CSTAM 2010-0040

扩张方式对隔离段流场特性的影响

裘新，岳连捷，卢洪波，陈立红，张新宇

中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室

中国空气动力研究与发展中心

第三届高超声速科技学术会议

2010 年 10 月 26-28 日 江苏·无锡

Copyright © 2007 版权所有 中国力学学会

地址: 北京市北四环西路 15 号　邮政编码:100190　Address: No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190

扩张方式对隔离段流场特性的影响

裘新，岳连捷，卢洪波，陈立红，张新宇
（中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室 ，北京海淀区 100190）

摘要 本文实验研究了不同扩张方式对隔离段激波串特性的影响，通过测量等直、2.5° 扩张角、后台阶三种构型的隔离段的沿程壁面压力分布以及激波串的纹影图片，分析了隔离段流动及抗反压性能。发现隔离段流动存在着非对称特性，且随入口马赫数的提高而增强。而两种扩张方式都削弱了隔离段的抗反压能力，后台阶的分离区使得反压直接传递并作用到台阶处，其流动对称性与等直构型接近，但激波起始位置更靠近上游。扩张角构型的抗反压能力最弱，且激波串更容易出现非对称结构。

关键词：超燃冲压发动机，隔离段，激波串，扩张通道

引 言

影响隔离段流动的因素除了进口与出口条件之外[1][2]，几何因素也起到比较重要的作用。隔离段通常被当做等直管道处理，但超燃燃烧室里普遍采用了扩张角或后台阶的结构，此类结构一般也承担着一定的抗反压的作用。此外，随着隔离段研究的深入，需要不断优化隔离段构型，扩张角和后台阶结构的突扩特点容易让人感觉其抗反压的能力比较强，而受到了研究者的关注。

高速气流经过一个带扩张角的通道之后，膨胀效应会使得马赫数增大，压力减小。通常认为入口马赫数越大，隔离段的抗反压能力越强，但是引入扩张角将会逐渐改变隔离段的高度、边界层厚度、基于边界层厚度的雷诺数、马赫数，实际上沿程不仅马赫数增大了，压力也减小了，而压力的减小又对抗反压能力的增强不利。综合起来的情况比较复杂。有部分文献数值研究表明扩张角会减弱隔离段的抗反压能力[3]，但并没有进行实验验证，对流动特性的分析也较简单。

而对后台阶构型隔离段的研究不同的文献却得到不同的结论。Saied Emami 通过实验研究得出的结论是增大后台阶的面积，隔离段抗反压的能力下降[4]，但只是简单验证了两种情况而得到上述结果。而有的研究认为后台阶结构可以很好地提高抗反压能力[5]。因此，有必要对后台阶的结构进行更深入的研究，同时对比分析后台阶与扩张角构型流动特性，特别是直接的实验观测结果。

早在 70 年代，Carrol 通过实验观测发现了等直隔离段中的激波串结构[6]，该结构是强逆压梯度作用下激波与边界层共同作用的结果，边界层分离，流线偏折产生激波，分离区后伴随着膨胀波，遇到壁面时流线再次偏折，形成较弱的激波，如此反复则形成了交替出现激波与膨胀波的节状流动结构，流动减速，壁面压力逐渐上升。但后台阶构型及扩张角构型的隔离段流动特点还需要深入研究。

本文基于实验研究，主要探索了扩张角和后台阶结构对隔离段激波串形态和反压特性的影响。

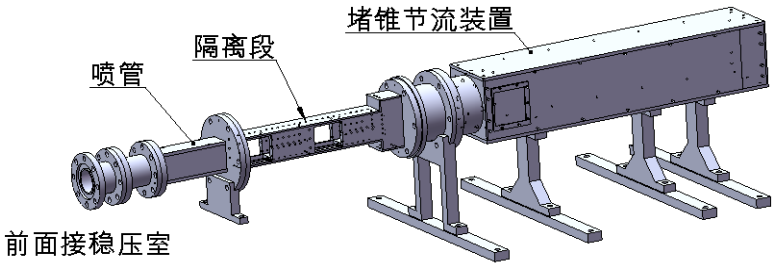
1 实验台及隔离段构型介绍

本文的所有实验都在中国科学院力学研究所的直联式隔离段冷流实验台上进行，装置如图 1 所示。高压空气经减压阀及临界流量计进入稳压室，再流经喷管与隔离段，然后是反压模拟装置，最后是消音塔。通过调节反压模拟装置中堵锥的位置来控制节流量的大小，进而实现调节反压的目的。本实验隔离段入口马赫数分别为 2.0、2.5、3.0。

