

doi: 10.16576/j.ISSN.1007-4414.2026.02.049

国内运载火箭贮箱结构设计研究现状

陈 皓,韩 伟

(江苏寰宇乾塋航天科技集团有限公司,江苏 无锡 214064)

摘 要:运载火箭贮箱作为液体运载火箭的关键部件,集推进剂密封存储和箭体主要承载功能于一体,其技术水准会直接对火箭的运载效率、发射成本还有飞行安全产生影响。随着我国航天事业向重型化、高密度发射以及可重复使用的趋势转变,贮箱技术亟需应对大尺寸薄壁成形、深冷工况下的应力调控以及复合材料工程化应用等新挑战。该文聚焦于结构与轻量化优化这个核心领域,较为系统地概述了我国运载火箭贮箱当前所处的研究状态,为后续的技术迭代以及工程应用给予相应的理论依据以及实践方面的指导。

关键词:运载火箭贮箱;结构设计轻量化;防晃设计;消能器设计

中图分类号: V414.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-4414(2026)02-0174-04

Research Status on the Structural Design and Welding Technology of Launch Vehicle Propellant Tanks

CHEN Hao, HAN Wei

(Jiangsu Space Explore Aerospace Technology Group Co., Ltd., Wuxi 214064, Jiangsu, China)

Abstract: As a key component of liquid-fueled launch vehicles, the storage tank integrates the functions of propellant sealed storage and main load-bearing of the rocket body. Its technical level directly affects the launch efficiency, launch cost, and flight safety of the rocket. As China's aerospace industry shifts towards heavier, high-density launches and reusability, storage tank technology urgently needs to address new challenges such as large-size thin-walled forming, stress regulation under cryogenic conditions, and the practical application of composite materials. This paper focuses on the core area of structural design and lightweight optimization, providing a systematic overview of the current research status of China's launch vehicle storage tanks, and offering theoretical basis and practical guidance for subsequent technological iteration and engineering applications

Key words: launch vehicle tank; structural lightweight design; anti-sway design; energy dissipator design

0 引 言

运载火箭作为人类进入太空的关键运输工具,其运载能力与可靠性是衡量国家航天实力的重要指标。不论是月球探测方面的任务,还是空间站建设相关工作,亦或是深空探测这类重大航天任务,每一项工作的顺利实施全都离不开火箭对载荷所展开的精准输送操作^[1-2]。贮箱在火箭当中可比作“动力粮仓”,同时也是整个火箭的“结构骨架”,它在动力系统跟箭体结构这二者之间起着极为重要的枢纽作用:一方面来讲,在极端工况条件之下,贮箱要切实保障推进剂能够实现密封存储的状态,务必要防止出现泄漏及污染问题;另一方面,贮箱必须充当主要的承力结构,可传递发动机所产生的推力,还要肩负起导航、控制等相关系统的安装任务,其技术水平的高低会直接对火箭的运载效率、发射成本还有飞行安全等方面产生影响^[3-5]。国内围绕贮箱关键技术,在结构优化技术、制造工艺、焊接技术等领域取得了大量创新性成果^[6-9]。

笔者聚焦运载火箭贮箱的核心技术领域,对结构与轻量化优化的创新路径进行了分析,阐释了实现减重与承载平衡的策略;结合行业发展需求对贮箱技术未来的发展方向进行了展望,旨在为我国运载火箭贮箱的后续研发与工程实践提供理论参考和技术支持,从而助力深空探测、载人登月等重大航天任务目标的实现。

1 结构与轻量化优化研究

贮箱结构设计的关键在于实现轻量化和高承载二者之间的平衡,每降低1%贮箱重量,可大幅提高火箭运载能力。当下研究聚焦参数化设计、多工况优化等方面,通过构建多维度优化体系,来满足不同场景的减重需求以及性能限制。

