

贮箱容积偏差及测量精度分析

马 键, 童 飞, 陈祖奎
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 贮箱一般采用称重法进行容积测量, 但测量值与理论设计值偏差较大。分析了贮箱在生产制造、液压试验、介质加注、称重、容积计算和变形等环节出现偏差的原因。通过贮箱计算实例分析了各环节偏差大小, 提出了减小偏差的对策, 并对贮箱容积测量提出了改进方案。

关键词: 贮箱; 容积测量; 偏差分析

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 01-0041-05

Analysis on deviation and measuring precision of tank volume

MA Jian, TONG Fei, CHEN Zu-kui
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The weighting method is usually adopted to measure the volume of tanks, but its measured value has a great deviation from the theoretical value. The reasons that the deviation occurs in the process of manufacture, hydraulics test, medium filling, weighting, volume calculation and distortion are analyzed. The deviation value of each link is also analyzed by means of an example of tank volume calculation. Some solutions for decreasing the deviation and a modification scheme regarding with tank volume measurement are proposed in this paper.

Keywords: tank; volume measurement; deviation analysis

0 引言

在液体火箭推进系统研制中, 为实现性能最优, 通常需要精确测量贮箱的实际容积, 以便确定推进剂实际加注量、气垫实际容积等, 了解贮箱真实工作性能, 确保飞行成功。

目前, 容积测量的方法主要有三种: 衡量法、容量比较法和几何测量法。火箭用液体贮箱一般采用称重法 (即衡量法), 大型贮箱有时也采用流量计法 (即容量比较法)。

在某贮箱研制中, 由于采用“加满泄出”的推进剂加注方案, 将贮箱的实际容积作为控制加注精度的基准条件, 对容积测量提出了偏差不大

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-09-25

作者简介: 马键 (1972—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机总体设计

于1 L的要求。但是在研制过程中发现,贮箱实测容积均与理论容积存在较大偏差。某设计容积880 L的贮箱,其容积测量偏差在-0.74%~2.28%之间;某设计容积300 L的贮箱,其测量偏差也在-0.94%~1.20%之间。这种偏差造成无法确定贮箱实际容积,推进剂加注量偏差大于设计值(要求精度0.5 kg),使推进剂加注过多或过少,影响飞行任务的完成,严重时甚至会造成灾难性失败。

1 偏差分析

贮箱从设计到容积测量,如图1所示,需要经历生产制造、液压试验、介质加注、称重、计算和变形等环节,如采用流量计法,则不需称重、计算环节。每个环节都会造成测量容积与理论容积偏差。在工程实际中,贮箱容积测量一般在贮箱液压试验之后进行,有时也在液压试验之前增加一次液压试验对贮箱造成的变形测量。

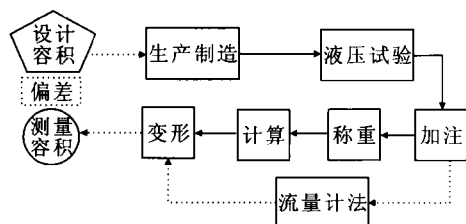


图1 贮箱容积测量过程

Fig. 1 Process of tank volume measurement

1.1 生产制造

贮箱生产制造时,主要形状尺寸均存在一定公差,造成最终容积上的偏差。大中型贮箱出于加工、成本方面考虑,一般采用板材钣金、拼焊而成,其线性尺寸公差控制精度较差,一般可达到0.2%~1%,折算到容积上可达0.6%~3%。因此,贮箱设计时,其容积偏差已存在。容积测量之前,应对设计偏差进行计算,确定合理允差。

1.2 加注

实际液体加注过程中,由于贮箱内部结构、排气口设置位置、贮箱放置姿态等因素,贮箱不

能完全被加满,贮箱内部存在的气体无法排出,形成“气隙”,造成贮箱容积测量值偏小。

通过内部结构设计和贮箱加注姿态设定使“气隙”容积应尽量减小。对存在的“气隙”,应通过计算得出其容积,用于贮箱容积测量偏差纠正。

1.3 液体计量

1) 称重法

采用“称重法”进行容积标定时,称重实测值为表观质量,对于大中型贮箱,还需考虑称重表观质量和真实质量的差别,即需要考虑空气浮力的影响。

假设称重表观质量为 M_0 ,考虑空气浮力时的容积偏差为:

$$\Delta V = \frac{M_0}{\rho_{\text{液}} - \rho_{\text{空气}}} - \frac{M_0}{\rho_{\text{液}}} \quad (1)$$

