

(对自由场而言相当于一维应变问题)运用上述公式时,还应考虑侧限条件,用完全侧限的传声器及介质的等效弹性模量将公式修改后才能进行计算。

(2) 静态与动态的试验结果的比较表明,在准静态的情况下,匹配误差的计算可以不考虑动态带来的影响。

(3) 从图 6 和图 7 中可以看到,实验得到的和用 Abbott 理论计算得到的  $\alpha-E_g/E_c$  曲线

有相同的趋势,但实验曲线高于理论计算的曲线。在实验范围内,两者的匹配系数的最大相差为 20%。

#### 参 考 文 献

- [1] Abbott, P. A., Arching for Vertically buried prismatic structures, *Proc. ASCE, J. Soil Mech. and Found., Div.*, Sept., **93**, SM5 (1967).  
 [2] 张世英、刘智敏著,测量实践的数据处理,科学出版社出版,1977 年 11 月。

## 应用在 HF 化学激光器上的超音速引射器

陈海韬 周学华

(中国科学院力学研究所)

高能化学激光器,除了用庞大的真空系统,泵浦尾气以外,目前正在探索,亚音速-超音速引射器和超音速-超音速引射器泵浦系统(后面简称为超音速引射器)。

本文用一维稳定绝热流动模型,计算不同  $M$ ,  $T$  和  $P$  下,以  $H_2$ 、 $He$ 、 $H_2O$ 、 $N_2$  等气体为引射介质的超音速引射器的运转性能。计算表明,用超音速引射器直接泵浦  $M = 4$  的激光尾气,或把它减速至亚音速再泵浦,都不能取得较好结果。然而,把激光尾气的速度从  $M = 4$  减至  $M = 2$ ,再用超音速引射器泵浦就能取得满意的效果。另外提出了超音速引射器设计的具体方案。

### 一、计算公式

考虑一个直筒式超音速气体引射器(见图 4)。根据一维流动质量守恒原理,有

$$G_1 + G_2 = G_3 \quad (1)$$

考虑绝热过程,能量守恒方程为

$$G_1 C_{P1} T_{01} + G_2 C_{P2} T_{02} = G_3 C_{P3} T_{03} \quad (2)$$

忽略摩擦损失,动量守恒方程为

$$\begin{aligned} p_1 A_1 (1 + \gamma_1 M_1^2) + p_2 A_2 (1 + \gamma_2 M_2^2) \\ = p_3 A_3 (1 + \gamma_3 M_3^2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $G$  为流量,  $C_p$  为等压比热,  $T_0$  为总温,  $p$

为静压,  $\gamma$  为比热比,  $M$  为马赫数,下标 1、2、3 分别表示引射气体,被引射气体和混合气体,由上面三式可以推出<sup>[1]</sup>

$$M_3 = \sqrt{\frac{(2 - \beta^2) \pm \beta \sqrt{\beta^2 - 2(1 + 1/\gamma_3)}}{(\gamma_3 - 1)\beta^2 - 2\gamma_3}} \quad (4)$$

$\beta =$

$$\frac{\left[ (1 + \gamma_1 M_1^2) + \frac{p_2}{p_1} \frac{A_2}{A_1} (1 + \gamma_2 M_2^2) \right] \sqrt{\mu_3/\mu_1}}{(1 + n) M_1 \sqrt{\gamma_1 \left( 1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} M_1^2 \right) \frac{T_{03}}{T_{01}}}} \quad (5)$$

式中  $\mu$  为分子量,  $n = G_2/G_1$ , 称为引射系数。

由式(4)知,混合流的流速有两个解,超音速解和亚音速解。

混合段出口总压为

$$p_{03} = p_3 \left( 1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} M_3^2 \right)^{\gamma_3/(\gamma_3 - 1)} \quad (6)$$

扩压器出口总压为

$$p_{04} = \sigma p_{03} \quad (7)$$

式中,  $\sigma$  为扩压器总压恢复系数。根据  $M_3$  的大小,选取适当的  $\sigma$  值<sup>[2]</sup>。为了使混合气体顺利排入大气,要求  $p_{04} > 1$  大气压。

### 二、被引射气体和引射气体

本文于 1980 年 8 月 20 日收到。

被引射气体是从光腔流出的尾气，其物理性质为，光腔压力为5毛，气流温度为 300°K，气流速度  $M_2 = 4$ ，气体成份为 HF 为 10%， $H_2$  为 30%，He 为 60%。

