

通道式表面张力贮箱通道的计算和确定^{*}

李 治, 沈赤兵, 周 进

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为确定通道式表面张力贮箱的通道数, 通过分析最差工况下液体所覆盖的筛网面积, 给出了通道宽与接触面积关系图和湿润圆位置与最小接触面积的关系图, 在 $10^{-2}g$ 加速度下贮箱采用 1 个横向通道和 5 个沿 $g-g$ 轴周向环布的通道较为合适。计算结果可为通道式表面张力贮箱的优化设计提供参考。

关键词: 表面张力贮箱; 推进剂贮箱; 推进剂控制; 推进剂管理

中图分类号: V421.33 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 03-0244-03

Calculation and determination for the channel of a channel surface tension tank

LI Zhi, SHEN Chibing, ZHOU Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the relationship between the channel width and the minimum screen area covered by the pool under the worst operating condition, the number of the channels was chosen. The relationship between the location of the pool and screen area covered were presented. The result obtained can provide a reference for the optimization design of the channel surface tension tank.

Key words: Surface tension tank; Propellant tank; Propellant control; Propellant management

1 引 言

通道式表面张力贮箱主要由网屏、通道、气泡收集器组成, 一系列只有几 μm 直径小孔的细筛网, 贴近贮箱壁, 并与通道结合起来, 分布在贮箱的周围, 推进剂由毛细筛网进入通道, 流入气泡收集器, 覆盖推进剂出口, 从而被送入推力器工作^[1]。通道式表面张力贮箱因具有较高的蓄留能力、筛网可连续工作、对热梯度没有限制, 而得到较为广泛的应用^[2,3]。对通道的计算和确定首先要考虑最差工况下推进剂所覆盖的最小筛网面积, 对由收集器等构成的 SPOT 柱形表面张力贮箱, 认为此时仅有一个收集器接触液体, 最小筛网面积即为收集器上筛网的面积, 而对于通道式表面张力贮箱, 剩余推进剂的位置不同会有不同的接触面积, 本文针对这一问题提出了一个求最小接触面积的方法。

2 筛网面积计算模型的建立

推进剂管理装置 (Propellant Management Device——PMD) 的设计中, 有最大加速度、容积、流量、排放效率等几个重要技术要求, 为满足任务要求, 只用考虑最恶劣工况下仍能正常工作即可。对通道式表面张力贮箱, 当推进剂即将耗尽 (即在最小剩余量下)、承受最大加速度、推进剂覆盖最小的筛网面积、推进剂所在的位置远离出液口、流量最大为最差工况。此时仍能正常工作, 并满足所需安全系数, 则 PMD 符合任务要求^[3]。在这种情况下, 推进剂所覆盖的最小筛网面积便是一个设计的重要参数, 如果太小, 必然会引起流经筛网的压降太大, 超出设计范围; 如果太大, 虽然压降很小, 会引起系统质量增大 (因筛网与通道是个结合体)。所以, 接触筛网面积是设计者首先要考虑的。因为接触筛网面积与接触通道面积可以视为一个正比关系 $S_s = jS_t$, j 表示筛网、通道

^{*} 收稿日期: 2002-06-12; 修订日期: 2002-09-02。

作者简介: 李 治 (1977—), 男, 硕士生, 研究领域为表面张力贮箱设计研究。

面积比。所以,我们借助分析接触通道面积分析筛网面积,以下用 s 表示。

如图 1(a) 所示,此方案是由 $g-g$ 为对称轴周向环布的 4 个竖通道(如通道 1, 2), 和一个横通道(如通道 3) 组成。通道 1, 2, 3 上阴影部分是在最差工况下液面所能覆盖的通道面积。加速度方向如图 1(b) 所示,此液面是在加速度较大的情况下所产生的比较平坦的液面,湿润圆就是液面本身, t 为此时的湿润圆。 c 点为湿润圆 t 的圆心。

选用目数为 325×2300 的筛网,最大加速度为 $10^{-2} g$, 要求最大流量为 40 g/s 。湿润圆覆盖通道 1, 2, 3 的面积分别用 s_1, s_2, s_3 表示,总接触面积 $s = s_1 + s_2 + s_3$ 。

图 2 为湿润圆 t 覆盖通道 3 的示意图,是沿 $o-c$ 在通道 3 过球心对称面上的投影直线方向视图。 a 为此视图下椭圆的长轴, b 为短轴, l 为圆心 c 到对称面的垂直距离。如图 2 所示建立 $x-y$ 坐标系。

设 c 与球心的距离 $o-c$ 为 h , $o-c$ 与 $g-g$ 的夹角为 e , 与通道 1 过球心对称面的夹角为 f , 点 c 到 $g-g$ 的垂线与对称面的夹角为 p , 见图 3(a) 示。图 3(a), (b), (c) 列出了 e, f, p, h, r, b, l 之间的关系。则此面积可表示为

$$s_3 = \int_{-w/2}^{+w/2} 2R \arcsin \left| \frac{\sqrt{a^2 - a^2 x^2 / b^2}}{\sqrt{R^2 - (x - l)^2}} \right| dx \quad (2)$$

$$\sin f = \sin e \cdot \sin p \quad a = r \quad b = r \cos f \quad l = h \sin f$$

