

气动窗口的实验研究

中国科学院上海光机所 105 组

提要: 本文介绍了三种气动窗口——膨胀式、激波式和旋流式——的设计与实验。这些窗的口径为 3 厘米, 运转腔压为 0.1 个大气压。光束通过窗口时, 最小束散为窗孔衍射极限的 1.5 倍。运转所需的最小耗气量为 0.012 千克/秒·厘米²。

Experimental investigation of aerodynamic windows

Group 105, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica

Abstract: This paper describes the design and experiments of three types of aerodynamic windows—expansion window, compression window and vortex window. Three windows have an aperture of 3 cm and were designed to operate at a cavity pressure of 0.1 atm. While the beam passes through the window, the minimum beam degradation is 1.5 times as large as the diffraction limit of the aperture. The minimum mass flow required for the operation of the window is 0.012 kg/sec·cm².

引 言

在高能气体激光器中, 使用一般固体窗口输出高能量密度的激光束时, 由于窗口材料出现严重的热效应, 导致输出光束严重畸变, 甚至造成窗口破碎。因此, 目前已经用气动窗口来作为高能激光器的输出窗口, 并在实用器件上得到应用^[1]。

本文叙述了几种气动窗口的设计和试验。这些窗口的型式是膨胀式气动窗口、激波式气动窗口、旋流式气动窗口。这些窗口的面积约 3×3 厘米²。都达到额定腔压 0.1 大气压。并能在偏离额定腔压的一定范围内正常运转。以光束通过窗口后所造成的光束发散程度来评价窗口的光学质量。光束通过膨胀式窗口和旋流式窗口后发散角为窗孔衍射极限的 1.47~1.70 倍, 而光束通过激波式窗口后

发散角约为窗孔衍射极限的 2.06~2.13 倍。使用这些窗口时的耗气量以旋流式窗口为最小, 约 0.012~0.023 千克/秒·厘米², 而膨胀式和激波式约 0.051~0.069 千克/秒·厘米²。这些窗口可应用于连续运转大功率气动激光器或电激励气动激光器的输出窗口。

原理及设计

我们研制的窗口是针对连续万瓦级气动激光器设计的, 其典型腔压 0.1 大气压。要求气动窗口应具有功能: 既能密封光腔又不影响输出光束的质量。

(1) 膨胀式气动窗口: 它是利用超音速气流绕外折角流动产生的膨胀波来封闭窗口。喷管出口静压和大气压匹配, 膨胀波后静压和光腔匹配^[2], 见图 1。窗口尺寸 30×34

收稿日期: 1979 年 10 月 18 日。

毫米²，设计腔压 $P_c=0.1$ 大气压，喷管出口马赫数 $M_1=1.8$ ， $P_1=1$ 大气压。喷管超音速过渡段采用 Atkin 方法设计，初始膨胀段由直线与喉部圆弧组成，亚音速段为简单的圆弧。喷管型线作附面层修正。设计膨胀压比 $P_1/P_2=10$ ， $M_2=3.3$ ，对应气流折转角为 34.5° ，考虑到低压一侧湍流剪切层的影响，取几何膨胀角 $\phi=35^\circ$ ，排气道高压一侧曲线段采用消波法设计，超音速扩压器喉部截面 $F^*=1900$ 毫米²。

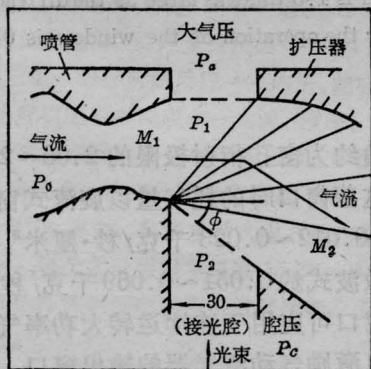
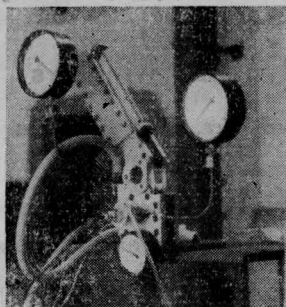


图1 膨胀式窗口照片及工作原理

实验观察到的激波(见图4纹影照片)系由剪切层和附面层产生的激波，这种激波不能起密封窗孔的作用，因此这种气动窗口仍属膨胀式气动窗口。与下面叙述的依靠激波来密封窗孔的激波式窗口是不同的。

(2) 激波式气动窗口：它是利用喷管出口超音速气流在大气侧形成一道激波，调整达到大气压^[2]，如图2所示。窗口尺寸 30×22 毫米²，设计腔压 $P_c=0.1$ 大气压，喷管出口马赫数 $M_1=3.65$ ，激波斜角 $\beta=54^\circ$ ，气流折转角 $\theta=34^\circ 9'$ ，波后马赫数 $M_2=1.408$ 。喷

