

冷气流引射式小型 DF 激光器紧凑度分析

郭建增, 邱雄飞, 王 杰, 刘盛田, 颜飞雪, 王植杰

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘 要: 对影响冷气流引射式小型 DF 激光器紧凑度的主要因素进行了分析, 以功率-气源体积比作为评价紧凑度的指标, 在多种参数条件下对功率-气源体积比进行了计算, 结果表明, 随着激光器喷管列阵质量流面密度的增加, 功率-气源体积比先增大后减小, 并在喷管列阵质量流面密度约为 $3.3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时取得最大值; 在激光尾气参数相同的情况下, 提高引射喷管总压可获得更大的功率-气源体积比, 但随着引射喷管总压的提高, 引射喷管总压对功率-气源体积比的影响逐渐减弱; 与氦气做引射工质相比, 采用氮气和空气做引射工质可获得更大的功率-气源体积比。

关键词: DF 化学激光; 压力恢复系统; 引射器; 紧凑度; 体积规模

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105006

Compactness analysis of small scale DF laser with cooling gas ejector

Guo Jianzeng, Qiu Xiongfei, Wang Jie, Liu Shengtian, Yan Feixue, Wang Zhijie

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

Abstract: Influence factors of compactness of DF laser with cooling gas ejector were analyzed. Ratio of Laser Power to Gas Source Volume (RPGV) was chosen as DF laser compactness evaluation index and was calculated at different conditions. According to the result, RPGV increases at first, and then decreases with increasing nozzle array mass flux. RPGV gets maximum value when nozzle array mass flux is about $3.3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. In the case of same laser effluent parameters, increasing ejector driving gas total pressure leads to a bigger RPGV, but its effect on RPGV gradually becomes weak. Compared with helium as ejector driving gas, adopting nitrogen and air as ejector driving gas leads to higher RPGV.

Key words: DF chemical laser; pressure recovery system; ejector; compactness; volume scale

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 国防科技基金

作者简介: 郭建增(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事高能激光技术方面的研究。Email: Guojianzeng718@126.com

0 引言

由于正常出光时必须维持较低的光腔压力^[1], 装备在移动平台上的化学激光器需要配备引射式压力恢复系统^[2-3]将激光尾气从较低的光腔压力增压至 1 atm, 排放到大气环境中, 而引射式压力恢复系统在整个激光器的体积规模中占比最大^[4], 其气源储罐的体积又比器件自身的体积大得多, 因此, 首先需要从减小气源体积着手解决化学激光器的紧凑度问题。增加激光尾气的恢复压力可以减小气源体积, 是提高紧凑度的有效方法^[5-6]。此外, 引射工质和被引射工质的总温比也对气源体积有显著影响, 大型化学激光器大多采用高温蒸汽^[3]、高温燃气^[7]做引射工质, 或对激光尾气进行主动冷却^[8], 但都需要增加复杂的气源供给系统或换热系统, 相比之下, 小型紧凑式 DF 化学激光器更适用于采用常温气体作引射工质的冷气流引射式压力恢复系统。迄今为止, 对于冷气流引射式小型 DF 激光器紧凑度的研究还较少, 文中对影响冷气流引射式小型 DF 激光器紧凑度的主要因素进行了分析, 提出了紧凑度的评价指标并进行了计算, 根据计算结果分析了喷管列阵质量流面密度、引射喷管总压及引射工质对激光器紧凑度的影响。

1 紧凑度影响因素分析

冷气流引射式小型 DF 激光器的组成如图 1 所示, 包括增益发生器、压力恢复系统和气源储罐三部分。其中增益发生器由喷注器、燃烧室、喷管列阵和激光腔组成; 冷气引射式压力恢复系统由扩压器、引射喷管和引射器组成; 气源储罐包括激光原料气储罐和引射工质储罐。引射器的作用是提高激光尾气的恢复压力, 持续地将激光尾气排放到大气环境中, 以维持所需的光腔压力。