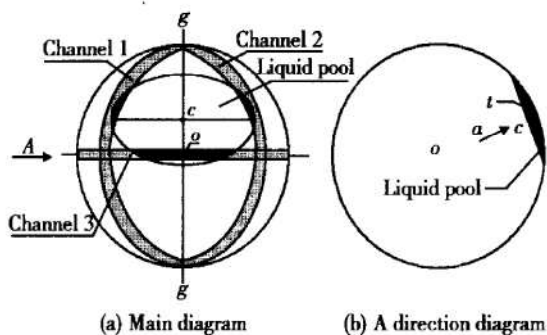


Fig. 1 Location of liquid pool and channel

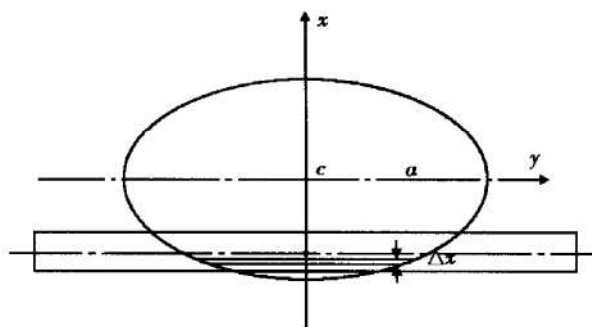


Fig. 2 Area of channel 3 covered by liquid pool

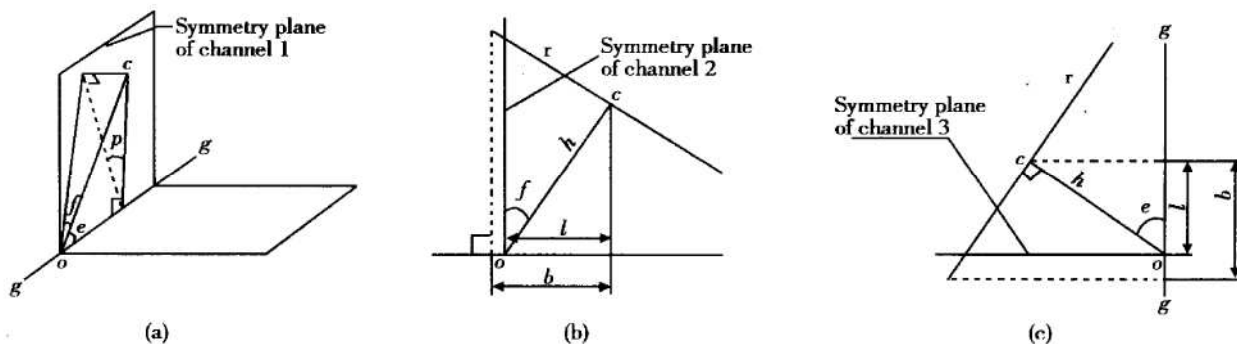


Fig. 3 Relation between f, e, p and l, h, r, b

其中, w 是通道宽, R 是球半径, r 是湿润圆半径。由于积分形式比较复杂,可将其转化为求和形式。把通道划分为 $2n$ 等分,每一等分的长度是 $\Delta x = w/2n$ 。

$$s_3 = \sum_{m=-n}^n 2R \Delta x \arcsin \left| \frac{\sqrt{a^2 - a^2 (l + m \Delta x^2) / b^2}}{\sqrt{R^2 - (m \Delta x^2)}} \right| \quad (3)$$

用同样的方法,可求出 s_1, s_2 。

3 计算结果分析

图 1 中的半径为 250 mm 的球形表面张力贮箱,容积为 64.4 L , 允许最大剩余量为 2% , 工作环境加速度为 $10^{-2} g$ 。由于通道是个结合体,通道宽可以与 PMD 的质量近似地视为一个正比关系,质量 $M = 20 \times 6 \times k$ 。其中, k 是质量常数,单位是 kg 。经计算,在 $g-g$ 轴周向环布 4 个通道时得到的通道宽与最小接触面积的关系并不理想。当通道宽小于 30 mm 时,最小接触面积 0,这显然不能完成正常排放。为了增加最小接触面积,有两个途径,一是增加通道宽,二是增加通道数目,而在设计贮箱 PMD 时有两个原则,一是保证它的质量最小,二是尽可能减少通道的数目(简化结构,减少需要焊接的面积)。此时,增加通道宽达到的效果也很不理想。当通道宽增加到 50 mm 时,接触面积还是只有 1600 mm^2 。注意,此时的质量已经达

到了 $50 \times 6 \times k$, 为原来的两倍多。而根据经验对于 $40g/s$ 流量至少要保证 $3\,000\text{mm}^2$ 以上的接触面积。

