



·激光物理·

化学激光器扩压器启动特性研究*

李金雪, 任晓明, 郭 洲, 邱雄飞

(中国船舶集团公司 第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

摘 要: 为实现化学激光器的高速、低压尾气排入背压环境, 需开展扩压器的启动特性研究。建立扩压器的仿真分析模型, 根据激光器的实际工作需求, 进行了扩压器总压 11 kPa 时的流场仿真, 得到了不同背压情况下扩压器启动过程的流场, 并提出扩压器逐级启动的工作方式。仿真结果显示, 采用逐级启动的工作方式, 扩压器以总压 13 kPa 启动直排入 8 kPa 的背景, 流动稳定后将扩压器总压回调至 11 kPa, 实现了扩压器的正常启动。依托现有的激光器试车台进行了扩压器逐级启动的试验验证工作。试验结果表明, 该种启动方式能够实现扩压器工作能力的提高。

关键词: 化学激光器; 扩压器; 启动; 总压; 背压

中图分类号: V228.7

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210273

Study of diffuser's start up property in chemical lasers

Li Jinxue, Ren Xiaoming, Guo Zhou, Qiu Xiongfei

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

Abstract: To discharge the chemical laser's high-speed and low-pressure gas into the background, the start-up pressure determines the recovery pressure of the diffuser. Base on the laser's actual requirement, the transient model of the diffuser is established, and the different background pressure's flow field is obtained with the total pressure 11 kPa on the diffuser's inlet. The result shows that the diffuser can't set up successfully when the background pressure increased to 8 kPa. According to the result, a step setup mode is used, the diffuser start up with total pressure 13 kPa, when the flow field is steady, adjusting the inlet's total pressure to 11 kPa, the diffuser starts up successfully. Experiment is carried out on the DF laser's test-bed, the result shows that the diffuser's ability is advanced.

Key words: chemical laser, diffuser, start-up, total pressure, background pressure

在连续波 DF/HF 化学激光器中, 燃烧室的燃烧产物通过喷管列阵产生马赫数 4 左右的高速气流, 在激射腔中与副燃料进行反应, 生成激发态的粒子供光学提取并进行增益放大。此时激射腔内的静压一般维持在 2 kPa 以下^[1-4]。为了将激光器的低压尾气顺利排出, 激光器需后接扩压器进行尾气的减速增压。化学激光器启动时, 扩压器需要将激光器尾气推出到高背压的环境中, 实现激光器的出光, 若扩压器启动失败, 激射腔压力抬高, 激光器将无法出光, 扩压器的启动情况直接影响了激光器的出光。由于扩压器应用广泛, 国内诸多专家学者对其结构及性能进行了广泛的研究^[5-17], 但研究多基于稳态, 对扩压器启动的瞬态过程的研究并不多见^[15]。本文利用建立的扩压器仿真分析模型, 得到了扩压器启动全过程的流场。利用仿真分析的结果对扩压器的工作过程进行了改进, 提高了扩压器的启动压力, 进而提高了激光器的工作压力。

1 仿真分析

1.1 仿真模型及条件

根据激光器对接型号尺寸需求及扩压器工作气体(激光器尾气混气)性质, 建立直排型扩压器的仿真模型, 具体结构及激光尾气性质可见参考文献^[1]。

为了探讨扩压器启动阶段的工作情况, 分别进行了扩压器启动正常及启动失败两种过程的瞬态分析。状态参数如表 1 所示。

* 收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2022-02-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2015AA8063032)

联系方式: 李金雪, ljzyxzxg@163.com。

表 1 扩压器仿真参数
Table 1 Simulation parameters of the diffuser

total pressure/kPa	static pressure/kPa	total temperature/K	background pressure/kPa
11	1.30	1500	8
13	1.54	1500	8

1.2 仿真结果及讨论

1.2.1 启动失败过程分析

根据表 1 初始参数, 扩压器入口马赫数 2.3、扩压器总压 11 kPa、背压 8 kPa 时, 对扩压器启动过程的流场进行了仿真分析, 计算时间取 100 ms, 得到了扩压器启动过程的流场变化过程。图 1 为不同时刻的扩压器流场马赫云图, 由图可见, 扩压器内部的激波推出失败, 扩压器入口处马赫数降至 0.6, 激射腔压力急剧抬升, 扩压器启动失败, 激光器无法正常出光。

