

某氢氧发动机推力室氢喷嘴烧蚀问题仿真分析

宣智超, 谢 恒, 袁 宇
(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 氢氧火箭发动机推力室内的喷注均匀性不但影响燃烧效率, 还有可能影响喷嘴、面板及内壁等结构的可靠性。针对某型氢氧火箭发动机推力室多次出现固定位置两个氢喷嘴的烧蚀问题, 采用 CFD 方法模拟了此发动机氢头腔及喷嘴的内部流动。通过分析流动特性, 并给出量化对比结果, 得出了以下两个结论: 一方面此发动机推力室喷注面氢流量分布不均, 而多次产生烧蚀的喷嘴是所有喷嘴中氢流量最小的两个; 另一方面氢喷嘴出口环形间隙内流量分布不均, 在所有喷嘴中产生烧蚀的喷嘴出口流速分布不均匀度是最高的。这两个因素共同作用下导致喷嘴局部混合比过高, 是造成固定位置喷嘴局部烧蚀的重要原因。

关键词: 氢头腔; 氢喷嘴; 烧蚀; 流场均匀性

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0006-06

Simulation analysis of hydrogen nozzle ablation problem existing in thrust chamber of a hydrogen oxygen engine

XUAN Zhichao, XIE Heng, YUAN Yu
(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: The injection uniformity in thrust chamber of hydrogen oxygen rocket engine not only affects the combustion efficiency, but also may affect the reliability of nozzle, panel and inner wall structure. Aiming at the phenomenon that two hydrogen nozzles at a fixed position of a certain hydrogen oxygen rocket engine were ablated repeatedly, CFD method is used to simulate the inner flow of hydrogen head chamber and nozzle of this engine. Two conclusions for the ablation phenomenon were obtained on the basis of analysis of flow characteristics and quantized contrast of the results. The first conclusion is that the hydrogen flow distribution is uneven in the thrust chamber and the ablated nozzles have smallest hydrogen flow among all the nozzles. The second conclusion is that there is uneven flow distribution in the annular space at outlet of hydrogen nozzle, and the ablated nozzles have highest unevenness of velocity distribution at their outlets. The combined action of these two factors can cause that the local mixing ratio of the two nozzles is too high, which is the important reason that the local ablation has occurred to the nozzles at the fixed position in the thrust chamber.

Keywords: hydrogen head chamber; hydrogen nozzle; ablation; flow field uniformity

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-07-16

作者简介: 宣智超 (1986—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机推力室设计

0 引言

氢氧发动机推力室工作在高温高压环境中, 若喷注器的喷注不够稳定和均匀 (或偏离设计的流量分布), 影响燃烧效率的同时, 会造成局部高温直接影响内壁、喷注面板和喷嘴本身的可靠性^[1]。对于氢氧发动机推力室喷注器通常采用的同轴式喷嘴, 一般中心为液氧的离心或直流式喷嘴, 环缝为直流式氢喷嘴, 氢氧在推力室内的雾化燃烧主要依靠速度差产生的碰撞破碎雾化^[2]。对于单个喷嘴, 由于氢喷嘴在外氧喷嘴在内, 高速流动的氢可以保证在喷注面附近混合比较低, 从而起到保护喷注面板及喷嘴的效果。因此, 喷注面氢流量不均匀性及单个喷嘴环向氢流量不均匀性会直接导致面板附近的混合比过高, 容易产生烧蚀, 从而影响结构可靠性。图 1 所示为某型氢氧发动机推力室喷注面板及周边结构示意图, 在试车后在图示烧蚀区域喷注面板及氢喷嘴翻边出现的烧蚀现象。此现象出现在多台次试车中, 且位置固定, 均发生在氢头腔集合器入口正对的最外圈的两个喷嘴。另外, 历次烧蚀中, 烧蚀较轻时烧蚀区域集中在氢喷嘴翻边处, 而烧蚀较重时会向外扩展至面板直至面板与氢头腔的焊缝处, 可以判断烧蚀的起点是氢喷嘴翻边。

