

超音速气流中气动斜坡喷嘴 喷射氮的实验研究

北京航空航天大学 陈能坤*
美国弗吉尼亚理工学院 R. P. Fuller

【摘要】 介绍一种新式矩阵喷嘴的实验结果。设计这种喷嘴的目的是为在超音速气流中,由壁面喷射氮而产生旋涡相互作用以达到强化掺混。在2种喷射压力下 $Ma=1$ 的氮气喷入 $Ma=3$ 的空气主流中,实验数据包括氮浓度和总压损失。发现矩阵喷嘴在431kPa下喷射氮其掺混率优于顺喷单孔喷嘴(喷射角为15和30°),在轴线处矩阵喷嘴的总压损失也低于单孔喷嘴。

主题词: 超音速流动 气动喷嘴 实验

分类号: O354.3 TP6

1 引言

前人所作的有关研究表明^[1],喷嘴为后掠物理斜坡(图1),其优点是有较好的掺混性能,但总压损失较大,且有机件部分暴露于主流道容易造成烧蚀;喷嘴垂直或平行于燃烧室壁面的圆孔和缝隙,或有良好的掺混性能但总压损失过大,总压损失虽小但掺混性能不良;喷嘴与燃烧室壁面成一定角度的圆孔,其掺混性能与总压损失大都介于垂直圆孔与平行缝隙之间。本文所述的气动斜坡式矩阵喷嘴,具有某些后掠物理斜坡喷嘴良好的掺混性能,又避免其总压损失过大和容易烧蚀的弊端。

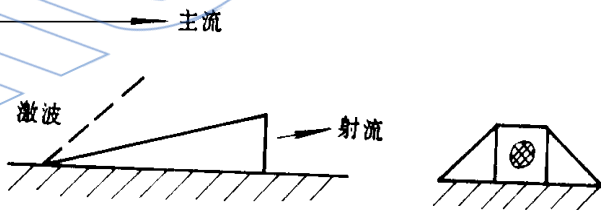


图1 后掠物理斜坡式喷嘴

2 实验装置和测量方法

实验是在美国弗吉尼亚理工学院与州立大学的超音速风洞中进行的。风洞动力源为4台活塞式压气机,可将空气贮气罐压至5066 kPa,贮气罐总容积为79 m³,压缩空气经干燥与过滤后进入贮气罐。风洞控制系统包括密闭阀,电动调节阀以及快速开启蝶阀,全部由计算机程序控制。图2表示试验段,由二元拉瓦尔喷管产生 $Ma=3$ 的超音速流,喷管的喉部面积为61.5 cm²,试验段高11.4 cm

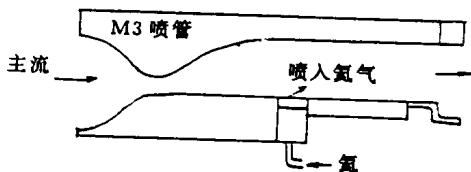


图2 冷流试验段示意图

×宽 23 cm 的矩形等截面段, 内含喷嘴试验件和测量感头。试验段侧边由石英玻璃组成的可开关的 2 扇大门, 便于试验件安装、观察、光学测量与照像。紧接试验段的是一台阶扩散器, 气流通过一出口导管及消音装置排入大气。图 3 表示实验研究所采用的座标系, θ 为横向喷射角, β 为迎角。图 4 表示喷嘴试验件, 由孔径 d 均约为 1.6 mm 的 3 排 9 孔组成, 形成矩阵式喷嘴。此矩阵喷嘴的有效直径 D_{eff} 约为 4.8 mm, 上游排 3 孔的间距为 $3d \approx 4.8$ mm, $\theta = 15^\circ$; $\beta = 0^\circ$; 中间排 3 孔的间距为 $2.5d \approx 4$ mm, $\theta = 30^\circ$; $\beta = 15^\circ$; 0 和 -15° ; 下游排 3 孔的间距为 $2d \approx 3.2$ mm, $\theta = 45^\circ$; $\beta = 30^\circ$; 0 和 -30° 。每排孔的间距为 $7d \approx 11.2$ mm。设计孔排的目的, 是使喷入主流的音速氮射流产生一个带后掠角的气动斜坡, 起着物理斜坡的作用, 以使燃料与主流达到良好的掺混, 并降低激波与掺混造成的总压损失。

