

多孔板泡破点试验研究

宁继荣¹, 苏志一¹, 张涛²

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 根据研制背景需求, 开展了多孔板泡破点特性研究。对多孔板泡破点理论分析方法进行说明, 并采取不同孔径多孔板进行了不同介质泡破点试验。试验结果表明, 各相关因素对泡破点的影响与理论分析一致, 实际测试值和理论计算值误差在 $\pm 15\%$ 以内, 可满足工程应用需求。多孔板可作为毛细元件应用于表面张力贮箱设计。

关键词: 多孔板; 泡破点; 试验; 理论分析

中图分类号: V431-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2017)06-0048-06

Test research on bubble point of perforated plate

NING Jirong¹, SU Zhiyi¹, ZHANG Tao²

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The bubble point character of the perforated plate was explored according to the mission demand. The theoretical analysis method for the bubble point of the perforated plate was expounded. A bubble point test of three kinds of liquids was carried out with several perforated plates with different pore diameters. The test result shows that the influence of the concerned factors on the bubble point is in conformity with that of the theoretical analysis, and the error between the actual test value and the theoretically-calculated value is within $\pm 15\%$, which can meet the requirement of engineering application. The perforated plate can be used for the surface tension tank as a kind of capillary element.

Keywords: perforated plate; bubble point; test; theoretical analysis

0 引言

表面张力推进剂管理装置利用液体与毛细元件或板片相接触的表面张力作用维持液、气分离, 具有无活动部件, 可靠性高, 相容性好, 结构重量轻, 可重复使用等特点, 因此广泛应用于

各种轨道飞行器的推进剂管理^[1]。表面张力推进剂管理装置形式多样, 包括通道、板片、槽、海绵、起动篮及其各种组合^[2-5], 按照基本原理不同可分为一代筛网式表面张力贮箱和二代板式表面张力贮箱^[6-7]。筛网式表面张力贮箱采用筛网作为毛细元件来实现气液隔离。不锈钢筛网由于

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-08-11

基金项目: 国家 863 项目 (2015AA7060210)

作者简介: 宁继荣 (1980—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机推进剂管理系统设计

拉丝及编制工艺性好,可实现精密筛网加工,一直以来广泛应用于表面张力贮箱,但存在与铝合金、钛合金等贮箱壳体材料异种金属焊接问题。随着贮箱减重要求日益苛刻,需寻求铝筛网、钛筛网、多孔板等不锈钢筛网的替代品。在金属薄板上采用机加、激光打孔等方式形成多孔板,具有材料不受限制、泡破点及流阻参数一致性好等优点。尤其随着试验及飞行数据的积累,以及CFD仿真技术的提高,产品精细化设计逐渐得到重视,采用多孔板代替不锈钢筛网是未来表面张力贮箱毛细元件发展的一个重要方向。作为贮箱毛细元件使用,泡破点是多孔板的重要特性,本文对多孔板泡破点开展了试验研究,为多孔板在表面张力贮箱上的应用奠定基础。

1 毛细元件泡破点理论分析及试验方法

由于分子间作用力,任何曲面形状的气液界面都存在一定压差。界面上任何一点的毛细压差可以表示为如下形式^[8]:

$$\Delta p_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中: σ 为液体的表面张力;如图1所示, R_1 和 R_2 为界面上给定点A的曲率半径, R_1 和 R_2 位于两个相互垂直的面。

对于一个平面气液界面, R_1 和 R_2 为无穷大,所以压差为零;对于一个球形的界面, R_1 和 R_2 相等,压差为: $\Delta p_c = \frac{2\sigma}{R_s}$,其中 R_s 为球形曲面半径。

