

文章编号: 1001-4322(2007)11-1766-05

高超声速低温喷管副喷管参数化设计*

雷 静, 赖 林, 王振国

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 通过对 DF 化学激光器高超声速低温(HYL TE)喷管副喷管流动与几何参数进行制约关系和敏感性分析,确定了能够对副喷管进行参数化设计的 4 个基本几何控制参数和 2 个调节参数,初步建立了 HYL TE 喷管副喷管的参数化设计方法。引入了相对未混合度作为衡量喷管混合效果的性能参数,建立了较完备的 3 维反应流数值模拟计算程序。结果表明:该方法选择的基本参数能够敏感地反映 HYL TE 喷管副喷管的尺寸特征和关键性能。

关键词: 化学激光器; 高超声速低温喷管; 副喷管; 参数化设计

中图分类号: TN248.5

文献标识码: A

激光器喷管设计的目标是在满足激射介质气流所需的基本条件下,尽可能增强喷管的反应介质混合效果,从而提高激光器整体性能。激光器喷管研究广泛,高超声速低温(HYL TE)喷管是目前被广泛使用、效率最高、代表化学激光器先进喷管发展方向的激光器增益发生器装置。自 1985 年被提出以来^[1],以其特有的优势,很快被应用于氟化氢(HF)、氟化氘(DF)等化学激光器中,并引起了深入的理论、数值和试验研究。1987~1999 年期间,美国 TRW 公司(后被合为诺斯诺普-格鲁曼空间技术公司)在优化 HYL TE 喷管以提高激光器性能方面做了大量理论和试验研究^[2-6],但未见详细喷管结构优化参数分析及相应结果。

HYL TE 喷管构型复杂,适用于工程的设计是一个反复的过程,一般需经历初步设计、性能估算、调整参数后再设计、再次性能估算等步骤。现有设计基本凭借设计者经验,并未完全实现参数化,这就意味着不同设计者得到的喷管构型可能有很大区别,不利于喷管甚至激光器的快速发展。喷管的优化设计是改善喷管性能的重要手段;而优化设计的基础是对喷管进行参数化设计,即确定能够控制喷管构型的基本几何参数,通过调节这些有限参数达到生成不同构型的目的。作为 HYL TE 喷管的重要组成部分,副喷管的优化设计需要优先进行。基于以上考虑,本文开展了面向 DF 化学激光器的 HYL TE 喷管副喷管参数化设计方法的初步研究。

1 基本设计方法

HYL TE 喷管的典型构型如图 1 所示,图中显示了喷管阵列中的 5 个喷管叶片构成的 4 个喷管。副喷管指稀释剂喷管和燃料喷管,为简单轴对称喷管,型面参数包括半收缩角 γ_c 、半扩张角 γ_a 、喉部直径 d 、喉部等截面段长度 l 和膨胀比 $(\epsilon = D/d, D$ 为副喷管出口直径) 5 类参数;位置参数包括副喷管与主喷管扩张段夹角 β

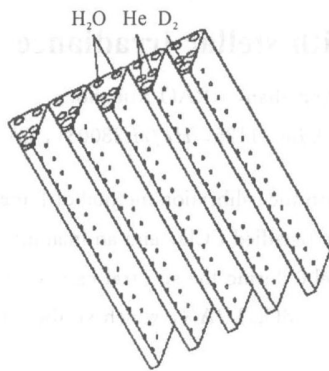


Fig. 1 Schematic of HYL TE nozzle
图 1 HYL TE 喷管示意图

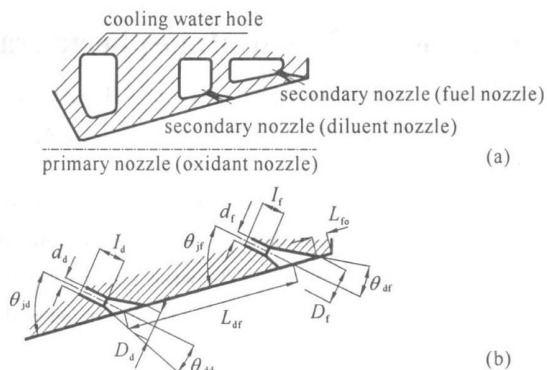


Fig. 2 HYL TE secondary nozzle parameter definition
图 2 HYL TE 副喷管参数定义

* 收稿日期:2007-06-27; 修订日期:2007-10-20
基金项目:国家部委基金资助课题
作者简介:雷 静(1979—),女,博士生,研究领域为化学激光器喷管流动过程研究及优化设计;leijing_nudt@126.com。

