

隔离段对二维混压式进气道出口参数的影响

黄 伟, 罗世彬, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙, 410073)

摘 要: 利用 Fluent 仿真软件, 对二维混压式高超音速前体/进气道在设计状态和非设计状态下的性能和流场进行了计算。分析表明, 进气道在设计状态下的性能得到了明显的提高。同时, 有无隔离段以及隔离段长度对进气道出口参数的影响, 文中进行了初步的分析, 结果表明: 有无隔离段以及隔离段长度对进气道出口总温没有太大的影响; 隔离段较短时, 进气道出口总压比无隔离段小, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口总压比无隔离段大; 隔离段较短时, 进气道出口马赫数比无隔离段大, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口马赫数比无隔离段小。

关键词: 隔离段; 高超音速进气道; Fluent; 马赫数; 总压; 总温

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2007) 04-0008-05

Effects of the isolator on the exit parameters of two-dimension inlet

Huang Wei, Luo Shibin, Wang Zhenguo

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

Abstract: The performances and flow fields of two-dimensional hypersonic forebody/inlet at design and under-design conditions are calculated through fluent simulation software. Analyses show that the performance of the inlet at design condition is improved obviously. Meanwhile, the effects of the existence and length of the isolator are also analyzed primarily. Results show that: isolator has little effect on total temperature of the inlet exit; when the length of isolator is shorter, the total pressure of the inlet exit is lower, but when the length of isolator is longer enough, the total pressure of the inlet exit is higher; when the length of isolator is shorter, the Ma number of the inlet exit is higher, but when the length of isolator is longer enough, the Mach number of the inlet exit is lower.

Key words: isolator; hypersonic inlet; fluent; Mach number; total pressure; total temperature

收稿日期: 2006-12-22; 修回日期: 2006-12-31。基金项目: 国家“863”基金资助项目

作者简介: 黄伟 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究领域为高超声速推进技术和飞行器一体化设计。

1 引言

隔离段是超燃冲压发动机的一个重要部件, 它通常是一个等截面或有微扩张角的管道, 位于进气道和燃烧室之间, 有两个重要的作用: 一是隔离进气道和燃烧室间的相互干扰, 以便提供给进气道一个较宽的稳定工作范围; 另一个是使超燃冲压发动机能以双模态方式工作。由于隔离段内气体流动的复杂性及其广泛的工程应用背景, 隔离段内的流动特性引起了越来越多人的关注。宋文艳^[1]采用等激波角设计方法并考虑温度、激波与附面层干扰等的影响, 对超音速燃烧室冲压发动机的二维混压式高超音速前体/进气道和隔离段的设计进行了探索, 给出了前体/进气道和隔离段的几何结构和尺寸, 运用二维 CFD 数值计算手段, 对所设计进气道结构进行了修正, 并计算了设计状态和非设计状态性能和流场。韩兆林等^[2]对进气道/隔离段进行了数值研究, 分析了不同收敛角以及不同外罩长度对进气道/隔离段性能的影响。肖隐利等^[3]对隔离段内的流场进行了数值模拟, 并分析了出口反压、来流马赫数对隔离段内流场的影响。王成鹏等^[4]通过风洞实验与数值模拟研究了超燃冲压发动机带进气道的隔离段流动, 并结合 RNG 模型隐式求解了三维 N-S 方程, 将计算结果与实验结果进行了比较。

本文针对文献 [1] 给出的二维混压式高超音速前体/进气道的几何结构和尺寸, 通过 Fluent 仿真软件计算比较了设计状态和非设计状态的性能和流场, 并对有无隔离段对进气道出口参数的影响进行了分析。

2 前体/进气道性能和流场仿真分析

采用 Fluent 仿真软件中的二阶耦合隐式 Spalart-Allmaras 湍流模型对图 1 所示二维混压式高超音速进气道在设计状态和非设计状态的性能和流场进行计算分析。此二维混压式高超音速进气道的几何尺寸如表 1 所示。其中设计状态的马赫数为 7.0, 飞行高度 $H=25\text{km}$, 对应环境静温为