1.1 常规结构的参数化与分区优化

常规贮箱的箱底与网格加筋筒段是最基础且关键的结构部件:箱底作为贮箱的“受力顶点”,需要承受内压与轴向载荷叠加所产生的作用力,且存在诸多

收稿日期: 2025-12-29

作者简介: 陈 皓(1996-),男,陕西铜川人,工程师,硕士研究生,主要从事运载火箭贮箱结构设计工作。

通信作者: 韩 伟(1985-),男,上海人,工程师,硕士研究生,主要从事运载火箭总体、性能及结构设计工作。

开孔,应力分布复杂。而网格加筋筒段则要在达成轻量化前提条件之下,确保拥有足够的环向刚度,以防止在内压作用的影响下出现屈曲失效^[10]。传统设计大多依靠经验公式还有类比法,如此一来很难精准地去匹配不同工况之下的结构方面的需求,进而致使部分区域出现过设计现象或者局部强度有所欠缺。因此近年来,相关的研究主要聚焦于参数化以及分区优化这两个方面,通常借助数学建模以及算法优化的方式来达成结构性能与重量之间的精准匹配。周宁等^[11]提出“剩余强度系数”设计准则,将箱底厚度、内压载荷和开孔分布进行定量关联,建立了开口多约束评估模型,并结合厚度分区轻量化方法,实现了旋压型箱底平均减重30%左右;同时通过建立参数化平台,实现了自动化建模,使设计周期缩短40%以上,极大地提升了设计效率。顾秀聪等^[6]基于等效刚度法,将筋条等效为光筒壳,显著降低了网格加筋贮箱的仿真模型规模,并通过优化算法实现了15%~20%的重量减小,且与精细模型的误差在5%以内,验证了该方法在火箭贮箱设计中的适用性。乐晨等^[12]则针对等边三角形网格加筋壳,提出了基于Abaqus的高精度建模方法,通过将壳单元和筋条等效结合的方法,精准模拟出了结构受力状态,然后以某新型中型运载火箭贮箱为例进行实际验证,其仿真模拟破坏载荷与试验结果相差仅1.8%,验证了该建模方法的准确性,同时也为网格加筋结构的精细化设计提供了强有力的技术支撑。

李庆庆等^[10]就新一代贮箱全搅拌摩擦焊接箱底的翻边法兰结构展开了研究,借助应变片测量和有限元计算,全面且细致地分析了在焊前装配、搅拌焊接、补焊及整底液压考核过程中典型位置处应变变化情况。经分析发现,法兰焊接后在圆角区域存在着幅度颇大的不均匀应力分布状况,并且全搅拌补焊对于法兰最终的应力水平所产生的影响是比较微小的。与此同时还发现,法兰在内压承载状态下由于受力分布不均,局部区域会出现屈服现象。这一结果一方面验证了有限元分析方法的较高准确性,另一方面也从力学角度为法兰结构优化提供了明确依据。

1.2 深冷工况下的结构减重与应力调控

深冷温度会显著改变贮箱材料的力学性能,同时结构内部因温度梯度产生热应力。传统基于常温条件的结构设计往往难以适应深冷工况,易导致应力集中或因过度减重而强度不足。因此,近年来相关研究主要聚焦于深冷工况下的结构减重与应力调控,通过理论建模与仿真分析,实现减重效果与结构安全之间的平衡。林伟等^[13]通过对贮箱结构参数设计流程进行细化,推导出在深冷加注条件下贮箱减重的理论公

式,同时构建起基于液氧温度的减重模型。相关研究说明:当深冷液氧温度从90 K降低至68 K的时候,贮箱减重能够达到38.64%,然而在温度低于68 K之后,其减重效果出现明显下降;最大等效应力集中在圆柱段以及球型封底转接段部位,达到136.23 MPa,低于2219铝合金的屈服强度,由此也验证了在深冷工况下结构设计所具备的安全性,进而为低温加注温度的选取给出了量化的依据。

1.3 制造缺陷适配的先验分析方法

传统贮箱结构设计很难精准量化制造过程中出现的缺陷给结构承载带来的影响,所以在设计阶段通常会留出较大的安全裕度,使得结构存在重量冗余的情况,进而对火箭运载能力的提升形成了制约。随着贮箱制造精度逐步提高,传统的“粗放式”设计已经不能满足轻量化方面的需求,迫切需要一种能够把制造缺陷影响考虑在内的精准设计方法。段宇航^[14]提出了面向制造过程的先验分析方法,借助NURBS样条曲线重新构建了壁板几何形貌,并通过随机数算法表征了材料的性能分布,建立了包含几何缺陷以及性能波动的贮箱轴压-内压耦合稳定性模型。研究发现:内压能在一定程度上提升结构的极限承载力,且在一定范围内能削弱制造缺陷所带来的不利影响。该方法可精准捕捉到结构传力路径和屈曲模态的变化,提升了折减因子的预测精度,为收缩安全裕度、实现轻量化提供了相应的理论支撑。郭磊等^[15]则针对箱底大型薄壁结构层次化装配偏差传递问题开展了研究,提出了基于三次Bezier曲线的随机偏差场表征方法,由此建立了多源偏差影响的装配偏差模型以及状态空间传递模型,为箱底公差设计和工艺优化提供依据。

