

文章编号: 1001-2486 (2001) 03-0035-05

压力恢复系统引射器工作效率工程估算*

黄 华, 姜宗福

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 在与高能化学激光器配套的引射式压力恢复系统中, 引射器作为一个关键部件, 其工作效率对于整套系统有很大影响。本文结合工程实际, 对引射器工作效率的工程计算方法进行了较为深入的研究, 提出了合理假设。计算采用守恒方程组, 考虑了在热力学特性上, 引射气体和被引射气体有较大差别的实际情况, 按照工程设计的要求, 对引射器的工作效率进行了计算。通过对多组参数的计算和分析, 得出了有关参数对引射器工作效率的影响规律。计算结果表明: 引射气体和被引射气体的速度参数、总压和环境压力的调整对于引射器的工作效率有着较大的影响。

关键词: 压力恢复系统; 引射器; 引射系数

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Study on Ejector Efficiency Engineering Calculation in Pressure Recovery System

HUANG Hua, JIANG Zong-fu

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the pressure recovery system of a high-energy chemical laser, the ejector is a very important equipment. Its efficiency influences all the system. In this paper, theory of the engineering calculation of the ejector efficiency is studied. The conservation equations are used. Since in an ejector, active and passive air has different thermodynamic and physical constants. This influence must be considered in calculation. The results of the calculation of different parameters show that some parameters have important influence. Some qualitative rules have got for engineering design.

Key words: pressure recover system; ejector; ejection coefficient

当前, 在高能激光器的研究领域, 小型化、实用化的高功率化学激光器已成为研究的主要课题。一般的高能化学激光器均采用真空装置来吸收废气, 保证运行。其真空装置体积庞大, 重量惊人, 已成为高能激光器小型化、实用化的主要障碍之一。而采用引射式压力恢复系统, 通过引射扩压, 可直接将废气排入大气, 具有体积小, 效率高等优点, 已成为研究的焦点。其中, 引射器作为关键部件, 其效率的高低对于压力恢复系统有重要影响。因此, 在工程设计中需对引射器有关参数进行估算。国外从 20 世纪 50 年代以来, 有关的研究工作逐步深入, 已从理论研究逐步过渡到工程实际^[1]。目前, 国内针对高能化学激光器的引射式压力恢复系统的理论研究尚未见到公开发表的文献。因此, 本文按照引射气体和被引射气体有较大差异的工程实际, 对引射器的运行规律进行了相应研究, 提出了合理假设, 并进行了工程估算。

1 问题分析

对于常用的截面为圆形的引射器而言, 可供选择的引射器结构主要有以下三种:

中心引射型: 引射气体位于引射器中心, 被引射气体环绕于引射气体周围。

环形引射型: 被引射气体位于引射器中心, 引射气体环绕于被引射气体周围。

环缝引射型: 被引射气体被环形的引射气体分隔为两个区域, 一部分位于中心的圆形区域, 另一部分位于引射气体外部的环形区域。

* 收稿日期: 2000-11-10
基金项目: 部委级预研基金资助
作者简介: 黄华 (1974-), 男, 博士后。

就引射效率而言,上述三种类型依次升高,但同时结构和加工性能也逐渐复杂。综合考虑而言,环形引射器较为可取。为便于理论分析和研究,将圆柱形环形引射器结构简化如下:

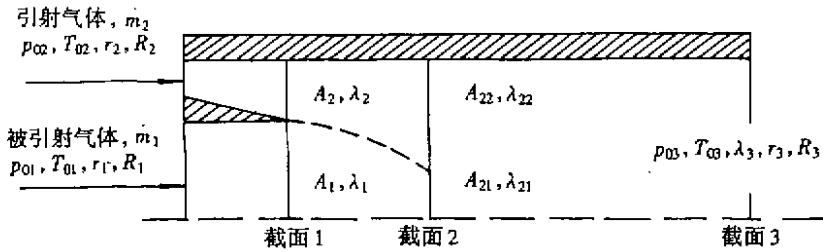


图1 环形引射器结构简图

Fig.1 Annular ejector

在引射器的不同工作条件下,截面1处引射气体和被引射气体不同的压力、速度和截面3处背压决定着不同的工作状态。根据本文研究的具体问题,一般情况下:引射气体为超声速高温高压气体,被引射气体为亚声速低压气体,引射气体和被引射气体在热力学上存在较大差异。截面1处,被引射气体的详细条件已知,引射气体的总温、入口速度系数 λ_2 已知,且截面1处静压 $p_2 > p_1$;截面3处,出口气体为满足能有效的排入大气,而限定为总压 $p_{03} = 1.2$ 大气压(包含20%的损耗)。需求解:引射气体总压 p_{02} ,面积比 A_2/A_1 ,截面3处,总温 T_{03} ,出口速度系数 λ_3 。

