

隔离段激波串非对称及震荡特性实验研究

岳连捷 卢洪波 裴新 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 100190

摘要：为了分析隔离段激波串的非对称性及震荡现象，本文利用压力测量、纹影等技术手段对等直、带扩张角隔离段在入口马赫数2.0、2.5、3.0三种情况下的流场结构进行了实验研究。结果表明：激波串结构的对称性与入口马赫数和出口背压大小相关，低马赫数及背压下激波串结构是对称性的，高马赫数及背压下激波串出现非对称性；隔离段中所形成的激波串具有振荡特性，且振荡性与入口马赫数和出口背压相关，入口马赫数越大、出口背压越大则振荡特性越强烈。

关键词：超然冲压发动机隔离段激波串非对称性震荡特性

Experimental Study of Characteristics of Shock Train in a Scramjet Isolator

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

Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract: In this paper, characteristics of shock train in straight and divergent isolators were studied with pressure measurements and schlieren photography. Three incoming Mach Numbers were considered: Mach 2.0, Mach 2.5 and Mach 3.0. The experimental result revealed that asymmetric properties of the shock-train and oscillation phenomena were related to the incoming Mach number and the back-pressure-ratio. As Mach number and back pressure-ratio increased, the asymmetry and the oscillation of the shock train were enhanced.

Keywords: Scramjet, isolator, shock-train, Asymmetry effects, Oscillation phenomena

1 引言

隔离段是吸气式超燃冲压发动机中的关键部件之一，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前沿的工程应用背景，隔离段内的流动特性引起了越来越多人的关注。

1973年Waltrip【1】通过实验观测到圆形截面隔离段中的激波串结构，发现激波串是激波与边界层相互作用的结果。但隔离段内的激波串通常被认为是对称的，众多数值计算均采用对称面假设来分析隔离段内的流动特征^[2-4]。Carroll与Dutton^[5]对等直矩形截面管内激波串的结构进行了实验研究，利用油流显示与纹影拍摄和测压手段观测流场结构，分析不同的进口边界层厚度、核心区来流马赫数的影响，发现激波串结构存在非对称特性即上下壁面的压力分布曲线一致性很弱、流动偏向某一侧壁面，但其结果仅仅在单一马赫数下观测到激波串结构的非对称性，未分析激波串非对称性的具体影响因素。Rodriguez^[6]提到超声速管道内流激波串数值计算存在非对称现象，并通过数值计算分析了激波本身、背压对非对称性的影响，发现非对称扰动由分离与激波的相互作用引起、与几何以及流动条件无关流动，高背压下更容易出现非对称现象；但是由于受到特定的湍流模型等方面的限制，数值计算获得结论仍需要实验结果的进一步验证。

综上所述，隔离段内的激波串存在非对称性，但是没有引起足够的重视，而且影响激波串的非对称性的关键因素并没有相关实验研究。因此本文基于实验测量手段，探索对称几何、均匀来流条件下来流马赫数、背压对激波串的非对称性的影响。

2 实验台及隔离段构型介绍

实验装置——直联式隔离段冷流实验台由中国科学院力学研究所提供，如图1所示。高压空气经减压阀及临界流量计进入稳压室、流经喷管与隔离段、紧接节流锥、之后为消音塔。通过调节节流锥的位置，实现隔离段不同出口背压；隔离段入口马赫数分别为2.0、2.5、3.0；隔离段为等直构型、 2.5° 扩张角构型，如图2所示，入口截面 $70\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ，长度525mm，扩张角构型的出口高度大约是等直构型的 $4/3$ 倍。隔离段模型上配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 $290\text{--}370\text{ mm}$ 的区域范围内，观察窗范围为 $390\text{--}470\text{ mm}$ 。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。