实验中所采用的隔离段包括等直构型、2.5° 扩张角构型、带后台阶构型三种，示意图如图 2 所示，入口截面 70 mm×50mm，长度 525mm，后台阶构型与 2.5° 扩张角的构型出口高度一致，大约比等直构型多出 1/3。隔离段模型上分布有静压测孔和光学玻璃观察窗，等

直与扩张角构型的观察窗位于同一位置，都处在 290~370mm 的区域范围内，后台阶构型的台阶距入口 350mm，观察窗范围为 390~470mm。出口处安装总压耙测量隔离段出口总压。

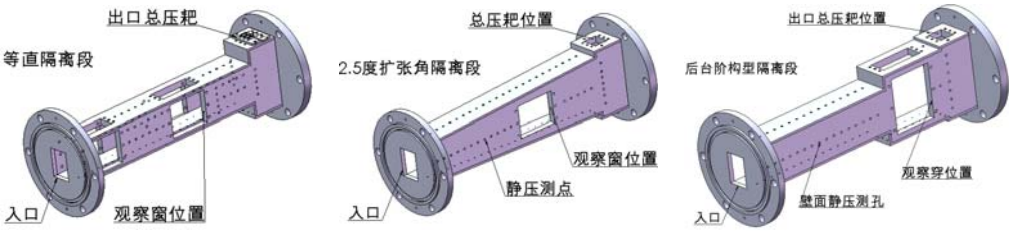
实验中采用 8400 测压传感器记录隔离段壁面沿程静压分布以及出口皮托压分布（共约 80 个静压测点），利用纹影拍摄记录光学窗口处激波串形态与结构。



（a） 实验台三维立体示意图

（b） 直联台照片

图 1 直联式隔离段实验台示意图



(a) 等直隔离段　　(b) 2.5°扩张角隔离段　　(c) 带后台阶的隔离段

图 2 三种隔离段构型

2 实验结果与分析

2.1 扩张通道对隔离段压力特性的影响

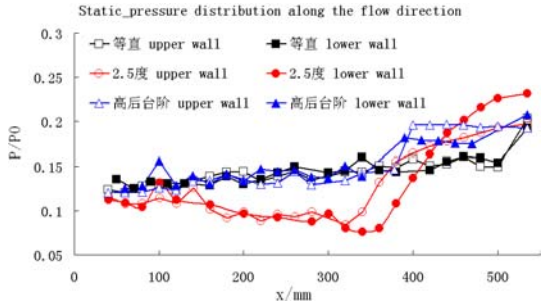
图 3 给出了等直、2.5° 扩张角和后台阶构型隔离段在进口马赫数 2.0 和不同反压条件下上下壁面沿程压力分布曲线（P_b 表示出口静压，P_0 表示入口总压，P_1 表示入口静压），可以看出几何构型对隔离段内激波串的压力特性影响显著。

具体表现为，等直构型的激波串起始位置在各种压比条件下一直最靠近出口，表明抗反压能力最强。对于 2.5° 扩张角的构型，由于有扩张角带来的膨胀效应，激波串之前的壁面静压缓慢下降。相同大小的反压条件下，2.5° 扩张角的激波串起始位置总是要比等直和后台阶的隔离段更加靠近入口，表明 2.5° 扩张角的构型抗反压能力最弱。而且反压越大，其激波串起始位置同等直的构型相差越大，因此该构型对反压改变更为敏感。

