

# 变截面隔离段流场数值分析\*

田旭昂, 王成鹏, 程克明

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 对一种由矩形转变为圆形的变截面隔离段流场进行了数值模拟, 并将其与圆形和矩形等截面隔离段内流场进行了对比。在相同来流条件和不同进出口压比条件下, 分析了隔离段内激波串区域流动特性、激波串起始位置、激波串长度、出口处流量平均参数以及隔离段出口流场流动均匀性等隔离段性能。结果表明: 相对于矩形截面隔离段, 变截面隔离段中的分离区域有变短、变宽的趋势。这不仅能够有效降低激波串长度和内阻, 而且产生了主流和壁面之间的横向流动。最后, 对变截面隔离段中激波串长度与压比之间的关系公式进行了修正。

**关键词:** 内流空气动力学; 变截面隔离段<sup>+</sup>; 激波串<sup>+</sup>; 冲压喷气发动机

**中图分类号:** V235.213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 06-0690-06

## Numerical analysis of a variable cross-section isolator

TIAN Xu-ang WANG Cheng-peng CHENG Ke-ming

(Coll. of Aerospace Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** The flow characteristics of a variable cross-section isolator were investigated using numerical simulation. The cross-section of the isolator was designed to have linear transformation from rectangular entrance to circular exit and all cross-section areas remained constant axially. The identical incoming flow and different pressure ratios were considered. The numerical results were compared with that of circle and rectangle cross-section isolators by characteristics of shock train region, leading edge of shock train, length of shock train, mass weighted-average parameters at the exit, etc. In contrast to rectangle cross-section isolator, the shorter and wider separation region is achieved in the variable cross-section isolator, which leads to shorter length of shock train, decreased internal drag and lateral flow between mainstream and wall. Based on an analysis of shock train length in this variable cross-section isolator, a modified correlation is proposed.

**Key words** Internal aerodynamics; Variable cross-section isolator<sup>+</sup>; Shock train<sup>+</sup>; Ramjet engine

## 1 引 言

隔离段处于超燃冲压发动机进气道和燃烧室之间, 其一方面起到避免进气道与燃烧室之间相互干扰的作用, 为进气道提供一个较宽的连续工作范围; 另一方面, 隔离段还需要为双模态冲压发动机的不同工作模态提供不同状态的气流, 以保证不同模态燃烧的平稳过渡。因为存在多激波系之间的干扰和反射, 以及激波与壁面附面层之间的强干扰现象, 隔离段流场表现出异常的复杂性<sup>[1]</sup>。

对于高超声速飞行器而言, 进气道类型和燃烧室结构的选择决定了飞行器的整体结构, 并且对推阻性

能、气动特性、冷却负荷等各种性能参数都将产生很大的影响。二维平面压缩、三维侧压进气道结构简单, 可以利用前体进行来流预压缩, 便于一体化设计, 常规的高超声速飞行器常采用这两种进气道。同时, 相比矩形截面燃烧室, 圆形截面燃烧室表现出较多优势: 长度较短、结构重量轻、阻力小、所需主动冷却面积小, 同时圆形截面的燃烧室还能有效降低超声速角流区的影响<sup>[2]</sup>。常规的处于进气道与燃烧室之间的隔离段通常设计为等截面管道, 目前隔离段的绝大多数研究也局限于等截面管道, 相应的流动研究和设计无法解决如何将上文提到的方形进气道出口和圆柱形燃烧室匹配的难题。鉴于此, 本文分析了一种进口

\* 收稿日期: 2007-12-21; 修订日期: 2008-04-22。

基金项目: 国家自然科学基金 (10702029, 90716013); 航空科学基金 (2006ZB52013)。

作者简介: 田旭昂 (1984-), 男, 硕士, 研究领域为高速空气动力学。Email: xuang\_tian@nuaa.edu.cn

为矩形截面、出口为圆截面的变截面隔离段内流动特点, 试图找出解决问题的方法。利用数值模拟对这种变截面隔离段内流场, 重点是激波串区域进行研究, 并与等截面圆形和矩形截面隔离段进行对照比较, 以初步分析变截面隔离段的内流特性, 得到变截面隔离段较等截面隔离段的优势之所在, 为今后的研究工作和工程应用提供一定的参考。