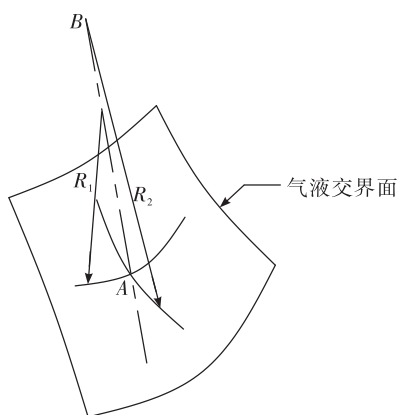


图1 气液界面主曲率半径

Fig. 1 Principal radii of curvature of gas-liquid interface

对于圆形孔,气液界面压差可以用两个参数来表征,一个是圆孔的半径 R ,另一个是液体和固体壁面的接触角 θ 。如图2所示, $R_s = \frac{R}{\cos \theta}$,这样就建立了以下关系式:

$$\Delta p_c = \frac{2\sigma}{R} \cos \theta \quad (2)$$

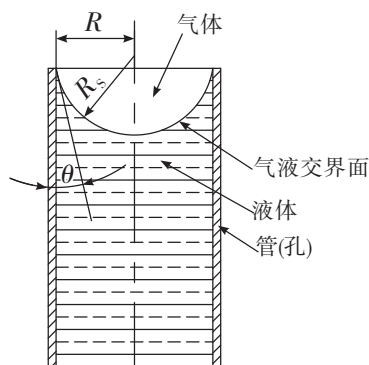


图2 圆形孔气液界面形状

Fig. 2 Gas-liquid interface shape of circular pore

表面张力贮箱依靠设置在其内部的推进剂管理装置实现推进剂蓄留及定向供应,筛网或多孔板等毛细元件是推进剂管理装置发挥作用的核心单元,主要依靠表面张力作用下气液界面可维持的压差来进行工作。该压差可以依据公式(2)进行理论计算,但通常由试验来确定。

进行试验测试时,毛细元件表面覆盖少量液体,从另一面通气,第一个气泡逸出时气液两面临压差即为所求值,该压差称为泡破点。

2 多孔板泡破点试验研究

2.1 试验产品

依据表1尺寸生产5种多孔板,壁厚0.5 mm,孔为圆形,材料为不锈钢1Cr18Ni9Ti,每种规格多孔板生产3件,编号分别为1#、2#和3#。

表1 5种多孔板结构尺寸

Tab. 1 Structure dimensions of five kinds of perforated plates

图号	1-0	2-0	3-0	4-0	5-0
孔径/mm	0.4	0.7	1	1.3	1.5
孔中心距/mm	0.9	1.2	1.5	1.8	2

2.2 试验介质

分别进行无水乙醇、异丙醇及蒸馏水三种介质多孔板泡破点试验。试验时对介质温度进行了测量, 约为 25℃。根据测量温度对介质泡破点的理论值进行了计算, 取 25℃ 下介质的表面张力值, 水表面张力约为 $72.2 \times 10^{-3} \text{ N/m}^{[8]}$; 无水乙醇表面张力约为 $22 \times 10^{-3} \text{ N/m}^{[9]}$; 异丙醇表面张

力约为 $21 \times 10^{-3} \text{ N/m}$; 三种介质均为浸润型液体, 与不锈钢接触角取 0° 。

2.3 试验系统及问题说明

泡破点试验系统如图 3 所示, 其中压力表对气源压力进行测量, 智能压力数显表对泡破点值进行显示。智能压力数显表量程为 10 000 Pa, 测量误差为 $\pm 20 \text{ Pa}$ 。

