

超声速环型引射器启动特性试验研究

徐万武, 邹建军, 王振国, 周 进

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 建立了超声速环型引射器空气引射试验台, 对高工况下环型引射器启动特性进行了试验研究。试验结果表明, 环型引射器启动压强明显高于运行压强; 试验发现, 引射马赫数越高, 混合室收缩比越大, 引射器启动压强越高。

关键词: 超声速引射器; 环型引射器; 启动压强; 运行压强; 引射马赫数

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)06-0007-05

Experimental investigation of the start performances of the supersonic annular ejector

Xu Wanwu, Zou Jianjun, Wang Zhenguo, Zhou Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: The air-ejecting test facility is constructed for experimental investigation of the start performances of the supersonic annular ejector. The test results show that the ejector start pressure is remarkably higher than the operate pressure. It's observed that the ejector start pressure goes up with the increasing of the ejecting Mach number and the mixing-room contraction ratio.

Key words: supersonic ejector; annular ejector; start pressure; operate pressure; ejecting Mach number

1 引言

超声速引射器是一种气体射流泵, 它利用超声速射流的引射增压作用达到抽真空的目的, 在固体(液体)火箭发动机地面模拟高空试车试验

系统、亚燃冲压和超燃冲压的地面试验系统等领域得到了广泛应用。超声速引射器首先必须启动, 在混合室内建立超声速流场, 才能保证有被引射气流时正常工作, 启动工况在超声速引射器整个工作过程中是最恶劣的, 启动后引射器能正常工作的工况不一定能保证引射器在此工况下启动,

收稿日期: 2005-03-31; 修回日期: 2005-08-29。

作者简介: 徐万武(1975—), 男, 在站博士后, 研究领域为超声速扩压器、引射器和冲压推进技术。

设计不适当的超声速引射器其启动工况过高,甚至根本无法启动,因此超声速引射器启动特性研究是超声速引射器研究的重要组成部分。

超声速引射器启动特性的影响因素较多,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。根据公开报道的文献来看,中心型超声速引射器启动特性研究较为成熟,有大量的实验结果可供参考。而有关超声速环型引射器启动特性研究的文献很少,仅有的几篇文献所研究的环型引射器工况低、盲腔真空度低,与高工况大压缩比超声速环型引射器的工作状态相去甚远,无法反映超声速环型引射器启动特性的变化规律。因此,有必要深入开展超声速环型引射器启动特性的试验研究工作。

本文采用高压空气作为引射工质,设计了两种不同引射马赫数的环型引射器,进行了数十次空气引射启动实验,得到了高引射马赫数下环型引射器的启动特性曲线。

2 环型引射试验系统和引射器设计参数

2.1 环型引射试验系统

环型引射试验系统由环型引射器、高压空气气源系统和测控系统组成。环型引射器组件包括:环型引射喷管、引射扩压管道、盲腔段和固定支撑台架。高压空气气源系统由高压空气罐、压气机、管道和阀门、减压器等组成。

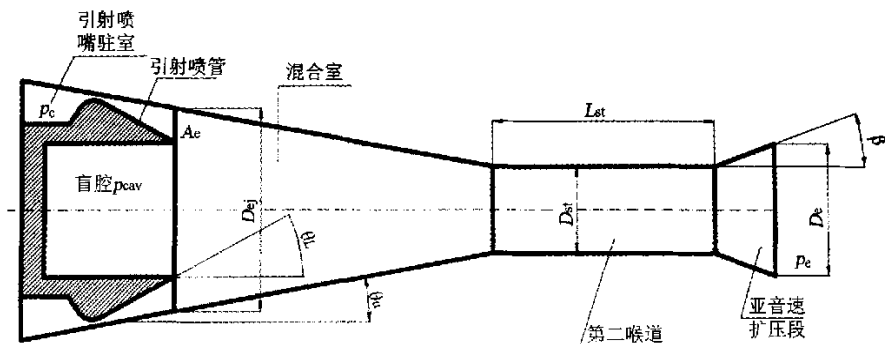


图1 超声速环型引射器

Fig.1 Supersonic annular ejector

测控系统由测量系统和控制系统组成。测量系统包括:压力传感器、数据采集和数据处理模块等等。其中,压力传感器包括高压传感器和负压传感器两种,高压传感器为压差传感器,测量值为表压,用于测量引射喷管驻室的室压 p_c ;负压传感器为绝压传感器,用于测量喷管出口壁面静压 p_n 和盲腔压强 p_{cav} 。采用了两种量程的负压传感器:100kPa负压传感器和20kPa负压传感器。其中, p_n 采用100kPa传感器,盲腔压强测量采用20kPa传感器。100kPa传感器可以反映引射器的整个启动过程,20kPa传感器可以更精确地得到盲腔真空度。控制系统由控制电路和执行机构组成,在试验过程中控制各阀门严格按设定的工作次序

