

文章编号: 1001 - 2486(2011)02 - 0038 - 06

HF 化学激光器燃烧室中燃料配比的数值分析*

靳冬欢, 刘文广, 陈 星, 陆启生

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:利用最小自由能法及质量流量守恒原则,对 HF 化学激光器的 $\text{NF}_3 - \text{D}_2 - \text{He}$ 体系的化学平衡组分进行了计算,提出了 F 原子摩尔流量密度参量,分析了各输入气流的流量调节对燃烧室总温、总压、F 原子产率等的影响。在燃料配比不变的情况下,总流量的增加使得 F 原子流量也成比例增加,而由此带来的总压升高引起的 F_2 解离度、绝热燃烧温度、F 原子摩尔分数的波动可以忽略。改变 NF_3 流量或 D_2 流量都可以实现对过量系数的调整。相对于改变 D_2 流量,选择改变 NF_3 流量能够获得更高的 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度、更小的燃烧室总压波动幅度。增加主稀释剂 He 的流量迅速降低了绝热燃烧温度及 F 原子摩尔分数,但在主稀释比小于 15 时仍能维持较高的 F_2 解离度及 F 原子流量密度。

关键词:化学激光器;燃烧室;数值模拟;燃料配比

中图分类号:T248.5 文献标识码:A

Numerical Study of Compositions Proportioning in Combustor of HF Chemical Laser

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

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Chemical equilibrium compositions, total temperature and total pressure of HF chemical laser combustor for $\text{NF}_3 - \text{D}_2 - \text{He}$ reaction system were calculated by combining minimum Gibbs' free energy method and mass flux conservation principle. Mole flux of F atom as a new parameter that can be used to express yield of F atom was presented. The effect of changing fuels' mass flow rates on combustor's characteristics was analyzed with emphasis. When the compositions proportion in combustor was maintained constant, increasing of mass flow rate of F atom and total pressure of combustor was in proportion to the increasing of total mass flow rate. Changing of total pressure had no obvious impact on adiabatic flame temperature, degree of F_2 dissociation, and mole fraction of F atom. The changing of mass flow rates of NF_3 or D_2 was able to adjust the oxidizer excess factor. In comparison with changing mass flow rate of D_2 , changing mass flow rate of NF_3 could acquire much higher mole fraction and mole flux of F atom, much smaller fluctuating amplitude of combustor's total pressure. Increasing mass flow rate of He decreased adiabatic flame temperature and mole fraction of F atom observably. Whereas degree of F_2 dissociation and mole flux of F atom maintained a high level still when primary diluent ratio was less than 15.

Key words: chemical laser; combustor; numerical simulation; compositions proportioning

燃烧驱动连续波化学激光器一个显著特点是,解离含氟化合物的热源来自于燃烧室内化学反应放出的热量,不需要外加电源,是“真正的”全化学式的激光器^[1]。那么,燃烧室内燃料的选择及配比将对激光器的性能有着至关重要的影响。经过大量的实验研究,对于 HF 化学激光器来说,通常采用的燃料体系为 $\text{NF}_3 - \text{D}_2 - \text{He}$ ^[1];相比之下,燃料配比的选择范围就比较大。最佳的配比应该是在合适的温度及压力条件下,使 F 原子的解离度、摩尔分数或流量达到最高。计算给定热

力学状态下的化学平衡组分有两种方法:平衡常数法和最小自由能法。文献[1-2]采用平衡常数对 F_2 的解离度进行了计算,但是平衡常数法程序冗长,通用性差,因此在 White 等人提出最小自由能法计算平衡成分后,平衡常数法就逐渐为最小自由能法所代替^[3]。文献[3]采用最小自由能法对 DF 化学激光器的 $\text{NF}_3 - \text{H}_2$ 体系和 $\text{NF}_3 - \text{C}_2\text{H}_4$ 体系进行了计算,并将有关结果与实验数据进行了比较。本文结合最小自由能法及质量流量守恒原则,对 HF 化学激光器的 $\text{NF}_3 - \text{D}_2 - \text{He}$ 体系的

* 收稿日期:2010 - 11 - 05

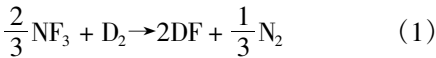
作者简介:靳冬欢(1981—),男,博士生。

化学平衡组分进行了计算,着重研究燃烧室各输入气流的流量调节对燃烧室温度、压力、F原子产率等的影响,以便为激光器的调试及性能参数优化等工作提供指导。

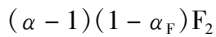
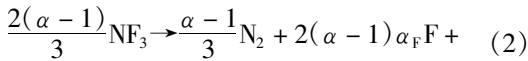
1 分析方法