根据本文问题的实际工作条件,并考虑工程计算快速、简便的特点,采用以下基本假设:

1. 由于将等截面圆管型引射器作为研究对象,本文采用一维假设。并认为截面1处引射气体入口、被引射气体入口和截面3气体出口处均为均匀流。
2. 为便于研究,忽略壁面摩擦,作无粘假设。
3. 考虑引射器工作温度的范围,假定在引射器气体混合过程中,未发生化学反应。
4. 引射气体和被引射气体为不同气体,具有不同的比热比和分子量。

在基本假设下,仅有三个守恒方程,无法求解四个未知数。为此,根据实际流场性质,增加临界截面2,并附加如下假设:

附加假设1:引射气体和被引射气体在截面1和截面2之间,不相混合,各自流动。

附加假设2:由于 $p_2 > p_1$,被引射气体被进一步压缩,速度逐渐加快,在截面2处达到音速,即: $\lambda_{21} = 1.0$ 。引射气体逐步扩张加速。

2 理论分析

定义面积比

$$\alpha = \frac{A_2}{A_1}$$

表征引射效率的引射系数

$$K = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{C(r_1, R_1)}{C(r_2, R_2)} \cdot \frac{p_{01}}{p_{02}} \cdot \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{01}}} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{q(\gamma_1, \lambda_1)}{q(\gamma_2, \lambda_2)} \quad (1)$$

式中, A 为截面面积, \dot{m} 为质量流量。

对于截面3处的比热比和气体常数的计算,根据道尔顿分压定律和未发生化学反应的假设,可得以下公式:

等压比热:

$$Cp_3 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} Cp_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_3} Cp_2 \quad (2)$$

比热比:

$$\gamma_3 = \frac{\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \cdot \frac{Cp_1}{Cp_2} + 1}{\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \cdot \frac{Cp_1}{Cp_2} \cdot \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2}} \quad (3)$$

气体常数：

$$R_3 = \frac{\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \cdot R_1 + R_2}{\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} + 1} \quad (4)$$

在截面 1 和截面 3 之间：

质量守恒方程：

由 $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$ 得：

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = 1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = 1 + \frac{1}{K}$$

又

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{\alpha(r_3, R_3)}{\alpha(r_1, R_1)} \cdot \frac{p_{03}}{p_{01}} \cdot \sqrt{\frac{T_{01}}{T_{03}}} \cdot (1 + \alpha) \cdot \frac{q(\gamma_3, \lambda_3)}{q(\gamma_1, \lambda_1)}$$

联立可得

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \frac{K + 1}{K} \cdot \frac{\alpha(r_1, R_1)}{\alpha(r_3, R_3)} \cdot \sqrt{\frac{T_{03}}{T_{01}}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \frac{q(\gamma_1, \lambda_1)}{q(\gamma_3, \lambda_3)} \quad (5)$$

动量守恒方程：

$$p_{01} A_1 f(\gamma_1, \lambda_1) + p_{02} A_2 f(\gamma_2, \lambda_2) = p_{03} A_3 f(\gamma_3, \lambda_3)$$

即

$$f(\gamma_1, \lambda_1) + \frac{p_{02}}{p_{01}} \alpha \cdot f(\gamma_2, \lambda_2) = \frac{p_{03}}{p_{01}} (1 + \alpha) \cdot f(\gamma_3, \lambda_3) \quad (6)$$

能量守恒方程：

$$\dot{m}_1 Cp_{01} T_{01} + \dot{m}_2 Cp_{02} T_{02} = \dot{m}_3 Cp_{03} T_{03}$$

将式 (1) 代入并化简得：

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} = \frac{K Cp_1 + Cp_2 \frac{T_{02}}{T_{01}}}{K Cp_1 + Cp_2} \quad (7)$$