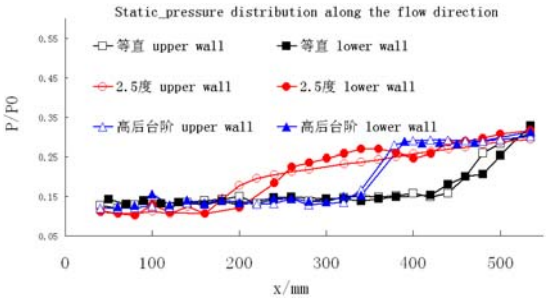
后台阶的构型，台阶上游为等直段，受到壁面粘性作用，气流减速增压，因此压力曲线小幅上升。由图可见，该隔离段压力升高起始位置介于 2.5° 扩张角构型及等直构型之间，其抗反压能力强过 2.5° 扩张角的构型，而弱于等直隔离段。如图 3 中，后台阶隔离段压力曲线在台阶后有一段平缓区，变化很小，这表明反

压直接从隔离段出口传递到台阶处，由于台阶的突扩作用，使得台阶之后出现了较大范围的分离区，而低速的分离区正是逆压梯度得以前传的通道，因此反压直接作用到了后台阶处，等同于短的隔离段通道形式，激波串起始位置前移。

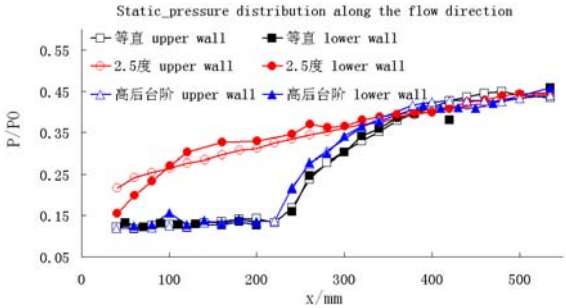
随着反压增较大，如图 3(c)，激波串向前传播的距离更远，但后台阶构型压力曲线与等直构型差异缩小，激波串的起始位置变得比较接近。分析原因，反压较高时，激波串上传距离较远，这使得气流经过激波串的减速压缩作用后，到达后台阶处气流速度大幅降低。由等直隔离段压力分布可见，此近似范围内其压力变化幅度也不大，应处于亚声速状态。因此台阶突扩带来的分离区对反压特性的影响也得到了缓解。



(a) $P_b/P_0 \approx 0.20$ （压比 $P_b/P_1 \approx 1.53$）



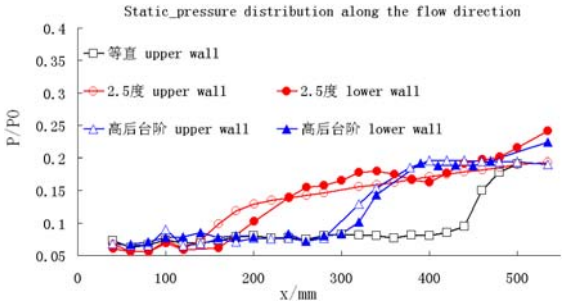
(b) $P_b/P_0 \approx 0.30$ （压比 $P_b/P_1 \approx 2.37$）



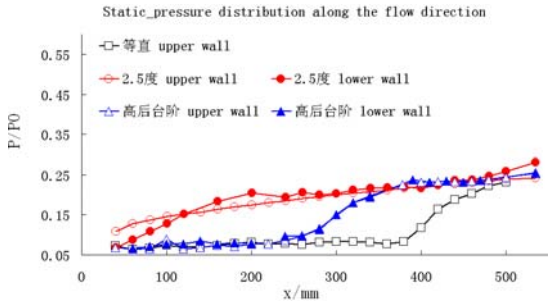
(c) $P_b/P_0 \approx 0.45$ （压比 $P_b/P_1 \approx 3.59$）