(副喷管喷射角)、燃料喷管距氧化剂喷管出口距离 L_{fo} 、稀释剂喷管与燃料喷管间距 L_{df} 这 3 类参数。参数化设计需共同考虑两个副喷管的结构参数, 则共有 10 个型面参数和 4 个位置参数。图 2 中给出了主副喷管的相对位置和主要结构参数。为了增强混合, 燃料以一定角度喷射进入氧化剂主流。而在燃料喷管前布置稀释剂喷管喷入 He, 一方面是建立低温喷射环境、提高激光器性能的需要; 另一方面可以一定程度地隔离燃料 D_2 , 避免 D_2 在氧化剂喷管中过早发生反应。

W. A. Duncan 等试验得到一种最优喷管构型——AGGTC 7^[7], 表 1 给出了该构型主要副喷管几何尺寸参数, 现有多数设计参数都源于此表中给出的典型结果。由于试验条件等限制, 该参数优化试验考察范围小, 最优设计值的确定有待进一步改进, 而且这种依靠试验分析和经验判断的设计方法非常不便, 有成本高、可操作性不强、工程化困难等缺点。

表 1 AGGTC 7 几何结构参数
Table 1 AGGTC 7 geometric parameters

$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	d_a/mm	$d/(\circ)$	d_t/mm
40	decided by processing	0.254	15	0.508

2 制约关系分析及设计参数和优化指标的选取

由于喷管构型设计中可控几何参数较多, 如果对几何参数与流动的制约关系分析不彻底, 将导致优化变量多、工作量大, 从而难以实现有效的优化设计。因此需要剔除部分存在制约关系而非独立的变量和部分不十分敏感地影响喷管性能的变量。另外, 参数化设计所选取的基本设计参数还应具有较强的可调节能力, 即通过调整参数, 能够生成多种喷管构型方案。

2.1 制约关系和敏感性分析

由于完备的副喷管结构参数较多, 包含型面和位置参数共 14 个。并且由于目前加工水平限制, 有些几何结构没有任意性, 对其进行优化也失去实际意义。另一方面, 某些参数之间本身存在相关性, 有必要剔除这类非独立参数, 减少优化的复杂性。

从图 2 中可以看出, 副喷管相对于主喷管尺寸很小, 喉部直径一般不到 1 mm; 同时由于基区结构的尺寸限制使得燃料和稀释剂供给孔很小, 导致难以在几 mm 结构下加工精确尺寸的副喷管收缩角。从理论上讲, 收缩段的主要作用是稳定气流, 且小尺寸副喷管的收缩角大小对整个流场结构不会有明显影响, 所以本文认为收缩角为不敏感参数。副喷管的扩张角作为超声速喷管的组成部分, 影响着喷射气流的膨胀过程, 决定最终进入主流的气流性质。但是, 由于副喷管尺寸小, 即使未优化扩张角造成局部喷射气流不佳并不会恶化激光器性能。为了减少优化工作量, 本文认为扩张角可以看作常数, 利用已有研究优化结果 $\alpha_d = \alpha_f = 15^\circ$ ^[7]。同理, 副喷管喉部等截面段长度的确定也可以通过理论方法和经验选择。根据等截面的特点, 等截面长度的确定可转化为长径比的选择。研究发现, 长径比为 $1 < l/d < 2$ 时最佳^[8], 可基本满足喷管设计中常作的超音速线假设, 从而避免喷管出口处边界层分离和产生激波。由以上分析, 可初步确定半收缩角 β 、半扩张角 α 和喉部等截面段长径比 l/d , 且认为型面参数中可排除这 6 个非敏感参数作为优化参数。

