

DOI:10.20031/j.cnki.0254-6094.202202012

航煤用单面倾斜底立式储罐罐底局部结构特性研究

王成杰¹ 刘 硕² 张 健²

(1.中国航空油料有限责任公司;2.中国科学院力学研究所)

摘 要 为探究单面倾斜底立式储罐用于航煤收发系统的可行性,开展针对该系统的试验测试和数值模拟。首先通过大角焊缝模型测试验证有限元模拟的准确性,并给出大角焊缝附近应变分布规律;然后通过有限元法对比单面倾斜底立式储罐和倒锥底立式储罐的大角焊缝附近受力状况,证实前者力学特性的优越性,并对其排板布置提出建议。

关键词 单面倾斜底立式储罐 倒锥底立式储罐 结构特性 大角焊缝 应变测试 有限元法
中图分类号 TQ053.2 **文献标识码** A **文章编号** 0254-6094(2022)02-0242-07

自 20 世纪末,民航燃料收发系统中已逐渐采用倒锥底立式储罐(以下简称锥底罐),该罐罐底呈倒锥形(坡度大于 0.040),锥底中心设置集油槽。相对于平底罐,锥底罐可消除微生物滋生环境、便于清洗作业且能削弱电化学腐蚀条件^[1,2]。然而,在近年来的应用中,发现锥底罐存在 3 个弊端:集油槽位于罐底正中,需定期人工作业辅助排污;需较高的环墙容纳集油槽和下部排污结构,不利于储罐稳定性;罐底与罐壁连接的角焊缝为钝角,反复收发航煤的作业可能造成疲劳破坏。在新的航煤储罐建设中,需考虑以上问题,调整罐底结构设计,改善储罐的排污特性。

单面倾斜底立式储罐(以下简称倾斜底罐)不失为一种理想选择,该储罐是一种平底罐,底板单向倾斜^[2],相对于锥底罐具有 2 个优势:集油槽在低点侧布置,可有效降低环墙高度;罐内清洗作业便利,不需设置清扫孔。然而,罐底特殊的结构形式会导致罐壁建造稍显复杂^[3],而相关规范和行业标准的设计建造的规定较为模糊^[4-7]。为此,需探究该储罐罐底及其周围区域的力学特

性,以指导倾斜底罐的设计和建造。

储罐属大型结构,一般通过在位测试或模型测试评估其力学性能。例如,Gusev G N 和 Shardakov I N 采用应变传感器监测极端环境下储罐的应力应变状况^[8];徐景锋采用模型试验的方式,通过振动台对储罐子结构输入地震波,研究储罐抗震性能^[9]。随着计算机硬件的发展,更多学者通过数值模拟评估储罐的力学性能。例如,周忠贺等构建了 500 m³ 容积储罐的三维网格模型,通过有限元法分析平底立式储罐在不同工况下的应力分布,发现应对人孔附近的底板进行修复或补强^[10],牛铮等通过有限元法对三通道储罐内部 T 型钢加强筋的布置方案进行了优化筛选^[11];张雪铭通过有限元软件 ANSYS 分析储罐的焊脚形式和结构参数对大角焊缝处应力强度峰值的影响,提出相关结构参数的选择原则^[12]。据此,笔者将通过数值模拟方法构建倾斜底罐的三维模型,同时开展原尺度子模型的测试验证,研究罐底局部力学特性,为该种储罐应用于航煤储运提供理论参考。

基金项目:中科院战略先导专项(B类)子课题——深海油气水多相多过程耦合理论与分离技术(XDB22030101)。

作者简介:王成杰(1990-),工程师,从事油气储运领域工作。

通讯作者:刘硕(1988-),助理研究员,从事多相流及油气储运领域的研究,liushuo@imech.ac.cn。

引用本文:王成杰,刘硕,张健.航煤用单面倾斜底立式储罐罐底局部结构特性研究[J].化工机械,2022,49(2):242~247,255.

