

文章编号: 0258-7025(2008)02-0211-05

功率提取对连续波 DF 化学激光器腔压的影响

闫宝珠 袁圣付 陆启生 华卫红 王红岩

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了研究功率提取对连续波 DF 化学激光器光腔压力的影响, 基于一台小型燃烧驱动连续波 DF 激光器装置, 进行了一系列实验, 实验结果显示, 随着提取功率的增大, 光腔压力逐渐减小。利用一维定常流理论和光腔动力学理论, 建立了从燃烧室到光腔出口的一维数学模型, 得到光腔压力随比功率的变化关系曲线, 取得了与实验较为一致的计算结果, 从而给出了功率提取对光腔压力影响的理论解释, 同时也验证了数学模型的合理性。数学模型和实验结果同时表明, 从光腔中提取功率, 光腔压力将有一定程度的下降, 将实验条件参量代入模型计算, 得出比功率为 50 J/g 时, 光腔压力比无功率输出时下降约 7.4%。

关键词 激光器; 化学激光器; 光腔压力; 功率提取; 压力恢复

中图分类号 TN 248.5 **文献标识码** A

Effect of Output Power on the Pressure of Cavity in Continuous Wave DF Chemical Lasers

Yan Baozhu Yuan Shengfu Lu Qisheng Hua Weihong Wang Hongyan

(College of Opto-Electric Science and Engineering,

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

Abstract To study the effect of output power on the pressure of cavity in continuous wave (CW) DF chemical lasers, a series of experiments are conducted based on a small-scale combustion-driven CW DF chemical laser. The result shows that greater specific power will result in lower cavity pressure. An algebraic model from combustor to the exit of cavity is constructed by using one-dimension steady state theory and cavity dynamics theory, then the dependence of cavity pressure on specific power is attained. The result is consistent with experiments, so the model explains the effect of output power on the pressure of cavity, and the result indicates that the model is logical. Both the model and experiments show that cavity pressure falls down because of output power. When specific power is 50 J/g, cavity pressure will be reduced by 7.4% theoretically in the experimental condition.

Key words lasers; chemical lasers; cavity pressure; output power; pressure recovery

1 引 言

压力恢复系统的体积和重量在整个化学激光器中所占的比例很大, 为了使化学激光器更加紧凑化、实用化, 如何减小压力恢复系统的体积成为关键。因此, 压力恢复是燃烧驱动连续波化学激光器的重要研究内容之一^[1,2], 也是化学激光器研究人员一直关心的问题, 人们通过各种方法来提高化学激光器的恢复压力, 如改善超声速扩压器性能^[3]、利用超声速引射器^[4~6]等。光腔压力是压力恢复的初始

值, 它在很大程度上决定了恢复压力的大小。功率提取是从光腔气流中提取能量的过程, 必将引起气流参量(特别是光腔压力)的变化, 因此, 研究功率提取对光腔压力的影响, 是一项非常有意义的工作。从光腔中提取功率, 光腔气流的总能量减小, 本文首先通过实验证实了光腔压力将随着提取功率的增大而减小, 然后利用一维定常流理论和 Driscoll 等^[2]提出的光腔动力学理论, 建立了连续波 DF 化学激光器从燃烧室到光腔出口的一维数学模型, 进而给

收稿日期: 2007-07-12; 收到修改稿日期: 2007-09-28

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, 主要研究方向为高能激光技术、激光与物质相互作用、非线性光学。E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

出了功率提取对光腔压力影响的理论解释。

2 实验装置和方法

整个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 激光器装置,它是一个采用 HYLTE(Hypersonic, Low Temperature nozzle)喷管的单喉道激光器^[7,8](Single Throat Laser, STL),图 1 给出了实验装置的外形结构,其中激光器主体内部结构如图 2 所示。图 2 中着重标出了燃烧室压力(P_0)和光腔出口压力(P_3)的测量位置。该激光器的工作原理是: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。实验中,激光器的光腔采用平凹稳定腔,光轴位置定在喷

