

文章编号: 0258-7025(2010)08-1967-05

两步燃烧法应用于气膜冷却式增益发生器 流场数值模拟研究

李 兰 袁圣付 华卫红 姜宗福 闫宝珠

(国防科学技术大学光电科学与工程学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了将分别应用在连续波 DF/HF 化学激光器增益发生器上的气膜冷却方式和在燃烧室中的两步燃烧方式相结合的方式, 这可通过转移部分主稀释剂至主喷管收缩段注入来实现。通过数值模拟方法对该应用下光腔内流场进行分析, 结果显示谱线小信号增益系数有小幅增大, 但两步燃烧方式较高的燃烧效率没有显著体现, 且高温气流对燃烧室提出更高要求。通过增加氧化剂过量系数可降低燃烧室总温, 且增益系数有所增大。

关键词 激光器; 化学激光器; 增益发生器; 两步燃烧; 气膜冷却

中图分类号 TN248.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1967

Numerical Study of Two-Step Combustion's Application in Gas Film Cooling Gain Generator

Li Lan Yuan Shengfu Hua Weihong Jiang Zongfu Yan Baozhu

(*Institute of Direct Energy, College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*)

Abstract Gas film cooling, for protecting the gain generators, and two-step combustion method, for improving combustion efficiency, were applied together to continuous wave DF/HF chemical laser. Portion of the main diluent-helium was transferred to inject at the converging section of the primary nozzle. The flowfield in cavity was numerically simulated and the results showed that spectra's small signal gain had a small amplitude increase. The results did not exhibit high combustion efficiency as that in traditional two-step combustion method, and the high temperature gas flow demanded the combustion chamber to reach a much higher level. The total temperature could be lowered through increasing oxidizing gas flow and the gain coefficient was increased.

Key words lasers; chemical laser; gain generator; two-step combustion; gas film cooling

1 引 言

连续波 DF/HF 化学激光器中, 增益介质是由氧化剂气流与燃料气流在光腔内混合后反应生成的。其中氧化剂气流包含大量氟原子, 经拉瓦尔喷管膨胀后进入光腔, 燃料气流也通过类似的喷射装置进入光腔。氟原子的生成主要依赖于氟原子发生器, 其产生方式可有多种, 如直流放电、电弧和燃烧等。本实验室对直流放电和燃烧驱动方式下激光器运转都开展了研究^[1,2]。在各种驱动方式中, 唯有

燃烧驱动是通过气体燃烧提供解离含氟氧化剂所需热量, 不需要附加能量供给, 激光器独立性更强。俄罗斯的专家设计了一种新型的氟原子生成方式^[3,4], 即减少直接注入燃烧室的氦气稀释剂量, 将部分稀释剂转移至主气流与燃料气流之间注入, 也可称为两步燃烧方式, 从而提高燃烧效率并减少了强去激活剂的生成比例, 实验结果显示这一方式在激光器比功率、增益区长度等参数上有显著改善。这种燃烧方法也曾被考虑应用于环柱型 HF 激光

收稿日期: 2009-12-02; 收到修改稿日期: 2009-12-23

作者简介: 李 兰(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事高能激光器数值计算方面的研究。E-mail: llnudt@163.com

导师简介: 姜宗福(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术及气动光学等方面的研究。

E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

器^[5], NF_3 与 D_2 以互击方式注入燃烧室发生反应, 氦气稀释剂在互击点后方与燃烧产物相混合, 实现两步燃烧过程。这两种燃烧方式的设计思路基本是一致的, 即减少直接参与燃烧过程的氦气稀释剂比例, 而将部分氦气与燃烧产物直接混合。之前设计的氦气膜注入式喷管结构^[6]就具备采用这种燃烧方式的特点, 即将部分主稀释剂转移至氦气膜注入, 相当于第二路稀释剂, 沿主喷管壁面注入主气流。由于第二路氦气注入位置与之前不同, 光腔内的流场结构将不同于传统的两步燃烧方式, 对其进行计算分析也就成为必要。

表 1 燃烧室出入口气流状态

Table 1 Flow parameters at the entrance and exit of combustor

Case	Inlet mole flow rate (mmol/s)			Transferred helium fraction /%	Total temperature /K	Outlet mass fraction				
	NF_3	H_2	He			F	F_2	He	HF	N_2
a	1.0694	1.0349	6.261	0	1726	0.20763	0.0022	0.24312	0.40173	0.14532
b	1.0694	1.0349	5.0088	20	1895	0.21961	0.00094	0.20444	0.42227	0.15274
c	1.0694	1.0349	2.5044	60	2391	0.2455	0.00016	0.11386	0.47034	0.17014
d	1.0694	1.0349	0	100	3291	0.27824	0.00003	0	0.52975	0.19198
e	1.2	1.0349	2.5044	60	1998	0.29745	0.00129	0.10301	0.42541	0.17272
f	1.076	0.9279	2.2455	60	1998	0.29745	0.00129	0.10301	0.42541	0.17272

