

文章编号: 0258-7025(2010)11-2838-06

基于 NCl_3/I_2 体系的化学发生碘原子源 数值模拟研究

李留成 多丽萍

(中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 提出了以 NCl_3 分解燃烧产生 Cl 原子随后与含碘化合物发生作用获得碘原子的技术方法。建立了 NCl_3/I_2 燃烧体系的化学反应动力学模型, 利用开发的 Matlab 程序进行了一维数值模拟计算。计算结果表明, I_2 与 NCl_3 的流量对比对碘原子粒子数密度和产率的影响较大, 且存在一个最佳范围, 该最佳范围随着总压力的增大而逐渐变小。最优化的碘原子产率随着压力的增大一直在减小, 说明较高的压力会损害碘原子的产生效率, 因而该方法比较适合直接加入到主气流中进行反应以产生碘原子。当初始压力 $P_0 = 666.61 \text{ Pa}$ 时 I_2 与 NCl_3 的初始配比的最佳值为 0.62, 此时碘原子相对于 NCl_3 的产率为 117%, 相对于 I_2 的产率为 189%。计算结果说明基于 NCl_3/I_2 体系发生碘原子是一种比较有效的产生碘原子的途径。

关键词 激光器; 氧碘化学激光器; 原子碘的产生; 碘原子; 化学法

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2838

Simulations of Chemical Atomic Iodine Generator Based on NCl_3/I_2

Li Liucheng Duo Liping

(Key Laboratory of Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract A chemical method of iodine atoms generation based on NCl_3 is proposed. Iodine atoms are generated by the reaction of iodine donors with chlorine atoms produced from the combustion of NCl_3 . A chemical model for NCl_3/I_2 reaction system is developed. Simplified one-dimensional numerical simulations are carried out with a developed Matlab code. The results indicate that the number density and yield of iodine atoms are significantly influenced by the molar flow rate ratio of I_2 to NCl_3 , and the optimum ratio decreases with the total pressure. The optimum yield of iodine atoms decreases with the total pressure, which indicates that this method favors direct injection into the main gas flow to produce iodine atoms. The optimum ratio of I_2 to NCl_3 is 0.62 at the pressure of 666.61 Pa with iodine atom yield of 117% versus NCl_3 and 189% versus I_2 . The modeling results show that the NCl_3/I_2 reaction system is an effective method to produce iodine atoms.

Key words lasers; chemical oxygen-iodine laser; atomic iodine generator; iodine atoms; chemical methods

1 引 言

传统的连续波超音速氧碘化学激光器主要是由单重态氧发生器、碘蒸气发生器、超音速混合喷管、光腔及真空系统等几部分组成^[1]。作为储能粒子的 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 通常是在单重态氧发生器中反应产生的, 也可以通过放电产生^[2]。而作为激射介质的碘原子则是由碘分子发生器蒸发出的碘分子蒸气, 在超音速混合喷管及光腔中与 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 碰撞解离而产生的, 在

此过程中每解离一个碘分子需要消耗 4~6 个单重态氧分子^[3], 这严重限制了碘分子的加入量, 因为如果大量加入碘分子, 则产生的单重态氧将全部用于解离碘分子而无法抽运产生的激发态碘原子, 从而不能激射出光。因而, 传统的连续波氧碘化学激光器中碘分子蒸气的流量通常较小, 一般是氯气流量 (即总氧流量) 的 2%~5%, 储存在单重态氧中的大量能量通过重复抽运碘原子而产生激光。由于腔镜

收稿日期: 2010-02-10; 收到修改稿日期: 2010-04-21

作者简介: 李留成(1978—), 男, 博士, 研实员, 主要从事化学激光、模拟计算、反应动力学和化学激光基础等方面的研究。

E-mail: liliucheng@dicp.ac.cn

尺寸和气流速度的限制,注定了气流经光腔后还有剩余的单重态氧,能量损失很多,从而限制了氧碘激光器的化学效率。如果能够获得大流量的碘原子,就可以将发生的碘原子直接与单重态氧混合传能,实现激励出光,避免了消耗 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 的过程,从而克服上述问题。

