

DOI: 10.7652/xjtuxb201907021

# 贮箱轻量化设计几何参数优化方法

辛腾达<sup>1</sup>, 王华<sup>2</sup>, 崔村燕<sup>2</sup>, 赵继广<sup>3</sup>, 韩向阳<sup>1</sup>

(1. 航天工程大学研究生院, 101416, 北京; 2. 航天工程大学宇航科学与技术系, 101416, 北京;  
3. 航天工程大学电子与光学工程系, 101416, 北京)

**摘要:** 为有效减轻推进剂贮箱质量、提高液体火箭的有效载荷运载能力,提出一种推进剂贮箱几何参数优化方法。在建立椭球底圆柱贮箱模型的基础上,应用材料力学理论对贮箱结构进行应力分析,推导出了贮箱椭球下底、圆柱筒及椭球上底经向应力与环向应力的解析式。在保证贮箱应力强度可靠性的前提下,结合贮箱应力分布特征与材料强度理论定义贮箱最大等效应力,并据此确定贮箱设计所需壁厚参数。根据推进剂贮箱设计需求,确定贮箱质量与贮箱设计参数间的约束关系,以贮箱质量最小化为优化目标,对贮箱半径与椭球模数进行优化设计。以某型火箭贮箱的设计参数为例,将优化后贮箱的质量与原始质量进行了对比分析,结果表明:当半径不变、椭球模数减小 0.02 时,贮箱质量减小 5.7 kg;当椭球模数不变、半径增加 0.02 m 时,贮箱质量减小 15.2 kg。

**关键词:** 推进剂贮箱;应力分析;贮箱半径;椭球模数;优化设计

**中图分类号:** V421.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0153-07

## Geometric Parameters Optimization for Tank Lightweight Design

XIN Tengda<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>2</sup>, CUI Cunyan<sup>2</sup>, ZHAO Jiguang<sup>3</sup>, HAN Xiangyang<sup>1</sup>

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

3. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** To effectively reduce the mass of propellant tank and improve the payload carrying capacity of liquid rocket, an optimal method for the geometric parameters of propellant tank is proposed. Establishing the ellipsoid cylinder tank model and following theory of material mechanics, the stress of tank structure is analyzed, and the formulas of the meridional stress and hoop stress of tank bottom, cylinder and roof are derived. On the premise of ensuring the reliability of tank stress intensity, the maximum equivalent stress of tank is defined according to the stress distribution characteristics of tank and material strength criterion, and then the wall thickness parameters required for the tank design are determined. Obeying the design requirements of the propellant tank, the constraint relation between the tank mass and the design parameters are determined, and the tank radius and ellipsoid norm are optimally designed with the optimal objective to minimize the tank mass. Taking the design parameters of a rocket tank as an example, the mass of optimized tank and the original mass are comparatively analyzed. It is revealed that when the radius is unchanged and the ellipsoid norm is lowered by 0.02, the tank mass is then reduced by 5.7 kg; when the ellipsoid norm is unchanged and the radius increases

收稿日期: 2018-11-06。 作者简介: 辛腾达(1990—),男,博士生;崔村燕(通信作者),女,副教授。 基金项目: 装备发展部资助项目(2016SY41A0007)。

网络出版时间: 2019-04-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190329.1208.002.html>

0.02 m, the tank mass is then reduced by 15.2 kg.

**Keywords:** propellant tank; stress analysis; tank radius; ellipsoid norm; optimal design

推进剂贮箱不仅用来贮存约占液体火箭起飞质量 90% 的推进剂,而且是火箭重要的承力构件<sup>[1]</sup>。贮箱的轻量化设计可以有效提高火箭的有效载荷运载能力,是发展重型火箭的关键技术之一,每减少 1 kg 火箭质量可节省约 2 万美元的发射成本<sup>[2]</sup>。目前,贮箱的轻量化设计主要体现在进行关于贮箱材料、制造技术及贮箱结构三方面的研究。

贮箱材料与制造工艺的发展,可为贮箱设计带来巨大变革,具体应用包括:美国航天飞机使用了 2195 铝合金,轻质外贮箱质量减少了 3 405 kg<sup>[3-4]</sup>; DC-XA 火箭液氧贮箱使用了 1460 铝锂合金,质量减少了 10%<sup>[5]</sup>; NASA 于 2014 年进行了轻质复合材料贮箱试验,贮箱质量减少了 30%,成本降低了 25%<sup>[6]</sup>;猎鹰 9 号火箭贮箱使用了新型 2198 铝锂合金,贮箱壁板采用了搅拌摩擦焊技术,成本仅为传统结构的 1/5<sup>[7-8]</sup>。