## 2 物理模型和计算方法

### 2.1 计算方法<sup>[3]</sup>

本文采用有限体积法对三维雷诺平均 N-S 方程进行离散求解, 湍流模型则采用 RNG  $k-\epsilon$  两方程模型, 非平衡壁面函数。其中对流通项采用 Roe 格式进行分裂, 而粘性项则采用二阶中心差分格式离散; 时间推进使用 LU 隐式格式; 流动控制方程、湍流动能方程和湍流耗散方程耦合求解, 且均达到二阶精度格式。隔离段进口和出口分别采用的是压力进口和压力出口边界条件; 壁面采用绝热、无滑移边界条件。在整个计算过程中, 保持隔离段进口总压  $p_0 = 100$  kPa, 总温  $T_0 = 298$  K 和来流马赫数  $Ma = 2.0$  不变, 通过改变隔离段进出口的压力比值, 确定出口处的静压, 从而设定不同的计算工况。整个计算过程中, 监视隔离段轴中心线上的压强总和, 以其数值恒定、激波串不再前移为计算收敛的主要判据。判断计算收敛还以各项残差系数达到  $10^{-3}$  以下且不再变化和进出口流量差  $\Delta m/m$  达到  $10^{-4}$  量级为标准。

### 2.2 几何构型和计算网格

本文针对 3 种不同截面形状的隔离段进行分析比较: 截面半径  $R = 16.93$  mm, 长  $L = 300$  mm 的圆形等截面隔离段; 截面为  $30 \times 30$  mm, 长  $L = 300$  mm 的矩形等截面隔离段; 进口截面为  $30 \times 30$  mm, 出口截面为半径  $R = 16.93$  mm 的圆形, 长  $L = 300$  mm 的变截面隔离段, 其截面变化规律如下:

(1) 从进口处的正方形 ( $30 \times 30$  mm) 沿轴向一次线性变化到出口圆形的内接正方形 ( $23.94 \times 23.94$  mm), 这个正方形区域也正是各个横截面的中心主要区域; (2) 各个截面在中心正方形区域确定的情况下, 各条边的外部区域为以边长为弦、半径由无穷大到  $16.93$  mm 变化的弦外面积。整个变截面隔离段的构型是通过 CAD 软件放样功能实现得到的, 其变截面示意如图 1(a)。

为了保证分析的可比性, 三种隔离段任一截面面积和隔离段长度保持恒定。考虑到三种隔离段的结

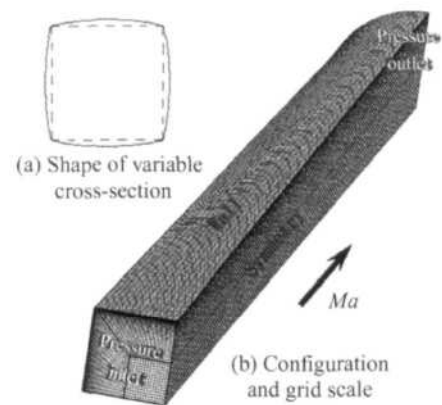


Fig. 1 Schematic of variable cross-section isolator

构对称特性和降低计算消耗, 本文对圆截面隔离段采用 2D 轴对称计算进行, 而对矩形截面和变截面隔离段则均沿轴向选取  $1/4$  的隔离段作为计算区域进行计算。本次数值模拟均采用结构化网格, 根据来流条件和几何尺寸, 底层网格的  $y^+ \approx 5$ 。具体网格划分细节如表 1 所示, 图 1(b) 为变截面隔离段几何构型和计算网格示意图。

Table 1 Parameters of grid

| Kind of cross-section | Grid scale                                                                    |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Circular              | $60 \times 300$ (2D axial symmetry)                                           |
| Rectangular           | $30 \times 30 \times 300$                                                     |
| Variable              | $30 \times 15 \times 300$ $30 \times 15 \times 300$ $15 \times 15 \times 300$ |