1 角焊缝局部强度测试

1.1 试件与测试

选取倾斜底罐高点的大角焊缝和周围罐壁-罐底结构,按照 10 000 m³ 的储罐,加工测试试件,其长宽均为 1.0 m、高 0.8 m,焊缝等的尺寸按照 SH 3046—1992《石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范》选取,罐底坡度取 0.020。

如图 1a 所示,依靠螺栓连接将罐底边缘板

固定于测试平台上,通过强力弹簧连接测试平台与罐壁来模拟上部罐壁对壁板的作用;如图 1b 所示,在试件的内/外壁板和罐底边缘板的不同位置布置应变监测点。通过千斤顶推动罐壁加载(罐壁变形范围为 0~23 mm),并由测力计(与千斤顶相连)测试其值。测试时,采用应变监测传感器测试监测点的应变变化,激光对准仪和刻度尺测量罐壁的水平变形。

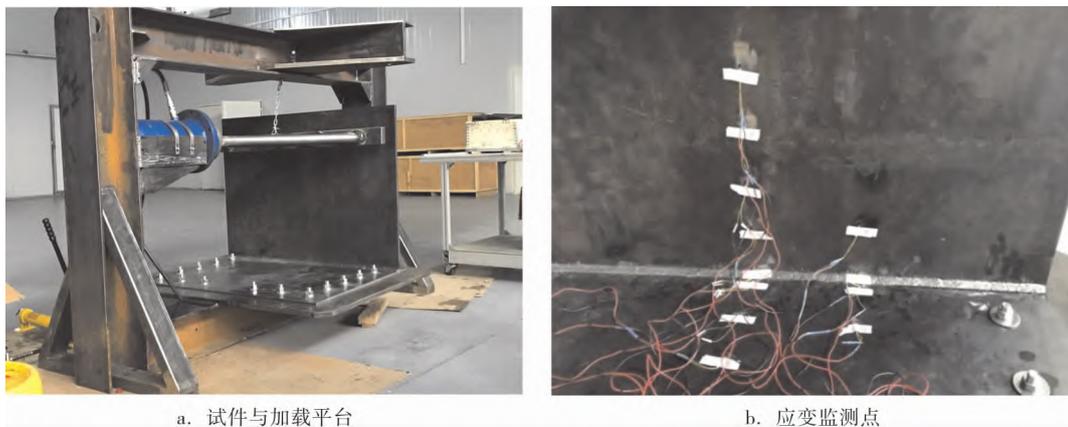


图 1 试验测试系统

1.2 数值模拟

在 ANSYS 软件平台中建立与试验加载试件一致的数值分析模型。如图 2 所示,三维模型模拟储罐壁板和罐底边缘板的局部区域,其中角焊缝部分与试件一致,并用平面单元模拟支撑试件的框架。边界条件为模型与约束平面做接触处

理。同时,三维模型上对应的螺栓固定点被约束所有自由度,且完全相同于试件在框架上的固定方式。有限元模型加载方式为在壁板施加指向储罐外侧的位移,与试验中试件的加载方式一致(根据试验数据,施加 22 mm 水平位移的加载量)。

