

文章编号: 1001-4322(2003)08-0729-04

# 竖直隔板对 COIL 超扩段流场影响实验研究\*

蔡光明, 刘 军, 宋影松, 王永振

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 通过一系列对比实验比较了隔板对气流转折点和总压损失、光腔静压的影响, 并通过分析阐述了竖直隔板对扩压器内部气流参数产生影响的原因。隔板可以增加超音速区域的长度, 并能增加光腔压力分布的稳定性, 减小总压损失, 增加压力恢复系数; 隔板厚度对光腔静压的影响较大, 需严格控制隔板厚度以避免正激波的产生。

**关键词:** COIL; 扩压器; 隔板

**中图分类号:** TN248.5 **文献标识码:** A

高功率化学氧碘激光器(COIL)在运行时应尽可能地将气流的大部分动能恢复并转变为压力。这种转化是通过扩压器来完成的。从流动的机理来看, 该过程实际上是将高速气流的动能转化为压力能, 降低流速, 增加出口静压, 以降低后面真空泵(或引射器)的工作负担。在不发生壅塞的条件下, 气流流经扩压段出口的流速越低、能量损失越小, 而出口气流静压的提高就越大。扩压器的基本性能由方程(1)来控制。

$$p_1(1 + Ma_1^2) = p_2(1 + Ma_2^2) \quad (1)$$

式中:  $p_1$  为扩压段入口静压;  $p_2$  为扩压段出口静压;  $Ma_1, Ma_2$  为入口、出口马赫数;  $\gamma$  为质量热容比。如果  $p_1 = p_{cav}$  (光腔静压), 当超扩段出口流速接近于 0 时 ( $Ma_2 \rightarrow 0$ ), 通过超扩段所获得的压增最大。即

$$p_{cav}/p_2 = (1 + Ma_1^2)^{-1} \quad (2)$$

对于 COIL 装置,  $\gamma = 1.615, Ma_1 = 2$ , 增压系数 ( $p_2/p_{cav}$ ) 为 7.5。但实际上, 7.5 的增压系数是不可能达到的, 因为在扩压器启动时产生的不是正激波, 而是一系列的波系; 况且, 扩压器的压力恢复过程不是纯粹的等熵过程, 摩擦会使压力恢复效率降低<sup>[1]</sup>。在光腔和喷管不发生改变的情况下, 常使用下面的公式来计算压力恢复系数, 其表达式为  $k = p_2/p_0^*$ , 其中  $p_0^*$  为喷管入口总压。

在尺寸受限的运载体或实验场中, 希望所设计的扩压器尽可能小, 并能保持主要的优化性能。减小扩压器尺寸的一种方法是增加隔板来减小特征尺度  $D$ , 进而减小长度  $L$ , 因为对于一定入口马赫数 ( $Ma$ ),  $L/D$  为一定值<sup>[2]</sup>。在超扩段加装隔板主要是为了减小管路截面的特征尺度  $D$ , ( $D = b^{0.7} h^{0.3}$ , 其中  $b$  为管路的宽度,  $h$  为管路的高度), 从而减小扩压段的物理长度。在研究过程中, 通过改变超扩段出口真空阀的开度来调节背压, 模拟不同状态下隔板对气流的影响, 比较各种状态下的压力恢复效率, 并对有无隔板时超扩段内气流的压力损失、转折位置、光腔静压变化以及隔板厚度进行了分析比较。

## 1 隔板的影响

实验标准条件: 超扩段长度 700mm; 超扩扩散角 8°; 亚扩段长度 430mm; 亚扩扩散角 8°; 光腔唇口为  $R = 50\text{mm}$  的 90° 圆弧。

对比条件: 隔板长度 700mm; 隔板厚度 2mm; 超扩段长度 700mm; 超扩扩散角 8°; 亚扩段长度 430mm; 亚扩扩散角 8°; 光腔唇口为  $R = 50\text{mm}$  的 90° 圆弧。

### 1.1 转折位置

在扩压器中, 气流的静压曲线由降到升的转换点, 也就是气流由超音速转变为亚音速的点, 称之为转折位置。转折位置表明了气流在通道中的超音速区的长度, 转折位置越靠后, 超音速区就越长, 稳定流动保持越久。有无隔板对转折位置的影响如图 1, 图 2 所示。

