

运载火箭贮箱箱底法兰力学特征分析

李庆庆, 刘冠华, 姬秀滨, 张佳佳, 付玉行
(蓝箭航天空间科技股份有限公司, 北京, 100076)

摘要: 针对新一代运载火箭贮箱全搅拌摩擦焊接箱底采用的翻边法兰结构, 对箱底法兰焊前装配、搅拌焊接、补焊及整底液压考核过程中的典型位置进行应变测量, 同时, 进行了箱底液压过程的有限元计算。测试结果表明, 法兰焊接后在圆角区存在幅度较大的不均匀应力分布, 而全搅拌补焊对法兰最终应力水平影响较小; 法兰在内压承载时, 存在因受力不均匀导致局部点进入屈服的状态。通过试验验证了有限元方法的准确性, 可以用于后续法兰结构优化的有效性评估。

关键词: 火箭; 箱底; 法兰; 搅拌摩擦焊; 应变; 有限元

中图分类号: V19

文献标识码: A

Mechanical Characteristics Analysis of the Flange on the Tank Bulkhead of Launch Vehicle

LI Qingqing, LIU Guanhua, JI Xiubin, ZHANG Jiajia, FU Yuhang
(Landscape Technology Co. Ltd, Beijing, 100076)

Abstract: For the flanged structure used in the fully friction stir welded tank bulkhead of the next-generation launch vehicle, strain measurements are conducted at typical locations during the flange assembly, welding, repair welding, and hydrostatic testing processes. Additionally, finite element analysis (FEA) is performed to simulate the internal pressure loading of the tank bulkhead. The test results reveal significant non-uniform stress distribution in the flange fillet area after welding, while full stirring repair welding has a relatively small influence on the final stress level of the flange. Under internal pressure loading, the flange exhibit uneven stress distribution, leading to localized yielding at certain points. The experimental results validate the accuracy of the finite element method, demonstrating its applicability for evaluating the effectiveness of subsequent structural optimizations.

Keywords: launch vehicle; tank bulkhead; flange; friction stir welding; strain; finite element analysis

0 引言

贮箱作为运载火箭的关键部段, 目前主要采用高强度铝合金材料拼焊而成。其中, 箱底法兰作为贮箱典型结构, 是贮箱与增压输送系统间气、液通道的重要接口, 同时受贮箱内压、贮箱与管路系统变形协调和管路振动等载荷^[1-3]。

传统型号贮箱箱底法兰受早期装备能力和工艺能力不足的限制, 普遍采用了在箱底瓜瓣或顶盖零件状态下凸孔, 整底状态下手工焊接法兰的工艺路线, 优点是不依赖装备、对法兰原材料综合性能要求较低, 但存在焊接质量不稳定、形位尺寸精度一致性较差的问题。近年来, 基础工业能力的发展促进了国内贮箱结构制造相关大型装备的研制和新工艺的开发, 伴随新一代运载火箭的研制, 箱底法兰已广泛应用整底状

态原位开孔后装配、搅拌摩擦焊接工艺, 法兰结构也从传统的直边对接手工熔焊结构转变为翻边对接搅拌摩擦焊结构。法兰原材料也普遍采用综合性能更高的锻件^[4-7]。

法兰结构、焊接装备、焊接工艺的改变, 导致法兰装配、焊接过程的受力状态和承载条件下的应力状态均发生显著变化, 在研制中也出现了法兰焊缝、法兰锻件本体开裂的相关质量问题, 而对法兰全寿命周期内实际受力状态的研究未见相关报道。

因此, 掌握装备、结构和工艺改变后的装配焊接过程及实际内压工况下的法兰力学特征, 对该结构法兰原材料性能控制、设计方案优化、焊接质量控制和提高整体结构的可靠性具有重要意义^[8-15]。