开启和关闭,确保试验安全。

2.2 引射器设计参数

表1给出了实验中选取的引射器参数。引射喷管为环型喷管,引射喷管马赫数选取了两个状态点(Ejector A和Ejector B),Ejector A引射马赫数 Ma_0 ,Ejector B引射马赫数略高($Ma_1/Ma_0=1.0454$);混合室收缩比选取三个状态点,以 Φ_0 为基准点, $\Phi/\Phi_0=1.0,1.29,1.45$;等截面段长径比 L_s/D_s 、亚音速扩压段面积比 ψ 、扩张半角 β 均保持不变。实验中通过改变引射马赫数 Ma_1 和混合室收缩比 Φ ,探讨引射器启动特性的变化规律。

表 1 环型引射器参数

Tab.1 Annular ejector configuration

引射器代号	引射马赫数 Ma_1/Ma_0	混合室收缩比 Φ/Φ_0
Ejector A	1.0	1.0, 1.29, 1.45
Ejector B	1.0454	1.0

3 试验结果

3.1 试验过程

在环型引射器的空气引射启动特性试验的开始阶段,选取的引射喷管马赫数较高(Ejector B),同时引射喷管喉道有少量固体颗粒堵塞,实际的

有效马赫数更高,而气源能提供的最高引射气流总压又受限,多次试验发现引射器无法启动。随后将引射喷管喉道的固体颗粒清除干净,同时,采用低引射马赫数(Ejector A),引射器启动正常,接着研究了不同混合室收缩比条件下引射器的启动特性。在 Ejector B 状态下,仅实现了 $\Phi=\Phi_0$ 时引射器的启动。试验时,由控制系统发出启动指令,打开引射喷管前空气主阀,高压气源通过减压器和主阀进入引射喷管驻室,引射器在高压工质驱动下迅速启动,在引射管道和盲腔内建立一定的真空度;同时,测量系统记录下各个测点压强随时间的变化情况。空气主阀工作预定时间后关闭,引射器工作过程结束。

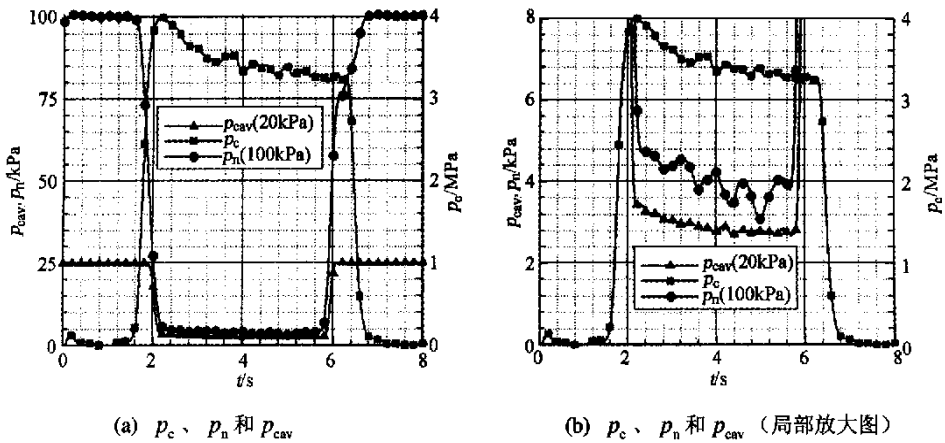


图 2 环型引射器启动过程 (Ejector A、 $\Phi=\Phi_0$)

Fig.2 Annular ejector starting process

图 2(a)、(b)给出了 Ejector A、 $\Phi=\Phi_0$ 条件下,在环型引射器启动过程中,盲腔压强 p_{cav} 、喷管出口压强 p_n 和气流总压 p_c 随时间的变化曲线。可以看出,由于气源系统和减压器调节能力的限制,无法稳定引射气流总压,在引射系统启动初始阶段总压 p_c 形成一道压力峰,随即缓慢下降,期间还有压力波动。初始的压力峰值 p_c 对超声速引射器的启动十分有利,在压力峰的驱动下引射器迅速启动,在引射喷管和混合室内建立起超声速流场,得到很低的盲腔压强和引射喷管出口压强。随后,在引射总压 p_c 逐渐降低的过程中,引射喷