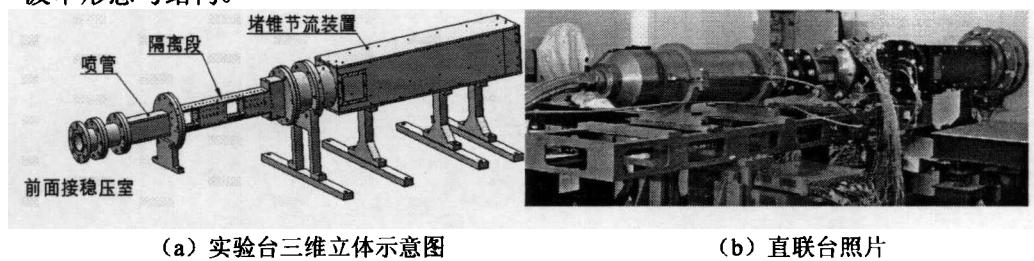
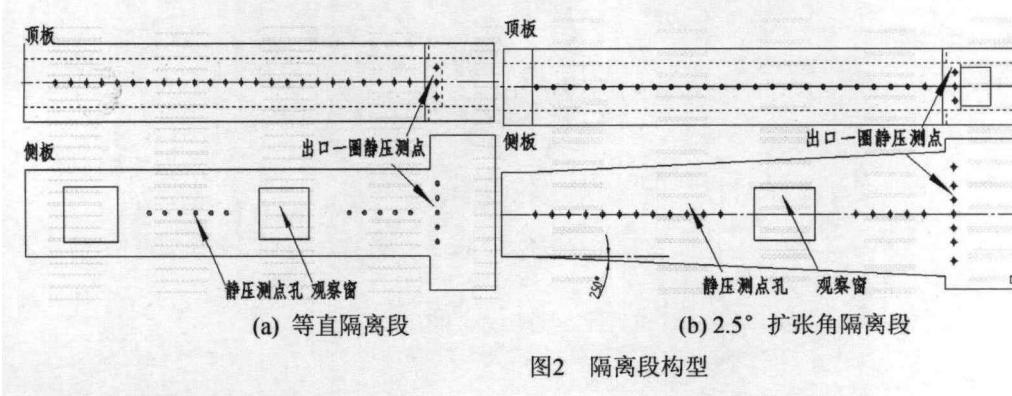


图1 直联式隔离段实验台示意图



3 实验结果与分析

3.1 激波串的非对称性分析

图3给出了等直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及纹影图。其中隔离段几何构型对称、入口气流参数均匀（即来流参数也关于中心面对称）、纵坐标为入口总压 P_0 无量纲后的静压，横坐标为距离隔离段入口处的距离，出口静压为 P_b ，入口静压为 P_1 ，后面不另作说明。从图3可以看出出入口 $Ma=2$ 时上下壁面激波串起始于同一位置，上下壁面沿程压力分布差异不大，波动性不明显。纹影图像更清晰地反映了上下壁面激波串起始于同一位置，流动还是比较对称的。对于来流 $Ma=3$ 的实验结果（如图4所示），与马赫数2.0的流动明显不同，可以观察到上下壁面激波串起始位置不同，一前一后，沿程静压分布也具有不对称性和波动性，压比较小时不对称性和波动性不明显，随压比增大，不对称性和波动性加剧。其纹影图进一步形象展示了激波串第一道激波的形态，明显可以看出上下端的起始位置不同，流动具有偏向性，本文将这种对称几何构型、均匀来流下出现的激波串的偏向性定义为激波串的非对称特性。

2.5° 扩张角马赫数2.0的壁面静压分布、纹影如图5所示，基本上所有压比情况下隔离段上壁面的压力分布不重合，内部出现非对称现象，只有在小压比的情况下（ $P_b/P_0=0.173$ ，此时对应的出口与进口的压比 $P_b/P_1=1.37$ ）上下壁面的压力分布基本重合，间接表明此时隔离段内的

激波串结构低压比情况下是对称的。此外，从图可以看出上壁面一侧的激波串起始位置更靠前，这将导致流动偏向下壁面，因此下壁面的测点的压力值受到主流激波节结构的交替性压力升高与压力下降的影响增大，所以沿程压力分布具有波动性。同样地随着反压增大激波串起始位置逐渐向隔离段入口发展。纹影照片可以更直观地看出激波串的不对称性。扩张型通道壁面静压沿程分布在未受激波串干扰时沿程壁面压力逐渐下降，这使得激波串起始位置的静压相对进口降低，同样出口反压条件下出口静压与激波串起始位置的静压之比显著提高。

因此隔离段流动的对称性不仅与反压压比（与文献【6】数值的结论一致），还与马赫数相关。具体来说马赫数越大，压比越大，非对称就越容易出现，程度也越严重。此外 2.5° 扩张角构型中的激波串更容易出现非对称性。

