

# 引射器用作化学氧碘激光器压力恢复系统的探讨\*

王成栋 庄琦

(中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023)

**摘要** 探讨了引射器在化学氧碘激光器(COIL)压力恢复系统中的使用问题。为减小引射器的规模而达到较高的扩压比 $P_{rec}/P$ , 引射工质应采用分子量和比热比小的气体。提高引射气体的温度及马赫数, 也可增加扩压比。

**关键词** 引射器 化学氧碘激光 压力恢复

**ABSTRACT** This paper investigates the problem of an ejector used in a pressure recovery system for chemical oxygen-iodine laser(COIL). For the purpose to reduce the scale of an ejector as well as to increase pressure ratio $P_{rec}/P$ , it is better to use the eject gas having small molecular weight and specific heat ratio. Another method to increase the pressure ratio $P_{rec}/P$  is to increase the temperature and Mach number of the eject gas.

**KEY WORDS** ejector, COIL, pressure recovery

## 0 引言

压力恢复系统是化学氧碘激光器(COIL)的组成部分, 它的性能直接关系到COIL的工作性能, 目前真空系统加真空泵的结构尺寸的比例相当大, 因而影响了COIL的实际应用。本文提出COIL的压力恢复系统采用引射器的设计方案, 可使COIL达到实用化。

COIL的光腔压力很低, 约0.34~1.33kPa, 停滞温度为298K, 马赫数为2。COIL的光腔工作介质流经扩压器(为与引射后的扩压器相区别, 这里称为前扩压器)。根据方程

$$P_1(1 + \gamma M_1^2) = P_s(1 + \gamma M_s^2) \quad (1)$$

其中下标1为光腔条件, 下标s为前扩压出口条件, 参见图1。为简化起见, 假设经过前扩压器后速度减小到 $M_s \rightarrow 0$ , 可以得到前扩压器的最大扩压比 $P/P_1 = (1 + \gamma M_1^2)$ 。根据超音速COIL目前的实验条件,  $\gamma_1 = 1.6, M_1 = 2$ , 可以得到前扩压器的最大扩压比为7.4。考虑到下列两个因素: (1) 经扩压后气体的流动速度不可能也不必达到零, 实际上其马赫数 $M_2 = 0.2 \sim 0.4$ ; (2) 气体流动中的各种损耗因素, 尤其是非正激波引起的压力损失, 在化学激光的扩压器设计中, 扩压器效率不大于0.8。由此, 可以认为利用扩压器可以使COIL的工作介质的压力提高约5倍, 从而达到3.33~6.67kPa。本文提出的引射器就是要使COIL的恢复压力由3.33~6.67kPa继续恢复到所需排出的外界压力。

对于扩压器的详细讨论可参见文献[1], 本文仅对引射器在COIL的压力恢复系统中应用的一些问题进行初步优化计算和讨论。

\* 国家863激光技术领域资助课题。  
1996年6月27日收到原稿, 1997年4月9日收到修改稿。  
王成栋, 男, 1940年1月出生, 高级工程师。

### 1 理论计算

由上述分析可见,在 CO L 的压力恢复系统中,引射器的作用是将前扩压器出口处压力为 3.33~ 6.67kPa,马赫数为 0.2~ 0.4,停滞温度为 298K 的工作气体引射到外界大气中。以下仅对稳定轴流一级引射器进行分析和讨论。图 1 是引射器式压力恢复系统的示意图。

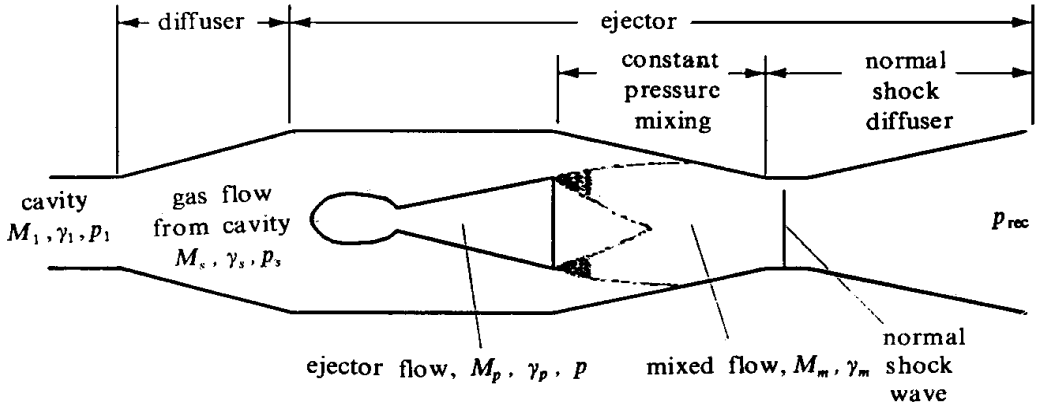


Fig 1 Schematic of an ejector pressure recovery system

图 1 引射器式压力恢复系统示意图

假定流动中的气体的比热比不随温度变化,流动中不发生凝结,引射气体的流速大于被引射气体的流速,引射气体与被引射气体为等压混合,并且引射气流在喷管出口处的压力与被引射气流的压力相匹配,混合为均匀混合。此外,还假定混合气流在进入扩压器入口时为均匀的超音速流动,在扩压过程中不考虑气体与壁的热传导及牵引损耗。上述这些假定在分析引射过程中是合适的。

