

文章编号: 1000-8055(2009)12-2763-05

带等宽度平直斜楔的非对称来流 短隔离段实验

曹学斌, 张堃元, 金志光

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了提高超燃冲压发动机隔离段耐反压能力以及缩短隔离段长度, 设计了一种带等宽度平直斜楔的隔离段, 斜楔放置在隔离段进口下壁面厚附面层一侧, 在 $Ma=1.98$ 非对称的隔离段进口来流条件下完成吹风实验. 实验结果表明, 隔离段加等宽度平直斜楔后可在相同的反压下使激波串相对长度从 13.87 缩短至 11.12, 比基准隔离段激波串长度缩短了 19.8%. 同样的隔离段加斜楔后能够承受的最大反压从来流静压的 3.55 倍上升到 3.85 倍, 提高了 8.45% 左右.

关 键 词: 超燃冲压发动机; 隔离段; 激波串; 斜楔; 壁面压力

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Experimental investigation of short isolator with a full ramp under asymmetric incoming flow

CAO Xuebin, ZHANG Kunyuan, JIN Zhiguang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An isolator with a full ramp was designed to improve the performance of the isolator or to reduce the length of the isolator. The ramp was placed on the lower wall at the isolator entrance. Experiment was conducted in Mach 1.98 at the isolator entrance. Experimental results indicate that, the length of the shock train is reduced by 19.8 percent for the rectangular isolator with the full ramp. The length of shock train in the isolator without a ramp is 13.87 times the height of the isolator entrance, but the length of shock train in the isolator with the full ramp is reduced to 11.12 times the height of the isolator entrance under the same back-pressure cases. The maximum back-pressure is improved by 8.45 percent for the isolator with a ramp which can withstand a maximum back-pressure of 3.85 times static pressure, but the isolator without a ramp could only withstand a maximum back-pressure of 3.55 times static pressure.

Key words: scramjet; isolator; shock train; ramp; wall pressure

隔离段是超燃冲压发动机必不可少的重要部件, 目前隔离段长度的设计基本上依赖于 Watrup 与 Billig 早年的关于激波串的经验公式^[1]和

超燃冲压发动机研究的工程经验, 为了满足各种马赫数下的正常工作, 不得不采用低马赫数的最大长度来设计隔离段以确保发动机的正常工作,

收稿日期: 2008-11-12; 修订日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(10572059)

作者简介: 曹学斌(1984-), 男, 江西都昌人, 博士生, 研究方向为内流气体动力学. E-mail: xuebincao@yahoo.com.cn.

造成发动机长度和质量都较大, 因此在安全工作的前提下, 尽可能地缩短隔离段长度就是一个既现实又紧迫的任务.

Neumann^[2]等在 1951 年实验研究了超声速扩压器的缩短问题, 提出了在扩压器内设置十字中心隔板的方法, 他们的实验结果表明进出口压比相同且总压恢复基本相等的前提下可将长度缩短为原来的 75%. 王成鹏^[3]等将此方法应用于隔离段的缩短问题上, 并针对隔离段入口来流严重非对称的特征^[4,5], 提出了弯曲隔板的方法, 数值模拟结果表明在进出口压比相同与出口总压恢复系数基本不变的情况下, 隔离段长高比减小了 33%. 最近, Tam C J^[6]等数值模拟研究了在隔离段内放置斜楔后隔离段耐反压能力提高的问题. 国防科大近日也研究了反压对激波串起始位置的影响^[7].

本文作者在前期的数值模拟中, 研究了等宽度平直斜楔提高隔离段性能的效果, 研究内容包括等宽度平直斜楔的主要几何参数对缩短隔离段长度的效果, 放置位置的影响等, 给出了加斜楔后隔离段耐反压能力提高的程度以及缩短程度, 但是并未经过风洞实验验证. 为此, 在前期数值研究

结果的基础上, 本文对非对称来流下带等宽度平直斜楔的隔离段进行了初步的风洞实验. 实验结果证明, 隔离段加平直斜楔后可在同样的反压下缩短激波串长度, 这样就可以达到缩短隔离段长度的目的; 实验结果还证明, 隔离段加平直斜楔后, 可以使承受的反压显著提高, 因此, 隔离段内加平直斜楔是提高隔离段性能的一种有效措施.

