

文章编号: 0258-7025(2010)04-0965-05

利用 N_2/He 混合气提高自由旋涡气动窗口的 光学性能

刘盛田 柳 琪 陈 良 李金雪 李 柱 郭建增

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘要 为减小激光束透过超声速自由旋涡气动窗口时的退化畸变, 提高光束质量, 基于气动窗口(ADW)射流外侧剪切层与环境折射率和压力同时匹配理论, 提出 N_2/He 双组元混合气射流工质方案, 讨论了混合气组分比例确定方法。对 N_2 和 N_2/He 混合气两种射流工质分别进行了实验, 以波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器为光源, 用哈特曼波前传感器采集数据, 给出了激光束透过射流时的波像差峰谷(PV)值。结果表明, N_2 为射流工质时, 波前畸变峰谷值约为 $0.18 \mu\text{m}$; N_2/He 混合气为射流工质时, 波前畸变峰谷值约为 $0.13 \mu\text{m}$, 说明 N_2/He 混合气取代 N_2 作为射流工质, 可以有效提高气动窗口的光学质量。

关键词 激光器; 气动窗口; 剪切层; 光学质量; 自由旋涡; 波前畸变

中图分类号 TN248.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.0965

Improving Optical Performance of the Free-Vortex Aerodynamic Window by N_2/He Mixture

Liu Shengtian Liu Qi Chen Liang Li Jinxue Li Zhu Guo Jianzeng

(The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China)

Abstract In order to minimize optical distortion of beam introduced by gas jet stream and improve optical transmission quality, a project of utilizing N_2/He mixture as working gas is proposed based on matching index-of-refraction and equalizing pressure. The method for determining gas mixture composition is also discussed. Experiments are carried on N_2 and N_2/He mixture respectively, and the laser beam wavefront aberration peak-to-valley (PV) value is measured from the data collected by Hartmann sensor. The results show that the wavefront distortion PV value of aerodynamic window (ADW) is $0.18 \mu\text{m}$ approximately in case of N_2 ; while that is $0.13 \mu\text{m}$ in case of N_2/He mixture. The optical quality of the ADW can be improved by using N_2/He mixture as working gas instead of N_2 .

Key words lasers; aerodynamic window; shear layer; optical quality; free-vortex; wavefront distortion

1 引 言

自由旋涡气动窗口(ADW)作为化学激光器系统中激光输出窗口得到了广泛研究^[1~6], 由于激光束透过气动窗口射流输出时会产生像差, 从而影响激光的光束质量^[7], 所以气动窗口密封光腔的同时, 还必须减小对输出激光光束质量的影响。超声速自由旋涡气动窗口利用高速自由旋涡射流产生的离心力来维持外界环境与光腔之间的压差, 离心力将会

强化外侧剪切层而减弱内侧剪切层混合效果, 使外侧剪切层向射流内侧弯曲, 呈非线性迅速生长, 因此自由旋涡气动窗口光学质量主要受外侧剪切层影响^[8~10], 外侧剪切层的优化设计对提高自由旋涡气动窗口光学质量具有非常重要的意义^[11]。剪切层光学性能优劣与其折射率分布有关, 当剪切层两侧折射率相等时, 对激光束的影响最小^[12~15], 因此实现剪切层与环境的折射率和压力同时匹配是提高气

收稿日期: 2009-06-12; 收到修改稿日期: 2009-07-21

作者简介: 刘盛田(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事激光技术等方面的研究。E-mail: wlylst@sina.com

动窗口光学性能的有效途径。

在压力匹配的同时,为了实现外侧剪切层折射率的匹配,国内外学者对热空气,He/Ar 混合气等射流工质进行了研究。本文在理论分析的基础上,尝试利用 N₂ 和 He 混合成双组元气体作为气动窗口射流工质,实现窗口外侧剪切层与环境的折射率和压力同时匹配,以优化剪切层设计,提高窗口光学质量。通过 N₂ 和 N₂/He 混合气两种射流工质的对比实验,探讨了 N₂/He 混合气提高窗口光学质量的可行性。