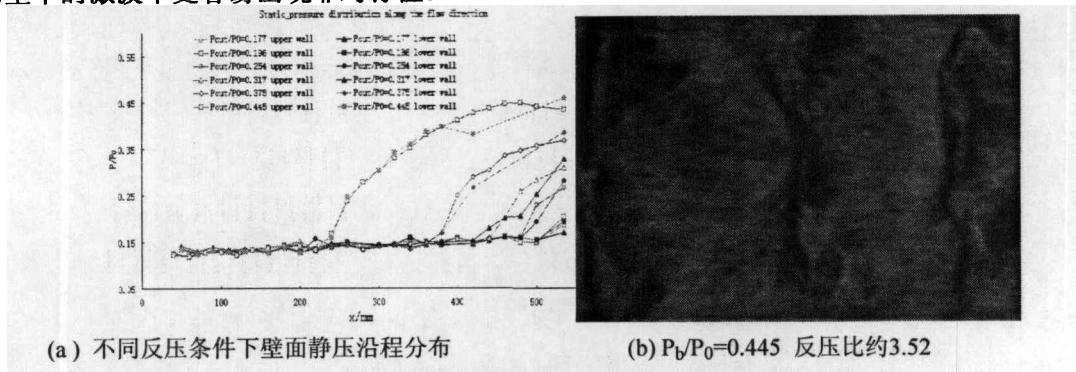


图3 等直隔离段，入口马赫为2.0的实验结果

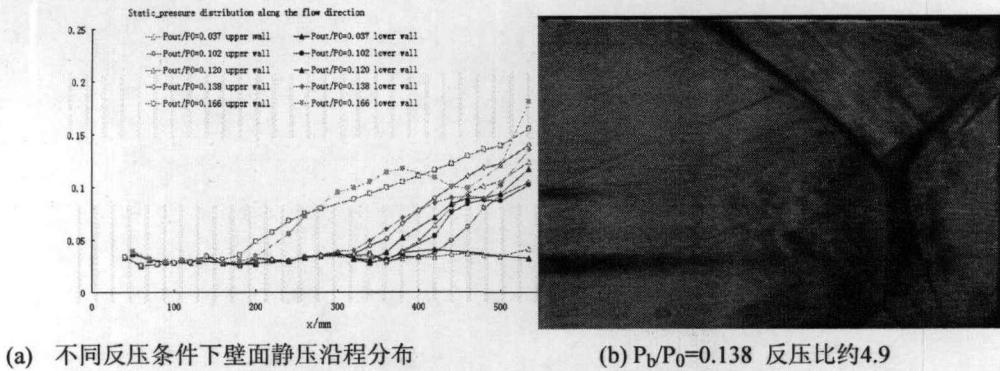


图4 等直隔离段，入口马赫3.0的实验结果

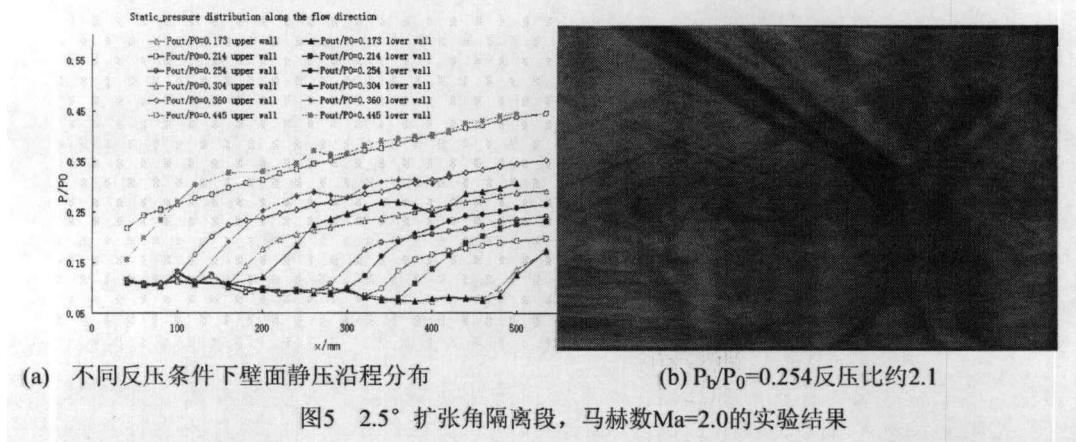


图5 2.5° 扩张角隔离段，马赫数 $Ma=2.0$ 的实验结果

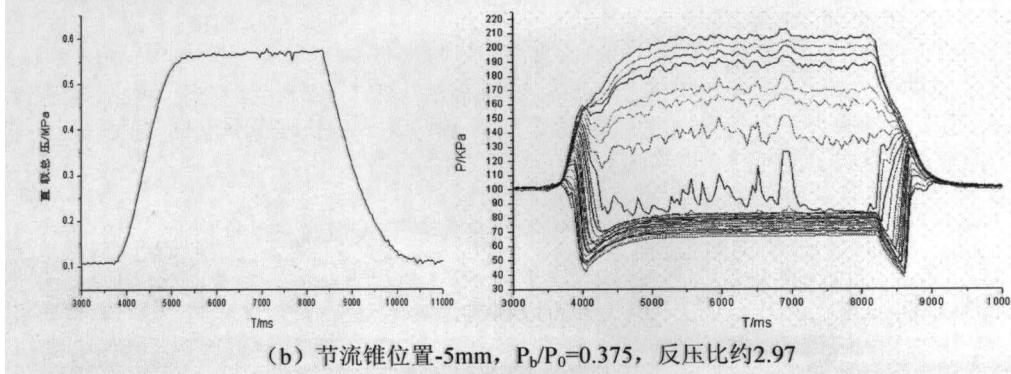
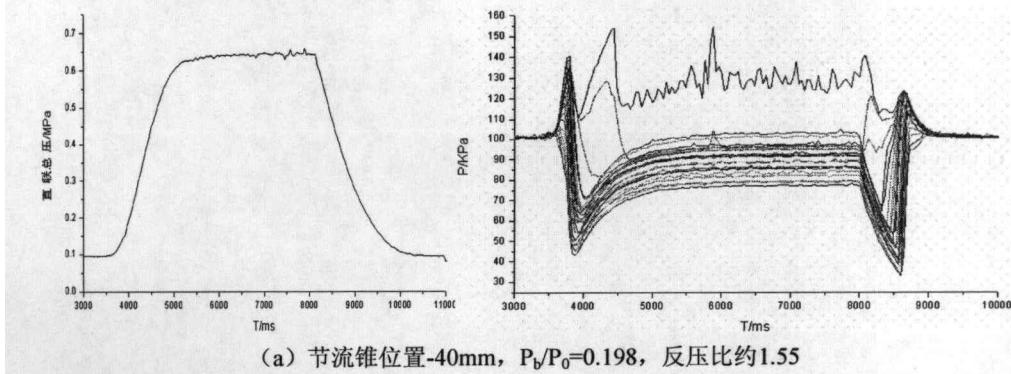
3.2 激波串的震荡特性分析

实验研究激波串的非对称特性时，还发现激波串范围内的静压测点的压力信号随时间有一个波动量，纹影拍摄也直观地观测到激波串的位置和结构都是随时间变化的，不能稳定，本文将这种现象定义为振荡的特性，因为激波串的振荡直接导致壁面压力的脉动。但是振荡的幅度