管超音速过渡段采用 Atkin 方法设计，喉道采用三次曲线，亚音速过渡段采用维托辛斯基曲线。喷管型线也作附面层修正。喷管喉高 $h^*=3.3$ 毫米，喷管出口高度 $h=25.8$ 毫米，气流通过截面为 $F^*=960$ 毫米² 排气道排出。

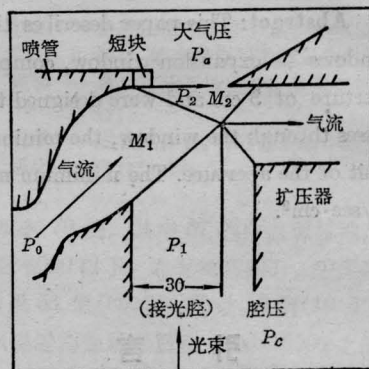
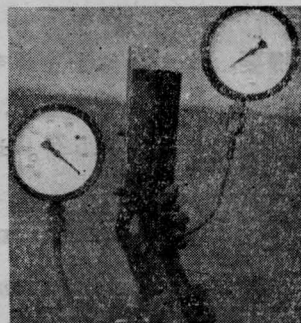
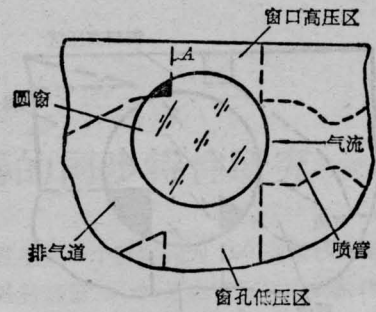
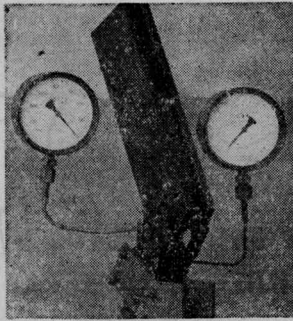


图2 激波式窗口照片及工作原理

(3) 旋流式气动窗口：这是利用超音速喷管产生一束旋转气流的离心力来达到平衡激光腔内外的气压差，并且选择适当喷管出口马赫数，使气流外侧压力与大气压匹配，气流内侧压力与腔压匹配^[3]，如图3所示。窗口尺寸 30×30 毫米²，设计腔压 $P_c=0.1$ 大气压，气流旋转角 $\Delta\theta=60^\circ$ ，喷管外壁出口马赫数 $M_2=2.01$ ， $M_2^*=1.63751$ 。喷管内壁出口马赫数 $M_1=3.53$ ， $M_1^*=2.06927$ ，理想气流束的内侧半径 $R_1 = \frac{D}{2} / \sin \frac{\Delta\theta}{2} = 30$ 毫米，理想气流束的外侧半径 $R_2 = \frac{M_1^* \cdot R_1}{M_2^*} = 37.8$ 毫米。为了得到旋转气流束必须使喷管出口平面上的速度变化反比于射流曲线半径^[3]。它



(a) 纹影图位置

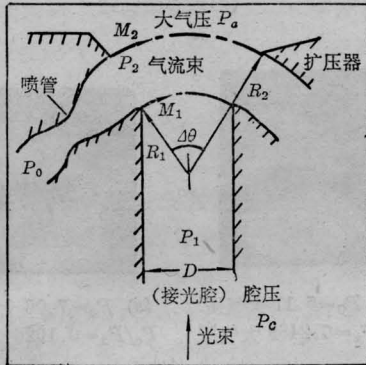
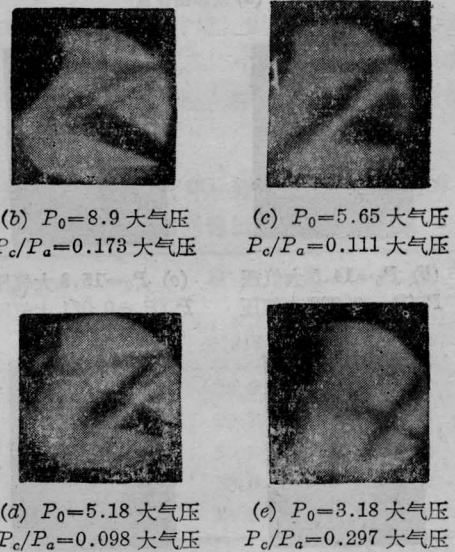