2 理论分析

2.1 传统射流工质(空气或 N₂ 气)实现折射率和压力同时匹配的不可行性

自由旋涡气动窗口射流外侧压力匹配表示为

$$P_a = P_j, \quad (1)$$

式中 P_a 表示环境压力, P_j 表示射流外侧压力。根据折射率与密度的关系和理想气体状态方程,外侧剪切层折射率匹配表示为

$$\frac{T_a}{T_j} = \frac{R_j k_a P_a}{R_a k_j P_j}, \quad (2)$$

式中 $k_{a(j)}$ 为 Gladstone-Dale 常数, $R_{a(j)}$ 为气体常数。假定气动窗口射流满足等熵流动方程

$$\frac{P_0}{P_j} = \left(\frac{T_0}{T_j} \right)^{\gamma/\gamma-1}, \quad (3)$$

式中 P_0 为射流总压, T_0 为滞止温度。根据(1)~(3)式,若常温空气或 N₂ 气作为射流工质时能够实现压力和折射率同时匹配,必然要求 $P_0 = P_j$, 这显然不符合实际情况,所以常温空气或 N₂ 气无法实现折射率和压力的同时匹配^[11]。

2.2 混合气组分比例

令相对总压 $\bar{P}_0 = P_0/P_a$, 将(1),(2)式代入(3)式可得

$$\bar{P}_0 = \left(\frac{k_j P_0}{k_a R_j \rho_a T_0} \right)^\gamma. \quad (4)$$

(4)式是气动窗口外侧剪切层与环境折射率和压力同时匹配的条件。对于双组元气体,组分 A 和 B 的参数分别用下标 1 和 2 表示,由一维等熵流动方程和理想气体状态方程,在满足(4)式情况下,可以推导出组分 A 的质量分数为

$$W = \frac{1 - k' M' \bar{P}^{(\gamma-1)/\gamma}}{M' \bar{P}^{(\gamma-1)/\gamma} (k - k') - (M'/M - 1)}, \quad (5)$$

式中 $k = k_1/k_a$, $k' = k_2/k_a$, $M = M_1/M_a$, $M' = M_2/M_a$ 。显然组分比例决定于组分性质和相对总压,将 He 和 N₂ 分别作为组分 A 和 B,并把各自物

性参数代入(4)式和(5)式中,计算结果表明,按合适比例混合的 N₂/He 双组元射流可以实现剪切层与环境折射率和压力的同时匹配。不同相对总压条件下 He 质量分数如图 1 所示,相对总压越高,He 质量分数越大。

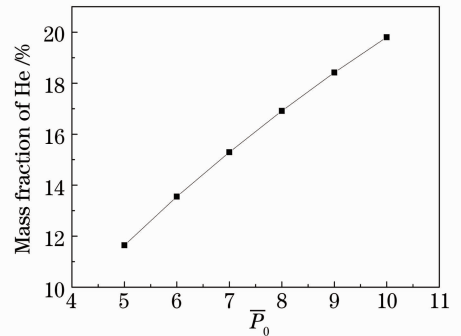


图 1 He 质量分数与相对总压的关系

Fig. 1 Relationship between relative total pressure and mass fraction of He

与常温空气和 N₂ 气相比, N₂/He 混合气对激光的吸收系数较小,能有效减小透过窗口的激光衰减,提高窗口光学性能,同时由于其液化温度相对较低,降低了射流工质凝结的可能性,所以能够实现更高的密封压比^[3],另外, N₂/He 混合气比热比较大,有利于提高气动窗口扩压器的压力恢复性能^[11]。

2.3 自由旋涡气动窗口质量流率

质量流率是气动窗口性能的重要评价指标,根据质量守恒定律通过非对称喷管出口截面的质量流量表示为

$$\dot{m} = H \int_{r_c}^{r_a} \rho v dr, \quad (6)$$

式中 H 为气动窗口高度, r_a 为射流外径, r_c 为射流内径。将动量方程、一维等熵流动方程、自由旋涡特性关系式、射流几何特性关系式代入(6)式后,化简可得气动窗口质量流率表达式

$$\frac{\dot{m}}{A} = \frac{\gamma \lambda_c P_0}{(\gamma + 1) a^* \sin(\theta/2)} \int_{\lambda_a}^{\lambda_c} \frac{\epsilon(\lambda)}{\lambda} d\lambda, \quad (7)$$

