

焊缝补强方式对大直径贮箱箱底 承载性能影响

胡正根^{1,2}, 湛利华¹, 董曼红², 刘观日², 李 斌², 常志龙¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2. 中国航天科技集团有限公司

中国运载火箭技术研究院 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 基于有限元法研究了典型 10 m 级直径贮箱箱底焊缝在双面对称补强、内表面补强及外表面补强三种情况下的内压承载性能。数值计算采用二维对称平面模型, 考虑了筒段和短壳真实边界条件及焊缝对承载能力的影响, 构建的考虑材料塑性的非线性数值分析模型准确地获得了贮箱箱底内外表面经向应力。结果表明: 顶盖和瓜瓣焊缝区域是箱底的薄弱位置, 使用内压下, 双面对称补强的加强区内外表面经向应力差较小, 结构均未进入塑性, 单面补强的加强区内外表面经向应力差远大于双面对称补强, 局部进入塑性, 且外表面补强的加强区最大和最小经向应力差相对于内表面补强分别增加了 9.7% 和 27.2%, 变形不协调; 设计内压下, 箱底内外表面均有局部进入塑性, 材料塑性对内外表面经向应力差有一定的缓解作用, 能够显著缓解内外表面应力差造成的附加弯矩; 双面对称补强优于内表面补强, 内表面补强优于外表面补强, 单面补强易产生附加弯矩, 不利于箱底的均匀承载和变形协调。该研究结果指导了大直径贮箱箱底结构的优化设计。

关 键 词: 焊缝补强; 贮箱箱底; 承载性能; 内表面补强; 外表面补强; 双面对称补强

中图分类号: V421.4⁺2

文献标志码: A

Effect of weld reinforcement methods on bearing performance of large diameter tank bottom

HU Zhenggen^{1,2}, ZHAN Lihua¹, DONG Manhong², LIU Guanri²,
LI Bin², CHANG Zhilong¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. Beijing Aerospace Systems Engineering Research Institute,
China Academy of Launch Vehicle Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on the finite element method, the influence of weld reinforcement methods (double symmetry reinforcement, inner surface reinforcement, outside surface reinforcement) on internal pressure bearing capacity of typical 10 m class diameter tank bottom was studied. The two-dimensional symmetric plane model was used for numerical calculation, and the effects of the real boundary conditions of the tube segment and the short shell and the weld on the bearing capacity were considered. The nonlinear numerical analysis mod-

收稿日期: 2020-08-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2017YFB0306300); 装备预先研究项目(305060509)

作者简介: 胡正根(1988—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事运载火箭推进剂贮箱结构设计。

引用格式: 胡正根, 湛利华, 董曼红, 等. 焊缝补强方式对大直径贮箱箱底承载性能影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(12): 2681-2688. HU Zhenggen, ZHAN Lihua, DONG Manhong, et al. Effect of weld reinforcement methods on bearing performance of large diameter tank bottom[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(12): 2681-2688.

el considering the plasticity of the material was constructed to accurately obtain the meridional stress on the inner and outer surfaces of tank bottom. Results showed that the weld area of the top and melon flap was a weak area of tank bottom. Under operating pressure, meridional stress difference between inner and outside surfaces of double symmetric reinforcement was smallest, and none of them presented plasticity. Meridional stress difference of single-side reinforcement was much larger than double symmetric reinforcement, and local plasticity occurred. Compared with inner surface reinforcement, the maximum and minimum meridional stress differences of outside surface reinforcement increased by 9.7% and 27.2%, and all of them led to uncoordinated deformation. Under design pressure, inner and outside surface meridional stress of tank bottom had local plasticity, and material plasticity had certain coordination effect on the inner and outside surface meridional stress difference, which can significantly alleviate the additional bending moment caused by the inner and outside surface stress difference. Double symmetric reinforcement was better than outside surface reinforcement, and inner surface reinforcement was better than outside surface reinforcement. The single-side reinforcement was easy to generate additional bending moment, which was not conducive to the uniform bearing and deformation coordination of tank bottom. The research results provide a guidance to the optimization design of the bottom structure of large diameter storage tank.

