

燃气发生器氢腔均流改进设计及试验研究

王晓丽

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 为解决某型号液体火箭发动机燃气发生器热试车后氢腔内过滤网和骨架的破损问题, 在不改变燃气发生器功能和性能、不影响发动机其它系统功能的前提下, 设计了七种均流替代方案。采用 Navies-Stokes 方程数值模拟七种方案的氢腔内流动状态, 计算分析了各种方案的氢喷嘴流量的均匀性, 综合考虑承载能力, 选定了一种有较好均流效果的均流环。对改进后的燃气发生器进行了液流试验和热试车考核。液流试验表明, 改进后的燃气发生器氢路压降与改进前吻合, 热试车后均流环无异常。分析和试验验证表明, 新设计的均流环能起到均匀氢喷嘴流量的作用, 提高了抵抗起动压力峰的能力, 增加了燃气发生器的工作可靠性。

关键词: 液体火箭发动机; 燃气发生器; 氢腔流动分析; 均流环设计

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0038-05

Improved current-sharing design and experimental investigation for hydrogen chamber of gas generator

WANG Xiao-li

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To solve the problem of cracking of the filter-screen and skeleton within hydrogen chamber of the gas generator after test of certain liquid rocket engine, seven current-sharing schemes are designed on the premise that the function and performance of the generator are not reduced. Through the calculation, analysis and simulation of the fluid dynamic status, flow uniformity and intensity of the seven design schemes, a current-sharing design with better structural intensity is chosen. Hydraulic test and test-driving are carried out for the modified generator successfully. The results manifest that the novel current-sharing design can play a role of sharing the flux of the hydrogen injector elements, enhance the capability of anti-startup pressure peak, and consequently, improve the stability of the generator.

Keywords: liquid rocket engine; gas generator; hydrogen chamber CFD; current-sharing design

收稿日期: 2010-11-11; 修回日期: 2011-01-06

作者简介: 王晓丽 (1983—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机推力室设计

0 引言

燃料氢在燃气发生器氢腔内的不均匀流动会导致各个氢喷嘴的流量不均^[1]，使得发生器燃烧室混合比不均匀，最终会影响燃气温度的均匀性甚至出现局部热线^[2]，因此合理设计氢腔均流方案十分重要。长期以来，某型号燃气发生器氢腔内的流动均匀性都是依靠防止多余物进入的过滤网来实现的，因为燃气发生器的起动压力峰问题^[3-4]，氢腔内的过滤网以及固支骨架经常在试车过程中出现破损现象。

为了改进氢腔的均流设计，本文考虑了七种

均流方案。采用 CFD 方法对各均流方案进行了深入分析，通过分析最后选定了一种方案，并进行了液流试验和热试车考核。

1 均流改进设计方案

因已在燃气发生器的上游增加了过滤器，防止多余物进入氢腔，因此改进方案只考虑进入氢喷嘴流量的均匀性即可。为了保证改进后的结构不影响发动机其它系统的功能和性能，燃气发生器氢路的压降尽量保持和改进前一致。表 1 为几种均流改进方案。图 1 和图 2 分别为 mh2 和 mh5 的方案示意图。

表 1 均流改进方案

Tab. 1 Improved schemes of current-sharing loop

方案代号	mh1	mh2	mh3	mh4	mh5	mh6	mh7
整体描述	无均流环	1/4 骨架 - 来流对孔	1/4 骨架 - 来流对实体	全骨架	均流环 1 (1/2 周)	均流环 2 (整周)	均流环 3 (1/4 周)
孔尺寸	-	6×6	6×6	6×6	Φ3.8	Φ2	Φ5
孔阵列	-	4×2	4×2	16×2	18×3	54×5	6×2

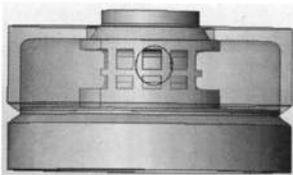


图 1 1/4 骨架-来流正对孔

Fig. 1 A quarter skeleton-incoming flow against hole

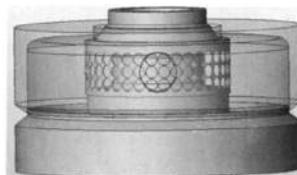


图 2 均流环 1 (1/2 周)

Fig. 2 Current-sharing loop 1 (1/2 cycle)

2 计算模型

2.1 几何模型和计算网格

燃气发生器氢腔均流改进方案计算模型具有相似性，本文仅以其中某方案为例加以说明。氢腔的主要部件为：盖板、均流环、喷注器和扰流环（图 3）。其几何模型和计算网格均采用 Gambit 软件逐个建立，采用四面体非结构流场计算网格。为了保证每个氢喷嘴内部小通道网格高质