图 3 进口马赫数 2.0、不同反压条件下三种构型隔离段壁面压力分布曲线

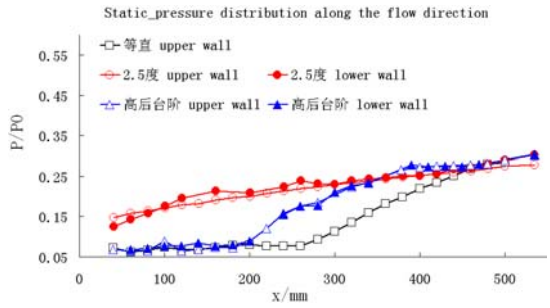
图 4、图 5 给出了来流马赫数 2.5、3.0 时不同反压条件下三种构型隔离段壁面压力分布曲线。同样地，可以看出 2.5° 扩张角构型抗反压能力最弱，激波串起始位置受反压影响变化明显，上下壁面静压分布不对称。后台阶构型的激波串起始位置位于其他两种构型之间，但随着入口马赫数增大，激波串起始位置趋向于扩张角的情况。



(a) $P_b/P_0 \approx 0.21$ （压比 $P_b/P_1 \approx 3.08$）

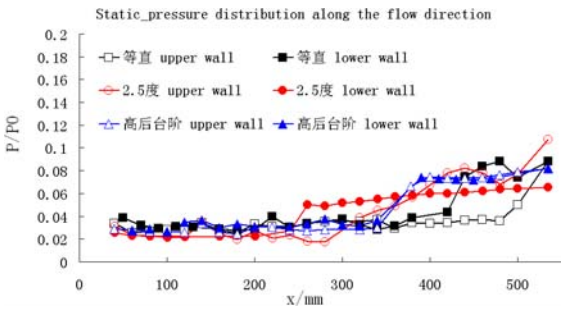


(b) $P_b/P_0 \approx 0.25$ （压比 $P_b/P_1 \approx 3.54$）

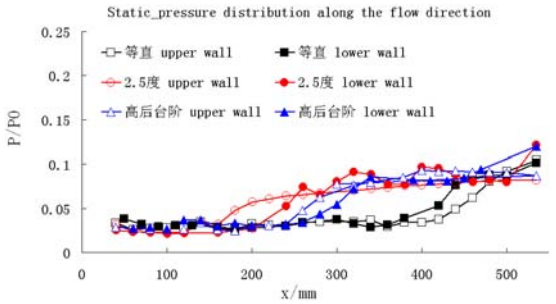


(c) $P_b/P_0 \approx 0.3$ （压比 $P_b/P_1 \approx 4.18$）

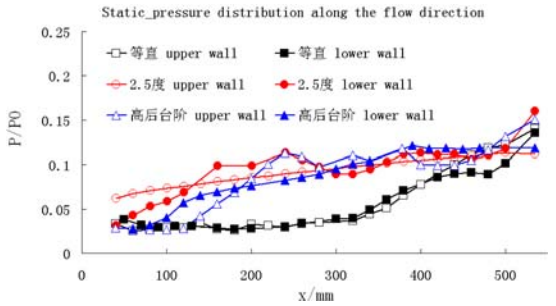
图 4 进口马赫数 2.5、不同反压条件下三种构型隔离段壁面压力分布曲线



(a) Pb/P0≈0.086 （压比 Pb/P1≈2.72）



(b) Pb/P0≈0.102 （压比 Pb/P1≈3.22）



(c) Pb/P0≈0.135（压比 Pb/P1≈4.26）

图 5 进口马赫数 3.0、不同反压条件下三种构型隔离段壁面压力分布曲线

2.2 流场的非对称性与激波串形态

由图 3，在来流马赫 2.0 条件下，等直构型及后台阶构型在各种压比条件下上下壁面压力曲线一致性较好，表明流场结构比较对称。2.5^{o} 扩张角构型上下壁面的压力分布曲线差异较大，表明激波串的不对称性较强，流动具有很强的偏向性。从图 3 的数据来看上侧壁面压力最先抬升，流动偏向下侧壁面。压力最先抬升的一侧（图 3(b)中的上壁面）在抬升之后曲线比较平缓，而另一侧则表现出波动性。由于流动偏向下壁面，边界层较薄，这就使得该侧壁面压力容易受到核心区激波串交替性压力升高和下降的节状激波杆结构的强烈影响，因此表现出波动性。