采用的引射气体有  $H_2$ 、He、 $H_2O$  和  $N_2$  等。浓过氧化氢分解，再加氢燃烧可得高温水蒸汽。最终温度达 2800°K。计算时，引射气体总温从 300°K 到 3400°K 之间变化，总压为 10, 20 和 30 atm 三种。

### 三、计算结果

引射气体，在不同温度和压力下，引射光腔尾气时，混合气流的总压  $P_{03}$  与引射系数  $n$  的关系示于所附各图中。

首先介绍，激光尾气速度减至  $M_2 = 2$  的计算结果。

**氢气引射** 图 1 为氢的总压曲线。图的下半部是亚音速解。虽然总压比较低，但合理选择  $T$  和  $P$ ，仍然可以取得较好的引射效果。图上部为超音速解。曲线全部位于  $P_{03} > 1$  的区域内。考虑到  $\sigma = 0.5-0.6$ ，若采用常温氢气引射，则  $n = 1$ ，若用  $T = 500^\circ K$  的氢气引射，则  $n = 2$ 。这时氢的用量减少一半。可见，氢的引射效果很好，但安全性较差。

**水引射** 图 3 为水的超音速解曲线。由图可见， $T > 1000^\circ K$  时，曲线落在  $P_{03} > 1$  的区域内。然而，考虑到总压恢复系数，只有当  $T \geq 1700^\circ K$ ， $P \geq 20 atm$  时，水的引射才能取得较

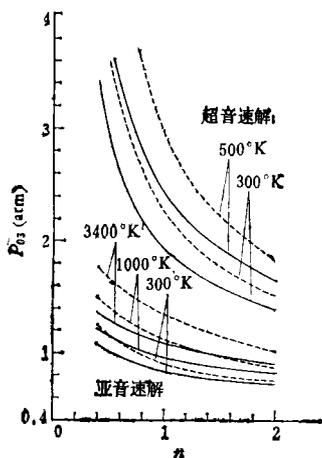


图 1  $H_2$  的曲线虚线图上部表示 30atm，在图下部表示 20atm，实线表示 10atm

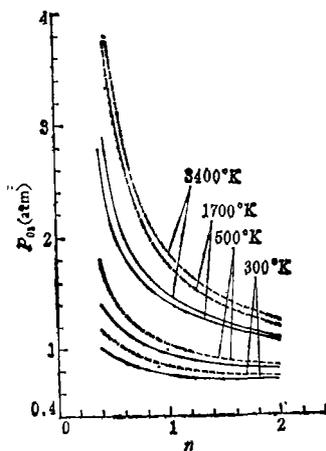


图 2  $H_2O$  的超音速解曲线  
虚线表示 20atm 实线表示 10atm

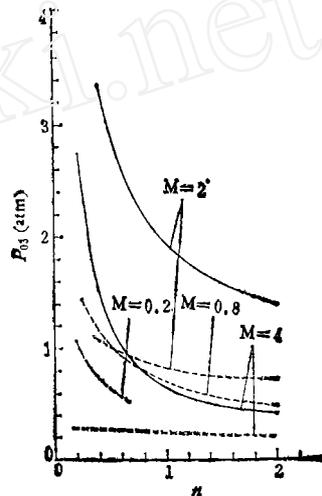


图 3  $T = 300^\circ K$ ， $P_0 = 10 atm$  时不同  $M$  值的氢的曲线，虚线表示亚音速解，实线表示超音速解

好效果。加氢燃烧得到的高温水蒸汽，可以满足上述要求。用水引射，附属设备规模较小，且较安全。亚音速解曲线大部分位于  $P < 1$  的区域内。

**氮和氮引射** 氮的总压曲线位于氢和水曲线之间，符合引射气体分子量越小，总压曲线越高的关系。由于氮较昂贵，因此，一般来说实用意义不大。氮的总压曲线大大低于  $H_2O$  的总压曲线。利用氮作为引射气体，只有在极高温和较高压力下才有可能。

对于被引射气体流速为  $M_2 = 4$ 、 $M_2 = 0.8$

及  $M_2 = 0.2$  的计算曲线, 极为相似. 仅以总压为 10 大气压的氢的引射作为例子, 示于图 3 上. 由图可见, 这些曲线均比  $M_2 = 2$  的曲线低. 这就说明, 直接引射  $M_2 = 4$  的激光尾气, 以及将激光尾气减速至亚音速再引射, 需要多几倍的引射气体, 得不到较好的引射效果.