### 2.3 算例验证

为了验证数值模拟的可信度, 首先对 Dudek J C 等人<sup>[4]</sup>进行的进口来流马赫数为 2 的圆截面隔离段内流场进行了计算, 几何条件与来流参数均取自于试验数据, 计算所得壁面压力分布与试验数据对比见图 2(a)。可以看出, 无论是激波串起始位置还是压力变化趋势, 双方都吻合得令人满意。作为进一步的算例考查, 计算了近期 Kaname Kawatsu<sup>[5]</sup>的进口来流马赫数为 2.3 的矩形截面隔离段内流场, 上壁面中心线上压力分布的计算值与试验值对比见图 2(b)。可以发现, 除了激波串起始位置前计算压力值略高于试验值外, 双方取得很好的一致; 仔细查看文献 [4, 5], 发现文献 [4] 中采用射流风洞, 文献 [5] 中采用直联风洞, 而文献 [5] 没有对隔离段进口 (即拉瓦尔喷管出口) 处附面层进行测量。本文在计算中假设隔离段进口附面层从零厚度开始发展, 从而导致计算附面层厚度较试验附面层厚度要小, 这使得激波串前区域计算与试验压力值略有差别。总的说来, 本文所用计算程序在计算这种管内激波串流场具有一定的精度。

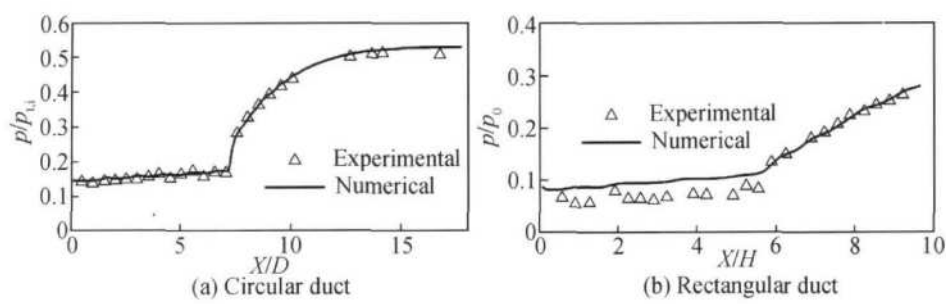


Fig. 2 Validation data and experimental data

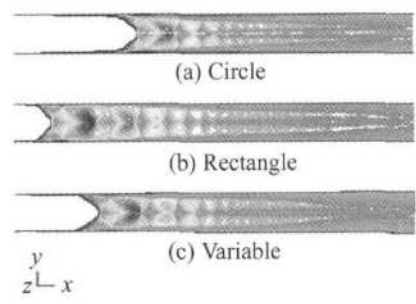


Fig. 3 Mach contours for  $Ma = 2.0$ ,  $p_b/p_i = 3.8$

3 计算结果与讨论

3.1 相同隔离段长度、相同背压条件下, 三种隔离段流动特性研究

在  $Ma = 2.0$  进出口压比  $p_b/p_i = 3.8$  的计算工况下, 对三种隔离段进行比较分析。图 3 为流场内对称面上马赫数分布图; 图 4 为沿壁面中心线和流场中心轴线的压强分布曲线; 表 2 给出了隔离段中斜激波起始位置、激波串区域分布、整个隔离段 (从压力进口到压力出口) 内阻  $F_D$ , 以及出口处流量平均马赫数  $Ma_{mwa}$  和流量平均总压恢复系数  $\sigma_{mwa}$ 。

