

“超重-星舰” 不锈钢贮箱的应用

杨浩亮¹ 李新宇² 明爱珍¹ 郝旭¹ 杨毅强²

1. 北京中科宇航技术有限公司; 2. 中国科学院力学研究所

2023年1月,美国太空探索技术公司(SpaceX)的新型研制型号“超重-星舰”进行了首次加注合练和静态点火,在90min内注入了约4860t的低温推进剂,整个箭体重量超过5000t,成为人类有史以来最大的航天器。在加注完成之后的泄出过程中,“超重”芯一级B7不锈钢贮箱变形,合计3处出现失稳,形成凹坑。

“超重-星舰”的设计目标是实现星际运输的重复使用,如果每次补给燃料或飞行时,都会使其箭体发生不可预测的变形,造成无法多次复用,安全性无法保证。根据“超重-星舰”的加注和泄出情况,本文对其不锈钢贮箱的应用和设计进行了分析。

一、“超重-星舰”简介

2019年,SpaceX开始快速迭代改进“超重-星舰”,坚持小步快跑的方式,旨在最终将人类送上火星、月球、其他深空目的地和地球周围的点对点旅行。以近地轨道的运载能力作为比较,NASA载人登月火箭的“土星5号”运载能力为118t,“超重-星舰”运载能力在可重复使用的状态下高达150t,在不重复使用的状态下可达250t。

“超重-星舰”总高度约为120m、直径9m,芯一级安装33台“猛禽”发动机;开发测试理念是“测试、

飞行、失败、修复、重复”，原型开发测试从2018年12月开始，至今已经建造并测试了20余个原型。“猛禽”发动机是全流量分级燃烧循环发动机，使用液态甲烷和液氧作为推进剂，具有高可靠性和低成本的优势，“猛禽”第二代发动机可提供220t推力，造价低于25万美元。2022年11月，SpaceX公司的“星舰”S24和“超重”B7“合体”，“合体”之后，对发射塔的快速断开（QD）接口进行测试，对其不锈钢贮箱加注液氮开展低温测试，在合练加注泄出的过程中，不锈钢贮箱出现了3处失稳导致的凹坑。

二、传统运载火箭贮箱

为了实现整个火箭箭体结构的轻量化，传统运载火箭的贮箱均采用铝合金贮箱，且直径一般不超过5.2m。随着运载火箭运载能力要求不断提高，传统运载火箭贮箱结构整体向着大型化、模块化的发展方向推进。

第一代贮箱为铝镁合金焊接贮箱，采用材料为5A06，焊接性能良好。第二代贮箱采用铝锂合金2A12、2A14（LD10），其抗拉和屈服强度大幅度超过第一代铝镁合金，但焊接性能急剧下降，在热处理强化状态下焊接，易产生焊缝金属凝固裂纹及近缝区母材液化裂纹，焊缝脆性大，工艺实施要求高。第三代铝合金选用铝锂合金2219，引入搅拌摩擦焊工艺，克服了第二代铝合金贮箱焊接的难题，进一步提高了贮箱的抗拉和屈服强度。国外多选择新型铝锂合金2195、2198作为第四代材料，在低温条件下，第四代铝合金具备良好的比强度和比刚度。

在贮箱成型工艺方面，整体旋压成形技术已成为制造运载火箭贮箱箱底的先进工艺，该技术可简化贮箱箱底制造工艺，提高生产效率和贮箱可靠性。美国的“德尔塔”（Delta）系列火箭、“宇宙神”（Atlas）系列火箭、日本的H-2B火箭的贮箱箱底、美国“战神”1号火箭直径为5.5m的上面级2195铝锂合金贮箱箱底

结构均采用整体旋压成形+热处理工艺制造。

三、“超重-星舰”的不锈钢贮箱

“超重-星舰”从2016年首次公开直至2018年底，并未采用传统的铝合金贮箱，而是采用碳纤维复合材料贮箱。2019年初，SpaceX推翻了“超重-星舰”原有的设计方案，将贮箱材料从高强度低重量的碳纤维复合材料变成工作常用的301不锈钢，并报废了结构形式复杂、成本高昂的复合材料工装（见图1）。

“超重-星舰”贮箱采用的不锈钢是一种常规的材料，具备耐高温、强度高、易加工、价格便宜、可室外焊接的特点，其密度是铝合金的3倍，导致其极少出现在航空航天的领域。



图1 成本高昂的复合材料贮箱模具

1. 贮箱设计

运载火箭的贮箱主要采用硬壳式结构和网格加筋结构，承受火箭运输、加注和飞行过程中贮箱内部的压力和轴向载荷。内部元件主要包括箱体结构系统、贮箱附件、管路系统和绝热系统四大部分。箱体结构系统主要包括短壳、圆筒段和箱底，其中短壳、圆筒段传递轴向载荷，弯矩载荷以及发动机机架和级间杆系所引起的集中载荷。箱底与圆筒段相连组成一个封

闭容器，主要承受内压载荷，短壳、圆筒段和箱底通过焊接成型为一压力容器箱体，用于存储推进剂；贮箱附件主要指防晃装置、防漩装置、消能器等；管路系统主要指推进剂输送管路、增压管路、加注管路等；绝热系统可使推进剂处于额定工作温度，维持发动机性能稳定而覆盖于贮箱和输送管路表面的绝热材料。

