

预冷却引射系统性能一维分析*

张建强^{1,2}, 王振国^{1,2}, 李清廉², 徐万武², 邹建军²

(1. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:根据引射器的一维设计理论可知,二次流在进入混合室之前进行预冷降温可以提高引射效率,增大引射系数,但引入预冷器会同时引起流动损失,故需要对引射系统进行性能评估。针对设有预冷器的引射系统,应用一维理论分析预冷对系统性能的影响,重点分析预冷增强效果与流阻减弱效果对引射效率的作用。研究发现:预冷器对引射系统同时带来冷却增强作用和流阻减弱作用,横截面积和换热面积是主要影响因素。预冷器存在临界横截面积,横截面积大于临界值时,换热面积越大,引射性能越高;反之,换热面积越大,引射性能越低。等压混合引射方案比等截面混合引射方案性能高,前者引射系数比后者大60%;预冷却能够有效提高引射性能,尤其是等截面混合引射方案,性能提高可达35.5%。

关键词:一维分析;预冷增强;流阻减弱;临界横截面积

中图分类号:V435 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2017)03-001-06

One-dimensional analysis for performance of ejector with precooling

ZHANG Jianqiang^{1,2}, WANG Zhenguo^{1,2}, LI Qinglian², XU Wanwu², ZOU Jianjun²

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the one-dimension design theory of ejector, cooling the secondary flow before it enters into the mixing chamber can promote the eject efficiency and increase the eject coefficient, but flow loss is brought with the addition of precooler, so the performance evaluation of ejector is necessary. Looking on the eject system with precooler, the effect of precooler on the performance of system was analyzed through the one-dimension theory, and the effects of the intensifying effect of precooling and the weakening effect of resistance on eject efficiency were analyzed emphatically. The research results indicate that: the precooler brings intensifying effect of precooling and weakening effect of resistance to eject system, and the cross section area and heat transfer area of the precooler are the dominating factors; cross section area of the precooler has a critical value, when the cross section area is bigger than the critical value, the eject performance improves with the increase of heat transfer area, otherwise it worsens; the eject performance of the equivalent pressure mixing scheme is better than that of the equivalent area mixing scheme, the eject coefficient of the former is 60% higher than the latter; precooling improves the eject performance effectively, especially for the equivalent area mixing scheme, the performance is improved by 35.5%.

Key words: one-dimensional analysis; intensifying effect of precooling; weakening effect of resistance; critical cross section area

目前,主动引射高空模拟试车台压力恢复系统主要有以下三种方案:“扩压器+冷却室+隔离阀+蒸汽引射器”“扩压器+环状蒸汽引射器+冷却室+排气机组+引射器”“扩压器+冷却室+排气机组”。其中,冷却室是三种方案都存在的部件。

对于引射方案来说,当模拟马赫数高时,燃气总温很高。亚-超引射方案中高超声速射流在扩压器内通过激波串的压缩作用变为亚声速气流,在压力升高的同时气流静温也恢复到接近气流总

温的程度,高静温、高静压将导致扩压器和引射器结构热载荷大大增加,故需要采用主动冷却措施或者特殊的热防护结构。按照引射器一维理论,在保持引射性能不变的前提下,不论引射气流与被引射气流的比热比、分子量等物性参数是否相同,都存在 $n \propto 1/\sqrt{\theta}$ 的关系(其中 n 为引射系数,是被引射工质与引射工质质量流量之比; θ 为总温比,是被引射工质与引射工质总温之比)^[1-6]。引射器一维理论表明随着总温比的减小,引射系

* 收稿日期:2016-01-10

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0156)

作者简介:张建强(1987—),男,山东泗水人,博士研究生,E-mail:nabiandeshan@163.com;

王振国(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:Zhenguo_Wang@nudt.edu.cn