221.65K, 总压为 88623.37Pa; 而非设计状态的马赫数为 5.0, 飞行高度为 20.67km, 对应环境静温为 217.32K, 总压为 91129.48Pa^[1,5]。

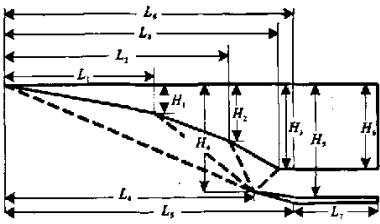


图 1 混压式高超音速进气道结构简图
Fig.1 Configuration diagram of two-dimensional hypersonic inlet

表 1 前体/进气道和隔离段的几何尺寸 (单位: mm)
Tab.1 Geometry dimensions of forebody/inlet and isolator (unit: mm)

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
963.39	1287.06	1561.61	1500	1700	1700
H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
101.26	194.58	312.26	337.26	354.76	324.37

通过仿真计算, 得到了进气道在非设计状态和设计状态的参数分布图 (图 2, 图 3)。从图中可看出, 在设计状态下, 外压波系交于唇口, 内压激波交于上壁面折点偏后位置, 符合设计要求。进气道内压部分存在激波、膨胀波, 激波反射与相交、膨胀波与激波相互干涉等, 在进气道壁面出现分离泡, 流场结构比较复杂。在非设计状态下, 外压斜激波交于唇口外, 由于溢流而产生附加阻力。这与文献 1 的结论一致。

图 4 和图 5 分别给出了此进气道出口在设计状态和非设计状态的总温和马赫数分布对比。从图中可以看出, 在设计状态下, 进气道的性能得到了明显的提高。进气道出口参数由于受到进气道壁面附面层的影响, 这样使得靠近壁面处参数的数值相对中央较小, 但进气道中央参数数值趋于平缓, 表明流动得到了很好的发展。

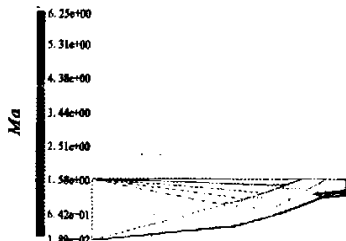


图2 非设计状态下进气道的马赫数等值线图
Fig.2 Mach number contour of inlet at under-design condition

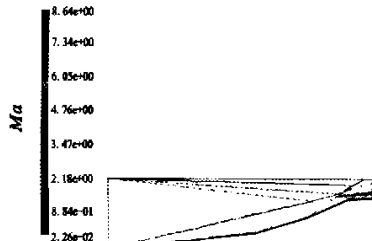


图3 设计状态下进气道的马赫数等值线图
Fig.3 Mach number contour of inlet at design condition

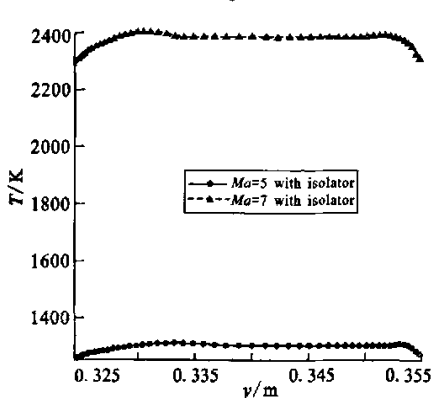


图4 设计状态和非设计状态下总温分布对比图
Fig.4 Comparison of total temperature distribution at design and under-design conditions