1 实验装置与测量方法

实验在南京航空航天大学能源与动力学院内流流体力学实验室进行. 实验设备由高压气源、控制阀、稳压段、隔离段模型和测试系统等组成. 其中最重要的隔离段模型见图 1(实物图见图 2), 它包括拉瓦尔喷管、附面层发展段、附面层排移槽、带等宽度平直斜楔的隔离段和节流尾锥等几部分, 其中平直斜楔放置在隔离段进口下壁面厚附面层一侧, 斜楔形状如图 3 所示, 后台阶高度为 2.7 mm, 来流附面层厚度约 5.5 mm 左右, 因此所加的斜楔完全淹没在来流附面层内. 图 1 中从左至右, 高压空气经由拉瓦尔喷管达到一定的超声速马赫数, 然后流过一定长度的附面层发展段, 在隔离段进口形成一定厚度上下对称的附面层, 上

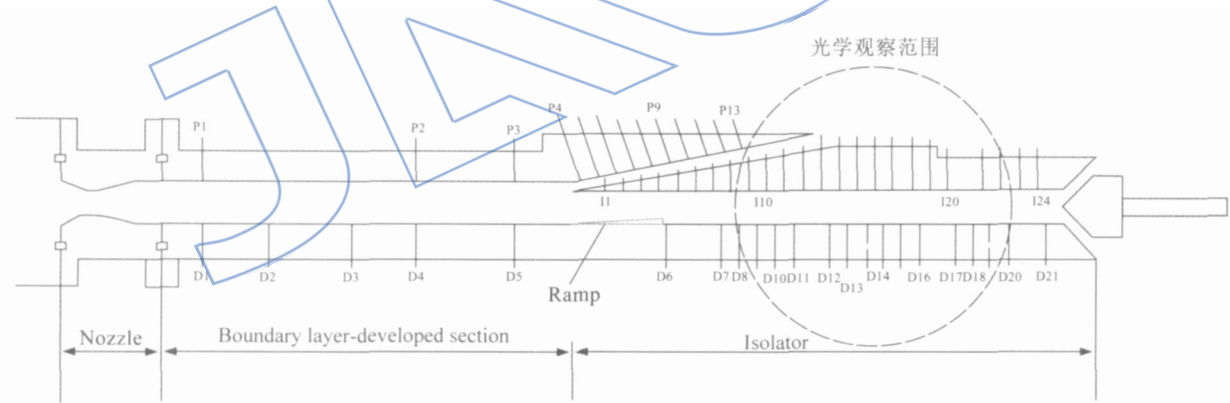


图 1 带斜楔的隔离段模型简图
Fig. 1 Schematic sketch of the isolator with a ramp

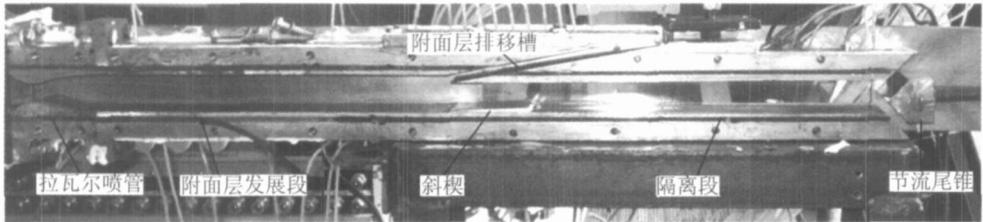


图 2 带斜楔的隔离段实物图
Fig. 2 Photograph of the isolator with a ramp

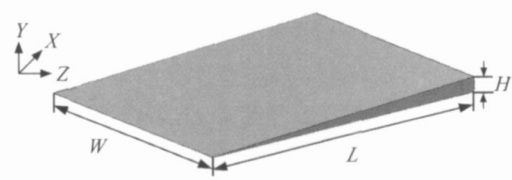


图 3 平直斜楔三维示图

Fig. 3 Full ramp

壁面的附面层可以通过附面层排移槽部分或全部排除,在隔离段入口形成下壁面附面层厚、上壁面附面层薄的气动布局.这种布局可以较好地模拟进气道出口的实际流场.实验时调节节流尾锥的开度以模拟燃烧室反压变化.为了研究不同反压下隔离段内的激波串形态及压升规律,因此实验用隔离段相对长度(隔离段长度与进口高度比)比较长,取为 15,使激波串有足够的前后移动空间.在附面层发展段、附面层排移槽及隔离段上下壁面中心线,沿流向布置 58 个静压孔以获得沿程静压分布;实验中采用 PSI(Pressure System Inc.) 公司的 9816 智能电子压力扫描阀采集全部稳态压力数据,测压精度为 0.05%.用双镜反射式纹影仪观察并记录隔离段内的波系结构.

2 实验结果分析