数增大,引射工质质量流量减小,运行成本降低,并且引射器结构尺寸减小,建设成本降低。

综合来看,对工质进行较大程度地冷却,不仅可以解决热防护问题,而且可以有效地增大引射系数,减小引射工质质量流量,降低运行成本和建设成本,其必要性显而易见^[6]。下面针对自由射流系统中的引射系统进行预冷却方案设计。

1 预冷却引射系统

预冷却引射系统由预冷扩压器、预冷器和引射器组成,其中预冷扩压器对壁面进行冷却热防护,预冷器对二次流进行冷却,引射器将二次流引射排出。图 1 和图 2 分别为预冷却等截面混合及等压混合引射系统示意图。图中标号 S, HX, HX', 1, 2, 3, 4 分别表示各特征截面,参数 $m_2, P_{O2}, p_2, T_{O2}, Cp_2, M_2, \gamma_2, V_2, Ma_2, A_2$ 分别表示截面 2 上气流流量、总压、静压、总温、定压比热、分子量、比热比、速度、马赫数以及截面面积,后文中各参数沿用该表述方式。

1.1 预冷扩压器

预冷扩压器由等直段和扩张段组成,壁面加工冷却槽道用于防热。超声速气流在等直段经斜

激波串减速为亚声速,然后通过扩张段进一步减速增压。

1.2 预冷器

预冷器采用叉排管束换热器方案,图 3 为预冷器结构示意图,换热管内的冷却剂和管外主流气体对流换热。换热过程分三部分:冷却剂与内管壁的对流换热;换热管内外壁之间的导热;主流气体与外管壁的对流换热。

预冷器结构参数主要包括横截面积、换热管总面积、管径 d_0 、壁厚、横向间距 s_1 、纵向间距 s_2 ,冷却剂选择水,其工况参数主要包括流量、入口温度、压力。

1.3 引射器

引射器由二次流入口通道、引射喷管、混合室、扩压器组成,引射器扩压器由等直段和扩压段组成。一次流和二次流分别由引射喷管和二次流入口通道进入混合室,经混合后气流进入扩压器,在等直段经过斜激波串减速为亚声速,然后通过后面的扩压段进一步减速增压。一维引射理论主要公式如式(1)~(3)所示,分别为质量、动量和能量守恒公式。

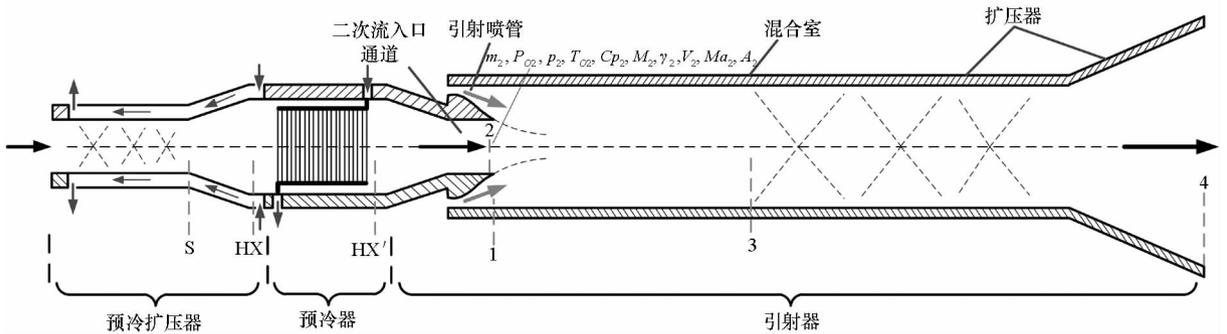


图 1 预冷却等截面混合引射方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-cooled equivalent area mixing scheme