Key words: weld reinforcement; tank bottom; bearing performance; inner surface reinforcement; outside surface reinforcement; double symmetry reinforcement

贮箱结构作为运载火箭箭体结构的重要组成部分,属于大型薄壁焊接压力容器,一方面作为液体容器实现推进剂的贮存、增压输送等功能,另一方面作为主承力结构承受内压和轴弯剪载荷^[1]。贮箱主结构一般由前、后短壳,箱筒段和前、后底组成。其中箱底是贮箱轻质化设计的关键,由于整体成形制造能力的限制,大直径贮箱箱底一般采用顶盖+多块瓜瓣+过渡环的拼焊结构方案^[2],由于焊缝的弱化效应,需对焊缝进行补强处理,而补强方式成为大直径贮箱箱底结构设计的关键。

有限元分析方法已经被广泛应用于运载火箭箭体贮箱箱底结构的数值分析。国外 Mescall、Adachi 等^[3-4]针对箱底的弹性屈曲开展了大量缩比件的试验和数值计算;Michael、Rachard、Nemeth 等^[5-7]利用有限元分析了航天飞机超大直径液氧贮箱箱底的线性和非线性屈曲问题,得到了局部失稳载荷及失稳波形,并对其内压作用下的缺陷敏感性开展了大量研究;乔治马歇尔飞行中心和通用动力学太空系统分部的 Ahmed 等^[8]对不同模数的贮箱椭球箱底的内压稳定性开展了大量试验和数值分析研究,为高性能贮箱箱底的底型选择提供了数据支撑;William^[9]数值分析了美国太阳神无人高空飞行器液氢贮箱内压作用下箱

底和筒段的收缩效应;Theodore、David 等^[10-11]针对大直径低温金属贮箱和复合材料贮箱的结构方案进行了概念比较设计,重点对大直径箱底不同结构方案的质量进行了分析研究。

国内周广文^[12]对贮箱箱底工程设计中要关注的底型选择进行了分析;章凌、王博等^[13-14]基于数值分析方法开展了箱底与筒段焊接接头的优化设计,提出了降低附加弯矩的削力槽方案;黄诚、胡正根等^[15-17]开展了大直径贮箱箱底在内压作用下的屈曲问题,发现筒段边界效应有利于抑制椭球箱底的内压屈曲,同时给出了临界屈曲模数,另外引入 1 阶模态缺陷和凹陷等缺陷对箱底内压屈曲的缺陷敏感性开展了较为系统研究;辛腾达、赵亮等^[18-19]对不同箱底的经向应力和环向应力进行了理论计算和数值分析,进而对箱底底型参数进行了优化设计,认为合理的椭球模数可有效减轻贮箱结构质量;朱天宇^[20]对不同底型在内压和外压的承载能力及稳定性开展了分析计算,提出了适用于提高外压承载能力的箱底轻质化方案;王鹏^[21]对传递发动机推力的贮箱箱底结构方案进行了研究,提出了适应于箱底传力的底型方案。

综上所述,国内外在大直径贮箱箱底底型选择及内外压稳定性计算方面开展了大量工作,但是针对大直径贮箱箱底焊缝补强方案分析方面鲜

见报道,而贮箱箱底焊缝补强方案的选择直接影响箱底的内压承载能力、结构质量及制造方案,是大直径贮箱箱底结构优化设计的重要内容,具有重大工程价值。本文利用薄膜理论计算结果验证数值计算准确性的基础上,基于数值计算方法研究了某典型 10 m 级直径贮箱箱底焊缝补强方式对箱底内压承载性能的影响,主要建模了焊缝双面对称补强、内表面补强、外表面补强三种情况。基于二维轴对称平面模型,建模了焊缝补强结构,考虑了筒段和短壳真实边界条件及材料塑性。计算结果准确地获得了大直径贮箱箱底内外表面经向应力分布,比较了三种方案的影响规律及原因。

1 数值模型

1.1 研究对象

典型大直径贮箱结构示意图见图 1,包括前、后短壳,箱筒段与前、后底,其中箱底由顶盖、瓜瓣和过渡环拼焊组成,材料为 2219 铝合金。表 1 为箱底不同焊缝补强方式,双面对称补强指焊缝区

域向内和向外同时增厚,内表面补强是指焊缝区域向内表面增厚,外表面补强指焊缝区域向外表面增厚。根据焊接试片性能测试和中国运载火箭技术研究院周家麟^[22]的研究,同时考虑大直径箱底焊接系统的需求,补强区单边宽度取 60 mm,其中焊缝影响区单边宽度取 30 mm,焊缝影响区力学性能为基体性能一半。

1.2 有限元模型及边界条件

大直径贮箱箱底经向应力为主应力^[18-19,22-23],该方向垂直于箱底环焊缝方向,是结构破坏的薄弱点,故顶盖与瓜瓣、瓜瓣与过渡环的环焊缝区域是研究重点。图 2 和表 2 给出了某典型 10 m 级直径贮箱箱底焊缝三种补强方式下的数值模型,其中 A 区域为顶盖与瓜瓣的环焊缝区域,B 区域为瓜瓣与过渡环的环焊接区域,C 为筒段的下端面。为提高计算效率,同时准确获取箱底表面应力,数值计算采用轴对称二维平面模型,考虑材料塑性引起的材料非线性和几何大变形引起的几何非线性。为模拟真实边界,在箱底上端和下端分别增加短壳和筒段,其中筒段边界下表面 C 面约束 y 向移动,x 向自由,箱底内表面加内压载荷 p,分别为使用载荷为 0.3 MPa 和设计载荷为 0.42 MPa。金属基体材料为 2219 铝合金,拉伸强度为 435 MPa,屈服强度为 350 MPa,延伸率为 6%,焊缝弱化区域拉伸强度为 215 MPa,屈服强度为 175 MPa,延伸率为 3%,为双线性模型。网格采用四边形单元,对网格进行测试试算,网格再增加对结算结果没有影响,结果趋于收敛,单元约 40 559 个,节点数约 137 534 个。

