

文章编号: 1001-2486(2008)01-0001-04

超音速环形引射器空气引射启动特性试验^{*}

邹建军, 周进, 徐万武, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:建立了超音速环形引射系统,对环形引射器空气引射启动特性进行了试验研究。试验结果表明:管道马赫数越大,则系统启动压强越高,同时盲腔真空度越高;混合室收缩比越小,系统启动压强越低;若管道马赫数较大,而第二喉部长径比和亚音速扩压段面积比过小,引射器启动过程可能不稳定,甚至无法启动;混合室收缩比、环型引射器扩压管道参数对盲腔压强无影响。

关键词:超音速引射器;环形引射器;启动特性

中图分类号: V434 文献标识码: A

Experimental Investigation on the Start Performances of the Supersonic Annular Air Ejector

ZOU Jian-jun, ZHOU Jin, XU Wan-wu, WANG Zhen-guo

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The air ejector test facility was established to investigate the start performance of supersonic annular ejector. The investigation indicates that the higher the mach number in pipe, the higher start pressure and vacuum in cavity, and that the mixing-room contraction ratio and the pipe configuration of the system deeply influence the start performance, but they have little influence on the vacuum in cavity.

Key words: supersonic ejector; annular ejector; the start performance

超音速引射器是一种应用非常广泛的流体机械,它利用超音速射流的引射增压作用抽走被引射流体,从而达到抽真空的目的,如高能化学激光系统、航空航天领域的喷射推进、高空模拟试车台、化工领域的喷射真空等^[1-5]。超音速引射器的自身启动是系统正常工作的前提条件,而影响其启动特性的因素较多,不同引射方式、不同引射器几何构形、不同引射气流工质,都会对引射器的启动特性产生影响^[6]。根据公开报道的文献来看,中心型超音速引射器启动特性研究较为成熟,有大量的试验结果可供参考^[7]。而有关超音速环型引射器启动特性研究的资料很少^[8],仅有的资料,所研究的环型引射器工压低,盲腔真空度低,与大压缩比超音速环型引射器的工作状态相去甚远,无法反映超音速环型引射器启动特性的变化规律。因此,有必要全面、深入开展超音速环形引射器启动特性的试验研究工作。

1 试验系统及说明

1.1 试验系统

如图1所示,环型引射器的试验装置由高压空气气源系统、引射器系统和测量控制系统组成。引射器系统由引射喷嘴、引射扩压管道、支架和盲腔段组成,引射喷嘴和引射扩压管道均可更换,以满足变引射器几何参数的需要。

1.2 启动状态说明

如图1所示,对于环形引射系统而言,其启动激波位于第二喉道时,称为临界状态;启动激波位于亚

* 收稿日期:2007-06-15

基金项目:国家“863”计划资助项目(2005AA992020)

作者简介:邹建军(1970-),男,副教授,博士。

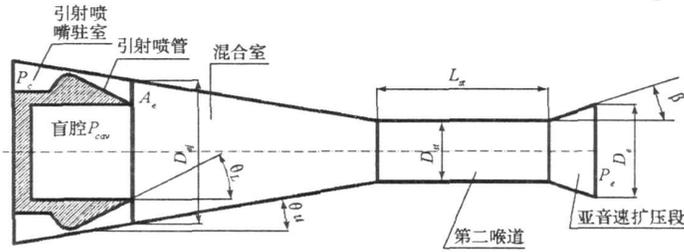


图1 试验系统结构图

Fig. 1 Structure of test system

音速扩压段时,称为超临界状态;启动激波位于混合室时,称为亚临界状态。

当系统处于临界状态或超临界状态时,称该系统启动;当系统处于亚临界状态时,称该系统没有启动。对于启动状态,由于混和段不存在强激波系,对应盲腔压力较低,反之,则盲腔压力较高。

引射器进入启动状态时对应的引射气流总压称为启动压强 $P_{c, start}$, 能维持引射器启动状态的引射气流总压称为操作压强 $P_{c, operate}$ 。一般情况下,引射系统的启动压强大于操作压强,即 $P_{c, start} > P_{c, operate}$ 。