由流量公式可知, 流量确定时, 喉部面积与来流总压成反比, 二者相互制约。而总压是影响主喷管流场的重要参数, 故喉部直径的优化可以转化为喷管喷注总压的优化问题。3 维数值模拟研究发现, 总压越高, 主喷管流场的静压越高, 同时对主流的压缩也越严重, 总压损失更大; 而总压太低, 射流又不足以进入主流核心流与氧化剂流充分反应。因此, 总压选择十分关键, 需要指出的是, 流量基本确定后, 实际试验中流量仍可以进行微调, 这就可以通过调节总压来实现流量的最优控制。

型面参数膨胀比 β 的大小会影响副喷管出口气流的速度、温度和压力等流动参数, 而射流与主流的压力匹配情况会直接对主流流场产生主要影响。匹配不好, 流场中会出现复杂激波等结构, 导致增益介质气流极度不均匀, 最终引起光束质量下降。故希望副喷管出口静压能够与接触主流较好的匹配, 同时还能具有较大的速度与主流进行快速、高效的混合。

对于位置参数, 副喷管喷射角 β 、燃料喷管距氧化剂喷管出口距离 L_{fo} 和稀释剂喷管与燃料喷管间距 L_{df} 充分体现了副喷管与主喷管、不同副喷管之间的结构关系, 决定了稀释剂与燃料喷入氧化剂主流的方向、燃料流与氧化剂流发生化学反应的初始位置等重要流场特征。通常 $L_{fo} > 0$, 主要是为了使燃料能够有效地进入光腔

进行反应;实际中结合加工难度等因素,我们选取 $L_{fo} = 0$,故本文亦不对其进行优化研究。而 L_{df} 和 j_d 的取值以稀释剂能隔离氧化剂与燃料,避免化学反应过早在喷管内发生为宜,它们的确定一般需要进行较详细的数值模拟,经验上 L_{df} 多为 6 mm 左右。同时,从流动发展轨迹上看, j_d 不能太小,否则会导致化学反应发生太靠后,且穿透度不够致使燃料不能进入主流核心区,得不到良好的混合; j_d 亦不能太大,否则虽然会增强混合,但由此引起的总压损失也增大,且光腔的流场亦更加不均匀,不利于光束质量的提高。故 j 存在一个最优值或者最优值范围,工程上初步设计一般有 $j_d = j_f$,取值在 40 左右。由此, L_{df} 和 j 为敏感参数,则优化位置参数个数由 4 减少为 2。

2.2 优化指标选择

混合好坏是衡量激光器喷管性能的关键指标^[9]。激光器广泛采用 HYL TE 喷管,正是利用其副喷管喷入主流的横向射流形成流向旋涡能有效地增强混合的特点。良好的混合效果使得燃料和氧化剂充分反应,从而提高激光器的化学效率,增大出光功率^[10]。激光器喷管混合性能的准确评价一直是个难题,目前虽然可以直接采用混合速度,或间接利用激光器整体性能参数如小信号增益、比功率等进行比较;但是对于喷管设计来讲,需要在试验之前确定初步结构,而这类衡量指标只有通过数值模拟求得,且带来一定模型误差。相比之下,相对未混合度是 0~1 之间的无量纲参量,可以直观地反映出多少燃料射流未与氧化剂主流进行混合,故本文选择其作为评价指标和优化目标。

用面积平均的射流质量分数的标准方差来描述混合程度,未混合度定义为^[11]

$$= \sqrt{\frac{1}{A_{tot}} \sum A_i (f_i - f_{avg})^2} \quad (1)$$

式中: A_{tot} 为横截面流通面积; A_i 为网格 i 的流通面积; f_i 为网格 i 的 D_2 射流质量分数; f_{avg} 为总的 D_2 射流流量与总流量的比值,即燃料射流与氧化剂来流完全混合所能达到的平均质量分数。

相对未混合度定义为

$$= \frac{f_{avg}}{F} \quad (2)$$

其中, $F = \sqrt{(1 - f_{avg})/f_{avg}} = (m_f/m_o)^{-0.5}$ 。未混合度 是实际混合与完全混合的均方差,反映了有多少射流未与来流混合,适用于多种情况下射流混合程度的比较。

通过以上分析,本文选取稀释剂喷管膨胀比 α_d 、燃料喷管膨胀比 α_f 、副喷管喷射角 j 和稀释剂喷管与燃料喷管间距 L_{df} 作为设计参数,稀释剂喷管总压 P_{0d} 和燃料喷管总压 P_{0f} 作为可调节参数。初步选择相对未混合度作为主要优化指标,兼顾流场静压、静温和 F 原子的分布情况等影响因素对喷管结构进行优化。