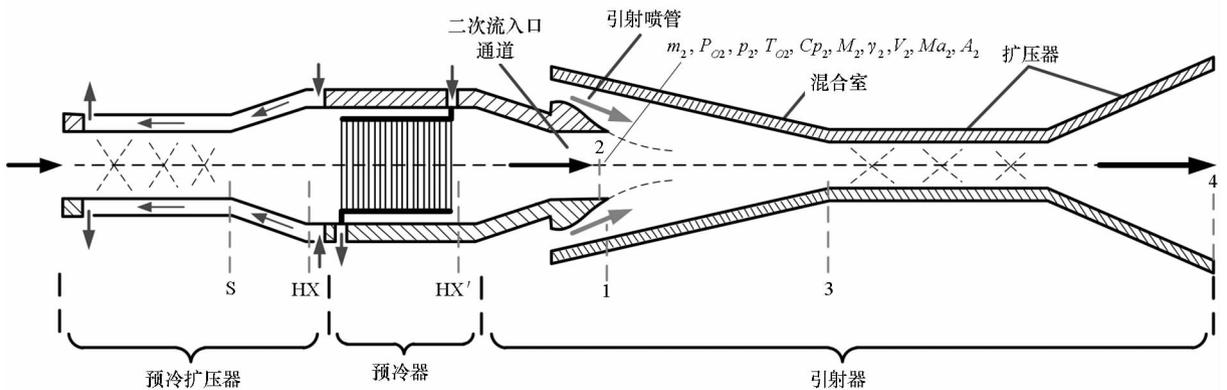
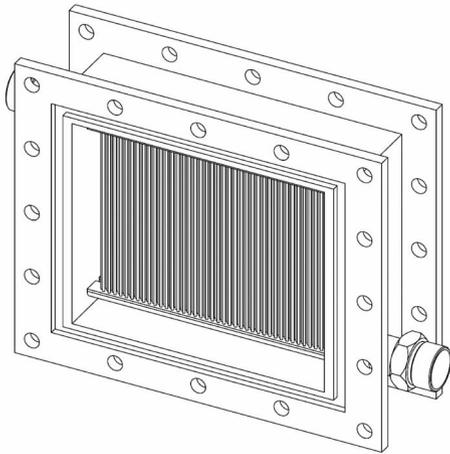


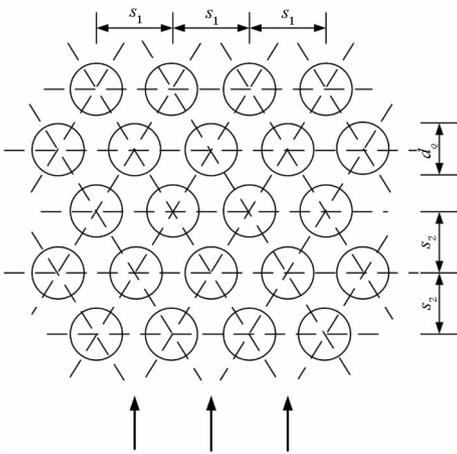
图 2 预冷却等压混合引射方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pre-cooled equivalent pressure mixing scheme



(a) 结构总图

(a) Overall view of the structure



(b) 叉排管束示意图

(b) Schematic diagram of staggered tube bundles

图3 预冷器结构示意图

Fig.3 Sketch of structure of the precooler

$$m_3 = (1 + n)m_1 \quad (1)$$

$$m_3 V_3 - (m_1 V_1 + m_2 V_2) = p_1 A_1 + p_2 A_2 - p_3 A_3 \quad (2)$$

$$m_1 C_{p1} T_{o1} + m_2 C_{p2} T_{o2} = m_3 C_{p3} T_{o3} \quad (3)$$

其中, $n = m_2/m_1$ 为引射系数。

2 计算流程和方法

该问题中,预冷扩压器入口经斜激波串后截面S上的气流参数为:总压 62 kPa;静压 58.4 kPa (0.3Ma);总温 1556.6 K;分子量 28.75;比热比 1.339。计算过程中改变预冷器结构参数和工况参数,研究引射性能的变化规律,引射器出口压力确定,引射系数越大,引射器性能越高。

计算过程作如下基本假设:

- 1) 气体为量热完全气体;
- 2) 气体参数沿轴线一维均匀变化,各截面参数一致;