对 $\text{NF}_3 - \text{D}_2 - \text{He}$ 体系而言,过量的 NF_3 与 D_2 、 He 混合并发生反应,忽略生成物中的微量组分,以 D_2 化学计量系数作为归一化因子,主要过程如下。

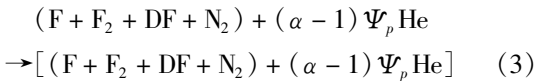
放热反应:



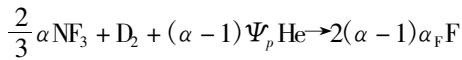
解离反应:



温度控制:



式(3)中各组分外侧再加上括号表示由这些组分组成的气体混合物。将上述三种反应合而为一,得到总的反应方程式



$$\gamma(T_0) = \frac{C_p^{\text{F}}n_{\text{F}} + C_p^{\text{F}_2}n_{\text{F}_2} + C_p^{\text{DF}}n_{\text{DF}} + C_p^{\text{N}_2}n_{\text{N}_2} + C_p^{\text{He}}n_{\text{He}}}{(C_p^{\text{F}} - R_u)n_{\text{F}} + (C_p^{\text{F}_2} - R_u)n_{\text{F}_2} + (C_p^{\text{DF}} - R_u)n_{\text{DF}} + (C_p^{\text{N}_2} - R_u)n_{\text{N}_2} + (C_p^{\text{He}} - R_u)n_{\text{He}}} \quad (8)$$

式(8)中, M_w^i 为组分 i 的摩尔质量, $R_u = 8.31434\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, C_p^i 为组分 i 的定压摩尔热容,它与组分的温度有关, $C_p^i = A_i + B_it_0 + C_it_0^2 + D_it_0^3 + E_i/t_0^2$, $t_0 = T_0/1000$, A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 、 E_i 的取值参照美国 NIST 标准数据库。

根据临界流质量流量公式,燃烧室输出气流的质量流量为

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R_u} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{p_0}{\sqrt{T_0}}} A_t \quad (9)$$

式中 A_t 为主喷管总的喉道面积。

由式(4)可得到燃烧室各输入气流的摩尔流量与 F 原子摩尔流量的关系为

$$\dot{n}_{\text{NF}_3} = \frac{\alpha \dot{n}_{\text{F}}}{3(\alpha-1)\alpha_{\text{F}}}, \quad \dot{n}_{\text{D}_2} = \frac{\dot{n}_{\text{F}}}{2(\alpha-1)\alpha_{\text{F}}}, \quad \dot{n}_{\text{He}} = \frac{\Psi_{\text{p}} \dot{n}_{\text{F}}}{2\alpha_{\text{F}}} \quad (10)$$

根据质量流量守恒原则,得到

$$\dot{m} = \dot{n}_{\text{NF}_3} M_w^{\text{NF}_3} + \dot{n}_{\text{D}_2} M_w^{\text{D}_2} + \dot{n}_{\text{He}} M_w^{\text{He}} \quad (11)$$

将式(9)、(10)代入式(11),得

$$+ (\alpha-1)(1-\alpha_{\text{F}})\text{F}_2 + 2\text{DF} + \frac{\alpha}{3}\text{N}_2 + (\alpha-1)\Psi_{\text{p}}\text{He} \quad (4)$$

式中 α_{F} 为 F_2 的解离度, α 为主氧化剂过量系数,也称余氧系数,定义为氧化剂的实际摩尔流量与参与放热反应的摩尔流量之比, Ψ_{p} 为主稀释比,采用过量等效 F_2 为归一化常数。三个参数的具体表达式如下:

$$\alpha_{\text{F}} = \frac{\dot{n}_{\text{F}}}{\dot{n}_{\text{F}} + 2\dot{n}_{\text{F}_2}}, \quad \alpha = \frac{3\dot{n}_{\text{NF}_3}}{2\dot{n}_{\text{D}_2}}, \quad \Psi_{\text{p}} = \frac{\dot{n}_{\text{He}}}{(\alpha-1)\dot{n}_{\text{D}_2}} \quad (5)$$

