

自由旋气动窗口设计原理及其工作性能的初步实验研究

刘天华 姜宗福 韦成华 唐荣奇 陈金宝 赵伊君

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

提要 论述了自由旋气动窗口(FADW)的基本工作原理,并对为万瓦级 CO₂ 气动激光器配置的 30 mm × 30 mm 大口径自由旋气动窗口的工作性能进行了实验研究。研究表明,此气动窗口在其工作范围内,密封压比 P_R (环境大气压 P_{AMB} /密封腔压 P_C) > 20, 最大可达到 28; 而且该气动窗口具有良好的启动性能和对光束质量影响小的特点。因此对于大口径、低腔压的大功率气体激光器来说,自由旋气动窗口是替代输出镜最有效的手段之一。

关键词 自由旋气动窗口, 气动激光器, 密封压比

由于晶体窗口材料的部分吸收作用及其阈值功率的限制,当大功率激光器工作时间相对较长或输出功率很高时,固体窗口就会产生热聚焦、热畸变、甚至炸裂或被击穿,从而影响光束质量或使激光器根本无法工作。气动窗口利用气体的选择吸收作用和各种气体动力学原理为激光器的输出提供了一个基本没有吸收的路径,从而避免了上述晶体材料窗口的各种问题的产生。

目前,国内外已经提出了很多种工作机制的气动窗口^[1~8],按输出激光与气动窗口工作气体相遇时的方向可分为纵向式和横向式两种形式,当两者平行时为纵向式,反之为横向式。对于纵向式气动窗口,虽然通过辅以抽真空方式可以达到较高的密封压比,但其对光束质量的影响比较大,且目前也只适用于聚焦输出^[3,8]。而且由于抽真空装置的存在,对激光武器向小型化和便携式方向发展无疑也是不利的。对于诸如斜激波、膨胀波及其联合机制的横向式气动窗口来说,在输出光路上,由于波系的存在使流场的密度变化极度不均,从而造成较大的光束畸变,而且由于波系的存在还限制了通过气动窗口的工作气体的动量改变量,使其质流量比较大,限制了密封压比的进一步提高^[4,5]。为了解决上述各种问题,我们对自由旋横向式气动窗口的工作原理进行了研究,为万瓦级 CO₂ 气动激光器配制了一套 30 mm × 30 mm 大口径自由旋气动窗口,并对其工作性能进行了初步实验研究。

1 自由旋横向式气动窗口的设计原理

由于连续波大功率激光器的腔压远小于外界大气压强,这样当去掉输出镜后,环境大气就与腔内工作气体之间形成一个压力差。为了平衡压差不让外界大气进入激光腔,人们根据超音

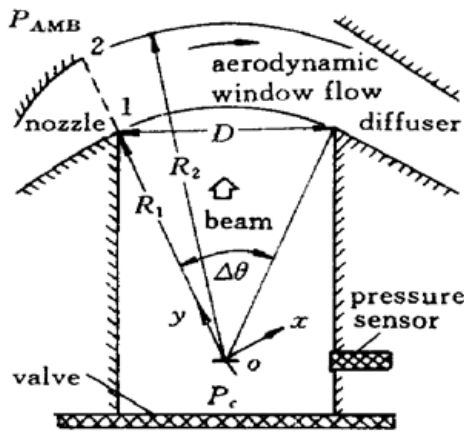


图 1 自由旋气动窗口的基本工作原理

Fig. 1 Principle of the FADW

速流动的特点,提出了膨胀波、斜激波及其联合形式的多种横向式气动窗口^[1,2],即通过设计 Laval 喷管出口的静压 P_{ex} ,使其在激光出射路径上形成膨胀波、斜激波或两者都存在,使波系两侧的压力分别与腔压 P_c 和外界大气压 P_{AMB} 相匹配,从而起到密封作用。但这时由于波系的存在,对光束质量的影响比较大。由此我们研究了图 1 所示的自由旋横向式气动窗口,它的 Laval 喷管出口平面内外两侧点 1, 2 处的静压 P_{ex1} , P_{ex2} 分别与腔压 P_c 和环境大气压 P_{AMB} 相等,同时在出口平面上其射流参数满足自由旋流动的性质,即

