

DF 化学激光器扩压器流场仿真及优化^{*}

李金雪，王 杰，颜飞雪，王植杰，郭建增

(中国船舶重工集团公司 第七一八研究所，河北 邯郸 056027)

摘 要：建立了 DF 化学激光器压力恢复系统扩压器的流场仿真模型，对扩压器流场结构进行了仿真分析。结果显示，扩压器超扩段长度为 1310 mm 时，激光器可工作压力为 7.18 kPa。增加超扩段长度至 1810 mm，激光器的可工作压力上升至 8.25 kPa；插入 2 片楔形叶片，激光器的可工作压力提升至 8.52 kPa。适当增加超扩段长度和插入叶片的方式可在一定范围内提高激光器的工作压力，研究结果对于化学激光器扩压器的设计与优化具有重要的参考价值。

关键词：流场仿真；化学激光器；扩压器

中图分类号：V228.7 **文献标志码：**A **doi:**10.11884/HPLPB201830.180113

为了满足化学激光器顺利出光的需求，现有的化学激光器光腔(激射腔)需维持 2 kPa 以下的低压环境，试验段压力过高，将直接影响激光器的出光功率及光束质量^[1-3]。为了将增益发生器的高速、低压反应尾气顺利排出，通常在激光器增益发生器后部接入压力恢复系统^[4-6]。为了实现化学激光器的小型化及轻量化，扩压器作为压力恢复系统的重要组成部分，如何在保证压力恢复效率的基础上，通过结构优化的方法来缩小扩压器的尺寸规模，得到了越来越多的研究^[7-8]。吉明团队模拟了扩压器通道内的激波串现象，并讨论了边壁吹气等一系列提高扩压器恢复压力、缩小扩压器尺寸规模的方法，对于在扩压器内部加入楔形叶片的方法也有提及^[9-12]。徐万武、袁圣付、闫宝珠团队针对 DF 化学激光器的压力恢复系统的仿真进行了研究，对扩压器超扩段长度的优化进行了实验研究^[13-14]。本文采用仿真与实验结合的方法，探讨了 DF 化学激光器的扩压器流动状态，将仿真结果与实验结果进行了对比，对扩压器结构的优化方法进行了研究。

1 扩压器模型及网格划分

图 1 为扩压器的结构示意图。扩压器在启动状态下，DF 化学激光器的高速低压反应废气从扩压器入口进入到超扩段进行减速增压，降至亚声速的气流进入亚扩段继续减速增压至扩压器出口，排入背景环境。

由于扩压器为对称结构，建立四分之一扩压器仿真模型，扩压器入口宽度及高度根据与化学激光器的对接需求，定为 149 mm 及 85 mm，扩压器设计超扩段长度 L 通过经验公式 $L=(8\sim10)D$ 倍等效直径的方式来确定，等效直径 $D=b^{0.7}h^{0.3}$ ，其中 b 及 h 分别表示扩压器入口处横截面的长和宽。扩压器总长 2700 mm，其中超扩段 1310 mm，亚扩段总长 500 mm，亚扩段扩张全角 16°。划分非结构化网格，壁面处进行附面层网格加密，网格总数 110 万，网格结构如图 2 所示。

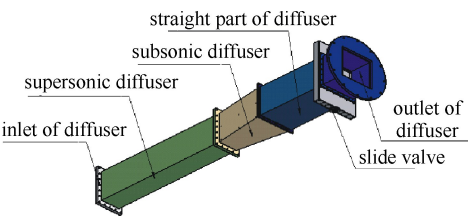


Fig. 1 Structure of the diffuser
图 1 扩压器结构示意图

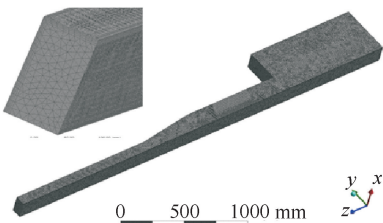


Fig. 2 Mesh of the diffuser
图 2 扩压器网格图

扩压器的工作介质为化学激光器的高温尾气，介质组成根据化学激光器的反应配方及混合气体性质计算得到，扩压器射流介质参数如表 1 所示。

^{*} 收稿日期:2018-04-17; 修订日期:2018-07-01
基金项目:国家高技术研究发展计划项目
作者简介:李金雪(1983—),女,高级工程师,从事化学激光器研究工作;ljsxzyxzg@163.com。

