

# 化学激光器燃烧室中的爆轰问题分析

王 杰 郭建增 颜飞雪 傅玉婷

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

**摘要** 为评估化学激光器燃烧室中爆轰的影响,分析了氟化氘(DF)化学激光器在某次出光实验中燃烧室产生的爆轰问题,采用时空守恒元与求解元(CE/SE)方法对该爆轰过程进行了数值模拟。结果表明,燃烧室中爆轰的产生与传播使得燃烧室瞬态压力剧增,由此产生的振动、冲击和扭矩作用导致光学谐振腔失调,从而影响了激光器的正常出光。研究结果对DF激光器的优化设计及安全运行具有指导作用。

**关键词** 激光器; DF化学激光器; 燃烧室; 爆轰; 守恒元与求解元方法; 数值模拟

**中图分类号** T248.5 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.081406

## Analysis of Detonation in Chemical Laser Combustor

Wang Jie Guo Jianzeng Yan Feixue Fu Yuting

The 718<sup>th</sup> Research Institute of the China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China

**Abstract** In order to evaluate the detonation influence in chemical laser combustor, the detonation from a lasing test in the deuterium fluoride (DF) laser is analyzed in depth. Numerical simulation of the detonation is conducted by the space-time conservation element and solution element (CE/SE) method. The simulation results indicate that the instantaneous pressure in the combustor surges as the detonation takes place and spreads. The vibration, shock and torque acts resulting from the detonation lead to the maladjustment of the lasing resonator, which affects the normal running and lasing of the chemical laser. The results calculated from the simulation will play an important role in guiding the optimized design and the secure running of DF chemical lasers.

**Key words** lasers; DF chemical laser; combustor; detonation; space-time conservation element and solution element method; numerical simulation

**OCIS codes** 140.1550; 140.3290

## 1 引言

氟化氘(DF)化学激光器燃烧室,也称氟原子发生器,其作用是光腔抽运反应提供足够的自由氟原子。燃烧室的设计与制造,以及燃烧室中发生的燃烧反应,对激光器的总体性能和输出效率产生直接影响。DF激光器燃烧室温度必须足够高(高于1500 K),以保证过量含氟氧化剂(如 $F_2$ 、 $NF_3$ 、 $SF_6$ 等)充分解离分解产生自由氟原子,且不会复合为氟分子。燃烧产物中的某些含氢组分(基态HF分子)对激光器光腔激射反应具有较强的去激活作用。因此,激光器燃烧室反应体系、配方、燃烧产物组分、自由氟原子产率、燃烧室绝热温度及热量损失等问题是化学激光器燃烧室研究的重点。Roback等<sup>[1]</sup>研究了HF/DF化学激光器燃烧室化学反应机理并探讨了激光器燃烧产物组分以及影响氟原子浓度的因素等问题。Kwok等<sup>[2]</sup>建立了化学激光器燃烧室性能预估模型,通过计算获得激光器燃烧室压力、滞止温度及燃烧室壁面平均温度等重要性能参数。华卫红等<sup>[3]</sup>采用最小自由能法计算了 $NF_3-H_2$ 和 $NF_3-C_2H_4$ 体系DF激光器燃烧室化学平衡组分,获得了不同体系DF激光器燃烧室氧化剂与燃料的最佳配比,研究了燃料、稀释剂及燃烧室压力对燃烧产物中氟原子浓度的影响。唐力铁等<sup>[4]</sup>采用一种新的方法计算了燃烧驱动DF激光器燃烧室组分化学反应流场,引入元素分布方程,根据化学平衡的热力学计算求得每一位置的组分及温度,在计算低速流场时,避免了由化

收稿日期: 2016-03-21; 收到修改稿日期: 2016-04-20; 网络出版日期: 2016-07-20

作者简介: 王 杰(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事化学激光器方面的研究。E-mail: wangjie\_24@163.com

学反应源项引起的数值计算过程中的方程刚性问题。本文从实际问题出发,分析了 DF 激光器在某次出光实验中燃烧室产生的爆轰问题,采用时空守恒元与求解元方法对该爆轰过程进行了数值模拟,并分析了爆轰影响及抑制方法。