1 试验与有限元计算

1.1 试验及测量

为获取翻边对接法兰受力状态，试验采集了试验件法兰装配、焊接、补焊全程中的应变数据和箱底内压试验过程的法兰应变数据，以全面评估法兰在生产、服役状态下的力学特征。

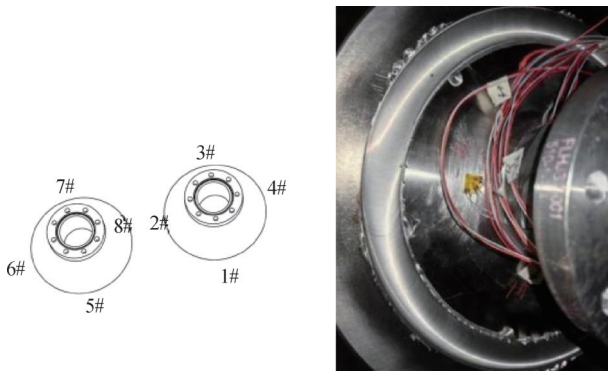
1.1.1 试验件状态

试验对象为模数1.6的3350椭球型面贮箱箱底。该箱底由叉形环1件、旋压圆环1件和法兰6件(1件中心人孔法兰、5件偏心法兰)拼焊组成，包含1条叉形环环缝、6条法兰环缝，人孔法兰环缝的分度圆直径为796 mm。偏心法兰中心均位于直径为1 800 mm的分度圆上，叉形环环缝位置的分度圆直径为3 288 mm。

箱底的材料为2A14铝合金，整底圆环由O态板材旋压成形后进行固溶时效热处理，法兰由T6态锻件机加，叉形环为T652态锻环机加，人孔法兰焊接区厚度为4.6 mm、偏心法兰焊接区厚度为4.5 mm。整底所有对接焊缝均采用搅拌摩擦焊工艺。

1.1.2 装配焊接及应变测量

为监测法兰装配、焊接及补焊过程的法兰圆角区受力情况，选择位置相邻的两件尺寸相同的密封插头法兰，采集了首先焊接的法兰1装配、焊接、焊后拆除工装全过程应变数据(测点1#~4#)；再采集了后焊接法兰2装配、焊接、焊后拆除工装及二次装配并整圈补焊全过程应变数据(测点5#~8#)。两件法兰均在法兰圆角均布4个测点(直角应变片)。焊接过程两法兰测点布置示意及实物测试贴片状态如图1所示。



a) 焊接过程测点示意 b) 实际产品测点状态

图1 法兰焊接过程测点

Fig.1 Flange welding process measurement points

1.1.3 液压试验与测量

单底液压过程主要关心法兰在圆角应力集中区及焊缝性能折减区的力学状态，在法兰圆角位置、焊缝边缘和箱底圆环母材典型位置设置测点，对液压全程进行了应变数据采集(测点布置如图2所示)，共布置24个测点(三向应变片)，总通道数72个。

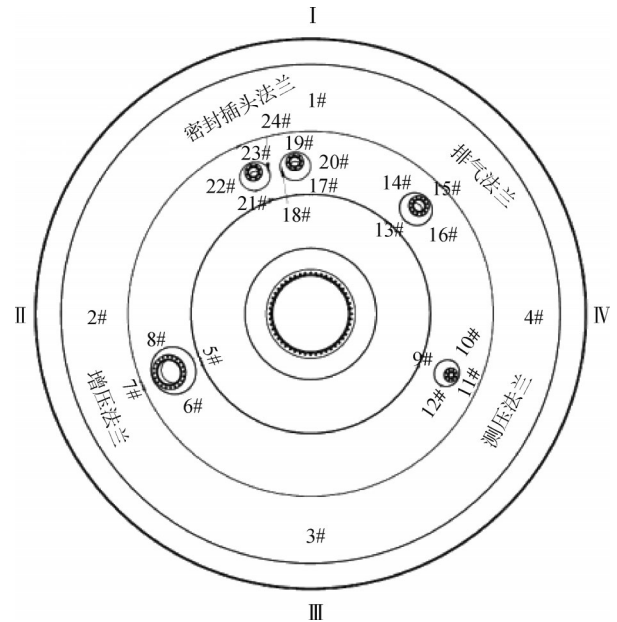


图2 箱底液压过程测点示意

Fig.2 Hydraulic process measurement points diagram

箱底采用纯水介质进行液压试验，液压过程分级加压至设计压力0.733 MPa，然后分级加压至破坏，每级保压3 min，加载至0.89 MPa。

测点1#~4#布置在R1300分度圆的4个象限处，5#~8#布置在自生增压法兰，9#~12#布置在测压法兰，13#~16#布置在排气法兰，17#~24#布置在密封插头法兰。其中，所有奇数测点均位于法兰焊缝内缘、偶数测点均位于法兰圆角。