然而,贮箱材料与制造技术的发展通常需要高额的人力、物力及时间成本,因此贮箱结构的优化也成为贮箱优化设计的一种有效方法。国内外学者根据不同的设计需求,对贮箱结构进行了广泛的研究,为推进剂贮箱的轻量化设计提供了重要参考。Sze-linski 等提出了 sandwich 贮箱壁设计方法,可有效改进低温贮箱的热力学性能<sup>[9]</sup>。Tapeinos 等提出了 multi-cell 结构贮箱设计理念,并对贮箱在内压及热负荷作用下的性能进行了分析<sup>[10]</sup>。Fahmy 等根据贮箱在谐波沉降作用下的性能,对贮箱壁厚参数进行了优化<sup>[11]</sup>。梁辉等应用零阶优化的方法,对推进剂贮箱壁厚参数进行了优化设计<sup>[12]</sup>。Zhao 等为改善加筋圆柱壳的局部屈曲现象,基于多岛遗传算法提出了一种分层网格结构的设计方法<sup>[13]</sup>。毛佳等人基于有限元分析的方法,对加筋圆柱壳结构参数进行了优化设计<sup>[14]</sup>。卜凡通过分析罐体的基本变形形式与应力分布特点,从强度、稳定性及抗震性能三方面对储罐结构进行了优化<sup>[15]</sup>。Ansary 等应用有限元分析的方法对加筋圆锥罐的壁厚、几何形状及加筋的尺寸与数量进行了优化设计<sup>[16]</sup>。郝鹏提出了一种基于等效刚度和精细模型的混合优化方法,为新一代火箭薄壁结构的设计提供了参考<sup>[17]</sup>。优化算法及有限元分析是结构优化设计的重要方法,但优化算法通常形式复杂,而有限元分析对模型参数依赖性高,需要精细的几何模型作基础,不利于

工程实际应用。

目前,贮箱几何参数的确定主要仍是根据工程手册及工程师的经验,并辅以有限元分析和地面测试。本文在分析椭球底圆柱贮箱应力分布的基础上,以推进剂体积与贮箱所受应力为约束条件,以贮箱质量最小为优化目标,对推进剂贮箱几何参数进行了优化,可为贮箱的工程设计提供一定的参考。

## 1 推进剂贮箱应力分析

### 1.1 椭球底圆柱贮箱模型

目前,承力式椭球底圆柱贮箱是液体火箭应用的主要贮箱类型,主要承受液体压力、内部增压、轴向压力及推进剂重力<sup>[18]</sup>。根据推进剂贮箱的受力情况,建立承力式椭球底圆柱贮箱模型,如图 1 所示。

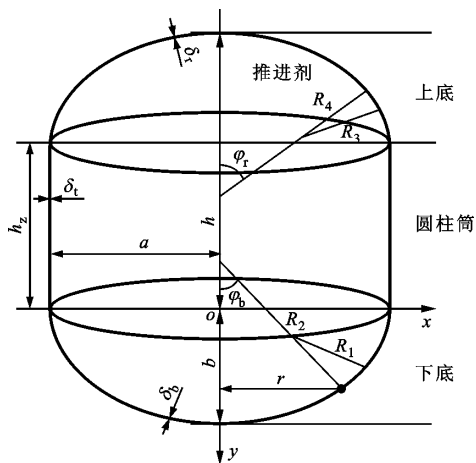


图 1 推进剂贮箱模型

图 1 中:  $xoy$  为贮箱基准坐标系;  $\delta_b$  为贮箱椭球下底壁厚;  $r$  为参考点到  $y$  轴距离;  $b$  为贮箱椭球底高度;  $R_1$  和  $R_2$  分别为贮箱椭球下底第一曲率半径和第二曲率半径;  $\phi_b$  为贮箱椭球下底第二曲率半径与  $y$  轴的夹角;  $R$  为贮箱半径;  $\delta_t$  为贮箱圆柱筒壁厚;  $h_z$  为贮箱圆柱筒高度;  $h$  为推进剂液面高度,  $h = h_z + b$ ;  $\delta_s$  为贮箱椭球上底壁厚;  $R_3$  和  $R_4$  分别为贮箱椭球上底第一曲率半径和第二曲率半径;  $\phi_s$  为贮箱椭球上底第二曲率半径与  $y$  轴的夹角。根据几何关系,可知  $R_1$ 、 $R_2$  和  $\sin\phi_b$  的数学表达式为

$$R_1 = \sqrt{[R^4 - x^2(R^2 - b^2)]^3} / R^4 b \quad (1)$$

$$R_2 = \sqrt{R^4 - x^2(R^2 - b^2)} / b \quad (2)$$

$$\sin\phi_b = bx / \sqrt{R^4 - x^2(R^2 - b^2)} \quad (3)$$

1.2 贮箱椭球下底应力分析

根据图 1 可知,贮箱椭球下底( $0 < y \leq b$ )母线的椭圆方程为

$$x^2/R^2 + y^2/b^2 = 1, \quad 0 < y \leq b \tag{4}$$

若将椭球模数  $m$  定义为椭圆长半轴  $R$  (即贮箱半径)与短半轴  $b$  之比,则可知  $m=R/b>1$ ,结合式 (1)~(4),可得

$$\left. \begin{aligned} r &= x = \sqrt{R^2 - m^2 y^2} \\ \sin\varphi_b &= \sqrt{(R^2 - m^2 y^2)/(m^4 y^2 + R^2 - m^2 y^2)} \\ R_1 &= \sqrt{(m^4 y^2 + R^2 - m^2 y^2)^3}/m^2 R^2 \\ R_2 &= \sqrt{m^4 y^2 + R^2 - m^2 y^2} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

