

# 载气密闭循环氧碘化学激光技术模拟实验研究<sup>\*</sup>

石文波, 李庆伟, 耿自才, 李永钊, 周灿华, 贾淑芹, 张岳龙, 房本杰, 金玉奇

(中国科学院 化学激光重点实验室, 中国科学院 大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 载气密闭循环氧碘化学激光器技术是一种有望大幅减小氧碘化学激光器体积和降低运行成本的技术,然而至今鲜见相关实验报道。采用超音速喷管加双螺杆真空泵建成了模拟实验装置,并通过测量超音速喷管前后和双螺杆真空泵出入口处的气动参数的方法开展了载气密闭循环氧碘化学激光器的可行性研究和稳定性模拟实验研究。模拟实验研究结果证明了该技术的可行性,发现并分析了其光腔压力随双螺杆真空泵转速提高而出现压力拐点的现象,确定了其稳定运行工作条件,为实现载气密闭循环氧碘化学激光器的真正运行和小型化奠定了良好的基础。

**关键词:** 氧碘化学激光; 载气; 密闭循环; 压力恢复技术; 超音速

**中图分类号:** TN248.5      **文献标志码:** A      **doi:**10.11884/HPLPB201729.170204

氧碘化学激光(以下简称 COIL)是目前波长最短、唯一运行在电子态跃迁的化学激光<sup>[1-3]</sup>。它具有波长短、放大性好、效率高、光束质量好、光纤传输效率高等优点,在军事和工业领域展示出了广阔的应用前景<sup>[4-8]</sup>。COIL 是一种运行在低压下的气体流动激光器,为了保证其正常运行,其尾气(包括载气、氧气、氯气、碘蒸气和水蒸气)通常采用通过压力恢复系统全部排出激光器或者全部吸收的方法处理<sup>[6,9-12]</sup>,这两种压力恢复技术导致了目前 COIL 系统体积庞大和运行成本高昂。

因此,John Vetrovec 于 2000 年提出了一种载气密闭循环的氧碘化学激光器(以下简称 CGC-COIL)<sup>[10,13]</sup>技术的概念设想,即采用尾气吸附吸收系统吸收 COIL 尾气中的氧气、氯气、碘蒸气和水蒸气,而剩下的大量惰性载气则通过高增压比真空气体压缩机增压实现密闭循环使用,以达到大幅减小 COIL 体积、节省载气用量降低 COIL 运行成本的目的。然而,至今未见该技术设想的相关实验研究报道,原因可能有两个方面:(1)满足运行要求的高增压比真空气体压缩机目前尚无成熟产品,需针对性特殊设计且价格昂贵;(2)在无任何可行性实验研究基础的情况下就订购一套高增压比真空气体压缩机的经济风险太大,系统比较复杂,没有任何前期理论和模拟实验研究就进行全系统的工程研制风险也太大。

从解决 COIL 小型化的迫切需求和降低工程研制风险的角度出发,预先开展模拟实验研究具有非常重要的意义。而厘清载气密闭循环的可行性并得到其初步的稳定运行规律是 CGC-COIL 模拟实验首先需要解决的问题。根据这一考虑,本实验研究舍弃了废气吸收装置、热管理系统、低温分子筛吸附系统和旁路等对 CGC-COIL 载气密闭循环影响较小且比较复杂的部件,设计和搭建了以超音速喷管和双螺杆真空泵为主要组成部件的模拟实验装置,并通过测量 COIL 超音速喷管前后和双螺杆真空泵出入口处的气动参数的方法开展了 CGC-COIL 的可行性和工作稳定性模拟实验研究。

## 1 实验装置

CGC-COIL 模拟实验装置如图 1 所示。超音速喷管、模拟光腔、超音速扩压器和亚音速扩压器采用一体化轴对称设计,由不锈钢加工制成。其中,喷管喉道直径为 10 mm,喉道至超音速喷管出口的长度为 25 mm,超音速喷管出口直径为 14 mm;光腔压力和光腔总温测量点位于模拟光腔的中部,距离超音速喷管出口 35 mm;超音速扩压器的直径为 25 mm,长度 250 mm;亚音速扩压器的长度为 242 mm,出口直径为 76 mm。扩压器出口连接双螺杆真空泵入口,双螺杆真空泵出口再与超音速喷管的进口相连。双螺杆真空泵采用德国 Elmo Rietschle 公司生产的 S-VSB 800 型号真空泵,理论极限真空度 5 Pa,理论气体流量为 560 m<sup>3</sup>/h @ 50 Hz (螺杆转速:2850 r/min)、700 m<sup>3</sup>/h @ 60 Hz (螺杆转速:3450 r/min),其转速由变频器控制调节,用于将从扩压