$$V_\theta r = \text{Const} \quad (1)$$

其中 V_θ 为流体切向速度, r 为其半径。根据气体动力学原理可知^[9],此时工作在设计状态下的气动窗口就不会有波系产生,而且还能最大限度地增加喷管射流的动量改变量,降低气动窗口工作气体的消耗^[4,5]。表 1 列出了上述几种气动窗口喷管出口的压力匹配关系。

表 1 各种气动窗口的相应压力匹配参数表

Table 1 Corresponding pressure parameter of aerodynamic windows

$P_{ex} = P_{AMB} > P_c$	expansion wave window	$P_{AMB} > P_{ex} > P_c$	combined window
$P_{ex} = P_c < P_{AMB}$	oblique shock wave window	$P_{ex1} = P_c, P_{ex2} = P_{AMB}$	FADW

如图 1 所示,在自由旋气动窗口喷管的设计计算时,首先用 P_c (等于 P_{ex1}), P_{AMB} (等于 P_{ex2}) 代入等熵、绝热、无旋、定常理想流动所满足的关系式

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_a^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

中的静压 P ,其中 P_0 为入口气体总压, γ 为气体比热比, M_a 为流体马赫数,分别计算出给定总压 P_0 , 总温 T_0 情况下的气动窗口喷管出口两侧点 1, 2 处流体的马赫数 M_a 以及其他流动参数;然后根据自由旋流体通过激光输出路径的横跨角度 $\Delta\theta$ 和气动窗口口径 D ,计算出自由旋流动的内侧半径 r_1 ,即

$$r_1 = \frac{D}{2\sin(\Delta\theta/2)} \quad (3)$$

另外由(1) ~ (3) 式可算出外侧半径 r_2

$$r_2 = \frac{V_1 D}{2V_2 \sin(\Delta\theta/2)} \quad (4)$$

和自由旋流体参数在喷管出口平面上的分布,上式中 V_1, V_2 分别是点 1 和 2 处的切向速度,这样就可以进行喷管的设计计算了。在本设计计算中,我们也采用了特征线这一在此类喷管设计计算中比较精确的方法^[4,5]。最后再对理想设计计算进行必要的边界层的理论和实验修正。

而对扩散器的设计,目前主要还是建立在实验的基础上。但通过研究发现,扩散器入口和喷管出口面积之比一般为 4 较好,而且扩散器的结构和位置直接影响到整个气动窗口的启动性能和稳定性能^[4]。

由于单位时间内通过气动窗口输出孔径单位面积上的工作气体流量(即质流率 $m\dot{e}$)也是评价气动窗口优劣的一个重要参数,因此在设计计算时,必须考虑该因素。按定义有

$$m\dot{e} = \frac{\int_1^2 \rho_r V_{\theta} dr}{D} \quad (5)$$

其中 ρ_r 为半径 r 处的流体密度。在计算质流率时,可以用速度系数 $\lambda = V/a_0$ 来代替速度进行计算,其中 a_0 为滞止声速。由于密度函数 $\epsilon(\lambda)$ 可写为

$$\epsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho_0} = \left[1 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \lambda^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (6)$$

其中 ρ_0 为滞止密度,又因下式成立

$$a_0 = \sqrt{\frac{2\gamma RT_0}{\gamma+1}} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \cdot \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (7)$$

因此有

$$m\dot{e} = \frac{-\rho_0 a_0 \lambda_1}{2 \sin(\Delta\theta/2)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon(\lambda)}{\lambda} d\lambda = \frac{\gamma P_0 \lambda_1}{(\gamma+1) \sin(\Delta\theta/2) a_0} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\epsilon(\lambda)}{\lambda} d\lambda \quad (8)$$