目前用于氧碘化学激光器的碘原子发生技术,主要有紫外光解离技术、放电等离子体技术解离产生碘原子技术^[4,5],但它们都有一个弱点,就是碘原子产生的浓度不够高,产生的碘流量不够大,而且总体讲它们的电效率不高,不具备放大性。用化学方法产生碘原子这些年来陆续有一些报道^[6-9],主要采用 $\text{F}_2 + \text{NO}$ 或 $\text{ClO}_2 + \text{NO}$ 反应产生 F 原子和 Cl 原子, F 原子和 Cl 原子与 HI 或 DI 反应生成碘原子的技术方案。最新研究结果^[8,9] 获得了 $3.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的碘原子浓度,但是与氧发生器对接的结果是,小信号增益比预计的要低,可能是因为过量 DI 的氧化副产物 DO_2 自由基对 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 的严重猝灭的结果。

针对目前碘原子发生技术存在的困难,本文提出基于 NCl_3 喷射分解产生氯原子^[10],进而与碘代物置换反应产生碘原子的技术方案。实验上已经证实, NCl_3 喷射分解与碘分子反应传能可以产生激发态碘原子^[11],而且由于是化学碘原子发生器,不需要外接电能,因而具备很好的放大性。本文的目的是对基于 NCl_3/I_2 体系的化学碘原子发生技术进行数值模拟研究。建立了化学反应动力学模型,并对氯原子和碘原子的发生效率及其影响的关键因素进行了重点研究,得到了一些规律性结果,对化学法碘原子发生技术的发展具有参考价值和现实意义。

2 模 型

2.1 化学反应动力学模型

基于 NCl_3 分解产生的氯原子与碘分子等反应生成碘原子,其化学反应包括分子离解、激发、复合以及自由基和中间物种及中性物质的反应和能量传递等。

2.1.1 NCl_3 的分解燃烧

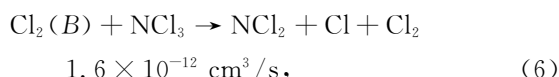
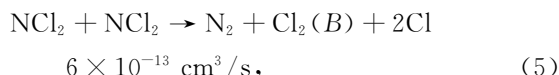
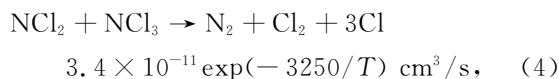
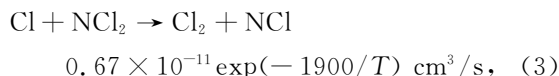
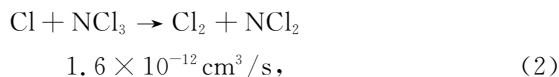
首先, NCl_3 气体通过链式分解反应过程生成 Cl 原子,该过程已经得到了深入的实验和理论研究^[12,13],表明可以得到较高的 Cl 原子产率。

链引发:

NCl_3 气体的链式分解反应可以通过火花、加热和紫外光等进行引发



链传播:



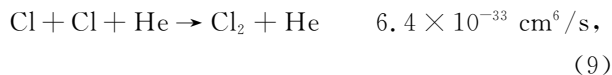
在链传播过程中, NCl_2 是引发支链的重要自由基,它的存在不仅迅速地产生了 Cl 原子,也产生了 $\text{Cl}_2(B)$ 等能量载体。由于 $\text{Cl}_2(B)$ 可以迅速地解离为 Cl 原子,因此由(5)和(7)式可以得到 $2\text{NCl}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 4\text{Cl}$,据此推测,在 NCl_2 自由基浓度最大时加入 I_2 可以获得最大的碘原子浓度。

链终止:

作为 NCl_3 分解链式反应的重要能量载体, $\text{Cl}_2(B)$ 主要是通过 Cl 原子猝灭损耗掉的,并且反应速率达到了 $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ 量级

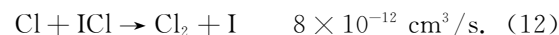
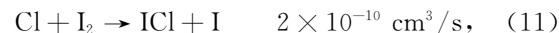