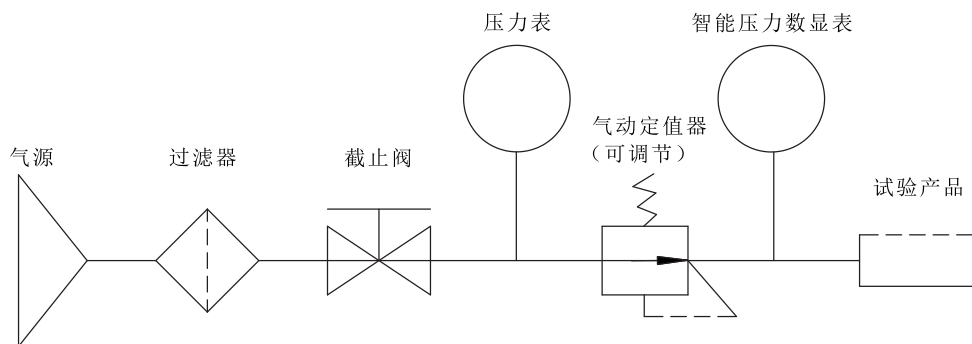


图 3 泡破点试验系统

Fig. 3 Test system configuration of bubble point

多孔板采用如图 4 所示装配密封结构。上端覆盖液体, 下端通气进行泡破点试验。

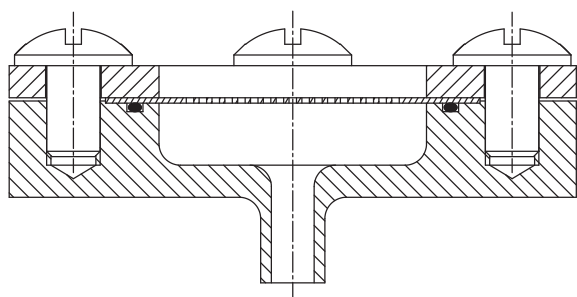


图 4 多孔板装配

Fig. 4 Assembling of perforated plate

3 试验结果及其分析

3.1 试验现象

1) 进行泡破点试验时, 如果将多孔板全部没入介质中, 由于多孔板孔径较大, 介质会在重力作用下通过多孔板进入管路, 介质的波动很大程度影响测量的准确性。为了确保试验的进行, 采取以下方式: 将少量介质置入多孔板上部的小容腔内, 随即开始通气测试, 避免过多液体穿过

多孔板进入试验管路。

2) 蒸馏水表面张力较大, 5 种规格的多孔板泡破点试验均可以依据第 1) 条方法正常进行。

无水乙醇和异丙醇表面张力较小, $\Phi 0.4$ 和 $\Phi 0.7$ 两种规格的多孔板试验依据第 1) 条方法进行; 对于 $\Phi 1$ 多孔板, 一旦通气, 多孔板就有气体逸出, 采取如下试验方法: 降低通气压力, 到某一临界点, 气体不再逸出, 取该临界点压力值为泡破点。 $\Phi 1.3$ 和 $\Phi 1.5$ 多孔板一旦置于介质中或者将介质置于多孔板上部容腔, 介质均在重力作用下沉入多孔板, 气体逸出, 不能测出泡破点。

3) 对于多孔板泡破点试验, 所有孔孔径大小一致, 气泡逸出时, 从所有的孔同时有气泡逸出。不同于筛网泡破时, 气泡从孔径最大处以细丝状逸出。

3.2 试验数据及分析

依据公式 (2), 带入相关值, 计算得到不同多孔板不同介质泡破点理论值, 如表 2 所示。表 3 ~ 表 5 列出了不同介质试验结果及其与理论值的偏差分析。同一件产品进行 3 次测量, 取 3 次测量平均值为最终泡破点值。

表 2 泡破点理论值

Tab. 2 Theoretical values of bubble point

孔径/mm	图号	泡破点值/Pa		
		蒸馏水	无水乙醇	异丙醇
0.4	1-0	720	220	210
0.7	2-0	411	126	120
1	3-0	288	88	84
1.3	4-0	222	68	65
1.5	5-0	192	59	56

分析表 3 ~ 表 5 试验数据：

1) 对于蒸馏水介质，泡破点试验值与理论值的偏差在 -12% ~ +11% 以内；从整体看，剔除个别偏差较大数据，试验值与理论值偏差在 -5% ~ +5.7% 以内。