加注液体工质一般采用无水乙醇、去离子水和异丙醇,液体密度越小,空气浮力带来的偏差影响越大。

2) 流量计法

流量计法一般用于大型贮箱,采用流量计安装在贮箱加注入口,在加注过程中完成对加注量的计量。由于直接测量加注液体体积,液体密度变化、空气浮力等因素均不需考虑。

1.4 容积计算

对采用称重法得到的液体质量需进行计算,换算为贮箱容积。

在已进行过的容积测量试验中,容积计算时,对于纯净水密度取1 000 kg/m³,对于无水乙醇密度取790 kg/m³,没有考虑温度对试验介质密度的影响。试验是在室内进行,考虑季节差异,试验介质温度在10~30℃范围内变化。表1列出了不同温度条件下密度变化带来的偏差。

从表1可以看出,由于计算时液体密度取值不同,造成贮箱容积测量偏差较大,特别是对于密度随温度变化显著的无水乙醇。所以容积计算时不能取定密度值,应配备专用密度计,直接测量液体的密度,或测量液体工质温度,计算得到液体密度,再用该值进行容积计算。

表 1 不同温度下介质密度偏差

Tab.1 Medium density deviation with different temperatures

温度 /℃	水密度 / (kg·m ⁻³)	密度偏 差 /%	无水乙醇密 度 / (kg·m ⁻³)	密度偏 差 /%
0	999.84	-0.02	806.25	+2.06
10	999.70	-0.03	797.88	+1.00
20	998.20	-0.18	789.44	-0.07
30	995.65	-0.44	781.00	-1.14

1.5 贮箱变形

在容积测量过程中, 在重力、支撑条件、内部压力、环境温度等因素影响下贮箱形状会发生改变, 造成测量偏差。假设贮箱为均匀薄壳体, 不考虑贮箱内部结构, 对贮箱变形影响进行分析。

1) 贮箱在重力作用下的变形

贮箱放置方式决定了重力作用的影响。对于柱形贮箱一般采用沿柱段轴线水平方式放置, 在贮箱自重和加注介质重量的共同作用下, 使贮箱截面变形为非圆形, 造成贮箱容积减小。这种变形与贮箱结构和支撑状态关系密切。消除重力变形的一种可行方法是贮箱加注时箱内应维持一定压力, 保持贮箱基本形状为设计状态形状。

2) 贮箱在内压作用下的变形

在内压作用下, 贮箱外形尺寸在弹性范围内增大。变形大小由内压压力、材料弹性模量决定。贮箱常用材料中, 铝合金比钛合金弹性模量小, 变形更大一些。

贮箱在各个方向上的变形可以认为是外形尺寸的变化, 由此得出贮箱容积的变化。变形量可通过工程估算给出, 也可建立有限元模型进行数值计算得到。

3) 贮箱温度变形

金属材料受温度影响, 尺寸发生变化, 带来贮箱容积的变化。

假设贮箱材料在 20 ℃时的线膨胀系数为 λ , 则贮箱容积变化为:

$$\Delta V=3V\lambda(t-20) \tag{2}$$

实际应用中可通过规定环境和介质温度范围减小温度偏差, 或实测温度进行计算修正。

2 计算实例

某贮箱要求为标准椭球封头的圆柱形结构, 设计容积为 1 000 L, 内径为 800 mm, 封头长短轴之比为 2。所采用材料为铝合金 5A06-O, 弹性模量 $E=69$ GPa, 泊松比 $\nu=0.33$, 线膨胀系数 $\lambda=23.6\times10^{-6}/\text{K}$ (20 ℃)。

计算得柱段长度为 1 723 mm, 封头高度为 200 mm, 壁厚 2.5 mm。从贮箱底部加注液体介质, 由于贮箱上部空间有限, 加注排气口设计在封头上, 内部有导管引出贮箱顶部气体, 尺寸 $h=5\sim10$ mm, 贮箱模型见图 2。