式中, \dot{n}_i 为组分 i 的摩尔流量。

假设燃烧室中的燃烧是等压绝热的^[3],给定总压及燃料配比,反应平衡组分及比例利用根据最小自由能法编制的化学反应平衡计算软件 CEA (Chemical Equilibrium with Application) 进行计算,过程如式(6)所示:

$$(p_0, \alpha, \Psi_{\text{p}}) \rightarrow (p_0, T_0, n_{\text{F}}, n_{\text{F}_2}, n_{\text{DF}}, n_{\text{N}_2}, n_{\text{He}}) \quad (6)$$

式(6)中, p_0 为燃烧室总压, T_0 为燃烧室总温,绝热条件下即为绝热燃烧温度, n_{F} 、 n_{F_2} 、 n_{DF} 、 n_{N_2} 、 n_{He} 为各生成物的摩尔分数。进而可以计算出生成物的摩尔质量及比热容比

$$M_w = n_{\text{F}} M_w^{\text{F}} + n_{\text{F}_2} M_w^{\text{F}_2} + n_{\text{DF}} M_w^{\text{DF}} + n_{\text{N}_2} M_w^{\text{N}_2} + n_{\text{He}} M_w^{\text{He}} \quad (7)$$

$$\frac{\dot{n}_{\text{F}}}{A_t} = \frac{2(\alpha-1)\alpha_{\text{F}} \sqrt{\frac{\gamma M_w}{R_u} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{p_0}{\sqrt{T_0}}}}{\frac{2}{3}\alpha M_w^{\text{NF}_3} + M_w^{\text{D}_2} + (\alpha-1)\Psi_{\text{p}} M_w^{\text{He}}} \quad (12)$$

式(12)中, \dot{n}_{F}/A_t 为 F 原子的摩尔流量密度,表示单位喉道面积上的 F 原子的摩尔流量,它可以反应同一燃烧室构型、不同运转参数的情况下 F 原子流量的波动情况。F 原子摩尔流量密度相对于 F 原子摩尔分数而言,综合考虑了燃烧室产物中 F 原子浓度及流量的变化,既可反映激光器的化学效率,也对激光器的出光功率大小有参考意义。

2 计算结果及讨论

2.1 总流量改变对 F 原子生成的影响

在燃烧室输入气流组分分配比不变的情况下,总流量的增加使得燃烧室的压力也成比例增加,对化学激光器的性能也有着重要的影响^[4]。参照 HF 化学激光器的典型特性参数^[1],选定过量系数 $\alpha = 1.5$,主稀释比 $\Psi_{\text{p}} = 10$ 。图 1 给出了总流量的

改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响,横坐标以总压表征总流量的改变,总压的增加对应着总流量的增加。从图中可以看出,随着总流量的增加, F_2 解离度在下降,绝热燃烧温度在提高。 F_2 解离度的下降意味着放热反应(式(1))可以将更多的热量用来加热反应产物,使之达到更高的绝热燃烧温度。图 2 给出了总流量改变对 F 原子摩尔分数及摩尔流量密度的影响,横坐标也是以总压表征总流量的改变。 F_2 解离度的下降直接导致了 F 原子摩尔分数的降低。F 原子的摩尔流量密度随总流量的增加几乎在线性升高,这反映了相对于 F 原子摩尔分数的降低,F 原子流量的增加占据了绝对优势。因此,我们可以看到,随着总流量增加使得燃烧室总压从 1.01325 bar 变化到 10.1325 bar,F 原子的流量基本上是逐倍增加的,而 F_2 解离度、绝热燃烧温度、F 原子摩尔分数的波动仅在 1% 左右,对 F 原子流量的影响可以忽略。这一结论与文献[3]是一致的。

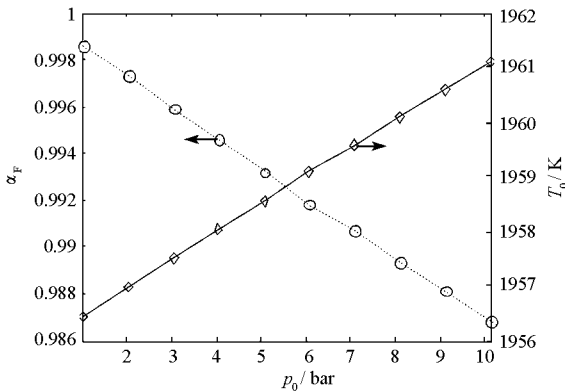


图 1 总流量改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响
Fig.1 Effect of changing total mass flow rate on adiabatic flame temperature and the degree of F_2 dissociation

