

多喷管引射器试验研究与数值模拟

缪亚芹, 王锁芳, 吴恒刚

(南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 为了探索多喷管引射器综合性能的影响因素, 对五喷管超音速引射器用实验的方法得到动量修正系数与引射系统尺寸的关系曲线. 在不同主喷管分布圆直径、混合管长径比、主次流压比以及扩压比情况下, 对多喷管引射系统动量修正系数进行了实验研究和数值计算. 结果表明: 在所有工况下, 引射性能随主次流压比和主流流量的增大而减小; 随着主喷管数增加、喷管喉部直径减小、扩压管长度增加, 引射器的性能在一定范围内得到提高. 混合管长径比与主喷管分布方式的相互作用对引射性能的影响很大. 同时使用 FLUENT 软件对不同几何尺寸下的引射器进行数值模拟, 并与试验结果进行了对比, 结果表明数值模拟结果与试验结果符合较好.

[关键词] 多喷管, 引射器, 试验研究, 数值计算, 动量修正系数

[中图分类号] V211.73; V231.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0068-04

Experimental Investigation and Numerical Simulation about the Multi-nozzle Ejector

MIAO Yaqin, WANG Suofang, WU Henggang

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the factors of influencing the effect of general performance of multi-nozzle ejector, we do an experiment with five-nozzle ejectors and obtain the relation curves between momentum correction factor K_m and geometric parameter of the ejector system. The experimental results and numerical calculations indicate that in any cases performance of the multi-nozzle ejector decreases with the increase of pressure ratio or mass flow rate of primary flow, and in certain ranges the performance increases as the number of primary flow nozzle as well, otherwise, the performance goes down as the length of diffuser and the diameter of nozzle throat increase. The interaction of the ratio of length and the diameter of mixing pipe and the distribution of the primary nozzle has great effects on the performance of the entrainment for the ejector, and numerical methods have been employed to study the effects of the geometric parameters. The numerical results agree with experimental data.

Key words: multi-nozzle, ejector, experimental investigation, numerical simulation, momentum correction factor

0 引言

海湾战争以来, 直升机发动机进气防砂越来越受到重视, 使用粒子分离器是其中的一种主要方式. 在粒子分离器中引射器是作为引射含砂低压气流装置使用. 单喷管引射器混合管小时, 其引射系数很小; 而多喷管引射器在较短混合管长度时, 其引射系数仍然很大.

前人已对单、多喷管引射器做过实验和理论研究, CHARLES MICHAEL MOSS 首先提出用动量混合系数 K_m 来表征引射器的性能, 在混合室长径比 $L_m/D_m = 2, 3$, 以及主喷管出口距混合室入口采用不同距离时 K_m 的变化; 王锁芳等^[1,2] 对多喷管引射器进行了性能分析, 得到了引射系数 u 的关系式; 针对六喷管超音速引射器进行了理论分析和实验研究, 得到随 m_s/m_p 增加, 动量混合系数 K_m 逐渐下降; 文献大多是研究引射系统部分尺寸对引射器性能的影响, 但对多喷管引射器系统装置尺寸相互作用对其性能影响的研究不多, 本文主要对五喷管超音速引射器进行了气动性能实验, 改变引射系统的主次流压比、扩压管出口直径

收稿日期: 2005-09-28.

作者简介: 缪亚芹(1973-), 女, 工程师, 主要从事传热与传质等方面的教学与研究. E-mail: myaqin73@sina.com

与混合管直径之比(以下简称扩压比)、混合管长径比和主喷管分布圆直径,侧重对长径比和混合管直径与主喷管分布圆直径之比 D_m/D_0 的相互作用进行了实验研究,分析得出了 K_m 与各相关因素的关系曲线,从而为以后多喷管引射器的设计工作提供了理论依据和设计方法。

1 实验方法

如图1所示,2-2截面与m-m截面之间的动量方程:

$$m_p V_{p2} + m_s V_{s2} - K_m m_m V_m = (P_m - P_{p2}) A_{p2} + (P_m - P_{s2}) A_{s2} + F_{fmm}$$