1.2 有限元计算

采用mm/N/MPa单位制。建立有限元模型，主要包含叉形环、旋压圆环和法兰组件(1件中心人孔法兰、5件偏心法兰)，如图3所示。

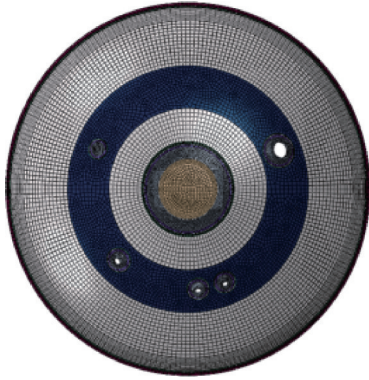


图3 箱底网格模型

Fig.3 Mesh model of bulkhead

其中旋压圆环采用 S4 壳单元，赋圆环实测厚度，其余部件采用 C3D8I 实体单元。为保证计算准确度，旋压圆环与叉形环、法兰组件之间采用 shell-to-solid 绑定连接，边缘切割出 20 mm 热影响区赋焊缝折减性能。计算时 couple 叉形环下端面施加固支约束，旋压圆环与法兰内表面施加面压载荷。

2 结果及分析

有限元模型为对称阵列，对于周向相似位置提取的仿真结果几乎无差异，为清晰展示仿真计算结果，仅展示平均值。周向相似位置布置 3 个及以上测点的应变数据进行预处理，无试验数据的点为坏点，试验数据与平均值相差 40% 以上的认为是异常点，进行数据对比时去除坏点和异常点。周向相似位置仅布置 2 个测点的应变数据，取平均值进行对比，平均值与仿真值相差在 25% 以上时对应变数据进行单独分析。分析时对于花片应变数据转换为应力数据进行对比分析。

2.1 法兰装配焊接过程测量结果

两法兰圆角位置在装配、焊接过程的应力变化曲线如图 4 所示，可见两法兰在装配焊接过程中的变化规律基本一致。在法兰固定工装压紧后法兰开始受力，沿箱底环向分布的 2#、4#、6# 和 8# 测点受力明显偏大，且后焊接的第二件法兰受第一件焊接变形的影响受力偏大，最大值约 75 MPa；沿箱底母线方向分布的 1#、3#、5# 和 7# 测点受力较小，均小于 10 MPa。此时的法兰应力状态反映了在产品实际型面与理论型面不一致的状态下，法兰与圆环在周向存在型面不匹配量偏大的问题，在工装压力作用下的装配约束变形，导致法兰的周向测点明显高于母线方向。

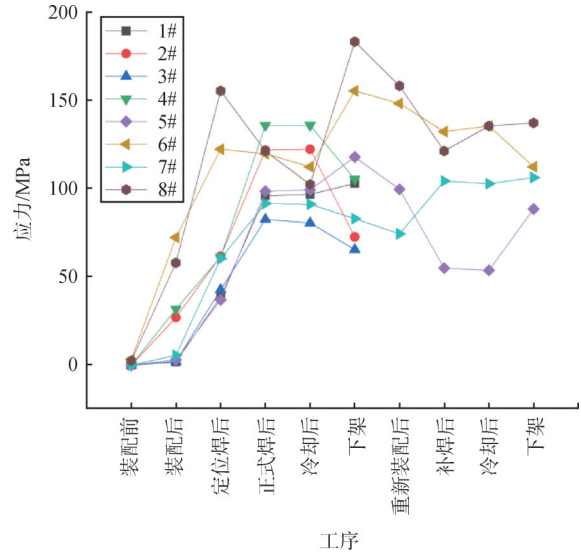


图4 焊接过程应力测量结果

Fig.4 Welding process stress measurement results

定位焊接后，所有测点应力水平相比装配后明显提高。正式焊接后，两法兰的 2#、4#、6# 和 8# 测点的应力水平为 120~135 MPa，1#、3#、5#、和 7# 测点的应力水平为 80~100 MPa。焊后应力分布结果与实际产品装配约束状态相同，在约束最大的方向焊接应力偏大。