图 4 给出了 $g-g$ 轴周向环布 5 个通道时接触面积通道宽的示意图。通道宽保持不变, 增加一个竖着的通道, 最小接触面积就达到了 $3\,300\text{mm}^2$ 以上, 而质量为 $20 \times 7 \times k$, 只比原来增加了 17%, 比 $g-g$ 轴周向环布 4 个通道、通道宽 50mm , 面积 $1\,600\text{mm}^2$ 时少了一半。而且通道宽与最小面积的关系变化非常理想 (通道宽在适当的数值上变化, 接触面积的变化很明显)。图 5 给出了此时润湿圆位置与接触面积的关系。

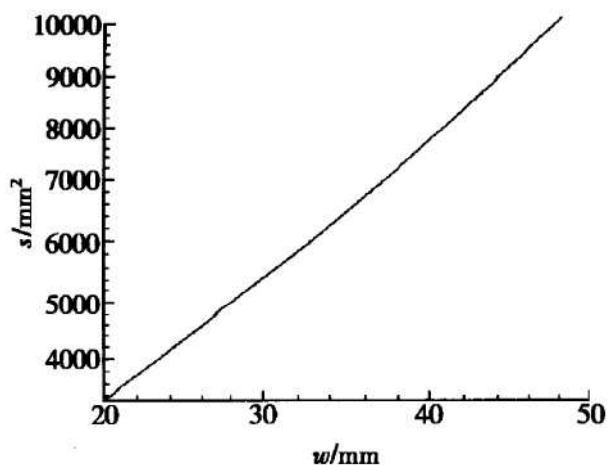


Fig. 4 Relation between channel width and minimum area covered

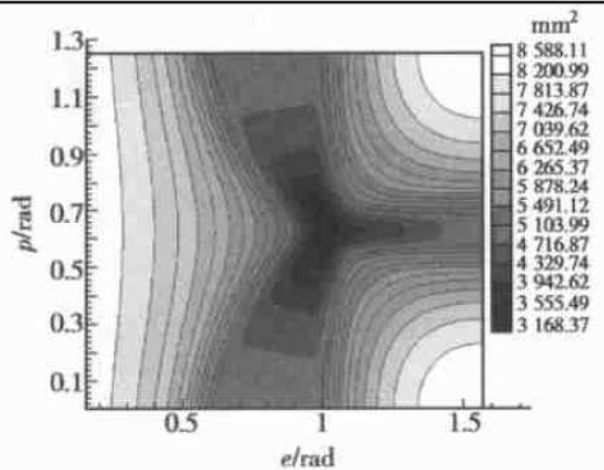


Fig. 5 Relation between covered area and location of the pool

可见, 最小面积出现在 $o-c$ 与通道 1 的夹角为 0.628 , 与轴 $g-g$ 夹角为 1.005 处。此时, 3 个通道都有

被湿润圆覆盖的区域, 经计算, $s_1 = 1\,532\text{mm}^2$, $s_2 = 1\,532\text{mm}^2$, $s_3 = 262\text{mm}^2$ 。这说明, 在最差工况下, 入流点有 3 个。由于 s_3 相对较小, 可以认为只有 2 个入流点。这样不仅可以选定此次设计所需要的通道数, 还确定了入流点的个数和位置及各入流点的面积。为下一步通道流动的网络计算指明了方向, 提供了基础数据。

虽然, 按排放效率是按 98% 进行设计的, 但由于加速度为 $10^{-2}g$ 时, 在接近贮箱壁的区域已经产生了一定曲率的液面^[4], 而设计的时候按平坦的液面处理; 在表面张力贮箱的实际工作中, 通道与球壳间会形成具有蓄留推进剂作用的“外通道”, 有增加入流点筛网浸润面积的作用 (影响的大小与具体的结构有关)。这些因素都使实际工作过程中排放效率远高于 98%。

4 结 论

利用求最小接触面积的方法, 可以使通道宽与筛网接触面积关系清晰地展现在设计者面前, 可以完成对通道式表面张力贮箱的通道数目的确定。并对下一步通道流动的网络计算指明了方向, 确定了在最差工况下筛网接触面积的大小, 此时湿润圆所覆盖各个通道的面积和入流点的个数、位置。加速度为 $10^{-2}g$ 时, 贮箱采用 1 个横向的通道和 5 个沿 $g-g$ 轴周向环布的通道比较合适。

参考文献:

- [1] Giacalone P L. Detail design of the surface tension propellant management device for the intel communication satellite [R]. AIAA 93-1802.
- [2] Debrececi M J, Lay W D, Kuo T K. Design & development of the Intelsat A & N-star propellant tanks [R]. AIAA 95-2527.
- [3] 陈志坚, 孟庆平, 李 建. 表面张力贮箱推进剂管理装置流阻的计算[J]. 上海航天, 2001, (5).
- [4] 魏延明, 潘海林. 表面张力贮箱的微重力实验验证——静平衡与重定位[J]. 航天控制, 1998, (3).

(编辑: 朱立影)