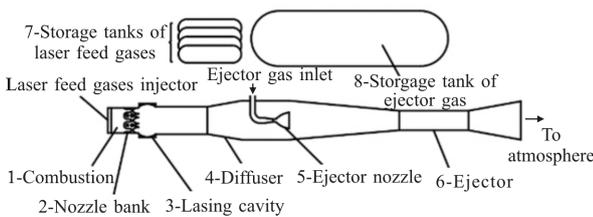


图 1 冷气流引射式 DF 激光器的组成

Fig.1 Schematic diagram of DF chemical laser with cooling gas ejector

冷气流引射式小型 DF 激光器紧凑度的影响因素主要有喷管质量流面密度、引射喷管总压和引射工质种类。在激光尾气的流量、温度及其他参数相同的情况下, 它的恢复压力越高, 所需要的引射工质就越少, 因此, 增加激光尾气的恢复压力可以减小气源体积, 是提高紧凑度的有效方法。对于采用 trip 型喷管列阵的 DF 激光器, 可以采用增加喷管列阵质量流面密度的方法来提高激光尾气的恢复压力。某台采用 trip 型喷管列阵的 DF 激光器的恢复压力和燃烧室压力、输出功率随喷管列阵质量流面密度的变化曲线分别如图 2、图 3 所示。可见, 在一定范围内增

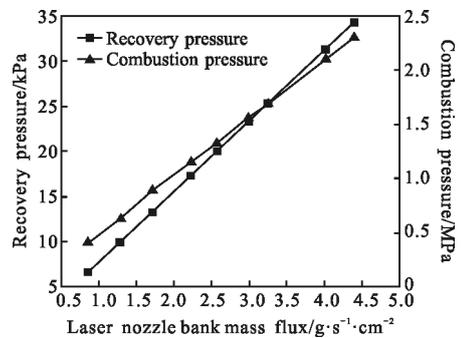


图 2 喷管列阵质量流面密度对恢复压力和燃烧室压力的影响
Fig.2 Effect of nozzle bank mass flux on recovery pressure and combustion pressure

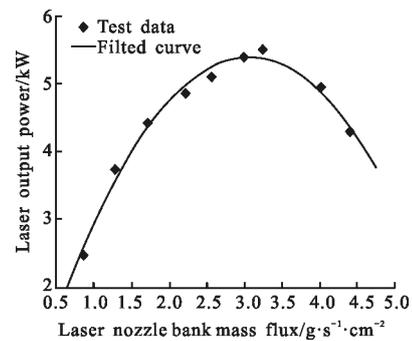


图 3 喷管列阵质量流面密度对激光器输出功率的影响
Fig.3 Effect of nozzle bank mass flux on laser output power

加喷管列阵质量流面密度, 激光尾气的恢复压力和燃烧室压力近似线性增加, 而激光器输出功率先增加, 达到最大值后逐渐减小。喷管列阵质量流面密度既影响激光输出功率, 又影响气源体积, 而引射喷管总压和引射工质种类只对气源体积有影响。提高激光器的紧凑度应使输出相同功率时的激光器体积最小, 由于激光器的气源体积远远大于激光器其他部

分的体积,因此气源体积一定程度上可以反映激光器的体积。定义功率-气源体积比 (Ratio of Laser Power to Gas Source Volume, RPGV) 为激光器输出功率和气源体积之比,它的大小可以反映相同功率条件下 DF 激光器的紧凑度,提高激光器紧凑度应使功率-气源体积比最大化。

2 气源体积计算模型

激光器的气源体积主要包括激光原料气气源体积和引射工质气源体积两部分,因此,根据激光器的运行次数 n 及每次运行时激光原料气各气体的运行时间 $\Delta t_{2,j}$ 、引射器的运行时间 Δt_1 ,可计算得到激光器的气源体积 V 为:

$$V = \sum_{j=1}^4 \frac{\dot{m}_{2,j} n \Delta t_{2,j}}{\rho_j - \rho_j'} + \frac{\dot{m}_1 n \Delta t_1}{\rho_{ejector} - \rho_{ejector}'} \quad (1)$$

