0254-6124/2012/32(1)-033–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Huang Yong, Shi Jiaming, Yuan Zhongcai. Comparison of ionospheric modification by different chemicals release. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1): 33-39

释放不同化学物质对电离层扰动的比较*

黄 勇[1,2] 时家明[2] 袁忠才[2]

1(合肥电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室 合肥 230037)

2(合肥电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室 合肥 230037)

摘 要 在电离层 F 区释放氢 (H_2)、水 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2)、六氟化硫 (SF_6)、三氟溴甲烷 (CF_3Br)、羰基镍 ($Ni(CO)_4$) 可以损耗局域等离子体电子密度, 形成电子空洞, 电离层电子密度的改变主要取决于释放物质的气态分子与电离层之间的离子化学反应. 在电离层人工主动扰动实验中, 应根据发射成本和扰动效果对释放物质进行选择. 通过热力学原理和有限元模拟方法计算比较了上述 6 种物质对电离层的扰动影响. 计算结果表明, 6 种物质中水的气化率最低, 约为 19%, 其余 5 种物质都在 60% 以上, 选择密度小的物质, 例如 H_2 和 CO_2, 可以有效降低发射成本. 另外, 扩散较慢且化学反应较快的物质, 例如 SF_6 和 $Ni(CO)_4$, 能够使得电离层电子密度减少得更多, 并且受扰动区域更广、持续时间更长.

关键词 化学释放, 电离层扰动, 热力学特征, 气化率, 有限元模拟, 扩散过程, 电子空洞

中图法分类号 P 352

Comparison of Ionospheric Modification by Different Chemicals Release

HUANG Yong[1,2] SHI Jiaming[2] YUAN Zhongcai[2]

1(*Hefei State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei* 230037)

2(*Hefei Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei Electronic Engineering Institute, Hefei* 230037)

Abstract Six chemicals, H_2, H_2O, CO_2, SF_6, CF_3Br and $Ni(CO)_4$, are considered as ionospheric modification materials. Each of these chemicals reacts in the F region to produce localized plasma depletions and form large scale electron holes. In the active ionospheric modification experiments, the criteria for selecting the released chemicals include the cost and effectiveness. The effectiveness of released chemicals depends on the amount which goes into the vapor state. In this paper, the thermodynamics governing the vapor fraction of the released chemicals were investigated. Additionally, the size and magnitude of the electron depletions were calculated with finite element simulation method. The results show that H_2O has the lowest vapor yield of about 19% from a heated, pressurized tank, and over 60% of the other five chemicals should be vented in gaseous form. To reduce the cost, the

* 武器装备预研基金项目资助 (9140A31030310JB39)

2010-11-17 收到原稿, 2011-10-09 收到修定稿

E-mail: huangyonghefei@163.com

chemicals with small density, such as H_2 or CO_2 may be chosen. Based on estimating the electron density reduction, the chemicals which have slow diffusion speed and large chemical reaction rates, such as SF_6 or $Ni(CO)_4$, may be selected. These chemicals can produce a larger, deeper and more durable electron hole.

Key words Chemical release, Ionospheric modification, Thermodynamic character, Vapor fraction, Finite element simulation, Diffusion process, Electron hole

0 引言

电离层人工扰动的方法有多种, 释放化学物质是人工改变电离层的有效手段, 它是局部的、有意识的电离层环境扰动. 在电离层的 F 层, 占绝对多数的 O^+ 与电子的复合系数约为 $10^{-12}\,\mathrm{cm^3/s}$, 而分子或分子性的离子与电子的复合系数一般可以达到 $10^{-9}\,\mathrm{cm^3/s}$ 甚至更大 [1], 因此在 F 层释放特殊的化学物质, 可以使得电子的复合速度有至少 3 个数量级的提高, 相应的电子密度就会大大减少, 从而形成人工电离层电子空洞.