贮箱椭球下底任意横截面上的力学平衡方程为

$$(P + g n \rho h_b) \pi r^2 + g n \rho V_b = \sigma_{b1} 2 \pi r \delta_b \sin\varphi_b \tag{6}$$

式中: $P$  为贮箱内部增压; $\sigma_{b1}$  为贮箱椭球下底的经向应力; $n$  为轴向过载系数; $g$  为重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$ ; $\rho$  为推进剂密度; $h_b$  为推进剂液面到贮箱椭球下底任意横截面高度, $h_b=h+y$ ; $\pi$  取为 3.14; $V_b$  为椭球下底任意横截面以下部分的容积,公式为

$$V_b = 2 \pi R^2 b (1 - 1.5 y b^{-1} + 0.5 y^3 b^{-3})/3 \tag{7}$$

据式(6)可得  $\sigma_{b1}$  的数学公式为

$$\sigma_{b1} = [(P + g n \rho h_b) \pi r^2 + g n \rho V_b]/2 \pi r \delta_b \sin\varphi_b \tag{8}$$

由式(8)可知  $\sigma_{b1}>0$ ,即椭球下底的经向应力表现为拉应力。在式(8)中对  $y$  进行求导可得  $\sigma'_{b1}>0$ ,即  $\sigma_{b1}$  在贮箱椭球下底顶点处取得最大值,公式为

$$\max\sigma_{b1} = mR(P + g n \rho h + g n \rho b)/2 \delta_b \tag{9}$$

根据无矩理论,贮箱椭球下底任意单元的平衡方程为

$$\sigma_{b1}/R_1 + \sigma_{b2}/R_2 = (P + g n \rho h_b)/\delta_b \tag{10}$$

式中  $\sigma_{b2}$  为贮箱椭球下底的环向应力。

结合式(8)和式(10),可得  $\sigma_{b2}$  为

$$\sigma_{b2} = (P + g n \rho h_b) R_2/\delta_b - \sigma_{b1} R_2/R_1 \tag{11}$$

由式(11)可知, $\sigma_{b2}$  可能为拉应力,也可能为压应力,在式(11)中对  $y$  进行求导可得  $\sigma'_{b2}>0$ ,即  $\sigma_{b2}$  在贮箱椭球下底与圆柱筒交界处取得最小值,公式为

$$\min\sigma_{b2} = \frac{3R(P + g n \rho h)(2 - m^2) - 2mR^2 g n \rho}{6 \delta_b} \tag{12}$$

根据式(9)和式(11)可得  $\max\sigma_{b1}=\max\sigma_{b2}$ ,即  $\max\sigma_{b2}>0$ 。由式(12)可得,当  $m \geq \sqrt{2}$  时,始终存在  $\min\sigma_{b2}<0$ ,即  $\sigma_{b2}$  存在由压应力向拉应力转换的现象。

给定推进剂贮箱的几何参数,如表 1 所示,即可

得到贮箱各部分的应力分布。

表 1 贮箱几何参数示例

| 参数                                   | 数值    | 参数                 | 数值 |
|--------------------------------------|-------|--------------------|----|
| $m$                                  | 1.60  | $n$                | 2  |
| $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 1 000 | $R/\text{m}$       | 2  |
| $P/\text{MPa}$                       | 0.2   | $h_z/\text{m}$     | 10 |
| $Z/\text{t}$                         | 200   | $\delta/\text{mm}$ | 3  |

注: $Z$  为火箭起飞质量; $\delta$  为贮箱壁厚参数。

若取  $\delta_b=\delta$ ,则根据式(8)和式(10)可得  $\sigma_{b1}$  和  $\sigma_{b2}$  的分布,如图 2 所示。

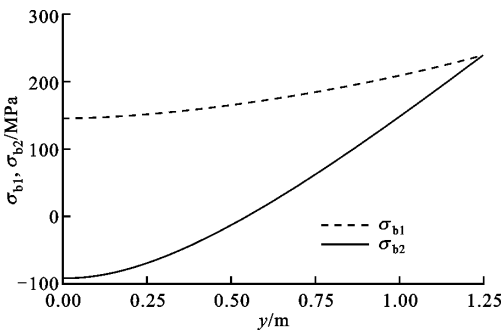


图 2 贮箱椭球下底的应力分布

分析图 2 可知:贮箱椭球下底的经向应力  $\sigma_{b1}$  与环向应力  $\sigma_{b2}$  均随贮箱纵坐标  $y$  的增加而增加;环向应力  $\sigma_{b1}$  始终表现为拉应力;因  $m=1.60$ ,环向应力  $\sigma_{b2}$  存在压应力向拉应力转换的现象。