从表 1 中可以看出, c, d 两情况下主氦转移比例较高, 燃烧产物的总温达到了 2000~3000 K, 这对燃烧室的稳定工作是不利的。因此, 考虑情况 e, 即通过增加 NF_3 流量来降低燃烧产物总温, H_2 和 He^P 流量相对于情况 c 保持恒定; 由于情况 e 中总气流量上升, 总压也将增长, 计算了情况 f, 即等比例减少情况 e 中各气流量, 使燃烧室总压降至与情况 c 一致。情况 e, f 具体入口参数也附在表 1 中。

计算区域及主要尺寸如图 1 所示, 包括主喷管

2 数值计算条件

计算针对 DF 激光器体系, 燃料采用 $(\text{NF}_3 + \text{H}_2 + \text{He}^P) + (\text{D}_2 + \text{He}^S)$ 体系, 上标 P 和 S 分别表示主气流和副气流。为使计算的各种情况更具可比性, 考虑注入激光器内的各气体组分流量恒定, He^P 的减少部分改在主喷管收缩段入口处注入, NF_3 , H_2 , D_2 和 He^S 等气流量均保持不变(表 1 中情况 a~d)。同时, 燃烧室内反应情况将发生变化, 需对其热力学平衡分布重新进行计算, 燃烧室出入口气流状态随主稀释剂流量的变化如表 1 所示。

及上下各半个燃料喷管, 氦气膜以离散圆孔方式注入, 由于此处流量较小, 主喷管上下壁面各取 5 个圆孔。计算方法同文献[6], 即在计算流体力学软件 Fluent 基础上开发^[7], 进行多组分, 有反应气流的三维流场计算。除初始气流组分外, 模型中还包含 DF 各振动激发态组分, 共包含 111 个基元反应, 具体反应动力学参数参照文献[8]。根据以上参数对 6 种不同入口条件的光腔流场进行计算。

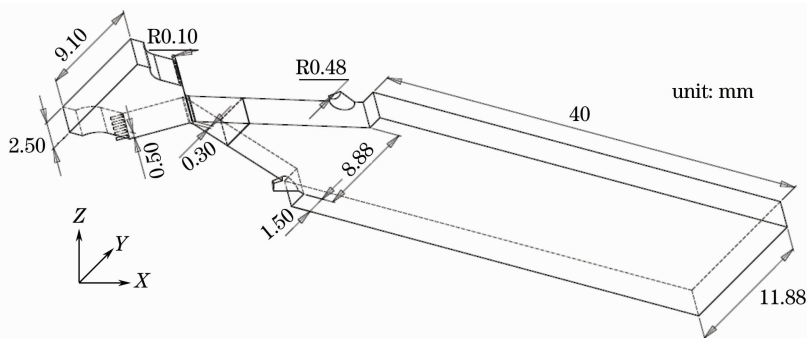


图 1 计算区域的结构及尺寸

Fig. 1 Configuration and size parameters of the computation zone

3 数值计算结果

图 2 给出了 $\text{P}_2(9)$ 支谱线的平均小信号增益系

数沿气流方向的分布曲线。a, b, c, d 4 种情况下谱线的增益分布趋势基本类似。当主氦被转移比例在

60%以下时,增益分布基本重合,比例继续增大时,小信号增益系数峰值有小幅增大,而增益区长度有缩短,增益区长度大致缩短 16%。情况 e, f 相对于情况 c 增益系数均有增大,而增益区长度缩短的幅度变小,在 8% 以内。这种分布与主副气流的状态是密切相关的。