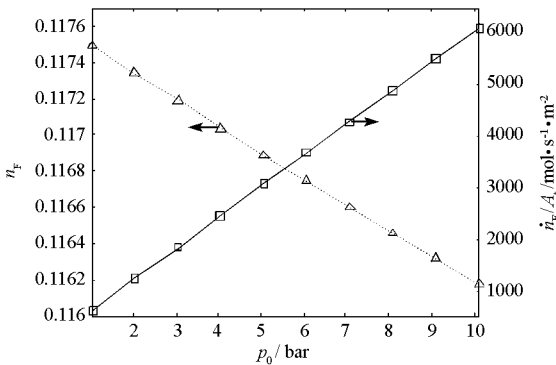


图 2 总流量改变对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响
Fig.2 Effect of changing total mass flow rate on mole fraction and mole flux of F atom

2.2 NF_3 、 D_2 流量改变对 F 原子生成的影响

实验过程中,常需要调整单一组分的流量,以

实现对燃料配比的调节。在保持 D_2 、He 流量不变的情况下调整 NF_3 流量,或者在保持 NF_3 、He 流量不变的情况下调整 D_2 流量,过量系数、主稀释比也会同步变化。选定过量系数 $\alpha = 1.5$,主稀释比 $\Psi_p = 10$ 为基准参数设置。

图 3 给出了 NF_3 流量的改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响,由于 D_2 流量保持不变,横坐标以过量系数表征 NF_3 流量的改变,过量系数的增加对应着 NF_3 流量的增加。从图中可以看出, NF_3 流量的增加,绝热燃烧温度下降。绝热燃烧温度高于 1900K 时, F_2 解离度 $\alpha_F \approx 1$, F_2 基本完全解离,温度继续降低时, F_2 解离度也迅速下降。当 NF_3 流量增加到过量系数为 2.9 时,绝热燃烧温度为 1188K, F_2 解离度仅为 21%。

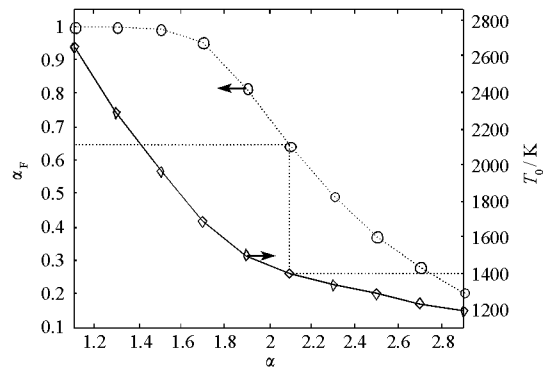


图 3 NF_3 流量改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响
Fig.3 Effect of changing NF_3 mass flow rate on adiabatic flame temperature and the degree of F_2 dissociation

图 4 给出了 NF_3 流量的改变对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响,横坐标也是以过量系数表征 NF_3 流量的改变。从图中可以看出,对某一确定的主稀释剂流量,F 原子的摩尔分数及 F 原子摩尔流量密度均存在最大值。这是因为 NF_3 流量降低时,参与解离反应的 NF_3 减少,但过

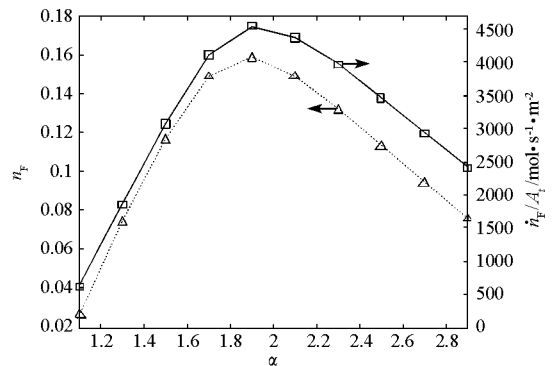


图 4 NF_3 流量改变对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响
Fig. 4 Effect of changing NF_3 mass flow rate on mole fraction and mole flux of F atom

量系数的降低导致绝热燃烧温度提高, F_2 解离度高;反之,参与解离反应的 NF_3 增加,而 F_2 解离度降低。综合作用下, F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度均出现最大值,此时对应的最佳过量系数 $\alpha = 1.9$ 。