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-06-08; 修订日期:2017-08-22

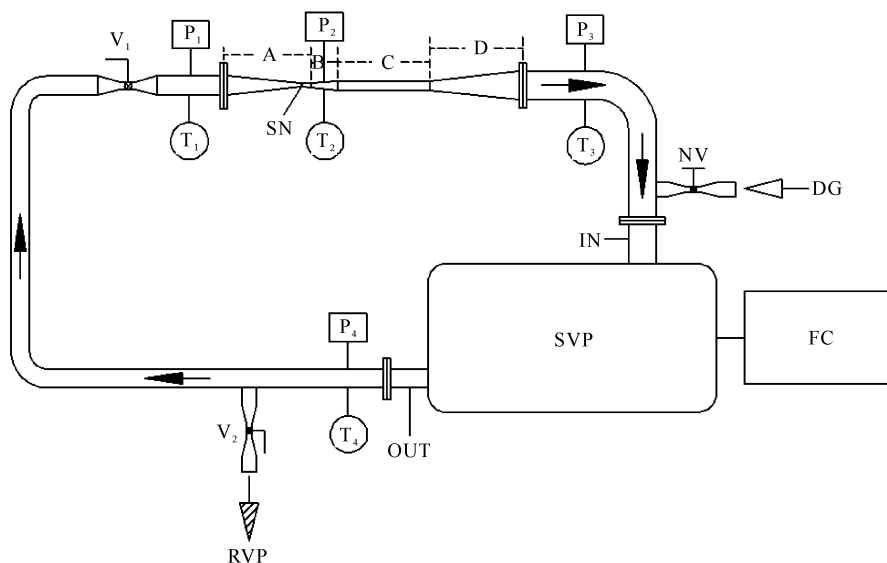
基金项目:中国科学院科技创新基金项目(CXJJ-16M117)

作者简介:石文波(1980—),男,副研究员,主要从事氧碘化学激光方面的基础研究工作;swb@dicp.ac.cn。

通信作者:李庆伟(1976—),男,副研究员,主要从事化学激光及其压力恢复技术研究工作;liqw@dicp.ac.cn。

器出来的气体进行升压,以保证整个 CGC-COIL 模拟系统的载气密闭循环运行。

实验前,首先用小型旋片真空泵将系统抽空,然后从针阀处通入所需气体(如氮气、氦气等),反复置换三次,以保证系统中的气体纯度。实验时,启动双螺杆真空泵,让系统中的气体沿图 1 中实心箭头所示的方向流动,然后通过固定及改变变频器频率(即改变真空泵转速从而改变真空泵的体积流量)、调节球阀 1 开度和改变系统中的气体量等方式来产生不同的系统工作条件,以研究不同工作条件下的系统工作状态。系统的工作状态通过处理和分析设置在上游、模拟光腔、双螺杆真空泵入口和出口的压力传感器和热电偶测量得到的压力和总温数据确定。



A: supersonic nozzle; B: simulation laser cavity; C: supersonic diffuser; D: subsonic diffuser; P<sub>1</sub>: Pressure sensor in the plenum region; P<sub>2</sub>: Pressure sensor in the simulation laser cavity; P<sub>3</sub>: Pressure sensor in the pump inlet; P<sub>4</sub>: Pressure sensor in the pump outlet; T<sub>1</sub>: Thermometer in the plenum region; T<sub>2</sub>: Thermometer in the simulation laser cavity; T<sub>3</sub>: Thermometer in the pump inlet; T<sub>4</sub>: Thermometer in the pump outlet; SN: Supersonic nozzle throat; V<sub>1</sub>: Ball valve 1; V<sub>2</sub>: Ball valve 2; NV: Needle valve; DG: Diluted gas; SVP: Screw vacuum pump; IN: Inlet of the screw vacuum pump; OUT: Outlet of the screw vacuum pump; FC: Frequency converter; RVP: Rotary vacuum pump; Solid arrow: Direction of gas flow; Hollow arrow: Inlet of diluted gas; Twill arrow: Outlet of the gas.