在以上的假设下,被引射气体在引射器入口处的静压约等于其停滞压力,也等于混合区的静压。引射器的压力由下式给出

$$\frac{p_{rec}}{p} = \left[ \frac{(\gamma_m + 1)M_m^2}{2} \right]^{\gamma_m/(\gamma_m - 1)} \left[ \frac{\gamma_m + 1}{2\gamma_m M_m^2 - (\gamma_m - 1)} \right]^{1/(\gamma_m - 1)} \quad (2)$$

式中  $p_{rec}$  是后扩压器的恢复压力,  $p$  是前扩压器出口处的静压即引射气流的静压,  $\gamma$  和  $M$  分别表示比热比和马赫数,下标  $m$  表示混合气体。对于  $\gamma_m$  和  $M_m$  的计算,文献[2]中有详细的数学推导和理论分析,其结果可归结为(3)~(7)式,其中利用了  $M_s \ll M_p$  的假设,而取  $M_s = 0$ 。下标  $p, s$  分别对应引射气体和被引射气体,下标 0 表示停滞状态。

$$\gamma_m = \frac{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} \frac{\mu_p}{W_p} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{\mu_s}{W_s}}{\frac{1}{\gamma_p - 1} \frac{\mu_p}{W_p} + \frac{1}{\gamma_s - 1} \frac{\mu_s}{W_s}} \quad (3)$$

$$M_m^2 = \frac{2}{(\gamma_m - 1)(\phi - 1)} \quad (4)$$

$$\phi = \left( 1 + \frac{W_s}{W_p} \right) \left( 1 + \frac{W_s}{W_p} \frac{h_{0s}}{h_{0p}} \right) \left( 1 + \frac{2}{(\gamma_p - 1)M_p^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{h_{0s}}{h_{0p}} = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \right) \left( \frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p} \right) \left( \frac{MW_p}{MW_s} \right) \left( \frac{T_{0s}}{T_{0p}} \right) \quad (6)$$

$$\mu_s = \frac{W_s}{W_p + W_s}, \quad \mu_p = \frac{W_p}{W_p + W_s} \tag{7}$$

式中,  $W$  为质量流率,  $MW$  为分子量,  $h$  为焓,  $T$  为温度。由此可见, 在一定的引射器工作介质下, 压力恢复系统的引射器扩压比  $p_{rec}/p$  与质量流率比  $W_p/W_s$ , 以及引射气体的马赫数  $M_p$  有关。

本文的目的就是通过计算, 在满足 COIL 的压力恢复系数  $p_{rec}/p$  时, 如何选择和优化引射器的参数。

## 2 结果与讨论

分析式(2)可以看出, 当被引射的介质确定时, 压力恢复系数  $p_{rec}/p$  与引射器的马赫数  $M_p$  及引射的介质有关, 显然提高引射的效果可以从以下几因素考虑:

(1) 提高引射气体的马赫数  $M_p$  即是增大引射气体的动能, 可以提高扩压比, 见图 2。但是, 对于大多数气体, 马赫数增大有一定限制。计算结果表明当  $M_p$  大到一定程度时, 对增大扩压比的效果已不太明显。

(2) 增大  $W_p/W_s$  也可增大扩压比  $p_{rec}/p$ 。在相同的被引射气体质量流率下, 增大  $W_p/W_s$ , 意味着增加引射物质的质量流率。图 2~ 5 的横坐标均为  $W_p/W_s$ , 从图中可见随着质量流率  $W_p$  的增大, 扩压比  $p_{rec}/p$  也增大。

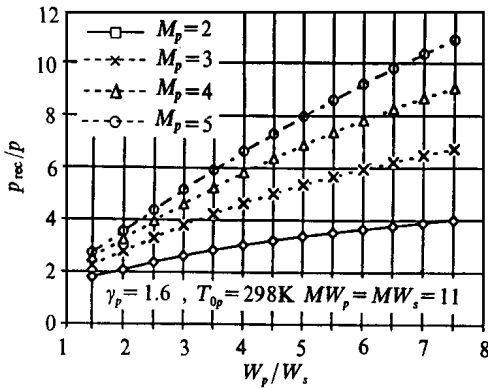


Fig 2 Effect of  $W_p/W_s$  and  $M_p$  on pressure recovery.