正式焊后静置至室温状态，冷却过程应力状态无明显变化。分解焊接工装后，后焊接的法兰 2 整体残余应力为 80~190 MPa，先焊接的法兰 1 应力水平为 65~105 MPa。焊后和冷却后的状态变化不明显，与搅拌焊接为非熔化固相连接特点相关，搅拌摩擦焊相比熔焊的热输入明显偏小，因此在冷却前后的应力水平无明显变化。由于法兰 1 先完成焊接，焊后的应变协调导致法兰 2 的装配约束状态发生变化，最终表现为法兰 2 焊后应力水平相对偏高。

法兰 2 进行了二次装配及整圈搅拌摩擦补焊，补焊完成下架后的 4 个测点应力水平相比补焊前趋于一致。补焊后再次下架后整体应力水平与补焊前和未补焊的法兰 1 应力水平相当。整圈补焊未改变应力水平，说明二次装配和焊接未引入新的装配约束及焊接变形，体现了搅拌摩擦焊工艺热输入小、焊后变形小的优势。

2.2 液压过程测量及有限元计算结果

正式试验前进行预试验，预试验加载过程中，应变及位移与载荷之间呈现良好线性关系，与仿真值差异较小，判断试验加载及测试系统正常，卸载过程曲

线无异常。正式试验过程中加载至前底内压设计载荷时无异常，加载至0.89 MPa时试验终止。

2.2.1 箱底母材区测试与有限元计算结果

母材设置基准测点，环向均布4处，实测无坏点，异常点为2#，液压过程实测及有限元计算的数据如图5所示，对比箱底在内压0.5 MPa时应力云图如图6所示。

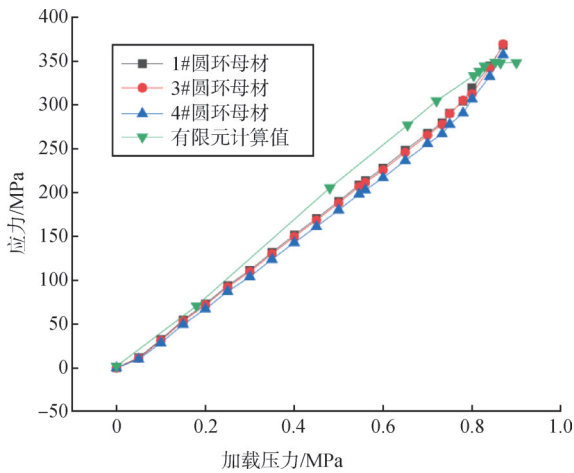


图5 母材区的液压过程实测及有限元计算结果

Fig.5 Measured data and FEA results for hydraulic process

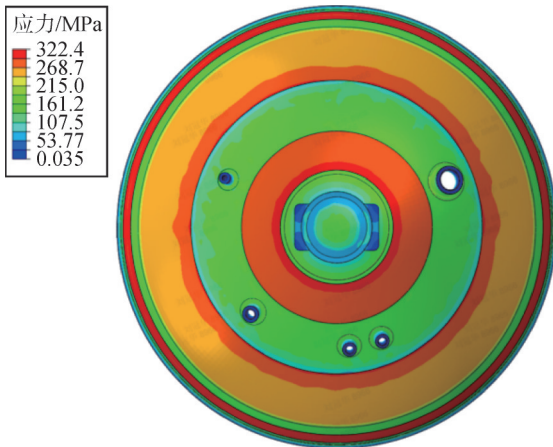


图6 内压0.5 MPa母材区应力云图

Fig.6 Stress cloud map of base material under 0.5 MPa

分析数据可看出，前底母材的载荷-应力曲线在0.733 MPa之前斜率均为定值，应力与载荷呈现线性关系；0.733~0.8 MPa之间斜率发生变化，曲线出现非线性，0.8 MPa之后应变数据斜率增大，此时前底开始进入塑性。对比有限元仿真值可看出，有限元仿真值在约0.8 MPa时进入塑性段，线性段最大误差约8.6%。