量，在建立网格时进行了局部加密（详见图 4）。

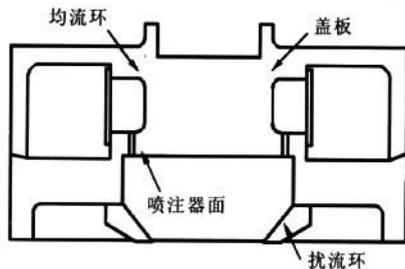


图 3 燃气发生器氢腔示意图

Fig. 3 Schematic of gas generator hydrogen chamber

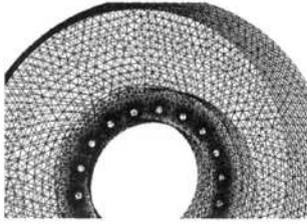


图4 氢喷嘴网格示意图

Fig. 4 Schematic of grids for hydrogen injector elements

2.2 控制方程

在氢腔中液氢的流动为不可压粘性流, 需要求解质量守恒方程和动量守恒方程 (坐标系中 i 方向):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: p 为静压; τ_{ij} 为应力张量; ρg_i 为 i 方向上的重力体积力。在燃气发生器中液氢进出口的净落差很小, 因此忽略质量力^[9]。

2.3 湍流模型

因七种方案仿真时都是按照液氢是不可压流体来计算, 且不考虑源项, 因此本文采用的标准 $k-\varepsilon$ 模型是:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: 湍动粘度 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; G_k 为湍动能 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 为经验常数; σ_k 、 σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数; 根据 Launder 等的推荐值及后来的试验验证, 模型常数 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 分别取值为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3^[9]。

2.4 边界条件

本文采用质量流量进口条件, 进口速度方向垂直于进口面, 进口处参考压强取实际工作压力; 出口指定为出流条件; 壁面采用无滑移条件。

3 数值仿真分析与设计改进

3.1 流场与强度计算分析

利用上一节建立的模型进行了七种均流方案的流场仿真, 其中氢入口约在喷嘴 6 和喷嘴 7 之间。图 5 是七种方案的 18 个氢喷嘴流量的分布图; 表 2 是七种方案的仿真计算流量最大值比较。

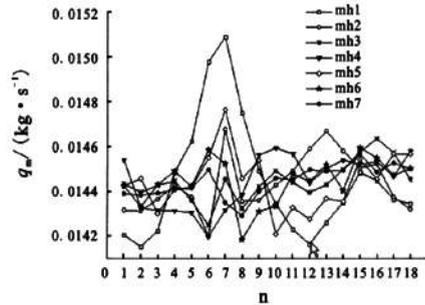


图5 七种方案氢喷嘴流量分布图

Fig. 5 Flux distribution of hydrogen injector elements of seven design schemes

由图 5 和表 2 可以得出以下结论:

1) 由 mh2 和 mh3 的分布曲线可以看出: 在相同的结构情况下, 来流正对实体处 (mh3) 比来流正对开孔处 (mh2) 有更好的均流效果;

2) 由 mh4 和 mh2、mh3 的分布曲线可以看出: 在相同的孔结构下, 1/4 周和整周的结构数值仿真结果差距不大; 为了减少仿真时的计算网格进而减少计算时间, mh5 和 mh7 的仿真结果在一定程度上能够代表其相同的孔结构的整周均流环的仿真结果; 根据经验可知整周结构的抗载能力更强, 所以后续的均流环都是整周结构;

3) mh4、mh6、mh7 结果都比较理想, 各喷嘴流量变化不大, 三种方案均流效果都较好。

由冲击强度分析经验可知圆孔比方孔的均流结构抗载能力强, 整周的均流结构比非整周的结构抗载能力强^[9]; 喷注器氢喷嘴直径为 1.7, 为使均流环兼具过滤网部分功能, 将 mh6 的孔径改为 $\Phi 1.7$ 。下面给出了 $\Phi 5$ 和 $\Phi 1.7$ 两种均流环在脉宽为 10 ms 峰值为 10 MPa 压力脉冲作用下的径向、轴向、环向位移及应力应变响应统计结果^[9]。

由表 3、表 4 可知，1) 均流环的最大变形及应力响应出现在峰值时刻 ($t=5\text{ ms}$)；2) $\Phi 5$ 结构与 $\Phi 1.7$ 结构相比更易造成应力应变集中现象。因此最后选取 $\Phi 1.7$ 均流环应用在实际产品中。

表 2 仿真计算最大值比较

Tab. 2 Values of CFD simulation

方案代号	mh1	mh2	mh3	mh4	mh5	mh6	mh7
整体描述	无均流环	1/4 骨架- 来流对孔	1/4 骨架-来 流对实体	全骨架	均流环 1 (1/2 周)	均流环 2 (整周)	均流环 3 (1/4 周)
流通面积/mm ²	1733.28	1539.96		960	1478.75	847.8	1535.46
流量最大值 /kg·s ⁻¹	0.01509	0.01468	0.01464	0.01459	0.01476	0.01460	0.01457
偏离平均值%	4.47	1.62	1.33	1.03	2.22	1.04	0.84
流量最小值 /kg·s ⁻¹	0.01415	0.01420	0.01425	0.01420	0.01421	0.01418	0.01429
偏离平均值%	-2.02	-1.70	-1.34	-1.72	-1.63	-1.80	-1.05
流量均值 /kg·s ⁻¹				0.01444			
混合比最小值	0.8615	0.8857	0.8882	0.8908	0.8805	0.8907	0.8925
混合比最大值	0.9185	0.9156	0.9122	0.9157	0.9149	0.9165	0.9096
混合比均值				0.9			