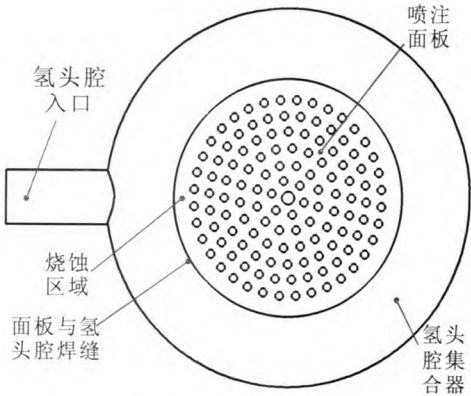


图 1 喷注面板及周边结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of hydrogen head chamber

利用三维 CFD 方法计算发动机内部流场可以较好的进行定性分析, 石晓波等利用三维 CFD 方法数值模拟了燃气发生器喷注器内氧腔

的流动^[3], 杨青真等模拟了某型火箭发动机推力室氧腔流动^[4]。本文采用 CFD 方法, 针对上文中的某型火箭发动机推力室氢头腔及所有氢喷嘴内的流场进行三维仿真计算, 得到氢头腔及各氢喷嘴内的流动状态, 为故障的原因分析提供支撑。

1 计算模型

1.1 几何模型和网格划分

某型火箭发动机推力室头部结构如图 2 所示。氢由氢集合器进口进入氢集合器, 然后从周向均布的氢腔径向孔进入氢腔, 最后通过氢喷嘴径向孔进入氢喷嘴的环形间隙喷出。

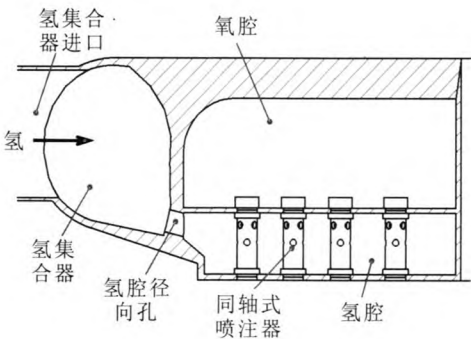


图 2 推力室头部结构示意图
Fig. 2 Structure diagram for head of thrust chamber

本文只计算氢的流场, 计算域设计如下: 包括氢集合器入口弯管、氢集合器、氢腔、氢喷嘴径向孔以及环形间隙。由于计算不但要得出喷注面整体的氢流量分布, 还要得出每个喷嘴环形间隙的周向流量分布, 这就要求喷嘴径向孔和环形间隙的网格质量和数量相对较高, 于是将喷嘴流域采用六面体网格, 其他区域采用四面体网格, 总网格数达到 289 万。

1.2 数值模型

根据工作时的流动状态, 计算采用单相、可压、定常、高 Re 数粘性三维控制方程, 湍流模型采用标准模型, 模型常数 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_{μ} , σ_k 和 σ_ϵ 分别取值 1.44, 1.92, 0.09, 1 和 1.3^[5]。

边界条件: 入口采用质量流量入口, 出口采用压力出口, 压力值取推力室室压, 每个喷嘴出口独立设置。

2 计算结果及分析

2.1 喷注面流量均匀性分析

喷注面上的喷注器以同心圆的方式排列，共 6 圈，将最外圈标记为 Loop1，依次向内。喷嘴编号如图 3 所示，其中 2、3 号喷嘴对应引言中介绍的产生烧蚀的喷嘴及喷注面板区域。

