

文章编号: 1001-3806(2011)02-0230-04

3股互击式喷注器混合特性的数值模拟

靳冬欢, 刘文广, 陆启生

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了获得更好的混合效果, 将3股互击式喷注器中间的喷注孔与两侧的喷注孔进行异型设计, 改为直孔与锥形孔的组合, 得到两种新型结构的3股互击式喷注器。应用计算流体力学方法, 在“燃料-氧化剂-燃料”组合条件下, 对上述两种结构及全直孔式喷注器的流场进行了3维的数值模拟。互击式喷注器主要通过横向旋涡驱动来实现快速混合; 氧化剂喷注采用锥形孔后, 旋涡强度偏低, 而燃料喷注采用锥形孔后, 旋涡强度则有所提高。选取质量加权平均的未混合度作为评价参量, 比较了3种不同喷注器结构的混合效果, 发现燃料喷注采用锥形孔的3股互击式喷注器混合效果最好, 全直孔式居中, 氧化剂喷注采用锥形孔的最差。结果表明, 对化学激光器燃烧室喷注器的设计而言, 可考虑对两种喷注孔进行异型设计, 如将燃料喷注改用锥形孔, 以便进一步改善混合效果。

关键词: 激光器; 3股互击式喷注器; 数值模拟; 未混合度; 直孔; 锥形孔

中图分类号: TN248.5; O354.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.024

Numerical study of mixing characteristics of triplet impingement injectors

JIN Dong-huan, LIU Wen-guang, LU Qi-sheng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to enhance mixing effect, two novel styles of triplet impingement injectors were presented by changing middle jet orifice or the other two jet orifices into cone-shaped orifices. Flow field characteristics of above-mentioned two kinds of injectors and traditional injectors with triple straight-wall jet orifices under conditions of fuel-oxidizer-fuel triplet arrangement were analyzed based on 3-D computational fluid dynamic methods. The numerical simulation results demonstrate that mixing of triplet impingement injectors is principally accelerated by transverse vortices. For the injector with cone-shaped oxidizer jet orifice, the vertex intensity of flow field is lower than that of the injector with triple straight-wall jet orifices. For the injector with cone-shaped fuel jet orifices, there is a definite increase of the vertex intensity of flow field. Mass-weighted average unmixedness was introduced to evaluate the mixing performances of three kinds of injectors. It is indicated that the mixing effect of injector with cone-shaped fuel jet orifices is better than that of injector with triple straight-wall jet orifices and the injector with cone-shaped oxidizer jet orifice is the worst of three. For injector design of chemical laser combustors, oxidizer and fuel jet orifices adopt different styles, for example, the injector with cone-shaped fuel jet orifices, which helps improve mixing effect of oxidizer flow and fuel flow further.

Key words: lasers; triplet impingement injector; numerical simulation; unmixedness; straight wall orifice; cone-shaped orifice

引言

对于燃烧驱动 DF/HF 化学激光器来说, 燃烧室的作用是通过化学反应放出的热量从 F_2 , NF_3 , SF_6 等含氟化合物中解离出氟原子, 为光腔区的抽运反应提供氧化剂^[1-2], 因此, 燃烧室也被称为氟原子发生器^[3]。喷注器是燃烧室的关键部件, 它将燃料组分以适当的比例和状态喷入燃烧室, 以实现较高的燃烧效率, 而燃烧效率很大程度上取决于燃料组分的混合效果^[4-5]。因此, 增强