Fig. 1 Schematic of closed diluted gas cycle chemical oxygen iodine laser (CGC-COIL) simulation experiment setup

图 1 CGC-COIL 模拟实验装置示意图

## 2 结果和讨论

### 2.1 CGC-COIL 运行可行性研究

该研究采用固定变频器频率,调节手阀 1 使上游压力保持在 COIL 常用上游工作压力,测量系统四个测量点处压力大小的方式进行。图 2 为 CGC-COIL 运行可行性研究的典型实验结果,系统中的气体为 N<sub>2</sub> 气,变频器频率为 35 Hz。从图 2 可以看出:上游压力平均为 4804 Pa,光腔压力平均为 396 Pa,真空泵入口压力平均为 806 Pa,真空泵出口压力平均为 16 884 Pa。

根据文献[14],超音速气体总压、静压和马赫数的关系可以表示为

$$\frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

式中: $p^*$  为喷管上游总压; $p$  为光腔中的静压; $\gamma$  为气体的比热容比; $Ma$  为气流马赫数。在超音速喷管的上游,气流为马赫数小于 0.1 的亚音速流动,其气体静压近似等于气体总压。

将由图 2 得到的上游压力、光腔压力和氮气的  $\gamma$  值 1.40 代入到式(1)得到此时的气流马赫数为 2.28。同时,比较光腔平均压力和真空泵入口压力可以看出后者是前者的约 2.04 倍。因此,由图 2 可以得到以下结论:CGC-COIL 不但可以运行,而且按照最初的设计在模拟光腔处建立起了 2 倍马赫数的超音速,经扩压器达到了不小于 2 倍的恢复压力。另外,由图 2 还可以看出:虽然受双螺杆泵工作特点的影响,真空泵出入口的气压波动很大,但是上游压力和光腔压力的波动并不大。这一结果表明,即使采用出入口气压变化较大的气体增压装

置,CGC-COIL 中上游压力和光腔压力的波动也不会太大,从而保证了 CGC-COIL 的稳定运行,证明了该 CGC-COIL 激光器的可行性。

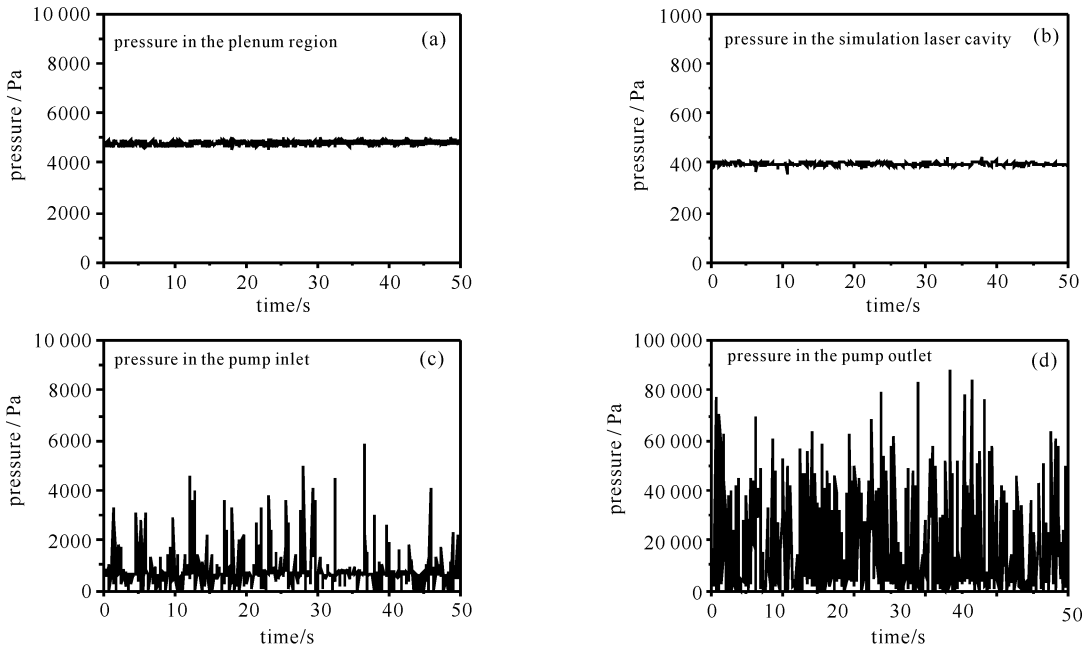


Fig. 2 Typical experimental results of CGC-COIL feasibility research

(Gas medium: nitrogen gas; Frequency of the frequency converter: 35 Hz)