图3 旋流式窗口照片及工作原理

是利用一个马赫数 $M=1.55$ 的普通收敛发散超音速喷管(其设计方法同激波式窗口)的平直流以 19.022° 的角度流入一个旋流喷管。旋流喷管用特征线法设计,使气流在该喷管的内外壁上经历不同的膨胀,使喷管出口参数达到 $M^* \cdot R_i = k$ (常数) 的速度分布。因为流动的旋转是特征线或在喷管出口平面上马赫数保持的,故可以避免强的激波。喷管出口高度 $h=7.8$ 毫米,喉高 $h^*=3.44$ 毫米,附面层单边修正量 $\delta^*=0.28$ 毫米。气流束扫过窗口 $\Delta\theta$ 角之后通过面积为 $F^*=1230$ 毫米² 的排气道排出。

流场观察

我们对三种窗口用纹影法观察拍摄了各种滞止压力下流场的流谱。图4为膨胀式窗口几种不同典型的运转条件流谱。可以看到,随滞止压力 P_0 下降,窗孔高压侧的斜激波向上游偏转及大气泄入的情形。图5为激波式



(b) $P_0=8.9$ 大气压
 $P_c/P_a=0.173$ 大气压

(c) $P_0=5.65$ 大气压
 $P_c/P_a=0.111$ 大气压

(d) $P_0=5.18$ 大气压
 $P_c/P_a=0.098$ 大气压

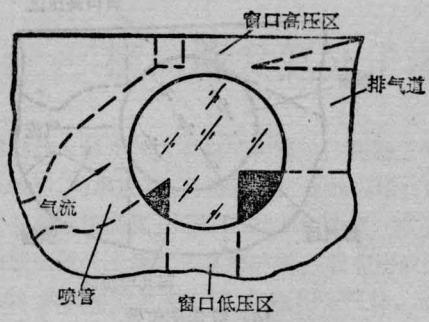
(e) $P_0=3.18$ 大气压
 $P_c/P_a=0.297$ 大气压

图4 膨胀式窗口几种典型运转条件流谱

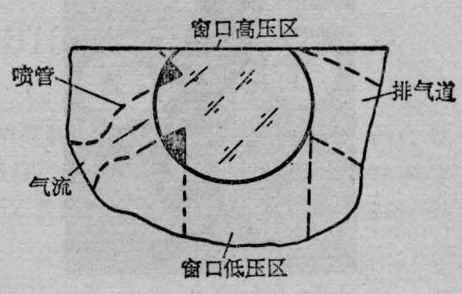
窗口几种不同典型的运转条件流谱,可以明显地看到一道封闭窗口与大气隔开的激波。从照片还发现喷管型线上形成的二道斜激波,伸入窗口流场严重地影响窗口的光学质量。图6为旋流式窗口几种不同典型的运转条件流谱。喷管出口附近的流场区域里可以看到由弱压缩波和弱膨胀波组成的特征线区域。从照片还可以看出当滞止压力增高时,由于靠大气侧的喷管出口压力高于大气压,出现欠膨胀的现象。

光学性能

为了确定窗口的光学性能,我们利用氩-氟激光作模拟光束。实验时,光束通过一组



(a) 纹影图位置



(a) 纹影图位置



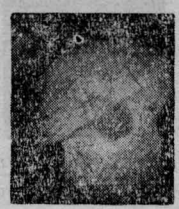
(b) $P_0=14.5$ 大气压
 $P_c/P_a=0.098$ 大气压



(c) $P_0=15.3$ 大气压
 $P_c/P_a=0.071$ 大气压



(d) $P_0=21.4$ 大气压
 $P_c/P_a=0.084$ 大气压

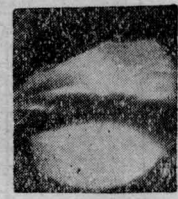


(e) $P_0=25.8$ 大气压
 $P_c/P_a=0.32$ 大气压

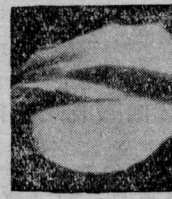
图5 激波式窗口几种典型运转条件流谱



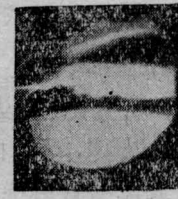
(b) $P_0=5.11$ 大气压
 $P_c/P_a=0.2489$ 大气压