另外,Cl 原子自身也会通过三体复合作用而湮没

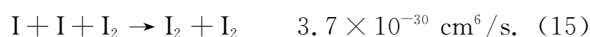
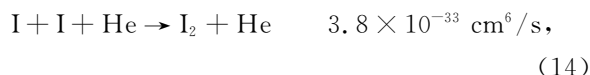
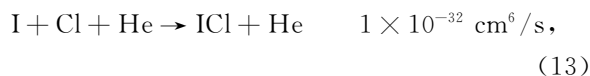


2.1.2 碘原子的产生

如果在 NCl_3 燃烧火焰中加入 I_2 等含碘化合物,则 Cl 原子就可以快速地与含碘化合物反应产生碘原子,同时 Cl 原子也会与复合所产生的 ICl 或 I_2 反应产生碘原子



反应中所产生的碘原子会通过三体碰撞复合而产生 ICl 和 I_2 分子



(1)~(15)式的反应速率常数来自于已知的文献数据^[14]。

2.2 计算模型

本系统利用 NCl_3 燃烧产生的 Cl 原子与 I_2 反应产生碘原子,共包括 15 个化学反应,即反应(1)~(15)式,其中共包含了 11 种化学成分,即 NCl_3 , NCl_2 , Cl , Cl_2 , NCl , N_2 , $\text{Cl}_2(B)$, I_2 , ICl , I , He 。

假设有 m 个物种粒子同时参加 n 个基元化学反应,则对于第 j 个物种粒子来说,其粒子数密度随着时间的变化可以表示为

$$\frac{dN_j}{dt} = \sum_{i=1}^n v_{ij} k_i \prod_{j=1}^m N_j^{u_{ij}}, \quad (16)$$

式中 N_j 为第 j 个物种粒子的粒子数密度, t 为反应时间, v_{ij} 为第 j 个物种在参与第 i 个基元反应时的化学计量系数,当它作为反应物出现时 v_{ij} 取负值,当它作为产物出现时 v_{ij} 取正值,当它不出现时取零, k_i 为第 i 个反应的反应速率常数, u_{ij} 定义为当 $v_{ij} < 0$ 时(即第 j 个物种在第 i 个反应中为反应物) $u_{ij} = |v_{ij}|$,而当 $v_{ij} \geq 0$ 时 $u_{ij} = 0$ 。

写出所有物种粒子的浓度 - 时间微分方程,组成微分方程组,然后进行积分,可以得到各个物种的粒子数密度随时间 t 的变化关系。特别地,对于气体流动管反应系统,利用物种的粒子数密度随时间的分布关系以及管内流体的线速度,可以进一步获得各个物种粒子数密度沿着流动方向的空间分布,并可以通过粒子数密度的时间、空间分布数据进一步计算得到其他所需要的参数。

在此过程中,使用了预混理论模型,即假设:1) 忽略气体的混合过程,认为在加入时刻起各股气流就已经是混合均匀的;2) 假设在气体加入过程中气流的线速度不发生改变;3) 忽略反应器表面对激发态粒子的脱活作用。

根据此动力学模型所得到的微分方程组采用四阶 Runge-Kutta 方法进行计算,即可得到各组分的粒子数密度沿着气流方向的变化。

3 计算结果与分析讨论

3.1 NCl_3 分解及 Cl 原子的产生

为了获得较高浓度的碘原子,就必须有较高浓度的 Cl 原子,因此首先研究了 NCl_3 分解燃烧的化学动力学过程。 NCl_3 分解燃烧模型中包含的反应为(1)~(10)式,其中共包含了 8 种化学成分,即 NCl_3 , NCl_2 , Cl , Cl_2 , NCl , N_2 , $\text{Cl}_2(B)$, He 。在计算过程中假定 NCl_3/He 混合气体的体积分数为