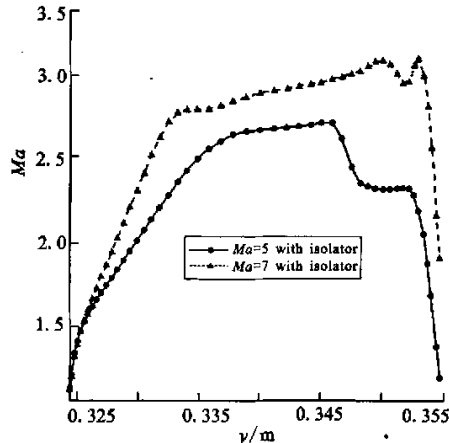


图5 设计状态和非设计状态下Ma数分布对比图
Fig.5 Comparison of Mach number distribution at design and under-design conditions

3 隔离段对进气道流场性能的影响

文献 [2,3]只分别考虑了不同收敛角、不同外罩长度以及出口反压、来流马赫数对隔离段内流

场的影响,而文献[1]和文献[4]也只是单纯地对隔离段内流场进行了计算。迄今为止,人们只知道隔离段可以用来隔离进气道和燃烧室之间的相互干扰,防止进气道的不启动,还没有认真考虑有无隔离段到底对进气道出口参数有多大的影响。

表2 设计状态和非设计状态下,三种情况进气道出口总温部分数据比较 (单位: K)

Tab.2 Data comparison of total temperature in three cases (unit: K)

非设计状态	带隔离段进气道	1279.01	1302.79	1307.8	1301.28	1301.34	1302.95	1272.14	1272.14
	不带隔离段进气道	1278.73	1297.12	1309.61	1309.49	1301.04	1301.16	1301.2	1301.18
	隔离段加长进气道	1304.96	1301.2	1397.41	1297.41	1297.41	1297.41	1297.41	1297.41
设计状态	带隔离段进气道	2354.61	2406.25	2388.41	2388.39	239081	2367.06	2311.98	2311.98
	不带隔离段进气道	2352.27	2398.71	2404.23	2388.15	2387.87	2388.63	2388.49	2388.42
	隔离段加长进气道	2398.53	2388.43	2385.36	2385.36	2385.36	2385.36	2385.36	2385.36

在第二部分的基础上, 对有无隔离段以及隔离段的长短对进气道出口参数的影响进行仿真分析。

以带隔离段的进气道出口总温为基准, 在非设计状态下, 不带隔离段的进气道出口总温与基准的偏差小于 2.78%, 当把隔离段加长时, 进

气道出口总温与基准的偏差则不大于 2.1%; 在设计状态下, 不带隔离段的进气道出口总温与基准的偏差小于 3.73%, 当把隔离段加长时, 进气道出口总温与基准的偏差则不大于 3.18%。由此可见, 有无隔离段以及隔离段的长短对进气道出口处总温的影响很小。

表 3 设计状态和非设计状态下, 三种情况进气道出口总压部分数据比较 (单位: MPa)

Tab.3 Data comparison of total pressure in three cases (unit: MPa)

非设计状态	带隔离段进气道	0.268	0.306	0.371	0.413	0.451	0.486	0.52	0.553
	不带隔离段进气道	0.314	0.363	0.447	0.502	0.549	0.591	0.631	0.668
	隔离段加长进气道	0.511	0.583	0.713	0.812	0.925	1.07	1.26	1.52
设计状态	带隔离段进气道	1.11	1.25	1.51	1.68	1.87	2.06	2.26	2.48
	不带隔离段进气道	1.31	1.49	1.8	2.01	2.22	2.44	2.67	2.91
	隔离段加长进气道	2.01	2.43	3.23	3.99	5.01	6.51	8.76	11.8

当隔离段较短时, 进气道出口总压比无隔离段小, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口总压比无隔离段大。

图 6 给出了此进气道在设计状态和非设计状态下, 有无隔离段以及隔离段较长时进气道出口马赫数的分布比较。

同时, 从图中可以看到, 当隔离段较短时, 进气道出口马赫数比无隔离段大, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口马赫数比无隔离段小。