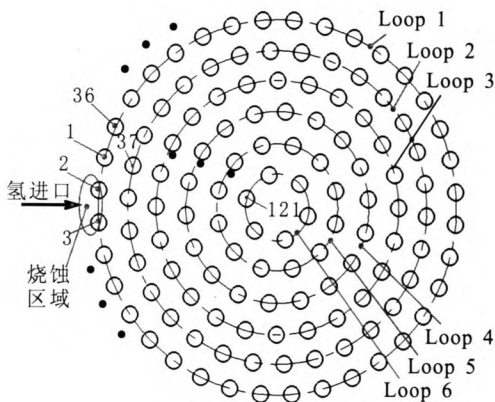


图 3 喷嘴排列示意图及编号方式
Fig. 3 Arrangement and numbering mode of nozzles

如图 4 所示，为计算得到的每个喷嘴的流量，由于相对氢进口方向喷注器的分布非对称结构，故计算得到的流量分布非对称。

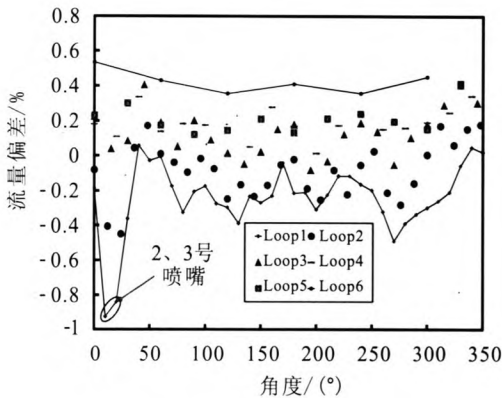


图 4 各圈氢喷嘴流量分布
Fig. 4 Flow distribution of hydrogen nozzles on each ring

喷注面板氢喷嘴的流量分布表明，烧蚀的两个喷嘴的流量是所有喷嘴中流量最少的。同时流

量的不均匀度最外圈最高，依次向内均匀度也依次变好。为量化每圈喷嘴流量的均匀度，由每圈各喷嘴流量偏差得出均方差，定义均方差为每圈喷嘴流量的不均匀度（值越大表征均匀度越差），如下表 1 最外圈的流量不均匀度是最内圈的 3 倍多。

表 1 各圈氢喷嘴流量不均匀度
Tab. 1 Inhomogeneity of flow of hydrogen nozzles on each ring

喷注器圈	Loop1	Loop2	Loop3
均方差	0.201	0.158	0.131
喷注器圈	Loop4	Loop5	Loop6
均方差	0.092	0.079	0.061

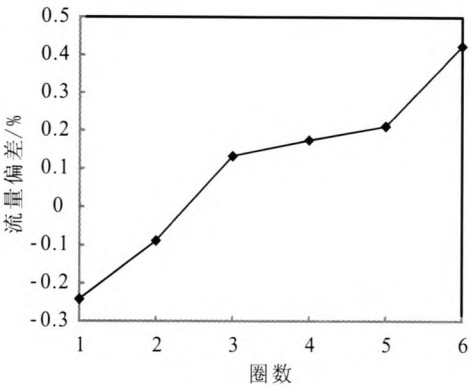


图 5 周向平均流量沿径向的分布
Fig. 5 Radial distribution of average flow in circumferential direction

如图 5 所示，沿径向，最外圈的流量水平也是最低。综合上面的分析，计算结果表明 2 号和 3 号喷嘴的工况相比其他喷嘴最恶劣，而 2 号和 3 号喷嘴出现的烧蚀现象也一定程度上证明了计算结果的可信性。

如图 6 所示，为分析得出 2 号和 3 号喷嘴工况恶劣的原因，给出了氢腔在不同轴向截面的速度云图。其中，截面 a 位于氢喷嘴两排径向孔中靠近二底的径向孔轴线所在平面；截面 b 位于靠近一底的径向孔轴线所在平面；截面 c 位于 b 截面与一底之间无径向孔区域，如图 7 所示。