混合效果是喷注器的设计的主要目标之一。

喷注器一般有两种结构: 一种是平行式射流喷注器, 氧化剂喷注孔与燃料喷注孔交错排列, 主要利用扩散混合技术, 通常靠减小喷管尺寸来加快混合速率; 另一种是互击式射流喷注器, 常见有两股互击式、3股互击式等形式。两股互击式喷注器中, 氧化剂和燃料的射流尺寸、动量不匹配会迫使气流撞击后形成的喷雾远离预期的轴向方向并使喷雾扇变形, 导致混合效果欠佳^[4]。为避免上述问题的发生, 可采用对称的互击式喷注器, 如3股互击式喷注器, 3个一组的喷注孔, 可以由两个氧化剂喷注孔和一个燃料喷注孔组成, 即“氧化剂-燃料-氧化剂”组合, 也可以由一个氧化剂喷注孔和两个燃料喷注孔组成, 即“燃料-氧化剂-燃料”组合^[6]。3股

作者简介: 靳冬欢(1981-), 男, 博士研究生, 从事化学激光器技术的研究。

E-mail: jinboyiyi@163.com

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-05

互击式喷注器具有良好的混合质量和较高的燃烧效率,是目前燃烧驱动 DF/HF 化学激光器燃烧室喷注器的首选方案。

3股互击式喷注器的喷注孔一般为直孔,但喷注孔的上、下游压力降一般与燃烧室压力相当,所以,通过喷注孔进入燃烧室的气流将是超临界的流动状态^[7]。在不影响流态的前提下,为了获得更好的混合效果,作者将中间的喷注孔与两侧的喷注孔进行异型设计,即将中间的喷注孔或两侧的喷注孔改为锥形孔。由于模型试验成本较高,并受试验条件、测试技术等诸多因素限制,而数值模拟则具有费用低、获取数据简便快捷、信息量大等优点,因此,采用数值模拟的方法对不同结构的喷注器的流场进行了分析,以便为燃烧室喷注器的设计和优化提供依据。

1 计算模型及分析方法

针对环形燃烧室喷注器建立的3股互击式喷注器的计算模型如图1所示。图1a为总体结构图,左右对

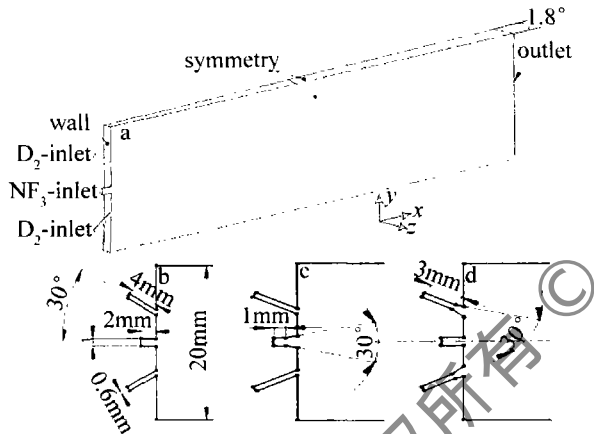


Fig. 1 Computational models of triplet impingement injectors

a—general model b—T II-0: section dimensions of injector with triple straight-wall jet orifices c—T II-1: section dimensions of injector with cone-shaped oxidizer jet orifice d—T II-2: section dimensions of injector with cone-shaped fuel jet orifices

称面的夹角为 1.8° ,燃料注入采用“燃料-氧化剂-燃料”组合;图1b中喷注孔皆为直孔,为基准构型,编号T II-0型;图1c中间的氧化剂喷注孔为锥形孔,编号T II-1型;图1d两侧的燃料喷注孔为锥形孔,编号T II-2型。为了便于说明,将中间的氧化剂射流称为主流,两侧的燃料射流称为副流。

工作介质选用 NF_3/D_2 ,它一般作为HF激光器燃烧室的氧化剂及燃料。介质的粘性系数及导热系数皆采用分子动力学理论进行计算,其中的分子间作用力模型使用的是Lennard-Jones(6,12)势^[8]。每个喷注器模型采用Map或Cooper技术生成体网格,网格单元总数约为 12×10^4 ;湍流模型使用Realizable $k-\varepsilon$ 两方程模型,

该模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟,包括旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动,以及带有分离的流动等^[9-10];立足于Navier-Stokes守恒型方程组,利用有限体积法对控制方程离散,对3种不同喷注器结构进行了3维的数值模拟。主要边界条件设置见表1。