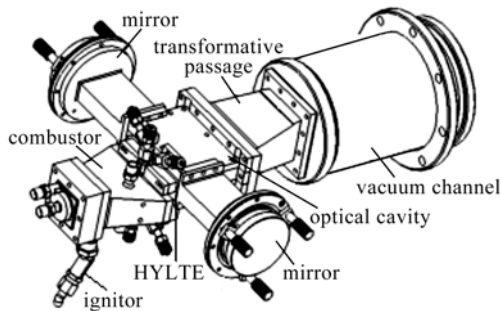


图 1 实验装置外形结构

Fig. 1 Figuration of experimental apparatus

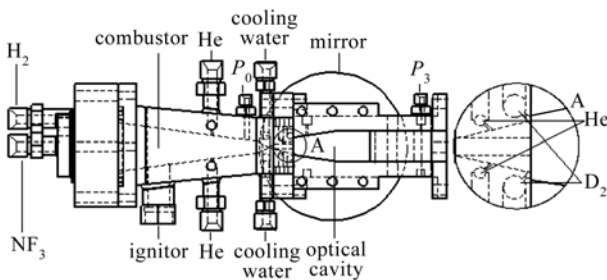


图 2 激光器主体模块的内部结构

Fig. 2 Interior structure of STL

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;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。

实验中,保持激光器各输入气流参量不变,通过调节腔镜的相对位置,使光腔处于完全失调、部分失调和调准状态,分别对应不同的输出功率,以得到光腔压力随提取功率的变化关系。

3 实验结果

表 1 中给出了三次实验的数据,实验 1,2 和 3 分别对应光腔完全失调、部分失调和调准状态。三次实验中,各阀门开启的时序相同,各气流的输入参量不变,测得的燃烧室压力 P_0 几乎不变,可以认为,除了提取的功率 P_{out} 不同,三次实验的工作状态完全相同。实验中,每次出光 2 s,表中的光腔压力 P_3 取出光期间的平均值。由表 1 可得,随着提取功率的提高,光腔压力缓慢下降。

表 1 DF 化学激光器实验结果

Table 1 Experimental results of DF chemical laser

Experiment	1	2	3
P_{out} / W	0	15.8	63
P_0 / kPa	156.3	155.4	155.7
P_3 / Pa	857	824	817

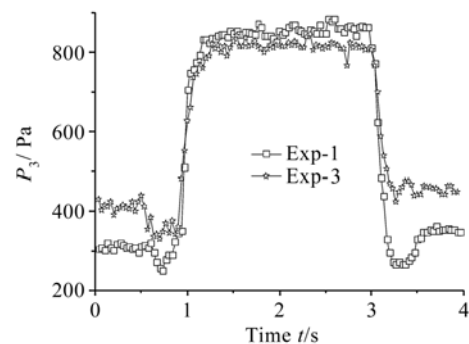


图 3 实验 1 与实验 3 的光腔压力比较

Fig. 3 Cavity pressure of experiment 1 and experiment 3

图 3 给出了实验 1 和实验 3 中光腔压力随时间的变化关系,图中第 0.5 s 之前,光腔中只通入保护腔镜的 N_2 ,光腔压力基本不变,但实验 3 的光腔压力高于实验 1。这是因为经过实验 1 和实验 2 之后,真空罐压力略有上升;随着第 0.5 s 主气流的加入,光腔起动,形成超声速气流,光腔压力明显下降;随着第 0.9 s D_2 的加入,光腔压力迅速上升;第

2.9 s 关闭主气流和 D_2 , 激光器停止运转, 光腔压力迅速下降至真空罐压力。由图 3 可见, 在整个出光期间, 由于实验 3 有一定的功率输出, 光腔压力始终低于实验 1。