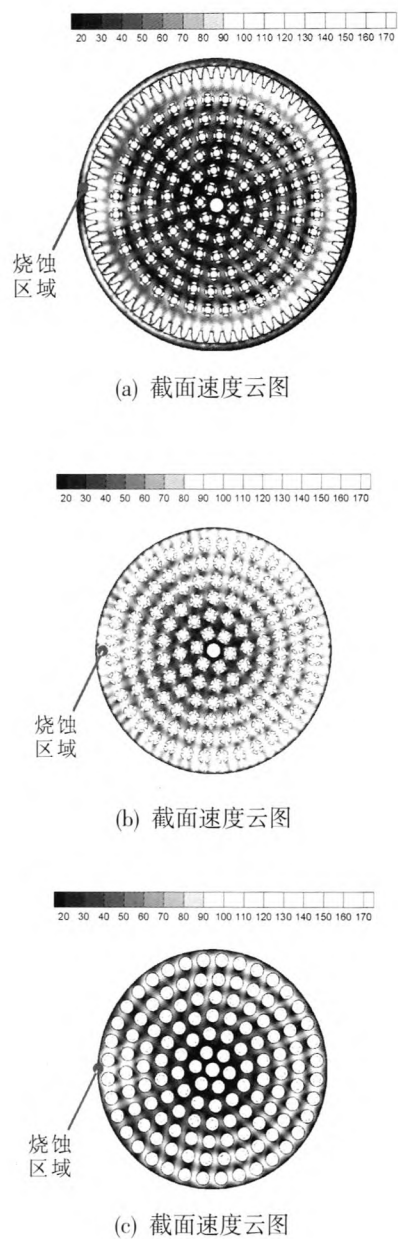


图 6 腔内流场云图

Fig. 6 Nephogram of flow field in head chamber

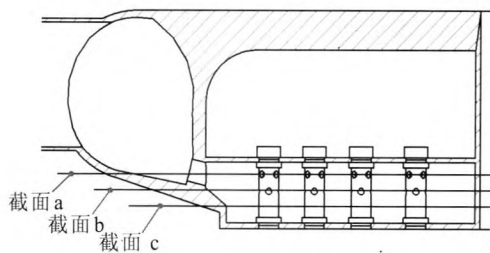


图 7 云图所处截面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of nephogram cross-section

从三个截面的速度云图可以得出以下结论:

1) 最外圈喷嘴附近的流速较内圈最高, 这是由于通过径向孔连接集合器和腔体这种结构中, 腔体中靠近径向孔的区域一般流速最高, 而本结构中最外圈喷嘴正好处于这个区域, 同时喷嘴的阻挡还减小了流体径向流动的流通面积, 进一步提高了流体流速; 2) 产生烧蚀现象的 2 号和 3 号喷嘴处于氢腔中流速最高的区域, 这是由于这两个喷嘴正对着氢集合器入口氢的流动方向; 3) 三个截面中 b 截面最外圈喷嘴附近的流速是最高的, 由图 8 可知氢腔径向孔中心线轴向延长线与 b 截面的交点正好处在最外圈氢喷嘴下排径向孔附近。

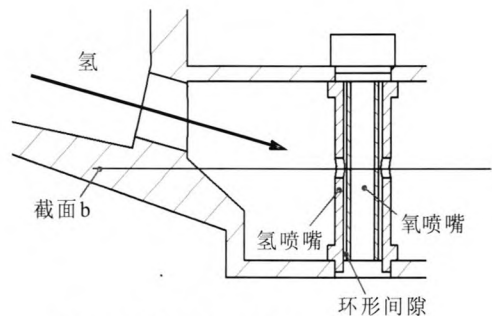


图 8 氢腔径向孔轴线与氢喷嘴下排径向孔相对位置示意图

Fig. 8 Relative positions of hydrogen chamber radial hole axis and bottom row radial holes of hydrogen nozzle

