

文章编号: 0258-7025(2008)06-0823-04

连续波 DF 化学激光器无稀释剂实验及其分析

闫宝珠 袁圣付 王红岩 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了增强对燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的理解,特别是为了提高对燃烧室中 F 原子产生环境和光腔内激射环境的认识,进行了一系列 DF 激光器无稀释剂条件下的出光实验。结果显示,无主稀释剂条件下,DF 激光器同样可以达到较高的功率水平和质量流比功率,无副稀释剂条件下,输出功率和比功率将损失一半左右。根据实验数据,定性分析了主、副稀释剂对激光器运转的影响。DF 化学激光器能够在无稀释剂条件下出光,为简化激光器设计提供了依据。

关键词 激光器;DF;化学激光器;质量流比功率;稀释剂;燃烧驱动

中图分类号 TN 248.5 **文献标识码** A

Experiment and Analysis of Continuous Wave DF Chemical Laser without Diluent

Yan Baozhu Yuan Shengfu Wang Hongyan Lu Qisheng

(College of Opto-Electric Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract To enhance the understanding of combustion-driven continuous wave (CW) DF chemical lasers, especially for knowing the situation of the generation of F atoms in combustion chamber and the excitation situation in the optical cavity, a series of experiments is carried out without diluent. The results show that, DF lasers will be in good condition without primary diluent, and lose a half of power and specific power without secondary diluent. The effect of diluents on lasers is discussed based on the results. DF lasers can run stably without diluent, which provides the evidence for the simplification of DF lasers.

Key words lasers; DF; chemical laser; specific power; diluent; combustion-driven

1 引言

在燃烧驱动连续波氟化氙(DF)化学激光器中,稀释剂对激光器的运转起着重要的调节作用。主稀释剂主要用于调节主气流的气动特性(平均比热比、平均分子量等)和燃烧室中 F 原子的产生环境,如温度、压力等;副稀释剂主要用于降低光腔温度,创造有效激射所必需的低温环境,同时,它还能将主气流中的 F 原子与固壁隔离,防止其在固壁催化作用下发生复合。He 和 N₂ 对激发态 DF 分子的去激活效应很弱,所以一般采用 He 或 N₂ 作为稀释剂^[1]。由于 He 的分子量小、比热比大,有利于提高激光器输出功率^[1,2],因此,以 He 作稀释剂更为普遍。

研究 DF 激光器在无主稀释剂、无稀释剂(无主稀释剂且无副稀释剂)条件下的运转状况,有助于进一步认识主、副稀释剂对连续波 DF 化学激光器性能的影响,特别是对燃烧室 F 原子产生环境和光腔激射环境的影响,同时,也为简化 DF 激光器设计寻出路。文献[1]从激光器输出功率水平的角度,对 He 和 N₂ 作主稀释剂进行了比较;文献[3]评价了 N₂ 作主稀释剂的综合性能;文献[4]通过数值模拟的办法,研究了不同反应体系下,燃烧室中燃料、氧化剂和稀释剂的最佳配比;文献[5]将原用于高腔压、大稀释比激光器的数学模型应用于低腔压、小稀释比激光器,得出与实验较为一致的结果;文献[6]

收稿日期:2007-11-11;收到修改稿日期:2007-12-18

作者简介:闫宝珠(1980—),男,辽宁人,博士研究生,主要从事强激光技术研究。E-mail:azhu711@163.com

导师简介:陆启生(1942—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用、非线性光学研究。E-mail:luqsheng@public.cs.hn.cn

研究了电激励化学激光器中,有、无副稀释剂对激光输出功率、模式分布、光谱分布等输出特性的影响。

本文采用实验手段,探索 DF 激光器无稀释剂运转的可行性,通过对实验数据的分析,讨论 DF 激光器在有、无稀释剂条件下的性能差异。

2 实验装置

实验装置主要包括六个模块:供气模块、真空系统模块、水冷模块、测控模块、评价模块和激光器主体模块。其中激光器主体模块为一台小型燃烧驱动连续波 DF 激光装置,它是一个采用高超音速低温喷管(Hypersonic Low Temperature nozzle, HYLTE)的单喉道激光器^[7,8](Single Throat Laser, STL)。图 1 给出了实验装置的实物图,其中单喉道激光器的内部结构如图 2 所示。图中着重标出了主、副稀释剂的注入位置和测量燃烧室压力(P_0)、光腔出口压力(P_c)的取压孔位置。