计算极限承载结果如图7~8所示，最大承载为0.966 MPa，危险点出现在箱底蒙皮薄区，法兰未破坏。

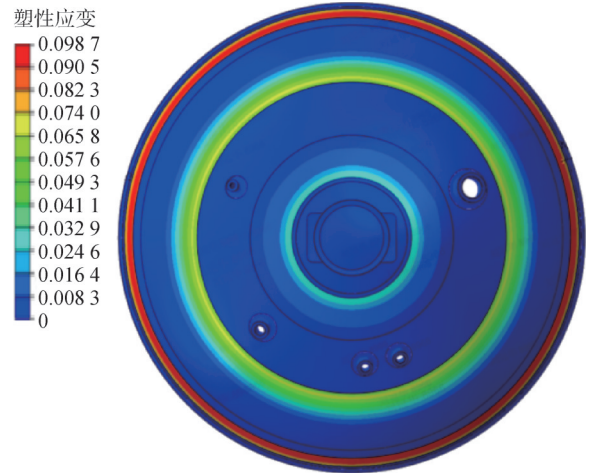


图7 极限内压条件下整底应变云图

Fig.7 Strain cloud map of bulkhead under ultimate pressure

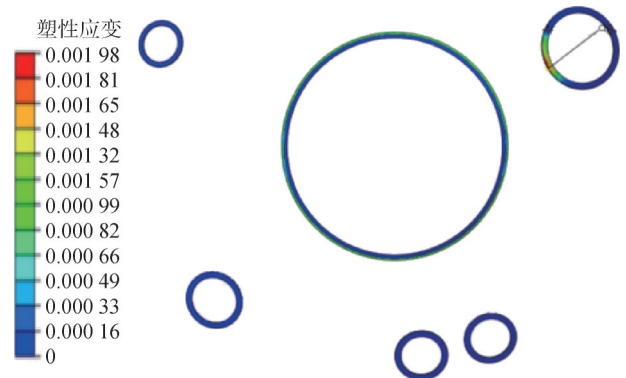


图8 极限内压条件下法兰焊缝区应变云图

Fig.8 Strain cloud map of weld zone under ultimate pressure

综合焊接工艺在结构产品上产生约100~200 MPa的焊接应力。此焊接残余应力叠加内压载荷后，只会使得法兰与椭球面圆角区提前进入屈服，屈服后应力释放。因此，焊接应力增加了结构应力水平，与试验结果吻合。