1.4 共底贮箱的一体化设计

共底贮箱是新一代运载火箭贮箱的重要形式,其核心优势是通过取消传统分离式贮箱之间的箱间段来大幅度缩短箭体长度,减少连接结构,从而实现了结构的减重。然而,共底贮箱需要同时承受两个贮箱的内压与温差,结构受力情况复杂,容易出现应力集中或隔热失效等问题,因此有必要开展一体化设计与优化。高佳伟^[16]针对共底贮箱开展了多维度优化设计:对网格加筋筒段建立“强度-屈曲”双约束优化流程,获得轻质高效的承载结构;对椭球底提出厚度曲面映射方法,实现热-力耦合条件下的变厚度设计;针对夹层共底结构,通过瞬态传热分析确定最小泡沫夹芯厚度,并结合最不利工况优化结构轮廓,确保其隔热性能与抗屈曲能力。

王彬等^[17]借助CFD模拟了共底贮箱加注过程的非稳态温度分布,充分考量贮箱表面可能出现的结冰状况以及液氮相变蒸发这一因素,深入分析了叉形环

包裹 PMI 绝热材料对煤油温度场以及液氮蒸发率的影响,最终发现当有包裹绝热材料时,煤油局部的最低温度会低于 240 K,而没有包裹绝热材料时,温度高于 260 K,为共底隔热设计提供了相应的参数参考。杨龙等^[18]通过建立多种不同的理论模型,对贮箱箱底、短壳以及筒段展开了强度计算并进行了有限元验证,并运用控制变量法和牛顿法对相关参数进行了优化,最终达到箱底减重 7.3%、短壳强度提升 56.36% 以及筒段强度提升 91.193% 的效果,进而为共底贮箱以及常规贮箱的结构优化提供了可借鉴的思路。

1.5 消能器设计

贮箱增压系统通过向气枕区充入高压气体来维持内部压力,进而保证推进剂能够稳定输送。若增压气体的流速过快,则会对液面产生冲击,引发剧烈的晃动情,还可能导致推进剂出现雾化或者夹带气体,并且还有可能因为高速冲刷而对贮箱内壁造成损伤。所以,需要在增压入口处安装消能器,借助节流、扩容以及均流等方法,使气流速度降低到 10 m/s 以下,从而达成平稳增压的目的^[19-20]。

胡梦琦等^[21-22]对锥形和直筒型消能器进行了仿真研究。结果表明,第一层节流结构是压力损失主要来源,其损失大小与自身开孔率、孔径及安装位置相关。当入口处高速气流直接流经该结构时,压力损失为 0.2 MPa;若先经扩容,则压力损失约为 0.1 MPa。对于直筒型消能器,出口气流的均匀性和速度受外层均流筛网距离和导流锥形状的影响:均流筛网距离存在最优值,过大或过小均会降低减速效果;切线圆或样条曲线型导流锥的均流效果高于圆锥形。

李颖琦等^[19-20]参考 NASA 半人马座火箭所采用的喇叭口消能器开展了数值仿真研究。该型消能器扩容效果好、减速均匀,适合应用于大流量系统。研究发现:一级筛网提供了 60%~70% 的能量损耗;当设置足够大的容腔且扩大流通面积可有效降低流速;采用多层筛网可使出口流速不均匀程度小于 5%。仿真结果与试验数据吻合,很好地揭示改型效能器的工作机理,为消能器在后续的选型以及优化方面提供了相应的参考依据。

邵业涛等^[23]研究了火箭启动过程中气枕压力的变化规律。发动机启动时会快速消耗推进剂,气枕体积随之增大;若增压系统响应不及时,贮箱压力可能降至允许值以下,进而影响推进剂输送的稳定性。通过建立氦气瓶闭式增压系统的动态模型分析表明:增压响应时间越短、初始气枕容积越小、发动机流量启动加速过程越平缓,气枕最低压力越高,越有利于满足发动机入口压力要求。对于大中型火箭,若将控制响应时间限制在 0.3 s 以内,并采用较小的初始气枕容