Table 1 Boundary conditions of computational model

boundary names	descriptions
NF_3 -inlet	mass flow inlet; 0.15g/s, species: NF_3 , total temperature: 300K
D_2 -inlet	mass flow inlet; 0.0087g/s, species: D_2 , total temperature: 300K
outlet	pressure outlet, static pressure: 0.1519875kPa

2 描述混合程度的无量纲参量

引入未混合度来描述主、副气流的混合程度,未混合度定义为^[11]:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{m_{\text{tot}}} \sum_i m_i (f_i - f_{\text{avg}})^2}}{\sqrt{f_{\text{avg}} (1 - f_{\text{avg}})}} \quad (1)$$

式中 m_{tot} 为横截面的总流量, m_i 为通过网格 i 的流量, f_i 为网格单元 i 内的副流 D_2 的质量分数, f_{avg} 为副流流量与总流量的比值,即燃料射流与氧化剂射流完全混合时所能达到的平均质量分数,文中 $f_{\text{avg}} = 5.48\%$ 。(1)式的分子为质量加权平均的射流质量分数的标准差,分母为归一化因子。 $U=0$ 对应完全混合流, $U=1$ 对应完全分离流。参考文献[11]中未混合度公式分子部分对使用面积加权平均或质量加权平均射流质量分数标准差的情况都进行了计算,认为二者本质相同,并且只给出了面积加权平均时的结果。作者在计算时发现,从喷注器出口到燃烧室入口存在一个截面突变段,使用面积加权平均的方法,在燃烧室入口附近(此时主、副气流刚开始混合)计算出的未混合度大于1,而使用质量加权平均的方法,计算的结果则接近于1。显然,使用质量加权平均的方法不受面积突变的影响,计算的结果更接近于实际情况,因此,采用质量加权平均的方法来计算射流质量分数的标准差。

3 计算结果及讨论

图2中给出了 z 向对称面($z=0$)的马赫数分布,可以看出,主、副气流在喷注器出口附近都发生了迅速的膨胀,速率达到超音速,形成了马赫盘,马赫盘后射流的总压和动压大幅降低,尤其是副流,副流在与主流的撞击过程中,产生了弓形激波结构,流动方向开始发生显著改变。弓形激波多次反射,形成一系列激波串,导致

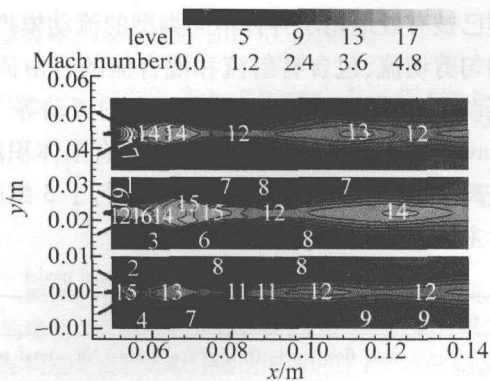


Fig. 2 Mach number contour distribution on plane $z=0$

沿流动方向马赫数呈现升高与降低交替分布的状态,与此相伴随的是两侧的副流对主流的周期性压缩,从图3的 D_2 质量分数分布图中也能看出这一点。从结构和现象来看,对于主流而言,两侧的副流也即是一种横向射流,只是这种横向射流与主流束宽差别较小,相互作用更为剧烈。图2和图3中,从上到下,分别对应于 T II-0