图5、图6分别给出了 D_2 流量的改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度、 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响。由于此时 NF_3 流量保持不变,横坐标以过量系数表征 D_2 流量的改变,过量系数的增加对应着 D_2 流量的降低。对比图5与图3、图6与图4可以看出,改变 D_2 流量时,绝热燃烧温度、 F_2 解离度、 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的变化趋势和改变 NF_3 流量时相同,但绝热燃烧温度及 F_2 解离度的变化范围稍有扩展, F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的变化范围有所缩窄。 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度出现最大值时的过量系数与改变 NF_3 流量的情况也不一样,此时对应的最佳过量系数 $\alpha = 1.7$,即改变 D_2 流量相对于改变 NF_3 流量, F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度最大值的出现有所提前。

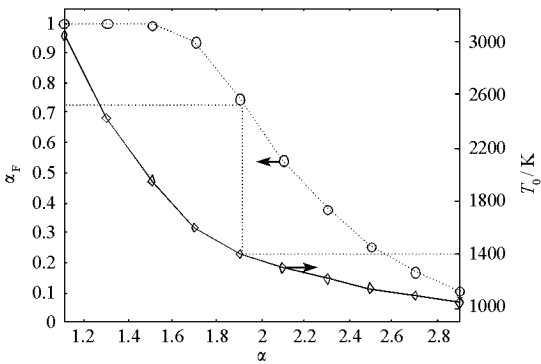


图5 D_2 流量改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响
Fig.5 Effect of changing D_2 mass flow rate on adiabatic flame temperature and the degree of F_2 dissociation

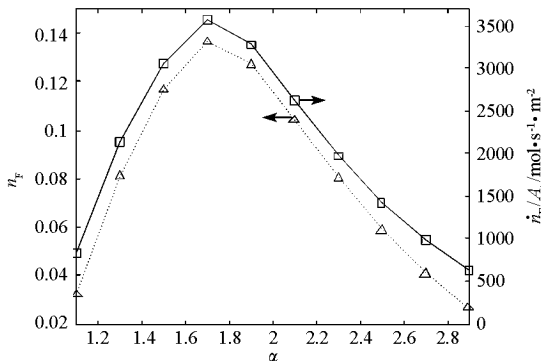


图6 D_2 流量改变对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响

Fig. 6 Effect of changing D_2 mass flow rate on mole fraction and mole flux of F atom

由式(5)中的主稀释比公式 $\Psi_p = \dot{n}_{He} / [(\alpha - 1) \dot{n}_{D_2}]$ 可知,改变 NF_3 流量时,主稀释比仅随过量系数的改变而改变,而改变 D_2 流量时,过量系数及 D_2 流量的改变都会影响主稀释比。相对于增加 NF_3 流量时而言,随着 D_2 流量的降低, $\alpha < 1.5$ 时,主稀释比降低, $\alpha > 1.5$ 时,主稀释比增加。这就造成 $\alpha < 1.5$ 时,绝热燃烧温度及 F_2 解离度更高, F 原子的摩尔分数提高; $\alpha > 1.5$ 时,绝热燃烧温度及 F_2 解离度更低,且下降得更为迅速, F 原子的摩尔分数也随之下降, F 原子的摩尔分数的最大值比改变 NF_3 流量时的相应数值下降了14%。还有, $\alpha > 1.5$ 时,主稀释比的增加、 F_2 解离度的迅速降低也就加快了 F 原子的摩尔分数与摩尔流量密度最大值的出现。由于改变 D_2 流量时,过量的 NF_3 流量相对改变 NF_3 流量时有所减少,因此 F 原子摩尔流量密度的最大值也比改变 NF_3 流量时的数值下降了28%。

理论上讲, F 原子的摩尔分数与摩尔流量密度的最大值对应的最佳过量系数并不一样,这是因为根据 F 原子的摩尔分数与摩尔流量密度的定义,可知二者存在如下关系:

$$\dot{n}_F/A_t = (\dot{n}_{total}/A_t) n_F \quad (13)$$

式中, \dot{n}_{total} 是燃烧室产物的摩尔总量。对于同一燃烧室构型, A_t 不变。图7给出了改变 NF_3 流量或 D_2 流量时 \dot{n}_{total}/A_t 的变化趋势。随着 NF_3 流量的增加, \dot{n}_{total} 在增大, F 原子的摩尔分数 n_F 与其相乘后,高点应该会发生后移;随着 D_2 流量的减少, \dot{n}_{total} 在减小, F 原子的摩尔分数 n_F 与其相乘后,高点应该会发生前移。从图4、图6中并没有观察到这种现象,主要原因是取样点间隔过大所