式中: j 表示气体种类, $j=1\sim 4$ 分别对应于激光原料气 NF_3/He 、 C_2H_4/He 、 D_2/He 和 He ; ρ_j 、 ρ_j' 分别表示激光原料气中第 j 种气体储罐最高使用压力下的气体密度和最低使用压力下的气体密度; $\rho_{ejector}$ 和 $\rho_{ejector}'$ 分别表示引射工质储罐最高使用压力下的气体密度和最低使用压力下的气体密度; $\dot{m}_{2,j}$ 表示激光原料气中第 j 种气体的质量流量; \dot{m}_1 表示引射气体的质量流量,它需要满足将质量流量为 \dot{m}_2 的激光尾气增压至 1 atm (1 atm = 1.01 × 10⁵ Pa) 的要求,可根据图 4 所示的等压混合模型进行计算^[9]。

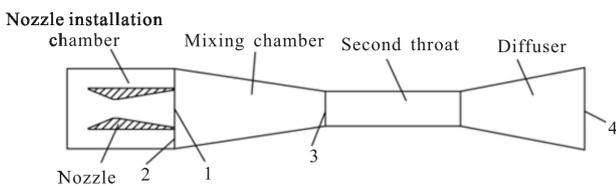


图 4 等压混合模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of constant pressure mixing model

定义 \dot{m} 、 w 、 C_p 、 T 、 t 、 P 、 p 、 γ 、 Ma 为质量流量、速度、定压比热、总温、静温、总压、静压、比热比、马赫数。下标 1、2、3 分别表示截面 1 上的引射工质参数、截面 2 上的激光尾气参数和截面 3 上的混合气体参数。根据质量守恒、动量守恒和能量守恒有:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (2)$$

$$\dot{m}_1 w_1 + \dot{m}_2 w_2 = \dot{m}_3 w_3 \quad (3)$$

$$\dot{m}_1 C_{p1} T_1 + \dot{m}_2 C_{p2} T_2 = \dot{m}_3 C_{p3} T_3 \quad (4)$$

根据公式(2)~(4)可计算得到二次喉道入口混合气流马赫数 Ma_3 。由等压混合模型有:

$$p_1 = p_2 = p_3 \quad (5)$$

利用气动关系式,可得二次喉道入口混合气流的总压为:

$$P_3 = p_3 \left(1 + \frac{\gamma_3 - 1}{2} Ma_3^2 \right)^{\frac{\gamma_3}{\gamma_3 - 1}} \quad (6)$$

认为引射工质和激光尾气在混合室出口已充分混合,并在二次喉道内通过正激波转变成亚声速气流,根据正激波后总压恢复关系式可得引射器的恢复压力为:

$$P_4 = P_3 \cdot \left[\frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} + \frac{2}{(\gamma_3 + 1) Ma_3^2} \right]^{-\frac{\gamma_3}{\gamma_3 - 1}} \cdot \left(\frac{2\gamma_3}{\gamma_3 + 1} Ma_3^2 - \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} \right)^{-\frac{1}{\gamma_3 - 1}} \quad (7)$$

根据公式(2)~(7)可求出要将质量流量为 \dot{m}_2 的激光尾气增压到 1 atm 排放到大气环境中所需要的引射工质流量 \dot{m}_1 。公式(1)中气体的密度采用 Redlich-Kwong 状态方程^[10]进行计算。