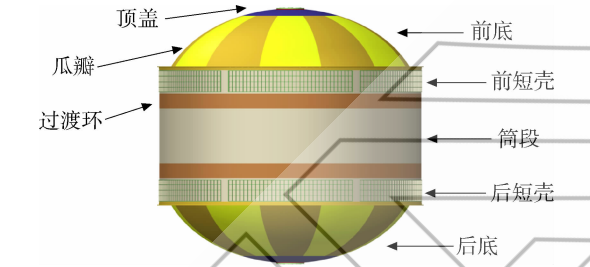


图 1 典型贮箱结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical tank structure

表 1 箱底不同焊缝补强方式

Table 1 Different weld reinforcement methods of tank bottom

类型	焊缝补强示意图	
双面对称补强		
内表面补强		
外表面补强		

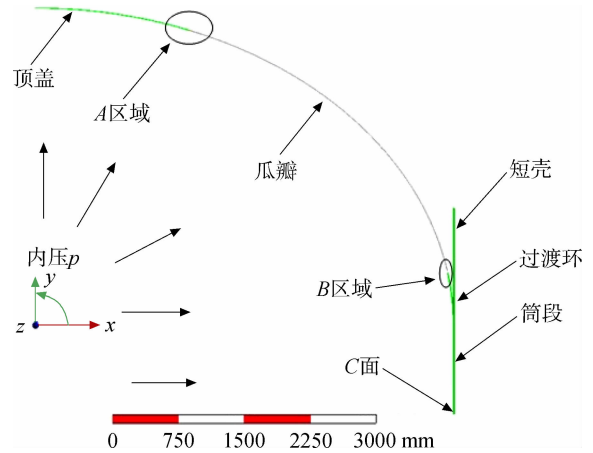
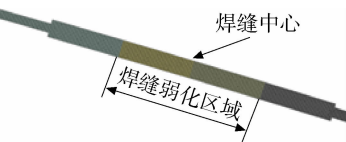
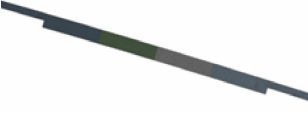
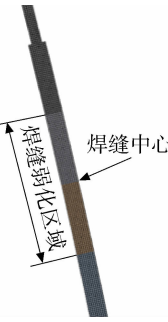


图 2 典型 10 m 级直径贮箱箱底数值模型

Fig. 2 Numerical model of 10 meters diameter tank bottom

表 2 不同焊缝补强方式下的数值模型

Table 2 Numerical model of different weld reinforcement methods

位置	双面对称补强	内表面补强	外表面补强
A 区域			
B 区域			

2 结果分析

2.1 使用载荷

共对三种箱底焊缝补强方案,双面对称补强、内表面补强及外表面补强进行了数值分析。图 3 给出了使用载荷下三种情况下计算得到内外表面经向应力,结果表明:①三种方式下,顶盖薄区和瓜瓣薄区内外表面经向应力几乎一致,不存在应力差,表明焊接区不同补强方式对薄区影响较小,即焊缝局部补强对箱底表面应力影响具有自限

性;②三种方式下,顶盖薄区内外表面经向应力解与薄膜理论解析解几乎一致,瓜瓣薄区内外表面经向应力与薄膜理论解析解变化规律基本一致,但均小于理论解析值,最大值相差 20 MPa,且除在薄厚交界的局部奇异点外,箱底基体内外表面经向应力均未超过材料屈服强度,表明本文轴对称平面模型对箱底薄壳结构的表面应力计算结果是准确的,其中箱底应力的薄膜理论解析解公式见辛腾达、赵亮及周家麟等^[18-19,22]的研究;③三种方式下,在焊缝补强 A 区域和 B 区域差异显著,同时与理论解析值也存在不同,表明该区域存在附加弯矩,导致应力不均匀,同时由于 A 区域和 B 区域的局部补强的环带效应,抑制了瓜瓣薄区的内外表面经向应力。