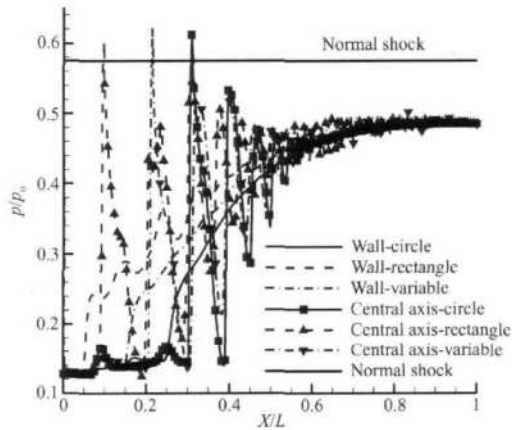


Fig. 4 Pressure distribution for  $Ma = 2.0$ ,  $p_b/p_i = 3.8$

Table 2 Characteristics of isolators for  $Ma = 2.0$ ,  $p_b/p_i = 3.8$

| Cross-section                         | Circle    | Rectangle  | Variable   |
|---------------------------------------|-----------|------------|------------|
| Leading edge of shock train ( $X/L$ ) | 0.24      | 0.042      | 0.138      |
| Shock train region ( $X/L$ )          | 0.24~0.60 | 0.042~0.82 | 0.138~0.75 |
| $F_D/N$                               | 3.21      | 2.85       | 3.18       |
| $Ma_{mwa}$                            | 0.71      | 0.72       | 0.70       |
| $\sigma_{mwa}$                        | 0.690     | 0.694      | 0.690      |

可以看出, 在相同背压条件下, 圆形截面隔离段

中激波串的起始位置最靠后, 变截面隔离段的次之, 而矩形截面隔离段的斜激波起始位置最前。圆截面隔离段的激波串区域最短, 大约为  $0.36L$ ; 矩形截面隔离段的激波串最长, 约为  $0.78L$ ; 而变截面隔离段中激波串的长度处于两者之间, 其数值比圆截面隔离段增加了 70%, 而比矩形截面隔离段减少了 21.3%。分析整个隔离段的内阻, 出口流量平均马赫数和流量平均总压恢复系数可以发现, 三种隔离段没有明显的差别, 只是在内阻的比较上变截面隔离段和圆截面隔离段要比矩形截面隔离段大 11.6% 和 12.6%。需要说明的是, 在等截面隔离段中, 压差阻力为  $Q$  内阻  $F_D$  完全由摩擦阻力提供; 而在变截面隔离段中, 因为截面的变化使得不同截面在四条边上除了具有曲率的变化外, 在轴向上还具有一定的扩张角; 而在截面角区, 因为边的变化和面积恒定的原因, 故具有一定的沿程收缩角。这两者使得变截面隔离段中的内阻  $F_D$  除了包含摩擦阻力外, 还具有一定的向前和向后的压差阻力。在本算例中, 变截面隔离段  $F_D = 3.18\text{ N}$ , 其中摩擦阻力  $2.97\text{ N}$ , 压差阻力  $0.21\text{ N}$ 。

3.2 相同激波串起始位置、相同压比条件下, 三种隔离段流动特性研究

选定  $Ma = 2.0$  激波串起始位置在距隔离段入口  $1/6L$  时为基准状态, 此时圆形截面、矩形截面和变截面隔离段进出口压比分别为 3.91、3.57 和 3.8 而激波串前的核心气流马赫数均为 1.95。取此马赫数下正激波前后压比的 82.5% 为统一的基准背压, 则基准背压比  $p_{bb}/p_0 = 0.45$ 。图 5 为激波起始位置为  $1/6L$  时, 三种隔离段沿壁面中心线的压强分布曲线。

此时三种隔离段分别在  $0.41L$ 、 $0.86L$  和  $0.57L$  处达到基准背压。设定这几个位置处的横截面作为隔离段基准出口面 (Base cross-section), 选取从压力进口到基准出口面的部分为定义隔离段, 以其为参考分析三种隔离段的性能。表 3 给出隔离段中基准出