3 功率-气源体积比计算

设定每次填充原料后激光器的最大运行次数为 100 次,激光器单次运行时间为 1 s,压力恢复系统单次运行时间为 1.5 s。 NF_3/He 储罐最高压力取为 10 MPa,其余各种气体储罐的最高压力取为 23 MPa。图 2 所示的结果表明,增加喷管阵列质量流面密度使得激光器燃烧室压力增加,因此, NF_3/He 和 C_2H_4/He 储罐的最低运行压力随喷管阵列质量流面密度的增加而相应升高。由于常采用音速文氏管进行气体流量测量,为了满足音速条件,同时考虑各种流动损失, NF_3/He 和 C_2H_4/He 储罐的最低运行压力取为燃烧室压力的 2.5 倍。 D_2/He 和 He 储罐最低运行压力取为 1 MPa。设引射工质储罐最低运行压力比引射喷管总压高 0.5 MPa。

3.1 喷管阵列质量流面密度和引射喷管总压的影响

以常温干燥的氮气作引射工质,在不同的喷管阵列质量流面密度和引射喷管总压下对功率-气源

体积比进行了计算,结果如图 5、图 6 所示。由图 5 可见,在引射喷管总压一定的情况下,随着喷管列阵质量流面密度的增加,激光器气源体积先快速减小,然后缓慢增大,当喷管列阵质量流面密度在 $2.6\sim 4.4\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 范围内时,激光器气源体积变化很小,但图 3 所示激光输出功率先增加后减小,因此功率-气源体积比主要由功率决定。由图 6 可见,随着喷管列阵质量流面密度的增加,功率-气源体积比先增大后减小,当喷管列阵质量流面密度在 $3.3\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右时取得最大值。为了获得较大的功率-气源体积比,喷管列阵质量流面密度宜取为 $2.6\sim 4.0\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

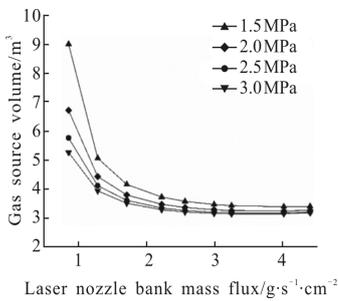


图 5 喷管列阵质量流面密度对激光器气源体积的影响

Fig.5 Effect of nozzle bank mass flux on laser system gas source volume

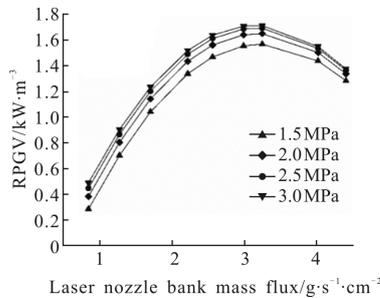


图 6 喷管列阵质量流面密度对 RPGV 的影响

Fig.6 Effect of nozzle bank mass flux on RPGV

引射喷管总压也对气源体积和功率-气源体积比有一定的影响。由图 5 和图 6 可见,在被引射激光尾气参数相同的情况下,增加引射喷管总压可以减小气源体积,增大功率-气源体积比,但随着引射喷管总压的升高,它对气源体积和功率-气源体积比的影响会逐渐减弱,当引射喷管总压大于 2.5 MPa 后,它对气源体积和功率-气源体积比的影响几乎可忽略。因此,当引射工质为氮气时,引射喷管总压宜控制在 $2\sim 2.5\text{ MPa}$ 。

3.2 引射工质的影响

理论研究表明^[7],引射工质和被引射气体分子量对引射效率有较大影响,减小引射工质分子量、提高被引射气体分子量均有利于提高引射效率,但被引射气体分子量一般是由工艺参数决定,不易改变,因此,通常通过提高引射工质的分子量来提高引射效率。在激光尾气参数相同的情况下,分别采用氮气、空气以及氦气做引射工质时的引射效率如图 7 所示,可见,采用氮气和空气做引射工质时的引射效率接近,均远低于氦气做引射工质时的引射效率,但却有更高的功率-气源体积比。氮气和空气属于易获得的廉价气体,而氦气属于稀有气体,价格较高,因此,从提高紧凑度和经济性两方面考虑,冷气流引射式小型 DF 激光器宜采用氮气或空气做引射工质。