3 参数化设计流程

设计之初,首先需要根据激光器功率及主喷管参数等设计要求确定各副喷管流量和主喷管流场的静压、静温等分布情况。对于初步设计,可利用 1 维气体动力学、简化的光学和化学动力学等理论进行粗略计算。在给定设计参数的前提下,即可以进行副喷管的结构优化设计。整个设计过程可以归纳为以下几个步骤:(1)结合文献[7]给出的 AGGTC 7 及前面讨论提供的经验参数构建用于优化设计研究的 HYL TE 喷管基准构型。(2)根据副喷管的设计流量可以得到喷管直径和总压的关系,设计多组直径或总压参数方案,替换基准模型的直径和总压参数,并进行数值模拟。依据核心流场中的静压、静温及射流流场分布等结果,挑选出最优的稀释剂喷管总压 P_{0d} 和燃料喷管总压 P_{0f} 。(3)分别对不同的 j 和 L_{df} 进行数值模拟,依据流场的射流穿透特性和 He 对燃料 D_2 的隔离效果,分析出相对最优的 j 和 L_{df} 。(4)计算氧化剂喷管扩张段副喷管出口处的静压,根据压力匹配的要求反算出副喷管的膨胀比 α_d 和 α_f ,并兼顾工艺水平得到实际的 α_d 和 α_f 。(5)考察所设计结构的流场综合性能,依据相对未混合度作为流场混合性能指标进行判断,同时综合考虑激光流场的激射环境要求。对某些参数进行迭代调整。

4 设计结果验证及分析

为了充分体现 HYL TE 喷管副喷管横向喷流的 3 维特征,并且尽量真实再现喷管的化学反应过程,从而得到逼近真实的喷管流场。流场控制方程采用 3 维 RANS 方程,离散方法为有限体积法。湍流模型选择适于求解圆柱射流的 $k-\epsilon$ Realizable 模型。较完全地模拟喷管和光腔中 15 个组分的混合情况,考虑 38 个化学反应

方程,102 个化学反应速率表达式。入口边界采用压力入口条件,具体参数由 1 维气体动力学和热力学计算获得;出口边界条件为超声速压力出口,数值边界条件采用一阶外推。针对研究对象为单喷管激光器的特殊情况,光腔壁面为固壁,对计算流场整个壁面取绝热、无滑移的物面条件。需要指出的是,应用型激光器都是阵列喷管形式,计算时光腔壁面应该为周期边界条件;通过比较数值结果发现周期性边界的流场性能更好,特别是静压更低。但是这里仍然采用单喷管进行计算,主要是为了与单喷管激光器试验结果相对应。采用结构化网格,并在副喷管内流场和喷管射流影响较大的流场区域处加密网格,计算域覆盖了包含副喷管扩张部分的氧化剂喷管扩张段和光腔耦合流场,利用 8 台计算机进行并行计算。

图 3 和图 4 给出了利用本文设计方法得到的 HYL TE 副喷管初始基准构型 SN-00 的流场 CFD 计算结果,SN-00 敏感参数值列于表 2 中。从图 3 可以看出,该设计构型能够提供较合适的激射流场,即低温、低压和高速。图 4 给出了 DF 分子基态及激发态 $\nu=1$ 和 $\nu=2$ 沿流场的 3 维分布,表明副喷管的射流结构使得反应界面扭曲,有效地增大了反应接触面,增强了燃料与氧化剂的混合。

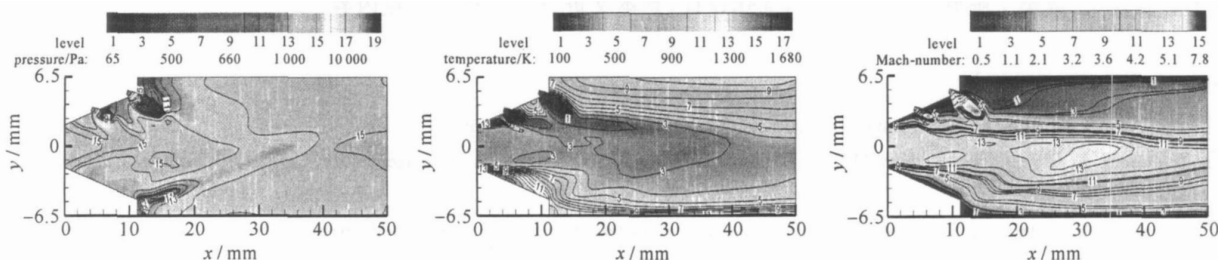


Fig. 3 Distributions of pressure, temperature and Mach number of HYL TE nozzle and cavity