式中 A 为气动窗口通光孔面积, γ 为比热比, λ_c 为速度系数, θ 为射流偏转角, $\epsilon(\lambda)$ 为气体动力学函数, a^* 为临界声速。在总温 $T_0 = 300$ K, 射流偏转角 $\theta = 50^\circ$, 密封压比 $P_r = 80$ 条件下,以 N₂ 和 N₂/He 混合气为射流工质的气动窗口所需的质量流率如图 2 所示,与 N₂ 相比采用 N₂/He 混合气时,气动窗口所需质量流率较小,并且质量流率减小幅度与总压有关,总压越大,质量流率减小幅度越大。

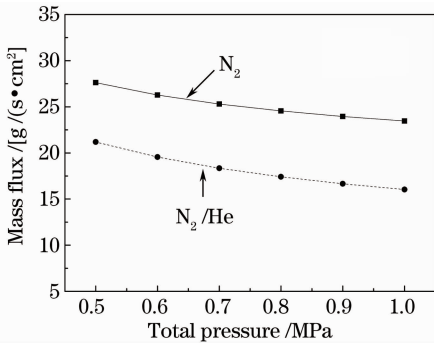


图 2 N₂ 和 N₂/He 混合气质量流率与总压的关系

Fig. 2 Relationship between total pressure and mass flux for N₂ and N₂/He mixture

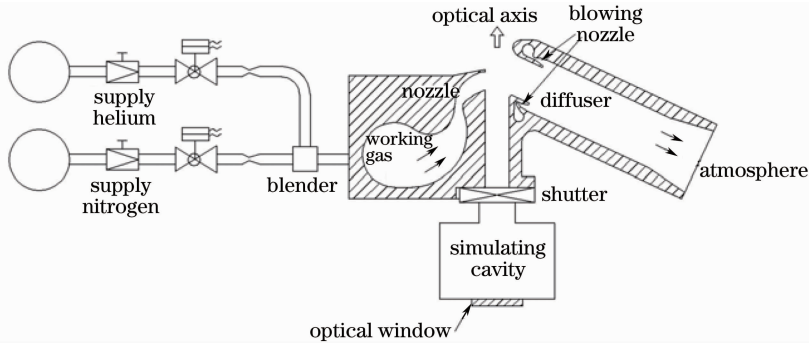


图 3 气动窗口实验装置简图

Fig. 3 Schematic of ADW test facilities

在不开启闸板阀的情况下,以波长为 0.6328 μm 的 He-Ne 激光器为光源,利用哈特曼波面传感器研究自由旋涡气动窗口对输出激光波前的影响^[16,17]。哈特曼传感器面阵 CCD 探测器采样频率为 25 Hz,微透镜子孔径数为 32,有效通光孔径为 120 mm。被测畸变波前分割成像在 CCD 探测器上,经过图像处理求得各个子孔径区域内的波前斜率,采用 Zernike 模式波前重构算法进行波前重构,计算得到被测激光波前,进而计算得到窗口通光孔内激光束畸变波前的波像差峰谷(PV)值等光学参数。

4 实验结果与讨论

4.1 射流工质类型比较试验

图 4 给出分别以 N₂, N₂/He 混合气为射流介质的气动窗口密封性能曲线,由图可知, N₂ 射流工质达到的最低密封压力为 3.6 kPa, 对应质量流率为 46.3 g/(s·cm²), N₂/He 混合气达到的最低密封压力为 5.3 kPa, 对应质量流率为 31.8 g/(s·cm²)。两种情况下达到的最大密封压比不同的原因在于: 实验中气动窗口装置不变, 没有针对 N₂/He 混合气专门设计气动窗口, 仅简单地将射流工质更换为 N₂/He 混