式中, m_p 、 m_s 分别代表主、次流质量流量; V_{p2} 、 V_{s2} 分别代表主、次流在2-2截面的速度; m_m 、 V_m 、 P_m 为混合流在m-m截面上的质量流量、速度、静压; K_m 为m-m截面上的动量修正系数; P_{p2} 、 P_{s2} 为主、次流在2-2截面的静压; A_{p2} 、 A_{s2} 为主、次流在2-2截面的面积; F_{fmm} 为壁面摩擦阻力, $F_{fmm} = \frac{f}{4} l_p L_m \frac{\rho_m V_m^2}{2}$, 其中 f 为沿程摩擦阻力系数, l_p 、 L_m 分别为混合管

周长和长度, ρ_m 、 V_m 分别为流体在混合管出口的密度和速度。

由上式可以知, K_m 是表征主、次流在混合管中的混合程度的物理量。影响 K_m 的因素很多, 本文选择了主喷管喉部直径为一定值的五喷管进行实验, 混合管长径比 L_m/D_m 选择了3.2、2.4、1.6, 混合管直径与主喷管分布圆直径之比 D_m/D_0 选择了1.31、1.5、1.79, 主、次流压比 P_p/P_s 选择了2.0~8.0, 扩压比分别为1.25、1.35和1.45。

图2为实验系统示意图, 在混合管和扩压管的壁上均匀布置一些测压管, 测得各截面的气流的静压和总压, 通过自编程序计算得到主、次流在混合管中的混合程度即 K_m 。本文主要通过更换不同分布结构的主喷管、不同混合管长度以及不同扩压比的扩压器来确定各实验系统尺寸工况, 通过改变主流压力得到不同的主、次流压比进行实验的。

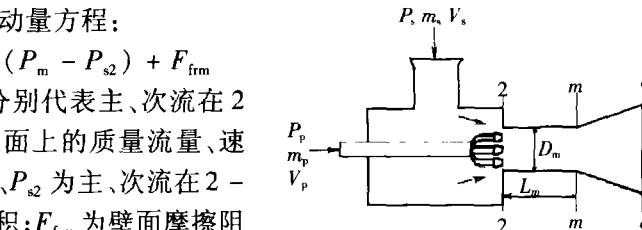
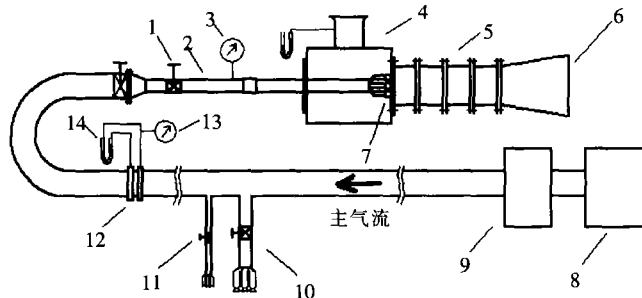


图1 多喷管引射系统简化图



1.主流调节阀; 2.主流管; 3.主流压力表; 4.集气室; 5.混合段
6.扩压管; 7.主流喷管; 8.空气压缩机; 9.汽水分离器; 10.大排气管路
11.小排气管路; 12.标准孔板流量计; 13.孔板前压力表; 14.U型管压差计

图2 实验系统示意图

2 实验结果分析

2.1 混合管出口动量修正系数与主、次流压比的关系

图3为扩压比不变, 混合管长径比相同的情况下 K_m 与压比的关系曲线。可以看出, 在引射系统尺寸不变的情况下, K_m 随主、次流压比的增加而增加, 文献^[1,2]也得到这样的结论。这是因为主气流离开喷管后, 由于气体微团的横向运动, 具有横向速度分量, 持续地与二次流气体进行能量与动量的交换。沿着混合段方向主流逐渐与二次流发生掺混, 混合得越好, 引射性能就越好, 混合管出口动量修正系数就越小。随着压比的增大, 主流流速增大, 使二次流流量也增大, 但是主流沿混合段方向的流速同样随之增大, 使主流与二次流的掺混不如低压比时充分, 二次流流量增幅小于主流流量的增幅, 因此混合管出口动量修正系数 K_m 就越大。即随着压比的增大, 引射器性能反而下降。