从上图可以看出, 在阀门开度 (valve opening 简称 VO) 分别为 90°, 40°, 37°, 35° 时, 有隔板时扩压器内气流

\* 收稿日期: 2003-01-28; 修订日期: 2003-04-11

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 中国工程物理研究院基金资助课题

作者简介: 蔡光明(1975-), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事气动光学一体化研究; 绵阳市 919 信箱 1011 分箱。

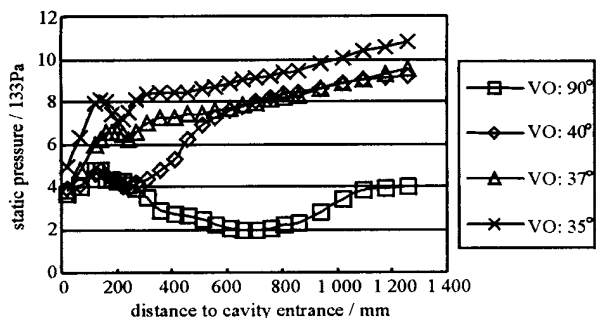


Fig. 1 Distribution of static pressure without vane along the flow

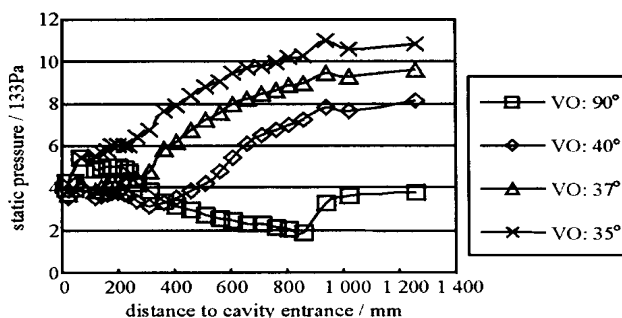
图1 无隔板时气流方向静压分布 ( $t = 5\text{s}$ )

Fig. 2 Distribution of static pressure with vane along the flow

图2 有隔板时气流方向静压分布 ( $t = 5\text{s}$ )

的转捩点分别比无隔板时转捩点位置后移 340, 70, 30 和 30mm。因此,有隔板时扩压器内气流的转捩点会后移,超音速区域变长。

### 1.2 喷管前总压与出口总压差

在矩形截面管道中,粘性对流动的影响是十分显著的,主要体现在附面层加厚和壁面摩擦上。在一般情况下,边长较窄的壁面上的附面层要比边长较宽的壁面上的附面层厚,因此,对于矩形管道而言,粘性影响将使流动的三维效应加强。在管道截面扭转比较大的情况下,粘性的存在会导致流动的附面层扭转并最终导致分离,使流动能量损失。

粘性对超扩段流动的另一影响体现在壁面摩擦造成的压力损失上。摩擦损失大小与管道壁面状况及流动雷诺数  $Re$  有关,气流在管道中的总压损失主要是由于摩擦损失造成的,在超音速流动中也有一部分被激波损失掉,但在 COIL 装置上,气流马赫数仅为 1~2,其所占的比例较小。故在该部分,较多考虑的为摩擦损失。摩擦损失可以用式(3)进行估算

$$E = \frac{v^2}{2} \frac{1}{8\sin} \left(1 - \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

式里:  $\theta$  为扩压段扩张角;  $\beta = A_2/A_1$ , 即出口截面积与入口截面积之比;  $f$  为摩擦因数,其计算公式为

$$f = \begin{cases} 0.3146 Re^{-1/4} & Re < 10^5 \\ 2 \lg(Re \sqrt{f} - 0.8)^{-2} & Re > 10^5 \end{cases} \quad (4)$$

表1 不同阀门开度状态下有无隔板的总压差值对比表

Table 1 Stagnation pressure difference with / without vane for various valve openings

valve opening	90°	40°	37°	35°
stagnation pressure difference without vane / 133 Pa	36.5	33.4	32.2	30.6
stagnation pressure difference with vane / 133 Pa	30.7	32.6	29.3	28.9