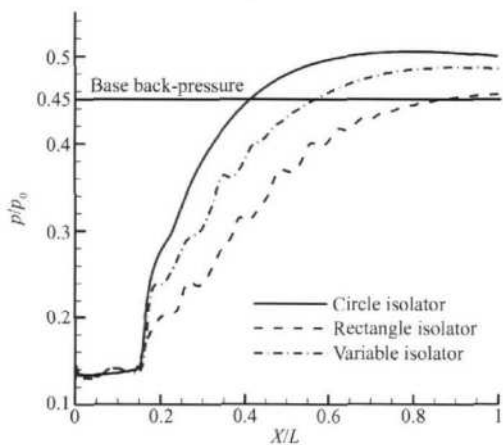


Fig. 5 Central axial pressure distribution  
for  $p_{bb}/p_0 = 0.45$

口面位置、定义隔离段(从压力进口到基准出口面)的内阻  $F_D$  以及基准出口处的流量平均马赫数  $Ma_{mwa}$  和流量平均总压恢复系数  $\sigma_{mwa}$ 。

Table 3 Characteristics of isolators for  $p_{bb}/p_0 = 0.45$

| Cross-section               | Circle    | Rectangle | Variable  |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Base cross-section( $X/L$ ) | 0.41      | 0.86      | 0.57      |
| $F_D/N$                     | 1.16      | 2.91      | 1.56      |
| $Ma_{mwa}$                  | 0.86      | 0.81      | 0.86      |
| $\sigma_{mwa}$              | 0.779     | 0.731     | 0.760     |
| Separation region( $X/L$ )  | 0.18~0.25 | 0.12~0.60 | 0.16~0.48 |

在激波串起始位置相同, 达到要求压升的情况下, 变截面隔离段所需的定义隔离段长度介于圆截面和矩形截面隔离段之间, 其比圆截面隔离段所需长度增加了 39%, 而比矩形截面隔离段缩短了 33.7%。变截面隔离段内阻  $F_D$  为 1.56 N, 比圆截面隔离段增加了 34.5%, 而比矩形截面隔离段减少了 46.4%。一方面隔离段中不同沿程位置上截面的变化大大降低了气流在角区的分离, 这在直接减少壁面剪切应力的同时, 也减少了达到要求压比所需要的隔离段的长度; 另一方面在本次算例中, 变截面隔离段的摩擦阻力为 1.70 N, 而前面提到的因为变截面隔离段扩张和收缩因素所产生的压差阻力为 -0.138 N, 即压差阻力在此时为向前推力, 这也降低了内阻的大小。

三种隔离段基准出口面流量平均马赫数均为亚声速。而在总压恢复系数方面, 圆截面隔离段比变截面隔离段高 2.5%, 而矩形截面隔离段则要比变截面隔离段低近 4%。通过流量平均参数的比较表明: 变截面隔离段的特性接近于圆截面隔离段, 而优于矩形截面隔离段。

图 6(a)显示了圆截面隔离段中心面上  $x$  方向速度的分布, 其中黑色实线表示了基准出口面的位置; 在图 6(b)和(c)中, 深色区域为矩形截面和变截面隔离段中的分离区, 同时图中还显示了基准出口面上  $x$  方向速度的分布。从图中可以看出, 圆截面隔离段中分离区域最短, 而变截面隔离段分离区域的长度要短于矩形截面隔离段, 但横向分离宽度更大。这就使得在变截面隔离段中“ $\lambda$ ”激波的激波角变大, 激波强度增加, 达到要求压升的长度减少, 激波串长度减少。分析变截面隔离段横向分离面积增大的原因为变截面隔离段中角区在轴向上的收缩使得本可以顺利通过的气流受到阻挡, 速度下降, 带动更多气流分离的产生。因为处于亚声速阶段, 气流速度降低和分离区域产生的影响会向前传播, 对前面分离区造成影响, 产生更大的分离区域; 而截面四边所包含的曲面, 因为具有一定的沿程扩张角, 使得角区的低速分离流动有一定程度上的速度增加, 抑制了角区分离的进一步扩大。随着矩形截面向圆截面的过渡, 角区逐渐由直角转变为平滑曲线, 也使得角区的壁面分离逐渐减弱。所以在变截面隔离段中, 横向分离宽度虽然比矩形截面大, 但轴向分离区域的长度则更短。正是分离区域这种由“长而窄”到“短而宽”的过渡, 是变截面隔离段相对于矩形截面隔离段性能提高的关键。