4 流场分析

图 3 给出了喷管出口平面(NEP)中心线上气流速度的分布曲线。

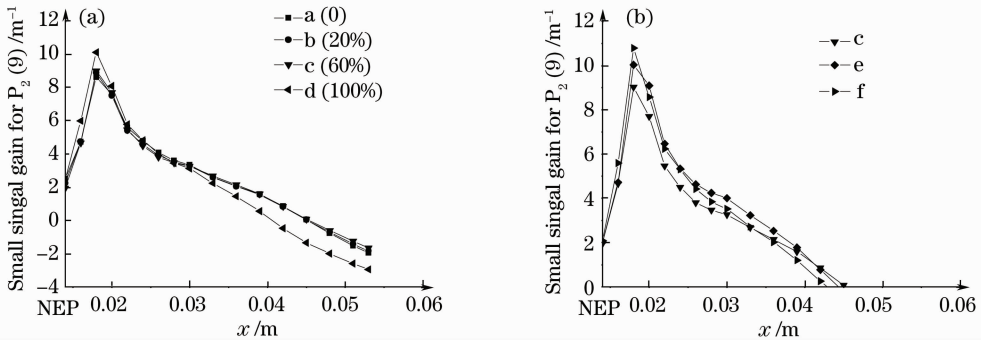


图 2 P₂(9) 支谱线沿气流方向的小信号增益系数分布。(a) 情况 a, b, c, d; (b) 情况 c, e, f

Fig. 2 Small signal gain coefficient curves of P₂(9) along the stream flow. (a) cases for a, b, c, d; (b) cases for c, e, f

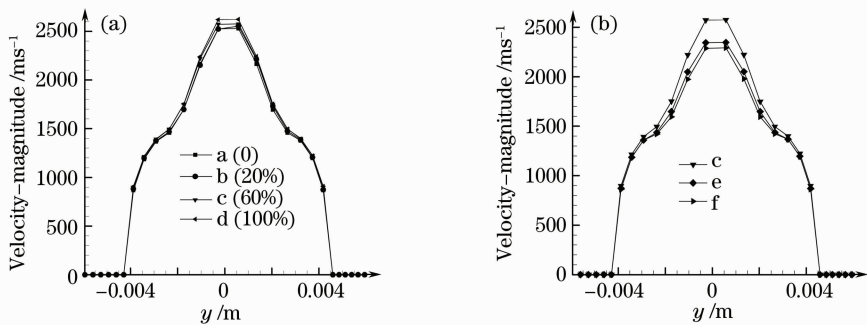


图 3 喷管出口平面中心线上的绝对速度曲线。(a) 情况 a, b, c, d; (b) 情况 c, e, f

Fig. 3 Velocity curve along the center line at the NEP. (a) cases for a, b, c, d; (b) cases for c, e, f

对前 4 种情况,由于主稀释剂减少,燃烧室出口主气流平均分子量将增大,比热比值减小,这将降低主气流在喷管内的加速程度;燃烧释放的热量除解离过剩的 NF₃ 外,将使主气流升至更高的温度,而这将有利于主气流速度的提高;随着转移主氦比例的增大,喷管有效喉道面积减小,但等效面积比未必减小^[6],三者共同作用下,主气流在喷管出口平面上绝对速度、马赫数只有较小幅度的变化,所以情况 a~c 的增益区长度基本一致。而随着氧化剂气流有效喉道面积的减少,其总压需升高以保证确定流量的气流输运,光腔内静压也将上升。这将加速激发态分子的去激活过程,所以对于情况 d,腔压升高的影响已表现更明显,增益区长度有一定缩短。

虽然燃烧释放的热量增多了,注入的 NF₃ 流量保持恒定,则解离出的氟原子流量变化幅度较小,4 种情况下燃烧室出口氟原子流量比为 1:1.00627:

1.00991:1.0143。由于转移主氦在喷管收缩段注入,氟原子的壁面复合有了有效抑制,因而进入光腔的氟原子比例近似为 1:1.028:1.056:1.17。可见,氦气膜冷却式增益发生器对主气流和喷管壁面的保护效果比较明显,这与文献[6]中结论是一致的。因此,依照情况 a~d 的顺序谱线小信号增益系数有增大很大程度上得益于参与反应的氟原子数量的增加。对于情况 e,注入燃烧室的 NF₃ 流量增加,解离出的氟原子量增多,因此增益系数相比情况 c 中有明显增大;情况 f 中氟原子流量也多于情况 c,所以增益系数有增大;而情况 f 中增益高于情况 e 可能是得益于光腔内压强的降低。

很明显,随着主氦比例的减少,位于喷管收缩段处注入的氦气将显著隔离主副气流,这本应有利于减缓气流的混合速度,延长激活区长度。但从增益分布曲线看,增益区长度开始基本没有变化,至情况

d时,长度有所缩短。经分析认为原因在于随着主氮比例的减少,主气流温度将随之上升,虽有利于增大气流速度,但也带来了光腔内的高温分布,如图4所示。光腔内温度升高将造成振动激发态粒子布居向高转动量子数方向偏移,这也是 $P_2(9)$ 增益系数

增大的原因之一。但过高温度对燃烧室以及激射产生都是不利的。因此,增益区长度没有拉长,甚至还有小幅缩短。而相对于情况c,情况e,f中 NF_3 比例增大,主气流温度将下降,这对激射的产生是十分有利的。