3 实验装置和测试方法

自由旋涡气动窗口^[3]实验装置如图 3 所示, N₂ 和 He 分别储存在高压钢瓶中, 通过减压阀调至适当压力后供给使用, 气体流量由标准音速文氏管计量, N₂ 和 He 进入混合器后互相撞击混合形成均匀的 N₂/He 混合气, 混合气经过非对称喷管形成自由旋涡射流, 而后进入扩压器, 在内外端壁吹气的引射作用下, 排到大气环境中。气动窗口射流与模拟光腔间安装密封闸板阀, 闸板阀阀板和模拟光腔后端盖法兰上加工方孔, 并用 K9 玻璃密封, 以便于光学测试。当单独使用 N₂ 作为射流工质时, 关闭 He 阀门。扩压器内外端壁吹气使用干燥 N₂。

合气, 运行时使窗口偏离设计工况所致。通过调节喷管型面和扩压器, 应该可以达到相同的设计工况。图 5 给出了激光束透过窗口时的畸变波前波像差峰谷值。由图可知, 在气动窗口运行过程中, 两种介质情况下, PV 值都比较稳定, 采用 N₂ 时, PV 值约为 0.18 μm, 当换用 N₂/He 混合气作为射流工质时, PV 值约降为 0.13 μm, PV 值减小约 27%, 证明 N₂/He 混合气替代 N₂ 作为射流工质, 可以有效提高气动窗口的光学性能。

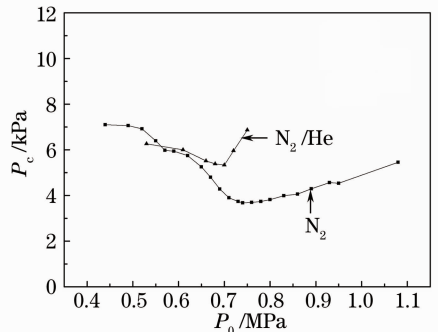


图 4 模拟光腔压力随总压的变化关系

Fig. 4 Simulated cavity pressure as a function of plenum pressure

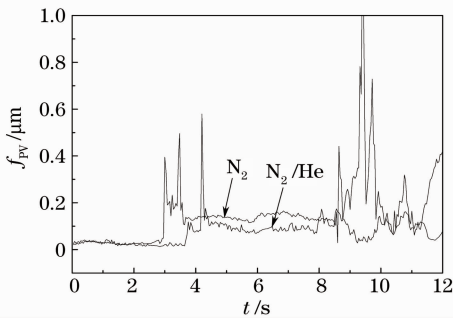


图5 不同射流工质下光束波像差的峰谷值

Fig. 5 PV values of wavefront as a function of time with different working jets

4.2 N₂/He 组分比例实验

为研究 N₂/He 混合气组分比例对气动窗口性能的影响,在总压 0.7 MPa,质量流率 32.6 g/(s·cm²)