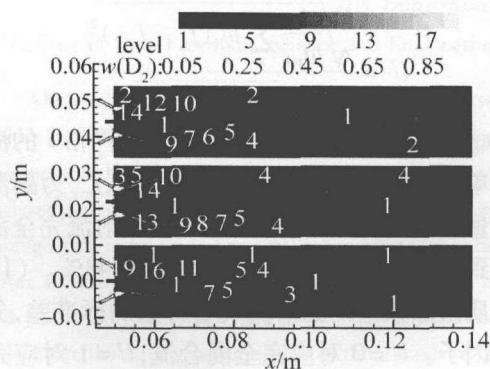


Fig. 3 Mass fraction of D_2 contour distribution on plane $z=0$

型、T II-1型和 T II-2型。两图结合来看,对于 T II-1型,主流在锥形孔内膨胀加速,出口压力降低,副流对主流压缩严重,产生的激波较强,之后剧烈挤压副流,将副流推向两侧,使之偏离中心较远,减弱了副流与主流的扩散作用;对于 T II-2型,锥形孔产生的副流出口压力降低,副流对主流压缩减弱,主流得到较为充分的膨胀,沿流向变化趋缓,两侧副流之间的距离趋于稳定,使得主流和副流之间的混合平稳有效地持续进行,因此,得到比 T II-0型、T II-1型更为均匀的气流组分分布。实际上,进行互击式喷注器设计时,非常重要的一点就是要保证主、副气流的出口压力在一定范围内的相互匹配,否则会引起气流混合效率下降。

气流的互击膨胀,在流向和横向都产生了明显的旋涡结构。燃烧室入口平面无气流注入的区域类似于主喷管叶片的基区,对喷注器射流有卸压增速的作用。流向漩涡主要产生在该区域,是边界层分离导致的一种回流现象,位置相对固定,在气流混合方面作用有限,导致在流向截面内(如 $z=0$ 平面),气流混合将以扩散方式为主,因此,这里重点讨论横向涡流。图4中给出了距离燃烧室入口平面 0mm, 2mm, 4mm, 10mm, 30mm 和 50mm 处的一组平行平面内 D_2 的质量分数分布及速率矢量图,每个平面均相对其右侧对称边界进行了镜像显示,从而得到一组完整的喷注单元。在图4b中,中间主流绕过两侧副流,在副流背风侧的上、下对称面附近各出现一对运动方向相反的旋涡,形似羊角。随着气流向下游流动时主流的膨胀或压缩,旋涡向上、下对称面回卷或向中心方向伸展,并大量卷吸主、副气流以促进