积,在满足压力与载荷要求的同时,可有效减轻箭体结构重量。

1.6 推进剂防晃与防塌设计

火箭飞行过程中,贮箱内的推进剂产生晃动,所产生的横向力可达 10 kN 以上,对飞行的稳定性产生影响,并且在出流末期可能出现液面塌陷夹带气体,严重影响发动机工作。因此,防晃与防塌是贮箱设计的关键。

成勇等^[24]针对出流末期液面塌陷夹气问题开展了消漩防塌装置仿真研究。该装置安装于出流口上方,其作用原理是通过阻挡漩渦和稳定液面推迟夹气发生。研究结果显示:当防塌圆盘高度越低时,液体剩余量越少,但流阻会有所增大;当圆盘直径越大时,发生夹气的时间越晚;当漩渦和晃动同时存在时,夹气会提前,但装置仍能有效推迟 15%~20%。

潘恺^[25]设计了一种“浮板式”防晃结构,解决了传统固定隔板重量大、易磨损内壁的问题。该结构由轻质浮板、传动浮环及弹簧组成,通过液体与浮板之间的摩擦耗散晃动动能。仿真与试验结果表明:浮板弹簧刚度和接触面积越大,系统晃动频率越高、幅值越小;在瞬时角速度激励和“Bang-Bang”横向加速度激励作用下,浮板结构可使晃动幅值降低 40%~60%,抑制效果接近全隔板,而重量仅为全隔板的 1/5~1/3,对大幅度晃动的抑制尤为明显。该方案为重量敏感的芯级贮箱提供了新的技术选择。

周倩倩等^[26]研究了圆柱形贮箱中推进剂大幅晃动的数值模拟方法。采用 VOF 与水平集法耦合捕捉破碎波与自由液面,利用 LES 模型模拟湍流效应。计算发现:含液率为 50% 时晃动最剧烈,易产生破碎波,液体对壁面作用力最大,质心变化幅度最大;含液率较低或较高时晃动以线性为主。该研究为防晃设计提供了工况依据,建议在含液率 50% 对应的液面高度附近加强防晃措施。

韦笑等^[27]提出了基于有限元的流固耦合纵向振子模型参数求解方法,用于分析复杂结构贮箱的晃动引发的流固耦合振动。该方法将三维体积分转为二维面积分,显著提高了计算效率,且精度与解析法相当,适用于网格加筋、复合材料等复杂贮箱结构。通过计算固有频率可有效避开箭体结构共振风险,为防晃设计与共振规避提供了重要工具。

2 展 望

面向重型运载火箭、可重复使用火箭的发展需求,结合卫星组网对强运力的要求与液体运载火箭结构系统规划,贮箱技术仍需突破三大核心方向:一是超大尺寸制造技术,需解决 10 m 级以上贮箱的整体成形与焊接变形控制,开发一体化成形装备与高精度

装配技术,突破现有尺寸瓶颈,满足重型火箭对大容积贮箱的需求;二是复合材料实用化,重点攻克低温防渗漏、层间结合强度提升与低成本成形工艺,依托国产碳纤维技术进步,推动无内衬复合材料贮箱从试验验证走向工程应用,进一步提升轻量化水平,降低火箭发射成本;三是智能化与可重复使用,构建数字孪生驱动的全生命周期管控系统,整合制造-运维数据实现实时监测与故障预警,同时研究贮箱疲劳寿命评估与修复技术,结合机器人焊接与智能检测,降低重复使用成本、提升可靠性,为我国航天事业高质量发展提供核心支撑,助力实现深空探测、载人登月等重大航天任务目标。

参考文献:

- [1] 王国辉,曾杜娟,刘观日,等.中国下一代运载火箭结构技术发展方向与关键技术分析[J].宇航总体技术,2021,5(5):1-11.
- [2] 顾名坤,何巍,唐科,等.中国液体运载火箭结构系统发展规划研究[J].宇航总体技术,2021,5(2):55-67.
- [3] 吴龙梅,康权,周明军,等.运载火箭贮箱隧道管波纹成形工艺方法[J].锻压技术,2025,50(10):118-124.
- [4] 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.
- [5] 李雨,王建刚,杨菊鹏,等.火箭贮箱结构材料应用及发展现状[J].宇航材料工艺,2024,54(2):29-42.
- [6] 顾秀聪,周遇仁,冀宾,等.基于等效刚度法的运载火箭网格加筋贮箱结构仿真与优化[J].制造技术与机床,2025(3):5-11.
- [7] 周金强,刘 晓,江小辉,等.运载火箭贮箱整体箱底镜像铣削工艺研究[J].航空制造技术,2024,67(22):118-125.
- [8] 卢晓红,张昊天,滕乐,等.重型运载火箭燃料贮箱FSW核心区温度监测[J].焊接学报,2024,45(9):30-41.
- [9] 胡正根,吴会强,王会平,等.运载火箭贮箱结构产品化研究与实践[J].中国航天,2022(S1):81-86.
- [10] 李庆庆,刘冠华,姬秀滨,等.运载火箭贮箱箱底法兰力学特征分析[J].导弹与航天运载技术(中英文),2025(3):23-29.
- [11] 周 宁,吴瀚泉,杨海鹏,等.液体运载火箭贮箱箱底厚度设计准则及轻量化[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(8):17-23.
- [12] 乐 晨,曹 昱,杨 帆,等.基于Abaqus的等边三角形网格加筋壳建模分析方法及试验验证研究[J].导弹与航天运载技术,2019(2):12-16.
- [13] 林 伟,米 力,顾福涛,等.深冷液氧加注运载火箭贮箱结构减重研究[J].航天技术与工程学报,2025,2(3):35-45.
- [14] 段宇航.运载火箭贮箱结构承载先验分析方法及应用[D].长沙:中南大学,2024.
- [15] 郭 磊.火箭贮箱箱底大型薄壁结构层次化装配偏差传递分析[D].上海:上海交通大学,2020.
- [16] 高佳伟.共底贮箱结构失效分析与优化设计[D].大连:大连理工大学,2024.
- [17] 王 彬,杨瑞生,郑卫东,等.运载火箭共底贮箱加注过程非稳态温度分布数值模拟[J].化工学报,2020,71(S1):68-76.
- [18] 杨 龙,冯祥东,宋士泽,等.运载火箭贮箱结构优化方案设计[C].2022年无人系统高峰论坛(USS2022).中国陕西西安,2022.
- [19] 李颖琦,梁国柱,王非凡,等.液体运载火箭贮箱增压消能器流动过程的数值仿真研究[C].第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会.中国江苏苏州,2022.
- [20] 李颖琦,胡梦琦,梁国柱,等.运载火箭贮箱增压消能器流场数值仿真方法研究[J].宇航总体技术,2021,5(1):50-56.
- [21] 胡梦琦,梁国柱,王非凡,等.液体运载火箭贮箱增压消能器性能仿真与结构方案分析[C].第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会.中国江苏苏州,2022.
- [22] 胡梦琦,王非凡,李颖琦,等.运载火箭贮箱增压消能器性能仿真与结构方案分析[J].宇航总体技术,2022,6(4):41-52.
- [23] 邵业涛,罗 庶,冉振华,等.液体运载火箭启动过程气枕压力变化分析[J].导弹与航天运载技术,2017(4):35-38.
- [24] 成 勇,杜 江,丁吉坤,等.液体运载火箭贮箱消液防塌装置流场仿真研究[J].真空与低温,2022,28(6):761-766.
- [25] 潘 恺.运载火箭芯一级贮箱浮板式防晃结构设计及性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [26] 周倩倩,谭永华,徐自力,等.运载火箭圆柱形贮箱中推进剂大幅晃动的数值模拟[J].推进技术,2022,43(5):358-364.
- [27] 韦 笑,杨琼梁,张美艳,等.确定贮箱流固耦合纵向振子模型参数的有限元方法[J].上海航天,2015,32(6):39-42.

(上接第173页)

为类似复杂零件的加工提供了参考。未来将进一步优化R参数编程算法,提升加工效率和质量。

参考文献:

- [1] 郭永亮.空间任意角度孔系加工的研究应用[J].天津职业院校联合学报,2014,16(11):41-44+47.
- [2] Siemens. SINUMERIK 840D sl Programming Guide[R]. 2022.
- [3] 周宏伟.配置数控万能附件铣头拓展数控龙门镗铣床使用功能[J].机械制造,2017,55(7):80-86.
- [4] 李智凤.应用角度头快速加工盾构机回转类零部件斜孔[J].新技术新工艺,2020(5):29-32.
- [5] 杨 保,岳岁宁.“R”参数编程在内燃机机体加工中的应用[J].现代制造技术与装备,2017(10):146-149.