表 1 扩压器射流介质参数

Table 1 Parameters of the diffuser's working gas

working gas	specific heat ratio	molecular weight	constant pressure specific heat
exhaust gas mixture of DF laser	1.5	10	2 494.2

2 仿真结果

2.1 仿真条件

湍流模型选择 Spalart-Allmaras,稳态压力基求解器。流场仿真参数如表 2 所示。

表 2 扩压器流场的仿真参数

Table 2 Parameters of the diffuser's simulation

total pressure/kPa	static pressure/kPa	total temperature/K	background pressure/kPa
11	1.3	1500	0.532

2.2 结果讨论

2.2.1 激光器的可工作压力

图 3 为不同背景压力条件下扩压器内部的流场结构。背景压力为 0.532 kPa 时,超扩段流道内超声速气流进入亚扩段扩张加速,到达亚扩出口继续膨胀加速,此时扩压器未启动,不发挥减速增压的作用;随着背景压力逐步提高,背景压力提升至 3.06 kPa 时,亚扩段出口开始出现激波系,继续提高背景压力,扩压器流道内的激波被逐渐向前挤压,背景压力升至 5.99 kPa 时,激波被挤压到扩压器超扩段出口,进一步提高背景压力至 7.18 kPa 时,流道内的激波系被挤压到超扩段入口,此时超扩段入口维持低压,进一步提高背景压力,超扩段入口不能形成超音速流动,激光器试验段内部腔压被憋高,激光器将不能正常工作,将 7.18 kPa 定义为此种扩压器结构及工况下化学激光器的可工作压力。

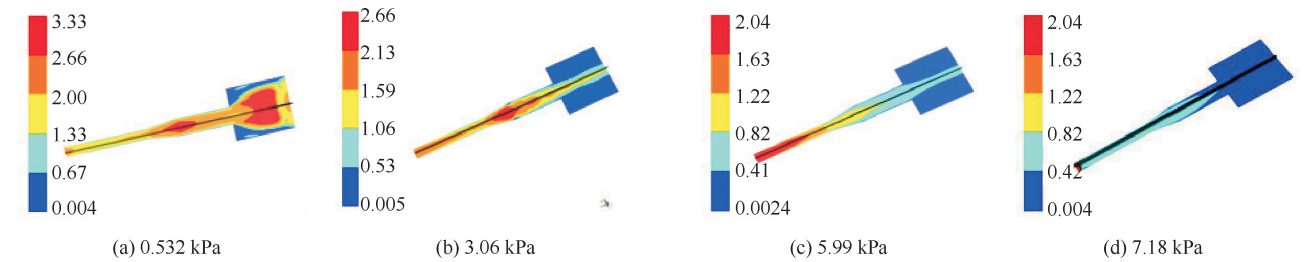


Fig. 3 Mach number contours of diffuser with different background pressure

图 3 不同背景压力的扩压器马赫数云图

2.2.2 试验验证

依据实验室现有的超扩段长度 1310 mm 的扩压器进行试验研究。激光器流量按入口压力条件及扩压器结构尺寸核算,扩压器沿流动方向布压力测点,实验过程中增益发生器对接真空球罐,启动化学激光器正常出光,将实验结果与仿真结果进行对比。图 4 为实验与数值仿真在扩压器不同位置的压强比较。如图所示,本文设计的扩压器流场仿真模型及算法与实验结果基本吻合,能够反映化学激光扩压器的真实工作状态。依据流场仿真的方式来进行扩压器的优化研究是有借鉴意义的。

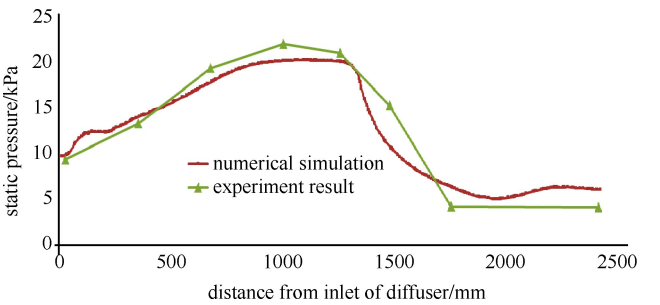


Fig. 4 Contrast of pressures at different positions in the diffuser

图 4 扩压器流向不同位置的压强对比图

3 优化设计

3.1 超扩段长度对扩压器性能的影响

由于激光尾气的成分和性质复杂,初始超扩段长度借鉴的经验公式误差较大。针对不同超扩段长度的扩压器进行流场仿真,得到了对应的扩压器流场结构及激光器的可工作压力。图 5 所示为背景压力 7.18 kPa 时不同超扩段长度的扩压器内部的马赫数云图。可以看出,随着超扩段长度的增加,激波串在扩压器流道内距超