实验中利用纹影拍摄记录下了进口马赫数 2.0 时三种隔离段的局部流场结构。图 6 显示了等直隔离段在反压比 3.59 时的流动情况，隔离段内出现了伪正激波串结构，流动形态非对称性较弱，激波间距较小，靠近壁面处激波出现分叉，分离区较小。图 7 为 2.5°扩张角隔离段在反压比 2.37 时纹影图像，由于其压比较小，激波串呈现斜激波形态，扩张角隔离段的激波串起始位置与压比 3.6 条件下的等直隔离段激波串位置接近，P_b/P_1≈2.37 时，等直隔离段的激波串尚未前传到窗口处，相同压比下扩张角构型激波串更易于上传，抗反压能力降低。由纹影结果还可见，扩张角隔离段流动明显向下壁面偏转，具有非常强烈的非对称特性，下壁面的分离区受到抑制，只在激波根部有较小的两个分离区，而上壁面则出现了一个较大的低速分离区，实际上该分离区一直延伸至隔离段的出口，为强逆压梯度向上游作用创造了条件。

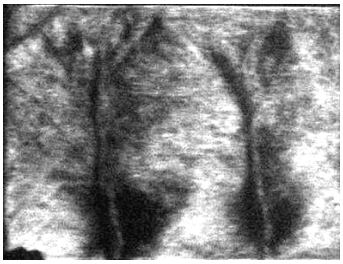


图 6 进口马赫数 2.0、P_b/P_1≈3.59 条件下等直隔离段纹影图像

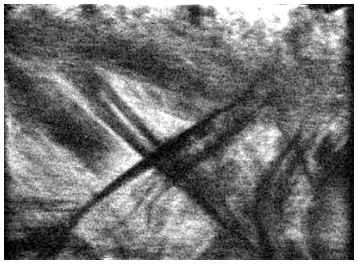


图 7 进口马赫数 2.0、P_b/P_1≈2.37 条件下 2.5°扩张角隔离段纹影图像

后台阶的构型，窗口恰好位于台阶之后，因此可以观测到台阶出口和角区的流动。由于台阶的突扩作用，台阶两侧形成较大的分离区，如图 8 所示，出现斜激波串结构，对称性较好。

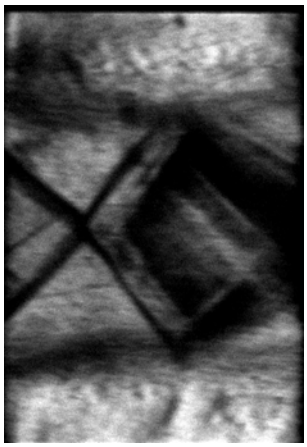


图 8 进口马赫数 2.0、$P_b/P_1 \approx 2.37$ 条件下后台阶隔离段纹影图像

结合压力分布曲线，可见等直隔离段与后台阶流动对称性接近，而扩张角构型较易出现非对称的流动结构。

分析原因，扩张角构型导致气流膨胀加速，到激波串起始位置处马赫数已增大，马赫数越大，膨胀导致压力下降，在同样大小的反压作用下，实际上等同于提高了压比，逆压梯度更大，因此分离的出现也就越发容易，分离流本身就具有不稳定的扰动因素，一旦流动失稳而偏向一侧，则偏离的一侧分离区逐渐长大，而偏向的一侧分离受到抑制。具有较大分离区的一侧，流体动量较低，逆压梯度更容易前传，因此该侧激波串的起始位置又进一步向入口方向推进，流场结构的非对称性达到最大。

对比图 5(b)及图 3(c)，前文已经描述过，在入口马赫 2.0 条件下，反压比 3.59 时隔离段激波串形态非对称性较弱；而在入口马赫 3.0 条件下，反压比即使仅仅 3.2，此时由静压分布来看，流动处于非对称形态，由于此时激波串还未上传至光学纹影窗口位置，所以无法进行纹影图像的对比。图 9 给出了当反压比 4.9 时激波串纹影照片，可以看到明显的强非对称特性。缩着来流马赫数的提高，隔离段流动非对称性增强。