10%,温度设为 300 K,气流的线流速设为 10 m/s。

图 1 为 NCl_3/He 混合气体在初始压力 $P_0 = 666.61$ Pa 时典型的物种浓度沿气体流动方向的变化曲线,可以看到在下游 6 cm 处 Cl 原子产率达到最大值 26%,而 Cl 原子粒子数密度达到 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

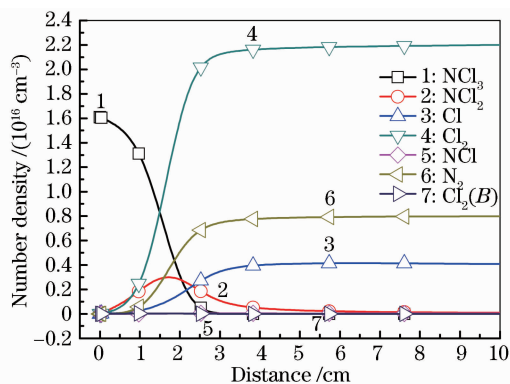


图 1 典型的 NCl_3 分解燃烧时各物种浓度随距离的变化关系 (NCl_3/He 体积分数为 10%, 初始压力为 666.61 Pa)

Fig. 1 Typical profiles of number densities of all species as a function of reaction path in the NCl_3 auto-decomposition (initial volume fraction of NCl_3/He is 10%, initial total pressure is 666.61 Pa)

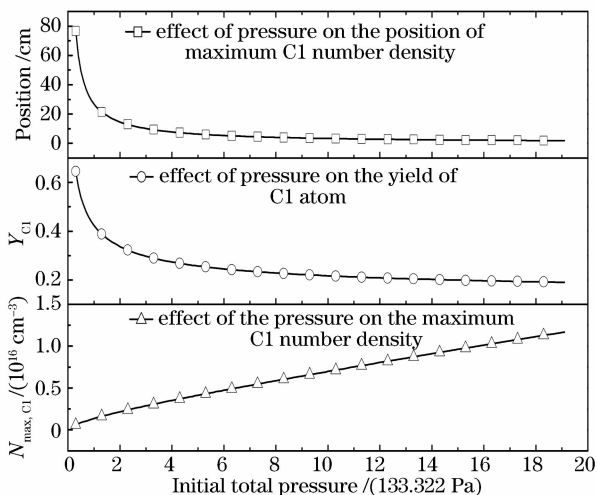


图 2 NCl_3 分解时混合气体初始压力 P_0 对最大 Cl 原子产率、最大 Cl 粒子数密度以及出现最大值距离的影响 (NCl_3/He 体积分数为 10%)

Fig. 2 Influence of initial total pressure of NCl_3/He mixture on the maximum Cl yield, maximum Cl number density and distance (initial volume fraction of NCl_3/He is 10%)

通过改变初始压力 P_0 ,考察了 NCl_3/He 混合物燃烧过程中最大 Cl 原子产率、最大 Cl 原子粒子数密度以及达到最大值时的距离等参量随着初始压

力的变化关系,计算结果如图 2 所示。从图 2 中可以看到,随着初始压力的增大,尽管 Cl 原子产率在减少,但 Cl 原子粒子数密度却一直在增加,而且达到最大值时的距离也一直在缩减。

很显然,这是由于当反应管内的压力增大时,由 He 参与的 Cl 原子三体复合损耗效应(9)式也随之而增大,从而降低了 Cl 原子的产率(定义 Cl 原子的产率 $Y_{\text{Cl}} = N_{\text{max,Cl}}/N_{0,\text{NCl}_3}$)。从图 2 中可以看到 $P_0 = 66.661 \text{ Pa}$ 时,Cl 原子的产率接近于 50%,而当压力 $P = 666.61 \text{ Pa}$ 时,Cl 原子的产率却只有 26%。尽管如此,由于 NCl_3 的初始粒子数密度也增大了,所以整个燃烧过程都加快了,因此达到最大值的距离减小了,同时最大 Cl 原子数密度也增大了。