前后短壳主要承受轴向载荷，选用网格加筋结构或半硬壳式结构；前后箱底主要承受贮箱内压载荷，选用硬壳式结构；筒段是贮箱受力最复杂的位置，根据受拉和受压工况设定结构形式。设计时，根据具体受力选择结构形式：前后短壳主要承受轴向载荷，选用网格加筋结构或半硬壳式结构；前后箱底主要承受贮箱内压载荷，选用硬壳式结构；筒段是贮箱受力最复杂的位置，需要根据设计输入进行判断，采用公式计算折合轴向力：

$$T_1 = f_1 \left(N + \frac{2M}{R} \right) - \pi R^2 p f_2$$

式中： N 为截面轴力， M 为截面弯矩， f_1 和 f_2 为安全系数， $p = p_0 + n_x h \rho g$ ， p_0 为增压压力，液柱压力为 $n_x h \rho g$ ， n_x 为过载， h 为液柱高度。

当 $T_1 < 0$ 时，贮箱轴向受拉，以内压设计为主，轴压校核为辅，采用光壳结构。当 $T_1 > 0$ 时，对于贮箱轴向受压，以轴压失稳作为主要的设计因素，采用网格加筋结构。设计上使用应力不超过设计应力，确保结构不发生失稳，不产生应力强度破坏。“超重-星舰”的贮箱设计与传统贮箱设计一致。

2. 不锈钢结构的优势

在结构轻质化方面，铝合金相较不锈钢具备绝对优势。但是不锈钢用在“超重-星舰”上的优势则是成熟的工业化和高性价比，是特殊环境下的特殊应用。除了“超重-星舰”之外，历史上苏联的“米格”25也采用了不锈钢油箱结构。采用轻质化铝合金结构，在高马赫飞行条件下，空气摩擦温度过高，导致结构急剧下降，速度很难突破和提升。苏联另辟蹊径直接

采用不锈钢飞机，虽然其质量过大，很难执行高难度任务，但是特殊的时代，速度优势还是得以发挥，可以甩开同时代的导弹，并突破了高马赫防热问题。

在现代的运载火箭应用中，印度GSLV-MK3火箭采用了大量不锈钢来提高火箭的强度，替代轻质化程度高的复合材料，虽然牺牲了运载效率，但是通过火箭的数量、发射的批次和产能的突破来弥补了运载效率的劣势。

“超重-星舰”采用不锈钢贮箱的最大优势体现在产能和工艺的需求：不锈钢贮材料相较铝合金，焊接受温湿度、环境的影响较小，可户外大棚焊接、露天安装。近4年的研制证明了“超重-星舰”采用不锈钢的设计理念的正确性，自2020年2月的S1到2021年的3月的S11，失稳、爆破、蚱蜢跳、下落解体、下落爆炸合计11枚，通过1年的快速验证，S15在2021年5月完成10km高空飞行并着陆。到目前，不但完成了“超重-星舰”的合练，还完成了首次的飞行试验。

不锈钢“超重-星舰”的设计理念和技术高度继承“猎鹰”9号，其动力从最初设计的9台“猛禽”发动机，到24台发动机，再到最新的33台“猛禽”发动机，整体推力增加，通过大推力的提升解决不锈钢的重量问题，换来了整体运载系数的提高。

四、“超重-星舰”合练加注与泄出的问题

2023年1月，“星舰”S24和“超重”B7总共被加注了4860t的甲烷和液氧，加上箭体本身和载荷的重量，可达6000t以上，远远超过当年“土星”5号，成为人类有史以来最为庞大的航天器。

加注过程合计90min，总体过程顺利，全箭低温推进剂加注测试和所有的模拟发射前全流程演练测试工作都一次通过。但在泄出的过程中，全箭至少3处发生局部失稳，“超重”的高度大约90m，整体缩短

22mm。

发生箱体凹坑的原因主要有两方面：一是大量甲烷和液氧低温推进剂的加注导致不锈钢发生了热胀冷缩，4860吨位这个量级在工程应用和设计上没有先例，热平衡和热交换不再是线性平衡的关系，非线性的问题突显出来；二是贮箱内部气枕压力释放速率问题，贮箱的最优化设计是利用内压平衡轴压，两者相减绝对值是设计贮箱的外部载荷依据，贮箱轴向受拉，以内压设计为主，轴压校核为辅，贮箱轴向受压，以轴压失稳作为主要的设计因素。在泄压过程中，贮箱排气阀打开，排气速率应达到动态平衡，如压力泄压过快，导致轴压过大，则会发生整体失稳或局部失稳，形成凹坑。

箭体发生局部失稳，暴露了“星舰”存在的问题，证明了“合练”的成功。

五、结束语

2023年4月20日,SpaceX发射了“超重-星舰”,

起飞后,6台发动机相继发生故障,飞行约239s后,火箭解体。失控后火箭在高空风的作用下,箭体不断旋转,但结构未发生解体,证明了不锈钢箱体的结构强度满足要求,加上“超重-星舰”经历了加注、跨声速飞行和大动压飞行,整个不锈钢贮箱基本经历了飞行上升段的全部考核,证明了设计的合理性。

参考文献

- [1] 杨浩亮,杨毅强,廉洁,等.商业可重复使用火箭关键技术与创新[J].中国航天,2022(11):8-14.
- [2] 冯国峰,杨毅强,胡小伟,等."星舰"发射支持系统特点与分析[J].中国航天,2022(11):31-34.
- [3] 齐环环,韩虹.SpaceX"超重-星舰"运输系统研制进展[J].国际太空,2022(6):36-39.
- [4] 龙雪丹.SpaceX"超重-星舰"试验验证之路[J].国际太空,2022(7):60-64.
- [5] 刘博,吴昊."超重-星舰"火星殖民有戏吗?[J].太空探索,2021(2):54-59.
- [6] 焉宁,胡冬生,郝宇星.SpaceX公司"超重-星舰"运输系统方案分析[J].国际太空,2020(11):11-17.

(编辑:刘宸好)

