现了明显的应力集中现象。同样由于加强筋的加入,使得罐顶可以拥有更小的厚度,路径B区



a—组合载荷下路径A应力;b—组合载荷下路径B应力

图16 组合载荷下优化前后应力曲线对比

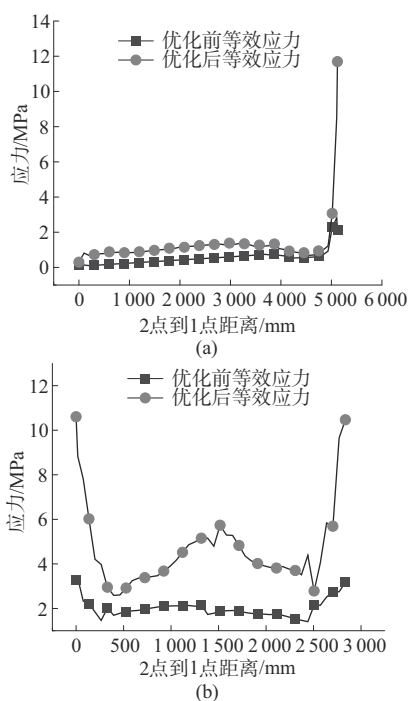


a—内压作用下路径A变形;b—内压作用下路径B变形

图17 内压下优化前后变形曲线对比

域变形明显增大,路径A的变形基本不变。

从图17a和图17b可以看出,在内压作用下,优化后的复合结构罐顶变形在两条路径上都有明显的增加。优化前罐顶在路径A上的最大变形发生在距离1点3 m处,优化后罐顶在路径A上的最大变形发生在距离1点1 m处,最大变形位置沿加强



a—内压作用下路径A应力;b—内压作用下路径B应力
图18 内压下优化前后应力曲线对比

筋向罐顶在中心移动2 m。路径B在优化前后变形走势基本不变,优化后的罐顶在路径B上的变形相比于优化前增加了1倍。

从图18a和图18b可知,在内压作用下优化前后的复合结构罐顶在大多数位置应力变化不大。路径A中优化前后在主加强筋位置应力差别最大,优化后该处应力最大增加为原来的6倍。路径B中可以看出,优化后的复合结构罐顶在副加强筋下沿位置应力也有明显增加,此处也是近似增加为原来的3倍。

因此结合17和图18可以看出优化后的罐顶在内压作用下同样存在应力集中现象,且比在组合载荷作用下表现得更加明显。在内压作用下,优化后的罐顶变形无论在路径A上还是在路径B上都比在组合载荷下增加得更加明显。

应力集中与变形对于罐顶主要有以下几方面影响^[18-19]:

(1)在应力曲线中,应力集中区域的应力明显高于其它区域;在安全系数云图中,应力集中区域的安全系数也明显低于其它位置。表明应力集中区域是罐顶主要的失效位置之一,应力集中是影响罐顶安全性的重要因素,大大降低了罐顶的安全性。若消除应力集中问题,罐顶厚度和质量可进一步优

化。

(2)应力集中区域的变形相对于周围区域的变形要小,这使得该位置的应力随变形的变化更加快速,因此该区域失效具有突然性。

(3)应力集中会影响材料的疲劳寿命,由于储罐罐顶常年承受风载等动载荷,因此即使所设计储罐强度已经符合标准,但是罐顶的使用寿命也会大大减少。亟需对罐顶进行进一步结构优化,提高罐顶的安全性能和使用寿命。

4 结论

(1)按照HG/T 20696-2018标准设计复合结构罐顶可以满足安全系数要求,但是安全系数过高,增加了制造成本。满足安全系数要求的前提下,复合结构罐顶的最小质量为2 963.7 kg,相比标准设计下的罐顶质量减少了10%。

(2)优化前复合结构罐顶首要的失效形式为罐顶稳定性失效,因此采用增加加强筋的方式增加罐顶的稳定性,以进一步减小罐顶的质量和厚度。

(3)加入加强筋后,复合结构罐顶的最小质量2 006 kg,相比于无加强筋罐顶的最小质量减少了32%,相比于标准设计下的复合结构罐顶上质量减少了40%。

(4)优化后的罐顶无论是在组合载荷下还是内压下,变形都有明显增加。加强筋下沿区域应力集中更加明显,且在内压加载时表现尤为突出。适当的延长主加强筋和副加强筋长度或者对加强筋末端进行渐变处理,可以进一步改善罐顶应力集中问题。

参考文献

- [1] 董志强,朱波,温立宪,等.天然气采出水埋地玻璃钢储罐服役状况检测研究[J].热固性树脂,2021,36(1):44-49.
Dong Zhiqiang, Zhu Bo, Wen Lixian, et al. Service condition detection of buried FRP tank for natural gas produced water[J]. Thermosetting Resin, 2021, 36(1):44-49.
- [2] 蒋华云,李凤舞,徐克彬,等.玻璃钢储罐在油田中的应用现状及前景[J].石油矿场机械,2012,41(11):24-26.
Jiang Huayun, Li Fengwu, Xu Kebin, et al. Application situation and the prospect of glass fiber reinforced plastic storage tanks in oilfield[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(11):24-26.
- [3] 倪平平.大型缠绕成型玻璃钢容器的优化设计[J].科技资讯,2014,12(4):135-136.
Ni Pingping. Optimization design of large winding glass fiber reinforced plastic container[J]. Science and Technology Information, 2014, 12(4):135-136.
- [4] 陶保林,石竣夫,宋传阳,等.3000 m³玻璃钢储罐有限元分析[J].