2 引射器试验设计参数

环型引射器的几何构形如图1所示,表1给出了引射器设计参数。共研究了四种不同的引射气流马赫数 Ma_1/Ma_0 组合,它们对应不同的管道马赫数 M_{ej} (M_{ej} 由面积比 A_{ej}/A_t 、比热比 γ 按一维理想气体公式求得),每一种组合下研究了不同的混合室收缩比 Φ 、第二喉部长径比 L_{st}/D_s 和亚音速扩压段面积比 Ψ 对引射器启动特性的影响。

表1 环型引射器设计参数

Tab.1 The configuration of annular ejector

引射器代号	$\frac{Ma_1}{Ma_0}$	$\frac{\Phi}{\Phi_0}$	$\left(\frac{L_{st}/D_s}{(L_{st}/D_s)_0}\right)_0$	M_{ej}	$\frac{\Psi}{\Psi_0}$
Ejector 1	1.0	1.61, 1.51, 1.45	1.0	4.595	1.0
			1.5		1.5
Ejector 2	1.16	1.61, 1.51	1.0	5.57	1.0
		1.39, 1.32	1.5		1.5
Ejector 3	1.41	1.61, 1.51	1.0	6.07	1.0
		1.39, 1.32	1.5		1.5
Ejector 4	1.34	1.61, 1.51	1.0	6.02	1.0
		1.45, 1.39, 1.32	1.5		1.5

3 试验结果与分析

3.1 管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 对启动特性的影响

图2给出了环型引射器启动压强随引射管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 的变化情况。可以看出,给定混合室收缩比 Φ 的情况下,随着管道马赫数 M_{ej} 的增大,引射器的启动压强和操作压强迅速升高,Ejector 3和Ejector 4的管道马赫数接近,它们的启动压强和操作压强差别很小,这表明,引射器启动压强的决定因素不是引射马赫数 Ma_1 ,而是管道马赫数 M_{ej} 。在给定 M_{ej} 的条件下,随着混合室收缩比 Φ 的不断增大,引射器启动压强和操作压强呈上升趋势。

图3给出了环型引射器启动后,盲腔压强比 P_{cv}/P_c 随管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 的变化情况。可以看出,在给定混合室收缩比 Φ 的条件下,随着 M_{ej} 的增大,盲腔压强比 P_{cv}/P_c 迅速下降,而在 M_{ej} 给定的条件下,混合室收缩比 Φ 的变化对盲腔压强比 P_{cv}/P_c 几乎无影响。这是因为引射气流经引射喷嘴膨胀后喷入混合室,在混合室入口段进一步膨胀,因此,管道马赫数 M_{ej} 越大,引射气流膨胀度越

大, 盲腔压比 P_{cav}/P_c 越小。

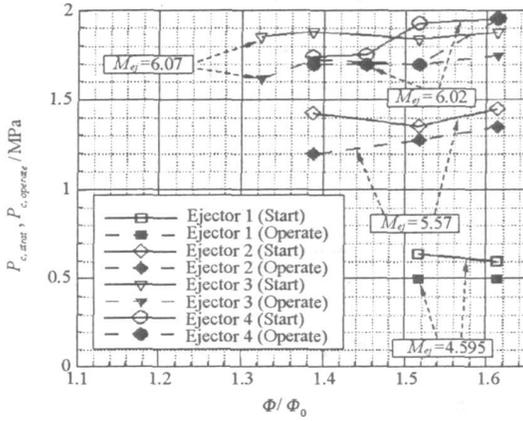


图2 M_{ej} 和 Φ 对启动特性的影响

$$\left(\begin{array}{l} L_s/D_s = 1.5, \Psi = 1.5 \\ (L_{st}/D_{st})_0 = 1.5, \Psi_0 = 1.5 \end{array} \right)$$