管 p_n 和 p_{cav} 也随着降低,盲腔真空度进一步提高。当引射总压 p_c 低于某一临界值时,引射器无法维持稳定的启动状态,盲腔压强和引射喷管出口压强迅速上升,引射器变成未启动状态。

图 3(a)、(b)以另一种形式给出了超声速环型引射器的启动过程。在超声速环型引射器启动过程中,随着引射总压 p_c 的不断升高,压强比 p_{cav}/p_c 沿着曲线 A-B 不断下降,而压比 p_{ex}/p_{cav} 不断升高 (p_{ex} 为环境大气压强),说明盲腔压强在不断下降;当引射总压达到 B 点时,压强比 p_{cav}/p_c

达到最低值,此时引射器压缩比 p_{ex}/p_{cav} 很高,表明超声速引射器已经启动;接着引射总压沿着曲线 B-C 逐渐下降,此时压强比 p_{cav}/p_c 几乎保持不变,而压缩比 p_{ex}/p_{cav} 进一步增大,盲腔真空度在进一步提高,引射器仍处于启动状态;当引射总压降低到 C 点时,压强比 p_{cav}/p_c 迅速上升,引射器压缩比 p_{ex}/p_{cav} 大幅度下降,引射器回到未启动状态。可以看出,超声速环型引射器启动压强较高,而引射器一旦启动后,能够在较低的引射总

压下维持其启动状态。把 B 点所对应的引射总压称为启动压强 $p_{c,start}$, C 点所对应的引射总压称为运行压强 $p_{c,operate}$,一般来说,运行压强低于启动压强。从图 3(b)可以看出,环型引射器启动后,引射总压越接近 $p_{c,operate}$,引射器压缩比 p_{ex}/p_{cav} 越高,盲腔真空度越高,因此,如果要获得尽可能高的盲腔真空度,引射器启动后引射总压可以适当降低。

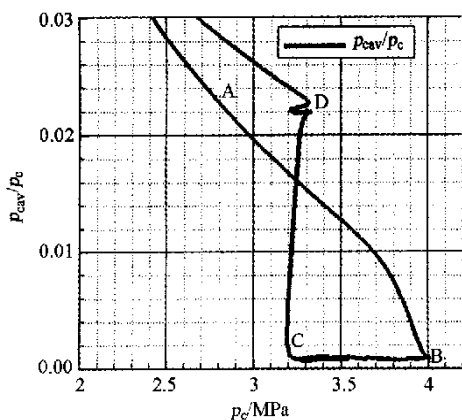
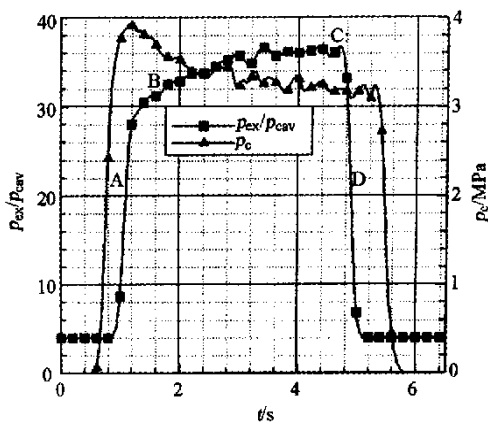
(a) p_{cav}/p_c (b) p_{ex}/p_{cav} 图 3 环型引射器压缩比 (Ejector A, $\Phi=\Phi_0$)

Fig.3 Compression ratio of the annular ejector

3.3 引射马赫数和混合室收缩比对启动特性的影响

图 4(a)给出了引射喷管参数不变情况下,环型引射器混合室收缩比 Φ 对引射器启动压强、运行压强的影响曲线。可以看出,随着混合室收缩比 Φ 的增大,引射器启动压强 $p_{c,start}$ 和运行压强 $p_{c,operate}$ 不断升高,当 $\Phi/\Phi_0=1.45$ 时,气源提供的引射总压已不能满足引射器的启动要求,致使引射器无法启动。

引射器启动后抽真空的能力(盲腔真空度)是启动特性研究的重要方面,图 5 给出了全尺寸环型引射器启动后压强比 p_{cav}/p_c 随 p_c 、 Φ 和引射马赫数 Ma 的变化情况。可以看出,对应给定的引射器几何构形,引射器启动后,随着引射总压 p_c 的

升高, p_{cav}/p_c 变化较小;相同引射马赫数条件下(均为 Ejector A),混合室收缩比 Φ 的变化对压强比 p_{cav}/p_c 无明显影响;Ejector B 的 p_{cav}/p_c 明显低于 Ejector A,它表明,引射马赫数越高,引射气流在混合室入口段的膨胀比越大,压强比 p_{cav}/p_c 越低。