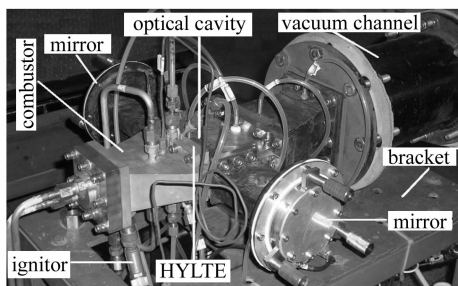


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

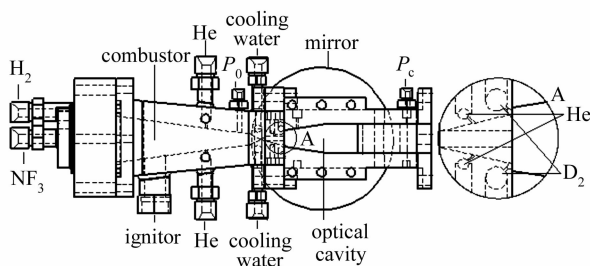


图 2 单喉道激光器主体结构

Fig. 2 Structure of the principal part in the STL

实验中采用 He 作为主、副稀释剂。燃烧室中采用以 H_2 为燃料的 H_2-NF_3 反应体系,通过点火器,使它们在燃烧室中燃烧,反应放热裂解过量的 NF_3 ,并与燃烧室上、下壁面两排小孔喷出的主稀释剂(He)混合,得到高温、高压、含自由态 F 原子的混合气体。它作为燃烧室中的滞止气体,经主喷管向光腔流动,在副稀释剂(He)的隔离保护下进入光腔。与喷管出口平面横向注入的光腔燃料 D_2 发生

抽运反应,生成激发态的 DF 分子。在光腔内低温、低压的环境下,形成粒子数(部分)反转的激活介质,光子在光腔中形成振荡,从而实现有效激射。最后,用真空罐收集废气。激光器的光腔采用平凹稳定腔,全反镜为 $\phi 70$ mm 的凹面镜,耦合输出镜为 $\phi 70$ mm 的平面镜,透过率为 5%。除去被安装架挡住的部分,腔镜的有效部分为 $\phi 60$ mm;光腔入口高度为 10 mm,出口高度 20 mm,光轴位置定在喷管出口平面下游 15 mm 处。在激光器输出镜外侧 500 mm 的位置放置有机玻璃,用烧蚀有机玻璃的办法得到输出激光的总能量和光斑形状;在燃烧室和光腔出口的上壁面设有取压孔,用于探测对应位置的静压;两个位置对应的压力传感器都是绝压型压力传感器,量程分别为 1.0 MPa 和 5 kPa,精度分别为 0.5% 和 0.25%。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

共进行了 23 次实验,其中 21 次实验中没有加入主稀释剂,9 次实验中没有加入副稀释剂。所有实验中,激光器均有一定量的功率输出,起动顺利,运转稳定,表 1 为部分实验数据。

表 1 DF 激光器实验结果

Table 1 Experimental results of DF laser

No.	Pri-dil	Sec-dil	P_0 /kPa	P_c /kPa	Power /W	σ /(J/g)
0	Y	Y	223	1.01	205.3	49.8
1	Y	Y	167	0.83	113.2	38.4
2	N	Y	127	0.91	28	10.4
3	N	Y	229	1.20	183.8	44.3
4	N	N	228	1.07	78.8	20.1
5	N	N	227	1.09	94.5	23.5
6	N	Y	235	1.19	197.8	46.6
7	N	Y	232	1.23	217	49.9
8	N	Y	232	1.30	176.8	40.4

表 1 中, Pri-dil, Sec-dil 分别表示主、副稀释剂有(Y)和无(N), σ 表示整个激光器的质量流比功率。各次实验相对于上次实验所做的改动为:0,以前的实验中,出光性能最好的一次实验结果,该实验中加入了主、副稀释剂;1,采用以前出光性能较好的气流配比参量进行实验,该实验中 NF_3 , H_2 , 主稀释剂, D_2 和副稀释剂的流量分别为实验 0 的 87%, 79%, 75%, 59% 和 91%;2,关闭主稀释剂二级减压阀,DF 激光器无主稀释剂运转;3,拆除主稀释剂供给管路,并用堵头将主稀释剂入口密封,以下各次实验均无主稀释剂,调节 H_2 , NF_3 , 副 He 和 D_2 的流