真空阀开度不断减小时,超扩段出口的背压逐渐升高,背压的升高导致超扩段内的超音速区不断前移,超扩段内的气流速度逐渐降低,使得  $E$  的值逐渐减少,总压差也随之逐渐降低。在同样的条件下,由于  $Re = vD/\mu$ , 其中  $\rho$  为气流密度,  $v$  为气流速度,  $D$  为特征尺度,  $\mu$  为粘性系数,在增加了竖直隔板以后,  $D$  将变小,同时由于增加了隔板,气流通道的面积将减小,在超音速下减小流道会使气流速度降低,在二者的影响下,  $Re$  降低,进而导致  $f$  的减小,使摩擦损失降低,因此,在有隔板时,总压损失比无隔板时低。

### 1.3 光腔静压

光腔静压分布与激光输出息息相关。当光腔静压在  $(4 \sim 6) \times 133\text{Pa}$  范围内,其变化梯度越小,即光腔中压力越稳定,增益区内的密度分布梯度变化越小,光束质量就越好<sup>[4]</sup>。

如图3,图4所示,不管是有隔板还是无隔板,在光腔内静压曲线均有一个先升高后降低的过程。这是由于在光腔内(0~170mm),由于光腔与光腔盒之间有一段空穴,主气流在通过光腔时不可避免地会在空穴处产生旋涡。而光腔盒中存在气帘,气帘的作用是为了避免主气流中的介质在出光期间对腔镜造成损伤。气帘的气流在充满光腔盒后会沿光轴方向直接注入主气流,因此,使得旋涡向沿光轴方向外推,相当于在光腔中形成一个二次喉道,使得从喷管出来的主气流先收缩再扩张,因而在光腔内气流静压先升高后下降,并在光腔中所形成的二次喉道处静压产生一峰值。

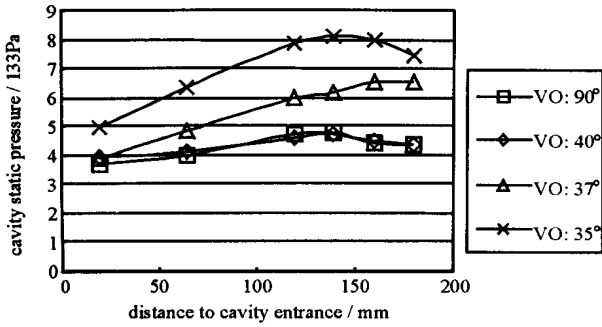


Fig. 3 Distribution of static pressure without vane in the cavity  
图 3 无隔板时光腔静压分布 ( $t = 5s$ )

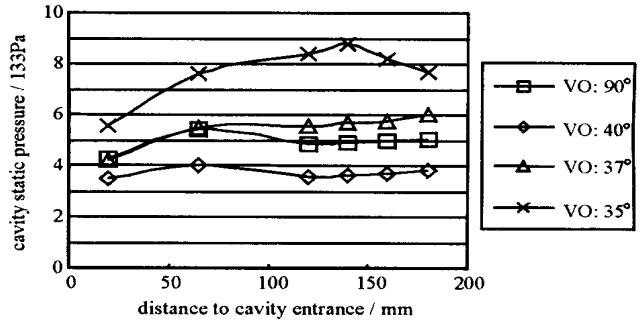


Fig. 4 Distribution of static pressure with vane in the cavity  
图 4 有隔板时光腔静压分布 ( $t = 5s$ )

从图 3,图 4 的对比可知有隔板时腔压的变化比无隔板时小。原因有以下两点:(1) 加隔板后超扩段的长宽比降低,流道缩小,在较大流量时(阀门开度为  $90^\circ$ ),背压降低,超音速区变长,如图 1 所示,在喷管后 800mm 仍是超音速。当入口流道缩小时,入口气流速度降低,有隔板时的静压相对较高。这也会带来一个负面的影响,就是超扩段启动压力升高,但总的趋势使得光腔后端的静压变化缓和,即静压梯度减小。(2) 在超扩段后端气流的抽吸能力受到限制以后(即阀门开度变小),背压升高,超音速区前移,在超扩段入口之前已是高亚音速,当隔板存在时,流道缩小,反而使气流加速,与同开度比较,静压降低。总而言之,增加隔板相当于减小流道面积。在光腔、超扩段均具有一定张角的情况下,增加隔板相当于减缓管道扩张过程,进而使静压的变化梯度降低,但同时也增大了扩压器的启动压力。