通过上面的分析不难得出 2 号和 3 号氢喷嘴的下排径向孔附近的流速是整个氢腔中流速最高的区域。氢腔内的流动以径向流动为主, 而最终喷入推力室的氢是沿轴向流动的, 这样的流向变化会带来总压损失, 流速越大流向变化造成的总压损失也会越大, 假设燃烧室喷注面压力均匀的情况下, 压力损失越大的喷嘴流量会越低, 也就是氢腔内流速最高区域附近的喷嘴流量将是最小的, 也就导致 2 号和 3 号喷嘴的流量最低, 工况最恶劣。

2.2 单喷嘴出口流场均匀性分析

由上述分析, 得出 2 号和 3 号喷嘴由于腔内流场的不均匀性造成流量最低, 但综合所有氢喷嘴, 流量最大与最小的偏差也不到 1.5%, 流量偏小是否是造成烧蚀的唯一原因? 从各台次喷嘴

烧蚀后形貌可以发现，发生烧蚀的喷嘴只是喷嘴周向部分区域产生烧蚀（见图 1），并且位置相对固定，而位于喷嘴外侧大约 60°~100°的范围内，从未发生过整周烧蚀的现象。由此可以推测，单喷嘴环形间隙内流量也存在较大的不均匀，造成局部混合比过高，产生烧蚀。

单喷嘴出口的网格为周向均布的结构网格，周向网格节点均匀分布，为保证结果的可比性，所有喷嘴出口网格结构数量相同。在出口氢密度相差不大的情况下，可以用节点流速的偏差来衡量流量密度的偏差，通过比较出口流速的周向分布来反映单喷嘴环形间隙出口氢流量的均匀性。从 2.1 节论述可知六圈喷嘴中最外圈（Loop1）喷嘴所处环境最恶劣，而最内圈（Loop6）相对最好。如图 9 所示，从 Loop1 和 Loop6 各取一个喷嘴（为消除氢集合器进口的影响，选取周向远离氢集合器进口的 21 和 123 号喷嘴），绘出每个喷嘴周向速度偏差的分布。

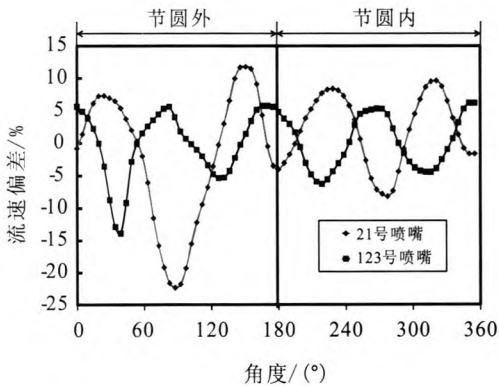


图 9 单氢喷嘴出口环形间隙的流速分布
Fig. 9 Velocity distribution in annular space at outlet of single hydrogen nozzle

如图 9 所示，单个喷嘴环形间隙内流速分布不均匀，其中最外圈喷嘴 21 号的流速波动幅度达到了 34%，流速最小处低于平均值 22%。另节圆外半圈的流速较节圆内半圈波动更大，特别是最低流速也在此范围内，说明从氢腔径向孔进入氢腔的高速氢对氢喷嘴迎风侧的出口流速会造成较大影响。类似 2.1 节中定义的不均匀度，为量化每个喷嘴出口环形间隙流量密度的不均匀度，通过出口网格各节点流速偏差的

均方差来衡量（值越大表征不均匀度越大），计算结果如下表 2。

表 2 喷嘴出口流速不均匀度			
Tab. 2 Velocity inhomogeneity at nozzle outlet			
喷嘴编号	Loop1-21	Loop2-53	Loop3-80
单喷嘴出口周向不均匀度	8.51	6.34	5.76
单喷嘴出口节圆外区域不均匀度	10.36	6.86	7.11

喷嘴编号	Loop4-100	Loop5-115	Loop6-123
单喷嘴出口周向不均匀度	5.08	4.95	4.64
单喷嘴出口节圆外区域不均匀度	6.15	4.50	5.19