3.2 基于 NCl_3/I_2 体系的碘原子发生及其参数影响关系

3.2.1 初始 I_2 与 NCl_3 配比的影响

固定反应气体混合物的总压为 666.61 Pa,考察了初始 I_2 与 NCl_3 配比对于碘原子产率的影响(包括相对于 NCl_3 的产率 $N_{\text{max,I}}/N_{0,\text{NCl}_3}$ 和相对于 I_2 的产率 $N_{\text{max,I}}/N_{0,\text{I}_2}$),计算结果如图 3 所示,很显然在一定的气体压力下 I_2 与 NCl_3 的初始配比存在着最佳值,当初始压力 $P_0 = 666.61 \text{ Pa}$ 时该最佳值约为 0.62,此时碘原子相对于 NCl_3 的产率为 117%,相对于 I_2 的产率为 189%。

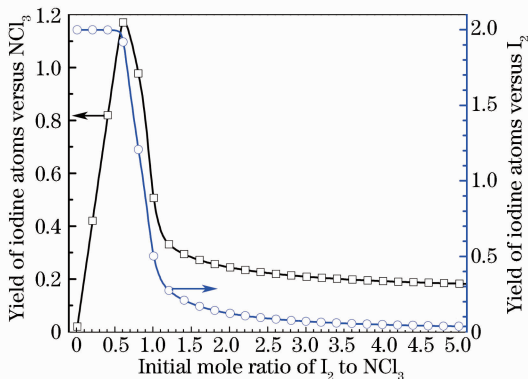


图 3 I_2 与 NCl_3 初始配比对碘原子产率的影响
(反应混合物总压固定为 666.61 Pa)

Fig. 3 Influence of initial mole ratio of I_2 to NCl_3 on the yield of iodine atoms (initial total pressure of all reactants is fixed at 666.61 Pa)

从图 3 还可以发现,当 I_2 与 NCl_3 比值较小时,碘原子相对于 NCl_3 的产率呈现直线上升的趋势,而碘原子相对于 I_2 的产率则一直保持不变(200%),这说明在这种情况下 NCl_3 分解燃烧所产生的 Cl 原子是过量的,同时加入的 I_2 分子已经完

全转化为了碘原子。而当 I_2 与 NCl_3 的初始配比越过最佳值 0.62 之后, I_2 分子的转化率开始直线下降,这说明在最佳值处 NCl_3 燃烧所产生的氯原子量恰好是碘分子的 2 倍,而越过了最佳值后 Cl 原子相对于 I_2 分子就开始不足量了。值得注意的是,在碘原子相对于 I_2 的产率开始下降的同时,碘原子相对于 NCl_3 的产率也开始下降,这是由于产生的碘原子在过量 I_2 分子的作用下,发生了速度很快的三体复合反应如(15)式,导致碘原子在产生的同时也大量损耗。

图 4 给出了 I_2 与 NCl_3 以最佳初始比值 0.62 预混燃烧时各种物种的浓度沿气体流动方向上的变化曲线,显然前半段(0~6 cm)碘原子的产生主要是以(11)式为主,每产生一个碘原子同时也产生一个 ICl 分子,因此 ICl 和 I 的增长速度几乎相同,后半段(6~20 cm)碘原子的产生就由(12)式控制了,通过消耗 ICl 来产生碘原子,等到 ICl 浓度最小时碘原子浓度就达到了最大值。

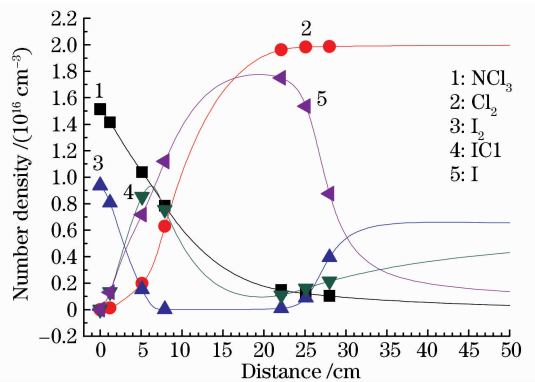


图 4 典型的 NCl_3 与 $\text{He} + \text{I}_2$ 预混燃烧时各物种浓度随距离的变化关系(NCl_3/He 体积分数为 10%,初始压力为 666.61 Pa)