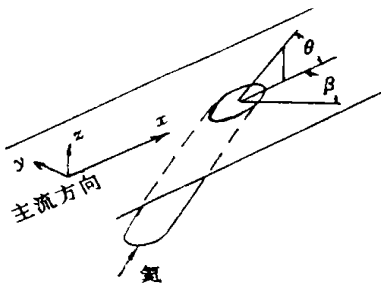


图 3 座标系

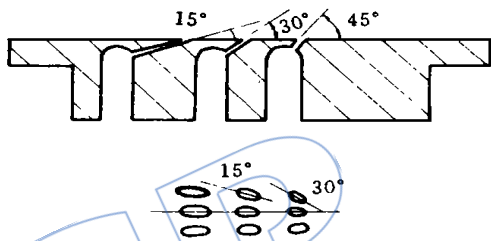


图 4 9 孔矩阵喷嘴

测量截面位于第 3 排孔后下游约 203 mm 处, 利用测量耙上的皮托管锥面静压孔(半锥角 10°)和热电偶感头分别测量激波(由皮托管引起)后总压、锥面静压和总温, 根据超音速流公式便可计算掺混流的有关参数。因此, 在同样的几何位置与工况下, 利用热膜感头测量氮气浓度。试验时测量耙及热膜感头均在 5 s 内作垂直于风洞底板向上匀速运动, 移动距离约为 4 cm, 数据采集速度为 100 点/s, 测量讯号通过模拟—数字转换板进入计算机存入软盘, 并用 FORTRAN 程序进行处理。

3 实验结果与分析

3.1 掺混效果

图 5a、5b 表明氮气喷射压力 861 kPa, 主流 $Ma = 3$ 时, 利用热膜感头直接测量矩阵喷嘴下游 203 mm ($x/d_{eff} = 43$, $y/d_{eff} = 0.6$ 和 1.2) 的氮气浓度百分数 α 沿高度的变化。从图可见, 存在着 2 个最大浓度点, 一个在边界层处, 另一个则在大约 $Z/d_{eff} = 3.5$ 处。在其它各 y/d_{eff} 测量点也存在着相似现象, 同后掠物理斜坡喷嘴^[3,6]产生的流场结构相似。流场因氮气的喷入产生一个后掠气动斜坡, 其与主流相互作用而产生一对顺着主流流动方向的旋涡结构, 正如同后掠物理斜坡喷嘴, 旋涡不断地将贴近风洞底板处的氮气卷入主流核心, 起着向中心主流输送氮气的作用, 这有利于燃料与主流的掺混。图 5c 与 5d 则表明氮气喷射压力为 431 kPa, $x/d_{eff} = 43$ 时氮气浓度百分数 α 沿高度的变化, 其规律与图 5a 和 5b 相似。

为了从不同实验的各种数据进行比较, 必须考虑喷射氮气的质量流量, 可采用射流与主流

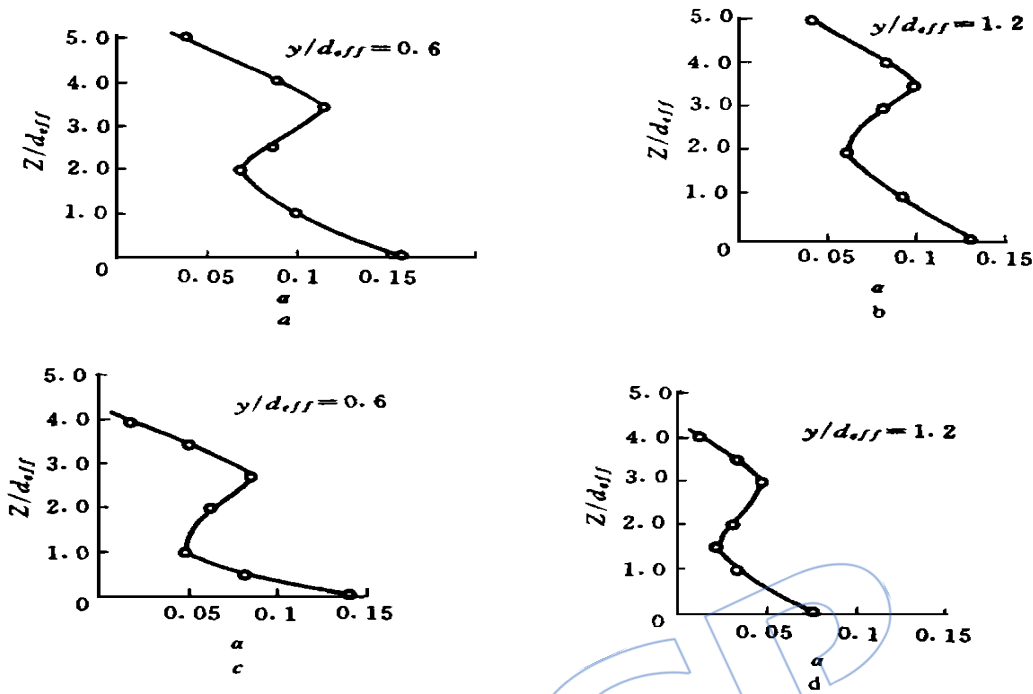


图 5 氮气浓度百分数沿高度变化

的密流比平方根 $\rho_j u_j / \rho_\infty u_\infty$ 进行修正。表 1 表示在喷嘴下游轴向距离约为 x/d $\rho_j u_j / \rho_\infty u_\infty = 25 \sim 35$, 单孔与矩阵喷嘴最大氮浓百分数 $\alpha_{\max}$ 的比较, 显示气动斜坡式矩阵喷嘴在喷射压力 431 kPa 时, 其最大氮浓度值相比最小, 即表明具有最好的掺混性能。