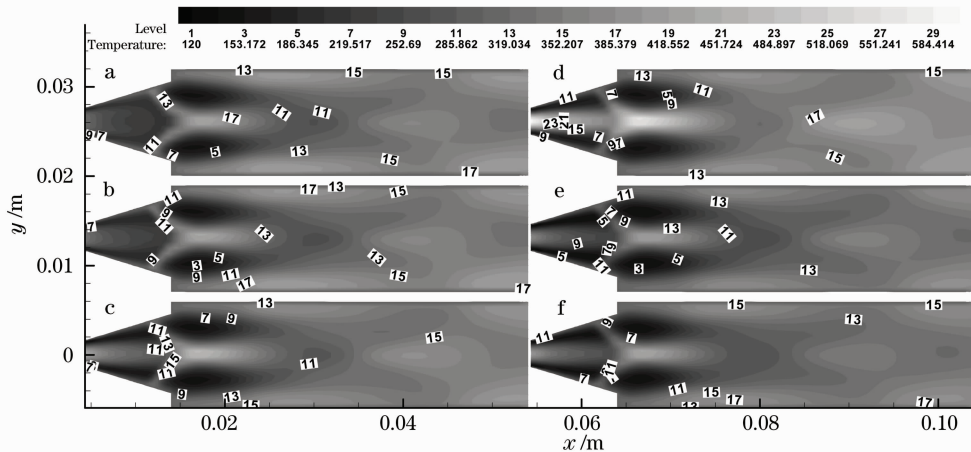


图4 沿Z向中心位置截面上静温等值线图

Fig. 4 Temperature contour distribution on middle plane along Z direction

因此,总体来看,在保持激光器总气流量恒定的情况下,氮气膜对主气流起到了较好的保护效果,主气流的高温一定程度上弥补了两步燃烧带来的大分子量、低比热比效应,使气流速度得以保持,但对激发态分子的影响是显著的。因此,采用此种方式激光器功率输出及激活区长度可能没有显著变化。但燃烧室中2000~3000 K的平衡温度和高压条件对其材料特性将有更高要求。通过增加燃烧室中 NF_3 流量可降低主气流温度,将有利于燃烧室的工作运转,并且在氟原子产生量、光腔内激射环境方面起到一定的改善作用,增益系数有增大。

算条件下,进入燃烧室的主燃料和氧化剂流量恒定,两步燃烧方式提高燃烧效率的特点没有得到很好体现,同时生成的高温对燃烧室提出更高要求。进一步对调整 NF_3 过量系数以降低燃烧室及主气流总温的情况进行了计算,燃料配比调节后燃烧室可恢复到之前的工作温度,氟原子量的增多带来了增益系数的增大,主气流的比热比值、速度等气动特性有一定下降,但增益区长度的变化是有限的。因此,两步燃烧方法与气膜冷却式增益发生器的结合应用,有可能在减少激光器用气量的情况下生成变化很小的增益介质分布,这将是十分有意义的。

5 结 论

将两步燃烧方式应用于新型的气膜冷却式喷管结构,并进行了数值模拟研究。在保持总气流量不变,仅将部分主稀释剂氮气转移至喷管收缩段注入的情况下,由于 NF_3 过量系数恒定,燃烧室中产生的主气流氟原子流量仅有少量变化,而燃烧产生的高温结合主气流分子量、比热比特性的变化导致主气流在喷管出口仍保持了较高的速度,但光腔内静压、静温的升高带来了增益区长度的小幅缩短。壁面氮气膜的存在有效减少了氟原子的壁面复合,增大了进入光腔的氟原子流量,谱线的增益系数因此得到增大。光腔内温度的升高也是以 $P_2(9)$ 支为代表的谱线增益增大的原因之一。在如上所述的计

致谢 感谢国防科学技术大学高性能计算应用研究中心为本文工作提供计算资源。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Li Qiang *et al.*. A discharge driven continuous wave single line DF/HF chemical laser for atmospheric absorption measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 997~1000
王红岩, 袁圣付, 李强等. 用于大气吸收测量的小型电激励连续波DF/HF选线化学激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 997~1000
- 2 Yan Baozhu, Yuan Shengfu, Lu Qisheng *et al.*. Effect of output power on the pressure of cavity in continuous wave DF chemical lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 211~215
闫宝珠, 袁圣付, 陆启生等. 功率提取对连续波DF化学激光器腔压的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 211~215
- 3 V. K. Rebone, I. A. Fedorov, P. Yu *et al.*. Characteristics of a cw chemical HF laser operating by using a new oxidising-gas

production technique [J]. *Quantum Electron.*, 2004, **34**(9): 795~800

4 V. K. Rebone, I. A. Fedorov, P. Yu *et al.*. Optimisation of characteristics of a chemical HF laser operating by using a new method for oxidising-gas production [J]. *Quantum Electron.*, 2006, **36**(12): 1155~1160