图2 CGC-COIL 系统运行可行性研究的典型实验结果(气体介质: N<sub>2</sub> 气;变频器频率: 35 Hz)

## 2.2 CGC-COIL 模拟器工作稳定性研究

图3为实验研究中得到的典型的上游压力和光腔压力与变频器频率之间的关系图,所用气体为 N<sub>2</sub> 气。从图3可以看到三个现象:(1)上游压力随着变频器频率的增加而单调增加;(2)光腔压力先随着变频器频率的增加而快速减小,然后在某一个变频器频率处出现压力拐点,之后随着变频器频率的增加而略有增加;(3)随着变频器频率的增加,上游压力和光腔压力的波动强度起先与变频器频率无关,而后在变频器频率达到一较高水平时随着变频器频率的增加而不断增加。

第一个现象的产生原因如下:

根据文献[14],超音速气体的流量公式为

$$W = K_m \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} A \quad (2)$$

式中:  $W$  为气体的质量流量;  $K_m = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ ,  $R$

为气体普适常数;  $T^*$  为喷管上游总温;  $A$  为超音速喷管的喉道面积。根据式(2)可知,在其他条件不变的情况下,通过超音速喷管的气体流量与超音速喷管的上游压力成正比。同时,双螺杆真空泵的排气量与双螺杆真空泵的转速(即:变频器频率)成正比。因此,变频器频率的增加必然导致上游压力的单调增加。

第二个现象与 CGC-COIL 光腔部分的激波有关,关系到 CGC-COIL 的稳定工作问题,所以下面重点解释这一现象的产生原因。

将图3中的上游压力与光腔压力相比得到如图4所示的上游压力与光腔压力比图。从图4中可以看出:(1)图4中出现拐点的频率(简称:拐点频率)与图3中光腔压力出现拐点的频率相对应;(2)在图4中,当变频器频率高于拐点频率时,上游压力与光腔压力比不再随变频器频率的变化而变化。

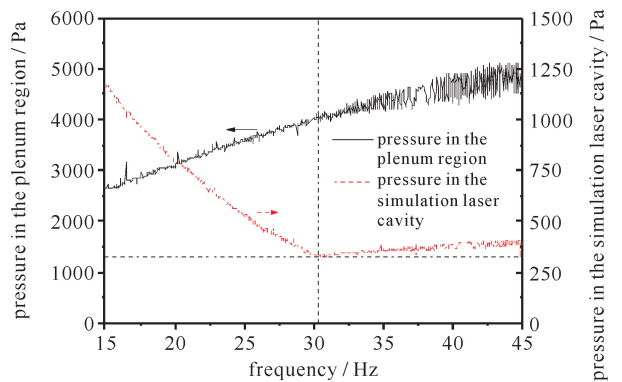


Fig. 3 Relationship between frequency of frequency converter and pressures in plenum region and in simulation laser cavity of CGC-COIL

图3 CGC-COIL 模拟实验研究中上游压力和光腔压力与变频器频率之间的关系

根据文献[15]研究,在 COIL 中,当超音速气体进入到光腔及后续的超音速扩压器时将形成如图 5 所示的激波串<sup>[15]</sup>。其中,第一个斜激波前面的气流为超音速,其压力不受背景压力的影响,而第一个斜激波后面的气流由于是超音速和亚音速交替变换的气流,其压力将受到背景压力的影响。

因此,与文献[15]中的激波串现象比较,本文对图 3 及图 4 中拐点频率的形成原因作出了如下解释:拐点频率对应于激波串中的第一个激波刚好位于光腔处的变频器频率;当变频器频率高于拐点频率时,双螺杆真空泵的排气能力较强,第一个斜激波位于光腔的后面,光腔中的气流不受后方气流的影响,表现为上游压力与光腔压力比不随变频器频率的变化而变化(图