Fig. 2 The influence of M_{ej} and Φ on start performance

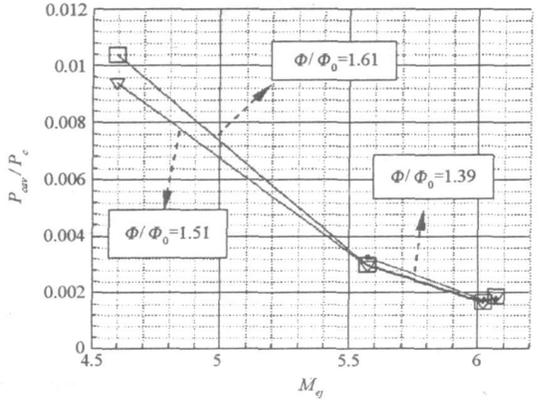


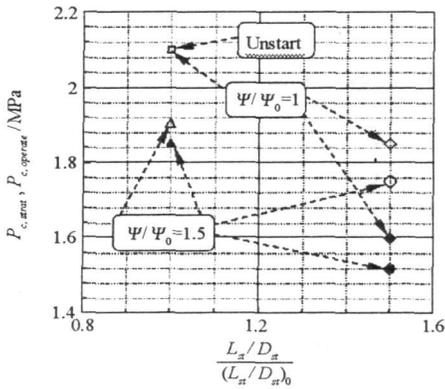
图3 压强比 P_{cav}/P_c 随 M_{ej} 和 Φ 的变化情况

$$\left(\begin{array}{l} L_s/D_s = 1.5, \Psi = 1.5 \\ (L_{st}/D_{st})_0 = 1.5, \Psi_0 = 1.5 \end{array} \right)$$

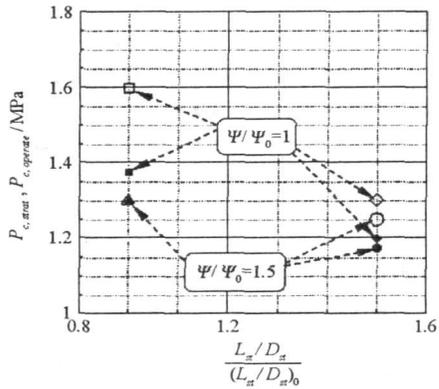
Fig. 3 The influence of M_{ej} and Φ on pressure ratio P_{cav}/P_c

3.2 引射器扩压管道参数对环型引射器启动特性的影响

图4给出了在不同管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 的条件下, 第二喉部长径比 L_s/D_{st} 和亚声速扩压段面积比 Ψ 对引射器启动压强、操作压强的影响。可以看出, 在管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 给定的条件下, 随着第二喉部长径比 L_s/D_{st} 和亚扩段面积比 Ψ 的增大, 引射器启动压强和操作压强下降, 启动特性改善, 而且 M_{ej} 越大, 启动压强下降幅度越大。试验还发现, 当管道马赫数 M_{ej} 较大时, 如果 L_s/D_s 和 Ψ 过小, 引射器启动不稳定, 甚至无法启动。试验结果表明, 随着 M_{ej} 的增大, L_s/D_{st} 和 Ψ 应该适当增加。



(a) $M_{ej}=0.67, \Phi/\Phi_0=1.32$



(b) $M_{ej}=5.57, \Phi/\Phi_0=1.51$

图4 环型引射器扩压管道的参数对引射器启动压强、操作压强的影响

Fig. 4 The influence of piping parameter on start pressure and operate pressure

图5(a)、(b)给出了在管道马赫数 M_{ej} 和混合室收缩比 Φ 给定的情况下, 盲腔压强比 P_{cav}/P_c 随第二喉部长径比 L_{st}/D_{st} 和亚扩段面积比 Ψ 的变化情况。可以看出, 盲腔压强比 P_{cav}/P_c 不随 L_{st}/D_{st} 和 Ψ 变化。所以, 盲腔压强比 P_{cav}/P_c 主要受管道马赫数 M_{ej} 的影响, 而混合室收缩比 Φ 、第二喉部长径比 L_{st}/D_s 和亚扩段面积比 Ψ 对引射器的启动压强 $P_{c, start}$ 有很大影响, 从而影响到盲腔压强 P_{cav} 。要达到尽可能高的盲腔真空度, 就要求管道马赫数 M_{ej} 高, 同时要求引射器的混合室收缩比 Φ 、第二喉部长径比 L_{st}/D_s 和亚扩段面积比 Ψ 设计合理, 以尽量降低启动压强 $P_{c, start}$, 从而降低盲腔压强 P_{cav} 。