图 4 为顶盖与瓜瓣以焊缝为中心,单边 60 mm 弧长补强范围内三种方式下的内外表面经向应力(A 区域)。由图 4 可知,在使用载荷下:①双面对称补强方式下,内外表面经向应力均未进入塑性,且与理论解析解基本一致,内表面稍大于外表面,最大差值为 24 MPa,为焊缝中心,最小差值仅 1 MPa;②内表面补强方式下,以焊缝为中心,左右两边经向应力基本对称,且外表面经向应力显著大于内表面经向应力,最大值为靠近薄区的补强区域,最小值为焊缝区域中心,最大差值达到了 248 MPa,最小差值为 92 MPa,均远大于双面对称补强的最大差值和最小差值,补强的基体区未进入塑性,焊缝区靠近加厚区界限的外表面局部进入塑性,形成经向应力台阶;③外表面补强方式下,以焊缝为中心,左右两边经向应力基本对称,

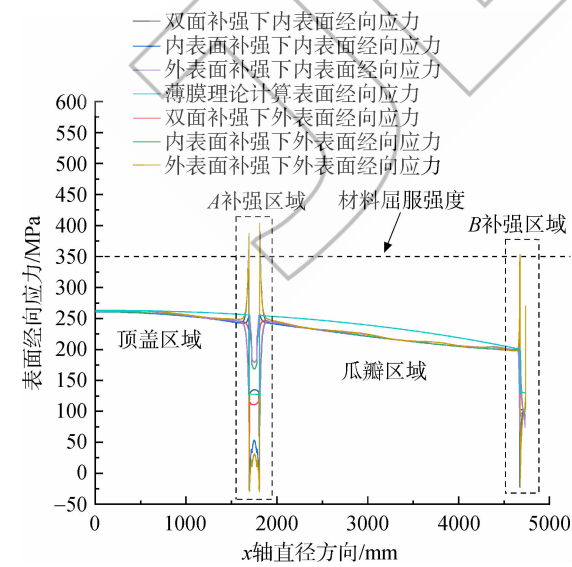


图 3 不同焊缝补强方式下箱底内外表面经向应力

Fig. 3 Meridional stress on inner and outer surface of tank bottom under different weld reinforcement methods

且内表面经向应力显著大于外表面经向应力,最大值为靠近薄区的补强区域,最小值为焊缝区域中心,最大差值达到了 272 MPa,最小差值为 117 MPa,相对于内表面补强下的最大和最小差值分别增加 9.7%、27.2%,补强的基体区域均未进入塑性,但是内表面均进入塑性,在内表面形成经向应力台阶;④三种补强方式下,靠近薄区的补强基体区域均有局部表现为压应力,特别是内表面补强方式下的内表面经向应力和外表面补强方式下的外表面经向应力,这表明内表面和外表面补强方式下均存在附加应力,造成变形不协调,如图 5 所示,内表面补强方式下,焊缝中间向外鼓,外表面补强方式下,焊缝中间向内鼓。

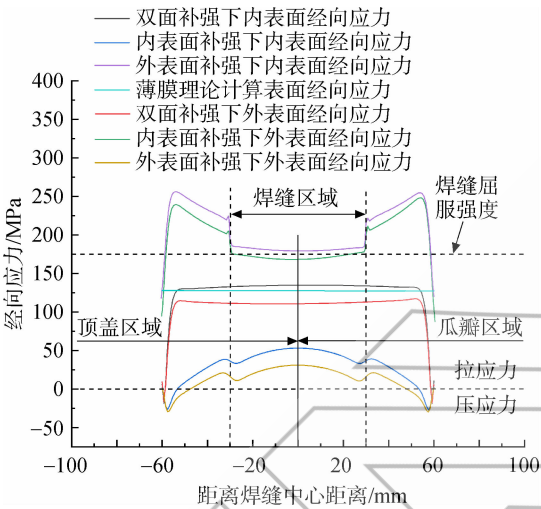
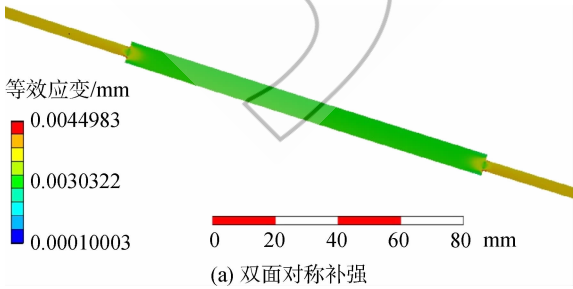
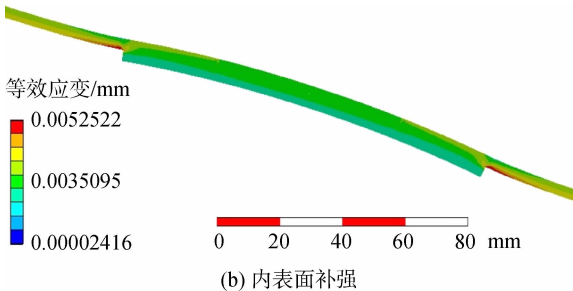