2.2 混合管长径比、混合管直径与主喷管分布圆直径之比对引射器性能的影响

图4中 K_m 在 $L_m/D_m = 2.8$ 左右达到最小。 $D_m/D_0 = 1.79$ 时, 大约在 $L_m/D_m < 2.8$ 时 K_m 随 L_m/D_m 增加而下降, 也就是说, 随 L_m/D_m 的增加主、次流的混合越好, 而大约在 $L_m/D_m > 2.8$ 时, 随 L_m/D_m 的增加, 主、次流的混合程度 K_m 反而稍有上升, 此时不能采用增加长径比来增加主、次流的混合程度。如图5所示, K_m 在 $L_m/D_m = 2.4$ 左右达到最小, $D_m/D_0 = 1.51$, 大约在 $L_m/D_m < 2.4$ 时, 随 L_m/D_m 的增加主、次流的混合越好, 而大约在 $L_m/D_m > 2.4$ 时, 随 L_m/D_m 的增加主、次流的混合程度 K_m 稍有上升。图6中 K_m 随 L_m/D_m 的增大变化很小, P_p/P_s 从2~8的情况下, K_m 只从1.7变化到2.04, 变化幅度只有17%, 而且看不出有规律, 这说明当 $D_m/D_0 = 1.31$, $L_m/D_m > 1.5$ 时长径比的变化对 K_m 影响不大。这是因为主流喷出喷管后在 $L_m/D_m < 1.5$ 的某一范围内已经附壁于混合管, 很难与次流进行掺混, 此时混合管的长径比就太大。对

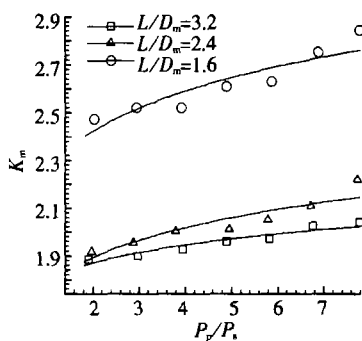


图3 K_m 与压比的关系曲线
($\alpha=7^\circ, D_m/D_0=1.79$)

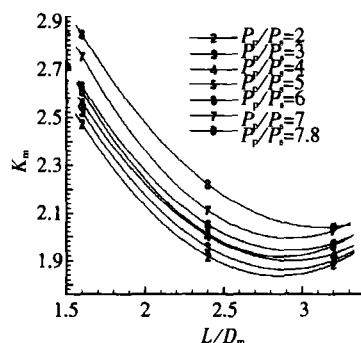


图4 K_m 与长径比的关系曲线
($\alpha=7^\circ, D_m/D_0=1.79$)

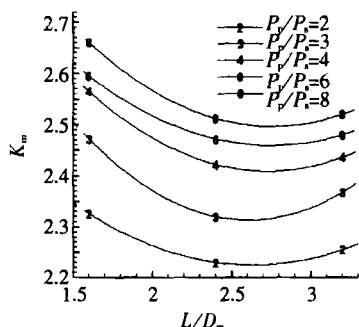


图5 K_m 与长径比的关系曲线
($\alpha=7^\circ, D_m/D_0=1.51$)

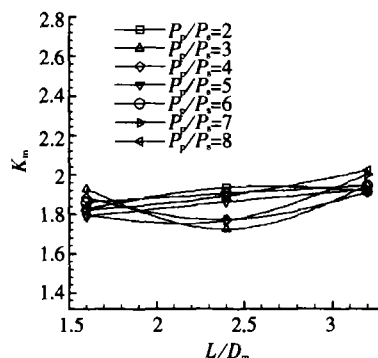


图6 K_m 与长径比的关系曲线
($\alpha=7^\circ, D_m/D_0=1.31$)