和范围都是有限的，不同的进口马赫数与进出口压比条件对应的情形不同。图6展示了等直隔离段入口 $Ma=2.0$ 时不同反压条件下的直联总压与沿隔离段上壁面的测点的压力数据。随着节流锥位置前移，隔离段出口背压增大。节流锥位置-40mm时，测点的压力随时间的曲线簇中除一条曲线波动较大外，其他的都很平坦，波动较大的曲线对应的测点刚好处于激波串起始位置附，这是因为此时节流量小，隔离段出口背压小，激波串的长度短而且处在隔离段出口处。节流锥位置变化到-5mm，平坦的曲线变少，震荡的曲线分布在平坦曲线之间，即激波串起始位置之前、激波串结束之后的各压力信号平稳，处在激波串之间的测点压力信号剧烈震荡，震荡幅度也大大增加。而且可以看出在5~8s的稳定时间段里，隔离段中只有中间的几个测点所对应的压力测量值随时间的变化有较大的波动，两侧的测点远离激波串的起始位置，曲线也较为平坦。节流锥推到2.5mm时，同样获得类似的结果但是震荡特性更加明显、震荡幅度进一步增加。随着节流锥的前移，背压逐步增大可以清晰观测到激波串之间的压力信号波动的幅度也逐步增大，因此反压增大会增强激波串的自激振荡。此外，在不同压比条件下，均存在一个脉动幅度最大的压力信号，结合隔离段沿程压力分布知此测点位于激波串的起始位置处，可见激波串的起始位置处流动最不稳定，震荡幅度最大。