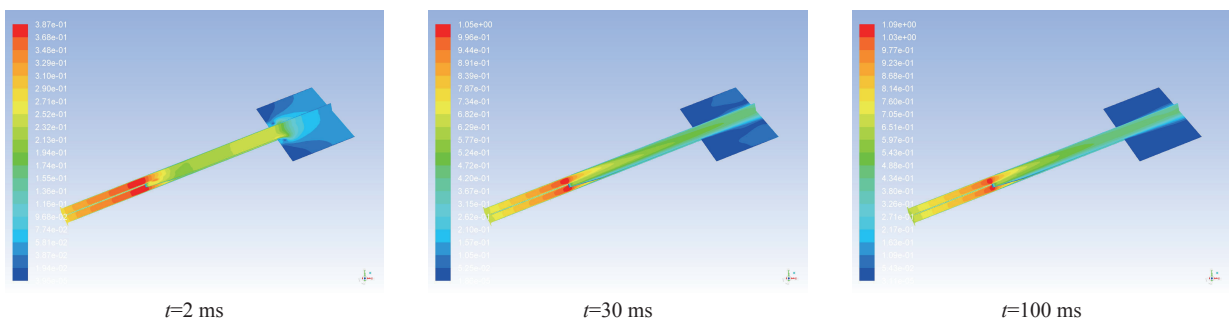


Fig. 1 Mach number contours of the diffuser with total pressure 11 kPa

图 1 总压 11 kPa 扩压器内部马赫云图

1.2.2 启动成功过程分析

扩压器背压维持 8 kPa, 扩压器入口总压提升至 13 kPa, 得到了扩压器启动成功的流动过程。图 2 为扩压器内部不同时刻的马赫云图, 由图可见, 激光器启动后, 扩压器通道内迅速建立起超声速流场, 将激光器尾气成功排出, 扩压器入口处维持马赫数 2.2, 激射腔维持 1.3 kPa 的低压, 扩压器成功启动。

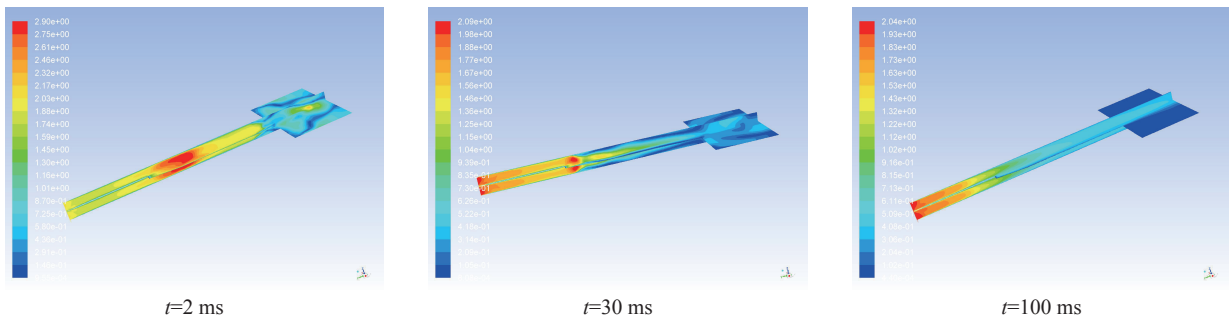


Fig. 2 Mach number contours of the diffuser with total pressure 13 kPa

图 2 总压 13 kPa 扩压器内部马赫云图

1.3 优化工况的仿真

为了提升扩压器的启动压力, 建立了一种逐级启动的工作方式, 仿真参数如表 2 所示。扩压器以总压 13 kPa 启动, 流场稳定后, 将扩压器总压回调至 11 kPa, 进行了逐级启动的扩压器流场的仿真分析。

计算时长 100 ms, 得到了不同时刻的扩压器内部马赫云图。如图 3 所示, $t=2$ ms, 扩压器进气, 流场开始建立,

表 2 逐级启动扩压器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the step-start diffuser

time/ms	total pressure/kPa	static pressure/kPa	total temperature/K	background pressure/kPa
0	13	1.54	1500	8
30	11	1.30	1500	8