1.3 贮箱圆柱筒应力分析

贮箱圆柱筒(即  $-h_z \leq y \leq 0$  部分)主要承受内部增压、轴向压力及推进剂液体压力的作用。由内部增压引起的贮箱圆柱筒的经向应力  $\sigma_{t1}^P$  的公式为

$$\sigma_{t1}^P = PR/2 \delta_t \tag{13}$$

由轴向压力引起的贮箱圆柱筒的经向应力  $\sigma_{t1}^N$  的数学公式为

$$\sigma_{t1}^N = -Zng/2 \pi R \delta_t \tag{14}$$

结合式(13)和式(14),可得贮箱圆柱筒的经向应力  $\sigma_{t1}$  的数学公式为

$$\sigma_{t1} = PR/2 \delta_t - Zng/2 \pi R \delta_t \tag{15}$$

根据式(15)可知,贮箱圆柱筒的经向应力  $\sigma_{t1}$  与  $y$  无关,且存在  $\delta_t>0$ ,因此  $\sigma_{t1}$  的正负取决于

$$f = PR/2 - Zng/2 \pi R \tag{16}$$

由式(16)可知:当  $f>0$  时, $\sigma_{t1}$  表现为拉应力;当  $f<0$  时, $\sigma_{t1}$  表现为压应力;当  $f=0$  时, $\sigma_{t1}$  为 0。

在内部增压  $P$  及推进剂液压  $P_y$  作用下,贮箱圆柱筒的环向应力  $\sigma_{t2}$  的数学公式为

$$\sigma_{t2} = (P + P_y)R/\delta_t \tag{17}$$

式中:  $P$  为内部增压;  $P_y$  为推进剂液压,  $P_y = g\rho h_t$ ,  $h_t$  为推进剂液面到贮箱圆柱筒任意横截面高度,  $h_t = h + y$ 。

由于  $P > 0$ , 根据式(17)可知  $\sigma_{r2} > 0$ , 即  $\sigma_{r2}$  始终表现为拉应力。在式(17)中对  $y$  进行求导可得  $\sigma'_{r2} > 0$ , 即  $\sigma_{r2}$  在贮箱圆柱筒与椭球下底交界处取得最大值, 数学公式为

$$\max \sigma_{r2} = (P + g\rho h)R/\delta_t \quad (18)$$

若取  $\delta_t = \delta$ , 根据式(15)、式(17)及表1可得  $\sigma_{t1}$  和  $\sigma_{t2}$  的分布, 如图3所示。

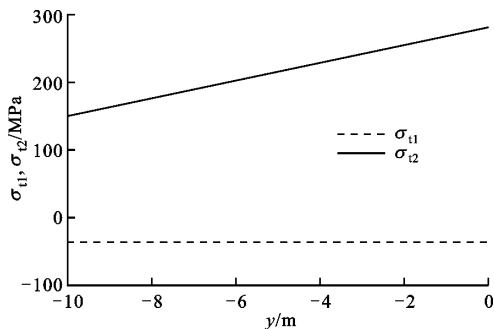


图3 贮箱圆柱筒的应力分布

分析图3可知: 因  $f < 0$ , 贮箱圆柱筒的经向应力  $\sigma_{t1}$  表现为与贮箱纵坐标  $y$  无关的压应力; 环向应力  $\sigma_{t2}$  表现为随贮箱纵坐标  $y$  的增加而递增的拉应力。

#### 1.4 贮箱椭球上底应力分析

贮箱椭球上底(即  $-h \leq y < -h_z$  部分)与椭球下底结构相同, 即  $R_3 = R_1$ ,  $R_4 = R_2$ ,  $\sin\varphi_r = \sin\varphi_b$ 。

贮箱椭球上底母线的椭圆方程为

$$x^2/R^2 + (y + h_z)^2/b^2 = 1 \quad (19)$$

联立式(1)~(3)及式(19)可得

$$\left. \begin{aligned} r &= x = \sqrt{R^2 - m^2(y + h_z)^2} \\ \sin\varphi_r &= \sqrt{\frac{R^2 - m^2(y + h_z)^2}{(m^4 - m^2)(y + h_z)^2 + R^2}} \\ R_3 &= \sqrt{[(m^4 - m^2)(y + h_z)^2 + R^2]^3 / m^2 R^2} \\ R_4 &= \sqrt{(m^4 - m^2)(y + h_z)^2 + R^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

贮箱椭球上底任意横截面上的力学平衡方程可表示为

$$2\pi x \sigma_{r1} \delta_r \sin\varphi_r = \pi x^2 (P + \rho g h_r) \quad (21)$$