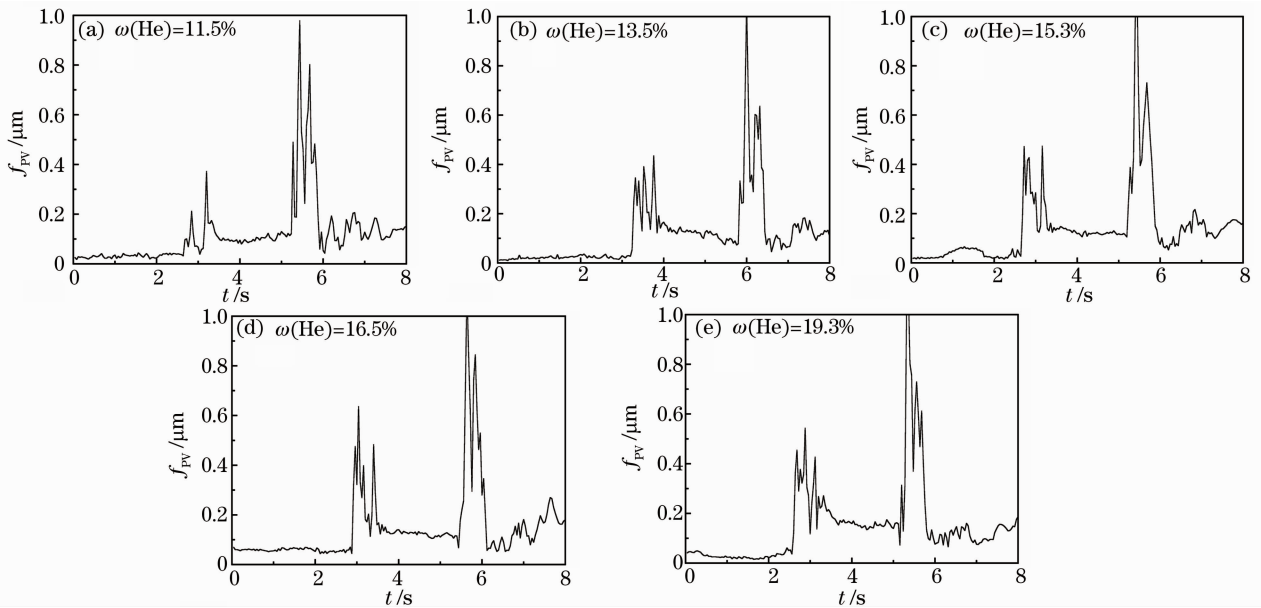


图6 不同 He 质量分数下光束波像差的峰谷值

Fig. 6 PV values of wavefront as a function of time with different mass fractions of He

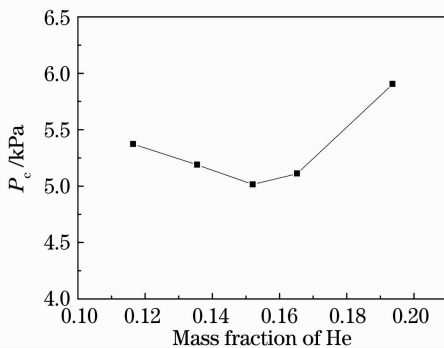


图7 He 质量分数对密封压力的影响

Fig. 7 Effect of the mass fraction of He on sealing pressure

条件下,进行了 5 种组分比例实验,He 质量分数分别取为 0.115,0.135,0.153,0.165 和 0.193,图 6 依次由(a)~(e)给出,其中 0.153 为理论设计值。图 6 和图 7 分别给出了波前畸变波像差峰谷值和密封性能随 He 质量分数的变化,由图 7 可知,气动窗口在理论混合气比例情况下,气动密封性能最好,当偏离理论值时,气动密封性能变差,从图 6 可以看出,He 质量分数为 0.115,0.135,0.153 和 0.165 四种情况下,波前峰谷值变化不大,约为 0.13 μm,当 He 质量分数增大到 0.193 时,波前峰谷值上升到 0.19 μm,光学质量有所恶化。实验表明,N₂/He 混合气组分比例对气动窗口密封性能影响较大,在理论设计值时密封压比最大;组分比例偏离设计值较小时对光学质量影响不大,当偏差较大时才会对光束质量产生一定影响。

5 结 论

理论分析表明,采用 N₂/He 双组元混合气作为自由旋涡气动窗口射流工质,能够实现窗口外侧剪切层与环境的折射率和压力同时匹配,减小激光束透过射流时的波前畸变,提高窗口的光学质量,同时能够降低气动窗口运行所需的质量流率。在实验中,N₂/He 混合气替代 N₂ 用作气动窗口射流工质,使激光波前畸变峰谷值减小了 27%;N₂/He 组分比例偏离设计工况时,对窗口密封性能影响较大,对波前畸变 PV 值影响相对较小。研究表明,N₂/He 混合气是一种具有工程应用价值的自由旋涡气动窗口射流工质。