人为电离层扰动的一个重要应用是考察扰动后的电离层对电波传播的影响 [2−4]. 可以想象, 一个地区上空的电离层如果处于一种空洞状态, 其无线电通信系统将受到强烈干扰, 后果十分严重. 自 20 世纪六七十年代起, 美国、前苏联等国家利用火箭或卫星作为搭载平台进行了大量的化学物质释放实验 [5−6]. 中国关于此方面的实验研究还未系统开展, 由于这种大型的天基实验比较复杂, 因此在实验前进行相关的理论研究, 提供必要的理论支持是非常重要. 在释放实验之前, 必须对释放物质的选择进行全面考虑, 其选择的主要依据是发射成本及干扰效果. 本文根据热力学原理, 综合考虑释放物质的发射成本, 采用有限元模拟 (Finite Element Simulation, FES) 方法对释放物质的干扰效果以及干扰区域大小进行了数值计算.

1 释放化学物质的热力学特征

在天基类的化学物质释放实验中, 常用的方法是将化学物质压缩在某一密封的气瓶内, 加热到一定的温度 (T), 通过航天飞机、运载火箭等释放平台, 到达电离层 F 区域进行释放. 在释放的瞬间, 气瓶内的液态物质在压力差的作用下会迅速转变为气态物质, 在此过程中, 由于需要吸收大量的能量, 被释放的化学物质总体温度迅速下降, 若温度下降到释放物质的熔点 (T_m), 那么部分液态物质将转化为固态, 通过热力学原理可以对氢气 (H_2)、水 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2)、六氟化硫 (SF_6)、三氟溴甲烷 (CF_3Br)、羰基镍 ($Ni(CO)_4$) 六种物质进行研究.

1.1 热力学基本原理

假设密封罐的质量为 M, 温度为 T_0. 化学物质释放后, 在状态变化的整个过程中能量保持守恒, 则

$$\begin{aligned}\mathrm{d}Q =& M_\mathrm{l}C_\mathrm{l}\mathrm{d}T + H_\mathrm{v}\mathrm{d}M_\mathrm{v} - H_\mathrm{f}\mathrm{d}M_\mathrm{s} + \\ & M_\mathrm{s}C_\mathrm{s}\mathrm{d}T + M_\mathrm{v}C_\mathrm{v}\mathrm{d}T - p\mathrm{d}V = 0. \end{aligned} \tag{1}$$

式中, M_l, M_v 和 M_s 分别为释放物质液态、气态和固态的质量; C_l, C_v 和 C_s 为相应三种状态的比热容; H_v 和 H_f 为物质液–气、固–液变化过程中吸收的热量; p 为压强; V 为气态物质的体积. 在释放物质状态改变的整个过程中, 系统一直处于热平衡状态, 三种状态的温度均用 T 表示. 另外, 此过程中化学物质不会与储气罐以及周围大气发生化学反应, 认为是一个纯物理过程, 因此物质的质量不会改变, 即

$$M = M_\mathrm{l} + M_\mathrm{v} + M_\mathrm{s}, \mathrm{d}M_\mathrm{l} + \mathrm{d}M_\mathrm{v} + \mathrm{d}M_\mathrm{s} = 0. \tag{2}$$

气体的体积 $V = M_\mathrm{v}/\rho$, $\rho = nm$ 为质量密度 (n 为分子密度, m 为分子质量). 由理想气体状态方程 $p = \rho kT/m$, 得到

$$p\,\mathrm{d}V = \frac{kT}{m}\mathrm{d}M_\mathrm{v}. \tag{3}$$

将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1) 可以得到

$$\begin{aligned}\mathrm{d}Q =& [MC_\mathrm{l} + M_\mathrm{s}(C_\mathrm{s} - C_\mathrm{l}) + M_\mathrm{v}(C_\mathrm{v} - C_\mathrm{l})]\mathrm{d}T + \\ & \mathrm{d}M_\mathrm{v}\Big(H_\mathrm{v} - \frac{kT}{m}\Big) + \mathrm{d}M_\mathrm{s}(-H_\mathrm{f}) = 0. \end{aligned} \tag{4}$$

释放物质状态发生改变的整个过程可以分为两个阶段. 第一阶段, 液态物质吸收能量从而蒸发为气态物质, 并使温度下降至凝点 T_m; 第二阶段, 随着物

质蒸发成气态, 不断吸收能量, 部分液态物质凝固为固态物质, 但此时温度保持 $T_{\rm m}$ 不变.