式中  $h_r$  为推进剂液面到贮箱椭球上底任意横截面高度,  $h_r = y + h$ 。

将  $x = r = R_4 \sin\varphi_r$  代入式(21), 可得贮箱椭球上底的经向应力  $\sigma_{r1}$  为

$$\sigma_{r1} = \frac{R_4 (P + \rho g h_r)}{2\delta_r} \quad (22)$$

据式(22)可知  $\sigma_{r1} > 0$ , 即  $\sigma_{r1}$  始终表现为拉应力。在式(22)中对  $y$  求导, 可得  $\sigma'_{r1} < 0$ , 即  $\sigma_{r1}$  可在贮箱椭球上底顶点处取得最大值, 数学公式为

$$\max \sigma_{r1} = RmP/2\delta_r \quad (23)$$

贮箱椭球上底任意横截面的力学平衡方程为

$$\sigma_{r1}/R_3 + \sigma_{r2}/R_4 = (P + g\rho h_r)/\delta_r \quad (24)$$

联立式(22)和式(24), 可得贮箱椭球上底的环向应力  $\sigma_{r2}$  的数学公式为

$$\sigma_{r2} = [(P + \rho g h_r)R_4](2 - R_4/R_3)/2\delta_r \quad (25)$$

根据式(25)可知: 当  $(2 - R_4/R_3) > 0$  时,  $\sigma_{r2}$  表现为拉应力; 当  $(2 - R_4/R_3) < 0$  时,  $\sigma_{r2}$  表现为压应力; 当  $(2 - R_4/R_3) = 0$  时,  $\sigma_{r2}$  为 0。

在式(25)中对  $y$  求导可得  $\sigma'_{r2} < 0$ , 即  $\sigma_{r2}$  在贮箱椭球上底与圆柱筒交界处取得最小值, 数学公式为

$$\min \sigma_{r2} = (mPR + \rho g R^2)(2 - m^2)/2m\delta_r \quad (26)$$

联立式(22)和式(25)可得

$$\sigma_{r1} - \sigma_{r2} = PR_4(R_4/R_3 - 1)/2\delta_r \quad (27)$$

由于  $P > 0$ ,  $R_4/R_3 \geq 1$ , 根据式(27)可知  $\sigma_{r1} \geq \sigma_{r2}$ , 当  $y = -h$  时, 存在  $\sigma_{r1} = \sigma_{r2}$ , 即  $\max \sigma_{r1} = \max \sigma_{r2}$ 。

结合式(26)和式(27)可知: 当  $m \leq \sqrt{2}$  时,  $\max \sigma_{r2} \geq 0$ , 即  $\sigma_{r2}$  始终表现为拉应力; 当  $m > \sqrt{2}$  时,  $\max \sigma_{r2} < 0$ , 即  $\sigma_{r2}$  存在拉应力向压应力转换的现象。

若取  $\delta_r = \delta$ , 根据式(22)、式(25)及表1可得贮箱椭球上底的经向应力  $\sigma_{r1}$  与环向应力  $\sigma_{r2}$  的分布, 如图4所示。

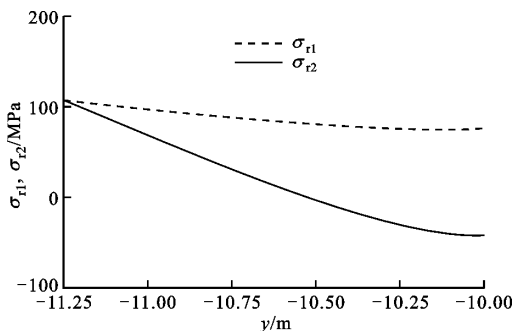


图4 贮箱椭球上底的应力分布

分析图4可知: 贮箱椭球上底的经向应力  $\sigma_{r1}$  与环向应力  $\sigma_{r2}$  均随贮箱纵坐标  $y$  的增加而增加; 经向应力  $\sigma_{r1} > 0$  始终表现为拉应力; 因  $m = 1.60$ , 环向应力  $\sigma_{r2}$  存在拉应力向压应力转换的现象。

## 2 贮箱几何参数优化方法

### 2.1 贮箱壁厚确定

通过对贮箱椭球下底、圆柱筒及椭球上底的经向应力与环向应力的分析, 可知贮箱的应力分布可

能存在拉应力与压应力转换的现象。本文根据材料强度理论对贮箱应力进行合理等效,并以此为依据确定推进剂贮箱设计所需的壁厚参数。

根据材料强度理论,贮箱的等效应力  $\sigma_e$  可表示<sup>[19]</sup>为

$$\sigma_e = \begin{cases} \max(\sigma_1, \sigma_2), & \sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0 \\ |\sigma_1| + |\sigma_2|, & \text{else} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $\sigma_1$  表示经向应力;  $\sigma_2$  表示环向应力。

由式(28)可知,贮箱环向应力或经向应力的转换现象将造成贮箱等效应力的突变,在贮箱设计中需要予以考虑。因此,为保证贮箱应力强度的可靠性,本文结合贮箱经向应力与环向应力的分布特征及式(28),将贮箱椭球下底、椭球上底的最大等效应力  $\sigma_{eb}$ 、 $\sigma_{er}$  和贮箱圆柱筒的最大等效应力  $\sigma_{et}$  定义为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{eb} &= \max \sigma_{b1} + |\min \sigma_{b2}| \\ \sigma_{et} &= \max \sigma_{t2} + |\sigma_{t1}| \\ \sigma_{er} &= \max \sigma_{r1} + |\min \sigma_{r2}| \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