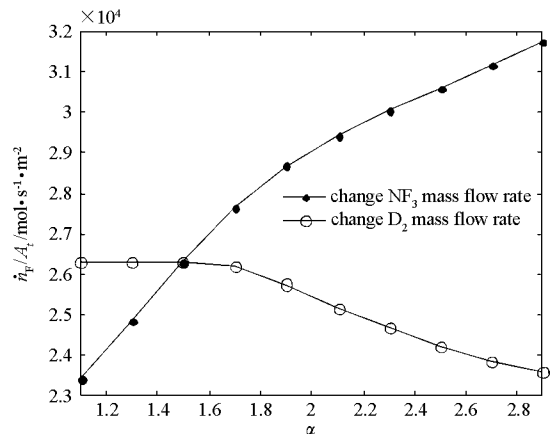


图7 改变 NF_3 流量或 D_2 流量对燃烧室产物摩尔总量的影响

Fig.7 Effect of changing NF_3 or D_2 mass flow rate on total mole flux of combustor productions

致,当然这也说明 F 原子的摩尔分数与摩尔流量密度的最大值对应的最佳过量系数差别不大。

另外,改变 NF_3 流量或改变 D_2 流量都会同时改变燃烧室总压。取基准设置 $\alpha = 1.5$ 时的燃烧室总压 $p_0 = 5.06625$ bar。根据 He 流量保持不变的条件,即 $n_{He}/A_t = \text{常数}$,可以反推出改变 NF_3 流量或改变 D_2 流量后的燃烧室总压,燃烧室总压的波动如图 8 所示。增加 NF_3 流量时,相对于总温的下降,总流量的增加略为显著,燃烧室总压稍有上升,从 5 bar 上升到 5.7 bar,波动幅度 14%,在 $\alpha < 1.9$ 时,波动幅度仅为 3.3%;改变 D_2 流量对总流量影响较小,但总温在迅速降低,燃烧室总压也必须随之下降才能保证几乎恒定的流量运输。减小 D_2 流量时,燃烧室总压从 6.43 bar 减小到 3.46 bar,波动幅度 58.6%。

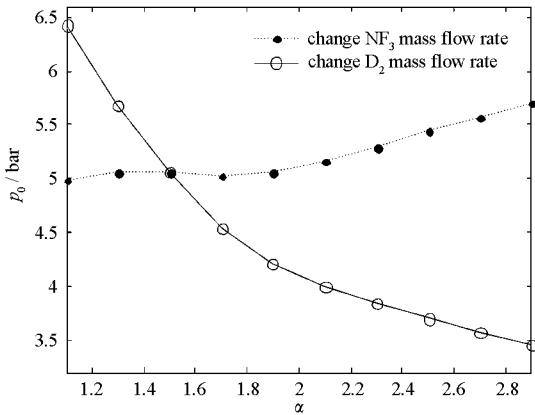


图 8 改变 NF_3 流量或 D_2 流量对燃烧室总压的影响
Fig.8 Effect of changing NF_3 or D_2 mass flow rate on total pressure of combustor

综上所述,要改变过量系数,选择改变 NF_3 流量能够获得更高的 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度。而且,在既定的设计工况下,小范围的燃烧室总压波动更有利于后续的主副喷管的压力匹配、主副气流的良好混合及激射区长度的保持等。从这一点来说,选择改变 NF_3 流量也更具优势。

2.3 He 流量改变对 F 原子生成的影响

保持 NF_3 、 D_2 流量不变,调整 He 的流量,主稀释比也会同步变化。选定过量系数 $\alpha = 1.5$ 。图 9 给出了不同 He 流量对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响。由 $\Psi_p = n_{He}/[(\alpha - 1)n_{D_2}]$ 可知,主稀释比仅随 He 的流量的改变而改变,所以横坐标以主稀释比表征 He 流量的改变,主稀释比的增加对应着 He 流量的增加。从图 9 中可以看出,He 流量的增加,绝热燃烧温度下降。绝热燃烧温度高于 1900K 时,F 原子基本完全解离,温度继续降低时, F_2 解离度也迅速下降。当 He 流量增加到