## 2 爆轰现象及分析

### 2.1 爆轰问题

DF 化学激光器在某次出光实验中,产生“轰”的一声巨响,输出功率下降了 80%。实验结束后,激光器光学谐振腔严重失调,实验中参与激光反应的原料气供给正常,而激光器光腔实验段监测压力(腔压)出现异常,如图 1 所示。图中曲线 p1 对应的压力测点距离激光器喷管阵列出口平面 7 mm,曲线 p2 对应的压力测点距离喷管阵列出口平面 47 mm。激光器理论出光时间在 3.7~4.7 s 之间,正常条件下激光器腔压是平稳的,曲线中的压力尖峰是由于腔压异常引起的。综合分析认为实验过程中产生了爆轰,实验中的震响和压力尖峰均为爆轰的外在体现。

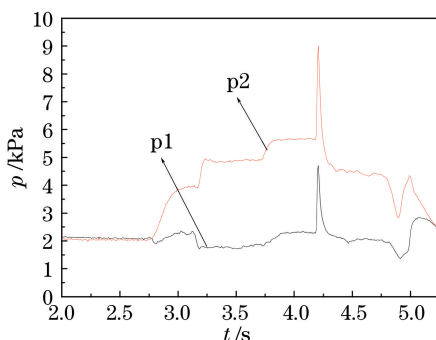


图 1 光腔压力曲线

Fig. 1 Pressure history of lasing cavity

### 2.2 原因分析

在 DF 化学激光器中,有两个环节可能产生爆轰,一是燃烧室燃烧反应过程,二是光腔二次反应过程。燃烧室燃烧反应过程是典型的扩散燃烧过程,氧化剂和主燃料气流分别从喷注器小孔喷射注入燃烧室并快速混合,在点火电嘴作用下触发燃烧反应。燃烧反应一方面为光腔抽运反应提供足够的自由氟原子,另一方面为激光器的运行提供一定的总压。一般情况下,扩散燃烧过程不会产生爆轰,而在半封闭环境下的动力燃烧(动力燃烧是指氧化剂与燃料在燃烧前预混)却很容易产生爆轰。光腔二次反应由燃烧室产生的高温含氟氧化剂气流与喷管阵列注入的燃料气流的快速混合产生,理论上这两股气流混合反应极快,其设计马赫数在 4~5 之间,同时激光器出光条件要求光腔静压低于 2.6 kPa,可见光腔中氧化剂和燃料气流密度较小,因此光腔二次反应不会产生爆轰。

图 2 为激光器燃烧室压力曲线。DF 激光器运行过程中燃烧室的压力监测是判断激光器运行正常与否的重要手段。图中实线为实验测量结果,虚线为激光器正常出光时的压力测量结果。两次实验中,激光器各反应气体的进气时序和点火控制完全相同,2.7 s 开始注入氧化剂与稀释剂预混气体,0.4 s 后注入燃料气体,为了避免燃料气体的过度积聚,注入氧化剂气体的同时触发电嘴进行点火。由图 2 可知,在正常情况下,燃料气体注入后的很短时间内即完成了点火过程,燃烧室压力快速升高并维持在一个相对稳定的运行总压上。对比两条曲线发现,实验中激光器点火完成时间在 4.1 s,比正常点火延时 1 s,造成了氧化剂与燃料气体的预混(预混气体压力大于 0.6 MPa),在点火电嘴作用下,激光器燃烧室中的扩散燃烧转变为动力燃烧。此时相当于在一端封闭一端开口的燃烧室内充满可燃混合气体,在封闭端点燃,反应后的高温燃气像一个活塞推着未燃气体加速前进,在一定条件下,缓燃波转化为爆轰波,并以一定的爆轰速度传播。理论上,只要压力采样足够快,燃烧室爆轰压力尖峰容易捕获,但实验中燃烧室压力监测主要用于应急处理,采样频率较低且不连续,导致了爆轰压力尖峰的遗失。同时,实验中应急参数设计偏差导致应急失效。可见实验中燃烧室爆轰产生的直接原因是点火延时,间接原因是应急失效。为进一步分析 DF 化学激光器燃烧室中爆轰