实验结果表明, 从光腔中提取功率, 使光腔压力在一定程度上下降, 提取的功率越高, 光腔压力越低, 这与预计的结果一致。

4 理论分析

4.1 一维模型

图 4 所示为连续波 DF 化学激光器从燃烧室到光腔出口的一维数学模型示意图。其中, p, s, b 分别表示主气流、副气流和基区, 位置 1, 2, 3 分别为主喷管入口、喷管出口平面(光腔入口)、光腔出口。主、副喷管采用一维定常流理论进行计算, 从喷管出口两气流混合, 到光腔出口, 这部分采用 Driscoll 等提出的动力学理论^[2]进行计算。

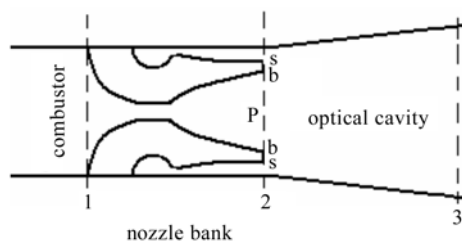


图 4 一维数学模型示意图

Fig. 4 Schematic of one-dimension model

连续波 DF 化学激光器喷管阵列中, 各喷管喷出的气流一般为超音速流, 喷管出口气流参量可根据一维定常流理论进行计算。对于主、副气流, 根据喷管的扩张比, 利用连续方程^[9], 可求得主气流速度系数。由速度系数和滞止参量, 可求得主、副气流的静参量、马赫数和速度^[9]。由于主喷管面积比大、喉道面积小, 气流粘性引起的总压损失比较大, 需要对主气流参量作一定的修正, 这里将气流参量直接乘以一定的修正系数来近似处理。

文献^[2]中已证明, 主、副气流先混合后反应, 与实际过程中的混合和反应同时进行, 两种途径的计算结果是一致的。所以, 为了方便计算, 本文根据 Driscoll 等提出的方法, 首先建立主、副气流的混合模型, 然后建立光腔动力学模型, 最终得到光腔出口气流参量, 这部分内容在文献^[2]中有比较详细的说明和公式推导。需要说明的是, 文献^[2]为了得到光腔内抽运反应前后气流的动量方程, 采用 Crocco 首先提出的压力-面积关系式^[10]

$$PA^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}} = C(\text{constant}), \quad (1)$$

式中 P, A 分别表示光腔各位置的压力和横截面积, ϵ 是需要确定的常数。显而易见, 当 $\epsilon = 1$ 时, (1) 式表示等面积光腔, 当 $\epsilon = 0$ 时, 表示等压力光腔, 当 $0 < \epsilon < 1$ 时, 表示处于等面积光腔和等压力光腔之间的状态。可以看出, 不同的压力-面积关系式指数 ϵ 对应不同的光腔出口面积, 在设计光腔时, 可根据需要的 ϵ 设计光腔尺寸。而对于本文的计算, 光腔出口面积是给定的, 通过它可以反推出 ϵ 的大小, 并最终得出光腔出口的气流参量。下面给出由混合后的气流参量和光腔出口面积, 反推 ϵ 和光腔出口气流参量的计算过程。

假设忽略气流与光腔壁面的热传导, 则光腔中反应前后的气流满足能量守恒方程^[2]

$$n_3 h_{3I}(T_{3I}) + \frac{1}{2} n_3 \omega_3 u_{3I}^2 = n_2 h_{02} + Q - n_2 \omega_2 \sigma, \quad (2)$$

式中 $n, h, T, \omega, u, \sigma$ 分别表示气流的摩尔流量、显焓、温度、分子量、速度和激光器比功率, 下标 0 表示滞止参量, 下标 2, 3 分别表示喷管出口平面和光腔出口的气流参量(见图 4), 下标 I 表示未经边界层修正的计算结果(= inviscid), 另外, 抽运反应放出的总热量为

$$Q = n_F h_{fF} - n_{DF} h_{fDF} - n_{D} h_{fD},$$

式中 h_{fi} 为物质 i ($i = F, DF, D$) 的标准生成焓。根据(2)式可得出光腔出口速度 $u_{3I}(T_{3I})$ 为光腔出口温度的函数。将其代入理想气体状态方程