图 2  $W_p/W_s$  和  $M_p$  对压力恢复的影响

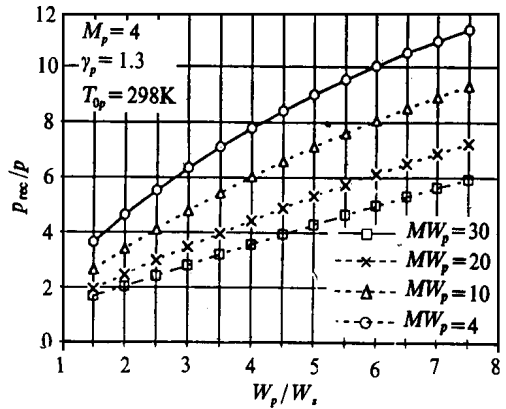


Fig 3 Effect of  $W_p/W_s$  and  $MW_p$  on pressure recovery.

图 3  $W_p/W_s$  和  $MW_p$  对压力恢复的影响

(3) 提高引射气体温度  $T_{op}$ , 扩压比  $p_{rec}/p$  也有少许的增加。而改变引射气体种类有明显的效果, 从图 4、图 5 中可见在同一  $W_p/W_s$  值, 采用较高温度、较小比热比的引射气体, 有利于提高  $p_{rec}/p$ 。

## 3 结论

由计算结果可知, 当引射介质与被引射介质的质量流率比相同时, 采用分子量较小、比热比小的气体为引射介质有利, 提高引射气体的温度及引射气流的马赫数, 也可增大扩压比  $p_{rec}/p$ 。提高引射气体的质量流率意味着增加工作介质的用量, 这将加大引射器的规模, 是不可取的。

如果 CO<sub>2</sub> 的质量流率按 50g/s 计算, 采用 643K 的水蒸汽引射, 引射流率为 200g/s 时扩压比为 7.3, 采用一级引射压力可恢复到 24.4kPa; 采用空气引射, 要达到同样的扩压比, 引射流率为 375g/s。若要求压力恢复到 101.3kPa, 可采用二级引射。

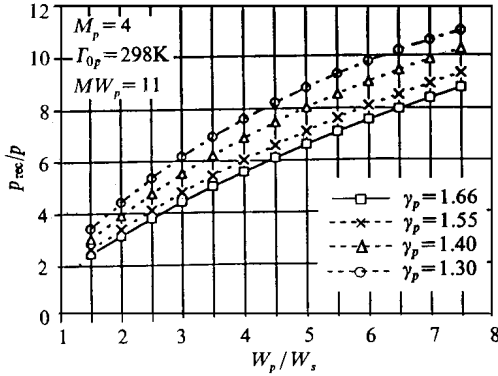


Fig 4 Effect of  $W_p/W_s$  and  $\gamma_p$  on pressure recovery.

图4  $W_p/W_s$  和  $\gamma_p$  对压力恢复的影响

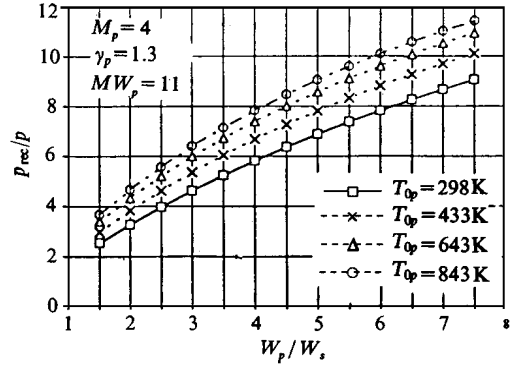


Fig 5 Effect of  $W_p/W_s$  and  $T_{0p}$  on pressure recovery.

图5  $W_p/W_s$  和  $T_{0p}$  对压力恢复的影响

## 参考文献

- 1 Robert F Walter & Robert A O'Leary. *SPIE, Infrared Lasers and Applications*, 1992, **1980**: 206~ 212
- 2 George Emanuel *AIAA*, 1976, **14**(9): 1292~ 1296
- 3 Dutton J C, Millesen C D and Addy A L. *AIAA*, 1982, **20**(10): 1392~ 1400

## THE INVESTIGATION OF AN EJECTOR USED IN A PRESSURE RECOVERY SYSTEM FOR CO<sub>2</sub>

Wang Chengdong, Zhuang Qi

Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023

A pressure recovery system is an important part for CO<sub>2</sub>. An ejector used in a pressure recovery system makes CO<sub>2</sub> practical.

Although the pressure of cavity is only 5~ 10 torr, by action of a diffuser the pressure can be recovered to as much as 25~ 50 torr, the purpose of an ejector in this paper is to recover the pressure of CO<sub>2</sub> from 25~ 50 torr to the pressure of environment, the results of the calculation and estimation of the ejector used in the pressure recovery system for CO<sub>2</sub> is discussed.

The results show that pressure ratio and mass flow ratio of the ejector in pressure recovery system is concerning with Mach number of the eject gas. For meeting the need of large pressure ratio  $p_{rec}/p$  in CO<sub>2</sub>, the eject gas having small molecular weight and specific heat ratio have to be used. Increasing the temperature and Mach number of the eject gas can also increase the pressure ratio.