注：Loop1~6 各选取一个喷嘴进行计算，为消除氢集合器进口的影响，选取周向远离氢集合器进口的喷嘴

计算结果表明，不均匀度的相对高低与喷嘴流量的相对高低反相关，最外圈单喷嘴平均流量最小，沿径向向内逐渐增大，而单喷嘴不均匀度最外圈最大，沿径向向内逐渐减小。由于产生烧蚀的最外圈 2 号和 3 号喷嘴的平均流量最小，所以推测单喷嘴环形间隙内流量分布不均匀度最高的仍然是 2 号和 3 号喷嘴，如图 10 和表 3 所示。

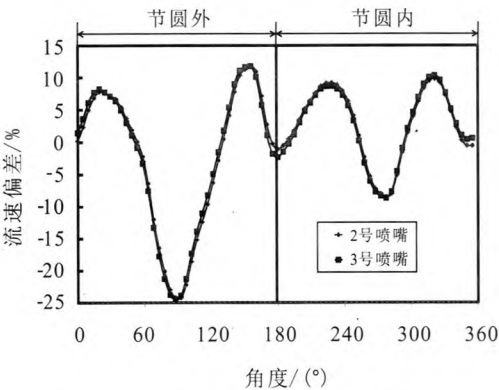


图 10 产生烧蚀的喷嘴周向流速分布
Fig. 10 Circumferential velocity distribution of ablated nozzles

此两个喷嘴的不均匀度相当，但相对 21 号喷嘴又上升了约 8.3%，且节圆外区域流速偏差

最大达到了 37% (-25%~12%), 这样的流速换算至当地混合比(推力室混合比设计值 6.4)可以达到 5.8~8.5 (经计算 2 号和 3 号喷嘴的确是所有喷嘴中不均匀度最高的, 由于数据较多不在此列出), 虽然此混合比范围对燃气温度影响不大(波动范围约 100 K), 但在理论混合比 8 附近, 有产生富氧燃烧的可能, 此时燃气的氧化烧蚀能力增强, 综合燃气温度的增加, 存在造成喷嘴烧蚀的可能。

表 3 产生烧蚀的喷嘴出口流速均匀性

Tab. 3 Flow velocity inhomogeneity at outlets of ablated nozzles

喷嘴编号	2	3
整周不均匀度	9.22	9.25
节圆外区域不均匀度	11.23	11.27

通过上面的分析可知, 单喷嘴出口环形间隙同样存在着流量不均匀情况, 从数值上看, 比 2.1 节中喷注面流量的不均匀度大了数十倍, 过大的不均匀度造成 2 号和 3 号喷嘴局部混合比过高, 是产生烧蚀的重要原因之一。

3 结论

对某氢氧火箭发动机推力室头部氢腔流场进

行了仿真计算, 通过分析得出造成固定位置喷嘴及面板在试车中经常烧蚀的重要原因: 1) 喷注面氢流量分布不均, 而产生烧蚀的喷嘴是所有喷嘴中氢流量最小的两个; 2) 氢喷嘴出口环形间隙内流量分布不均, 在所有喷嘴中产生烧蚀的喷嘴出口流速分布不均匀度是最高的。这两个因素是导致喷嘴局部混合比过高, 造成喷嘴局部烧蚀的重要原因。根据此分析在设计上采取了针对性措施, 采取此措施后, 文中所述出现烧蚀的氢喷嘴再未出现烧蚀现象。

参考文献:

[1] 杨立军, 富庆飞. 液体火箭发动机推力室设计[M]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.

[2] 朱森元. 氢氧火箭发动机及其低温技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[3] 石晓波, 刘占一, 郭灿琳. 燃气发生器喷注器内氧腔三维流动分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(2): 6-11.
SHI Xiaobo, LIU Zhanyi, GUO Canlin. Analysis of three-dimensional flow in oxygen chamber in injector of gas generator [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39 (2): 6-11.

[4] 杨青真, 王红梅, 张银波. 液态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.

[5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(编辑: 王建喜)