(c) $P_0=7.06$ 大气压
 $P_c/P_a=0.1026$ 大气压



(d) $P_0=9.21$ 大气压
 $P_c/P_a=0.1492$ 大气压

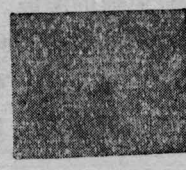


(e) $P_0=13.02$ 大气压
 $P_c/P_a=0.2023$ 大气压

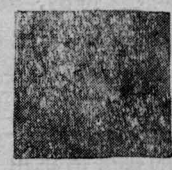
图6 旋流式窗口几种典型运转条件流谱

中性滤光片(目的是为避免底板乳胶黑度饱和而产生非线性误差),经扩束镜扩束后通过窗口,用焦距 $f=5$ 米的透镜在相机底片上聚焦,利用 $9n$ 型测微光度计测定光斑的光强高斯分布,计算得到光能随光斑半径的分布及光束的发散角。为避免方孔衍射对光斑强度测量的影响,采用了圆孔光阑 ϕd 。

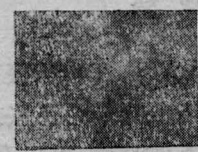
图7为膨胀式窗口、激波式窗口以及旋流式窗口在近设计工作腔压下运转时所拍摄的光斑照片。图8是对应的归一化远场强度随光斑半径 R 的变化。图9是对应的能量分布曲线。以光束集中80%的能量时的半径为光斑半径 R ,求得光束发散角 $\theta_{\text{发散}} = \text{tg}^{-1} \frac{R}{f}$



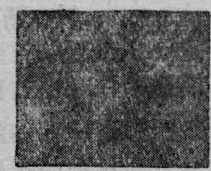
(a) 原始光斑



(b) 膨胀窗口



(c) 激波窗口



(d) 旋流窗口

图7 光束通过窗口后的远场光斑
(运转条件: 腔压 $P_c/P_a \approx 0.1$ 大气压)

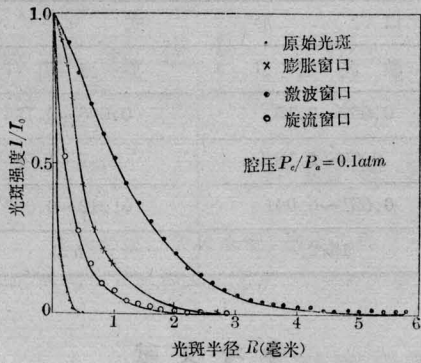


图8 远场强度随光斑半径 R 的分布 ($\lambda=6328 \text{ \AA}$)

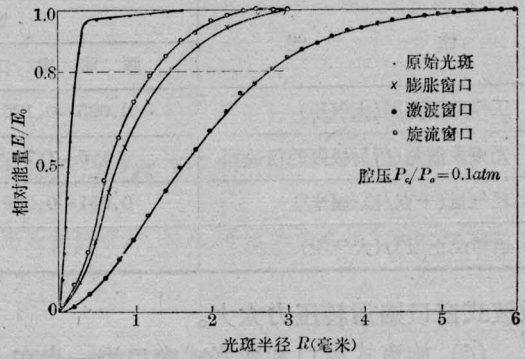


图9 光斑的光能分布 ($\lambda=6328 \text{ \AA}$)

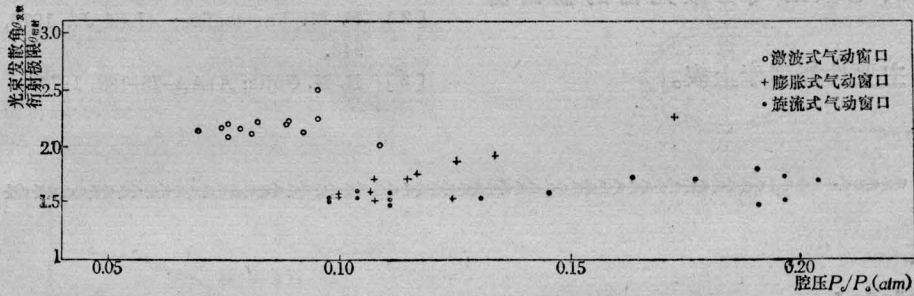


图10 光束通过气动窗口的发散角随工作腔压的关系
(对波长 $\lambda=10.6 \mu$)

与理想平行光束的衍射极限角 $\theta_{\text{衍射}} = 2 \times 1.22 \times \frac{\lambda}{d}$ 相比较。图10表示在不同腔压的工作状态下，三种形式的窗口相对光束发散角 $\theta_{\text{发散}}/\theta_{\text{衍射}}$ 的变化情况。