2.2.2 密封插头法兰测量及有限元计算结果

两个密封插头法兰共布置8处测点，无坏点、异常点，液压过程实测及有限元计算数据如图9所示，两法兰在内压为0.5 MPa时应力云图对比如图10所示。

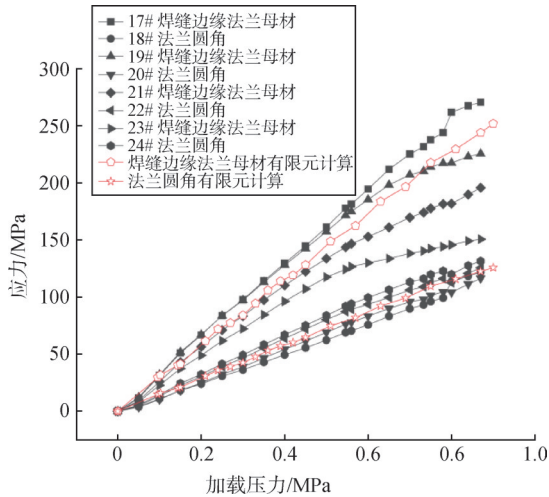


图9 密封法兰内压过程实测及有限元计算结果

Fig.9 Sealed plug flange measured data and FEA results for hydraulic process

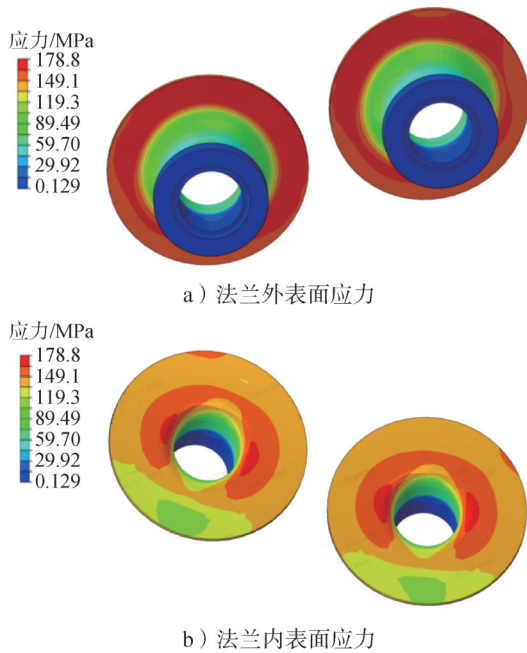


图10 内压0.5 MPa时密封插头法兰应力云图

Fig.10 Stress cloud map of sealed plug flange under 0.5 MPa

分析数据可看出，近底顶点侧焊缝处的17#、21#测点应力高于近赤道面侧的19#、23#测点，差值均为45 MPa。法兰圆角的18#、20#、22#、24#测点基本处于同一应力水平。应力分布满足回转椭球壳体内压条件下薄膜应力水平只与测点位置第二曲率半径相关的规律。

在达到使用载荷0.55 MPa时，法兰圆角最大应力为88 MPa，焊缝边缘法兰母材最大应力约为177 MPa。

母材圆角区应力在0.8 MPa时出现振荡，振荡后

载荷应力曲线斜率几乎未改变，此时母材圆角区仍未进入屈服。焊缝区17#、21#测点应力在0.5 MPa时进入非线性段。19#、23#测点在破坏时未达到屈服强度。

与有限元计算值进行对比，对于母材圆角区测点，实测数据与计算值对应良好；对于焊缝处测点，19#、23#测点计算值与实测数据对应良好，17#、21#测点计算值在0.89 MPa之前未出现非线性，在线性段与实测数据对应良好。线性段最大误差为13%。

2.2.3 其余法兰测量及有限元计算结果

其余法兰共12个测点，如图11和图12所示。分析数据可看出，法兰圆角区的3处测点应力水平相当，几何轴对称的区域应力水平基本一致；焊缝对应测点靠近底顶点测点应力大于靠近叉形环方向的应力，与密封插头法兰规律一致。

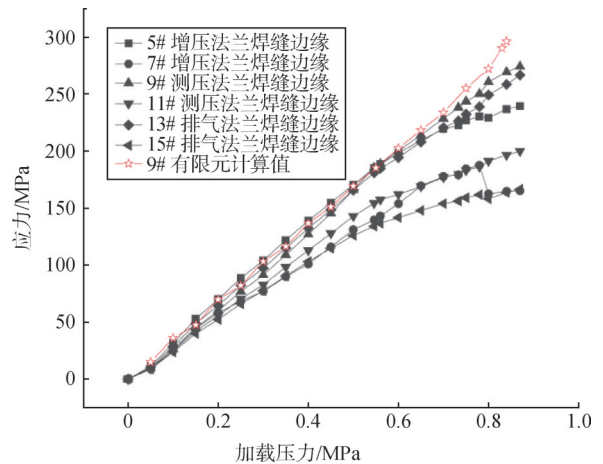


图11 其余法兰焊缝边缘实测与有限元计算结果

Fig.11 The measured data and FEA results of the remaining flange edges

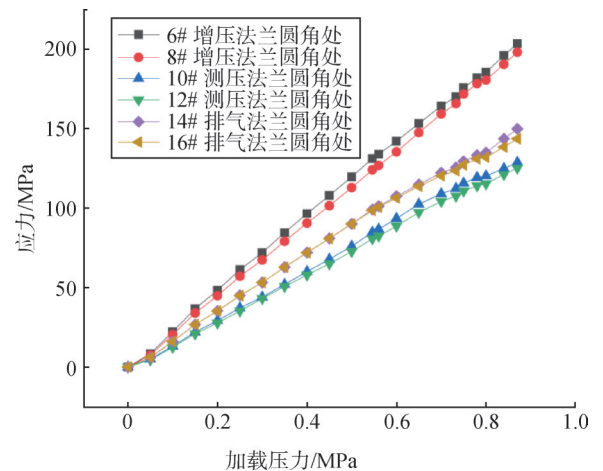


图12 其余法兰圆角实测与有限元计算结果

Fig.12 The measured data of the remaining flange fillets

对比最大应变点9#与有限元计算结果, 应力最大位置在测压法兰近前底顶点焊缝区, 试验值在0.5 MPa之后斜率出现略微变化, 在0.8 MPa之后进入屈服, 仿真值在0.8 MPa以前为线性段, 在0.8 MPa之后进入屈服, 误差最大为11%。