图 3 HYL TE 喷管和光腔流场压力、温度和马赫数分布

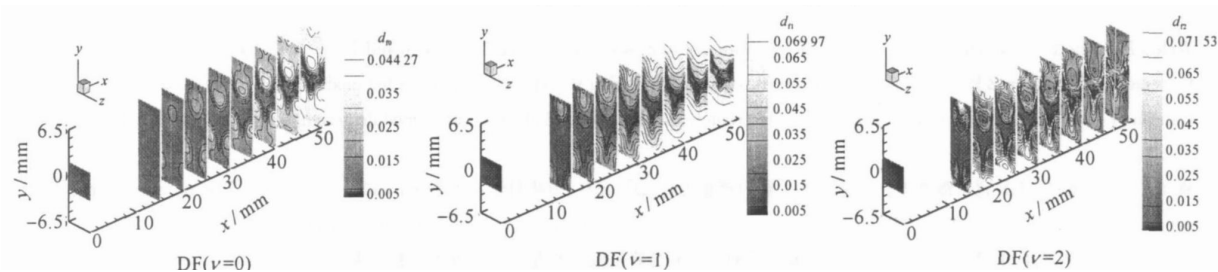


Fig. 4 Mass fraction distribution of DF of HYL TE nozzle and cavity

图 4 HYL TE 喷管和光腔流场 DF 分子的质量分数分布

表 2 4 种构型几何结构参数

Table 2 Geometric parameters of 4 configurations

configuration	d	r	$j / (^\circ)$	L_{df} / mm
SN-00	11.11	16.0	40	6.0
SN-01	11.11	16.0	50	6.0
SN-02	16.0	25.0	40	6.0
SN-03	25.0	16.0	40	8.0

选取相对未混合度作为混合性能参数,通过燃料和氧化剂的混合程度反映副喷管射流结构的混合效果,进而对副喷管结构的优劣进行评价。以 SN-00 为基准构型,通过改变某些结构参数得到 SN-01,SN-02 和 SN-03 3 种构型,具体参数列于表 2 中。通过 3 维数值模拟得到设计结构的流场参数,选取垂直于流场方向的多个面为计算点,利用公式(1)和(2)可以计算得到沿流场的相对未混合度分布。图 5 给出了 4 种构型 SN-00 ~ SN-03 的计算结果。可以看出,不同副喷管结构的相对未混合度明显不同,但是趋势一致,沿流场方向相对未混合度逐渐减小,混合越来越好。4 种构型中,构型 SN-00 的相对未混合度最大,也就是说经过改变 d, r, j 和 L_{df} 可以改善喷管的混合性能。相对于基准构型 SN-00,构型 SN-02 增大了副喷管扩张比,SN-03 增大了副喷管扩张比和副喷管间距离,两者改善混合的效果接近;构型 SN-01 增大了喷射角,有利于射流进入核心流与氧化剂来流进行混合,反映在相对未混合度参数上就是整体减小。可以看到,改变喷射角的效果最为明显,构型 SN-01 的相对未混合度整体最小,喷管混合性能最好,同时

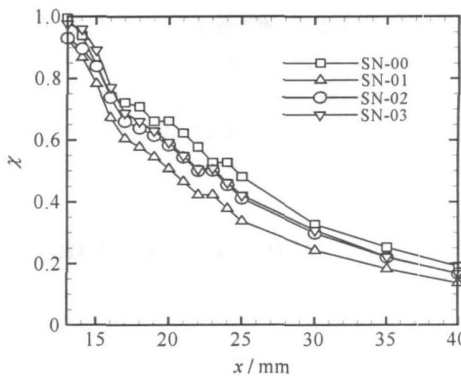


Fig. 5 Relative unmixedness distributions

图 5 相对未混合度沿流场分布

也说明了副喷管喷射角参数对喷管构型的强敏感性。这也表明,由于结构参数的强耦合影响,考虑单个参数影响的结构设计很难最优,需要在得到初始设计构型后通过调整某些敏感结构参数来提高喷管的整体性能,实现满足考察性能指标的结构优化设计。