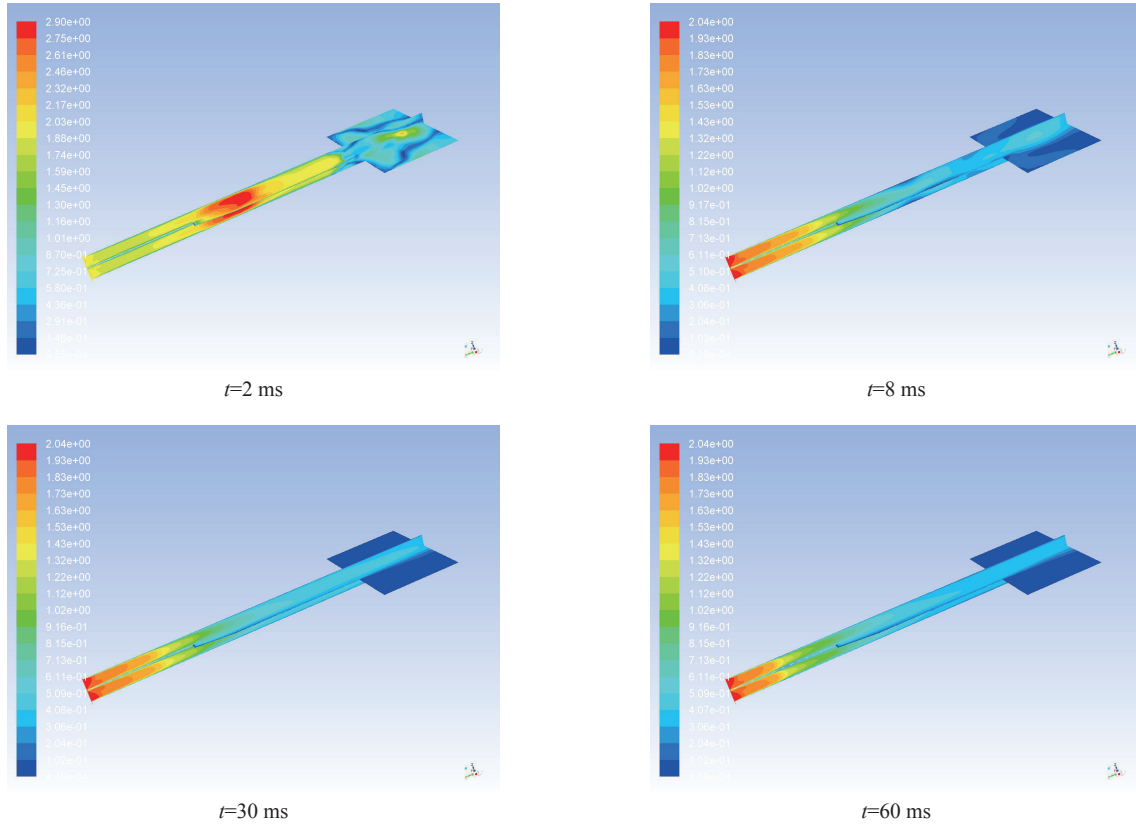


Fig. 3 Mach number contours of the diffuser with step-start diffuser

图3 逐级启动扩压器内部马赫云图

$t=8\text{ ms}$ 时, 扩压器入口马赫数 2.3, 扩压器启动成功, $t=30\text{ ms}$ 时, 扩压器入口处总压降为 11 kPa, 扩压器入口总能降低, 波系略有回收, $t=60\text{ ms}$ 时, 扩压器内部流场稳定, 扩压器维持成功启动状态, 激光器可以正常出光。

2 试验验证

依托课题组现有的化学激光器试车台, 进行了如表 3 所示 4 种工况的扩压器试验, 对数值仿真的结果进行了验证。试验过程中采用音速文氏管标定激光器流量, 通过减压器调节扩压器入口的总压, 采用功率计判定激光器出光情况。