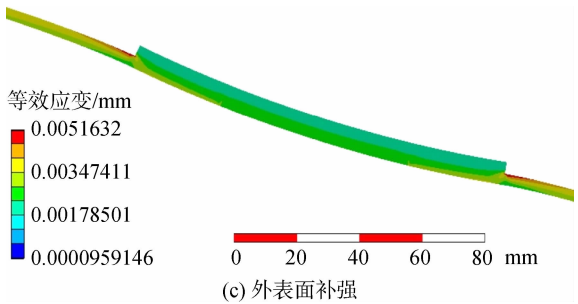
图 4 使用内压下 A 区域内外表面经向应力
Fig. 4 Meridional stress on the inner and outside surfaces of area A under operating pressure



(a) 双面对称补强



(b) 内表面补强



(c) 外表面补强

图 5 使用内压下 A 区域等效应变图
Fig. 5 Equivalent strain of area A under operating pressure

图 6 为瓜瓣与过渡环以焊缝为中心,单边 60 mm 弧长补强范围内三种方式下的内外表面经向应力图。由图 6 可知,在使用载荷下:①双面对称补强方式下,内外表面经向应力均未进入塑性,且与理论解析解一致,仅相差 0~5 MPa;②内表面补强方式下,以焊缝为中心,外表面经向应力显著大于内表面经向应力,经向应力变化平滑,最大值为靠近瓜瓣薄区的补强区域,靠近过渡环,两者趋于一致,最大差值达到了 204 MPa,远大于双面补强下的差值,均未进入塑性;③外表面补强方式下,以焊缝为中心,内表面经向应力显著大于外表面经向应力,最大值为靠近瓜瓣薄区的补强区域,靠近过渡环,两者趋于一致,最大差值达到了 210 MPa,相对于内表面补强仅增加 2.9%,均未进入塑性;④三种补强方式下,靠近瓜瓣薄区的补强金属区域均有局部表现未压应力,特别是内表面补强方式下的内表面经向应力和外表面补强方式下的外表面经向应力,这表明内表面和外表面补强

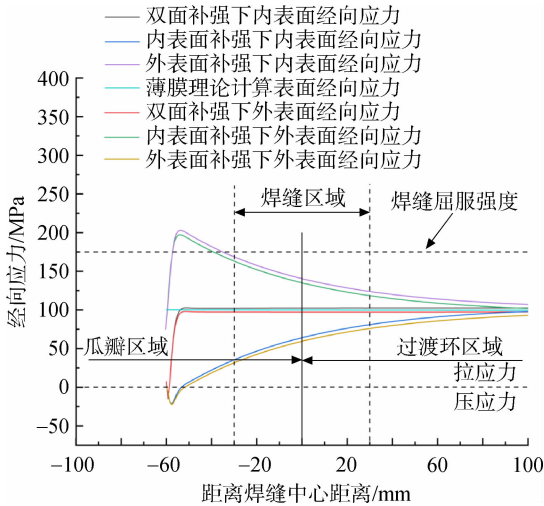


图 6 使用内压下 B 区域内外表面经向应力
Fig. 6 Meridional stress on the inner and outside surfaces of area B under operating pressure

方式下均存在附加应力,造成变形不协调,与 A 区域原因一致,且 A 区域的经向应力水平显著大于 B 区域的应力水平,最大值相差达到 55 MPa,故顶盖与瓜瓣的焊缝区域是箱底薄弱点。

综合上述,使用载荷条件下,内表面补强和外表面补强方式下补强区内外表面受力不均匀,形成较大的经向应力差,导致附加弯矩,变形不协调,双面对称补强方式下内外表面经向应力差较小,且结构均未进入塑性,顶盖和瓜瓣环焊缝区域是箱底的薄弱位置。

2.2 设计载荷

图 7 给出了设计载荷下三种补强方式下计算得到内外表面经向应力情况,结果表明:①三种方式下,顶盖薄区和瓜瓣薄区经向应力一致,与使用载荷条件下规律一样;②设计载荷下,顶盖全部区域和瓜瓣靠近顶盖的局部区域的理论经向应力全部进入塑性,但是在数值解下,应力值均在屈服强度附近,且都小于理论解,顶盖区域最大差值达到了 15 MPa,小于使用载荷下顶盖的差值 3 MPa,表明材料进入塑性后,能够缓解降低结构的应力水平,理论解析值不能反映真实受力状态。