3) 预冷扩压器和引射器扩压器中的斜激波串按照正激波处理,亚声速扩压段内气体流动按照等熵过程处理;

4) 预冷扩压器冷却槽道主要用于壁面防热,对气流的冷却作用忽略不计。

预冷器性能按照工程设计方法估算^[7-12],引射器参数计算参照一维设计理论,由三大方程联立求解混合过程,图4为预冷却引射方案参数计算流程。

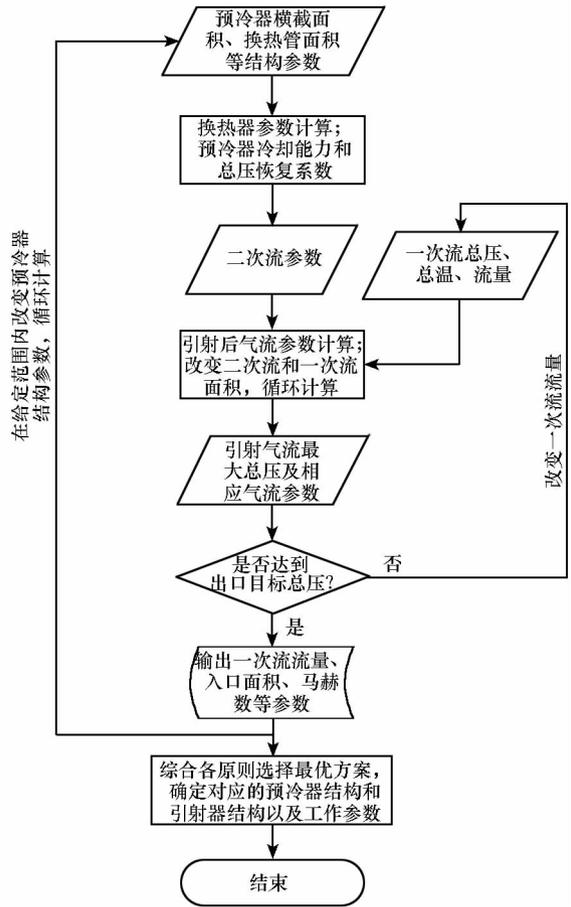


图4 预冷却引射方案参数计算流程图^[6]

Fig.4 Calculation flow chart of precooled ejector parameters^[6]

预冷却引射方案参数的具体计算过程如下:

1) 选定引射器结构参数和冷却剂工况参数,估算其换热功率和流动损失,求得其总温恢复系数和总压恢复系数,确定换热器出口气流参数。

2) 选定一次流流量、总压和总温,改变一次流和二次流面积以改变入口马赫数,循环计算求得最大出口总压,确定对应的入口面积。如果该总压达到出口压力,则停止计算,反之则改变一次流流量,直到引射器出口最大总压达到要求,确定对应的一次流流量。

3) 在一定范围内改变引射器结构参数和冷却剂工况参数,返回步骤1循环计算。综合考虑

建设、运行成本以及结构占地等因素,选择最优方案,确定对应的预冷器结构和引射器结构以及工作参数。

3 计算结果和分析

选择来流面积 A_s 作为基准面积,即为总温 1556.6 K、总压 62 kPa、马赫数 (Ma) 为 0.3 下的流通面积,实际面积与基准面积之比即为后文中的无量纲面积。一次流总温 1200 K、总压 3 MPa 保持不变。为了将二次流顺利引射排入大气,对出口目标总压留取 50% 的余量,即为 1.5 bar,二次流增压比为 2.42。

3.1 预冷器

计算中保持冷却剂工况参数不变,改变预冷器结构参数,研究预冷器性能的变化规律。冷却水无量纲流量 (冷却水流量/二次流流量) 为 1.294,入口温度为 300 K,压力为 5 MPa。