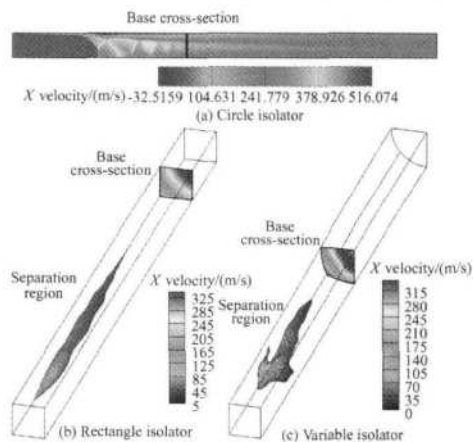


Fig. 6 Schematic of separation region  
and  $x$ -velocity at base cross-section

观察基准出口面的位置可以发现, 基准出口面都处于壁面分离区域之后, 因此在基准出口处并没有气流分离和回流情况的出现。图 7(a)为圆截面隔离段中马赫数分布图, 图 7(b)和(c)为矩形截面和变截面隔离段基准出口面的马赫数分布, 其中矢量为出口面内  $y$  和  $z$  方向的速度分量。可以看出, 三种隔离段的基准出口面上的流动既存在超声速区, 也存在亚声

速区,这就为燃烧室提供了亚/超声速两种气流。在从壁面向中心主流过渡的方向上,三种隔离段的气流马赫数都具有一个递增的过程。然而圆截面和变截面隔离段中,在中心轴线附近的气流马赫数有一定的下降,见图 7(c)和图 8。也就是说,隔离段轴线核心处的气流马赫数要略小于周围。这与基准出口面处于隔离段内伪激波区域的具体位置有关:矩形截面隔离段的基准出口面处于伪激波区域中混合区的后部,此时流场已恢复具有较高的均匀性;而圆截面和变截面隔离段中基准出口面的位置相对靠前,处于激波串区域的后部或混合区的前部,受激波和负面层分离影响较大,流场的均匀性较差。同时在比较基准出口面上横向速度时可以发现,矩形隔离段只有从中心向四周壁面的横向流动;而变截面隔离段在距中心 0.5R 附近会有一定涡旋的产生,使得在主流和壁面流动之间具有气流的交换。产生这种情况应该归结于变截面隔离段中,横截面边曲率的变化和壁面沿程的扩张与收缩,从而带动了气流的横向运动。变截面隔离段这一特点的出现有利于燃料与气流的混合,提高发动机的燃烧效率。

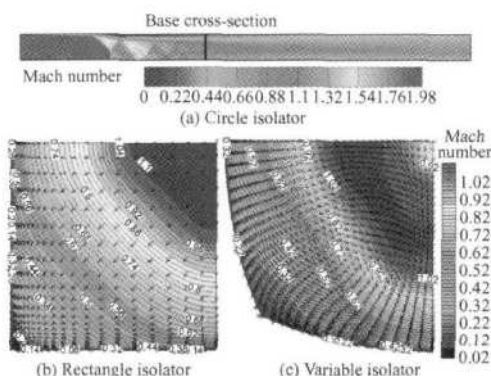


Fig. 7 Flow characteristics of circle isolator and base cross-sections

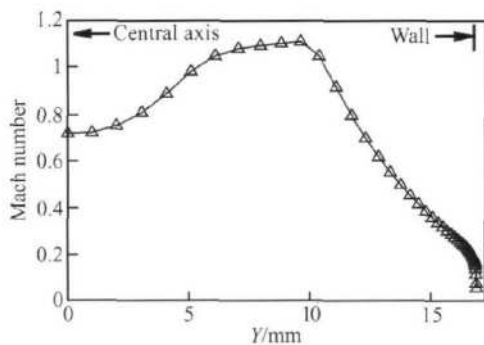


Fig. 8 Mach radial distribution at base cross-section of circle isolator

### 3.3 隔离段内激波串长度公式分析

为了得到隔离段内激波串长度的计算方法,前人进行了许多相关研究。20世纪70年代, Waltrup 和 Billig 通过大量实验总结出了等直圆管内激波串长度的经验公式<sup>[6]</sup>。到了20世纪90年代, Billig 又对该公式进行了修正,得出了等直矩形管内激波串长度的经验公式<sup>[7]</sup>