2) 对于无水乙醇和异丙醇介质，剔除个别异常数据，Φ0.4 和 Φ0.7 多孔板泡破点试验值与理论值的偏差在 0 ~ +14.2% 以内；Φ1 多孔板泡

表 3 蒸馏水泡破点试验结果

Tab. 3 Test result of bubble point of distilled water

孔径/mm	编号	泡破点值/Pa					偏差/%
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	理论值	
0.4	1	630	630	640	633	720	-12
	2	710	730	740	727		+1
	3	680	700	710	697		-3
0.7	1	390	400	380	390	411	-5
	2	390	410	410	403		-2
	3	400	400	390	397		-3.4
1	1	250	260	270	260	288	-9.7
	2	290	290	280	287		-0.3
	3	300	280	260	280		-2.8
1.3	1	210	220	210	213	222	-4
	2	230	230	230	230		+3.6
	3	220	240	240	233		+4.9
1.5	1	180	190	190	187	192	-2.6
	2	200	210	200	203		+5.7
	3	210	210	220	213		+11

表 4 无水乙醇泡破点试验结果

Tab. 4 Test result of bubble point of absolute ethyl alcohol

孔径/mm	编号	泡破点值/Pa				理论值	偏差/%
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值		
0.4	210	220	230	220		220	0
	2	230	230	230	230		+4.5
	3	230	230	230	230		+4.5
0.7	1	130	130	130	130	126	+3.2
	2	140	140	140	140		+11
	3	135	135	135	135		+7
1	1	50	60	70	60	88	-31
	2	50	60	60	60		-31
	3	60	60	60	60		-31

表 5 异丙醇泡破点试验结果
Tab. 5 Test result of bubble point of isopropyl alcohol

孔径/mm	编号	泡破点值/Pa				理论值	偏差/%
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值		
0.4	1	220	210	210	213	210	1.4
	2	220	210	220	217		3.3
	3	220	220	220	220		4.7
0.7	1	140	130	135	135	120	+12.5
	2	125	130	125	127		+5.8
	3	135	140	135	137		+14.2
1	1	60	60	70	63	84	-25
	2	50	50	60	53		-37
	3	50	50	60	53		-37

破点试验值与理论值的偏差为 -37% ~ -25%。

对试验数据进行分析,蒸馏水由于其表面张力较大,在现有试验设备及重力场条件下,能够确保 5 种不同规格多孔板试验均正常进行。从试验数据来看,实际试验结果与理论计算值偏差在 ±12% 以内,二者一致性较好;异丙醇和无水乙醇表面张力较小,Φ0.4 和 Φ0.7 多孔板泡破点试验值与理论值的偏差在 ±15% 以内,一致性程度较好;试验数据具有较高的可信度。异丙醇和无水乙醇 Φ1 多孔板泡破点试验值与理论值的偏差为 -37% ~ -25%,二者差异较大,分析认为,主要原因为质量力与表面张力比值较大,以及在重力场中进行试验固有的干扰因素,该试验数据不可信,现有试验方法不适用于低泡破点测量,一定程度上也意味着较大孔径的多孔板作为毛细元件应用存在问题。

从工程应用的角度考虑,包容测量系统的偏差,可认为多孔板泡破点试验值和理论值的偏差在 ±15% 以内。

4 结论

- 1) 多孔板所有孔径大小一致,泡破点试验气泡逸出时,气泡同时从各个孔中同时逸出;
- 2) 孔径越小,表面张力越大,泡破点值越大,与理论公式分析相一致;
- 3) 多孔板泡破点试验值和理论值偏差在

±15% 以内,可满足工程应用需求。

在显微镜下对本文试验研究采用的多孔板进行观察,发现孔边缘存在较多的毛刺,可能对试验值和理论值的一致性存在影响。后续可采用精细加工方法开展多孔板加工,同时精确测量试验介质的物性参数,优化试验系统,进一步开展理论分析和试验对比研究,以减小二者之间的偏差,实现工程应用精细化设计。

参考文献:

[1] ROLLINSJ R, GROVE R K, JAEKLE D E, Jr. Twenty three years of surface tension propellant management system design, development manufacture test and operation: AIAA85-1199 [R]. Reston: AIAA, 1985.