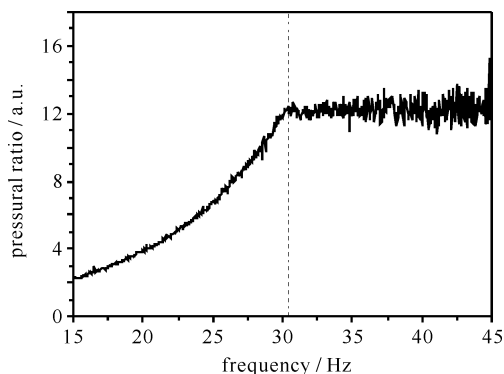


Fig. 4 Relationship between frequency of frequency converter and pressure ratio in plenum region and in simulation laser cavity

图 4 上游压力与光腔压力比与变频器频率之间的关系

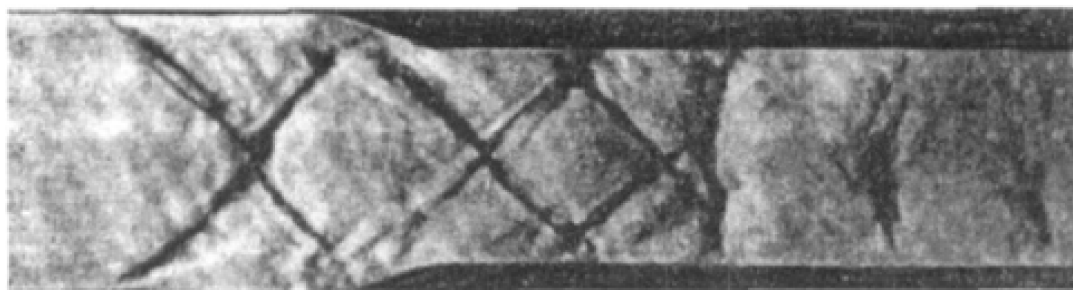


Fig. 5 Photo of shock wave train in supersonic diffuser<sup>[15]</sup>

图 5 超音速扩压器激波串照片<sup>[15]</sup>

2 所示 CGC-COIL 稳定工作情形即为这种情形);当变频器频率低于拐点频率时,双螺杆真空泵的排气能力较弱,第一个激波位于光腔的前面,光腔中的气流受到后方气流的影响,从而使得上游压力与光腔压力比随着变频器频率的减小而减小。

同时,由图 4 得到的第 2 点结论还表明,拐点之后光腔压力随着变频器频率的增加而略有增加完全是由上游压力的升高造成的。

由图 3 得到的第三个现象同样与激波串有关,但与第二个现象不同的是此现象中的激波串来源于手阀 1。手阀 1 可以看作是一个能够调节喉道孔径的文氏管,其作用是通过自身开度的调节使上游压力保持在 COIL 常用上游工作压力,以尽量模拟 COIL 的正常工作状态。作为文氏管,手阀 1 的后续管道中也会产生激波串,且激波串中的第一个激波强度最强,后续的激波强度不断减弱直至当气流达到亚音速时激波消失。

因此,上游压力波动随变频器频率变化情况可以作如下解释:当变频器频率比较低时,上游区域中的气流处于亚音速状态,此时上游压力的波动强度与变频器频率无关;随着变频器频率的增加,手阀 1 后续管道中的激波串将会不断后移,当激波串中的最后一个激波出现在上游区域时,上游压力将开始出现波动;随着变频器频率的进一步增加,激波串进一步后移,上游压力的波动强度也变得越来越大。光腔压力与上游压力直接相关,因此光腔压力波动强度随变频器频率变化的情况与上游压力的波动情况相似。

需要说明的是,在实际的 CGC-COIL 中,上游区域的前面是单重态氧发生器,其后面没有激波串存在,所以不会产生 CGC-COIL 模拟实验中变频器频率较高时上游压力和光腔压力波动强度随变频器频率的增加而增加的现象。

总结以上实验结果可以看出:要使 CGC-COIL 系统的光腔处不出现激波,变频器频率应该高于拐点频率;同时,由于变频器频率高于拐点频率后光腔压力会有所升高,所以 CGC-COIL 稳定运行的最佳变频器频率为略高于拐点频率的频率。

### 3 结 论

本文采用超音速喷管加双螺杆真空泵组成 CGC-COIL 模拟器的方法开展了模拟实验研究,实验研究结果

证明了 CGC-COIL 的可行性,发现并分析了其光腔压力随变频器频率(双螺杆真空泵转速)增加而出现压力拐点的现象。同时,通过对光腔压力拐点问题的研究还进一步确定了 CGC-COIL 稳定工作所需的条件。

