

过氧化氢/煤油发动机试验中压差式 孔板流量计的设计

王朋军

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 论述了液体火箭发动机用过氧化氢作为推进剂进行试验的过程中流量测量可采用的方式, 提出了压差式孔板流量测量和角接式取压结构在过氧化氢/煤油发动机试验中的应用技术, 针对过氧化氢/煤油发动机试验中流量测量提出了研究需要解决的关键技术。

关键词: 液体火箭发动机; 过氧化氢/煤油; 孔板流量计

中图分类号: V434.3

文献标识码: B

文章编号: (2005)04-0050-04

Design and application of differential pressure orifice flowmeter in H_2O_2 /kerosene engine test

Wang Pengjun

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The measuring methods used and the key technologies to be resolved in the flowrate measurement of H_2O_2 /kerosene rocket engine test are discussed in the paper. It is presented that the differential pressure orifice flowmeter and the angle joint differential pressure measuring structure used in the test are the applied technologies of H_2O_2 /kerosene engine test. Critical technologies for the flowrate measurement of H_2O_2 /kerosene engine test are also presented.

Key words: liquid rocket engine; H_2O_2 /kerosene; orifice flowmeter

1 引言

在过氧化氢/煤油发动机试验中, 因为过氧化氢的特殊性质, 决定了试验系统在组建时对管道、阀门等组件材料有特殊要求。又因发动机为挤压

式工作, 因此, 在流量计选材时必须从过氧化氢的相容性和强度两方面同时考虑。

因为 1Cr18Ni9Ti 与过氧化氢为二级相容, 同时, 它在材料方面具有很好的综合力学性能, 可用于高压挤压式试验系统中。因此在流量计选材

收稿日期: 2005-03-20; 修回日期: 2005-05-24。

作者简介: 王朋军(1974—), 男, 工程师, 研究领域为发动机试验。

时可采用 1Cr18Ni9Ti 材料。

在用于过氧化氢系统时，常规的流量计有涡轮流量计、靶式流量计、质量流量计等。但其测量方式、密封形式及材质方面都因为与过氧化氢出现不同程度的不相容现象而无法正常使用。因此，在过氧化氢/煤油发动机试验的研制过程中，必须尽快地解决流量的测量问题，同时，应该尽可能提高流量计的安全性和可靠性研究工作。

孔板流量计的结构简单，材质方面可完全采用与过氧化氢相容的材料，密封的实现也较为容易，同时设计压力在选择时无局限性。孔板流量计在实际使用当中，通过对孔板前、后压力的测量来转化成流量的测量。因此压力的获得应力求准确，在设计上采用了角接式取压结构。

压差式孔板流量计适用于圆管流的流量测量。在管内设置孔板，当有流体流过时，在其上、下游侧之间就会产生静压差。在有关参数已知的条件下，该静压力与流体流量之间有确定的数值关系（详见孔板计算）。

2 孔板流量计的设计结构

2.1 孔板的技术要求

孔板的结构如图 1 所示。孔板的上游端面应是平整的，其表面任何两点的连线对垂直于中心线平面的斜率应小于 1%。此时，可忽略孔板表面上不可避免的、肉眼看不见的局部缺陷。在与孔板同心的直径不小于 $1.5d$ 的圆的范围内，应保证孔板上游端面的粗糙度准则 $Ra \leq 10^{-4}d$ 。下游端面应是平整的，而且平行于上游面。

孔板厚度 E 、锐孔厚度 e 及斜角 F 的确定如下：

(1) 锐孔厚度 e 应在 $0.005D$ 和 $0.02D$ 之间，在锐孔上任何点所测得的 e 值之间的差不得大于 $0.001D$ 。

(2) 孔板厚度 E 应在 e 和 $0.05D$ 之间，在孔板上任何点所测得的 E 值之间的差不得大于 $0.001D$ 。

(3) 如果孔板厚度 E 超过了锐孔厚度 e ，则孔板下游应做成倾斜面，斜面应加工得光滑。斜面角应在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间。

(4) 边缘 G、H、I 应是尖锐的既无划痕也无

毛刺。

锐孔应是圆筒形的，并垂直于上游端面。孔径 d 值应至少取四个不同测量方向直径的平均值。这四个直径应按彼此大致相等的角距离分布在几个轴向平面内。任何孔径的单测值与平均直径之差不应大于 0.05%。