因此,在激光器副喷管设计循环中,给出喷管混合性能参数随设计变量变化的规律对喷管设计和构型优化有着十分重要的意义,通过以上算例可以看出,本文建立的参数化设计方法为喷管性能的参数研究提供了便捷的途径。

5 结 论

通过控制本文选取的 4 个基本几何参数,能够方便地生成构型、性能差异较大的 HYL TE 喷管,这说明所选取的基本参数能够敏感地影响喷管性能,本文建立的 HYL TE 喷管副喷管参数化设计方法能够为喷管优化设计提供便捷的变参数途径。对以上 HYL TE 喷管设计初步结果进行修正,提高设计准确度,并将该方法推广于主喷管,完成整个喷管的一体化结构优化设计,是本文进一步工作的重点内容。

参考文献:

- [1] Smith W. A simple model of the transverse injection chemical laser[R]. AIAA 85-1599.
- [2] Duncan W A, Rogers B J, Holloman M E, et al. Hydrogen fluoride overtone chemical laser technology[J]. *AIAA Journal*, 1991, **29**(12): 2181-2184.
- [3] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R. Advanced nozzle characterization for hydrogen fluoride overtone chemical lasers[R]. AIAA 92-2977.
- [4] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R, et al. Gain generator optimization for hydrogen fluoride overtone and fundamental chemical laser [C]// Proc of SPIE. 1993, **1871**:123-134.
- [5] Waldo R E, Betts J A, Graves B R, et al. Approach for reduced heat loss in HYL TE laser module[R]. AIAA 97-2422.
- [6] Patterson S P, Graves B R. HF fundamental and overtone testing using the HYL TE water cooled module[R]. AIAA 99-3472.
- [7] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R, et al. Overtone research, advanced chemical laser module design[C]// Proc of SPIE. 1994, **2119**: 46-57.
- [8] 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:国防科学技术大学, 2002. (Yuan S F. Theoretical design of gain generator in continuous-wave DF/ HF chemical lasers. Changsha: National University of Defense Technology, 2002)
- [9] 施建华, 姜宗福, 袁圣付, 等. HYL TE 喷管流场混合性能的实验与数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10):1240-1244. (Shi J H, Jiang Z F, Yuan S F, et al. Experimental and simulation investigation of HYL TE nozzle's mixed flowfield in DF/ HF chemical lasers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10):1240-1244)
- [10] 桑凤亭, 顾成洲, 庄琦, 等. 燃烧驱动连续波氟化氢(氘)化学激光器-三维阵列小孔喷管研究[J]. 强激光与粒子束, 1991, **3**(3):323-329. (Sang F T, Gu C Z, Zhuang Q, et al. Mixing process behind the nozzle bank exit of a supersonic cw HF/DF laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, **3**(3):323-329)
- [11] 王卫东. 垂直射流混合的三维湍流数值模拟[J]. 推进技术, 1998, **19**(2):58-62. (Wang W D. CFD mixing analysis of vortex generator jets injected into confined crossflow in rectangular duct. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, **19**(2):58-62)

Parameterized design for HYL TE secondary nozzle

LEI Jing, LAI Lin, WANG Zhen-guo

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A parameterized design method for secondary nozzle of hypersonic low temperature (HYL TE) nozzle of DF chemical laser was established in order to provide an available approach to optimize HYL TE nozzle. Four basic geometric parameters and two adjusting parameters were selected for the parameterized nozzle design by analyzing the restriction and sensitivity of those parameters which affect the nozzle performance or configuration. The relative unmixedness was introduced to evaluate the mixing performance of the designed nozzle. Furthermore, a 3 dimensional simulation code was built to compute the flowfield of the nozzle and cavity. It is indicated that the primary performance for nozzle evaluating is sensitive to the basic geometric parameters.

Key words: Chemical laser; HYL TE nozzle; Secondary nozzle; Parameterized design