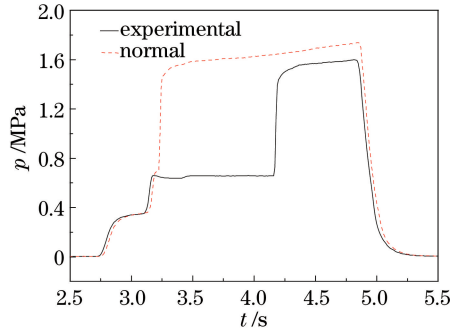


图 2 燃烧室压力曲线

Fig. 2 Pressure history of combustor

的产生、传播及影响,采用时空守恒元与求解元方法对该爆轰过程进行数值模拟。

### 3 数值模拟及分析

#### 3.1 控制方程

为简化问题,假设激光器燃烧室壁绝热,燃烧室内的气体流动为二维流动,不考虑湍流等耗散效应,得到激光器燃烧室内气体二维流动无量纲守恒方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)}{\partial x} + \frac{\partial (\mathbf{G} - \mathbf{G}_v)}{\partial y} = \mathbf{R}, \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho E, \rho c]^\top, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho v u, (\rho E + p)u, \rho c u]^\top, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_v = \frac{1}{Re} [0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + q_x, -\Delta c_x]^\top, \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = [\rho v, \rho u v, \rho v^2 + p, (\rho E + p)v, \rho c v]^\top, \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_v = \frac{1}{Re} [0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + q_y, -\Delta c_y]^\top, \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = [0, 0, 0, 0, \dot{\omega}]^\top, \quad (5)$$

式中  $\rho$  为密度,  $p$  为压力,  $u$  和  $v$  分别为气体在  $x$  和  $y$  方向的速度,  $E$  为总能量,  $\dot{\omega}$  为化学反应源项,  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{yy}$  为正应力,  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yx}$  为剪切应力,  $q_x$ 、 $q_y$  为能量扩散通量,  $\Delta c_x$ 、 $\Delta c_y$  为组分扩散通量, 其表达式分别为

$$\tau_{xx} = \mu \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right], \tau_{yy} = \mu \left[ 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right], \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (7)$$

$$q_x = \frac{\mu}{Pr} \frac{1}{Ec} \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = \frac{\mu}{Pr} \frac{1}{Ec} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (8)$$

$$\Delta c_x = -\frac{\mu}{Pr} \frac{1}{Le} \frac{\partial c}{\partial x}, \Delta c_y = -\frac{\mu}{Pr} \frac{1}{Le} \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (9)$$

式中  $\mu$  为黏性系数,  $Re$ 、 $Le$ 、 $Ec$  和  $Pr$  分别为雷诺数、路易斯数、埃克特数和普朗特数。

假设化学反应一步完成,可用 Arrhenius 公式计算,其表达式为

$$\dot{\omega} = -K\rho c \exp(-E^+/RT), \quad (10)$$

式中  $K$  为前因子,  $c$  为反应物的质量分数,  $E^+$  为活化能,  $T$  为温度,  $R$  为通用气体常数。

总能量  $E$  满足

$$E = p / [(\gamma - 1)\rho] + cq_0 + (u^2 + v^2)/2, \quad (11)$$

式中  $\gamma$  为比热容比,  $q_0$  为化学反应释放的热量。

### 3.2 计算方法

数值计算方法采用 NASA(美国国家航空航天局)Chang<sup>[5]</sup>提出的守恒元与求解元方法(CE/SE 方法),该方法将时间通量与空间通量统一处理,计算精度高且捕捉间断能力强<sup>[6-8]</sup>。CE/SE 方法将整个空间-时间计算区域划分为若干个求解元。在每个求解元内,假设流场的变量是连续的,可用泰勒级数展开,穿过相邻求解元的边界,流场的变量可以是不连续的。对于每个网格点对应的守恒元,空间-时间密度矢量的积分通量是守恒的。通过计算穿过守恒元各个边界的对流项和扩散项的空间-时间密度矢量的积分通量,得到二维黏性 CE/SE 方法<sup>[5,9]</sup>的计算格式为