马赫数3.0、反压比3.7等直隔离段各压力测点的数据如图7所示。与马赫数2.0、压比相同的测量数据比较发现， $Ma=3.0$ 的位于激波串之间的压力信号震荡更加剧烈，幅度进一步增加。 2.5° 扩张角构型的隔离段实验结果类似，这里没有一一列出。可见马赫数越大，激波串震荡越剧烈，震荡幅度越大。

调整节流锥位置到合适的位置，使得在观察窗口附近出现激波串结构。等直隔离段、入口气流马赫数2.0、节流锥位置在1mm处，纹影观测到的激波振荡特性如图8所示。综合图7、图8清晰分析出：1、测点压力的波动只出现在当该测点处于激波串的范围内时。2、激波串起始位置附近的测点的压力波动特别大，远离起始位置的测点压力波动减小。气流方向从左往右，可以看出激波串距离观察窗入口处的距离时而增大时而减小，有来回振荡的特性，第一与三幅图出现了三道分叉激波，第二、四幅图出现约两道激波。激波振荡不仅表现为来回式振荡，就还包括激波形态的改变，激波间距也发生变化。在 2.5° 扩张角构型隔离段实验同样观测类似的结果，这里没有展示。当然由于实验采用的压力传感器响应特性限制，只能定性说明激波串存在震荡特性，因此很有必要利用高速响应的测压传感器和CCD来捕捉振荡的细节内容，做更深入的分析。