表 3 扩压器试验参数

Table 3 Experiment parameters of diffuser

No.	total pressure/kPa	static pressure/kPa	total temperature/K	background pressure/kPa
1	11	1.30	1500	6.9
2	11	1.30	1500	7.2
3	11	1.30	1500	8.0
4	13~11(300 ms)	1.54~1.30(300 ms)	1500	8.0

在扩压器的入口、超扩、亚扩和直排段设置如图 4 所示的压力测点。进行了总压 11 kPa、背压分别为 6.6, 7.2 及 8.0 kPa 三种工况的扩压器工作状态研究, 得到了图 5 所示的扩压器沿程压力曲线对比图。如图所示, 背压为 6.6 kPa 及 7.2 kPa 时, 扩压器入口维持 1 kPa 的低压环境, 此时功率计显示激光器出光正常; 当背压升至 8.0 kPa 时, 扩压器入口处压力明显抬升(至 1.8 kPa), 此时激光器出光功率大幅下降, 激光器无法正常出光。

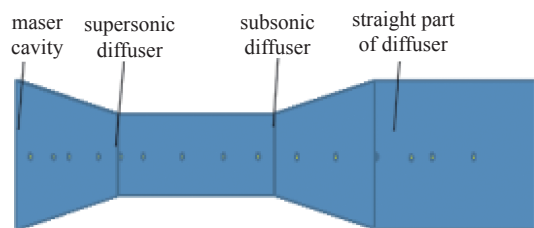


Fig. 4 Pressure sensors' distribution of the diffuser

图4 扩压器压力传感器位置分布

在进行扩压器逐级启动试验时,考虑到气体的填充时间以及电动减压器的调节时间等,扩压器以总压 13 kPa 启动后,间隔 300 ms 启动电动减压器的流量调节,

将扩压器总压回调至 11 kPa,得到了扩压器入口压力随时间变化的分布图。如图 6 所示,1.5 s 时,激光器启动主气流进气并点火,扩压器压力抬升,扩压器启动稳定后,入口压力回落;2 s 时,副气流注入,激光器以高流量启动出光,扩压器入口处压力为 1.2 kPa,此时激光器正常出光;激光器运行到 2.3 s 时,调节扩压器入口总压为 11 kPa,此时激光腔内压力没有明显变化,激光器正常出光,扩压器启动成功。