$$\begin{aligned} U_{i,j}^n = & \frac{1}{4} \left[ \left( U + \frac{\Delta x}{4} U_x \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( G_y - \frac{8}{\Delta x} F - F_x - \frac{2\Delta t}{\Delta x} F_t \right) \right]_{i-1/2,j}^{n-1/2} + \\ & \frac{1}{4} \left[ \left( U - \frac{\Delta x}{4} U_x \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( G_y + \frac{8}{\Delta x} F - F_x + \frac{2\Delta t}{\Delta x} F_t \right) \right]_{i+1/2,j}^{n-1/2} + \\ & \frac{1}{4} \left[ \left( U + \frac{\Delta y}{4} U_y \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( F_x - G_y - \frac{8}{\Delta y} G - \frac{2\Delta t}{\Delta y} G_t \right) \right]_{i,j-1/2}^{n-1/2} + \\ & \frac{1}{4} \left[ \left( U - \frac{\Delta y}{4} U_y \right) - \frac{\Delta t}{4} \left( F_x - G_y + \frac{8}{\Delta y} G + \frac{2\Delta t}{\Delta y} G_t \right) \right]_{i,j+1/2}^{n-1/2} + \\ & I_{i,j+1/2}^{n-1/2} + I_{i,j-1/2}^{n-1/2} + I_{i+1/2,j}^{n-1/2} + I_{i-1/2,j}^{n-1/2}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $I_{i,j\pm 1/2}^{n-1/2}$  和  $I_{i\pm 1/2,j}^{n-1/2}$  为扩散项空间-时间密度矢量在守恒元上的积分通量,  $F_t, G_t, F_x$  和  $G_y$  为  $U, U_x$  和  $U_y$  的函数,  $U_x$  和  $U_y$  采用中心差分方法进行计算。

### 3.3 模拟结果及分析

图 3 所示 ABCD 矩形区域为数值模拟的计算区域,其中 AB 长 72 mm, AD 长 124 mm, BC 上端喉道狭缝入口宽 1.3 mm,中间喉道狭缝入口宽 1.1 mm。AB、CD 及除去狭缝入口的 BC 为固壁,采用固壁边界条件;AD 为气流入口,采用入口边界条件;BC 上的狭缝入口为燃烧室气流出口,采用非反射 CE/SE 边界条件<sup>[10]</sup>。计算初始,流场压力为 0.66 MPa(燃烧室发生点火延时的预混气体压力),温度为 300 K。为了实现电火花点火过程,取点火初始条件为:  $x \leq 12$  mm,  $26$  mm  $\leq y \leq 34$  mm(根据点火电嘴安装位置),压力为 1.0 MPa,温度为 3000 K。无特别说明时,计算结果图中的参数均为无量纲参数,选取的参考长度为燃烧室宽度,参考压力为标准大气压力,参考温度为 300 K。

图 4 为沿点火中心轴线的燃烧室压力曲线。图中 4 条曲线分别对应 0.037、0.067、0.095 和 0.122 时刻的燃烧室压力分布。由图可知,压力曲线存在明显间断,峰值压力不断增加,表明随着点火过程的进行,爆轰产生并逐渐增强,形成的爆轰波向燃烧室下游传播。数值模拟得到的爆轰波平均速度为 2239 m/s,与理论计算结果 2440 m/s 相符。从图中还可以看出,爆轰波波阵面较陡,一般为 3~5 个网格,表明 CE/SE 方法能够有效捕捉强间断,是一种较好的爆轰波模拟方法。

图 5 为 0.067、0.122 和 0.171 时刻燃烧室压力等值线图。0.067 时刻,燃烧室产生的爆轰波从点火中心向外传播。0.122 时刻,爆轰波沿  $x$  方向(气流流动方向)传播至 0.56 处,在  $y$  方向由点火中心向两端侧壁传播,远离点火中心位置的爆轰波传播至 0.8 处,靠近点火中心位置的爆轰波遇侧壁发生反射后与爆轰波膨