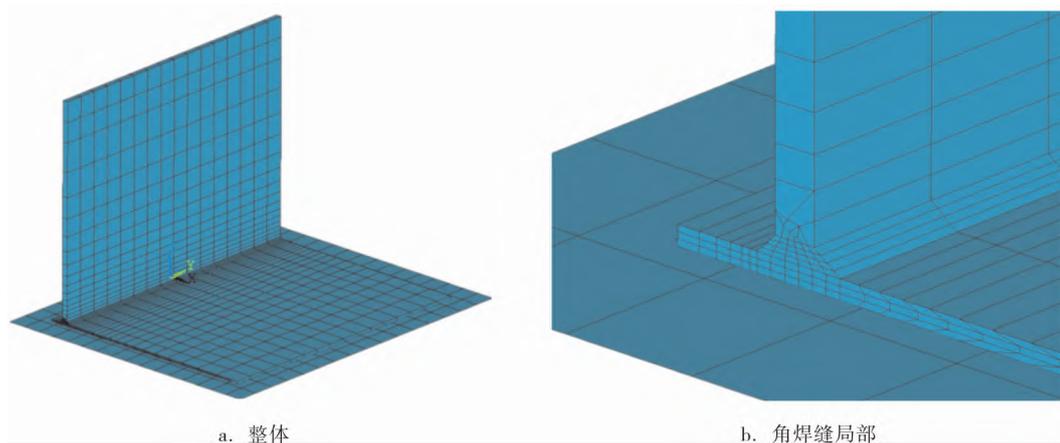


图 2 测试试件的有限元模型

1.3 测试结果与模拟结果对比

罐壁内部施加 22 mm 水平位移的加载量后,

重点关注试件中心附近监测点应力和应变分布状况。图 3a 为试件应力分布云图,高应力区域出

现于大角焊缝焊趾处,高应力由螺栓约束所致。图3b为各监测点的测试应变和模拟应变的结果对比,两者在幅值和变化趋势上较为相符(尽管存在误差,但对整体趋势的影响可以忽略不计),

其中最大应变不超过 1200×10^{-6} ,说明试件中重点研究部分处于线弹性区间。同时证明,基于有限元法的数值模拟可以用于研究倾斜底罐局部力学特性。

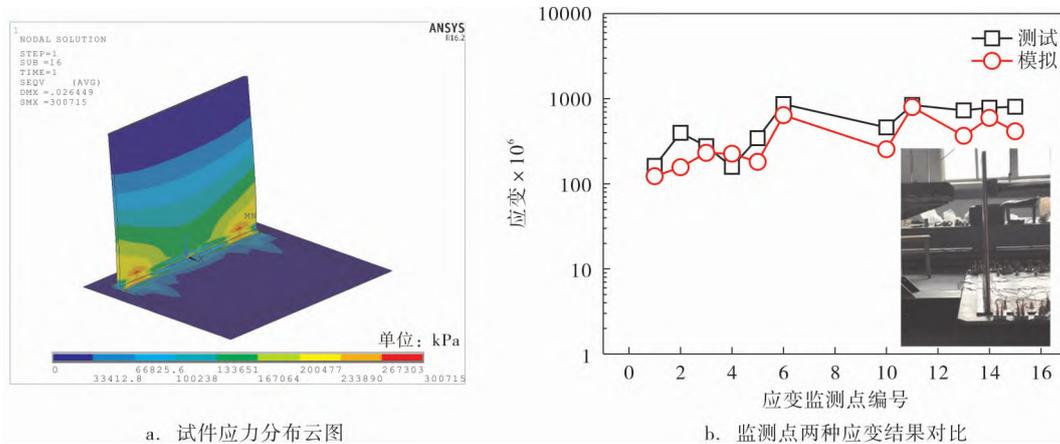


图3 测试与模拟结果对比

2 两储罐大角焊缝力学特性分析

2.1 模型建立

倾斜底罐与锥底罐的不同点在于罐底-罐壁连接处的大角焊缝张角并非固定不变。在倾斜底罐高点时,大角焊缝张角为钝角;在倾斜底罐低点时,大角焊缝张角为锐角。角度不同可能会引发角焊缝附近应力分布不同。为此,在有限元模拟可靠性的基础上,采用有限元法对比分析锥底罐和倾斜底罐大角焊缝的力学特性。

以 $10\ 000\ \text{m}^3$ 储罐为例,依据 API 650 附录 A2 中推荐的储罐规格确定其结构参数为:

- 直径 42.0 m
- 高度 7.2 m
- 筒节数 4
- 罐壁厚度 11.5 mm
- 罐底边缘板厚度 6 mm
- 角焊缝尺寸 6 mm
- 罐底坡度 0.350

建立锥底罐和倾斜底罐有限元模型(图4)。模型中包含储罐罐体、混凝土环墙和环墙内部回填材料,这三者的实体采用 Solid45 单元,罐底-基础、环墙-回填材料间的接触采用 Target170-Contal74 接触对。倾斜底罐模型共包含 147 562 个节点、123 680 个单元,锥底罐模型共包含 152 814