量分别为实验 2 的 1.6 倍, 1.4 倍, 1.8 倍和 2.4 倍; 4, 关闭副稀释剂二级减压阀门, DF 激光器无稀释剂运转; 5, 调节 D_2 流量至实验 4 的 1.12 倍; 6, 将副稀释剂流量恢复到实验 3 的水平; 7, 调节副稀释剂流量至实验 6 的 1.5 倍; 8, 调节副稀释剂流量至实验 7 的 1.1 倍。

3.2 数据分析

实验 2~8 说明, 在没有主稀释剂的条件下, DF 激光器能够正常出光, 并且有较好的重复性。

比较实验 1 和 2 可见, 没有主稀释剂时, 输出功率和比功率都有较大幅度的下降, 实验 6~8 说明, 在没有主稀释剂条件下, 适当调整其他原料流量配比, DF 激光器同样可以达到较高的功率水平和比功率。这说明燃烧室内的环境(温度、压力)对 F 原子的产生有很大的影响, 而主稀释剂是否存在, 对 F 原子的产生影响不大, 也就是说, 主稀释剂主要是通过调节燃烧室内温度和压力的调节来影响 F 原子的产生, 而这种调节作用可以通过选择适当的 NF_3 , H_2 流量配比来实现。

比较实验 1 和 2 的燃烧室压力和光腔压力可以发现, 主稀释剂对主气流的气动特性有着重要的调节作用: 主稀释剂为 He, 分子量小, 比热比大, 所以主稀释剂的加入减小了主气流的平均分子量, 增大了主气流的平均比热比, 因此提高了喷管出口主气流的速度, 从而降低光腔压力(也降低了光腔温度), 这非常有利于有效激射。

比较实验 3~6 可见, 与适量副稀释剂相比, 在没有副稀释剂条件下, 激光器输出功率和比功率下降一半左右。图 3 为实验 3~6 烧蚀的光斑。由图可见, 在有副稀释剂条件下, 光斑变高(而且烧蚀得更深), 这是由以下两个原因造成的: 第一, 副稀释剂(总温为 280 K 左右)的温度远低于主气流, 它的加入必然降低光腔温度, 这对有效激射是非常有利的; 第二, 副稀释剂将主气流中的 F 原子与喷管固壁隔离, 防止其在固壁的催化作用下发生复合反应。所以在整个光腔内, F 原子密度要比无副稀释剂时大, 因此输出激光功率密度大, 光斑烧蚀得更深。同时, 在光腔高度方向上, F 原子密度超过振荡阈值的范围变大, 因此有效激射区变高, 对应的光斑变高。由此看来, 降低光腔温度和对 F 原子的隔离保护作用, 是适量副稀释剂比无副稀释剂条件下输出功率高一倍的主要原因。但是, 在有副稀释剂条件下, 光斑没有变长, 反而在一定程度上缩短, 这与副稀释剂的注入方式有关: 在本台 DF 激光器中, 副稀释剂以一定

的角度横向注入主气流, 对主气流的压缩作用比较大, 于是, 主气流速度减小, 同时静压升高(见表 1)。这使 F 原子的复合和激发态 DF 的去激活效应加快, 再加上主气流速度减小, 这些都使激射区变短。虽然副稀释剂的加入也有降低光腔温度的作用, 但从整体上看, 本台 DF 激光器中副稀释剂对主气流的压缩作用更为显著, 所以最终的结果是激射区变短, 相应的光斑缩短。

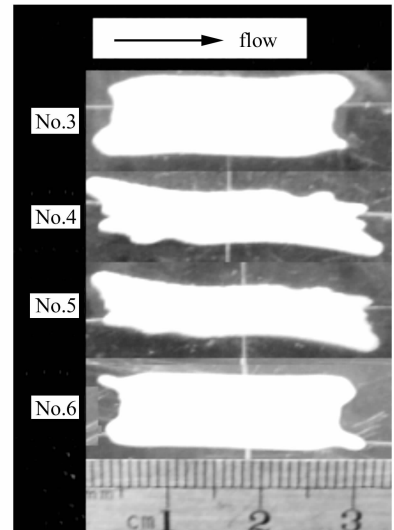


图 3 副稀释剂对光斑的影响

Fig. 3 Effect of secondary diluent on facula

实验 6~8 说明, 在没有主稀释剂的条件下, 单靠副稀释剂同样可以将光腔内的激射环境调节到较佳的状态; 在没有主稀释剂条件下, 其他原料流量固定不变, 存在一个最佳的副稀释剂流量, 使输出功率和比功率最高。