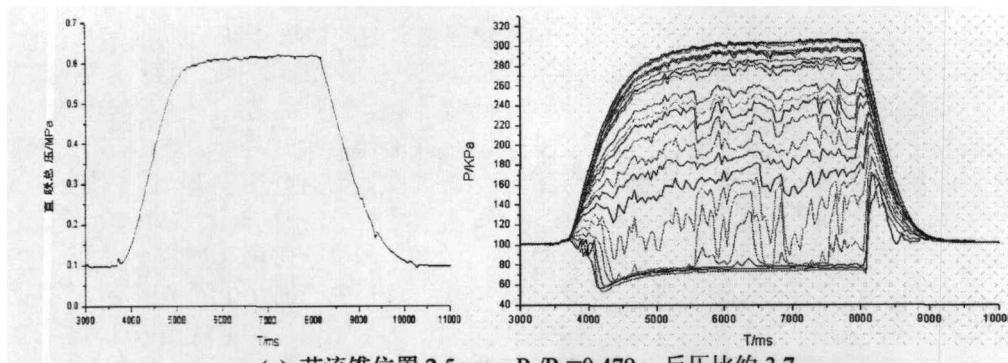


图6 等直隔离段、 $Ma=2.0$, 压力随时间变化曲线
左: 入口总压随时间分布曲线 右: 沿程各压力测点的压力随时间分布曲线

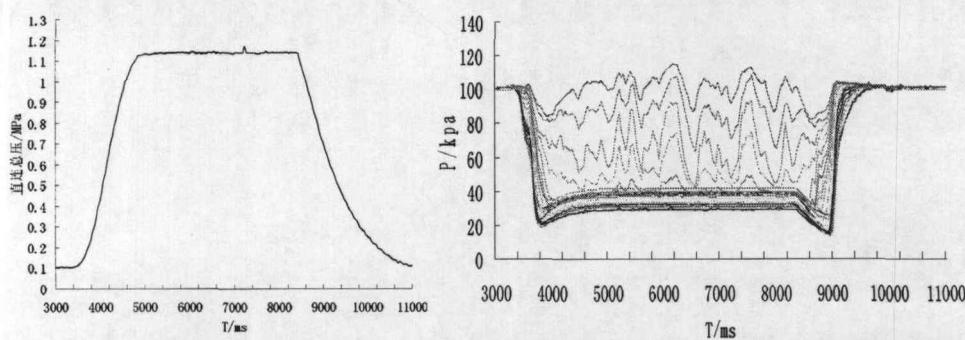


图7 等直隔离段、 $Ma=3.0$, $P_b/P_0=0.102$, 反压比约 3.7, 压力随时间变化曲线
左: 入口总压随时间分布曲线 右: 沿程各压力测点的压力随时间分布曲线

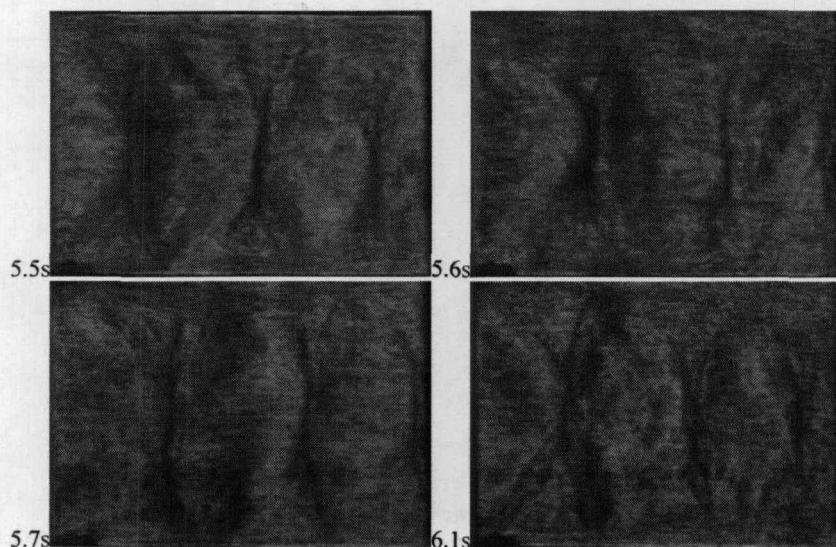


图8 等直隔离段、 $Ma=2.0$, 压比约为 3.54, 不同时刻纹影图

4 结论

本文采用压力测量、纹影等技术手段成功地捕获了等直、扩张角构型的隔离段的流场特性，针对激波串的非对称及震荡特性开展了分析，得出以下结论：

1. 在来流均匀（隔离段入口参数关于中心面对称）、对称的几何构型条件下隔离段激波串结构仍存在非对称性，且非对称性与来流马赫数、背压压比相关。马赫数2.0时，背压压比增加，激波串的非对称性增强；同样背压压比下，马赫数3.0对应的激波串比马赫数2.0的非对称更强。
2. 同样来流条件下，相比等直构型， 2.5° 扩张角构型更容易出现非对称性。马赫数2.0时，等直隔离段构型中的激波串基本对称，而 2.5° 扩张角构型内的激波串在同样出口背压下出现强非对称性。

3. 激波串结构本身并不稳定，存在震荡现象，且受背压压比、来流马赫数的直接影响。随着马赫数及背压压比的提高，激波串的震荡幅度增大。

参考文献

1. Waltrip P, Billig F. Structure of shock waves in cylindrical ducts. AIAA Journal 1973; 11: 1404-1408.
2. 曹学斌, 张堃元. 非对称来流下带斜楔的短隔离段数值研究. 推进技术, 2009, 10 (6): 677-681
3. 范晓樯, 李桦, 丁猛. 三维超声速隔离段湍流内流场旋涡结构的数值模拟. 国防科技大学学报 2001; 23 (6) :5-8.
4. 冯锦虎, 高峰, 刘华, 等. 反压对超燃冲压发动机隔离段内流场的影响. 空军工程大学学报, 2009, 10 (4): 20-23.
5. Carroll B, Lopez-Fernandez P, Dutton J. Characteristics of multiple shock wave/turbulent boundary-layer interactions. J Propulsion and Power 1990;
6. Rodriguez C. Asymmetry effects in numerical simulation of supersonic flows with upstream separated regions. AIAA 2001; 84.