个节点、121 800 个单元。储罐罐体的钢材(Q235-B 型)采用双线性本构关系模拟,其屈服强度为 235 MPa,弹性模量为 206 GPa;回填材料通过 Drucker-Prager 本构关系模拟。

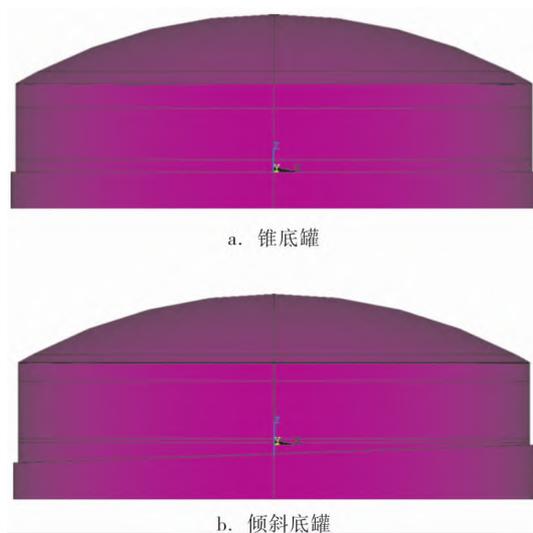


图4 两储罐罐体有限元模型

模型约束方面,基础和回填材料底面约束所有自由度,环墙侧面约束水平方向的平动自由度。基础、回填材料与储罐底板间的相对滑动摩擦因子为 0.7。模型加载方面,两个模型均受竖直向下的重力作用。同时,针对满罐和罐内液位高度为 7.2 m 两种情况,对罐壁和罐底产生静水压

力,对储罐内壁产生指向罐外的面载荷,载荷大小与距离自由液面的距离成正比;对储罐罐底产生向下的面载荷,大小同样与液位深度成正比。据此,对模型开展静力分析,求解角焊缝局部受力状况。

2.2 大角焊缝力学特性对比

锥底罐和倾斜底罐大角焊缝应力分布如图 5 所示。由图 5 可见,在满罐条件下两储罐局部应

力峰值(前者明显高于后者)均出现在罐壁-罐底大角焊缝附近,且在罐底板一侧的角焊缝焊趾上。原因为:罐壁和罐顶的重量通过角焊缝传递到底板,罐壁承受静水压力形成的力矩,底板承受向下的载荷,三者共同作用造成角焊缝附近出现明显的应力集中;罐底边缘板的厚度小于罐壁,会产生较大协调变形,造成底板一侧出现应力峰值。