$\Psi_p = 50$ 时,绝热燃烧温度为 975K, F_2 解离度仅为 9.2%。实际上,在 NF_3 、 D_2 流量都不变的情况下,放热反应(式(1))释放的热量一定,且参与解离反应的 NF_3 流量也维持恒定,那么,随着 He 流量的增加,这些热量能将反应生成物加热到的温度越来越低,随之而来的就是 F_2 解离度的不断下降。

值得注意的是,在相同的绝热燃烧温度下,燃烧产物中 He 比例的增加将有助于提高 F_2 解离度^[1],如图 3、5、9 中的折线所示。在绝热燃烧温度同为 1400K 时,图 3 中 $\Psi_p = 4.56$, $\alpha_F = 0.64$,图 5 中 $\Psi_p = 6.98$, $\alpha_F = 0.73$,图 9 中 $\Psi_p = 22.0$ 对应的 $\alpha_F = 0.79$ 。 NF_3 流量的增加或 D_2 流量的减少在提高过量系数的同时,也降低了主稀释比,从而促进了 F_2 解离度的降低;He 流量的增加,虽然提高了主稀释比,但由此带来的绝热燃烧温度的降低占据主导地位, F_2 解离度总的趋势还是下降的。

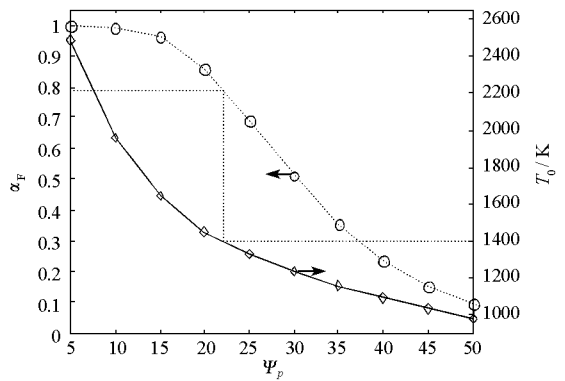


图 9 He 流量改变对绝热燃烧温度及 F_2 解离度的影响
Fig.9 Effect of changing He mass flow rate on adiabatic flame temperature and the degree of F_2 dissociation

图 10 给出了 He 流量的改变对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响,横坐标也是以主稀释比表征 He 流量的改变。绝热燃烧温度及 F_2 解

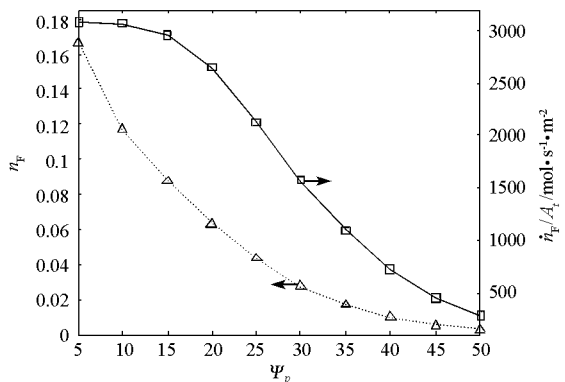


图 10 改变 He 流量对 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度的影响
Fig.10 Effect of changing He mass flow rate on mole fraction and mole flux of F atom

离度的降低也直接造成了 F 原子摩尔分数的降低。相对而言, F 原子摩尔流量密度下降较慢, 其变化趋势与 F_2 解离度基本相同, 根本原因在于参与解离反应的 NF_3 流量未变, F_2 解离度变化就直接决定了 F 原子摩尔流量密度的变化。从式(13)也可以看出, He 流量的增加, 使得 \dot{n}_{total} 在增大, n_F 与其相乘后, \dot{n}_F 虽然仍在下降, 但变化趋缓在 $\Psi_p < 15$ 时, 尤其明显, 此时即使 He 流量在实验过程中略有起伏, 也不会使 F 原子摩尔流量密度产生较大波动而影响激光器的性能。