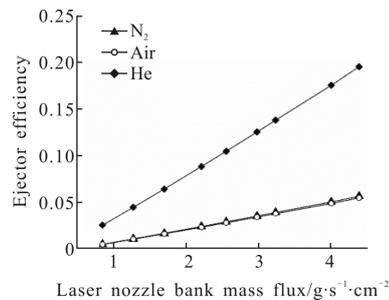


图 7 引射工质对引射效率的影响

Fig.7 Effect of ejector driving gas on ejector efficiency

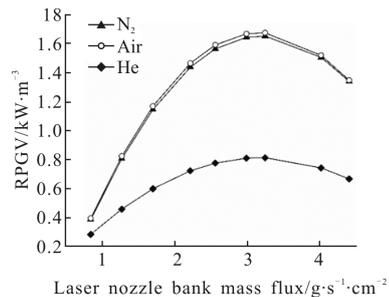


图 8 引射工质对 RPGV 的影响

Fig.8 Effect of ejector driving gas on RPGV

4 结论

激光器喷管列阵质量流面密度、引射喷管总压和引射工质都对激光器气源体积和功率-气源体积比有影响。喷管列阵质量流面密度在 $3.3\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右时功率-体积比取得最大值,紧凑度最高。冷气流引射式小型 DF 激光器宜选择常温氮气或空气做

引射工质, 引射喷管总压不宜过高, 2~2.5 MPa 较合适。研究结果对冷气流引射式小型 DF 激光器的优化设计具有指导作用。

参考文献:

- [1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Lasers [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [2] Acebal R, Marietta G A. Multi-stage steam ejector methodology: model development and application to high energy lasers[C]//18th Fluid Dynamics and Plasma Dynamics and Lasers Conference, AIAA, 1985: 1601.
- [3] Emmanuel G. Optimum performance for a single stage gaseous ejector[J]. *AIAA Journal*, 1976, 14(9): 1292-1296.
- [4] Ortwerth P J. On the rational design of compressible flow ejectors [C]//11th Fluid Dynamics and Plasma Dynamics Conference, AIAA, 1978: 1217.
- [5] Tang Litie, Yu Zhichuang, Zhao Lezhi, et al. Total pressure losing of nozzles flow in DF/HF chemical laser by numerical simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1194-1197. (in Chinses)
唐力铁, 于志闯, 赵乐至, 等. DF/HF 化学激光器喷管总压损失的数值模拟[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5):1194-1197.
- [6] Tang Litie, Li Yanna, Zhao Lezhi. Theoretical analysis of one dimensional gas dynamics of total pressure losses for combustion-driven continuous wave DF/HF chemical lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0705001. (in Chinese)
唐力铁, 李艳娜, 赵乐至. 燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器总压损失的一维气体动力学理论分析 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0705001.
- [7] Xu Wanwu. Study of high performance, high compression ratio pressure recovery system for chemical laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
徐万武. 高性能、大压缩比化学激光器压力恢复系统研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [8] Qiu Xiongfei, Liu Shengtian, Guo Jianzeng, et al. Improving the efficiency of pressure recovery system by high-fin tube heat exchanger [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 091011. (in Chinses)
邱雄飞, 刘盛田, 郭建增, 等. 利用高翅管换热器提高压力恢复系统效率[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 091011.
- [9] Liao Daxiong, Ren Zebin, Yu Yongsheng, et al. Design and experiment of constant-pressure mixing ejector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 728-732. (in Chinese)
廖达雄, 任泽斌, 余永生, 等. 等压混合引射器设计与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(5): 728-732.
- [10] Tong Jingshan. Fluid Thermodynamics-Basic Theory and Calculation [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008. (in Chinese)
童景山. 流体热物性学-基本理论与计算 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.