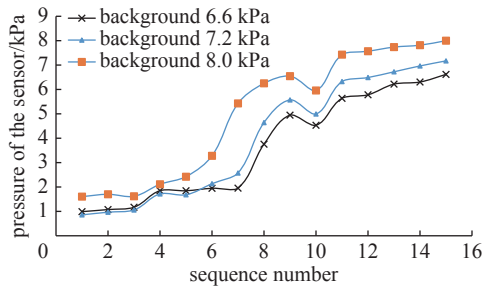


Fig. 5 Pressure's contract of the diffuser

图 5 扩压器实测压力曲线对比图

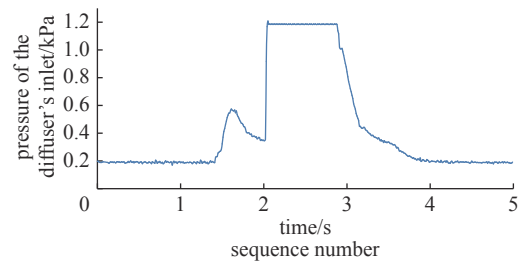


Fig. 6 Pressure's curve of the diffuser's inlet

图 6 扩压器入口压力曲线图

3 结论

建立了化学激光器扩压器的仿真分析模型,得到了扩压器启动过程的全流场。建立了一种逐级启动的激光器工作方式,扩压器背压为 8 kPa 时,扩压器以高总压 13 kPa 启动,流场稳定后将总压回调至 11 kPa,实现了扩压器的成功启动。通过试验对仿真分析的结果进行了验证,试验结果与仿真分析结果吻合良好,通过逐级启动的方式能够有效提升扩压器的恢复压力。研究结果对于提高激光器的可工作压力、拓宽激光器的应用背景具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李金雪, 王杰, 颜飞雪, 等. DF化学激光器扩压器流场仿真及优化[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 101002. (Li Jinxue, Wang Jie, Yan Feixue, et al. Simulation and optimization of DF chemical lasers' diffuser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 101002)
- [2] 李金雪, 颜飞雪, 王植杰. 可模拟不同背压环境的直排型扩压器装置[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 071003. (Li Jinxue, Yan Feixue, Wang Zhijie. Diffuser that can simulate different background pressure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 071003)
- [3] 符澄, 彭强, 刘卫红, 等. 光腔与扩压器化学反应流场优化数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 111009. (Fu Cheng, Peng Qiang, Liu Weihong, et al. Numerical simulation of chemical reaction flow optimization in cavity and diffuser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 111009)
- [4] 李桦, 范晓楠, 丁猛. 超声速扩压器中激波串结构的数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(1): 18-21. (Li Hua, Fan Xiaoqiang, Ding Meng. Numerical simulation of the shock train structure in the supersonic diffuser[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2002, 24(1): 18-21)
- [5] 余真, 李守先, 陈栋泉. 喷管、光腔及压力恢复系统一体化设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 533-537. (Yu Zhen, Li Shouxian, Chen Dongquan. Integrative design of nozzle, cavity and pressure recovery system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 533-537)
- [6] 童华, 孙启志, 张绍武. 高超声速风洞扩压器试验研究与分析[J]. 实验流体力学, 2014, 28(3): 78-81,103. (Tong Hua, Sun Qizhi, Zhang Shaowu. Investigation and analyse on the diffuser of hypersonic wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(3): 78-81,103)
- [7] 符澄, 彭强, 刘卫红, 等. 光腔与扩压器的一体化优化数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 111003. (Fu Cheng, Peng Qiang, Liu Weihong, et al. Integrative optimization numerical simulation of cavity and diffuser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 111003)
- [8] 蔡光明, 刘军, 王永振, 等. 二次喉道扩压器对COIL的影响实验[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(12): 1807-1811. (Cai Guangming, Liu Jun, Wang Yongzhen, et al. Experimental study on influence of secondary-throat diffuser on COIL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(12): 1807-1811)
- [9] 蔡光明, 刘军, 宋影松, 等. 竖直隔板对COIL超扩段流场影响实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 729-732. (Cai Guangming, Liu Jun, Song Yingsong, et al. Experimental research of the influence of the vertical vane on the flow-field of COIL diffuser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 729-732)
- [10] 黄知龙, 张国彪, 耿子海, 等. 氧碘化学激光器直线分段扩型扩压器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1211-1214. (Huang Zhilong, Zhang Guobiao, Geng Zihai, et al. Performance of line-divergence subsection supersonic diffuser for COIL[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(5): 1211-1214)
- [11] 黄知龙, 廖达雄, 张国彪. 附面层抽气扩压器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 725-727. (Huang Zhilong, Liao Daxiong, Zhang Guobiao. Test research on performance of the boundary scoop pumping diffuser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5): 725-727)
- [12] 陈吉明, 任玉新. 压力恢复系统扩压器激波串现象的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(3): 304-309. (Chen Jiming, Ren Yuxin. Numerical simulation to the pseudo-shock of the supersonic diffuser in the pressure recovery system[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(3): 304-309)

- [13] 陈吉明, 彭强, 廖达雄. 压力恢复系统扩压器性能初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(8): 1266-1270. (Chen Jiming, Peng Qiang, Liao Daxiong. Performance of supersonic diffuser in pressure recovery system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1266-1270)
- [14] 闫宝珠, 袁圣付, 陆启生. 直排型DF/HF化学激光器扩压器喉道最佳长度实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3): 331-334. (Yan Baozhu, Yuan Shengfu, Lu Qisheng. Experimental investigation on optimal length of diffuser throat in directly drained CW DF/HF chemical laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 331-334)
- [15] 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. (Xu Wanwu. Study of high performance, high compression ratio pressure recovery system for chemical laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003)
- [16] 闫宝珠. 基区引射式连续波DF/HF化学激光器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. (Yan Baozhu. Study on base-ejecting, continuous wave DF/HF chemical lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009)
- [17] Acebal R J. Vaned diffuser performance for chemical laser pressure recovery systems[C]//Proceedings of the International Conference on Lasers' 98.