预冷器设计点结构参数分别为:无量纲横截面积 $A_{HX} = 4.23$,换热管总面积 $A_{tube} = 44.06$,换热管外径 0.98 mm,壁厚 0.04 mm,相对横向间距 S_1 ,相对纵向间距 S_2 。性能参数包括总压恢复系数 Po_{rec} 和总温恢复系数 To_{rec} ,分别为气流在预冷器出口与进口的总压和总温之比,表征气流经过预冷器后的流动损失和换热功率。 Po_{rec} 越大, To_{rec} 越小,说明预冷器流动损失越小,功率越高,性能越优。预冷器设计点性能参数分别为 $Po_{rec} = 0.94$, $To_{rec} = 0.515$ 。

计算中依次改变各个结构参数,保持其他参数不变,研究单一变量的影响,实际参数与设计点参数之比为相对参数。由计算结果可知,预冷器横截面积和换热面积是影响其性能的主要因素,如图 5 和图 6 所示,其中 A'_{HX} 和 A'_{tube} 分别为相对横截面积和相对换热面积。 A'_{HX} 由 0.5 增大至 1.25, Po_{rec} 增大 67.8%, To_{rec} 增大 37.5%, A'_{tube} 由 0.4 增大至 1.6, Po_{rec} 减小 8.7%, To_{rec} 减小 47.3%。随着 A'_{HX} 的增大,总压恢复系数不断增大但增幅逐渐减小,总温恢复系数则基本线性增大;随着 A'_{tube} 的增大,预冷器总温和总压恢复系数均基本呈线性减小。

随着横截面积的增大,气流速度减小,流动损失相应减小,但气流与换热管对流换热系数也随之减小,使得换热功率降低。换热管总面积增大,换热功率相应增大,预冷器出口气流温度降低,但换热管管排数随之增大,流动损失增大。

3.2 预冷却引射方案

常规的非预冷亚超引射方案结果如图 7 和

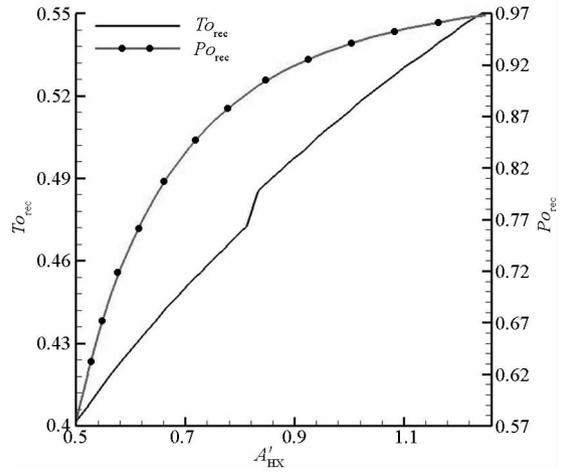


图 5 预冷器性能随横截面积变化曲线

Fig. 5 Evolution curve of precooler performance along with cross section area

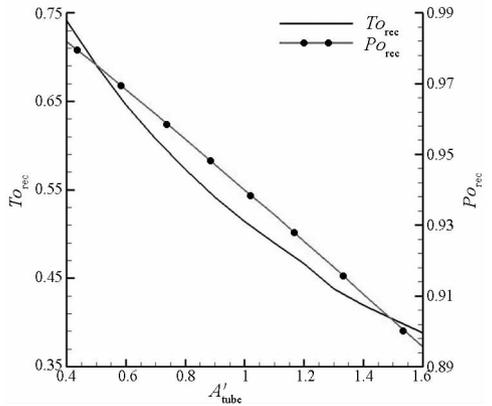


图 6 预冷器性能随换热面积变化曲线

Fig. 6 Evolution curve of percooler performance along with heat transfer area

图 8 所示,两图分别为等截面混合引射方案和等压混合引射方案。当引射系数确定时,通过调整二次流和主流入口面积,可以使出口气流总压达到最大,从而使引射性能达到最优。