[2] JKEKLED E, Jr. Propellant management device conceptual design and analysis: galleries: AIAA97-2811 [R]. Reston: AIAA, 1997.

[3] JKEKLED E, Jr. Propellant management device conceptual design and analysis: vanes: AIAA91-2172 [R]. Reston: AIAA, 1991.

[4] JKEKLED E, Jr. Propellant management device conceptual design and analysis: sponges: AIAA93-1970 [R]. Reston: AIAA, 1993.

[5] JKEKLED E, Jr. Propellant management device conceptual design and analysis: traps and troughs: AIAA95-2531 [R]. Reston: AIAA, 1995.

- [6] 李永,潘海林,魏延明. 第二代表面张力贮箱的研究与应用进展[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 503-507.
- [7] 穆小强,陈祖奎. 竖管-叶片式表面整理管理装置的设计与分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(1): 15-18.
- MU Xiaoqiang, CHEN Zukui. Design and analysis for standpipe and its vane surface tension management device [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(1): 15-18.
- [8] 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(01): 29-32.
- [9] KITB, EVERED D S. Rocket propellant handbook [M]. New York: The Macmillan Company, 1960.

(编辑:陈红霞)

(上接第6页)

图中火焰面用 OH 聚合物的等值面表示。二次燃烧过程释放大量的热,可能会引起引射器不启动^[10]。

3 结论

论述了液体火箭发动机试验过程中富燃燃气常用的安全处理方式。随着富燃气体的排放流量的增大,富燃气体的处理方式经历了排空(吹除)到主动或被动燃烧的过程。当前,我国由于发动机推力量级相比航天强国来说要小的多,试验时产生的富燃气体排放流量也远小于它们,因此富燃气体处理的能力和手段也相对简单。随着百吨级以上氢氧发动机研制需求的提出,有必要借鉴国外先进的富燃燃气处理方式为大推力氢氧发动机试验台的设计提供技术积累。

参考文献:

- [1] 符锡理. 国外火箭技术中氢的安全排放与处理[J]. 国外导弹与宇航, 1981(12): 23-27.
- [2] LAPIN A. Hydrogen vent flare stack performance [J]. Advances in cryogenic engineering, 1967, 12: 198-206.
- [3] ГАИЕЕВ А Г. 火箭发动机研制与试验中的生态安全问题[M]. 莫斯科: 莫斯科航空学院, 2006.
- [4] BARTT H, JOHN L. Hydrogen reclamation and reutilization; NP-2009-09-00164- SSC [R]. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [5] MENDEZ G, DRAKE R, CARLILE J. Large liquid engine test facility; AIAA 2001-0608 [R]. Reston: AIAA, 2001.
- [6] THOMPSON W R, BONCORE C S. Design and development of a test facility for the disposal of hydrogen at high flow rates [J]. Advances in cryogenic engineering, 1967 (12): 207-217.
- [7] 何常勇. 某新型靶场液氢排放燃烧系统设计构想[J]. 低温工程, 2010(6): 41-45.
- [8] SMITH R K, CHRISTENSEN E R, WAGNER D A. Development of a dual propulsion test capability for the RS68 engine at NASA Stennis Space Center; AIAA 99-2166 [R], Reston: AIAA, 1999.
- [9] SAUNDERS G P. Design, activation, and operation of the J-2X subscale simulator; AIAA 2009-5098 [R]. Reston: AIAA, 2009.
- [10] VINEET A, ASHVIN H, ANDREA Z, et al. Computational analyses in support of sub-scale diffuser testing for the A-3 facility Part 2: unsteady analyses and risk assessment; AIAA 2009-5205 [R]. Reston: AIAA, 2009.

(编辑:陈红霞)