$D_m/D_0 = 1.79$ 由于主流沿主喷嘴出口张角方向在混合管横向具有了分速度,当主流轴向流动到 $L_m/D_m = 2.8$ 处附壁于混合管内壁,与次流掺混能力下降,由于额外的扰动作用,增大了流动阻力开始增大,反而不利于引射器性能的提高,导致动量修正系数 K_m 稍有上升。并不是 D_m/D_0 越大引射器性能越好。图7、图8分别为实验和计算得到的不同混合管直径与主喷嘴分布圆直径之比下引射系数与主、次流压比的关系曲线,由这两幅图可以看到实验和计算符合很好,在相同主、次流压比下 $D_m/D_0 = 1.51$ 的引射系数高于其他两种工况。这说明在本文研究的引射系统中 $D_m/D_0 = 1.51$ 为最佳。因为 $D_m/D_0 = 1.79$ 时,喷嘴过于集中,主流从喷嘴喷出相互干扰,使得主流流束不能完全及时与次流进行掺混,直接导致次流流量随压比增加的幅度降低,从而导致引射系数降低。 $D_m/D_0 = 1.31$ 时,主流流束虽然干扰减小,但由于主流出口离混合管壁太近,主流流束还没与次流进行充分的掺混就已经附壁于混合管,致使主、次流流量比即引射系数下降。图7中 $D_m/D_0 = 1.51$ 与 $D_m/D_0 = 1.31$ 在高压比时相互交叉,这主要是因为 $D_m/D_0 = 1.51$ 的试验加工精度的原因,主喷嘴中心线与主流管中心线不平行导致主流提前附壁。

2.3 动量修正系数与扩压比

由图9可以看出,在扩压器长度不变,只通过改变扩压器的张角来改变扩压比 D_e/D_m 时, K_m 随扩压比

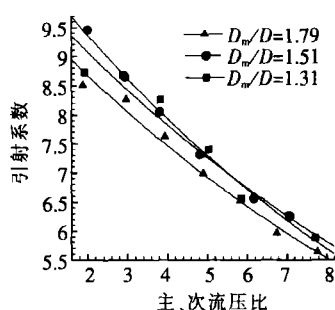


图7 实验得到不同 D_m/D_0 下引射系数与主、次流压比的关系曲线

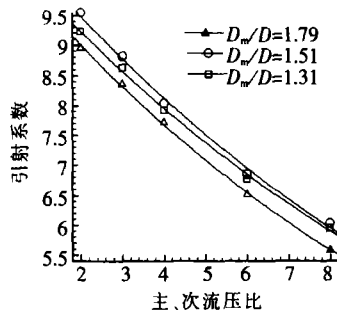


图8 计算得到不同 D_m/D_0 下引射系数与主、次流压比的关系曲线

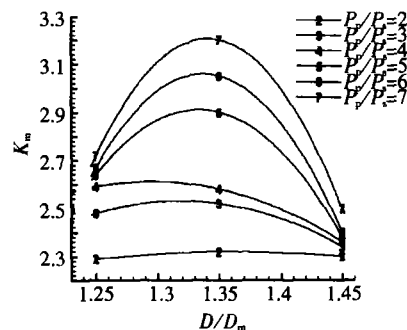


图9 扩压器扩压比不同时, K_m 与扩压比的关系曲线

的增加而增加,但增加到一定数值后, K_m 就开始减小,这说明扩压角很小时并没有真正起到扩压器的作用,只有当扩压角增加到一定值时主次流在扩压管中得到了进一步的掺混,从图线趋势来看主、次没有达到最佳掺混状态.由于实验件加工时考虑不周,没能找到最佳扩压角,还待进一步的研究.