实验 4 和实验 5 表明, DF 激光器完全可以在无稀释剂条件下运转, 并且同样具有很好的重复性。但是, 激光器的无稀释剂运转, 其质量流比功率较低, 所以, 这种运转方式只能用于小功率激光器。

4 结论

由实验结果可以看出, DF 激光器完全可以在无主稀释剂条件下运转, 而且从比功率的角度来看, 并不比有主稀释剂条件下差。这说明, 影响 F 原子产生的因素是燃烧室中的压力、温度等环境条件, 主稀释剂是通过调节燃烧室的压力和温度来影响 F 原子产生的; 主稀释剂对光腔内激射环境的调节作用, 主要是通过调节主气流的气动特性来实现的。主稀释剂的加入能够提高喷管出口主气流的速度, 降低光腔压力和温度, 从而改善激射环境。相比之

下,副稀释剂对 DF 激光器性能的影响比较大,无副稀释剂条件下的功率水平和质量流比功率大约是适量副稀释剂条件下的一半;另外,在没有主稀释剂条件下,单靠副稀释剂同样可以将光腔内的激射环境调节到较佳的状态。

燃烧驱动连续波 DF 激光器可以在无主稀释剂条件下,甚至在无稀释剂条件下正常出光,这在一定程度上有助于简化 DF 激光器供给气路,简化增益发生器的结构设计。因此,在小功率 DF 激光器中,可以采用无稀释剂的运转方式。当然,在实际的激光器设计中,还要考虑很多其他问题,如压力恢复、废气处理和光束质量^[9,10]等。

参 考 文 献

- 1 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Lasers [M]. Beijing: Science Press, 1987. 260~267
R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 北京:科学出版社, 1987. 260~267
- 2 Sang Fengting, Zhou Dazheng, Jin Yuqi *et al.*. Chemical Laser [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. 37~38
桑凤亭,周大正,金玉奇 等. 化学激光[M]. 北京:化学工业出版社, 2000. 37~38
- 3 Yao Cuiyue, Sun Chaojun, Guo Jianzeng *et al.*. Evaluation of the performance of DF chemical laser with nitrogen diluent [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1992, **4**(4):588~592
姚翠月,孙超君,郭建增 等. 氮作稀释剂 DF 化学激光器性能评价[J]. *强激光与粒子束*, 1992, **4**(4):588~592
- 4 Hua Weihong. Numerical Simulation of High Energy Continue Wave DF/HF Chemical Laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1997. 31~37
华卫红. 高功率连续波 DF/HF 化学激光器数值模拟研究[D]. 长沙:国防科技大学研究生院, 1997. 31~37
- 5 W. L. Rushmore, S. W. Zelazny, C. W. Modeling. DF and HF Laser Performance at Low Cavity Pressures and Diluent Conditions [C]. 1978. New York: AIAA Paper No. IV-5. AIAA Conference on Fluid Dynamics of High Power Lasers, Cambridge, Massachusetts, October 31-November 2
- 6 Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Zhang Peng *et al.*. Effect of two different diluent injecting methods on a discharge excited infrared multi-band chemical laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3):339~342
王红岩,袁圣付,张 鹏 等. 电激励红外多波段化学激光器中稀释剂注入方式对激光输出的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3):339~342
- 7 Yuan Shengfu, Hua Weihong, Jiang Zongfu. Performance analysis of small continuous wave DF chemical laser with HYLTE nozzle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):295~299
袁圣付,华卫红,姜宗福. 采用超音速低温喷管的小型连续波 DF 化学激光器性能分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):295~299
- 8 Shi Jianhua, Jiang Zongfu, Yuan Shengfu *et al.*. Mixing performance of HYLTE nozzle in CW DF/HF chemical lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):627~631
施建华,姜宗福,袁圣付 等. 连续波 DF/HF 化学激光器高超音速低温喷管混合性能的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):627~631
- 9 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258
于永爱,张玲玲,唐前进 等. 激光束质量实时测量技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):255~258
- 10 Xi Fengjie, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Influence of nonuniform intensity on wavefront curvature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1293~1296
习锋杰,姜宗福,许晓军. 光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9):1293~1296