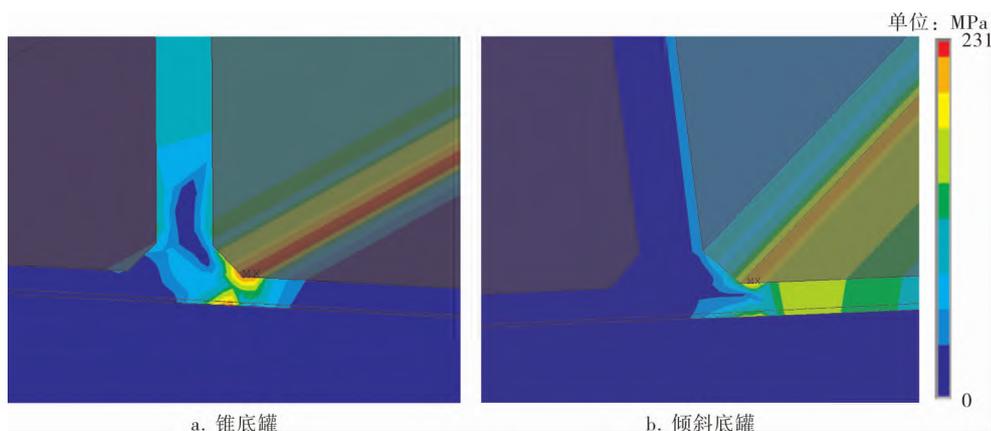


图 5 两储罐的大角焊缝应力分布

相同的规格和工况下,两储罐大角焊缝圆周方向的应力峰值如图 6 所示。由图 6 可见,锥底罐的应力峰值维持在 230 MPa 左右,而倾斜底罐的介于 180~200 MPa 间,明显小于锥底罐,这是由于高程差与罐底-罐壁夹角共同作用所致。在倾斜底罐的高点,液位深度小于锥底罐,储罐内液产生的压力小于锥底罐,虽然内侧的壁板-罐底边缘板夹角为钝角,但是较低的压力水平使得该点的应力峰值小于锥底罐;在倾斜底罐的低点,液位深度与锥底罐相差不大,罐内测壁板-罐底边缘板夹角为锐角,受力状况优于锥底罐的钝角大角焊缝,使得倾斜底罐低点处的应力峰值仍小于锥底罐;其他位置的受力状况则介于高点和低点之间。因此,从以上分析中可以得出倾斜底罐的大角焊缝受力特性优于锥底罐。

3 倾斜底罐罐底局部力学特性分析

3.1 模型建立

为探究倾斜底罐罐底及其周边局部力学特性,以航煤用 20 000 m³ 储罐为例,建立三维实体有限元模型进行数值模拟。为结合国内生产实际,储罐规格依据 SH 3046—1992《石油化工立式

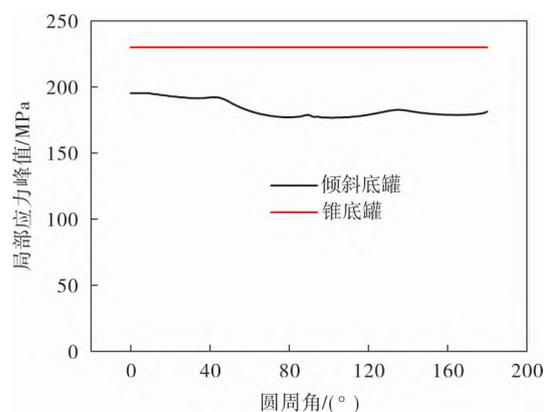


图 6 两储罐大角焊缝圆周方向的应力峰值对比
圆筒形钢制焊接储罐设计规范》选取,其结构参数为:

直径 42.0 m
高度 17.0 m
筒节数 4
罐壁厚度 23、21、19、17、14、11、9、9、9 mm
罐底边缘板厚度 9 mm
罐底中幅板厚度 7 mm
角焊缝尺寸 12(罐外)、16(罐内) mm
罐底坡度 0.020

根据上述参数构建储罐有限元模型(图7)。模型中包含罐体、混凝土环墙和基础回填材料。本研究主要涉及罐底及其周边结构,需要适当简化罐壁上部、罐顶及其附属结构。采用 Solid45 单元构建三维实体,通过 Target170-Conta174 单元接触对模拟罐底、基础和环墙间的相互作用。储罐模型共包含 178 240 个单元。罐体的钢材(16MnR)采用双线性本构关系模拟,其屈服强度为 345 MPa,弹性模量为 206 GPa;回填材料通过 Drucker-Prager 本构关系模拟。

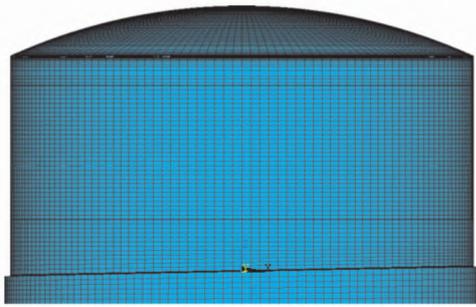


图7 储罐三维实体有限元模型

边界条件设置:约束环墙和回填材料底面全部自由度,约束环墙侧面的水平自由度。加载工况设置空罐和满罐两个工况:空罐为整个模型在自重作用下的受力分析;满罐为储罐内部航煤达到设计液位时的储罐受力分析。通过面载荷模拟航煤液位对罐壁的压力。据此进行静力分析,求解储罐受力分布状况。