$$\frac{L(Ma^2 - 1)Re_0^\alpha}{D^{1/2}\theta^{1/2}} = 50\left(\frac{p_t}{p_a} - 1\right) + 170\left(\frac{p_t}{p_a} - 1\right)^2 \quad (1)$$

式中  $p_a$ ,  $p_t$  分别为激波串前和上升要求的压强;  $L$  为达到要求压强时所需要的长度;  $D$  为截面当量直径;  $\theta$  为附面层动量损失厚度;  $\alpha$  表示了不同管道内激波串长度和动量损失厚度雷诺数  $Re_0$  之间的指数关系:  $\alpha = 0.25$  时对应等直圆管,  $\alpha = 0.2$  时对应等直矩形管。定义激波串长度参数  $Q = \frac{L(Ma^2 - 1)Re_0^\alpha}{D^{1/2}\theta^{1/2}}$ 。

利用本文中等直圆截面和矩形截面隔离段的算例与上面两个经验公式进行比较,如图9。可以看出,经验公式在整体上反映了隔离段内激波串特性。图10表示了按照等截面隔离段经验公式计算变截面隔离段所得到的数据分布。已有的经验公式不能够很好地描述变截面隔离段数据分布,因此需要对其进行修正。在变截面隔离段中,虽然每一个截面的当量直径都不相同,但截面为线性变化,因此选取进出口当量直径的平均值作为参考当量直径  $D = 31.93$  mm。两种等截面隔离段经验公式的区别还在于  $Re_0$  的指数  $\alpha$  选取的不同。因此,  $\alpha$  的设定也应该是修正变截面隔离段公式的关键。通过分析比较得到,  $\alpha = 0.23$  时变截面隔离段的数据分布与曲线拟合较好,如图11。在本文所设定的变截面隔离段中,激波串

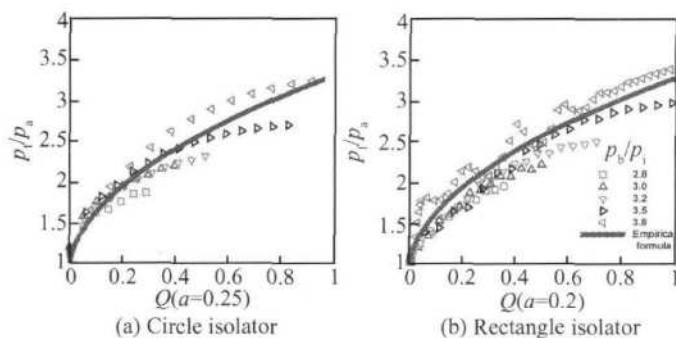


Fig. 9 Empirical formula and numerical simulated data for circle and rectangle cross-section isolators

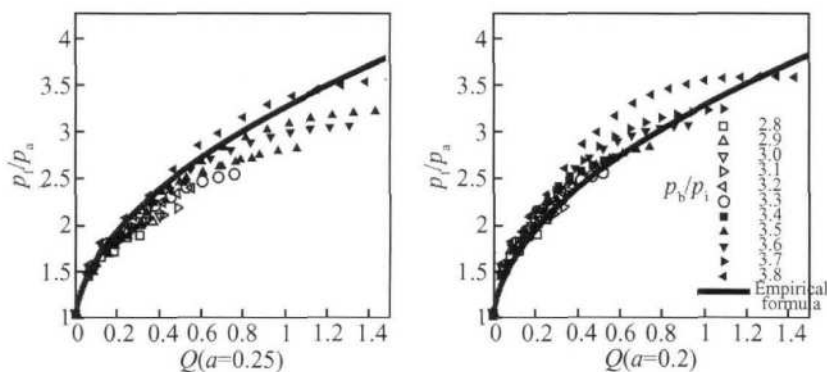


Fig. 10 Empirical formula and numerical simulated data for variable cross-section isolator