在设计时,要根据气动窗口的密封压比、质流率及其体积的大小等因素进行综合比较,选取较为合适的入口总压及自由旋流体的跨度 $\Delta\theta$ 的大小。在我们的设计中,气动窗口的工作总压 $8 \text{ atm} < P_0 < 10 \text{ atm}$, $\Delta\theta = 60^\circ$, $D = 30 \text{ mm}$,工作气体为压缩空气,由为万瓦级 CO_2 激光器提供氧化剂的高压气瓶附带供应。在 $P_0 = 9 \text{ atm}$ 时,气动窗口喷管出口射流为自由旋流体,通过计算此时有 $m\dot{e} = 18.4 \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$ 。在实际工作中,一般不超过 $20 \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$ 。由此可见,该自由旋气动窗口具有较小的质流率。另外流过本气动窗口的工作气体不采用任何抽真空装置,而是直接由扩散器排向大气,因此具有易于操作、体积小、功耗较小等优点。

2 实验结果及分析

2.1 密封性能

如图 1 所示,在气动窗口和光腔连接处安装了一个阀门(Valve),并在阀门远离光腔的一侧安装了一个压力传感器,用于密封压力的测量。密封性能测量结果见图 2。从图中可以看出,

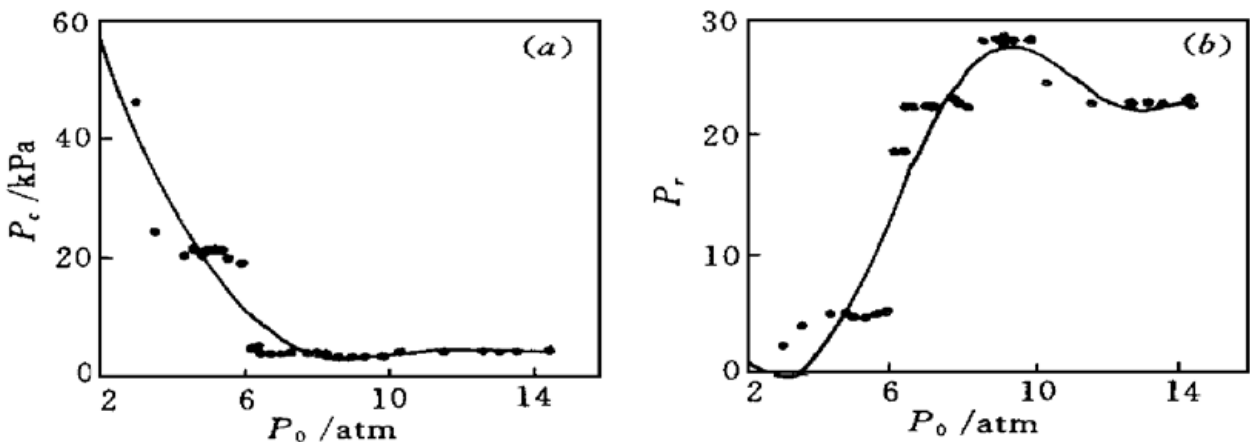


图 2 密封性能曲线

(a) 密封压力关系曲线; (b) 密封压比关系曲线

Fig. 2 Sealing-property curve of the FADW

(a) sealing-pressure curve; (b) sealing-pressure ratio curve

随着总压 P_0 的增加, 密封压力 P_c 逐渐降低, 密封压比 P_r 显著升高。当 $8 \text{ atm} < P_0 < 10 \text{ atm}$ 处于设计状态时, 密封压比为 27.7 ± 0.3 。当工作在理想的设计状态 $P_0 = 9 \text{ atm}$ 时, 可达到最大值 28, 能够很好匹配本激光器的工作, 此时喷管出口形成自由旋流体, 激光出射路径上没有任何波系产生。而在 $P_0 \geq 10 \text{ atm}$ 或 $P_0 \leq 8 \text{ atm}$ 时, 由于在喷管出口有复杂波系的生成, 所以会产生较大的光束畸变, 因此一般只能工作在设计状态。