Fig. 4 Typical profiles of number densities of all species as a function of reaction path in the NCl_3 auto-decomposition (initial volume fraction of NCl_3/He is 10%, initial total pressure is 666.61 Pa)

3.2.2 初始混合物总压力的影响

通过固定 I_2 和 NCl_3 的比值为 1,同时改变初始混合气体的总压 P_0 ,计算得到碘原子的产率随压力的变化关系如图 5 所示。注意到当固定 I_2 和 NCl_3 的比例时,碘原子相对于 NCl_3 的产率 $N_{\text{max,I}}/N_{0,\text{NCl}_3}$ 和相对于 I_2 的产率 $N_{\text{max,I}}/N_{0,\text{I}_2}$ 只相差一个固定系数,即二者的变化趋势是相同的,特别地,当 I_2 与 NCl_3 的配比为 1 时二者相同。

由图 5 可知,当反应气体的总压 P_0 较低时,总能得到较高的碘原子产率。在 P_0 小于 133.322 Pa

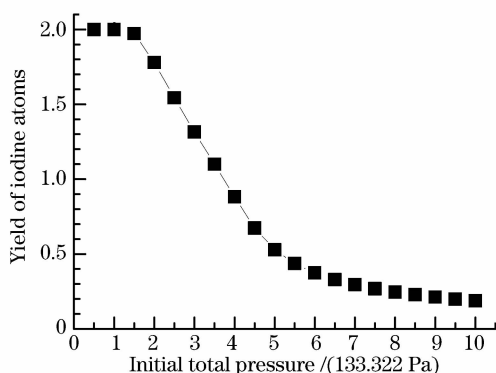


图 5 初始混合气体总压对碘原子产率的影响 (反应物 I_2 与 NCl_3 之比固定为 1)

Fig. 5 Influence of initial total pressure of I_2 and NCl_3 on the yield of iodine atoms (initial mole ratio of I_2 to NCl_3 is fixed at 1)

时,碘原子产率可以维持在 200%,这说明 NCl_3 燃烧所产生的 Cl 原子还有剩余,而加入的 I_2 分子已经完全转化。当 P_0 大于 199.983 Pa 时,碘原子的产率下降得很快,666.61 Pa 时已经下降到了 50%。

图 6 给出了碘原子以及其他粒子的数密度随压力的变化关系。可以看到 Cl 原子始终维持在较低的量级水平上,碘原子的粒子数密度随着压力的变化则呈现出先增大后减小的趋势(其最佳范围在 399.966 Pa 附近),而 I_2 和 ICl 粒子数密度随着压力的增加一直在增加,这很显然是由于(13)~(15)式的三体复合效应造成的。

据此可知, NCl_3/I_2 燃烧产生碘原子的方法不适合采用分离式反应器来进行,而比较适合直接加入到主气流中进行反应以在线产生碘原子。这主要

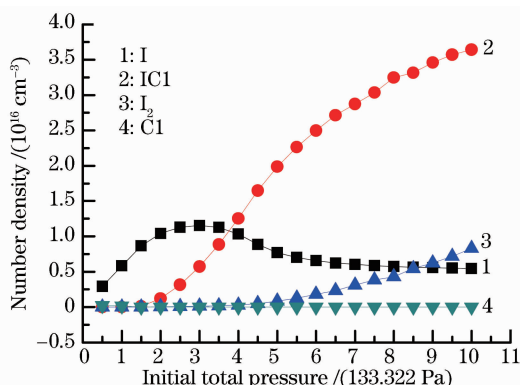


图 6 初始混合气体总压对几种关键物种粒子数密度的影响(反应物 I_2 与 NCl_3 之比固定为 1)

Fig. 6 Influence of initial total pressure of I_2 and NCl_3 on the number densities of several key species (initial mole ratio of I_2 to NCl_3 is fixed at 1)