3.2 罐壁应力分布规律

图8所示倾斜底罐低点和高点罐壁应力沿高程变化曲线,其中并未包含底部大角焊缝局部的应力峰值。由图8可见,空罐时的罐壁应力水平远小于满罐;满罐时的罐壁应力水平随着靠近罐底逐渐增加,在距离罐底1 m左右的位置出

现峰值后急剧下降。这是由于满罐工况下,靠近罐底板的液体压力较大。但在罐壁-罐底大角焊缝处,由于底板和角焊缝的加强作用,局部刚度较大,难以产生较大变形。而在靠近底板的罐壁处,液压载荷较大,同时罐壁的刚度远小于大角焊缝附近区域,会产生较大变形,形成应力峰值。进一步对比还可发现,低点一侧的罐壁应力峰值略大于高点一侧,这是由液位差导致。同时,低点一侧底板和高点一侧应力峰值的高程差约为1.9 m,为保证储罐强度,第1筒节与第2筒节间的焊缝不宜在这一区间内。为此,应适当增加筒节高度以补强储罐强度。

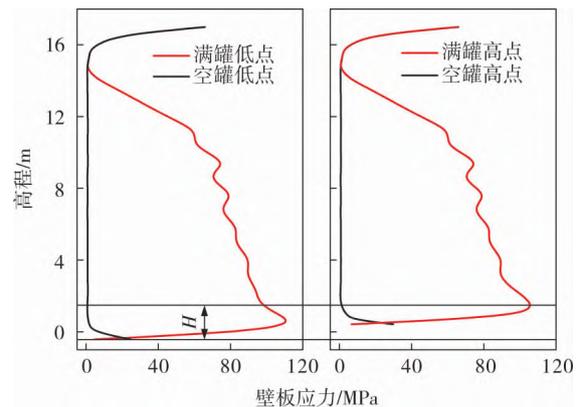
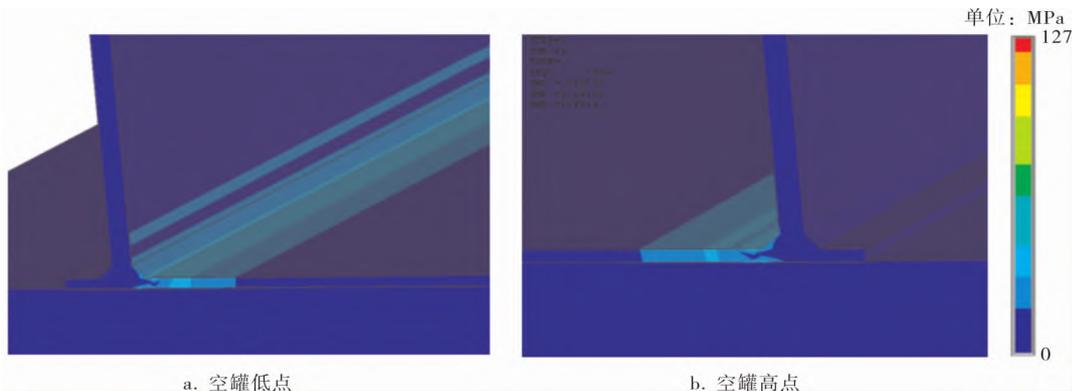


图8 储罐罐壁应力沿高程变化曲线

3.3 大角焊缝局部力学特性

不同工况下,储罐低点和高点的大角焊缝应力分布如图9所示。

由图9可见,大角焊缝附近应力较高的区域为罐壁内罐底一侧的角焊缝焊趾。这是由于第1筒节罐壁厚度大于罐底边缘板厚度,且大角焊缝又位于罐壁一侧,因此高应力出现于内部罐底边缘板区域。另外,空罐工况下,大角焊缝应力峰值水平很低,不超过40 MPa;满罐工况下,大角焊缝