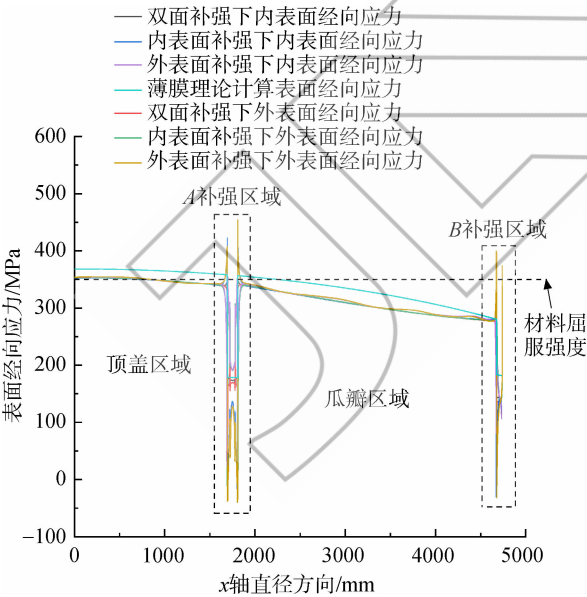


图 7 不同焊缝补强方式下箱底内外表面经向应力
Fig. 7 Meridional stress on inner and outside surface of tank bottom under different weld reinforcement methods

图 8 为顶盖与瓜瓣以焊缝为中心,单边 60 mm 弧长补强范围内三种方式下的内外表面经向应力图(A 区域)。由图 8 可知,在设计载荷下:①内表面补强和外表面补强方式下补强区域的内

外表面经向应力分布和变化规律与使用载荷条件下基本一致,均成对称分布,且在基体区和焊缝区呈现台阶式应力跳跃,内表面补强方式下的内表面经向应力和外表面补强方式下的外表面经向应力在弹性区间内,且应力差加大,而内表面补强方式下的外表面经向应力和外表面补强方式下内表面的经向应力进入塑性,且在焊缝区应力进一步平缓,这表明,材料进入塑性后,有利于缓解内外表面应力差;②双面对称补强方式下,相对于使用载荷条件下基体区和焊缝区的平滑过渡,设计载荷条件下内外表面经向应力在基体区和焊缝区发生台阶式跳跃,焊缝区经向应力与焊缝的屈服强度接近,且内外表面经向应力差在载荷加大的情况下反而由 24 MPa 下降为 20 MPa,特别是焊缝中心由应力差最大变为应力差最小,仅有 3 MPa 左右,说明焊缝区进入塑性后,有利于缓解内外表面应力差;③图 9 给出了补强区域的变形情况,与使用载荷下补强区的变形情况相比,焊缝区域与基体区域形成了明显的梯度,且焊缝区域的应力均匀性好于使用载荷条件下的应力均匀性,这也表明了材料塑性有助于缓解内外表面的应力差,有助于缓解附加弯矩效应。

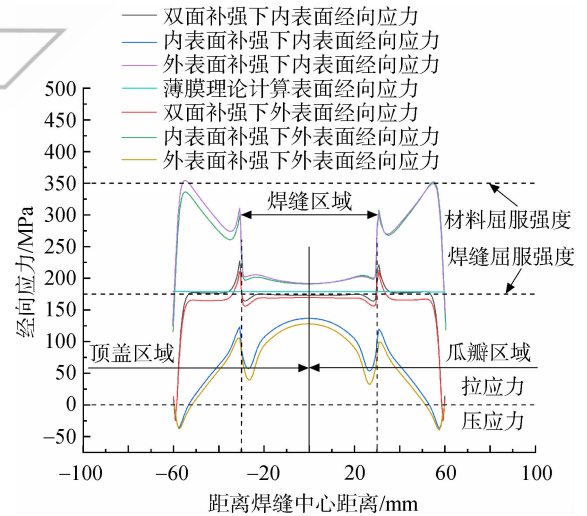


图 8 设计内压下 A 区域内外表面经向应力
Fig. 8 Meridional stress on the inner and outside surfaces of area A under designing pressure

由图 10 可知,在设计载荷下:①双面对称补强方式下补强区域的内外表面经向应力分布和变化规律与使用载荷条件下基本一致,且与解析解一致性较好,均未进入塑性;②内表面补强方式下的内表面应力和外表面补强方式下的外表面应力变化规律与使用载荷条件下一致,均未进入塑性,