扩段入口距离变远,背景压力存在进一步提升的能力。

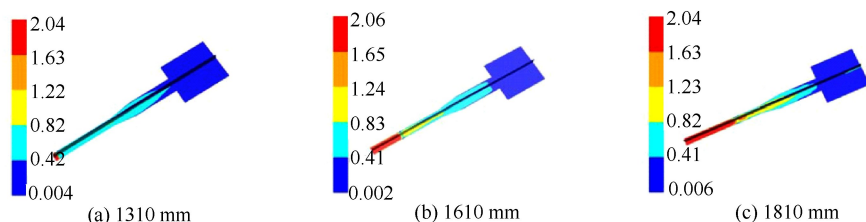


Fig. 5 Mach number contours of diffuser with different length

图 5 不同超扩段长度的扩压器马赫数云图

图 6 总结了不同超扩段长度对应的激光器可工作压力。由图可见,提高超扩段长度至 1810 mm 时,激光器的可工作压力提高到 8.25 kPa,继续提高扩压器长度至 2310 mm 时,由于长度的增加所带来的总压损失增大,扩压器的恢复压力下降至 7.85 kPa。

可见,通过增加扩压器长度的方式来提高扩压器的恢复压力,在一定范围内是有效的,然而超扩段长度的大幅提升,将增大尾流的总能损耗,导致扩压器启动困难;另一方面,扩压器长度的增加带来的直接后果是激光器整体规模体积的增大,不利于激光器小型化、轻量化的发展需求。

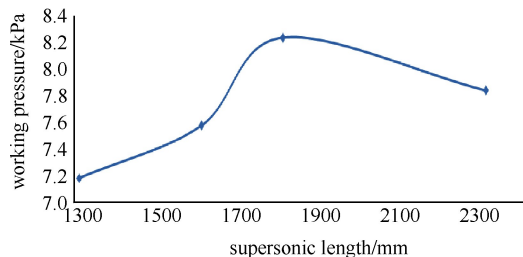


Fig. 6 Laser's working pressure with different superconic length

图 6 不同超扩段长度对应的激光器可工作压力图

3.2 楔形叶片对扩压器性能的影响

扩压器通过超扩段内的激波串进行减速增压,采用叶片分流的方式可以有效地缩短单个斜激波的长度,从而缩小扩压器的整体长度。探讨扩压器加入不同数量叶片的流场分布,为了不增大扩压器入口处的总压损失,叶片的总厚度相同,叶片入口处采用尖劈结构进行导流,尖劈半角 10° ,超扩段长度为 1310 mm,图 7 为不同叶片扩压器不同背景压力时内部压力分布图。如图所示,扩压器内部无楔形叶片时,扩压器工作背景压力 7.18 kPa 对应的扩压器内部波系被推到扩压器入口,扩压器内部插入 2 片楔形叶片,扩压器背景压力 8.6 kPa 时对应的扩压器内部波系被挤压至扩压器入口。

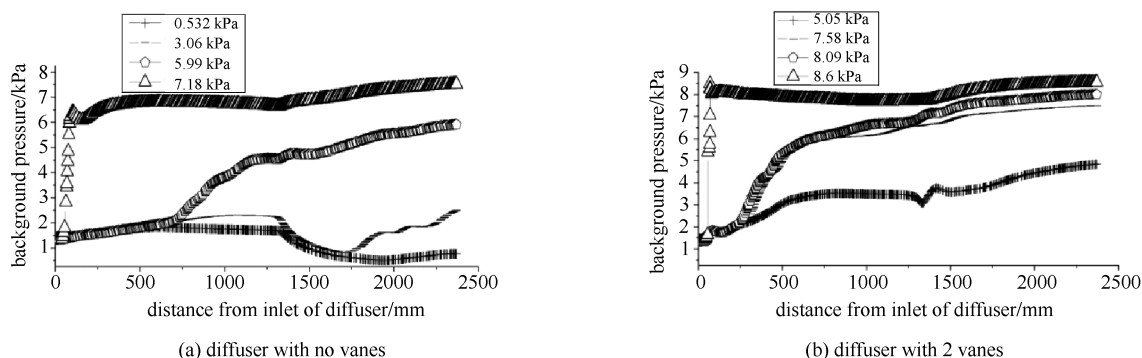


Fig. 7 Pressure in diffuser with different background pressure

图 7 不同背景压力条件下扩压器内部压力曲线图

图 8 为不同叶片数情况下激光器的可工作压力,考虑到化学激光器高温尾气对叶片的烧蚀,没有对尖劈继续减薄。结果显示:加入两片叶片后,激光器的可工作压力上升至 8.5 kPa。