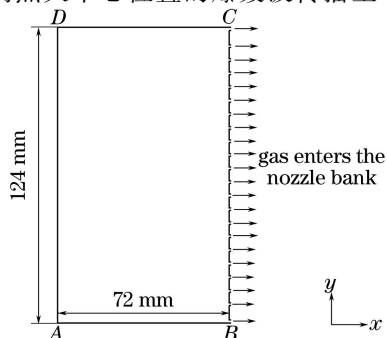


图 3 计算区域示意图

Fig. 3 Schematic of computational domain

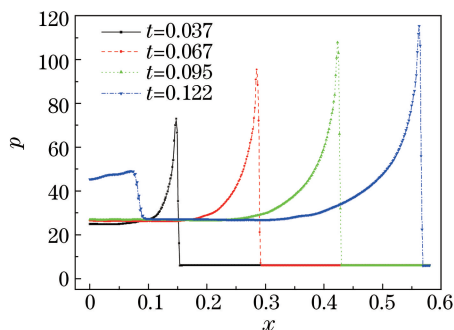


图 4 沿点火中心轴线的压力分布曲线

Fig. 4 Pressure profiles along the axis of ignition

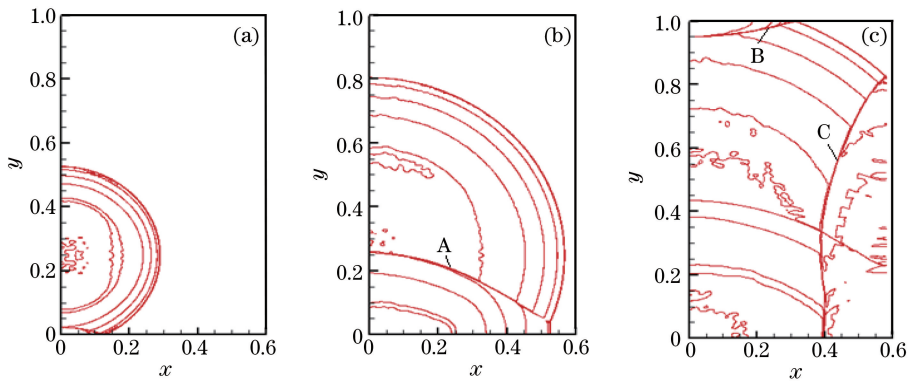


图5 不同时刻燃烧室压力等值线图

Fig. 5 Combustor pressure contours at different time

胀波作用形成一道激波 A。0.171 时刻,可见两道激波 B 和 C,分别由爆轰波遇侧壁和喷管列阵后发生反射并与膨胀波相互作用产生。

图 6 为 0.095 和 0.171 时刻燃烧室压力分布云图。0.095 时刻,燃烧室压力峰值靠近爆轰波与右侧壁,主要由爆轰波传播至右侧壁发生反射并与膨胀波相互作用产生强激波导致。0.171 时刻,燃烧室压力峰出现在左侧壁,同样是由于爆轰波遇固壁反射后与膨胀波作用产生强激波,最大瞬态压力超过 700,该瞬态压力对激光器燃烧室侧壁和喷管列阵产生剧烈的冲击作用。

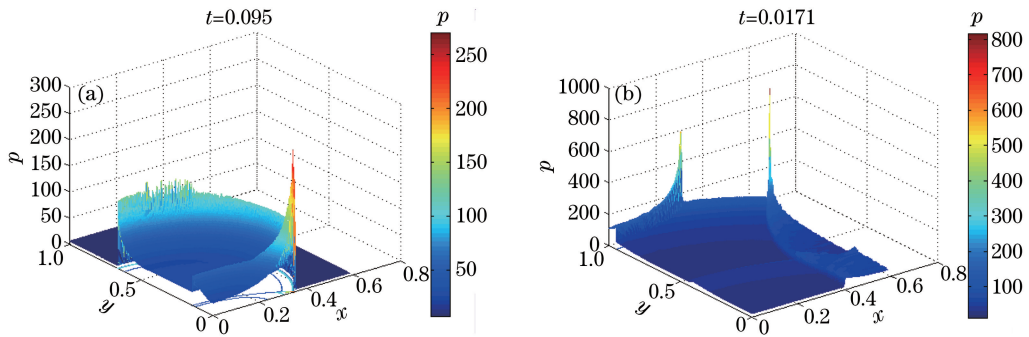


图6 不同时刻燃烧室压力云图

Fig. 6 Combustor pressure nephograms at different time

图 7 为不同时刻燃烧室出口(即喷管列阵入口)压力曲线图。图中 4 条曲线分别对应 0.127、0.135、0.148 和 0.171 时刻的压力分布。0.127 时刻,燃烧室产生的爆轰波传播至喷管列阵入口,曲线中的 3 个压力凹坑由喷管列阵入口泄压产生。0.135 时刻,在  $x$  方向上爆轰波遇喷管列阵后反射回传,在  $y$  方向上爆轰波向燃烧室左右侧壁传播,此时压力最大值靠近右侧壁。0.171 时刻,爆轰波作用范围进一步扩大。从整个变化过程来看,随着爆轰波的传播,爆轰对喷管列阵产生的瞬态冲击和扭矩作用不断变化,这是导致光学谐振腔失调的主要原因。