据式(28)和式(29)可知,始终存在  $\sigma_{eb} \geq \sigma_e$ 、 $\sigma_{et} \geq \sigma_e$  及  $\sigma_{er} \geq \sigma_e$ , 为保证贮箱等效应力不大于贮箱材料极限应力,将  $\sigma_{eb}$ 、 $\sigma_{et}$  及  $\sigma_{er}$  均取为贮箱材料的极限应力  $\sigma_s = 290 \text{ MPa}$ 。因此,贮箱椭球下底、圆柱筒及椭球上底壁厚参数可以用数学公式表示为

$$\delta_b = \frac{R(mP + mgn\phi h + gn\rho R)}{2\sigma_s} + \left| \frac{3R(P + gn\phi h)(2 - m^2) - 2mR^2 gn\rho}{6\sigma_s} \right| \quad (30)$$

$$\delta_t = \frac{(P + gn\phi h)R}{\sigma_s} + \left| \frac{PR}{2\sigma_s} - \frac{Zng}{2\pi R\sigma_s} \right| \quad (31)$$

$$\delta_r = \frac{RmP}{2\sigma_s} + \left| \frac{mPR + \rho n g R^2}{2m\sigma_s} (2 - m^2) \right| \quad (32)$$

## 2.2 贮箱几何参数优化设计

以推进剂贮箱质量最小化为优化目标,对推进剂贮箱几何参数进行优化设计。根据推进剂贮箱设计需求,所需推进剂体积  $V$  为已知量,贮箱圆柱筒高度  $h_z$  的数学公式为

$$h_z = V/\pi R^2 - 4R/3m \quad (33)$$

由式(33)可知,当  $m \leq 4\pi R^3/3V$  时,  $h_z \leq 0$ , 即贮箱不存在圆柱筒段,因此在几何参数的设计中需保证  $m > 4\pi R^3/3V$ 。同时,随着椭球模数  $m$  的减小,贮箱椭球上底与椭球下底逐渐变为半球形,不利于箭体空间的有效利用,在贮箱的实际设计中通常取  $m \geq 1.40$ 。

根据式(30)~(33)可知,在给定贮箱设计需求参数的情况下( $P$ 、 $Z$ 、 $\rho$ 、 $n$  参照表 1,  $V$  取为  $100 \text{ m}^3$ ), 贮箱椭球下底、圆柱筒及椭球上底质量完全可由贮

箱半径  $R$  及椭球模数  $m$  进行约束。

根据式(30)可得贮箱椭球下底质量  $M_b$  为

$$M_b = \left[ \frac{2\pi(R + \delta_b)^2(R + m\delta_b)}{3m} - \frac{2\pi R^3}{3m} \right] \rho_c \quad (34)$$

式中  $\rho_c$  为贮箱材料密度,取为  $2\,640 \text{ kg/m}^3$ 。

因此,可得贮箱椭球下底质量  $M_b$  随贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  的变化,如图 5 所示。

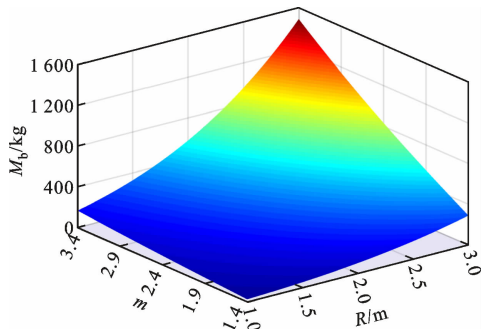


图 5 贮箱椭球下底质量的变化

分析图 5 可知:贮箱椭球下底质量随贮箱半径与椭球模数的增加而增加;当贮箱半径与椭球模数均取较小值时,椭球下底质量较小。

根据式(31)可得贮箱圆柱筒质量  $M_t$  为

$$M_t = (2R\delta_t + \delta_t^2)\pi h_z \rho_c \quad (35)$$

因此,可得贮箱圆柱筒质量  $M_t$  随贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  的变化,如图 6 所示。

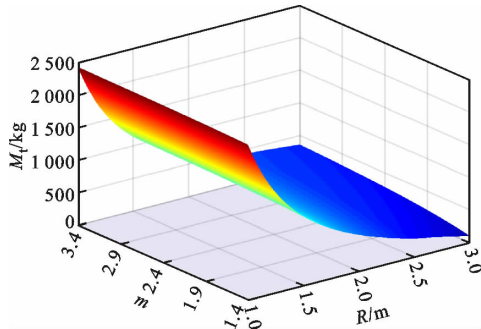


图 6 贮箱圆柱筒质量的变化

分析图 6 可知:贮箱圆柱筒质量随贮箱半径的增加而减小;椭球模数对贮箱圆柱筒质量的影响较小;当贮箱半径取较大值而椭球模数取较小值时,贮箱圆柱筒质量较小。

根据式(32)可得贮箱椭球上底质量  $M_r$  为

$$M_r = \left[ \frac{2\pi(R + \delta_r)^2(R + m\delta_r)}{3m} - \frac{2\pi R^3}{3m} \right] \rho_c \quad (36)$$

因此,可得贮箱椭球上底质量  $M_r$  随贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  的变化,如图 7 所示。