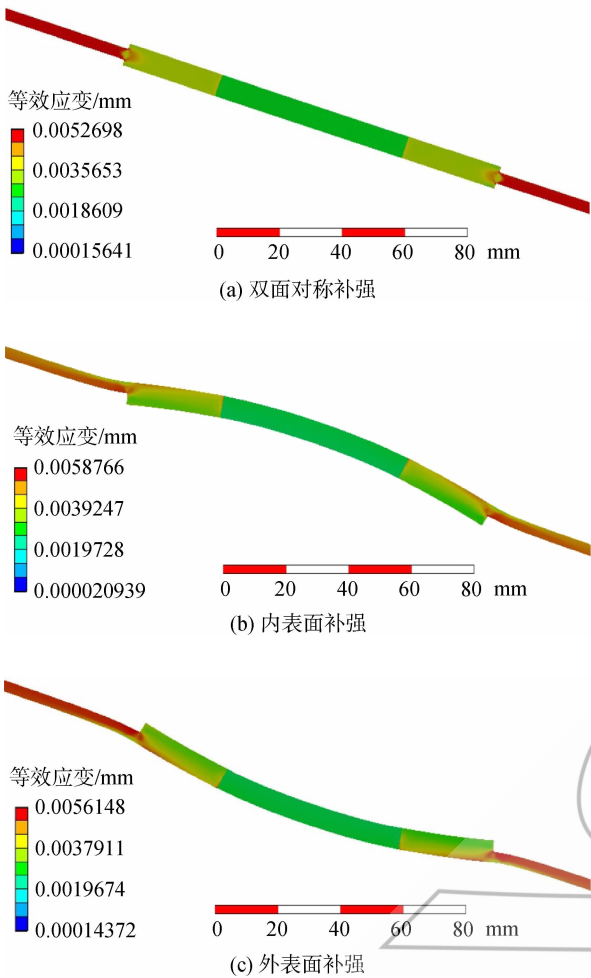


图 9 设计内压下 A 区域等效应变图
Fig. 9 Equivalent strain of area A under
designing pressure

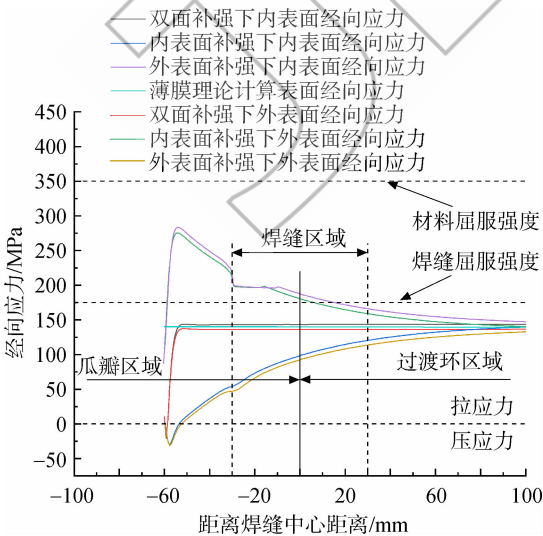


图 10 设计内压下 B 区域内外表面经向应力
Fig. 10 Meridional stress on the inner and outside
surfaces of area B under designing pressure

但是内表面补强方式下的外表面应力和外表面补强方式下的内表面应力在瓜瓣侧焊缝区形成了应力台阶,且进入了塑性,内外表面的应力差有进一步下降趋势,这进一步表明材料塑性缓解了内外表面的应力差。

综上所述,设计载荷下,三种补强方式下补强区域不同程度的进入塑性,材料进入塑性后,内外表面经向应力差均有不同幅度的下降,材料塑性有助于缓解变形不协调问题。

3 结 论

基于二维轴对称平面模型数值模拟了典型 10m 级直径贮箱箱底焊缝不同补强方案下内外表面应力。重点分析了双面对称补强、内表面补强及外表面补强三种情况,同时考虑了真实边界条件和材料非线性,获得了箱底内外表面经向应力,得出结论如下:

1) 顶盖和瓜瓣焊缝区域是结构的薄弱点,使用载荷条件下,双面对称补强下内外表面经向应力差较小,且结构均未进入塑性。内表面补强下的经向应力差远大于双面对称补强,外表面补强下的最大和最小经向应力差相对于内表面补强,分别增加了 9.7%、27.2%,单面补强形成较大经向应力差,进而产生附加弯矩,变形不协调,且局部进入塑性进一步导致在焊缝区和基体区形成台阶式应力。

2) 设计载荷条件下,箱底内外表面均有局部进入塑性,且在焊缝区域和补强基体区域交界处形成了明显的台阶式应力跳跃,但是内外表面应力差均有一定程度的缓解,材料塑性对内外表面经向应力差有一定的协调作用,能够显著缓解内外表面应力差造成的附加弯矩。

3) 从薄壳结构避免附加应力角度考虑,双面对称补强方式优于内表面补强方式,内表面补强方式好于外表面补强方式,单面补强易产生附加弯矩,不利于薄壁箱底的均匀承载和变形协调。

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(增刊 1):7-13.
WU Huiqiang, HUANG Cheng, CHANG Zhilong. Recent progress and prospects of large foreign tank structure[J]. Aerospace Materials and Technology, 2014, 44(Suppl. 1): 7-13. (in Chinese)
[2] 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(增刊 1):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 and Technology, 2014, 44(Suppl. 1): 1-6. (in Chinese)

[3] MESCALL J. Stability of thin torispherical shells under uniform internal pressure[R]. NASA TN D-1510, 1962.