表 1 单孔与矩阵喷嘴最大氮浓百分数 $\alpha_{\max}$ 的比较

喷嘴模型	单孔[2]	单孔[2]	单孔[2]	单孔[2]	矩阵喷嘴	矩阵喷嘴
$\theta(^{\circ})$	30 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$	15 $^{\circ}$		
$P_j(\text{kPa})$	861	861	172	172	861	431
$\alpha_{\max}$	0.17	0.1	0.09	0.095	0.12	0.08

3. 2 总压损失

超音燃烧另一个重要参数是总压损失, 造成总压损失的原因主要有以下几个方面: (1) 氮射流喷入超音主流中产生强烈的激波。(2) 气动斜坡射流与超音主流相互作用, 产生一对强烈的顺流旋涡与掺混。(3) 燃烧与加热。由于所述研究为冷流, 引起总压损失的原因主要是前 2 项。图 6 表示在测量截面不同的横向位置, 总压恢复系数 σ 沿高度的变化, 从图可见, 在轴线位置 ($y/d_{eff} = 0$), 当 Z/d_{eff} 小于 5 时, 总压因激波而产生重大损失。在偏离轴心 $y/d_{eff} = 4/3$ 处, 当 Z/d_{eff} 小于 3 时, 其总压损失小于相应的轴心处, 但当 Z/d_{eff} 大于 3 时, 其总压损失却高于相应的轴心处, 唯一的解释是因后掠气动斜坡产生顺流旋涡而造成较大总压损失。在偏离轴心 $y/d_{eff} = 8/3$ 处, 则更明显看出这一现象, 顺流旋涡产生的总压损失更明显。图 7 表明在 x/d_{eff}

= 43 处, 气动斜坡矩阵喷嘴与其当量直径相同的单孔 $\theta = 45^\circ$ 顺喷喷嘴的比较。表明轴心处单

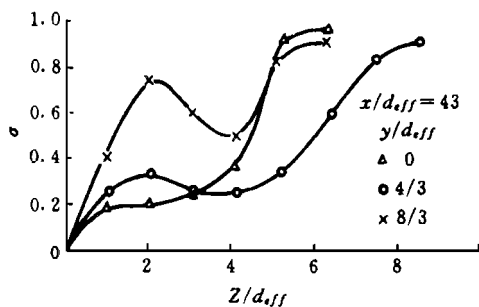


图 6 总压恢复系数沿高度的变化

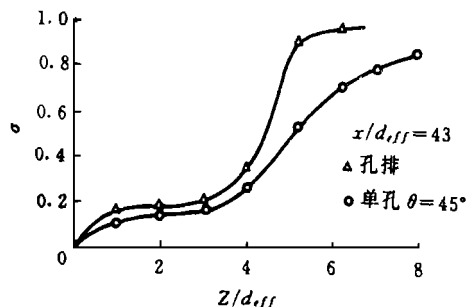


图 7 轴心处 2 种喷嘴总压损失比较

孔喷嘴的总压损失大于矩阵喷嘴, 这可能与矩阵喷嘴产生的激波比单孔喷嘴较弱有关。

4 结 论

(1) 后掠气动斜坡矩阵喷嘴可产生良好的掺混作用。

(2) 超音速主流与后掠气动斜坡矩阵喷嘴喷射音速氦流的相互作用, 产生一对顺流旋涡, 正是这对旋涡加强了氦气与主流的掺混, 但也带来一定的总压损失。

(3) 由于气动斜坡矩阵喷嘴在超音速流道内无任何机械突起物, 因而总压损失相对较小, 也避免了机械突起物易烧蚀的危险。故此种类型的喷嘴对超音燃烧及超音冲压发动机具有重要价值。

参 考 文 献

- David W. Bogdanoff Advanced Injection and Mixing Techniques for Scramjet Combustors. Journal of Propulsion and Power, 1994, 10(2)
- Schetz J A, Thomas R, Billing F. Mixing of Transverse Jets and Wall Jets in Supersonic Flow. IU TAM Symposium on Separated Flows and Jets, Novosibirsk, July 1990
- Donohue J M, Mc Daniel J C Jr, Hajhariri H. Experimental and Numerical Study of Swept Ramp Injection Into a Supersonic Flowfield. AIAA Technical Paper 93- 2445, June 1993
- Mays R B, Thomas R H, Schetz J A. Low Angle Injection into a Supersonic Flow. AIAA Technical Paper 89- 2461, July 1989
- Schetz J A, Billing F. Penetration of Gaseous Jets Injected in to a Supersonic Stream.
- Hartfield R J Jr, Hollo S D, Mc Daniel J C. Experimental Investigation of a Supersonic Swept Ramp Injector Using Laser - Induced Iodine Fluorescence. AIAA Technical Paper 90- 1518, June 1990

(责任编辑 杨再荣)