应当注意到,与 Ejector A 相比,尽管 Ejector B 条件下压强比 p_{cav}/p_c 有较大幅度的下降,但由于其启动压强 p_c 有较大幅度的升高,使得其最终盲腔压强与 Ejector A 几乎相同。因此,为了提高盲腔的真空度,一方面要通过增大引射马赫数等措施降低压强比 p_{cav}/p_c ;另一方面,必须降低启动压强(引射马赫数增大,启动压强也相应升高),这可通过适当减小混合室收缩比 Φ 来实现。

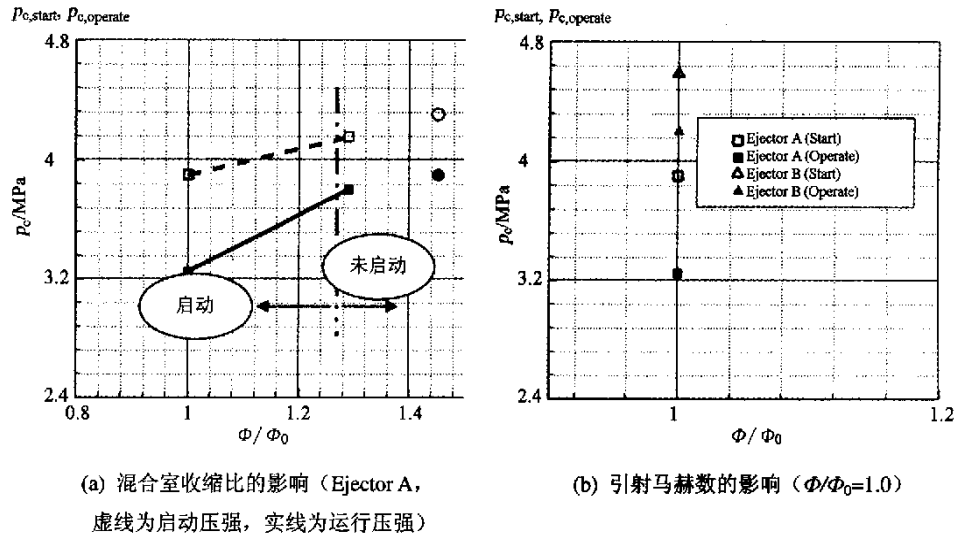


图 4 收缩比 Φ 和引射马赫数 Ma_1 对启动特性的影响

Fig.4 The influence of the contraction ratio and the ejecting Mach number

图 4(b)给出了相同混合室收缩比 Φ 条件下,不同引射喷管马赫数对引射器启动压强、运行压强的影响。实验结果表明,尽管 Ejector B 与 Ejector A 相比马赫数增加很小 ($Ma_1/Ma_0=1.0454$),环型引射器的启动压强和运行压强明显升高,说明引射马赫数对引射器的启动特性影响较大。

4 结论

超声速环型引射器空气引射启动特性试验结果表明,环型引射器的启动压强 $p_{c,start}$ 高于运行压强 $p_{c,operate}$,引射器启动后可通过适当降低引射总压的方法进一步提高引射真空度;试验发现,引射马赫数和混合室收缩比对引射器启动特性有较大影响,引射马赫数 Ma_1 越高,启动压强越高,混合室收缩比 Φ 越大,启动压强越高。

参考文献:

[1] Taylor, Delbert. Supersonic ejectors[R]. GARD-AG-163.

[2] R C Bauer, R C German. The effect of second throat geometry on the performance of ejectors without induced flow[R]. AEDC-TN-61-133.

[3] James W Hale. Comparison of diffuser-ejector performance with five different driving fluids[R]. AEDC-TDR-63-207, 1963.

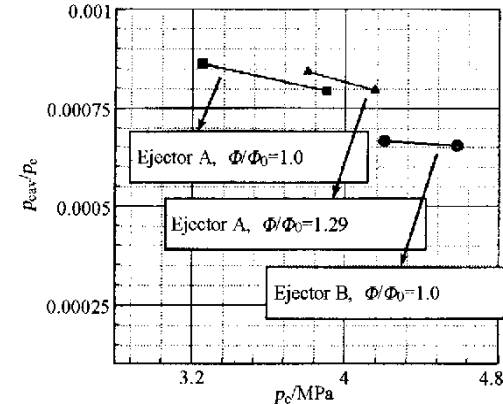


图 5 压强比 p_{cav}/p_c 随 p_c 、 Φ 和引射马赫数 Ma_1 的变化情况

Fig.5 The influences of p_c 、 Φ and Ma_1 on pressure ratio p_{cav}/p_c

(编辑: 侯 早)