长度与压比之间的关系可以通过下式得到

$$\frac{L(Ma^2 - 1)Re_0^{0.23}}{D^{1/2}\theta^{1/2}} = 50\left(\frac{p_f}{p_a} - 1\right) + 170\left(\frac{p_f}{p_a} - 1\right)^2 \quad (2)$$

## 4 结 论

通过数值模拟对三维变截面隔离段的流动特性和问题进行了研究,并按照一定基准与圆截面隔离段和矩形截面隔离段特性进行了对比。通过分析得到如下结论:

(1)变截面隔离段承受反压的能力要高于矩形截面隔离段。当隔离段长度和背压均相同时,变截面隔离段中激波串区域长度较矩形截面隔离段缩短了 21.3%;而在给定前后压比的条件下,变截面隔离段的长度要比矩形截面隔离段短 33.7%。

(2)变截面隔离段的内阻除了摩擦阻力因素外,因为壁面的扩张和收缩还引入了压差阻力。即使如此,因为承受反压能力的提高,在给定前后压比的条件下,变截面隔离段的内阻仍要比矩形截面隔离段减小 46.4%。

(3)变截面隔离段内的分离区域相对于矩形截面隔离段而言,有一种由“长而窄”到“短而宽”的变化。这不仅有效降低激波串长度和内阻,而且产生了主流和壁面之间的横向流动,提高了隔离段的综合性能。这种分离区的特点是决定隔离段性能的关键。

(4)通过对当量直径和  $Re_0$  指数  $\alpha$  的修订,可以大致得到变截面隔离段中激波串长度与压比之间的关系公式。

## 参考文献:

[1] Kazuyasu Matsuo, Yoshisaki Miyazaki, Heuy-Dong Kim.

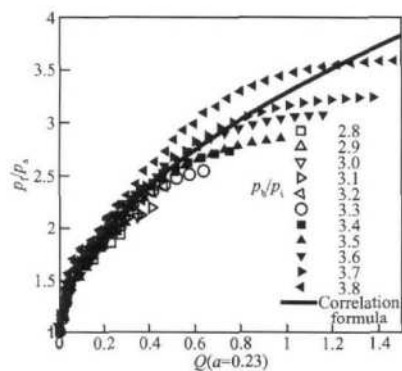


Fig. 11 Correlation formula and numerical simulated data for variable cross-section isolator

Shock train and pseudo-shock phenomena in internal gas flows [J]. *Progress in Aerospace Science*, 1999.

- [2] Lewis M J. A hypersonic propulsion airframe integration overview [R]. *AAIA* 2003-4405.
- [3] 朱自强. 应用计算流体力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [4] Dudek J C, Davis D O, Slater J W. Validation and verification of the WND code for supersonic diffuser flow [R]. *AAIA* 2001-0224.
- [5] Kaname Kawatsum, Shunsuke Koike. Pseudo-shock wave produced by backpressure in straight and diverging rectangular ducts [R]. *AAIA* 2005-3285.
- [6] Waltup P J, Billig F S. Structure of shock waves in cylindrical ducts [J]. *AAIA Journal*, 1973, 11(10).
- [7] Sullins G, McLafferty G. Experiments results of shock trains in rectangular ducts [R]. *AAIA* 92-5103.
- [8] 王成鹏, 张堃元, 程克明. 非对称来流隔离段流动特性研究 [J]. 推进技术, 2006, 27(5). (WANG Cheng-peng, ZHANG Kun-yuan, CHENG Ke-ming. Investigation of flow in isolators under asymmetric incoming airflow [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(5).)
- [9] 王成鹏, 张堃元, 杨建军. 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). (WANG Cheng-peng, ZHANG Kun-yuan, YANG Jian-jun. Experimental and numerical investigation of isolator combined with hypersonic inlet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(1).)

(编辑: 刘蓓威)