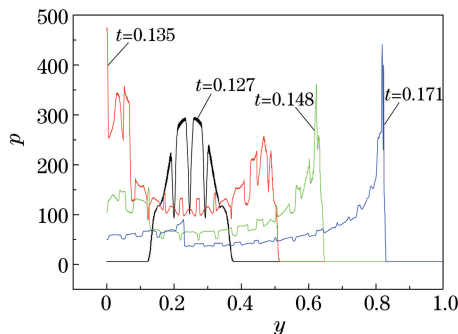


图7 不同时刻喷管列阵入口压力曲线

Fig. 7 Pressure profiles at nozzle inlet at different time



为进一步考察中心点火时产生爆轰的影响,对该过程进行了数值模拟。图 8 为不同时刻燃烧室压力等值线图。0.067 时刻,随着点火开始,爆轰逐渐产生并向四周传播,0.122 时刻爆轰波率先传播至燃烧室左右侧壁,遇固壁反射形成激波 A,0.175 时刻,爆轰波传播至喷管列阵发生反射回传产生激波 B,同时侧壁处的激波 A 演变为激波 C。燃烧室压力具有良好的对称性。

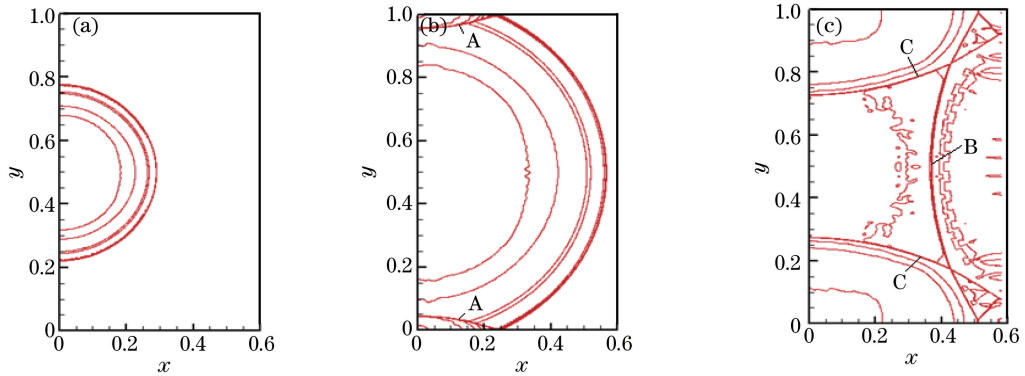


图 8 中心点火条件下燃烧室压力等值线图

Fig. 8 Combustor pressure contours under centre ignition condition

图 9 为中心点火条件下 0.127、0.136、0.150 和 0.175 时刻燃烧室出口(即喷管列阵入口)的压力分布曲线图。由图可知,随着爆轰的产生与传播,影响区域逐渐增大,从整个过程来看,压力分布具有良好的对称性,可见在这种情况下,爆轰的产生不会对喷管列阵产生非对称的扭矩作用,但爆轰瞬态压力峰值比正常燃烧高得多,即爆轰对燃烧室和喷管列阵产生巨大的冲击作用。因此,在实际应用中,为保证激光器的正常运转,必须有效抑制爆轰。

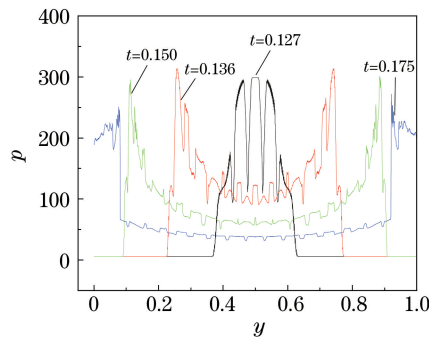


图 9 中心点火条件下喷管列阵入口压力分布曲线

Fig. 9 Pressure profiles at nozzle inlet under centre ignition condition

## 4 爆轰影响与抑制

数值模拟结果与实验结果一致,燃烧室中爆轰产生的巨大冲击作用造成光学谐振腔失调,导致激光器输出功率大幅降低。对于具有一定长宽比的激光器燃烧室,非中心点火延时产生的爆轰传播具有明显的二维非对称特征,由此产生的瞬态作用力对燃烧室侧壁以及喷管列阵组件产生强烈的扭矩作用。在中心点火条件下,燃烧室爆轰也会对喷管列阵产生巨大的瞬态冲击。因此,为保证 DF 化学激光器的安全运行,必须抑制燃烧室中的爆轰,采取的技术措施主要包括以下两个方面。