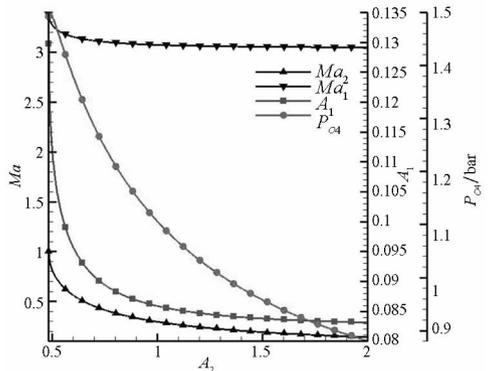


图 7 等截面混合引射方案参数变化曲线

Fig. 7 Evolution curves of ejector parameters of equivalent area mixing scheme

等截面混合引射方案下,随着 A_2 的减小, Ma_2 不断增大,静压降低, Ma_1 和 A_1 相应地增大, P_{04} 不断增大。当引射系数 $n=0.864$ 时, $A_2=0.489$ 对应的出口总压达到最大,为 1.5 bar,达到引射要求,相应的 $A_1=0.12$, $Ma_1=3.32$, $Ma_2=0.89$,此即非预冷等截面混合引射方案的最佳工况。

等压混合引射方案下,随着 A_2 的减小, Ma_2 不断增大,静压降低, Ma_1 和 A_1 相应地增大, P_{04} 先增大后减小。当引射系数 $n=1.382$ 时, $A_2=0.505$ 对应的出口总压达到最大,为 1.5 bar,达到引射要求,相应的 $A_1=0.069$, $Ma_1=3.26$, $Ma_2=0.79$,混合室收缩比为 0.716,此即非预冷等压混合引射方案的最佳工况。

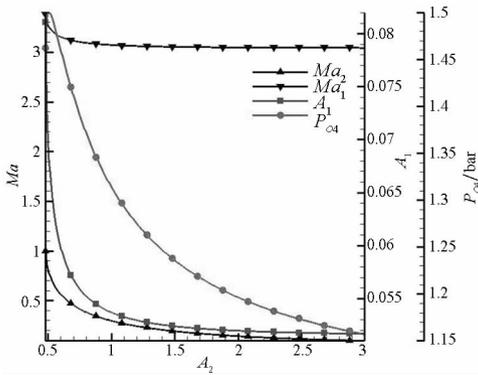


图8 等压混合引射方案参数变化曲线
Fig. 8 Evolution curves of ejector parameters of equivalent pressure mixing scheme

由上述计算可知,等压混合引射方案比等截面混合引射方案性能高,同等增压比前提下,前者引射系数比后者大约 60%,同时系统尺寸较小。

增加预冷器会使二次流温度降低,冷却作用能够提高引射性能,但同时也会引起流动损失,而流阻作用又会降低引射性能。以下针对两种预冷引射方案进行性能计算,主要考察引射系数随预冷器换热面积和横截面积的变化曲线,相对换热面积 A'_{tube} 取 0.4 ~ 1.6,相对横截面积 A'_{HX} 取 0.5 ~ 1.25,计算结果反映了预冷器对引射性能的影响。

3.2.1 预冷却等截面混合引射方案

图9为预冷等截面混合引射方案引射系数变化曲线,由结果可知,保持 A'_{tube} 不变,随着 A'_{HX} 的增大,流动损失减小,冷却作用同时减弱, n 逐渐增大至趋于平稳,可见流阻减弱作用大于冷却增强作用,但两者之间的差距逐渐减小。保持 A'_{HX} 不变,随着 A'_{tube} 的增大,流动损失增大,冷却作用同时增强, n 则呈现出相反的变化规律:临界相对横截面积约为 0.8,当 $A'_{\text{HX}}=0.8$ 时, n 随着 A'_{tube} 的改变基本保持不变,即换热面积对引射性能几乎