5 W. R. Warren, N. Cohen. NF_3 Combustor for Cylindrical Laser [P]. United States Patent: 4650416, 1987

6 Li Lan, Hua Weihong, Yuan Shengfu *et al.*. Theoretical investigation of nozzle with helium film injection at the converge section in CW DF/HF chemical laser [J]. *Chinese J. Lasers*,

2009, **36**(2): 362~366

李 兰, 华卫红, 袁圣付 等. 连续波 DF/HF 化学激光器收缩段氦气膜注入式新型喷管的理论研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 362~366

7 Fluent incorporated. FLUENT User Manual. 2001

8 Yuan Shengfu. Theoretical Design of Latest Gain Generator for Continuous Wave DF/HF Chemical Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002

袁圣付. 连续波 DF/HF 化学激光器新型增益发生器的理论设计 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2002



光学手册(新版)简介

光学手册(新版)的编著工作启动于 2006 年,计划今年全国光学大会召开前夕出版。该书获得国家图书出版基金的首批资助。

本书堪称巨著,全书 38 章共 48 个光学分科,约 500 多万字,包括电磁光学、量子光学、统计光学、非线性光学、分子光学和磁光学、纳米光学、太赫兹波光学和红外光学、紫外光学 X 射线光学和中子光学、辐射度学和光度学、色度学、光谱学、光源和同步辐射光源、非成像光学和自由曲面光学、成像光学、信息光学、衍射光学和二元光学、偏振光学和偏光器件、晶体光学、薄膜光学和滤光片、光学调制器、纤维光学和变折射率光学、导波光学和集成光学、金属表面等离子体光学、海洋光学、大气光学、空间光学、自适应光学、生物光学和生物光子检测、视觉光学、显示光学、瞬态光学和高速成像、飞秒光学、显微光学和近场光学、光电探测器及光电探测、感光材料、光学材料、光学测试计量学和光学零件工艺学,几乎涵盖光学的所有领域。

光学手册的编著、出版得到了王大珩先生、母国光先生、周炳琨先生等十八位院士的鼓励、指导和支持,其中不乏院士亲自执笔、组织撰写、审稿把关,这是保证图书质量的关键。王大珩院士多次表示光学手册是光学学科的基础工程,并为光学手册题词“传承 辟新 循优 勇进”。

光学手册的主编是李景镇教授,责任编辑是杨波编审。参加编著、审稿的学者教授近百人,来自德国国际生物物理研究所,来自中国科学院的长春光机所、中国科学院西安光机所、中国科学院上海光机所、中国科学院上海技术物理所、中国科学院上海应用物理所、中国科学院安徽光机所和中国科学院大气成分与光学重点实验室、中国科学院光电所、中国科学院半导体所、中国科学院北京物理所和中国科学院北京理化所,来自高等学校的有清华大学、北京理工大学、首都师范大学、南开大学、天津大学、上海交通大学、上海理工大学、同济大学、浙江大学、南京理工大学、中国科技大学、山东大学、四川大学、电子科技大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学、中国海洋大学、西安电子科技大学、西北大学、西北工业大学、西安工业大学、华南师范大学、西南师范大学、苏州大学、华东师范大学和深圳大学,还有来自中国计量科学研究院的光学和激光计量科学研究所、兵器工业部的 205 所和中国机械装备集团总公司的秦皇岛视听机械研究所。这些学者教授都是各自领域的专家,多有出版专著的经历,是保证本书高水平的基

础。学科性的手册是科研成果的凝练,是学科发展的基础。光学手册编写的目的是为科研、设计和学习人员提供几乎所有光学分科的基本概念、基本原理、基本方法、基本公式和基本数据,一本手册能起到几十本书的功能,因而能做到有用、方便。王大珩先生认为:在国外,学科性的手册为这一学科总结、提高的结晶,有助这一学科的发展,为这一学科的基础工程。这种手册是源于学术专著,却难于专著,因为更加全面、更有深度、更加精炼、更好查阅,是改造世界的工具书,不仅仅是认识世界的学术著作。光学手册力求在全面、深入、精炼的前提下具有基础性、前沿性、科学性和实用性的特点。“基础”才能长久,“前沿”才有时代特征,“科学”需要反复锤炼,“实用”能赢得读者。