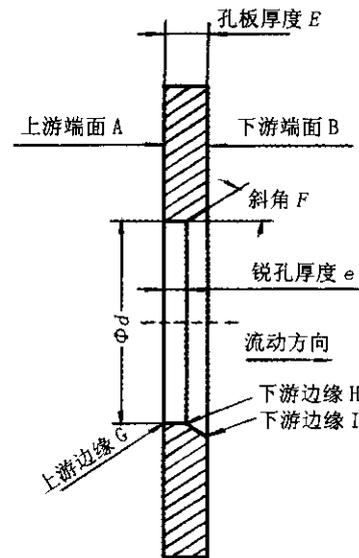


图 1 孔板结构示意图

Fig.1 Diagram of the orifice configuration

2.2 孔板流量计的安装

在实际的设计当中，孔板应设计为可拆卸式结构，一种孔板不可能适应任何工况。即在所有的工作区间，孔板的流出系数并非恒定不变。在孔板的设计区内工作时，流量的测量值可信度较高，在非设计区内工作时，流量的测量值可能会出现失真现象。按照试验时贮箱的工作压力对法兰进行结构设计。连接形式见图 2。

在使用中，孔板结构可设计为放大状态下的密封垫。两头采用活套法兰结构，与管路连接，中间为起密封作用的孔板。在孔板的前、后分别设置取压孔，以此获得压力参数。用靠肩圈和孔板在对接时形成的内腔来实现取压环的结构。

这种结构在完成有效密封的前提下，使角接式取压结构在连接的过程中得到了实现。从而提高了孔板流量计安装和使用的高可靠度要求。

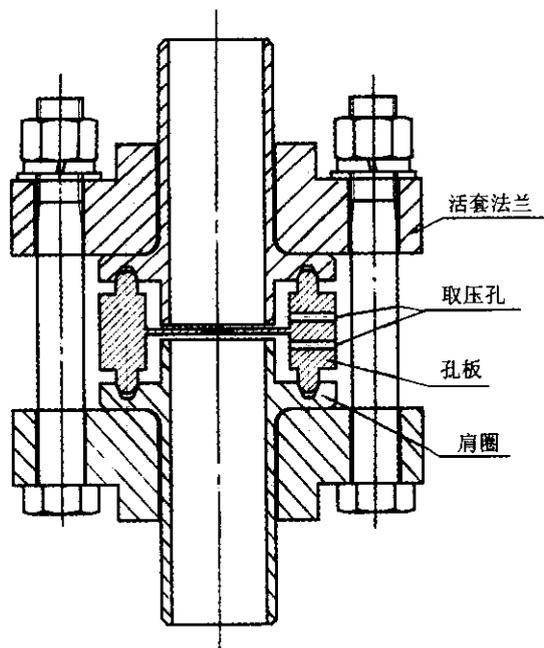


图2 压差式孔板流量计安装结构示意图

Fig.2 Block diagram of the differential pressure orifice flowmeter

2.3 角接取压形式

孔板流量计在实际的使用过程中，不但应实现管路的连接和密封，同时应满足角接式取压结构的设计要求。

取压的方式较多，将孔板用于流量测量时，为降低流量的测量误差，采取了角接取压结构。角接取压的结构形式见图3所示。

取压口的中心线与孔板的相应端面之间的间距等于取压口直径的一半或等于取压口本身宽度之半，这样，穿透管壁的取压口与孔板两端面正好取平。图3参数的取值如下： a 为环隙宽度，对任意 \hat{a} 值在测量清洁流体的流量时， $1\text{mm} < a < 10\text{mm}$ ； C 和 C' 为上游和下游的环的长度，不应大于 $0.5D$ ； f 为厚度，应大于或等于环隙宽度 a 的两倍； $g \times h$ 为环室的横截面积，应大于或等于连接环室与管子内部的开口总面积的一半； j 为直径，连接环室和二次装置的取压口是管壁取压，穿透处呈圆形， j 应在 $4 \sim 10\text{mm}$ 之间。

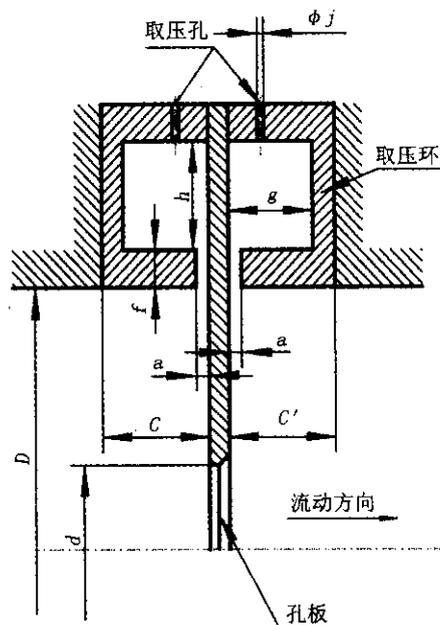


图3 角接式取压的结构形式示意图

Fig.3 Angle joint differential pressure structure diagram

3 压差式孔板流量计的设计计算

流量的计算公式如下：

$$q_m = CE \frac{\delta}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho}$$