3 讨论

对比两个尺寸相同、位置相邻近的法兰在整个装配、焊接及补焊后的受力状态, 焊接导致法兰圆角区存在65~180 MPa的应力, 且法兰沿箱底环向测点的应力高于沿椭圆母线方向测点应力。先焊接法兰产生的圆环型面变形会导致后焊接的法兰残余应力水平提高。采用搅拌摩擦工艺的整圈补焊对法兰整体的应力水平影响较小。

法兰圆角区最大应力出现在增压法兰处, 最大应力值约150 MPa, 未进入屈服。考虑焊接残余应力, 在法兰圆角区应力最大为190 MPa, 内压工况下未导致法兰提前破坏, 这是由于在进行法兰设计时对圆角区进行了厚度补强, 内压载荷带来的母材圆角位置应力水平较低, 且残余应力与内压载荷产生的应力不是简单相加的关系, 在法兰进入屈服后存在应力释放阶段将降低残余应力对法兰产生的影响。考虑法兰圆角处在焊接后存在残余应力, 且内压条件下圆角区为蒙皮不连续的应力集中区, 因此在法兰结构设计时应考虑在圆角区适当加厚提高结构可靠性。

0.55 MPa使用内压载荷下, 法兰焊缝处测点最大应力约为220 MPa, 焊缝处应力值高于圆角区应力值, 焊缝边缘应力最大的测点均为靠近箱底顶点, 符合回转椭圆体薄膜应力分布规律。从实测应力曲线观察, 箱底的偏心法兰在焊缝附近存在部分测点进入屈服状态, 而有限元计算值约在0.8 MPa之后才会产生屈服, 推断原因为有限元计算时采用的焊缝处材料性能与实际存在差距, 后续可借助本体取样手段获取焊缝性能实测值以修正有限元模型。

综合对比各测点实测值与有限元计算结果, 除部分法兰焊缝处测点外, 有限元分析值与实测值吻合较好。

4 结论

综上所述, 本文结论如下:

a) 法兰焊接后, 圆角区存在幅度较大的不均匀应力分布。搅拌摩擦工艺的整圈补焊过程的二次装配会导致法兰圆角区最大应力达到约190 MPa, 但补焊

对法兰最终整体的残余应力水平影响较小。结构设计应考虑生成过程中法兰最大受力状态的影响。

b) 需要考虑法兰内压应力与焊接残余应力叠加效应, 在进行翻边法兰结构法兰设计、法兰原材料性能和法兰原材料质量控制方面应考虑过程最大应力水平的影响。

c) 通过对比试验与有限元计算结果, 验证了计算方法的准确性, 可以通过有限元方法完成结构设计的优化评估。为进一步提高计算准确性, 建议获取焊缝区本体性能用于计算。