在截面 1 与截面 2 之间：

由附加假设 1 知：截面 A_2 和截面 A_{22} 之间质量守恒，截面 A_1 和截面 A_{21} 之间质量守恒，由此可

$$\text{得：} \begin{cases} \frac{A_{21}}{A_1} = q(\gamma_1, \lambda_1) \\ \frac{A_{22}}{A_2} = \frac{q(\gamma_2, \lambda_2)}{q(\gamma_2, \lambda_{22})} \end{cases} ; \text{又知 } A_{21} + A_{22} = A_1 + A_2$$

联立可得

$$q(\gamma_1, \lambda_1) = 1 + \alpha - \alpha \cdot \frac{q(\gamma_2, \lambda_2)}{q(\gamma_2, \lambda_{22})} \quad (8)$$

动量守恒方程：

$$p_{01} A_1 f(\gamma_1, \lambda_1) + p_{02} A_2 f(\gamma_2, \lambda_2) = p_{01} A_{21} f(\gamma_1, \lambda_{21}) + p_{02} A_{22} f(\gamma_2, \lambda_{22}) \quad (9)$$

联立方程 (1), (5~9), 选取引射系数 K , 总温比 T_{03}/T_{01} , 面积比 α , 出口截面速度系数 λ_3 , 引射气体和被引射气体总压比 p_{02}/p_{01} , 截面 2 处引射气体的速度系数 λ_{22} 作为未知数, 进行求解。显然, 此为强非线性常系数方程组, 需进行数值求解。式中函数 $\alpha(r, R)$, $q(r, \lambda)$, $f(r, \lambda)$ 的具体表达

式参见文献 [2]

3 算例分析

按照上述的理论分析,本文采用数值方法对有关算例进行了计算,并对其进行了分析。

(1) 被引射气体速度系数 λ_1 对引射效率的影响:

$$p_{01} = 1.9223 \times 10^4 \text{ Pa}, T_{01} = 1800 \text{ K}, \gamma_1 = 1.5, R_1 = 955.632$$

已知条件:

$$T_{02} = 1800 \text{ K}, \lambda_2 = 1.96326, \gamma_2 = 1.33, R_2 = 296.236, p_{03} = 1.212 \times 10^5 \text{ Pa}$$

将不同的 λ_1 代入求解,由计算结果可知,在引射气体总温和入口速度固定的情况下,为满足出口总压的要求,随着被引射气体的速度增加,引射气体和被引射气体总压比下降,面积比增加,出口截面速度下降,引射效率相应下降。对应的计算结果见图 2。

(2) 引射气体速度系数 λ_2 对引射效率的影响:

$$p_{01} = 1.9223 \times 10^4 \text{ Pa}, T_{01} = 1800 \text{ K}, \lambda_1 = 0.59, \gamma_1 = 1.5, R_1 = 955.632$$

已知条件:

$$T_{02} = 1800 \text{ K}, \gamma_2 = 1.33, R_2 = 296.236, p_{03} = 1.212 \times 10^5 \text{ Pa}$$

将不同的 λ_2 代入求解,由计算结果可知,在被引射气体入口条件固定的情况下,为满足出口总压的要求,随着引射气体的速度增加,引射气体和被引射气体总压比上升,面积比下降,出口截面速度上升,引射效率上升。因此,较高的引射气体速度对于引射器工作是有利的。所对应的计算结果见图 3。

(3) 被引射气体总压 p_{01} 对引射效率的影响:

$$T_{01} = 1800 \text{ K}, \lambda_{11} = 0.59, \gamma_1 = 1.5, R_1 = 955.632$$

已知条件:

$$T_{02} = 1800 \text{ K}, \lambda_{12} = 1.96236, \gamma_2 = 1.33, R_2 = 296.263, p_{03} = 1.212 \times 10^5 \text{ Pa}$$

将不同的 p_{01} 代入求解,由计算结果可知,在被引射气体入口条件、引射气体的总温和速度系数固定的情况下,为满足出口总压的要求,随着被引射气体的总压增加,引射气体和被引射气体总压比上升,面积比下降,出口截面速度下降,引射效率上升。因此,较高的被引射气体总压对于引射器工作是有利的。对应的计算结果见图 4。

(4) 出口截面总压 p_{03} 对引射效率的影响:

已知条件:

$$p_{01} = 1.9223 \times 10^4 \text{ Pa}, T_{01} = 1800, \lambda_{11} = 0.59, \gamma_1 = 1.5, R_1 = 955.632,$$

$$T_{02} = 1800 \text{ K}, \lambda_{12} = 1.96236, \gamma_2 = 1.33, R_2 = 296.236$$

将不同的 p_{03} 代入求解,在被引射气体入口条件、引射气体的总温和速度系数固定的情况下,随着出口截面的总压增加,总压比下降,面积比增加,出口截面速度增加,引射效率下降。因此,较高的出口截面总压对于引射器工作是不利的。对应的计算结果见图 5。由此可见,在实际工作中,较高的环境压力不但增大了引射器的工作负荷,而且降低了引射器的工作效率,对整套压力恢复系统的工作产生了不利的影响。

4 结论

通过对计算结果的分析可以发现,在实际工作条件的选取范围内,有关参数的选取对于引射器的工作效率有相当大的影响。为提高引射器的工作效率,在引射器设计中应尽量提高引射气体的速度;降低被引射气体的速度,提高其压力;降低出口截面处的总压。总的说来,在工程设计的初步阶段,上述工程估算模型可以快速、方便地给出有关仿真结果,为工程优化设计指明方向。但在进一步的工程设计中,上述参数的选取还应综合考虑压力恢复系统的整体设计,对于相关的参数综合进行选取,

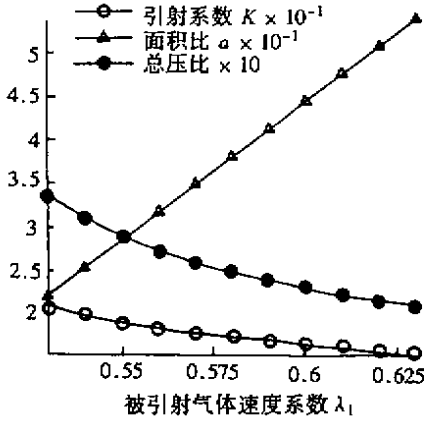


图 2 计算结果示意图

Fig.2 Example of calculation

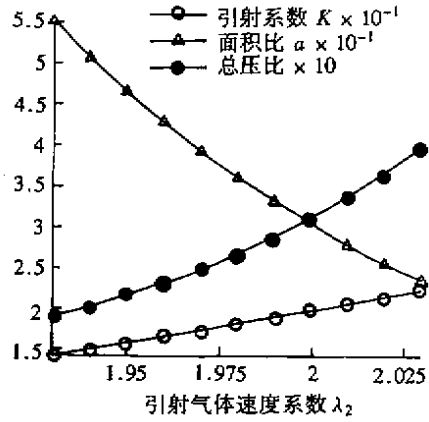


图 3 计算结果示意图

Fig.3 Example of calculation

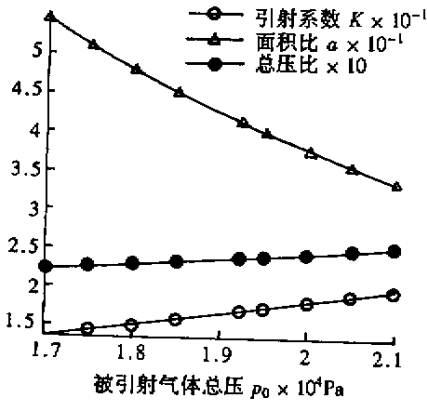


图 4 计算结果示意图

Fig.4 Example of calculation

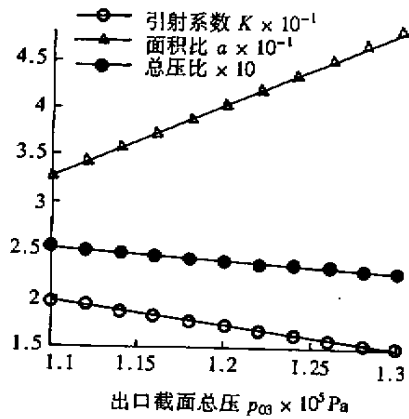


图 5 计算结果示意图

Fig.5 Example of calculation

以达到最佳效果。

参考文献：

[1] Israel and US forces warm to high-energy laser weapons [J]. *Jeans International Defense Review*, 1997. 2.
 [2] 徐华舫. 空气动力学基础 [M]. 北京航空学院出版社, 1985.