是考虑到独立的反应器产生的碘原子在加入主气流时需要较高的压力以保证较好的穿透性能,而较高的压力会损害碘原子的产生效率。

3.2.3 碘原子产率与粒子数密度的优化

通过同时改变混合气体初始压力 P_0 和 I_2 与 NCl_3 的初始配比,对碘原子产率以及产生的碘原子粒子数密度进行了优化,计算结果如图 7 所示。

从图 7(a), (b) 可以看到,最优化碘原子产率随着压力的增加一直在减小,而随着 I_2 与 NCl_3 配比的变化则存在着一个最优化范围。这是因为,当压力增加时,Cl 原子和碘原子的三体复合效应开始大幅度增加,由(9), (13)~(15)式可知,导致每个 NCl_3 分子可产生的碘原子大为减少,造成碘原子产率一直在下降。

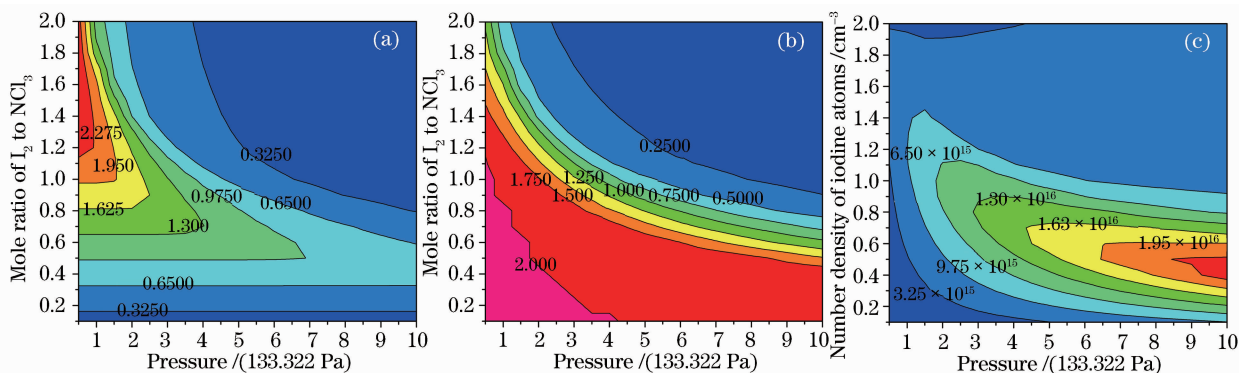


图 7 压力和 I_2 与 NCl_3 配比对碘原子产率及碘原子数密度的影响

(a) 相对于 NCl_3 的碘原子产率, (b) 相对于 I_2 的碘原子产率, (c) 碘原子粒子数密度

Fig. 7 Yield of iodine atoms and iodine atom number density as a function of initial total pressure and initial mole ratio of I_2 to NCl_3 . (a) relative to NCl_3 , (b) relative to I_2 , (c) iodine atom number density

虽然碘原子产率随着压力的增加一直在减小,但是碘原子粒子数密度随着压力的增加却在一直增

加,参见图 7(c),而且随着 I_2 与 NCl_3 配比的变化也存在着一个最优化范围,且该最佳范围随着总压力

的增大而逐渐变小。这是因为虽然碘原子的产率减小了,但初始 NCl_3 的粒子数密度(即初始 NCl_3 分压)却随着初始压力而增加,而且影响更为显著,所以碘原子粒子数密度仍然增加,因此如果需要一定量的碘原子粒子数密度(例如 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$),就需要使用较高的压力(即较高的 NCl_3 分压)。另外,随着压力的增加,Cl 原子等的三体复合效应也显著增加,Cl 原子的产量也随之降低,这就要求减少加入的 I_2 量,即减小 I_2 与 NCl_3 的初始配比。