参考文献

- [1] 吴会强, 黄诚, 常志龙. 国外大型贮箱结构研制现状及展望[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(S1): 7-13.
WU Huiqiang, HUANG Cheng, CHANG Zhilong. Recent progress and prospects of large foreign tank structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(S1): 7-13.
- [2] 鄢东洋, 王爱民, 潘楨, 等. FSW和VP-TIG焊接箱底的力学特征分析[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(3): 71-74.
YAN Dongyang, WANG Aimin, PAN Zhen, et al. Analysis on mechanical properties of tank bulkhead with both FSW and VP-TIG weld[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(3): 71-74.
- [3] 王腾, 张茜, 李澍, 等. 运载火箭贮箱典型结构件自主统一造型方法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(6): 33-38.
WANG Teng, ZHANG Qian, LI Shu, et al. Research for the unified and independent modeling method of the classic parts on the tank of launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(6): 33-38.
- [4] 郑新宇. 超大直径运载火箭贮箱箱底龙门铣焊装备静动态分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
ZHENG Xinyu. Static and dynamic analysis of gantry milling and welding equipment at the bottom of storage tank of super large diameter launch vehicle[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [5] 徐爱杰, 赵耀邦, 历吴恺, 等. 运载火箭贮箱焊接技术应用现状及发展展望[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(S2): 11-16.
XU Aijie, ZHAO Yaobang, LI Wukai, et al. Recent advances and development prospects of welding technologies and its application in launch vehicle tank[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(S2): 11-16.
- [6] 王国庆, 李曙光, 吴会强. 重型火箭贮箱大型结构制造技术现状及发展分析[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(S1): 1-6.
WANG Guoqing, LI Shuguang, WU Huiqiang. Status and development analyses on manufacturing technologies for large scale structures of heavy lift launch vehicle propellant tanks[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(S1): 1-6.
- [7] 刘欣, 王国庆, 李曙光, 等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术, 2013(1): 1-6.

- LIU Xin, WANG Guoqing, LI Shuguang, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 1-6.
- [8] 程晓, 王渭平, 李力, 等. 燃料贮箱服役可靠性评估中无损检验与强度校核的应用[J]. 压力容器, 2018, 35(9): 60-65.
- CHENG Xiao, WANG Weiping, LI Li, et al. Application of nondestructive testing and intensity check in the reliability evaluation of fuel tank[J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35(9): 60-65.
- [9] 宋宗贤, 宋建岭, 吴志生, 等. 铝合金贮箱法兰件自动化焊接工艺研究[J]. 压力容器, 2020, 37(2): 71-78.
- SONG Zongxian, SONG Jianling, WU Zhisheng, et al. Study on automatic welding technology of aluminum alloy storage tank flange [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(2): 71-78.
- [10] 李颖, 张聃, 徐奎, 等. 2A14 T6 铝合金FSW及VP-TIG焊接对比分析[J]. 电焊机, 2019, 49(2): 19-23.
- LI Ying, ZHANG Dan, XU Kui, et al. Comparative analysis of FSW and VP-TIG for 2A14 T6 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(2): 19-23.
- [11] 姚君山, 蔡益飞, 李程刚. 运载火箭箭体结构制造技术发展与应用[J]. 航空制造技术, 2007(10): 36-40+42.
- YAO Junshan, CAI Yifei, LI Chenggang. Development and application of manufacturing technology for launch vehicle airframe structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(10): 36-40+42.
- [12] 董春林, 栾国红, 关桥. 搅拌摩擦焊在航空航天工业的应用发展现状与前景[J]. 焊接, 2008(11): 25-31.
- DONG Chunlin, LUAN Guohong, GUAN Qiao. The application, development status and prospect of friction stir welding in the aviation and aerospace industry[J]. Welding & Joining, 2008(11): 25-31.
- [13] 宋建岭, 李超. 搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应用与发展[J]. 焊接, 2018(5): 21-27.
- SONG Jianling, LI Chao. Application of FSW technology to tank manufacturing of launch vehicle and its development[J]. Welding & Joining, 2018(5): 21-27.
- [14] 周广文. 推进剂贮箱优化设计的思考[J]. 导弹与航天运载技术, 2011(1): 26-28.
- ZHOU Guangwen. Optimal structure design for launch vehicle tank [J]. Missiles and Space Vehicles, 2011(1): 26-28.
- [15] 姚梦, 张文学, 马康, 等. 锻造工艺对2219铝合金焊接法兰组织与性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(4): 39-44.
- YAO Meng, ZHANG Wenxue, MA Kang, et al. Effect of forging process on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy welded flange[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(4): 39-44.

作者简介

- 李庆庆 (1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为火箭贮箱结构设计。
- 刘冠华 (1993—), 女, 工程师, 主要研究方向为火箭结构强度仿真。
- 姬秀滨 (1988—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭结构设计。
- 张佳佳 (1992—), 女, 工程师, 主要研究方向为运载火箭贮箱结构设计。
- 付玉行 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭贮箱结构设计。