## 2 隔板厚度的影响

在其它参数不变的情况下,将隔板厚度由 2mm 增加到 5mm。经过实验,得到数据如表 2 所示。结果显示,5mm 隔板相对于 2mm 隔板转捩点的位置稍微后移,光腔静压比 2mm 的腔压略高,其余参数并无明显的变化。但从图 5,图 6 的光腔静压变化,明显可以看出 2mm 隔板在光腔低背压时( $90^\circ, 40^\circ$  和  $37^\circ$ ),光腔二次喉道的位置靠前,沿距离方向的静压梯度也较高,约为  $0.024 \times 133Pa/mm$ ;而对于 5mm 隔板,二次喉道的位置靠后,沿距离方向的静压梯度相对也较低,约为  $0.01 \times 133Pa/mm$ 。高背压时( $35^\circ, 33^\circ$ ),二者的二次喉道的位置均后移,但 5mm 的静压变化较缓。由公式(3)可以算出:在背压较高( $33^\circ$ )时,此时超扩段入口的  $Ma$  分别为 1.24(2mm),1.19(5mm);在高背压时,光腔到超扩段入口这段仍为超音速,增加隔板厚度,也相对减小了超扩段入口的通道面积,导致气流速度的降低,光腔静压因此也会随之增加,也就不难解释 5mm 隔板时的腔压比 2mm 时的腔压高这一现象。

表 2 不同厚度隔板实验结果对比表

Table 2 Experiment results of vanes with different thickness

valve opening	vane thickness	$90^\circ$	$40^\circ$	$37^\circ$	$35^\circ$	$33^\circ$
inflection location / mm	2mm	850	310	270	230	220
	5mm	900	360	270	240	220
stagnation pressure difference between inlet and outlet/ 133Pa	2mm	8.5	11.2	10.2	8.7	6.9
	5mm	11.3	6.4	9.3	9	6.4
pressure recover coefficient	2mm	0.046	0.18	0.23	0.25	0.29
	5mm	0.049	0.18	0.22	0.25	0.29
static pressure on cavity axis/ 133Pa	2mm	5	5.1	4.3	6	7.6
	5mm	5.6	5.4	5.5	5.65	8.1

俄罗斯人 A. S. Boreysho 曾经用三维有粘流的 Navier-Stokes 方程计算过 COIL 中隔板厚度对压力恢复的影响,由于附面层和激波区的影响,隔板截面积与通道面积比( $S/S^*$ )的最大值为 12%,在  $S/S^*$  为 12% 时,在超扩段入口形成一系列的 X 形斜激波系,气流经过激波系逐渐减速、增压过渡到亚音速状态;在  $S/S^*$  为 20% 时,在超扩段入口形成一道脱体正激波,而正激波的波阻比斜激波的波阻大许多,气流在通过正激波时,总压损失较大,直接导致气流的动能急速下降,气流在此形成壅塞,扩压器不能启动。具体的计算结果如图 7 所示<sup>[5]</sup>。