其中

$$C = 0.5959 + 0.0312b^{2.1} - 0.184b^8 + 0.0029b^{2.5} \cdot \left[\frac{10^6}{\text{Re}} \right]^{0.75} + 0.09L_1b^4(1-b^4)^{-1} - 0.0337L_2'b^8$$

$$E = (1 - b^4)^{1/2}$$

$$e = 1 - (0.41 + 0.35b^4) \frac{\Delta p}{k p_1}$$

式中， C 为流出系数； $\text{Re} = \frac{wD}{\nu}$ ，为管道雷诺数；

w 为管道横截面积上流体运动的平均速度， m/s ； d 为孔板孔径； D 为管道直径； ν 为流体的运动粘性系数； $L_1 = l_1/D$ 是上游取压口到孔板上游端面的距离除以管径的商； $L_2 = l_2/D$ 是下游取压口到孔板下游端面的距离除以管径的商（角接取压时 L_1 和 L_2 取0）； $\hat{a} = d/D$ ，为直径比； $\bar{n} = 1390 \text{kg/m}^3$ ，为过

过氧化氢的密度; E 为渐近速度系数; e 为膨胀系数; Δp 为孔板上、下游侧之间的压差; p_1 是上游侧压力; k 为等熵系数。

在已知各项设计参数如质量流量 q_m 、压差 Δp 、上游侧压力 p_1 及推进剂各种性能参数的情况下, 代入流量计算公式, 反求 β 或 d , 既可确定孔板的尺寸。

在使用工质为过氧化氢时, 流量计算的公式可简化为:

$$q_m = (0.5959 + 0.0312 \mathbf{b}^{2.1} - 0.184 \mathbf{b}^8 + 0.0077 \mathbf{b}^{2.5}) \cdot \left[1 - (0.41 + 0.35 \mathbf{b}^4) \frac{\Delta p}{k p_1} \right]^{1/2} \cdot \frac{\delta}{4} D^2 \mathbf{b}^2 \sqrt{2 \Delta p \cdot r}$$

表 1 是在预设的三种设计状态下 (其余参数已知) 计算程序得到的孔板结构尺寸。

表 1 孔板设计计算结果

Tab.1 Calculation results of the orifice design

工况	q_m /(kg/s)	p_1 /MPa	p /MPa	孔板内径 /mm
1	3.6	5	1	12.42
2	7.2	5	1	17.49
3	14.4	11	2	20.65

4 压差式孔板流量计的设计验证

试验准备阶段, 按上述工况 2 和工况 3 分别计算的结果制作孔板各一个, 参照要求的流量, 在冷调时, 流量接近工况 3 状态。因此, 在试验系统上安装这种设计状态的孔板, 冷调时系统上串接一涡轮流量计, 用它来校准孔板流量计。通过多种流量的调整发现, 在小流量和大流量两种状态下工作时, 孔板的流出系数差异较大。在额定流量下进行三次调试 (额定流量接近设计流量), 流出系数为恒定值。这样, 也进一步验证了孔板流量计设计的有效性和准确性。同时, 该孔板流量计参加了两次过氧化氢/煤油试验, 对该种流量计结构设计的可行性也得到了验证。

参考文献:

- [1] 吕崇德. 热工参数测量与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.
- [3] 李翼祺, 马素珍. 流体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [4] 窦昱. 涡轮泵连动试验调整计算及结果分析[J]. 火箭推进, 2004, 30(6).

(编辑: 马 杰)

(上接第 40 页)

- [7] Karabeyoglu M A, Ziliac G, Cantwell B, De Zilwa S R N, Castellucci P. Scale-up tests of high regression rate liquefying hybrid rocket fuels[R]. AIAA 2003-1162.
- [8] Kilic S, Karabeyoglu A, Stevens J, Cantwell B. Modeling the slump characteristics of the hydrocarbon-based hybrid rocket fuel[R]. AIAA 2003-4461.
- [9] Karabeyoglu A, Ziliac G, Castellucci P, Urbanczyk P, Stevens J, Inalhan G, Cantwell B J. Development of high-burning-rate hybrid-rocket-fuel flight Demonstrations [R]. AIAA2003-5096.
- [10] Pelt D V, Hopkins J, Skinner M, Buchanan A., Gulman R, Chan H, Karabeyoglu A, Cantwell B. Overview of a 4-in OD paraffin-based hybrid sounding rocket program[R]. AIAA2004-3822.

(编辑: 陈红霞)