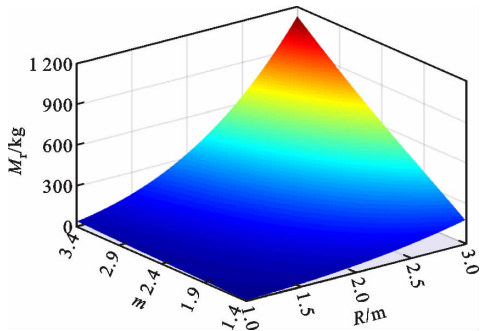


图 7 贮箱椭球上底质量的变化

分析图 7 可知:贮箱椭球上底质量随贮箱半径与椭球模数的增加而增加;当贮箱半径与椭球模数均取较小值时,椭球上底质量较小。

综上所述,可得贮箱质量  $M_z$  为

$$M_z = M_b + M_t + M_r \tag{37}$$

因此,可得贮箱质量  $M_z$  随贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  的变化,如图 8 所示。

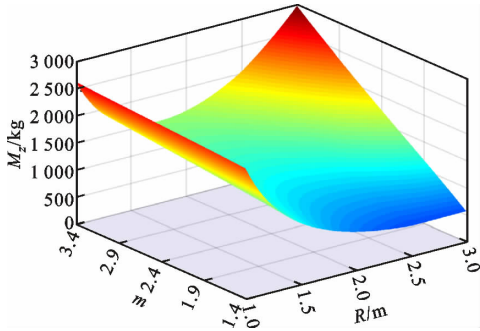


图 8 表 1 所示火箭贮箱质量的变化

分析图 8 可知:当贮箱半径取小值时,贮箱质量较大,即细长型贮箱设计不可取;当贮箱半径取大值、椭球模数也取大值时,贮箱质量较大,即粗平底型贮箱设计亦不可取;当贮箱半径取大值,而椭球模数取小值时,贮箱质量较小。

从本节分析可知,根据推进剂贮箱设计参数,并结合式(35)~(37),即可在保证贮箱应力强度可靠性的条件下,对贮箱半径及椭球模数进行优化,为贮箱的轻量化工程设计提供参考。

3 验证分析

以某型火箭贮箱设计参数为例,对提出的推进剂贮箱几何参数优化方法进行验证分析,该型火箭贮箱设计参数如表 2 所示。

将贮箱最大等效力取为贮箱材料极限应力  $\sigma_s = 290 \text{ MPa}$ ,即可得该型火箭贮箱质量  $M_z$  随贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  的变化,如图 9 所示。

表 2 某型火箭贮箱设计参数

| 参数                                   | 数值      | 参数                                     | 数值    |
|--------------------------------------|---------|----------------------------------------|-------|
| $m$                                  | 1.60    | $n$                                    | 2     |
| $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 1 458   | $R/\text{m}$                           | 1.67  |
| $P/\text{Pa}$                        | 151 987 | $\rho_c/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 2 640 |
| $Z/\text{t}$                         | 202     | $V/\text{m}^3$                         | 80.01 |

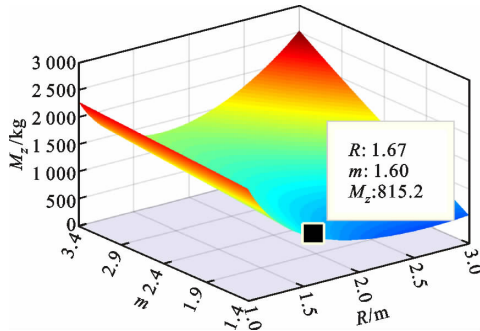


图 9 某型火箭贮箱的质量变化

分析图 9 可知,当贮箱半径取大值,而椭球模数取小值时,贮箱质量较小,火箭贮箱半径与椭球模数的设计未处于最优状态。这在一定程度上与火箭整体的气动布局、总体空间利用及有效载荷的几何参数有关,但结合贮箱的实际需求,仅对贮箱半径或椭球模数做微小改进时,即可有效减小贮箱的质量,如表 3 所示。

表 3 某型火箭贮箱质量对比

| 条件           |      | 结果              |                 |                 |                 |
|--------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R/\text{m}$ | $m$  | $M_b/\text{kg}$ | $M_t/\text{kg}$ | $M_r/\text{kg}$ | $M_z/\text{kg}$ |
| 1.67         | 1.60 | 97.0            | 683.8           | 34.4            | 815.2           |
| 2.62         | 1.50 | 229.1           | 139.7           | 111.4           | 480.2           |
| 1.67         | 1.58 | 94.2            | 682.1           | 33.2            | 809.5           |
| 1.67         | 1.56 | 91.4            | 680.3           | 32.0            | 803.7           |
| 1.67         | 1.54 | 88.6            | 678.5           | 30.8            | 797.9           |
| 1.69         | 1.60 | 99.2            | 665.1           | 35.7            | 800.0           |
| 1.71         | 1.60 | 101.5           | 646.9           | 37.1            | 785.5           |
| 1.73         | 1.60 | 103.8           | 629.4           | 38.4            | 771.6           |