没有影响;当 $A'_{\text{HX}} > 0.8$ 时, n 随着 A'_{tube} 的增大而增大,换热面积增加带来的冷却增强作用的增长速度大于流阻减弱作用的增长速度,并且两者之间的差别随着横截面积的增大而增大;当 $A'_{\text{HX}} < 0.8$ 时, n 随着 A'_{tube} 的增大而减小,换热面积增加带来的冷却增强作用的增长速度小于流阻减弱作用的增长速度,并且两者之间的差别随着横截面积的减小而增大。

非预冷等截面混合引射方案 $n=0.864$,对应图9中的虚线,虚线以下表示流阻减弱作用大于冷却增强作用,虚线以上表示流阻减弱作用小于冷却增强作用。预冷器设计参数应该在虚线以上,才能体现预冷对引射系统的增强效果。当横截面积大于临界值时, A'_{tube} 越大,引射性能增强效果越明显,当 $A'_{\text{HX}}=1.25$ 、 $A'_{\text{tube}}=1.6$ 时,引射系数 $n=1.171$,此时引射系统的性能最优,比非预冷引射方案的提高 35.5%。

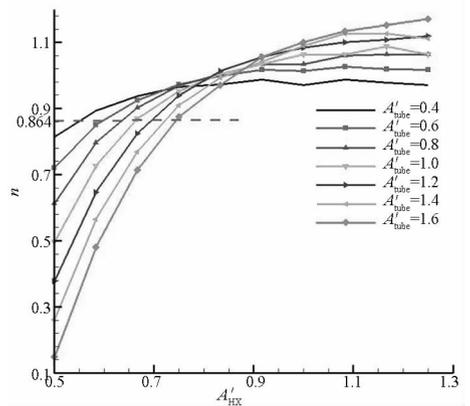


图9 预冷却等截面混合引射方案引射系数变化曲线
Fig. 9 Evolution curve of eject coefficient of precooled equivalent area mixing scheme

3.2.2 预冷却等压混合引射方案

图10为预冷却等压混合引射方案引射系数变化曲线,由结果可知,保持 A'_{tube} 不变,随着 A'_{tube} 的增大,流动损失减小,冷却作用同时减弱, n 逐渐增大至趋于平稳,可见流阻减弱作用大于冷却增强作用,但两者之间的差距逐渐减小。保持 A'_{HX} 不变,随着 A'_{tube} 的增大,流动损失增大,冷却作用同时增强, n 同样呈现出相反的变化规律:临界相对横截面积约为 1.1,当 $A'_{\text{HX}}=1.1$ 时, n 随着 A'_{tube} 的改变基本保持不变,即换热面积对引射性能几乎没有影响;当 $A'_{\text{HX}} > 1.1$ 时, n 随着 A'_{tube} 的增大而增大,换热面积增加带来的冷却增强作用的增长速度大于流阻减弱作用的增长速度,并且两者之间的差别随着横截面积的增大变化较小;当 $A'_{\text{HX}} < 1.1$ 时, n 随着 A'_{tube} 的增大而减小,换热面积增加带来的冷却增强作用的增长速度小于流阻减弱作

用的增长速度,并且两者之间的差别随着横截面积的减小而增大。

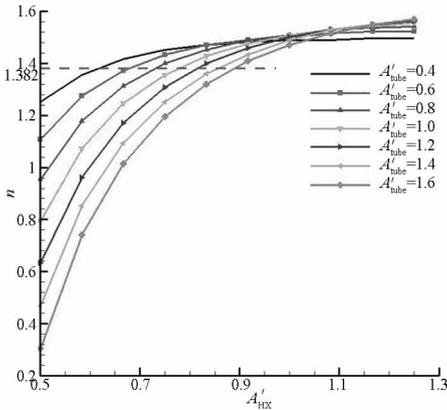


图 10 预冷却等压混合引射方案引射系数变化曲线
Fig. 10 Evolution curve of eject coefficient of precooled equivalent pressure mixing scheme