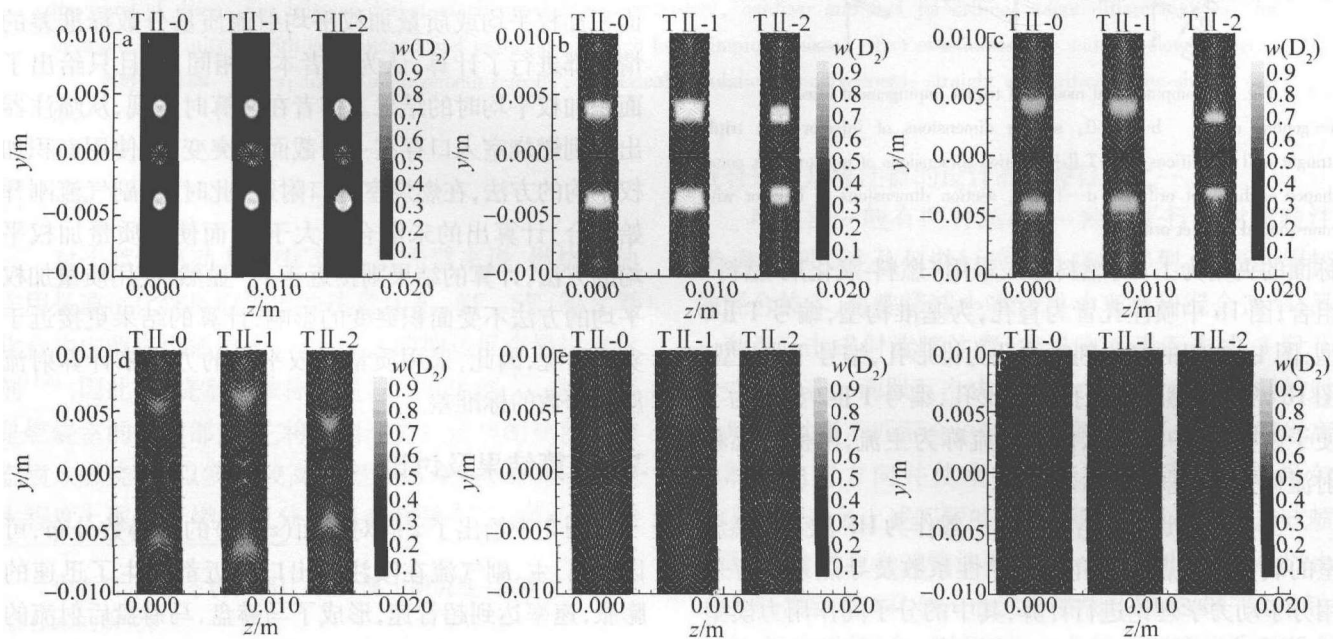


Fig. 4 Mass fraction of D_2 contour distribution and velocity vector distribution on a couple of parallel planes with combustion entrance plane

a—combustion entrance plane b—distance from combustion entrance plane:2mm c—distance from combustion entrance plane:4mm d—distance from combustion entrance plane:10mm e—distance from combustion entrance plane:30mm f—distance from combustion entrance plane:50mm

掺混。从各个截面 D_2 的质量分数云图能够看出,副流在燃烧室入口平面处界面形状为椭圆形,与喷注器出口形状相一致,之后受主流膨胀影响,依次变为矩形、肾形,然后在漩涡的往复运动中,副流向中心及四周逐渐扩展,界面形状变为马蹄形,因此可以说,副流类似于一个可以变形的小实体,有效地拉伸、扭曲了反应界面,从而增加了主、副气流的相互接触面积。综上所述,认为互击式喷注的主要通过横向旋涡驱动来实现快速混合。T II-2 型的喷注器出口处,虽然副流出口面积变大,但压力降低,且具有明显的斜向速率,有利于横向旋涡的产生,扩散速率最快;T II-1 型副流仅具有垂直方向速率,且相对于 T II-1 型,主流出口面积较大,阻碍了副流向主流扩散,效果最差。

下面通过引入螺旋度来进一步说明涡结构的发展。螺旋度 H 定义为速率矢量的旋度与速率矢量的点积^[12],其绝对值为:

$$|H| = |(\nabla \times \vec{V}) \cdot \vec{V}| \quad (2)$$

它是流体微团随流场运动旋转的度量,通过比较气流运动类似螺旋的程度来表示涡结构的强弱。图5中给

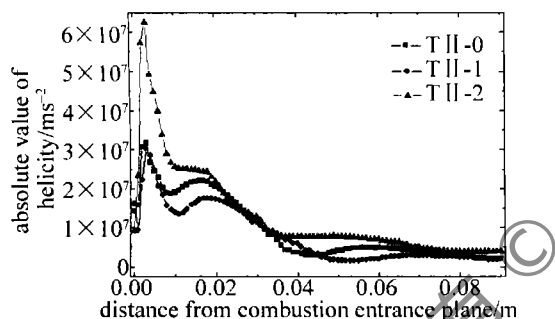


Fig. 5 Absolute value of helicity distribution along the direction of gas flow 出了沿流场方向的螺旋度绝对值的分布曲线,可以看出,喷注器出口附近,螺旋度绝对值迅速达到最大,此时旋涡最强,之后旋涡结构沿流场方向逐渐被耗散。相对于基准构型, T II-2 型显著提高了旋涡强度,而 T II-1 型,旋涡强度则有所降低。这也验证了前面的分析。