实验中,分别对未加斜楔的隔离段和加了斜楔的同一隔离段作了实验研究.为区别起见,前者称为基准隔离段.

实验的来流总压 $p_0 \approx 3.6 \times 10^5 \text{ Pa}$,总温 $T_0 \approx 300 \text{ K}$,隔离段入口中心流马赫数 $Ma = 1.98$,下壁面进口附面层厚度 5.5 mm 左右.实验在完全非对称状态下进行,即隔离段上壁面入口附面层经附面层排移槽完全排除.实验时,通过调节出口节流锥改变前后压比即反压,获得不同的激波串位置,研究反压与激波串的关系.

2.1 隔离段加斜楔后激波串长度的缩短

图 4 为基准隔离段和加斜楔的隔离段在相同的最大反压下的上壁面沿程静压分布,图中横坐标为用隔离段入口高度 H 无因次化的沿流向相对距离,以隔离段进口位置为零点;纵坐标是用来流总压无因次化的相对压力.其中三角格为基准隔离段壁面沿程静压,方格为带斜楔的隔离段壁面沿程静压.图 4 中左边第一根虚线为基准隔离段激波串前缘位置,第二条虚线则是相同反压下加斜楔后激波串前缘位置,与图 5 所示的纹影照

片的初始激波位置相符.从图中可分析出,相同进出口压比时,加斜楔后隔离段内激波串长度明显缩短(图 4 所示 ΔX 的距离).本实验条件下,隔离段加等宽度平直斜楔后可在同样的反压下使激波串相对长度从 13.87 缩短至 11.12,比基准隔离段激波串长度缩短了 19.8%.

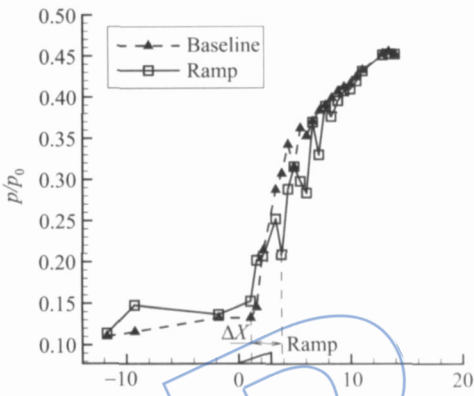


图 4 上壁面静压分布

Fig. 4 Upper wall static pressure distributions

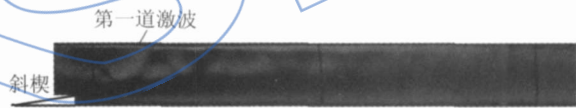


图 5 纹影照片

Fig. 5 Schlieren

众所周知,隔离段的长度依赖于其内激波串的长度,因此激波串长度的减小也就意味着隔离段长度的减小,从上述实验结果可知,隔离段加等宽度平直斜楔后确实能起到缩短隔离段的作用.

需要说明的是,加斜楔后隔离段上壁面压力先有较大幅度的上升,斜楔后台阶下游一小段距离处,上壁面压力开始下降,此种现象为斜楔产生的斜激波与后台阶处的膨胀波所致.