由上述可知, 即使考虑较小的总压恢复系数, 超音速解的总压仍比亚音速的总压高. 只要能够在混合段内维持超音速流, 就可以用少量的引射气体取得相同的引射效果. 因此带有超音速扩压器的超音速引射器是值得研究的. 它可以进一步提高引射器的潜在能力.

#### 四、超音速引射器设计方案

下面按照  $P = 10 \text{ atm}$ ,  $M_2 = 2$ ,  $n = 1$ , 以氢为引射介质的计算结果, 设计一个超音速引射器泵浦系统. 被引射气体流量为每秒 1 公斤. 各流动截面的参数列于表 1.

图 4 为超音速引射器泵浦系统的剖视图, 分混合段和扩压段两部分. 气流通过矩形截面通道(宽为 43.3cm, 高度如图所示,  $\sigma$  选为 0.9).

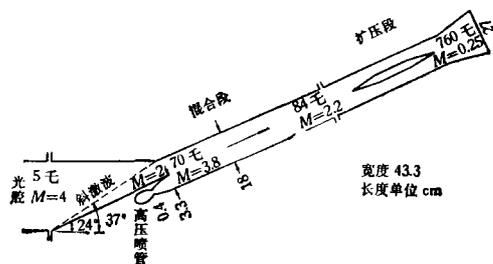


图 4 超音速-超音速引射器

如果所用扩压器的总压恢复系数比较低, 建议用  $\sigma = 0.5$  的计算结果设计. 如果这个方案能够实现, 对于高能化学激光器或其他类型高能

表 1

	高压喷管出口	低压喷管出口	混合室出口	扩压器出口
流量 (kg/sec)	1	1	2	2
总压 (atm)	10	0.7499	1.150	1.0465
静压 (atm)	0.0924	0.0924	0.1117	1.0
总温 ( $^{\circ}\text{K}$ )	300	1648.8	890.5	890.5
静温 ( $^{\circ}\text{K}$ )	78.66	776.3	417.6	877.5
马赫数	3.75	2.0	2.2	0.25
截面积 ( $\text{cm}^2$ )	142.2	635	777.2	1165

激光器的探索研究具有实际意义.

#### 五、结论

1. 以  $n = 1$  为条件, 采用氢引射, 可以将 HF 化学激光器的光腔尾气较容易地泵浦到大气中. 安全性较差. 采用水引射, 水汽压力为  $20 \text{ atm}$ ,  $T \geq 1700^{\circ}\text{K}$  才行. 分解  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 加氢燃烧可以取得这种引射气体. 水引射器的附属设备规模较小, 也较安全.

2. 激光尾气先减速至  $M = 2$  之后, 再引射效果较好. 如果直接引射尾气, 或者先将尾气减速至亚音速再引射, 就需要较大的引射气体.

3. 保持引射器混合段的气流为超音速, 可以获得较高的出口总压. 研究带有超音速扩压器的超音速引射器, 可以提高引射器的潜在能力.

#### 参 考 文 献

- [1] Mikkelsen, C. D., et al., AD-A033615.
- [2] 阿勃拉莫维奇, 实用气体动力学, 高等教育出版社 (1955).

(上接第 67 页)

例 求图 6 所示梁各段弹性曲线方程式.

作出 AB 段单位力弯矩图, 如图 6(b).

以 A 为原点, 由逐次面积矩法公式求出第一段, 其后各段, 按规定附加对应项.

$$Ely = \frac{p}{2} \cdot \frac{1}{6} \left( \frac{l}{2} - x \right) l^2 - p \cdot \frac{1}{6} \left( \frac{l}{2} - x \right)$$

$$\times \left( \frac{l}{2} \right)^2 \Big|_{x \leq l/2} + \frac{p}{2} \cdot \frac{1}{6} \left( x - \frac{l}{2} \right)^3 \Big|_{x \leq l} - p \cdot \frac{1}{6} (x - l)^3 \Big|_{x \leq \frac{2}{3}l}$$

上述方法, 对求阶梯式梁(或轴)变形, 以及直接求解一次或二次静不定问题有时较其它方法显得简捷. 不再举例赘述.