结果表明，窗口的光学质量与运转条件有关。膨胀窗口对应腔压 $P_0/P_a = 0.095 \sim 0.125$ 大气压时，光束通过窗口后的发散角为衍射极限的 $1.5 \sim 1.7$ 倍。当腔压 $P_0/P_a > 0.134$ 大气压时输出光束出现严重发散，达到衍射极限的 2.3 倍以上，并且随着 P_0 的增加，光束方向性趋于变坏。这是因为随着 P_0 增加，气流外折越厉害，气流绕下游的窗孔壁时，产生的离体激波距壁面更远，泄流更严重，从而导致光束方向性迅速变坏。旋流式窗口，在腔压 $P_0/P_a = 0.098 \sim 0.146$ 大气压范围内，光束通过气动窗口后发散角为衍射极限的 $1.47 \sim 1.59$ 倍。随滞止压力增加发

散角增大。在腔压 $P_0/P_a = 0.069 \sim 0.15$ 大气压范围内，光束通过气动窗口后发散角为衍射极限的 $2.06 \sim 2.13$ 倍。随滞止压力增加，发散角增大。

结 论

(1) 三种窗口都满足在设计工作状态 $P_0/P_a = 0.1$ 大气压下运转，并且可以用调节滞止压力的方法，使窗口在一定范围内偏离设计状态下稳定运转，对光腔腔压具有一定适配能力。

(2) 光学性能以膨胀式窗口和旋流式窗口较好，激波式窗口较差。

(3) 使用这些窗口时的耗气量，以旋流式窗口最小。因此使用时所需的气源设备小，经济性好。同时膨胀式窗口和旋流式窗口运转方便，即用较小的滞止压力便可正常运转。

性能	窗口形式		
	膨胀窗口	激波窗口	旋流窗口
工作腔压范围(大气压)	0.095~0.125	0.069~0.15	0.098~0.146
光束发散角(衍射极限的倍数)	1.5~1.7	2.06~2.13	1.47~1.59
耗气量(千克/秒·厘米 ²)	0.051~0.069	0.051~0.061	0.012~0.023
运转滞止压力(大气压)	4.8	15.2	5.3

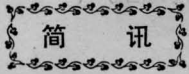
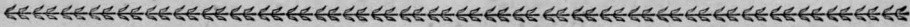
激波式窗口则运转压力太大。

(4) 旋流式窗口和膨胀式窗口进一步在性能上及结构上进行改进后,可以用于气动激光器、电激励气动激光器的输出窗口。

(5) 主要性能列于上表。

参考文献

- [1] Ethan Hoag *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 8, 1959.
- [2] E. M. Farnenfer; *AIAA J.*, 1973, **11**, No. 7 943.
- [3] R. N. Guile; AIAA-75-122, 1975.

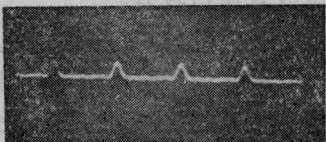


磷酸盐玻璃声光主动锁模振荡器

以石英玻璃为声介质, 铌酸锂为换能器, 调制频率为 51.636 兆赫。工作物质直径为 10 毫米、长 230 毫米的磷酸盐钽玻璃棒。双灯双椭圆腔, 灯光脉宽为 300 微秒。腔长约为 1.5 米, 腔内插入直径 2 毫米的小孔, 可得到单横模输出。输出腔镜有 1° 的劈角, 其反射率 $R=50\%$ 。腔长精确可调。声光调制器紧靠全反射镜端。振荡器输出波长是 1.054 微米。

用 7904 示波器拍得的锁模脉冲序列照片如图所示。用双光子荧光方法测得的脉冲宽度约为 200 微微秒。用 F-P 测得的光谱宽度是 0.2 埃, 脉冲序列的能量为 13 毫焦耳。

研究了腔长和频率变化对锁模状态的影响。测



锁模脉冲序列扫描速度 5 毫微秒/厘米

得允许的腔长失配量达厘米量级, 频率的失配量为 100 千周。测量表明, 腔长失配量和频率失配量相对于“0”点(最佳锁模状态)都是不对称的。

以氦-氖激光为探测光源, 调制器的衍射效率达到 15~20% 时就可实现稳定的锁模。调制器工作时器件振荡阈值比没有调制时高 15% 左右。振荡器应控制在近阈值条件下运转。

在实验中我们发现声光调制器关闭时经常会出现自锁模的脉冲序列, 频率为 51 兆赫左右。发生自锁模的条件是必须在单横模运转, 而且谐振腔的 Q 值达到特定值。

综上所述, 脉冲工作的主动锁模振荡器对实验条件的要求是不苛刻的。虽然锁模质量低于连续或准连续工作的稳态锁模, 但重复性和稳定性都优于被动锁模, 因而具有一定的实用意义。

(中国科学院上海光机所 郑玉霞
徐志明 范滇元)