4 结 论

建立了扩压器的仿真模型,依托 DF 化学激光器进行了扩压器的流场仿真,将仿真结果与实验进行了对比,结果表明:流场仿真结果与实验结果基本吻合,采用流场仿真的方法

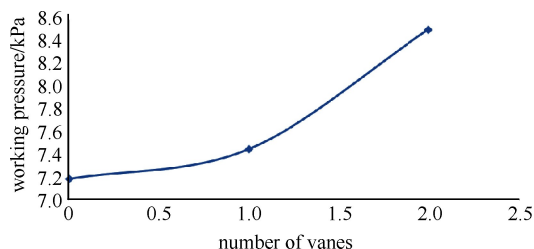


Fig. 8 Laser's working pressure with different number of vanes

图 8 不同叶片数扩压器对应的激光器可工作压力

可以较好地反应 DF 化学激光器扩压器的内部流动状况。开展了扩压器的结构优化研究, 研究表明, 加大扩压器长度可以有效提升激光器的可工作压力, 但会造成扩压器规模体积的增大, 且长度的过度增加会导致激光器尾流总能的降低, 在超扩段流道内加入叶片能够在控制扩压器整体规模的同时, 也有效地提升激光器的可工作压力。

参考文献:

- [1] 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. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 111009)
- [2] 李烨, 范晓樯, 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 Ye, Fan Xiaoqiang, Ding Meng. Numerical simulation of the shock train structure in the supersonic diffuser. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(1): 18-21)
- [3] 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. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(4): 533-537)
- [4] 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, 2016, 28(3): 78-81. (Tong Hua, Sun Qizhi, Zhang Shaowu. Investigation and analyse on the diffuser of hypersonic and wind tunnel. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 28(3): 78-81)
- [5] 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. Investigation optimization numerical simulation of some cavity diffuser. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 111003)
- [6] 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. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(12): 1807-1811)
- [7] 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 verical vane on the flow-field of COIL diffuser. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 729-732)
- [8] 黄知龙, 张国彪, 耿子海, 等. 氧碘化学激光器直线分段扩开型扩压器实验研究[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. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1211-1214)
- [9] 黄知龙, 廖达雄, 张国彪. 附面层抽气扩压器试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 5(18): 725-727. (Huang Zhilong, Liao Daxiong, Zhang Guobiao. Test research on performance of the boundary scoop pumping diffuser, High power laser and particle beams, 2006, 5(18): 725-727)
- [10] 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, 23(3): 304-309. (Chen Jiming, Renyuxin. Numerical simulation to the pseudo-shock of the supersonic diffuser in the pressure recovery system. Acta Aerodynamic Sinica, 2008, 3(23): 304-309)
- [11] 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. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(8): 1266-1270)
- [12] 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. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 331-334)
- [13] 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. Changsha: National University of Defense Technology. 2003)
- [14] 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 of base-ejecting CW DF/HF chemical laser. Changsha: National University of Defense Technology. 2009)

Simulation and optimization of DF chemical lasers' diffuser

Li Jinxue, Wang Jie, Yan Feixue, Wang Zhijie, Guo Jianzeng

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

Abstract: The model of diffuser used on chemical laser's pressure recovery system is built, the fluid field is simulated. The results show that when the supersonic part of the diffuser is 1310 mm long, the background pressure that the chemical laser can lase normally is 7.18 kPa. When the supersonoic length is 1810 mm, the diffuser's recovery pressure rises to 8.25 kPa; when there are 2 vanes in the supersonic flow channel, the diffuser's recovery pressure rises to 8.52 kPa. The lengthening of the diffuser can raise the pressure, but the losing of the total energy will induce the difficulty of the diffuser's start-up. The use of vanes can raise the diffuser's recovery pressure successfully, and the scale of the recovery system could be reduced at the same time.

Key words: flow field's simulation; chemical laser; diffuser

PACS: 02.60.Cb; 02.60.Pn; 40.70.Nm