- 当代化工, 2017, 46(1):98-101.
- Tao Baolin, Shi Junfu, Song Chuanyang, et al. Finite element analysis of 3000 m³ FRP tank[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(1):98-101.
- [5] 段国晨, 赵景丽, 赵伟超. 手糊玻璃钢工艺蜂窝夹芯结构的力学性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(9):33-36.
- Duan Guocheng, Zhao Jingli, Zhao Weichao. The mechanical properties of honeycomb sandwich structure for hand-paste FRP molding process[J]. China Adhesives, 2018, 27(9):33-36.
- [6] 匡宁, 陈同海, 钱育胜, 等. 中空复合材料的成型工艺及应用进展[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(1):120-123.
- Kuang Ning, Chen Tonghai, Qian Yusheng, et al. Progress in molding technology and application of hollow composites[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):120-123.
- [7] 逢博, 黄永亮, 张云峰. 中空复合材料的成型工艺及应用进展[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(3):128-131.
- Pang Bo, Huang Yongliang, Zhang Yunfeng. Forming technology and application progress of hollow Composite materials[J]. Fiber Composite Materials, 2022, 39(3):128-131.
- [8] 赵芳, 王红玉, 张琪. 玻璃钢储罐的安全分析[J]. 辽宁化工, 2016, 45(8):1 011-1 013.
- Zhao Fang, Wang Hongyu, Zhang Qi. Safety analysis on glass steel storage tanks[J]. Liaoning Chemical Industry, 2016, 45(8):1 011-1 013.
- [9] 叶文龙, 郑贤中, 李小阳. 玻璃钢储罐地震作用下的有限元分析[J]. 化学工程与装备, 2019(4):11-13.
- Ye Wenlong, Zheng Xianzhong, Li Xiaoyang. Finite element analysis of glass Reinforced plastic storage tank under seismic action[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019(4):11-13.
- [10] 赵晨, 赵凤霞. 大型低温立式LNG储罐强度分析[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(5):42-48.
- Zhao Chen, Zhao Fengxia. Strength analysis for large cryogenic vertical LNG storage tank[J]. Process Equipment & Piping, 2022, 59(5):42-48.
- [11] 李德龙, 蔡永梅, 宋莹莹. 在役立式常压储罐强度分析[J]. 石化技术, 2021, 28(8):25-26.
- Li Delong, Cai Yongmei, Song Yingying. Analysis on strength of in-service vertical atmospheric storage tanks[J]. Petrochemical Technology, 2021, 28(8):25-26.
- [12] 高晋. 大型LNG储罐大跨度穹顶结构稳定性分析[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(11):147-151.
- Gao Jin. Structural stability analysis of large-span dome of large LNG storage tank[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2021, 24(11):147-151.
- [13] 陈广祥. 带加强筋自支撑锥顶稳定性分析[J]. 广州化工, 2012, 40(13):148-150.
- Chen Guangxiang. Stability analysis of self-supporting conical roof with reinforcing rib[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012, 40(13):148-150.
- [14] 高艳, 刘敏. Ansys在LNG储罐强度分析中的应用[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(22):214-216.
- Gao Yan, Liu Min. Application of Ansys in strength analysis of LNG storage tank[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(22):214-216.
- [15] 帅露. 大型储罐罐顶优化设计[J]. 化工设计, 2019, 29(05):29-32.
- Shuai Lu. Optimization design of large storage tank roof[J]. Chemical Industry Design, 2019, 29(5):29-32.
- [16] 姚佐权, 张新建, 陈美全. 10000 m³常压醋酸储罐罐顶失稳分析及修复[J]. 设备管理与维修, 2014(8):19-21.
- Yao Zuoquan, Zhang Xinjian, Chen Meiquan. Analysis and repair of instability of 10 000 m³ atmospheric acetic acid storage tank[J]. Equipment Management and Maintenance, 2014(8):19-21.
- [17] 毛宁. 大型外浮顶储罐罐壁厚度优化设计探讨[J]. 广东化工, 2020, 47(18):150-151, 142.
- Mao Ning. Discussion on optimization design of wall thickness of large external floating roof storage tank[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(18):150-151, 142.
- [18] 党亚茹, 张满航. 压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施[J]. 石化技术, 2021, 28(2):166-167.
- Dang Yaru, Zhang Manhang. Measures to reduce stress concentration in the design and manufacture of pressure vessel[J]. Petrochemical Technology, 2021, 28(2):166-167.
- [19] 朱沙沙, 史艳梅. 降低压力容器设计制造应力集中的措施[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(9):62-83.
- Zhu Shasha, Shi Yanmei. Measures to reduce stress concentration in pressure vessel design and manufacture[J]. Chemical Industry Design Communication, 2016, 42(9):62-83.