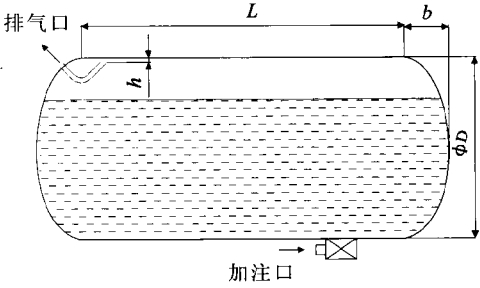


图 2 贮箱模型示意图

Fig. 2 Schematic of tank model

采用称重法进行容积测量, 贮箱水平放置, 加注介质采用纯净水, 计算时, 净水密度取 1 000 kg/m³。

2.1 贮箱制造

尺寸公差按 GB/T1804-c 级选取, 则柱段长度 $L=1\,723\pm3$ mm, 内径 $D=800\pm2$ mm, 封头高度 $b=200\pm1.2$ mm。

假设尺寸公差相对尺寸名义值为无穷小量, 则有:

$$V=\frac{\pi D^2 L}{4}+\frac{\pi D^2 b}{3}$$

$$\Delta V=2\pi D\left(\frac{L}{4}+\frac{b}{3}\right)\Delta D+\frac{\pi D^2}{4}\Delta L+\frac{\pi D^2}{3}\Delta b \tag{3}$$

代入计算得贮箱容积偏差为 ± 7.31 L, 由此可知, 一个合格贮箱的容积偏差也可达 $\pm 0.73\%$ 。

2.2 贮箱加注

理想情况下,贮箱加注时水平放置,液面水平,贮箱顶部“气隙”容积恒定,按 $h=10\text{ mm}$,计算气隙容积为 2.11 L ,占贮箱总容积的 0.21% 。而实际情况下,贮箱加注时不能保证绝对水平,当液体溢出时,贮箱上部“气隙”容积随贮箱姿态有较大变化(见图 3)。

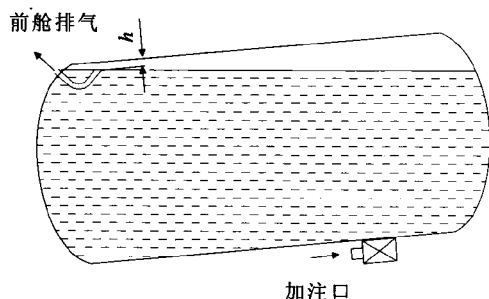


图 3 贮箱倾斜时对“气隙”的影响

Fig. 3 Influence of inclined tank on space cavity

假设贮箱倾斜角为 $\pm 1^\circ$,计算贮箱倾斜时“气隙”容积。倾斜 $+1^\circ$ 时,气隙为 0.31 L ,倾斜 -1° 时,气隙为 8.95 L ,从计算可以看出,按有利于排气的倾斜方式进行加注可以减小贮箱“气隙”容积。

另外贮箱周向位置不正时,也会影响“气隙”容积,因此加注前还应检查贮箱周向位置,排气口是否处于最高点。

2.3 液体称重

假设称重测量值 M_0 为 $1\ 000\text{ kg}$,水温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,密度取 998.2 kg/m^3 ,不考虑空气浮力时,水的体积为 $1\ 001.80\text{ L}$ 。

按公式 (1) 计算,其中: $\rho_{\text{空气}} = \frac{p}{RT}$,以西安地区为例,大气压 $p=0.098\text{ MPa}$,试验室内温度 $T=293\text{ K}$ (20°C),空气的气体常数 $R=287.06\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,计算得: $\rho_{\text{空气}}=1.165\text{ g/L}$

水的实际体积为 $1\ 002.97\text{ L}$,偏差为 -1.17 L (0.12%)。

2.4 容积计算

按水温在 $10\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化,可得出与按密度 $1\ 000\text{ kg/m}^3$ 计算带来的偏差。水温 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,偏差为 -0.30 L (-0.03%),水温 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,偏

差为 -4.35 L (-0.44%)。

2.5 贮箱变形

假设贮箱加注时,内压为 0.2 MPa (表压),水密度取 998.2 kg/m^3 ,加注满后,贮箱底部因加注液体高度而增加的压力为 $p=\rho gH=0.007\ 8\text{ MPa}$,因此主要考虑内压的影响。

通过有限元模型计算得: $\Delta D=0.310\text{ mm}$, $\Delta L=0.152\text{ mm}$, $\Delta b=0.549\text{ mm}$ 。

代入公式 (3) 中得:贮箱内压造成的容积偏差为 $+1.22\text{ L}$ ($+0.12\%$)。

根据公式 (2) 计算贮箱温度变形:在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 或 $30\text{ }^\circ\text{C}$,相对 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的容积偏差为 $\pm 0.71\text{ L}$ ($\pm 0.07\%$)。