4 结论

- (1) 相对于非设计状态而言, 进气道在设计状态下的性能得到了更大的提高;
- (2) 有无隔离段以及隔离段的长短对进气道出口处总温的影响很小;
- (3) 当隔离段较短时, 进气道出口总压比无隔离段时小, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口总压比无隔离段时大;
- (4) 当隔离段较短时, 进气道出口马赫数比无隔离段时大, 但当隔离段长度增大到一定值后, 进气道出口马赫数比无隔离段时小。

因此, 在设计高超音速发动机时, 隔离段的长度应得到充分的考虑, 使得在满足发动机进气道性能的前提下, 尽量减少隔离段的长度, 降低发动机的重量。

(下转第 15 页)

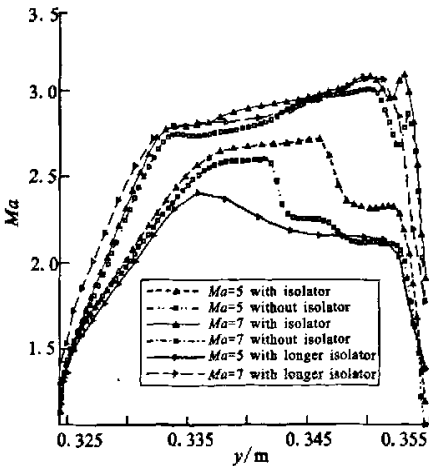


图 6 马赫数分布比较图

Fig.6 Comparison of Mach number distribution

推进剂的流速不同, 剪切速率也不同 (见式 2)。实验得到的凝胶推进剂流变特性有助于研究凝胶推进剂在管内的流动状态, 并有助于管路和喷嘴的设计。

4 结束语

通过凝胶推进剂管路流动特性的理论分析, 研究了凝胶推进剂管路流动特性的实验研究方法, 进行了某型凝胶推进剂管路流动特性实验研究。通过实验发现:

(1) 凝胶推进剂的表观粘度随着剪切速率的增加而急剧减小;

(2) 对于本文研究的凝胶推进剂, 当剪切速率在 10^4 量级时出现了表观粘度随剪切速率增加基本不再变化, 并趋向于一个固定的极限牛顿粘度, 这一特点对于液体火箭发动机管路和喷注器的设计有所启示;

(3) 在低剪切速率段, 流变仪测得的剪切速率和表观粘度与管路得到的剪切速率和表观粘度是一致的 (如图 3 所示);

(4) 不同管径得到凝胶推进剂的流变指数 n 从 0.49 到 0.69, 稠度系数 k 为 $0.57 \sim 4.49 (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$ 。

参考文献:

- [1] Jens von Kampen, Klaus Madlener, Helmut K. Ciezki. Characteristic Flow and Spray Properties of Gelled Fuels with Regard to the Impinging Jet Injector Type [R]. A-IAA2006-4573.
- [2] 杨伟东, 张蒙正. 凝胶推进剂模拟液直圆管流动特性初步研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 12-27.
- [3] 沈崇棠、刘鹤年. 非牛顿流体力学及应用[M]. 北京, 高等教育出版社, 1987.

(编辑: 王建喜)

(上接第 11 页)

参考文献:

- [1] 宋文艳. 超燃冲压发动机前体/进气道和隔离段气动设计[J]. 西北工业大学学报. 2004, 22(1): 96-99.
- [2] 韩兆林, 王强. 双模态冲压发动机进气道/隔离段流场的数值研究 [J]. 航空动力学报. 2006, 21(1): 31-35.
- [3] 肖隐利, 陈亮, 宋文艳. 超燃冲压发动机隔离段流场数值模拟[J]. 飞机设计. 2005, (3): 41-44.
- [4] 王成鹏. 带进气道的隔离段流场实验研究与数值模拟 [J]. 推进技术. 2004, 25 (1): 27-31.
- [5] 徐华舫. 空气动力学基础[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.

(编辑: 王建喜)