参 考 文 献

- 1 R. N. Guile, W. E. Hilding. Investigation of a free-vortex aerodynamic window[R]. AIAA Paper, 1975. 75~122
- 2 V. M. Malkov, A. V. Trilis, A. V. Savin *et al.*. One-stage free-vortex aerodynamic windows with pressure ratio 100 and atmospheric exhaust[C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 170~174
- 3 Liu Shengtian, Guo Jianzeng, Liu Qi *et al.*. Design and experiment of a high pressure ratio free-vortex aerodynamic window[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1846~1850
刘盛田, 郭建增, 柳 琪等. 大密封压比超音速自由旋涡气动窗口设计与试验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1846~1850
- 4 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Wei Chenghua *et al.*. Designing principle of the free-vortex aerodynamic window and experimental study on running properties[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(1): 23~27
刘天华, 姜宗福, 韦成华等. 自由旋涡气动窗口设计原理及其工作性能的初步实验研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(1): 23~27
- 5 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Li Wenyu *et al.*. Study on the effect of similar lens of free-vortex aerodynamic window[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 16~20
刘天华, 姜宗福, 李文煜等. 自由旋涡气动窗口的类透镜效应研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1): 16~20
- 6 Li Xiangyu, Lu Fangyun, Zhang Duo. The design of free-vortex aerodynamic window's nozzle[J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2006, **24**(4): 461~465
李翔宇, 卢芳云, 张 舵. 自由旋涡气动窗口喷管设计研究[J]. *空气动力学学报*, 2006, **24**(4): 461~465
- 7 D. W. Bogdanoff. The optical quality of shear layers: prediction and improvement thereof [J]. *AIAA Journal*, 1984, **22**(1): 58~64
- 8 W. Masuda, M. Yuasa. Experimental study of a free-vortex aerodynamic window[J]. *Journal de Physique*, 1980, **41**(C9): 423~429
- 9 Yi Shihe, Cheng Zhongyu, Liu Dafeng. The application investigation of DPIV technique in supersonic free-vortex ADW [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, **18**(3): 79~82
易仕和, 程忠宇, 刘大峰. DPIV 技术在超声速自由涡气动窗口中的应用[J]. *流体力学实验与测量*, 2004, **18**(3): 79~82
- 10 T. Satake, M. Sakai, T. Watanabe *et al.*. Experimental investigation of supersonic free-vortex flow with large asymmetry for aerodynamic laser windows[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(8): 4377~4382
- 11 Yi Shihe, Hou Zhongxi, Zhao Yuxin. The optimization study of optical performance of shear layer in free-vortex ADW [J]. *Experiments and Measurements in Fluid Mechanics*, 2004, **18**(2): 47~49
易仕和, 侯中喜, 赵玉新. 超声速自由涡气动窗口剪切层光学性能的优化设计研究[J]. *流体力学实验与测量*, 2004, **18**(2): 47~49
- 12 C. C. Stewart, J. M. Avidor, E. R. Pugh *et al.*. Gas laser aerodynamic window[P]. US Patent, 4201952, 1980
- 13 R. R. Smith, C. R. Truman, B. S. Masson. Prediction of optical phase degradation using a turbulent transport equation for the variance of index-of-refraction fluctuations [C]. Aerospace Sciences Meeting, 28th, Reno, NV, AIAA-1990-250
- 14 M. R. Baxter, C. R. Truman, B. S. Masson. Predicting the optical quality of supersonic shear layers [C]. Themophysic, Plasmadynamics and Lasers Conference, San Antonio, TX, AIAA-1988-2771
- 15 A. S. Boreisho, A. V. Trilis, V. M. Khailov *et al.*. Improvement of the optical quality of the free vortex aerodynamic window[C]. *SPIE*, 2001, **4351**: 134~140
- 16 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun *et al.*. Study on the laser wavefront deformation induced by the free-vortex aerodynamic window for high energy lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 289~294
刘天华, 姜宗福, 许晓军等. 高能激光器自由旋涡气动窗口激光波前畸变的初步研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 289~294
- 17 Liu Tianhua, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun *et al.*. Study on the optical quality of the free-vortex aerodynamic window using Hartmann-Shack sensing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(4): 536~540
刘天华, 姜宗福, 许晓军等. 用哈特曼法研究自由旋涡气动窗口光束质量[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(4): 536~540