2.2 对光束质量的影响

在对光束质量的初步实验研究中, 远场光斑图的获取是采用图 3 所示的基本原理进行的。万瓦级 CO_2 气动激光器经由该气动窗口输出的激光束, 通过透镜系统聚集在光热敏半导体材料上, 光越强被照射光敏面颜色越黑, 这样就形成了反映激光强度分布的光斑图。然后成像在 CCD 相机上, 把反映光强分布的数字信号输入到计算机进行数据处理。

图 4 所示为远场光斑原始图, 从图中可以看出, 在使用气动窗口时输出的激光强度分布没有明显变化; 通过对两者光强分布的计算, 发现该气动窗口对输出激光远场发散角的影响也很小, 而且光轴也基本没有漂移。

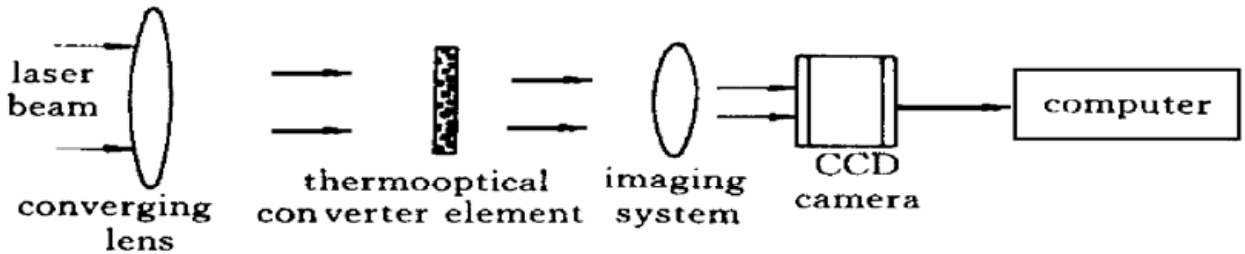


图 3 光束质量实验基本原理图

Fig. 3 Principle schematic of the experiment on light beam quality

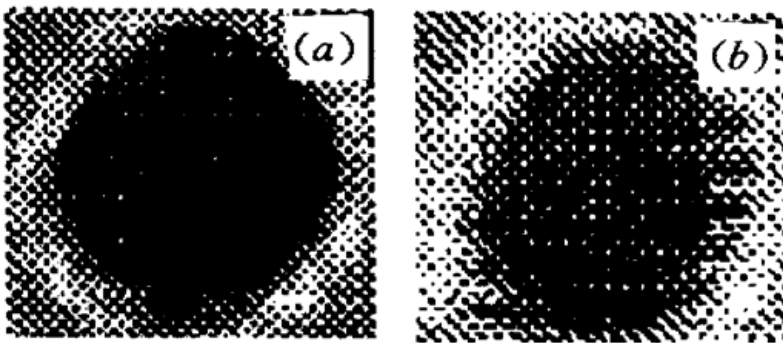


图 4 采用不同输出窗口时的远场光斑图

(a) 采用晶体窗口时的情况; (b) 采用气动窗口时的情况

Fig. 4 The distant field facula using different output windows

(a) facula using a crystal window; (b) facula using FADW

2.3 启动性能

图 5 给出了密封压力实验中 $P_0 = 9 \text{ atm}$ 时测得的气动窗口的密封压力随时间的变化曲线。横坐标为测量时间, 纵坐标为所测得气动窗口的密封压力变化。从图中可以看出, 该气动窗口在极短时间内就能够达到稳定的密封状态, 从而很好地匹配该激光器的工作, 具有良好的启动性能。通常在有激光输出时, 打开气动窗口的阀门, 使激光器正常输出。