3 数值计算与实验的对比

本文使用 FLUENT 软件应用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、压力-速度耦合的 SIMPLE 算法,对引射系统的次流进口进行了简化,侧重在混合管段加密,重点对混合段内进行了数值模拟,并将计算得到的引射系数等性能参数与试验结果进行了对比,并将计算得到的动量修正系数 K_m 试验结果进行了对比.

图 10 是本文五喷管引射器模型试验与本数值计算和文献数值计算结果中主次流压比和引射系数之间的关系.由此图可以看出,曲线的基本趋势是一致的,即主次流压比增大,引射系数减小,数值计算与实验数据并没有完全重合.这是由于实验中存在各种误差(如人为读数误差、试验件加工误差等),因此两者曲线不可能完全重合.

图 11 为混合管直径与主喷管分布圆直径之比为 1.51 的 K_m 随主、次流压比变化实验数据与数值计算的关系曲线对比图.由图可以看出,实验数据与数值计算均是在长径比为 2.4 时 K_m 最小,长径比为 3.2 和 1.6 次之,可见此种类型的引射器的混合管长径比在 2.4 为最佳.这是因为主气流离开喷管后,由于气体微团的横向运动,具有横向速度分量,持续地与二次流气体进行能量与动量的交换.沿着混合段方向主流逐渐与二次流发生掺混,混合得越好,混合管动量修正系数 K_m 越小.但主流管喷出主流随着混合管的生长到一定的位置后就附壁于混合管,与二次流掺混能力就减弱,此时再利用增加混合管长度的方法来增加引射系数的效果就不那么明显了.且实验值与数值计算值符合较好,将上图试验曲线和计算曲线进行比较,通过取几个对应点计算两者的偏差可知,两两相对的曲线平均偏差在 4.42%.

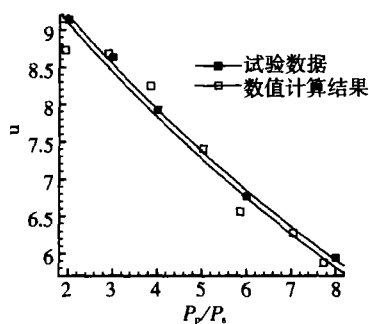


图 10 引射系数随压比变化的关系曲线

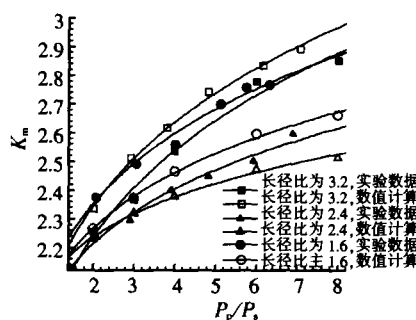


图 11 实验得到 K_m 随 P_2/P_1 的变化

4 结论

综上所述,可以对多喷管超音速引射系统得出以下结论:

- (1) 不同的主次流压比代表了不同的气动工况,随主次流压比增大,引射系数减小,混合管出口动量修正系数增加,也就是引射系统性能随主次流压比的增加而下降.
- (2) 混合管长径比和主喷管分布圆直径的交互作用对主、次流的混合程度有很大的影响.
- (3) 扩压比在小于 1.45 范围内,可以通过改变扩压比来增加主、次的掺混.
- (4) K_m 的数值计算与实验值符合较好.

[参考文献] (References)

- [1] 王锁芳,李立国.多喷管引射器的性能分析[J].南京航空航天大学学报,1996,28(3):350-356.
WANG Suofang, LI Ligu. Performance analysis of a multi-nozzle ejector[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 28(3): 350-356. (in Chinese)
- [2] 王锁芳,李立国.六喷管超音速引射器性能的理论分析和实验研究[J].航空动力学报,1996,11(3):312-315.
WANG Suofang, LI Ligu. A study on supersonic 6-nozzle ejector performance[J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(3): 312-315. (in Chinese)

[责任编辑:刘健]