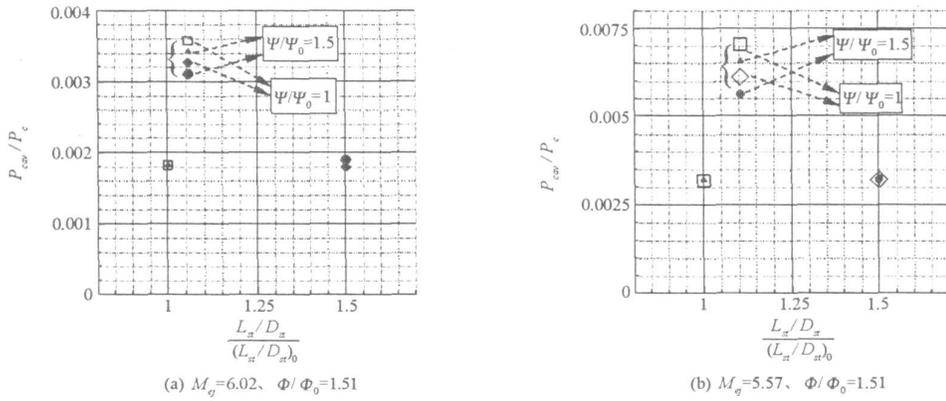


图5 环型引射器扩压管道参数对引射器盲腔压强比 P_{cav}/P_c 的影响

Fig. 5 The influence of piping parameter on pressure ratio of cavity

4 结论

(1) 管道马赫数 M_j 和混合室收缩比 Φ 对环型引射器的启动特性影响较大。 M_{ej} 越大, $P_{c, start}$ 和 $P_{c, operate}$ 越高, P_{cav}/P_c 越小, 盲腔真空度越高, 同时 Φ 可以取更小的值; 其他参数给定的情况下, 混合室收缩比 Φ 越小, $P_{c, start}$ 和 $P_{c, operate}$ 越低, 引射器启动特性越好; 混合室收缩比 Φ 对盲腔压强比 P_{cav}/P_c 无影响。

(2) 第二喉部长径比 L_s/D_{st} 、亚扩段面积比 Ψ 对环型引射器启动特性有较大影响。如果管道马赫数 M_j 较大, 而 L_s/D_{st} 和 Ψ 过小, 引射器启动过程可能不稳定, 甚至无法启动; 随着 M_{ej} 的增大, L_s/D_{st} 和 Ψ 应该适当增大, 以降低启动压强。实验结果表明, 环型引射器扩压管道参数对盲腔压强比 P_{cav}/P_c 无影响。

参考文献:

- [1] Yang T T, Hurlock S C, Dickerson R A, et al. High Pressure Recovery, High Mach Number Nitrogen Based Chemical Oxygen Iodine Laser[C]// Lasers 2000 Conference, December 2000.
- [2] Savin A V, Ignatiev A A, Fedotov A V. Numerical Simulation of Gas Dynamic Flows in Pressure Recovery Systems of Supersonic Chemical Lasers [C]// International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-power Laser Conference, 2001: 410-413.
- [3] Dutton J C, Mikkelsen C D, Adly A L. A Theoretical and Experimental Investigation of the Constant Area Supersonic Ejector[J]. AIAA J., 1982, 20(10).
- [4] 徐万武, 谭建国, 王振国. 高空模拟试车台超音速引射器数值研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(2).
- [5] 李海军. 喷射器性能、结构及特殊流动现象研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [6] Hickman E, Hill P G, Gilbert G B. Analysis and Testing of Compressible Flow Ejectors with Variable Area Tubes[J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1972, 94: 407-416.
- [7] 廖达雄, 任泽斌, 等. 等压混合引射器设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5).
- [8] 徐万武, 邹建军, 王振国, 等. 超声速环形引射器启动特性试验研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(6).