表 3 两种均流环结构的最大位移响应统计

Tab. 3 Results of displacement response simulation for two kinds of current-sharing loops

时间/ms	最大径向位移/mm		最大轴向位移/mm		最大环向位移/mm	
	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$
5	4.05E-2	4.52E-2	9.83E-4	2.82E-3	2.18E-3	4.59E-3
10	8.05E-3	1.44E-2	-6.48E-4	2.47E-3	9.58E-4	2.85E-3

表 4 两种均流环结构的最大应力及应变响应统计

Tab. 4 Results of stress and strain response simulation for two kinds of current-sharing loops

时间/ms	最大轴向应力 /MPa		最大环向应力 /MPa		最大剪应力 /MPa		最大等效应力 /MPa		最大等效塑性应变	
	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$	$\Phi 1.7$	$\Phi 5$
5	-316.0	-321.8	326.8	325.7	-125.1	-131.8	286.7	292.6	0.76%	1.0%
10	-143.6	117.4	-233.7	-152.0	-55.2	-35.5	230.7	151.8	0.76%	1.0%

3.2 设计细化

在选定均流环结构后，因均流环是对接焊接而成，因此焊缝与喷注器（有 18 个氢喷嘴）、氢

进口的相对位置仍需进一步细化。

任意选定喷注器与氢进口的某装配角度，计算得到 18 个氢喷嘴流量最大相对偏差为 1.25%；

再旋转 10° (18 个氢喷嘴之间的间距是 20°) 后对流量均匀性的影响不大, 最大相对偏差为 1.48%, 据此得出结论: 喷注器与氢进口的相对位置对流量均匀性的影响不大。

对接焊缝正对氢进口更有利于液氢分流, 将对对接焊缝偏移 2 mm 对流量均匀性的影响相对较大, 最大相对偏差增至 1.86%, 因此为保证均流环的均流效果, 焊缝与氢进口的相对位置须严格限定。

4 试验验证

4.1 液流试验

在设计均流环时, 使其流通面积与原结构的流通面积相当, 氢路压降的设计值也保持不变, 保证发生器氢路压降的一致性, 以避免影响发动机其他系统。

对改进后的 23 台全尺寸燃气发生器进行液流试验 (试验以水为介质), 试验测量了氢路压降,

图 6 列出了改进后的氢路压降与设计值之间的关系。由图可知: 改进后的燃气发生器氢路压降变化趋势较稳定, 数值一致性很好, 且都在设计值范围内。

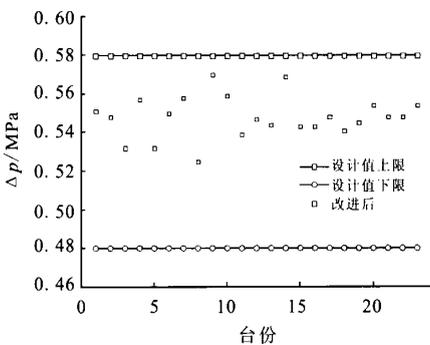


图 6 改进后氢路压降分布图

Fig. 6 Pressure drop distribution of improved hydrogen injector elements

4.2 热试车考核

改进后的 1 台燃气发生器成功参加长程热试车考核 (10 次起动共 2500 s), 经过分析试车参数可知, 改进后的燃气发生器与改进前性能一致, 燃气发生器工作正常。热试车后对其进行内窥检查, 发现氢腔内的均流环完好。

4.3 飞行考核

截止到目前, 改进后的燃气发生器已经成功参加了 5 次飞行考核。

5 结束语

1) 改进设计后的均流环能起到均匀氢喷嘴流量的作用和部分过滤功能;

2) 不影响燃气发生器的功能和性能; 不影响整个发动机系统和总装的功能和性能;

3) 提高了燃气发生器抵抗起动压力峰的能力, 提高了整个发动机的工作可靠性。

参考文献:

- [1] SANFORD Gordon, BONNIE J McBeide. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions, rocket performance, incident and reflected shocks and Chapman-Jouguet detonations, N73-17724 [R]. [S. l.]: [s. n.], 1973.
- [2] NICHOLLS J A, WILKINSON H R, MORRISON R B. Intermittent detonation as a thrust producing mechanism [J]. Jet Propulsion, 1957, 27: 534-541.
- [3] 陈旭扬. 燃气发生器起动压力峰研究[J]. 航天推进与动力, 2007, 4(1): 1-4.
- [4] 李清廉, 李庆, 王振国. 氧气/醇类燃气发生器起动过程试验研究[J]. 火箭推进, 2010, 36 (1): 13-18.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 杨青真, 王红梅, 张银波. 液体火箭发动机氧腔流动分析及均流板设计研究[J]. 宇航学报, 2005, 6 (26): 698-701.
- [7] 石亦平, 周玉蓉. Abaqus 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(编辑: 王建喜)