由上述非对称特性的分析，对数值模拟也提出了要求，即使来流及几何构型是完全对称的，数值模拟也需采用全区域计算，而不应人为设置对称边界条件。目前，尽管已有文献阐述了隔离段流动非对称特性，但并未引起数值计算的重视。

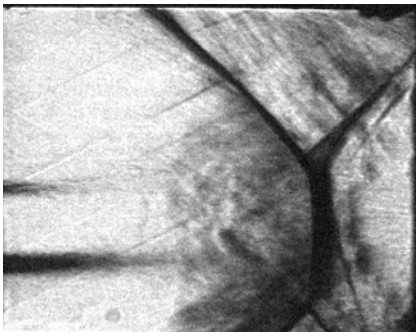


图 9 进口马赫数 3.0、$P_b/P_1 \approx 4.9$ 条件下等直隔离段纹影图像

3 结 论

本文实验对比了等直、扩张角、后台阶三种构型隔离段的压力特性以及流场形态，得出以下结论：

（1）等直隔离段的抗反压能力最强，扩张角和后台阶结构都将降低隔离段的抗反压能力，特别是扩张角的情况。

（2）后台阶的分离区使得反压直接传递并作用到台阶处，后台阶构型的激波串起始位置位于其他两种构型之间，但随着入口马赫数增大，激波串起始位置趋向于扩张角的情况。

（3）入口马赫数较低时等直隔离段内出现激波串结构接近对称形态，随着入口马赫数的提高，激波串呈现非对称结构。后台阶构型流动对称性与等直构型相近，而扩张角构型较等直隔离段更易出现流动非对称形态。非对称表现为流动偏向一侧壁面，使得该侧壁面的压力分布具有波动特性，而另一侧则比较平缓，具有较大分离区。

参考文献

1 金亮，吴先宇，罗世彬，王振国．隔离段反压对激波串起始位置的影响．推进技术 2008；29：54-57.

2 李博，袁化成，梁德旺．高超声速进气道等直隔离段的反压特性研究．宇航学报 2008；1.

3 肖隐利，陈亮，宋文艳．扩张角对隔离段抗反压能力影响的数值模拟研究．机械设计与制造 2005：42-44.

4 Emami S, Trexler C, Auslender A, Weidner J. Experimental investigation of inlet-combustor isolators for a dual-mode scramjet at a Mach number of 4. NASA Technical Paper 1995-3502.

5 杨事民, 唐豪, 黄胡. 超燃冲压发动机隔离段流场抗反压能力数值模拟. 长春理工大学学报 2008; 31: 127-131.
6 Carroll B, Lopez-Fernandez P, Dutton J. Characteristics of multiple shock wave/turbulent boundary-layer interactions. J Propulsion and Power 1990; 6.
7 Rodriguez C. Asymmetry effects in numerical simulation of supersonic flows with upstream separated regions. AIAA 2001; 84.
8 李博, 袁化成, 梁德旺. 高超声速进气道等直隔离段的反压特性研究. 宇航学报 2008; 1.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE FLOW CHARACTERISTICS OF DIFFERENT DIVERGENT ISOLATORS

Qiu Xin, Yue Lianjie, Lu Hongbo, Chen Lihong, Zhang Xinyu

(Hypersonic Research Center, CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract The flow characteristics of different divergent isolators were investigated experimentally, including the configurations with constant section, divergence angle and rearward-facing steps as well. The pressure distribution and schlieren images of three different isolators were measured. The results reveal that the isolator flow can be asymmetric even under conditions of symmetry in geometry and incoming flow. And the asymmetry would be stronger as the incoming Mach number increases. Both divergent configurations decrease the capability to resist back-pressure, especially that with divergence angle. The divergence angle leads to the worst capability to resist back-pressure, and stronger asymmetry of the shock train than the constant area duct. As for the isolator with rearward-facing steps, back pressure would get across to exert on rearward-facing step due to the large separated regions downstream the step. Its flow is close to the shorter isolator with constant area.

Key words Scramjet, isolator, shock-train, divergence duct