第一,消除点火延时,提高激光器点火成功率。根据实验经验,点火延时主要由点火电嘴长时间累积使用状态变差导致。激光器触发电火花时,点火电嘴发出一定频率的稳定放电声音,并产生具有一定长度的连续不断的明亮电火花,表明点火电嘴正常运行。存在放电声音不稳定、产生电火花不连续等隐患的点火电嘴需及时更换。对于长宽比较大或横截面积较大的燃烧室,可采用多个点火电嘴并联点火,进而达到提高激光器燃烧室点火成功率的目的。

第二,设计合理有效的应急条件,避免燃烧室爆轰的产生。通过燃烧室压力监测(具有较高的采样频

率),对激光器点火成功与否进行实时判断,发现点火延时及时停车,既消除爆轰隐患,又节省激光器原料气体。同时,为避免应急误判,需要设计科学合理的应急参数(应急判断时间、燃烧室压力上下限等)。

## 5 结 论

分析了 DF 化学激光器某次出光实验中燃烧室产生的爆轰问题,并采用时空守恒元与求解元方法对该爆轰过程进行了数值模拟,结果表明,燃烧室中爆轰产生的巨大冲击作用造成光学谐振腔的严重失调,进而导致激光器输出功率大幅降低。非中心点火延时产生的爆轰具有明显的二维非对称特征,由此产生的瞬态作用力对燃烧室侧壁以及喷管列阵组件产生强烈的扭矩作用。在中心点火条件下,燃烧室爆轰也会对喷管列阵产生巨大的瞬态冲击。因此,为保证激光器的安全正常运行,必须有效抑制燃烧室中的爆轰,研究结果对 DF 激光器的优化设计及安全运行具有重要的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 Roback R, Lynds L. Fluorine-atom generators for HF/DF combustion-driven chemical laser systems[C]. AAA/SAE 10<sup>th</sup> Propulsion Conference, San Diego, California, 1974.
- 2 Kwok M A, Corp A, Segundo E, *et al.* A model predictor for chemical laser combustors [C]. 32<sup>nd</sup> AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Anaheim, 2001.
- 3 Hua Weihong, Jiang Zongfu, Zhao Yijun. Numerical study of compositions match in combustor of DF chemical laser[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(1): 91-98.  
华卫红, 姜宗福, 赵伊君. DF 化学激光器燃烧室中化学配比的数值研究[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 91-98.
- 4 Tang Litie, Zhuo Haitao, Lu Qisheng. Numerical solution to multi-component chemical equilibrium flows in DF chemical laser chamber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(11): 1625-1629.  
唐力铁, 卓海涛, 陆启生. DF 激光器燃烧室反应流场的一种新的计算求解方法[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1625-1629.
- 5 Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element - a new approach for solving the Navier-Stokes and Euler equations[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 119(2): 295-324.
- 6 Zhang Z C, Yu S T J, He H, *et al.* Direct calculations of plume dynamics of a pulse detonation engine by the space-time CE/SE method[C]. 37<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, 2001.
- 7 Wang Jie, Weng Chunsheng, Yin Yanhua, *et al.* Numerical simulation of flow field at the entrance of nozzle bank in chemical laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101402.  
王 杰, 翁春生, 尹燕华, 等. 化学激光器喷管列阵入口流场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101402.
- 8 Wang Jie, Weng Chunsheng. Numerical calculation of 3-D flow outside multi-tube pulse detonation engine[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(6): 835-841.  
王 杰, 翁春生. 多管脉冲爆轰发动机外三维流场的数值计算[J]. 力学学报, 2009, 41(6): 835-841.
- 9 Guo Y H, Andrew T H, Wu J, *et al.* Extension of CE/SE method to 2D viscous flows[J]. Computers & Fluids, 2004, 33(10): 1349-1361.
- 10 Chang S C, Loh C , Yu S T, *et al.* Robust and simple non-reflecting boundary conditions for the space-time conservation element and solution element method[C]. 13<sup>th</sup> Computational Fluid Dynamics Conference, Snowmass Village, 1997.