$$P_{3I} V_{3I} = n_3 R T_{3I}, \quad (3)$$

得出光腔出口压力 $P_{3I}(T_{3I})$, 其中, R 为普适气体常数, 体积流量 $V_{3I} = u_{3I} A_3$ 。反应前后动量方程为^[2]

$$\{P(T) A [\epsilon + kMa(T)^2]\}_{3I} = [PA(\epsilon + kMa^2)]_2, \quad (4)$$

式中 k, Ma 分别为气流的比热比和马赫数, $Ma(T_{3I}) = u_{3I}(T_{3I}) / \sqrt{k_3 RT_{3I} / \omega_3}$, 可得到压力-面积关系式指数随光腔出口温度的变化关系 $\epsilon(T_{3I})$, 将 $P_{3I}(T_{3I})$ 和 $\epsilon(T_{3I})$ 代入(1)式解出光腔出口气流温度 T_{3I} , 并根据(2)~(4)式求得光腔出口气流参量和压力-面积关系式指数 $\epsilon(T_{3I})$ 。

在光腔中, 由于总压很低, 边界层生长得比较厚, 其对气流的影响同样不能忽略, 所以需要对结果进行边界层修正。文献^[2]根据文献^[11]中介绍的方法对计算结果进行修正, 为了简化计算, 本文将上述结果直接乘以一定的修正系数得到近似结果。

4.2 模型计算结果

各种气体的热容和显焓采用美国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 提供的拟合曲线^[12], 将实验装置的结构参量和各气路的入口参量代入数学模型进行计算, 得到实验条件下, 光腔压力随比功率的变化关系曲线, 如图 5 实线所示。由图 5 可知, 激光器光腔压力随比功率的升高而缓慢下降, 当比功率为 50 J/g 时, 光腔压力比无功率输出时下降约 7.4%。比功率对计算结果的影响只是表现在(2)式中, 当比功率为 50 J/g 时, 式中等号右侧含比功率的一项值为另两项之和的 1.9%, 这是比功率为 50 J/g 时, 光腔压力下降 7.4% 的原因。

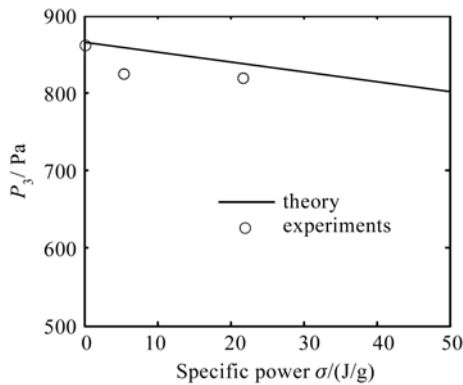


图 5 腔压随比功率的变化关系

Fig. 5 Relationship of cavity pressure and specific power

由(2)式可知, 从光腔中提取功率, 光腔气流的总能量减小, 这将直接引起气流总温度的下降, 相应地, 气流的静温、速度和压力都会有所改变, 但是由于静温和速度都不易被测量, 因此实验中只是测量了压力的变化。而理论计算中没有类似的限制, 可以得到气流的静温和速度。计算表明, 当比功率为 50 J/g 时, 气流的静温下降 4% 左右, 速度增加约 3.4%。总温下降, 静温相应减小。因为光腔出口静压减小, 光腔出、入口的压差减小, 由动量方程(4)可知, 气流在光腔中的减速过程变弱, 所以光腔出口气流速度增大。综上所述, 提取功率使光腔压力减小, 表现在两个方面: 1) 静温降低, 根据理想气体状态方程(3), 压力相应降低; 2) 速度增大, 部分势能转化为动能, 或根据理想气体状态方程, 光腔压力减小。另外, 压力-面积关系式(1)中, 指数 ϵ 也随比功率的改变而略有变化, 当比功率的取值范围为 0~50 J/g 时, ϵ 的变化范围为 0.71~0.72。