2.2 加斜楔的隔离段可提高最大耐受反压

以上分析的是承受相同反压时加斜楔后隔离段内激波串长度的缩短问题,其实隔离段加斜楔后的最大承受反压能力也会得到较大提高.图 6 为基准隔离段的最大承受反压与隔离段加斜楔后的最大承受反压对比图,图中横、纵坐标与图 4 一致.其中三角格为基准隔离段上壁面沿程静压,方格为带斜楔的隔离段上壁面沿程静压.从图 6 可知,两工况下激波串前缘均接近隔离段进口,但均

未被反压推出隔离段,因此此时的反压为隔离段最大承受反压.由图6分析得出,未加斜楔时隔离段能够承受的最大反压为3.55倍的来流静压,而加斜楔后隔离段最大承受反压为来流静压的3.85倍,加斜楔后隔离段抗反压能力提高了8.45%.

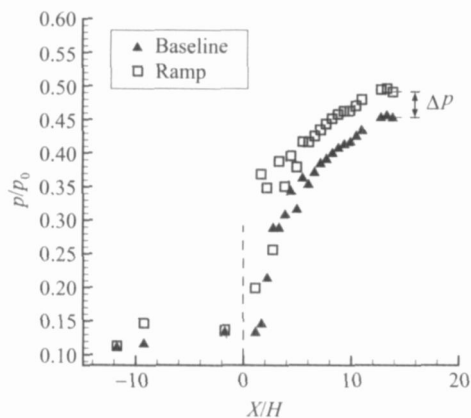


图6 上壁面静压分布

Fig. 6 Upper wall static pressure distributions

2.3 内流场结构

图7为相同反压下激波串初始激波位于隔离段中游处的纹影照片,其中上图为带斜楔的隔离段激波纹影照片,下图为基准隔离段纹影照片.气流从左向右流.对比两图可知,加斜楔的激波串初始激波位置明显退后,激波串长度减小,这是隔离段加斜楔后可以缩短激波串长度的直观证据.其次看到加斜楔后初始激波前方存在一系列反射的斜激波以及后台阶处的膨胀波,这就说明斜楔通过它的气动效能确实影响了激波串波前的气流,达到改善隔离段耐反压性能的目的.最后可知,在非对称进口来流条件时,与基准隔离段相比,加斜楔的激波串结构也是明显非对称的,偏向薄附面层的上壁面.

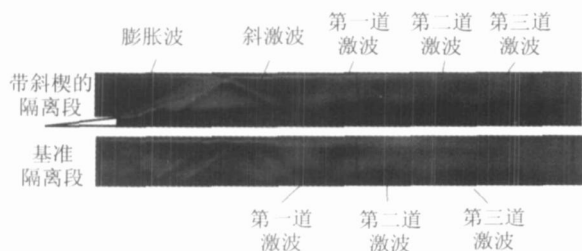


图7 纹影照片

Fig. 7 Schlieren

需要说明的是图7中基准隔离段内的激波串波前存在一系列连续反射的马赫波系,它来源于上壁面的附面层排移口带来的微弱扰动.由于侧壁附面层的存在及激波的自激振荡,纹影仪观测到的激波不甚清晰,似乎都存在一定厚度.

2.4 实验与计算对比

采用FLUENT软件对图7所示实验工况进行了三维数值模拟.考虑流场的对称性,计算域取流场的一半,包括:附面层发展段、附面层排移槽、带斜楔的隔离段.边界条件取自实验数据.湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型, y^+ 在30~60之间.

图8为对应图7所示带斜楔实验工况的实验和数值模拟的隔离段下壁面静压分布对比图.图中横坐标、纵坐标与图4一致.图中方格为带斜楔隔离段的壁面沿程静压,实线为带斜楔隔离段的数值模拟壁面沿程静压.对比两者可知,数值模拟的壁面沿程压力分布反映了激波串内的实际压升规律.图9给出了激波串的纹影照片及对应工况对称面数值模拟的波系对照,可见二者的基本形态相同.总的来说,计算结果与实验数据吻合得较好,表明所采用的数值分析方法在模拟带斜楔的隔离段时具有一定的精度.