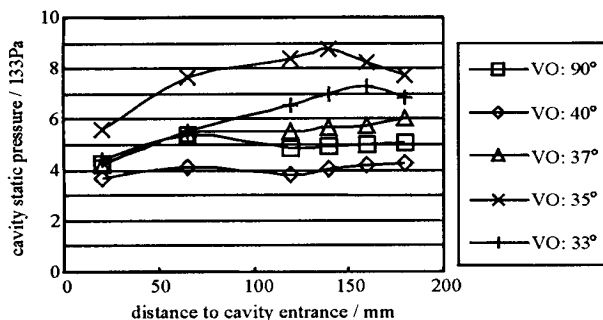


Fig. 5 Distribution of static pressure with 2mm vane thickness along the flow

图5 隔板为2mm时光腔气流方向静压分布曲线

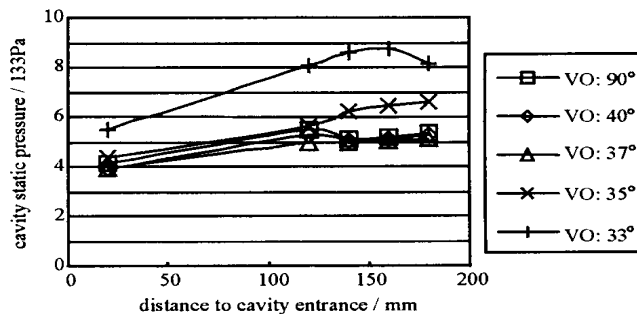


Fig. 6 Distribution of static pressure with 5mm vane thickness along the flow

图6 隔板为5mm时光腔气流方向静压分布曲线

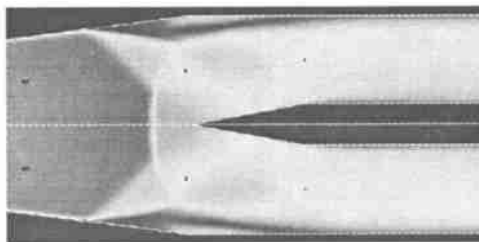
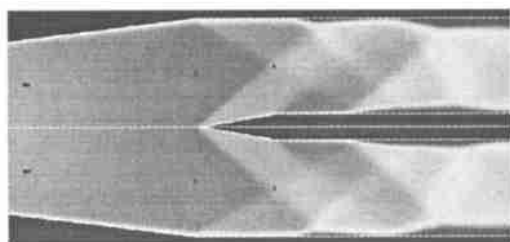


Fig. 7 Results of three-dimensional calculations of the viscous flow in supersonic diffuser channel with vane (Mach number distribution of constriction degree 12% and 20% respectively)

图7 带隔板的超音速扩压器通道中有粘流的三维计算结果(压缩比分别为10%和20%的马赫数分布云图)

### 3 结论

在扩压器中,通过有无隔板的实验对比分析,可以得出以下结论:(1)在扩压器内部增加一定厚度的隔板可以使气流的转捩点后移,超音速区的长度增加,流动的稳定性增加。(2)有隔板时的总压损失相对于无隔板有所降低。(3)有隔板时的光腔压力变化较无隔板的光腔压力变化小,静压随时间、空间的梯度变化也相对较小,但有隔板时的腔压总的趋势较无隔板要高。(4)隔板的厚度对光腔静压影响较大。在考虑厚度时,必须避免正激波的提前出现,以免造成扩压器通道的壅塞,扩压器不能正常启动。

### 参考文献:

- [1] Robert F W, Robert A. Pressure recovery in supersonic gas lasers[A]. SPIE[C]. 1992, 1810:328—333.
- [2] Robert A. Vaned diffuser and supersonic ejector screening investigation[R]. UTRC, June 1980.
- [3] 陈再新,刘福长,鲍国华.空气动力学[M].北京:航空工业出版社,1993.(Chen Z X, Liu F C, Bao G H. Aerodynamics. Beijing: Publishing House of Aviation Industry, 1993)
- [4] 庄琦,桑凤亭,周大正.短波长化学激光[M].北京:国防工业出版社,1997.(Zhuang Q, Sang F T, Zhou D Z. Short-wave chemical laser. Beijing: National Defense Industry Press, 1997)
- [5] Boreysho A S, Khailov V M, Malkov V M. Pressure recovery systems for high power gas flow chemical lasers[A]. SPIE[C]. 2001, 4184:401—405.

## Experimental research of the influence of the vertical vane on the flowfield of COIL diffuser

CAI Guang-ming, LIU Jun, SONG Ying-song, WANG Yong-zhen

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1011, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A series of contrast experiments were done to obtain the influence of vertical vane on flow inflexion, the loss of stagnation pressure and cavity static pressure. The cause of influence of the vane on diffuser flowfield is expounded by analysis. The vane can increase the length of supersonic region, the stability of cavity pressure, and reduce the loss of stagnation pressure thus to increase the pressure recover coefficient. The vane thickness has great influence on cavity static pressure, so the thickness must be controlled to avoid coming into being the normal shock.

**Key words:** COIL; Diffuser; Vane