最后,选取未混合度作为评价参量,通过副流 D_2 和主流 NF_3 的混合程度来反映不同结构的3股互击式喷注器的混合效果。图6中给出了3种3股互击式喷注器沿流场方向未混合度的分布曲线。3条曲线趋势基本一致,都是沿流场方向未混合度逐渐减小,混合越来越好。不同结构的喷注器混合效果差别较为明显,比较来看, T II-2 型,燃料喷注采用锥形孔后,改善了喷注器的混合性能,燃烧室出口未混合度下降为 T II-0 型的 74.2%;但在距离燃烧室入口平面约 13mm 以内未混合度略微大于 T II-0 型,这可能因为是一方面,较强的旋涡促进了气流组分的混合,另一方面,旋涡太

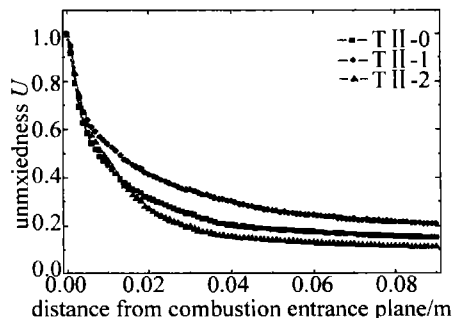


Fig. 6 Unmixedness distribution along the direction of gas flow

强则导致混合的不均匀性有所增加,二者相互作用使得计算出的未混合度出现上述情况。T II-1 型,氧化剂喷注采用锥形孔后,混合效果下降,燃烧室出口未混合度增大,约为 T II-0 型的 1.38 倍。

4 结论

3股互击式喷注器相对于平行式射流喷注器、两股互击式喷注器等,混合效果有所改进,但喷注孔的设计多局限于直孔。分别将中间的喷注孔与两侧的喷注孔进行异型设计,改为直孔与锥形孔的组合,就得到两种新型结构的3股互击式喷注器。应用计算流体力学方法,在“燃料-氧化剂-燃料”组合条件下,对上述两种结构及全直孔式的喷注器的流场进行了3维的数值模拟。

结果表明:对互击式喷注器而言,气流的互击膨胀,在流向和横向都产生了明显的旋涡结构,但主要通过横向旋涡驱动来实现快速混合;氧化剂喷注采用锥形孔后,副流对主流压缩严重,主流膨胀、收缩剧烈,主流出口面积的增大也阻碍了副流向主流扩散,导致旋涡强度偏低;燃料喷注采用锥形孔后,副流对主流压缩减弱,主流得到较为充分的膨胀,沿流向变化趋缓,两侧副流之间的距离趋于稳定,另外,副流具有明显的斜向速率,有利于横向旋涡的产生及旋涡强度的提高。

选取质量加权平均的未混合度作为评价参量,比较了不同3股互击式喷注器结构的混合效果,发现燃料喷注采用锥形孔的3股互击式喷注器混合效果最好,全直孔式居中,氧化剂喷注采用锥形孔的最差。上述3种类型喷注器,锥形的燃料喷注孔属于斜面锥形孔,加工相对较难,但通过机械加工、电火花加工等方法一般都可以达到技术要求。因此,对化学激光器燃烧室喷注器的设计而言,对两种喷注孔进行异型设计,例如将燃料喷注改用锥形孔,是值得加以关注和考虑的。

参考文献

- [1] GROSS R W F, BOTT J F. Handbook of chemical lasers[M]. Beijing: Science Press, 1987: 260 (in Chinese).