4 结 论

提出了基于 NCl_3/I_2 体系的化学发生碘原子方法,建立了化学反应动力学模型并进行了数值模拟研究。计算结果表明, I_2 与 NCl_3 的流量配比对碘原子粒子数密度和产率的影响较大,且存在最佳范围。当固定 I_2 和 NCl_3 的配比时,最优化的碘原子产率随着压力的增大一直在减小,说明较高的压力会损害碘原子的产生效率,因而该方法比较适合直接加入到主气流中进行反应以在线产生碘原子。当固定压力时,最优化的碘原子产率随着 I_2 与 NCl_3 配比的变化则存在着一个最优化范围,且该最佳范围随着反应腔总压力的增大而逐渐变小。当初始压力 $P_0 = 666.61 \text{ Pa}$ 时 I_2 与 NCl_3 的初始配比的最佳值约为 0.62,此时碘原子相对于 NCl_3 的产率为 117%,相对于 I_2 的产率为 189%。计算结果说明基于 NCl_3/I_2 体系发生碘原子的方法是一种比较有效的产生碘原子的化学方法。

参 考 文 献

1 Duo Liping, Yang Bailing. Technologies of Measurements and Diagnostics for Gas Flow Chemical Lasers [M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 2005. 8~9
多丽萍,杨柏龄. 气流化学激光测试诊断技术[M]. 第一版. 北

京: 科学出版社, 2005. 8~9
2 Duo Liping, Li Liucheng, Wang Zengqiang *et al.*. Recent development of electric oxygen-iodine laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(11):15~21
多丽萍,李留成,王增强等. 电激励氧碘激光器研究最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(11):15~21
3 K. Waichman, V. Rybalkin, A. Katz A *et al.*. Toward understanding the dissociation of I_2 in chemical oxygen-iodine lasers: Combined experimental and theoretical studies [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(1):13108
4 Li Liucheng, Tang Shukai, Duo Liping. Research progress of atomic iodine generator for COIL [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9):091406
李留成,唐书凯,多丽萍. 碘原子发生技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(9):091406
5 Duo Liping, Li Guofu, Yu Haijun *et al.*. Study of pulsed discharge of gases simulated in N_2 -chemical oxygen-iodine laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9):2315~2318
多丽萍,李国富,于海军等. 模拟 N_2 -氧碘化学激光器混合气体脉冲放电实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(9):2315~2318
6 O. Spalek, V. Jirasek, J. Kodymova *et al.*. Chemical generation of atomic iodine for COIL [C]. *SPIE*, 2002, **4631**:34~42
7 M. Censky, O. Spalek, V. Jirasek *et al.*. Generation of atomic iodine for a COIL via atomic fluorine at higher pressure [C]. *SPIE*, 2005, **5777**:187~191
8 V. Jirasek, M. Censky, O. Spalek *et al.*. Chemical oxygen-iodine laser with atomic iodine generated via fluorine atoms [J]. *Chem. Phys.*, 2008, **345**(1):14~22
9 V. Jirásek, O. Špalek, M. Čenský *et al.*. Study of COIL active medium with atomic iodine generated via fluorine atoms [C]. *SPIE*, 2009, **7131**:71310M
10 Li Liucheng, Tang Shukai, Duo Liping *et al.*. Experimental study on NCl_3 spraying auto-decomposition [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1):45~48
李留成,唐书凯,多丽萍等. 三氯化氮气体喷射自发分解实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(1):45~48
11 L. Li, L. Duo, B. Yang. Efficient $\text{I}(5^2\text{P}_{1/2})$ production by the reaction of I_2 with NCl_3 flame [J]. *Chem. Lett.*, 2008, **37**(7):738~739
12 W. E. McDermott, B. Nizamov, T. Henshaw *et al.*. The auto-decomposition of NCl_3 as a source of $\text{NCl}(a)$ [C]. *SPIE*, 2006, **6101**:610120
13 McDermott, R. Coombe, J. Gilbert *et al.*. Flow tube studies of NCl_3 reactions[C]. *SPIE*, 2004, **5334**:11~17
14 T. J. Madden, T. L. Henshaw, G. C. Manke II *et al.*. A model for the $\text{NCl}(a)$ -I transfer chemical laser [C]. *AIAA*, 2000, **2423**:1~14