图 5 中同时画出了三次实验测得的数据点, 由图 5 可见理论计算与实验结果基本吻合, 这表明所

采用的理论模型是合理的, 它能够较好地反映功率提取对光腔压力的影响。

5 结 论

通过一台小型燃烧驱动连续波 DF 激光器装置, 得到光腔压力随提取功率的提高而不断减小的结论。利用一维定常流理论和 Driscoll 等提出的光腔动力学理论, 建立了连续波 DF 化学激光器从燃烧室到光腔出口的一维数学模型, 模型的计算结果显示, 随着比功率的提高, 光腔压力略有下降。将实验装置的结构参量和气流参量代入模型得到, 当比功率为 50 J/g 时, 光腔压力的理论值下降约 7.4%。模型计算结果与实验结果基本一致, 表明理论模型合理, 能够较好地反映光腔内气流的动力学性质和功率提取对光腔压力的影响。

从光腔中提取功率, 还将引起光腔气流静温等参数的变化, 由于实验条件的限制, 这些参数的变化都不易被测量, 所以实验部分只测量了静压的变化。如果条件允许, 可以进行光腔静温的测量, 以便更好地理解功率提取对光腔气流参数的影响, 同时可以进一步验证理论模型的合理性。另外, 该理论模型的思想同样可应用于其他类型的气动激光器, 比如电激励红外化学激光器^[13]和氧碘化学激光器^[14,15]。

参 考 文 献

- Robert F. Walter, Robert A. O'Leary. Pressure Recovery in COIL Devices [C]. 25th Plasmadynamics and Lasers Conference, Colorado, AIAA, 1994. 2456
- Richard J. Driscoll, Lamar F. Moon. Pressure recovery in chemical lasers [J]. *AIAA Journal*, 1977, **15**(5):665~673
- M. G. Ktalcherman, V. M. Mal'kov, N. A. Ruban. Experimental investigation of GDL diffusers [C]. AIAA 21st Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, Seattle, AIAA, 1990. 1512
- J. C. Dutton, C. D. Mikkelsen, A. L. Addy. A theoretical and experimental investigation of the constant area, supersonic-supersonic ejector [J]. *AIAA Journal*, 1981, **20**(10):1392~1400
- George Emanuel. Optimum performance for a single-stage gaseous ejector [J]. *AIAA Journal*, 1976, **14**(9):1292~1296
- R. Acebal. Multi-stage steam ejector methodology: model development and application to high energy lasers [C]. AIAA 18th Fluid Dynamics and Plasmadynamics and Lasers Conference, Cincinnati Ohio, AIAA, 1985. 1601
- 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
- 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 Pan Jinshan, Fang Rensong, Shen Zhenhua *et al.*. Elements of Gasdynamics [M]. Revised edition. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. 18~34
潘锦珊, 方人淞, 申振华 等. 气体动力学基础[M]. 修订版. 西安:西北工业大学出版社, 1995. 18~34
- 10 L. Crocco. One-Dimensional Treatment of Steady Gas Dynamics [M]. Xu Huafang trans.. Beijing: Science Press, 1985. 45
L. 克罗柯. 定常气体动力学的一维处理法[M]. 徐华舫译. 北京:科学出版社, 1985. 45
- 11 Richard J. Driscoll. Study of the boundary layers in chemical laser nozzles [J]. *AIAA Journal*, 1976, **14**(11):1571~1577
- 12 <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- 13 Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Zhang Peng *et al.*. Choice of cavity's parameters for a discharge driven infrared multi-band chemical laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1040~1044
王红岩, 袁圣付, 张鹏 等. 电激励红外多波段化学激光器的光腔参量选择[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1040~1044
- 14 Zhang Yuelong, Fang Benjie, Chen Fang *et al.*. Primary experimental investigation on 1 kW class verti-COIL [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1):21~24
张岳龙, 房本杰, 陈方 等. kW 级立式氧碘化学激光器的初步实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(1):21~24
- 15 Du Yanyi, Shu Xiaojian, Li Shouxian. Effects of heat release from near-resonant energy transfer on chemical oxygen-iodine laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1224~1227
杜燕怡, 束小建, 李守先. 近共振传能放热对氧碘化学激光器性能的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1224~1227