另外, He 流量的增加, 在降低燃烧室总温的同时, 也减小了反应产物的分子量, 为了使增加的总流量顺利排出燃烧室, 燃烧室总压就必须提高。取基准设置 $\alpha = 1.5$ 时的燃烧室总压 $p_0 = 5.06625\text{bar}$ 。根据 NF_3 或 D_2 流量保持不变的条件下, 即 \dot{n}_{NF_3}/A_i 或 \dot{n}_{D_2}/A_i 保持不变, 可以计算出改变 He 流量时燃烧室总压的波动, 如图 11 所示。增加 He 流量使得主稀释比从 5 变化到 50, 燃烧室总压从 4.6bar 上升到 8.6bar, 波动幅度达 79.1%。在 $5 < \Psi_p < 15$ 时, 燃烧室总压波动幅度明显降低, 仅为 18%。这也是主稀释比的通常取值范围定在 $5 < \Psi_p < 15$ 区间的一个重要原因。

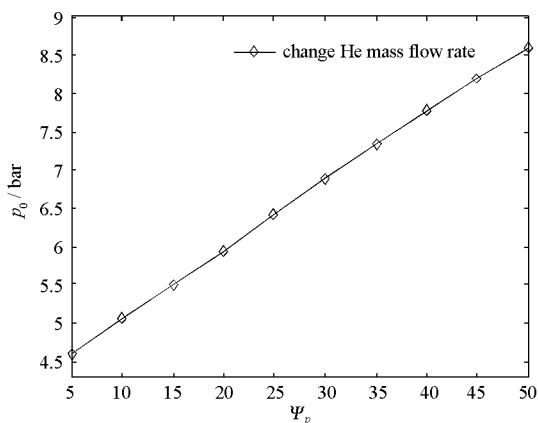


图 11 改变 He 流量对燃烧室总压的影响

Fig. 11 Effect of changing He mass flow rate on total pressure of combustor

主稀释剂不仅对 F 原子生成环境有影响, 也对主气流的气动特性起着重要的调节作用^[5]。增加主稀释剂 He 可以提高主气流在喷管出口的马赫数及速度, 从而降低光腔区压力、拉长激光区长度。从前面的分析来看, 主稀释剂 He 的增加应该适度, 否则会大幅度降低 F 原子产率, 它带来的燃烧室总压的升高甚至会连带升高光腔区压力, 加快碰撞去激活速率。

3 结论

在燃烧驱动连续波化学激光器的实验中, 经常需要调节燃烧室各输入气流的流量, 以实现反应环境及进程的控制。本文结合最小自由能法及质量流量守恒原则, 对 HF 化学激光器的 $NF_3 - D_2 - He$ 体系的化学平衡组分进行了计算, 提出了 F 原子流量密度参量, 分析了各输入气流的流量调节对燃烧室总温、总压、F 原子产率等的影响。

在燃烧室输入气流组分分配比不变的情况下, 总流量的增加使得 F 原子流量也成比例增加, 而由此带来的总压升高引起的 F_2 解离度、绝热燃烧温度、F 原子摩尔分数的波动可以忽略。改变 NF_3 流量或 D_2 流量都可以实现对过量系数的调整。相对于改变 D_2 流量, 选择改变 NF_3 流量能够获得更高的 F 原子的摩尔分数及摩尔流量密度、更小的燃烧室总压波动幅度。增加主稀释剂 He 流量迅速降低了绝热燃烧温度及 F 原子摩尔分数, 但在 $\Psi_p < 15$ 时仍能维持较高的 F_2 解离度及 F 原子流量密度, 此时燃烧室总压波动幅度也较小。

基于上述结论, 在调试化学激光器时可参考以下建议: 对于预先设计的燃料配比, 可从低流量做起, 此时气体损耗小、燃烧室总压低, 但输出气流的气动特性、组分等基本不变; 若在某些情况下需要调整过量系数, 可优先考虑调整 NF_3 流量, 除了上面提到的优点外, NF_3 相对 D_2 而言, 流量一般较大, 对调节精度不会过于敏感; 主稀释剂调节范围不宜过大, 以免大幅降低激光器的化学效率及出光功率。当然, 为了确定最优的燃料配比, 还需要对各输入气流流量进行组合调节, 并结合实验过程中反馈的激光器输出参量的变化, 再对流量进行微量调整。

参考文献:

- [1] 格罗斯 R W F, 博特 J F, 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] Kwok M A, Amimoto S. Modeling HF Gain Generator F-atom Flows[C]//31st AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Denver, Colorado, 2000.
- [3] 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] 华卫红, 姜宗福, 赵伊君. 三喷管型连续波 HF 化学激光器性能的数值模拟研究[J]. 中国激光, 1997, 24(3): 221-227.
- [5] 李兰. 连续波 HF/DF 化学激光器增益发生器结构与运转模式数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.