2.6 偏差合计

对上述计算结果所作的统计见表 2。从表中可以看出,在容积测量过程中,贮箱容积偏差可达 $+0.75\%\sim 2.13\%$,除设计偏差不能在短期内消除外,其余偏差可采取措施进一步减小。

表 2 偏差合计

Tab. 2 Deviation caused by each factor and calculated total deviation

影响因素	偏差/L	百分比/%
制造偏差	$+7.31\sim -7.31$	47.0
气隙	$-0.31\sim -8.95$	27.7
空气浮力	-1.17	3.8
介质密度	$-0.30\sim -4.35$	13.0
内压变形	$+1.22$	3.9
温度变形	$+0.71\sim -0.71$	4.6
合计	$+7.46\sim -21.27$	100

3 结论

1) 除制造偏差无法在短期内消除外,通过采取改进措施,可使贮箱容积测量精度提高,最大可减小 1.4% 的偏差;

2) 贮箱制造偏差对大型贮箱影响较大,但其涉及生产加工工艺和成本,需要和贮箱承制方

协调解决。

3) 容积测量中偏差控制措施同样也适用于推进剂加注, 当采用“加满泄出”方案确定加注量时, 加注状态应与容积测量时保持一致, 有利于减小加注量偏差。

参考文献:

- [1] 刘子勇, 郭立功. 容量计量研究方向[J]. 现代测量与实验室管理, 2007(6): 11-13.
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 周广文. 推进剂贮箱优化设计思考[J]. 导弹与航天运载

技术, 2011(1): 26-28.

- [4] 朱平萍, 刘宪力. 大型贮箱结构及工艺性研究[J]. 航天制造技术, 2011(3): 42-45.
- [5] 陈朝, 黄敏超, 陈志坚. 空间表面张力贮箱结构分析与优化设计[J]. 航天制造技术, 2007(5): 9-12.
- [6] 石晓强. 卫星用推进剂贮箱和高压气瓶封头制造技术[J]. 真空与低温, 2008(3): 184-186.
- [7] MICHAEL J DEBRECENI, WILLIAM D LAY. Propellant tank for an advanced communications satellite, AIAA-2001-3826[R]. USA: AIAA, 2001.
- [8] WALTER H TAM, JIM R TAYLOR. Design and manufacture of a propellant tank assembly, AIAA-97-2813[R]. USA: AIAA, 1997.

(编辑: 王建喜)

(上接第35页)

参考文献:

- [1] SAKAIS, KATAYAMA T. Discharge modes and characteristics of hollow cathode [C]// The 30th International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy: IEPC, 2007: 1-7.
- [2] 张天平, 袁子, 田华兵. 电推进系统空心阴极研制试验技术[J]. 真空电子技术, 2007(2): 9-13.
- [3] KAMHAWI H, PATTERSON M J. On the operational status of the international space station plasma contactor hollow cathodes, AIAA2005-3676[R]. USA: AIAA, 2005.
- [4] 孙宗祥. 等离子体减阻技术的研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 87-94.
- [5] 方绍强, 赵尚弘, 余侃民, 等. 飞行器等离子体隐身技术[J]. 现代防御技术, 2005, 33(2): 32-35.
- [6] 于志强, 李季, 邵文生. 应用于离子发动机和霍尔推力器的空心阴极组件的研究[C]. 北京真空电子技术研究所, 第十七届中国电子学会真空电子学会年会军用微波管研讨会论文集(下). 2009.

- [7] MANDELL M J, KATZ I. Theory of hollow cathode operation in spot and plume modes, AIAA 94-3134 [R]. USA: AIAA, 1994.
- [8] DOMONKOS M T, GALLIMORE A D, PATTERSON M J. An evaluation of hollow cathode scaling to very low power and flow rate[C]// The 25th International Electric Propulsion Conference. Cleveland, OH, US: IEPC, 1997: 121-129.
- [9] NISHIYAMA K, SHIMIZU H, FUNAKI K. EMI of microwave discharge neutralizer and hollow cathode[C]// Abstracts of ISAS Space Transport Symposium. Japan: ISAS, 2001: 211-218.
- [10] YOSHIDA H. Four-step double sheath model of a neutralizer hollow cathode[C]// 48th Space Sciences and Technology Conference. Fukui, Japan: SSTC, 2004: 4-6.
- [11] PATTERSON S W, MALIK A K. Noise and oscillatory disturbances in the t6 ion thruster hollow cathode, AIAA 99-2577[R]. USA: AIAA, 1999.

(编辑: 马 杰)