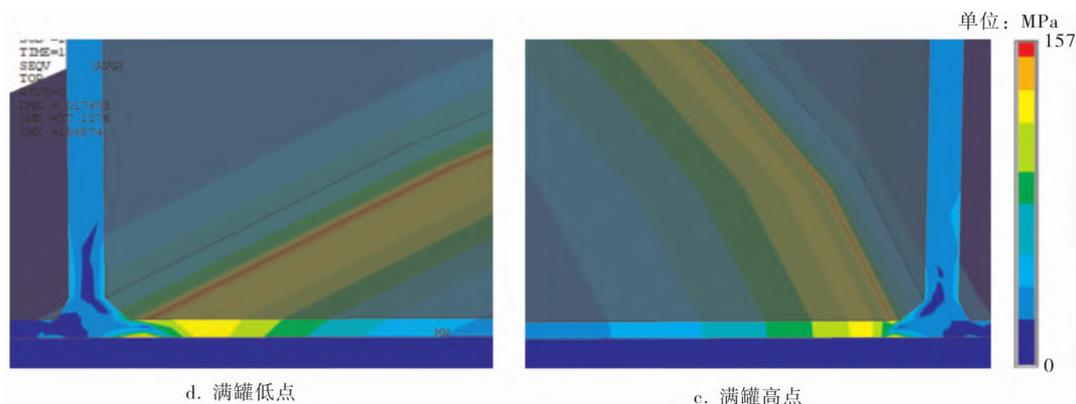


图 9 不同工况储罐低点和高点的大角焊缝应力分布

应力峰值虽有所增高,但总体未超过 157 MPa,远小于 16MnR 钢材的许用应力 345 MPa。

以圆周角为 x 轴,以两工况时的大角焊缝应力峰值为 y 轴,形成图 10。由图 10 可见,空罐时整个圆周上大角焊缝的应力峰值不超过 50 MPa,且圆周位置变化不大;满罐时圆周上大角焊缝的应力峰值不超过 160 MPa。应力峰值最大的点在周向 110~120°区间内,这与储罐整体几何特征和罐底-回填材料相互作用有关。另外,储罐大角焊缝的应力峰值远小于钢材本身的屈服强度 345 MPa。

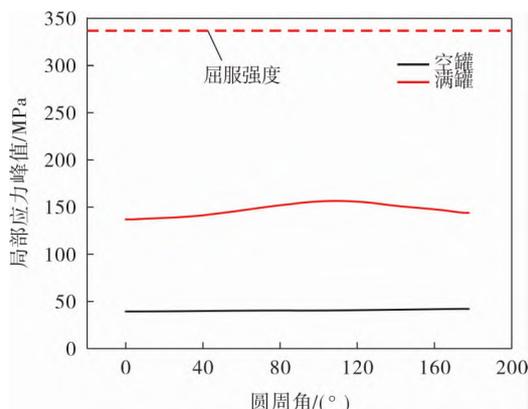


图 10 不同工况下大角焊缝应力峰值沿储罐周向变化曲线

4 结论

4.1 通过原尺度储罐局部模型的测试,验证了有限元法对储罐进行受力分析是准确可靠的。

4.2 同规格的锥底罐和倾斜底罐,后者的大角焊缝应力水平更低,结构特性优于前者。这与坡度引发的液位变化、罐壁-罐底夹角有关。

4.3 倾斜底罐的罐壁应力峰值出现在距离罐底

1 m 附近的位置,第 1 筒节的排板布置应综合考虑高程差和应力峰值区域,并避免该区域出现焊缝。

4.4 由于第 1 筒节壁板厚度大于罐底边缘板,储罐大角焊缝应力峰值出现于罐底一侧的焊趾附近;合理设计的罐壁-罐底结构形式,使大角焊缝应力峰值远小于钢材屈服强度。