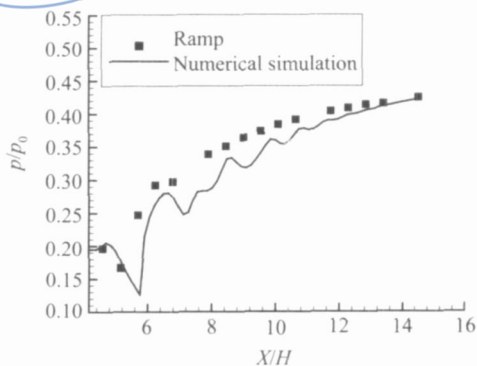


图8 下壁面沿程静压分布

Fig. 8 Lower wall static pressure distributions

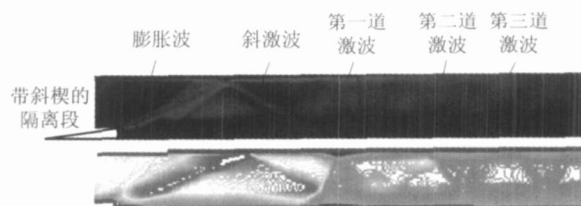


图9 纹影照片与数值模拟对比

Fig. 9 Comparison between schlieren and Mach number contour on symmetry plane

最后需要说明的是加斜楔前后隔离段内部的流动损失变化不大,因为斜楔所产生的斜激波非常微弱.数值模拟表明,基准隔离段内加平直斜楔后的流量平均总压恢复系数不仅没有降低,反而略有增加,大约增加了 0.11,说明加斜楔前后隔离段的总压恢复系数相当.推测其原因为基准隔离段内加斜楔后,激波串的长度大幅度减小,使得激波串导致的总压损失减小许多,而斜楔产生的斜激波以及反射激波所造成的总压损失不是很大,因此加斜楔的隔离段总压损失可能稍微大于未加斜楔隔离段.

3 结 论

加斜楔缩短隔离段长度的研究是一项有实际意义的工作,目前研究工作正在进之中,还有许多问题尚待解决,初步的实验结果表明,在本文的实验条件下:

1) 隔离段加等宽度平直斜楔后可在相同的进出口压比下使激波串相对长度从 13.87 缩短至 11.12,比基准隔离段激波串长度缩短了 19.8%.

2) 未加斜楔时隔离段能够承受的最大反压为 3.55 倍的来流静压,而加斜楔后隔离段最大承受反压为来流静压的 3.85 倍,加斜楔后隔离段抗反压能力提高了 8.45%.因此,加等宽度平直斜楔确实是改善隔离段性能的有效措施,值得进一步研究.

3) 计算和实验结果对比表明,所采用的数值分析方法在模拟带斜楔的隔离段流动方面具有一

定的精度和可信度.

参考文献:

- [1] Waltrup P J, Billig F S. Structure of shock waves in cylindrical ducts[J]. AIAA J., 1973, 11(10): 1404-1408
- [2] Neumann E P, Lustwerk F. High efficiency supersonic diffusers [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1951, 18: 369-374
- [3] 王成鹏, 张堃元. 非对称来流下带隔板的二维短隔离段研究[J]. 推进技术, 2006, 27(1): 66-70
WANG Chengpeng, ZHANG Kunyuan. Investigation for two dimensional short isolator with a spacer under an asymmetric incoming airflow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(1): 66-70 (in Chinese)
- [4] 张堃元, 王成鹏, 杨建军, 等. 带高超进气道的隔离段流动特性[J]. 推进技术, 2002, 23(4): 311-314
ZHANG Kunyuan, WANG Chengpeng, YANG Jianjun, et al. Investigation of flow in isolator of hypersonic inlet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(4): 311-314 (in Chinese)
- [5] Ajay K, Singh D J, Trexler C A. A numerical study of the effect of reverse sweep on a scramjet inlet performance [R]. AIAA Paper 1990-2218
- [6] Tam C J, Lin K C. Numerical investigations on simple variable geometry for improving scramjet isolator performance [R]. AIAA Paper 2006-450
- [7] 金亮, 吴先宇, 罗世彬, 等. 隔离段反压对激波串起始位置的影响[J]. 推进技术, 2008, 29(1): 54-57
JIN Liang, WU Xianyu, LUO Shibin, et al. Influence of back pressure on location of shock train in isolator [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(1): 54-57 (in Chinese)