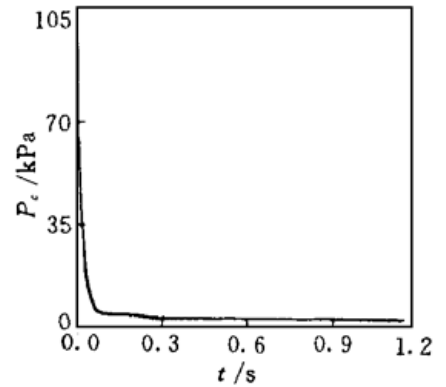


图 5 启动性能曲线

Fig. 5 Starting-property curve

3 结 论

自由旋气动窗口工作在设计状态时, 激光出射路径上没有激波、膨胀波的产生, 因此对光束质量影响较小, 并且能最大程度地提高流过气动窗口的工作气体的动量改变量, 减小质流量, 提高密封压比, 并适用于大口径激光输出。实验发现, 该 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 大口径自由旋横向式气动窗口工作在理想设计状态下 $P_0 = 9\text{ atm}$ 时, 其密封压比可以达到 28, 并具有良好的启动性能。由于本气动窗口的工作气体不通过任何抽真空装置而直接由扩散器排向大气, 因此它还具有易于操作、体积小、功耗较低等优点。但由于要满足自由旋条件, 因此其结构一旦确定就很难改变。而且当偏离设计工作状态时, 由于波系的产生, 就会对光束质量产生较大的影响, 因此该类型气动窗口通常只能工作在设计范围内。而为特定的大功率激光器设计相应的气动窗口来换取较高的光束质量和输出功率是值得的, 因此这种气动窗口是取代大口径、低腔压的大功率激光器输出镜的最有效的手段之一, 具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 E. M. Parmeter, R. A. Greenberg. Super flow aerodynamic windows for high-power lasers. *AIAA J.*, 1973, **11**: 943~ 949
- 2 G. F. Hausmann. Aerodynamic Window. *Us. PAT-3*, 654, 569
- 3 C. K. Knight, P. I. Singh. An axial flow aerowindow for large pressure ratios. *AIAA Paper*, 1980, (80): 1435
- 4 R. N. Guile. W. E. Hilding. Investigation of a free-vortex aerodynamic window. *AIAA Paper*, 1975, (75): 122
- 5 W. Masuda, M. Yuasa. Experiment study of a free-vortex aerodynamic window. *J. de Physique*, 1980, **C9**: 423~ 429
- 6 ADA 126818. Experimental investigation of aerodynamic windows. Translated from *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1980, **7**(1): 7~ 12
- 7 Li Lijun, Qin Yuzhong, Zhao Zhongpi. An output optical system and gas dynamic window for 6 kW level CO_2 lasers. *Chinese J. Lasers (Special Issue on Laser Devices)* (中国激光 - 器件专辑), 1990, **17**: 35~ 37 (in Chinese)
- 8 Zhu Songlin, Cheng Zuhai, Ku Geng *et al.*. The sealing performance and optical quality of a jet-injection aerodynamic window. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(2): 113~ 117 (in Chinese)
- 9 Pan Jinshan. Introduction to Gas Dynamics. Xi'an: North-West Industrial University Press. 1995. 87~ 103 (in Chinese)

Design Principle of the Free-vortex Aerodynamic Window and an Experimental Study on Its Running Properties

Liu Tianhua Jiang Zongfu Wei Chenghua
Tang Rongqi Chen Jinbao Zhao Yijun

(Applied Physics Department, National University of the Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract The principle of the free-vortex aerodynamic window (FADW) is described. The sealing property and influence of a FADW device designed for the 10 kW CO_2 gas dynamic laser (GDL) on the optical quality have been studied experimentally. The experimental results show that this FADW device can attain a high sealing-pressure ratio $P_R > 20$, with the highest being 28 under the designing conditions, and that the FADW has a good starting-property and little influence on the optical quality. So this kind of free-vortex aerodynamic window is a promising alternative to take the place of the crystal windows.

Key words free-vortex aerodynamic window (FADW), GDL, sealing-pressure ratio