(下转第263页)

饱和增益为 19.2dB。可以看出,短波长和长波长信号呈现出明显不同的变化趋势。上面已经提到,随着输入光功率的变大,增益峰值波长向长波长方向移动。对于长波长信号,如 $\lambda = 1310.77\text{nm}$,在不饱和状态下,波长远离峰值增益波长。所以,不饱和增益小于中心波长增益,约为 18.5dB。随着输入光功率的增大,增益峰值波长变大,波长向增益峰值波长靠近,增益在某区域出现增强放大,如图中输入光功率在 -35dBm 和 -30dBm 之间时所示。而对于短波长信号,始终远离峰值增益波长,所以增益小于中心波长的增益。尽管这对目前增益线宽较窄的 VCISOA 意义不大。但是当 VCISOA 增益线宽提高后,当要求一定的放大时,选取的信号波长应比不饱和波长稍大些。另一方面,如果需要做光限制器,从该分析结果看出,选择短波长信号较好些。

4 结 论

增大 VCISOA 的输入光功率,调谐输出曲线的增益峰值波长向长波长方向移动,在某些区域增益谱呈现非对称性,适当地选择波长可以观察到双稳态。双稳环的宽度随着输入光功率先增大后减小,随着抽运光功率增大而增大。由于增益谱的频移,对增益饱和和特性曲线有很大的影响。当信号波长大于中心波长时,增益在某些区域放大。信号波长小于中心波长时,增益很快达到饱和。

参 考 文 献

- [1] TOMBLING C, SAITOH T, MUKAI T. Performance prediction for vertical-cavity semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(11): 2491-2499.
- [2] PIPREK J, BJÖRLIN E S, BOWERS J E. Optical gain-bandwidth product of vertical cavity laser amplifiers[J]. Electronics Letters, 2003, 37(5): 298-299.
- [3] ROYO P, KODA R, COLDREN L A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of fabry-perot and rate equation approaches[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 38(3): 279-284.
- [4] BJÖRLIN E S, RIOU B, ABRAHAM P, et al. Long wavelength vertical-cavity semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 37(2): 274.
- [5] ADAMS M J, COLLINS J V, HENNING I D. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers[J]. IEE Proceedings, 2000, 132(1): 58-63.
- [6] PIPREK J, BJÖRLIN E S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 37(1): 127-134.
- [7] BJÖRLIN E S, KIMURA T, BOWERS J E, et al. Carrier-confined vertical-cavity semiconductor optical amplifiers for higher gain and efficiency[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(5): 1374-1385.
- [8] HENNING I D, ADAMS M J, COLLINS J V. Performance predictions from a new optical amplifier model[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21(6): 609-613.
- [9] LU J, LUO B, PAN W, et al. Analysis of influencing factors on gain saturation property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 496-499 (in Chinese).
- [10] PAN W, ZHANG X X, LUO B. Theoretical study of bistable and logic characteristics in vertical cavity semiconductor optical amplifier[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(2): 357-362 (in Chinese).

(上接第 233 页)

- [2] LIU W G. Study on the cylindrical continuous wave HF chemical high energy lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 62 (in Chinese).
- [3] FEDOROV I A. CW chemical HF/DF laser[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010: 35 (in Chinese).
- [4] HUZEL D K. Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2004: 129-142 (in Chinese).
- [5] YAN B Zh. Study on base-ejecting continuous wave DF/HF chemical lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 96 (in Chinese).
- [6] DUNCAN W A, PATTERSON S P, GRAVES B R, et al. Overtone research advanced chemical laser module design[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2119: 47-58.
- [7] SALTER G R, BROWN C H, DRISCOLL R J, et al. Chemical laser advanced diffuser ejector[R]. Buffalo: Bell Aerospace Textron, 1978: 1-204.
- [8] TSIEN H S. Physical mechanics teaching materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007: 238-248 (in Chinese).
- [9] WANG F J. CFD analysis—principles and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 126 (in Chinese).
- [10] ZHANG L, YE Zh Y, WANG G. Numerical simulation of COIL injection[J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 344-347 (in Chinese).
- [11] BAIN D B, SMITH C E, HOLDEMAN J D. CFD mixing analysis of jets injected from straight and slanted slots into confined crossflow in rectangular ducts[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Nashville: AIAA, 1992: 1-29.
- [12] TONG B G, YIN X Y, ZHU K Q. Theory of vortex movement[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 57-59 (in Chinese).