[4] ADACHI J, BENICEK M. Buckling of torispherical shells under internal pressure [J]. Experimental Mechanics, 1964, 4(8): 217-222.

[5] MICHAEL P N, RICHARD D Y, TIMOTHY J C, et al. Nonlinear analysis of the space shuttle superlight weight LO2 tank: Part II behavior under 3g end-of-flight loads [R]. NASA/TM-1998-207287, 1998.

[6] RICHARD D Y, MICHAEL P N, TIMOTHY J C, et al. Nonlinear analysis of the space shuttle superlight weight LO2 tank: Part I behavior under booster ascent loads [R]. NASA/TM-1998-208127, 1998.

[7] NEMETH M P, BRITT V O, COLLINS T J, et al. Nonlinear analysis of the space shuttle superlight weight external fuel tank[R]. NASA-TM-112151, 1996.

[8] AHMED R, WILHELM J. Analysis and test of low profile aluminum aerospace tank dome[R]. NASA-TP-3442, 1993.

[9] WILLIAM L. Structural analysis of helios filament wound tanks subjected to internal pressure and cooling [R]. NASA/TM-2005-212855, 2005.

[10] THEODORE F J, DAVID W S, ROBERT A M. Structures and design phase I summary for the NASA composite cryotank technology demonstration project [R]. AIAA 2013-1825, 2013.

[11] DAVID W S, ROBERT A M, THEODORE F J. Structural design and sizing of a metallic cryotank concept[R]. AIAA 2013-1844, 2013.

[12] 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. (in Chinese)

[13] 章凌, 黄诚, 方岱宁, 等. 大型薄壁贮箱焊接区等应力优化设计[J]. 应用力学学报, 2015, 32(4): 593-596.
ZHANG Ling, HUANG Cheng, FANG Daining et al. Optimized design of welding area of large thin wall storage tank[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(4): 593-596. (in Chinese)

[14] 王博, 赵亮, 郝鹏, 等. 改善贮箱 Y 形环焊缝应力水平的优化设计[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(增刊 1): 26-28.
WANG Bo, ZHAO liang, HAO Peng, et al. Optimization of improving Y-ring welding stress level for tanks[J]. Aerospace Materials and Technology, 2014, 44 (Suppl. 1): 26-28. (in Chinese)

[15] 黄诚, 胡正根, 马云龙, 等. 筒段边界对大直径贮箱椭球箱底的内压稳定性影响研究[J]. 强度与环境, 2015, 42(5): 19-26.
HUANG Cheng, HU Zhenggen, MA Yunlong, et al. Impact study of shell segment boundary on internal pressure stability of the large diameter tank ellipsoid bottom[J]. Structure and Environment Engineering, 2015, 42(5): 19-26. (in Chinese)

[16] 黄诚, 胡正根, 常志龙, 等. 大直径贮箱三心箱底内压作用下的力学性能分析[J]. 强度与环境, 2016, 43(6): 19-26.
HUANG Cheng, HU Zhenggen, CHANG Zhilong, et al. Mechanical properties analysis of three-center bottom of the large diameter tank on internal pressure[J]. Structure and Environment Engineering, 2016, 43(6): 19-26. (in Chinese)

[17] 胡正根, 黄诚, 常志龙, 等. 基于缺陷敏感性的大直径贮箱椭球箱底内压稳定性研究[J]. 强度与环境, 2017, 44(5): 19-26.
HU Zhenggen, HUANG Cheng, CHANG Zhilong, et al. Analysis of the internal pressure stability on the large diameter tank ellipsoid bottom based on imperfection sensitivity[J]. Structure and Environment Engineering, 2017, 44(5): 19-26. (in Chinese)

[18] 辛腾达, 王华, 崔树燕, 等. 贮箱轻量化设计几何参数优化方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 153-159.
XIN Tengda, WANG Hua, CUI Cunyan, et al. Geometric parameters optimization for tank lightweight design[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53 (7): 153-159. (in Chinese)

[19] 赵亮. 大直径薄壁箱体结构力学分析与精细优化设计[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2015.
ZHAO Liang. The mechanical anlysis and refined optimization of large diameter and thin walled tank structures [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

[20] 朱天宇. 大型共底贮箱结构优化设计[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2018.
ZHU Tianyu. Optimum design of large coplanar tank structures[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)

[21] 王鹏. 传递发动机推力的贮箱箱底结构研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2019.
WANG Peng. Structural research propellant tank aft dome transmitting engine thrust [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2019. (in Chinese)

[22] 周家麟. 推进剂金属贮箱设计规范: Q/Dy 350-1995[S]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 1995: 1-76.

[23] 利津, 皮亚特金. 薄壁结构设计[M]. 廖启端, 王敬春, 王其兴, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1983.

(编辑: 张 雪)