注:表中所示质量不包括贮箱加强结构及设备的质量。

分析表 3 可知:在  $1 \leq R/\text{m} \leq 3$ 、 $1.5 \leq m \leq 3.5$  的范围内,当  $R = 2.62 \text{ m}$ 、 $m = 1.50$  时,贮箱质量  $M_z$  取得最小值,此时相对于贮箱原始质量减小 335.0 kg。在实际应用中,贮箱半径的增大会严重影响火箭整体的气动布局,而椭球模数的减小会直接影响箭体空间的有效利用,因此贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  难以取到最优值。然而,当贮箱半径  $R$  不变,椭球模数  $m$  减小为 1.58、1.56 与 1.54 时,贮箱质量

仍可分别减小 5.7、11.5 与 17.3 kg;当椭球模数  $m$  不变,贮箱半径增加为 1.69 m、1.71 m 与 1.73 m 时,贮箱质量亦可分别减小 15.2、29.7 与 43.6 kg。表 3 结果表明:结合推进剂贮箱设计需求,对贮箱半径  $R$  与椭球模数  $m$  进行优化设计可有效减轻贮箱质量,提高液体火箭有效载荷运载能力。

## 4 结 论

(1)当椭球模数  $m > \sqrt{2}$  时,贮箱椭球下底及椭球上底的环向应力存在拉应力与压应力转换的现象,而经向应力始终表现为拉应力。

(2)贮箱圆柱筒的经向应力随贮箱纵坐标  $y$  的变化而变化,可能为压应力也可能为拉应力,而环向应力始终表现为随  $y$  递增的拉应力。

(3)结合推进剂贮箱实际设计需求,对贮箱半径  $R$  及椭球模数  $m$  进行优化设计,可有效减轻贮箱质量,提高液体火箭有效载荷运载能力。

## 参考文献:

- [1] 王心清. 结构设计 [M]. 2 版. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 19-35.
- [2] 杨晓杰. 航天器典型结构稳定性分析及优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 1-6.
- [3] WAGNER J, DOMACK M, HOFFMAN E. Recent advances in near-net-shape fabrication of Al-Li alloy 2195 for launch vehicles: 20081013435 [R]. Washington DC, USA: NASA Technical Reports Server, 2007: 1-17.
- [4] PILET J C, DIECIDUE-CONNERS D, WORDEN M, et al. External tank program: legacy of success [C]// AIAA Space 2008 Conference & Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 7157.
- [5] 刘春飞. 新一代运载火箭箱体材料的选择 [J]. 航空制造技术, 2003(2): 22-27.  
LIU Chunfei. Material selection for new-type launch vehicle tank [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(2): 22-27.
- [6] NASA. NASA-Boeing team wins big at advanced materials expo [EB/OL]. (2014-10-20) [2018-06-11]. <https://www.nasa.gov/content/nasa-boeing-team-wins-big-at-advanced-materials-expo/>.
- [7] WANG Guoqing, ZHAO Yanhua, HAO Yunfei. Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34:

73-91.

- [8] VOZOFF M, COULURIS J. SpaceX products: advancing the use of space [C]// AIAA Space 2008 Conference & Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 7836.
- [9] SZELINSKI B, LANGE H, ROTTGER C, et al. Development of an innovative sandwich common bulkhead for cryogenic upper stage propellant tank [J]. Acta Astronautica, 2012, 81(1): 200-213.
- [10] TAPEINOS I G, KOUSSIOS S, GROVES R M. Design and analysis of a multi-cell subscale tank for liquid hydrogen storage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41: 3676-3688.
- [11] FAHMY A S, KHALIL A M. Wall thickness variation effect on tank's shape behavior under critical harmonic settlement [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55: 3205-3209.
- [12] 梁辉, 孙雨果. 推进剂贮箱结构变厚度优化 [J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1349-1352.  
LIANG Hui, SUN Yuguang. The optimal design for propellant-tank with vary-thickness [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1349-1352.
- [13] ZHAO Yunong, CHEN Mingji, YANG Fan, et al. Optimal design of hierarchical grid-stiffened cylindrical shell structures based on linear buckling and nonlinear collapse analyses [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 119: 315-323.
- [14] 毛佳, 江振宇, 陈广南, 等. 轴压薄壁加筋圆柱壳结构优化设计研究 [J]. 工程力学, 2011, 28(8): 183-192.  
MAO Jia, JIANG Zhenyu, CHEN Guangnan, et al. Design and optimization research on rib-stiffened thin cylindrical shell under axial loading [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8): 183-192.
- [15] 卜凡. 大型储罐的强度与刚度分析及设计方法研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2015: 15-40.
- [16] ANSARY A M, DAMATTY A A, NASSEF A O. A coupled finite element genetic algorithm for optimum design of stiffened liquid-filled steel conical tanks [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49: 482-493.
- [17] 郝鹏. 面向新一代运载火箭的网格加筋柱壳结构优化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 19-48.
- [18] 赵亮. 大直径薄壁箱体结构力学分析与精细优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 32-36.
- [19] 刘雨均. 运载火箭总体与结构 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 206-217.

(编辑 陶晴)