非预冷等压混合引射方案 $n = 1.382$, 对应图 10 中的虚线, 虚线以下表示流阻减弱作用大于冷却增强作用, 虚线以上表示流阻减弱作用小于冷却增强作用。预冷器设计参数应该在虚线以上, 才能体现预冷对引射系统的增强效果。当横截面积大于临界值时, A'_{tube} 越大, 引射性能增强效果越明显, $A'_{HX} = 1.25$ 、 $A'_{tube} = 1.6$ 时, 引射系数 $n = 1.57$, 此时引射系统的性能最优, 比非预冷引射方案的提高 13.6%。

由计算结果可知, 预冷却引射方案能够有效增强引射性能, 尤其是对于等截面混合引射方案, 性能提高达 35.5%。预冷器对引射系统同时具有冷却增强作用和流阻减弱作用, 必须保证设计点处于图 9 和图 10 虚线以上区域才能体现预冷过程的优越性; 同时应根据横截面积选择换热面积, 当横截面积大于临界值时, 换热面积越大, 引射性能越高; 反之, 换热面积越小, 引射性能越高。

4 结论

针对预冷却引射系统开展性能分析计算, 利用引射一维理论和换热器工程设计方法建模, 得到预冷却对引射性能的影响, 并发现了预冷器的临界横截面积, 所得结果能够有效指导系统设计。主要结论如下:

1) 预冷器对引射系统同时带来冷却增强作用和流阻减弱作用, 横截面积和换热面积是主要影响因素, 两者在增强冷却和减弱流阻上起相反的作用;

2) 预冷器存在临界横截面积, 横截面积大于临界值时, 换热面积越大, 引射性能越高, 冷却带来的

引射增强作用起主导作用; 反之, 换热面积越大, 引射性能越低, 流阻带来的引射减弱作用起主导作用;

3) 等压混合引射方案比等截面混合引射方案性能高, 前者引射系数比后者大 60%, 预冷却能够有效提高引射性能, 等截面混合引射方案性能提高可达 35.5%, 等压混合方案性能提高 13.6%。

参考文献 (References)

- [1] Nagaraja K S. Some ejector characteristics [C]//Proceedings of Aircraft Systems and Technology Conference, AIAA 1981 - 1679, 1981.
- [2] Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment [J]. Journal of Applied Mechanics, 1950, 17(3): 299 - 309.
- [3] Keenan J H, Neumann E P. A simple air ejector [J]. Journal of Applied Mechanics—Transactions of the ASME, 1942, 64: A75 - A81.
- [4] 邹建军, 周进, 徐万武, 等. 超声速环形引射器空气引射启动特性试验 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1): 1 - 4. ZOU Jianjun, ZHOU Jin, XU Wanwu, et al. Experimental investigation on the start performances of the supersonic annular air ejector [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(1): 1 - 4. (in Chinese)
- [5] 徐万武. 高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2003. XU Wanwu. Study of high performance, high compression ratio pressure recovery system for chemical laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [6] 吴庆伟. 预冷器及预冷引射系统性能研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2014. WU Qingwei. Research on precooler and characteristics of precooling ejector system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] Shah R K, Mueller A C, Sekulic D P. Heat exchanger [M]. Weinheim, Germany: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 1988.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006. YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 余建祖. 换热器原理与设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. YU Jianzu. Principle and design of heat exchanger [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 马小明, 钱颂文, 朱东生, 等. 管壳式换热器 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010. MA Xiaoming, QIAN Songwen, ZHU Dongsheng, et al. Shell and tube heat exchanger [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 沙拉. 塞库利克. 换热器设计技术 [M]. 程林, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010. Shah R K, Sekuli D P. Fundamentals of heat exchanger design [M]. Translated by CHENG Lin. Beijing: China Machine Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 兰州石油机械研究所. 换热器 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2013. Lanzhou Petroleum Machinery Research Institute. Heat exchanger [M]. 2nd ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2013. (in Chinese)