**致 谢** 感谢中国科学院大连化学物理研究所回晓康高级工程师、初荣清高级技师和单隼冬高级技师在实验中提供的帮助。

### 参考文献：

- [1] McDermott W E, Pchelkin M V, Benard D J, et al. An electronic transition chemical laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1978, **32**(8):469-470.
- [2] Truesdell K A, Lamberson S E. Phillips laboratory COIL technology overview[C]//Proc of SPIE. 1992, **1810**:476-492.
- [3] Yuryshv N N. Chemically pumped oxygen-iodine laser[J]. *Quantum Electron*, 1996, **23**:583-600.
- [4] Tei K, Sugimoto D, Ito T, et al. Technical progress in industrial COIL[C]//Proc of SPIE. 2005, **5777**:281-289.
- [5] Vetrovec J. Prospects for an industrial chemical oxygen-iodine laser[C]//Proc of SPIE. 1996, **3092**:723-726.
- [6] Duff E A, Truesdell K A. Chemical oxygen iodine laser (COIL) technology and development[C]//Proc of SPIE. 2004, **5414**:52-68.
- [7] Ilyin S P, Buzoverya V V, Adamenkov A A, et al. Industrial COIL systems. Part 1. Laser beam delivery by fiber[C]//Proc of SPIE. 2005, **5777**:290-293.
- [8] Kolobyanin Y V, Bulatkin I A, Kalinovski V V, et al. Industrial COIL systems. Part 2. Gas-laser cutting[C]//Proc of SPIE. 2005, **5777**:294-297.
- [9] 刘宗政,郭隆德,吕金磊,等.引射式压力恢复系统的振动抑制技术[J].清华大学学报(自然科学版),2012, **52**(1):10-20. (Liu Zongzheng, Guo Longde, Lü Jinlei, et al. Ejector pressure recovery system's vibration control technology. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2012, **52**(1):10-20)
- [10] Vetrovec J. Chemical oxygen-iodine laser with a cryo-sorption vacuum pump[C]//Proc of SPIE. 2000, **3931**:60-70.
- [11] Vetrovec J. Chemical oxygen-iodine laser (COIL) with a cryosorption vacuum pump system: US, 6154478[P]. 2000-10-28.
- [12] 夏良志,王金渠,桑凤亭,等.COIL 低温真空吸附床结构的改进[J].强激光与粒子束,2006, **18**(11):1765-1768. (Xia Liangzhi, Wang Jinqu, Sang Fengting, et al. Structure improvement of cryosorption bed for COIL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11):1765-1768)
- [13] Vetrovec J. Chemical oxygen-iodine laser with a closed gas cycle[C]//Proc of SPIE. 2001, **4184**:83-86.
- [14] 何立明,赵罡,程邦勤.气体动力学[M].北京:国防工业出版社,2009:63-79. (He Liming, Zhao Gang, Cheng Bangqin. *Aerodynamics*. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:63-79)
- [15] Luigi C. Section B one-dimensional treatment of steady gas dynamics[M]//Emmons H W. *Fundamentals of Gas Dynamics*. Princeton: Princeton University Press, 1958:64-349.

## Simulation experiment study on closed diluted gas cycle chemical oxygen iodine laser

Shi Wenbo, Li Qingwei, Geng Zicai, Li Yongzhao, Zhou Canhua,  
Jia Shuqin, Zhang Yuelong, Fang Benjie, Jin Yuqi

(Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The closed diluted gas cycle chemical oxygen iodine laser (CGC-COIL) was considered as a promising miniaturized laser; however, we haven't read any experimental study reports till now. In this study, a simulation experiment setup composed of supersonic nozzle and screw vacuum pump was built, and it was used to study the feasibility and the operation stability of CGC-COIL by means of measuring the inlet and outlet aerodynamic parameters of the supersonic nozzle and screw vacuum pump. The simulation experiments firstly demonstrated the feasibility of this type of laser, and then confirmed the optimal stable operation condition of this type of laser by finding and explicating the phenomenon that a simulation laser cavity pressure inflection point will appear with the increase of the revolving speed of screw pump. The study provides an experimental evidence for CGC-COIL realization and a new technological approach for chemical oxygen iodine laser miniaturization.

**Key words:** chemical oxygen iodine laser; diluted gas; closed cycle; pressure recovery technology; supersonic

**PACS:** 42.55. Ks; 47.40. -x