参 考 文 献

- [1] 王彤彤.锥底油罐浅析[J].江西化工,2002,(3):38~39.
- [2] 苏吉鑫,朱华清,张的,等.储罐机械清洗设备清洗工艺与应用[J].管道技术与设备,2014,(1):49~51,55.
- [3] Myers P E.Aboveground Storage Tanks[M].New York: McGraw-Hill Education,1997:144.
- [4] GB 50341—2014,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,2015.
- [5] GB 50128—2014,立式圆筒形钢制焊接储罐施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [6] SH 3046—1992,石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范[S].北京:中国石化出版社,1992.
- [7] API Std650—1998,钢制焊接石油储罐[S].Washington:American Petroleum Institute,1998.
- [8] Gusev G N,Shardakov I N.Monitoring of Stress-Strain State in Steel Oil Storage Tanks. Features of strain Gauges Transducers Application in Severe Environment [J].Procedia Structural Integrity,2020,28:2328~2334.
- [9] 徐景锋.考虑 SSI 效应储罐抗震性能振动台子结构试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [10] 周忠贺,王亚东,许皆乐,等.储罐底板变形机理与有限元强度分析[J].化工机械,2020,47(6):783~787,815.

(下转第 255 页)

- 射流喷嘴结构参数影响研究[J].流体机械,2019,47(10):1~19.
- [10] 王生亮,刘根友.一种非线性动态自适应惯性权重 PSO 算法[J].计算机仿真,2021,38(4):249~253,451.
- [11] 赵刚,朱华昕,李苏辉,等.基于数据和神经网络的燃气轮机NO_x排放预测与优化[J].动力工程学报,2021,41(1):22~27.
- (收稿日期:2021-05-17,修回日期:2022-03-22)

Prediction of Gas Volume Fraction of Cavitation Jet and Optimization of Nozzle Structure Based on Artificial Neural Network

ZHANG Hao-nan, WANG Zun-ce, XU Yan, ZHANG Jing-long,
LI Sen, YAN Yue-juan

(School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University;
Heilongjiang Key Laboratory of Petroleum and Petrochemical Multiphase Treatment and Pollution Prevention)

Abstract The scale formation, salt deposition, wax precipitation, rust and heavy oil accumulation on the tubing's inner wall may reduce inner wall space, increase oil resistance, consume electrical energy obviously and even cause oil-line plugging. Considering cavitation water jet technology's merits in efficiency and energy saving, a method of predicting gas volume fraction of cavitation jet and optimizing structure based on artificial neural network (ANN) was proposed. Taking cavitation nozzle of cleaning oil pipe as an example, the sample set was extracted for ANN training. The results show that, the neural network has certain ability in predicting the span and peak value of gas volume distribution, and the structural optimization complying with the experimental verification proves the artificial neural network's reliability in predicting and optimizing the cavitation jet.

Key words oil pipe, cavitation jet, neural network, regression model, gas volume distribution

(上接第247页)

- [11] 牛铮,范海俊,姚佐权.基于 ANSYS 的三通道储罐结构加固及修复技术[J].管道技术与设备,2020,(2):46~50.
- [12] 张雪铭.超大型原油储罐大角焊缝处应力分析及结构优化[J].化工设计,2014,24(2):26~29.
- (收稿日期:2021-04-27,修回日期:2021-06-22)

Research on Bottom Local Structure Characteristics of Shovel Bottom Vertical Tank for Aviation Kerosene

WANG Cheng-jie², LIU Shuo², ZHANG Jian²

(1. China National Aviation Fuel Co., Ltd; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract For purpose of exploring feasibility of applying a shovel bottom vertical tank to receiving and sending aviation fuels, both systematic experimental test and numerical simulation was implemented. Firstly, having the large fillet weld model employed to test and verify FEM simulation's accuracy and having the strain distribution law near the large fillet weld presented; and then, making use of finite element method to compare the stress distribution near the large fillet welds of the shovel bottom vertical tank and the tapered bottom tank to prove the former's superiority in mechanical properties, including suggestions to its layout.

Key words shovel bottom vertical tank, vertical tank with inverted cone bottom, structural characteristics, large fillet weld, strain test, FEM