在第一阶段中没有固态物质, 所以式 (4) 中的 $M_{\rm s}$ 不存在, 式 (4) 可以变为

$$\frac{{\rm d}T}{(kT/m)-H_{\rm v}}=\frac{{\rm d}M_{\rm v}}{MC_{\rm l}+M_{\rm v}(C_{\rm v}-C_{\rm l})}. \tag{5}$$

式 (5) 有一特解, 当 $T=T_0$ 时, $M_{\rm v}=0$. 因此方程解为

$$M_{\rm v}=\frac{MC_{\rm l}}{C_{\rm l}-C_{\rm v}}\Big\{1-\exp\Big[-\frac{m(C_{\rm l}-C_{\rm v})}{k}\cdot \ln\Big(\frac{1-kT/mH_{\rm v}}{1-kT_0/mH_{\rm v}}\Big)\Big]\Big\},\quad T_{\rm m}\leqslant T\leqslant T_0. \tag{6}$$

因为在整个过程中 $kT/mH_{\rm v}\ll 1$, 所以

$$\ln\Big(\frac{1-kT/mH_{\rm v}}{1-kT_0/mH_{\rm v}}\Big)\approx\frac{k(T_0-T)}{mH_{\rm v}},$$

则

$$M_{\rm v_1}=M_{\rm v}(T_{\rm m})=\frac{MC_{\rm l}}{C_{\rm l}-C_{\rm v}}\Big\{1-\exp\Big[-\frac{(C_{\rm l}-C_{\rm v})(T_0-T_{\rm m})}{H_{\rm v}}\Big]\Big\}. \tag{7}$$

在第二阶段中, 当液态向固态转变时, $T=T_{\rm m}$ 保持不变, 即 ${\rm d}T=0$, 因此式 (4) 可以变为

$${\rm d}M_{\rm v}\Big(H_{\rm v}-\frac{kT}{m}\Big)={\rm d}M_{\rm s}(H_{\rm f}). \tag{8}$$

式 (8) 的特解, 当 $M_{\rm v}=M_{\rm v1}$ 时, $M_{\rm s}=0$. 因此方程解为

$$M_{\rm v}=\frac{M_{\rm v_1}(H_{\rm v}-kT_{\rm m}/m)+H_{\rm f}(M-M_{\rm l})}{H_{\rm v}+H_{\rm f}-kT_{\rm m}/m}. \tag{9}$$

因为最终只有固态和气态物质 ($M_{\rm l}=0$), 并且 $H_{\rm v}\gg kT_{\rm m}/m$, 所以

$$M_{\rm v}=\frac{M_{\rm v_1}H_{\rm v}+MH_{\rm f}}{H_{\rm v}+H_{\rm f}}. \tag{10}$$

由于释放化学物质最终将以粒子的形式与电离层背景中的各种成分发生离子化学反应, 因此本研究只关心释放物质中被气化的部分, 被气化的比例为

$$f_{\rm v}=\frac{M_{\rm v}}{M}=\frac{f_{\rm v_1}H_{\rm v}+H_{\rm f}}{H_{\rm v}+H_{\rm f}}. \tag{11}$$

$$f_{v_1}=\frac{M_{\rm v_1}}{M}=\frac{C_{\rm l}}{C_{\rm l}-C_{\rm v}}\Big\{1-\exp\Big[-\frac{(C_{\rm l}-C_{\rm v})(T_0-T_{\rm m})}{H_{\rm v}}\Big]\Big\}. \tag{12}$$

1.2　计算结果及讨论

图 1 给出的是水和羰基镍在电离层释放后, 温度、气化比例以及固化比例随物质液态比例的变化关系, 从图 1 中可以清楚地看出, 在整个气化过程中释放物质液态比例 ($f_{\rm l}=M_{\rm l}/M$) 从 1 降到 0; 在释放的液态物质变成固态之前, 物质云团的温度从释放温度 $T_0=343\,{\rm K}$ (70°C) 下降到各自的熔点温度; 当 $f_{\rm l}=0$ 时, 接近 19% 的液态水转变为气态水, 而羰基镍转变成气态物质的比例为 69%.

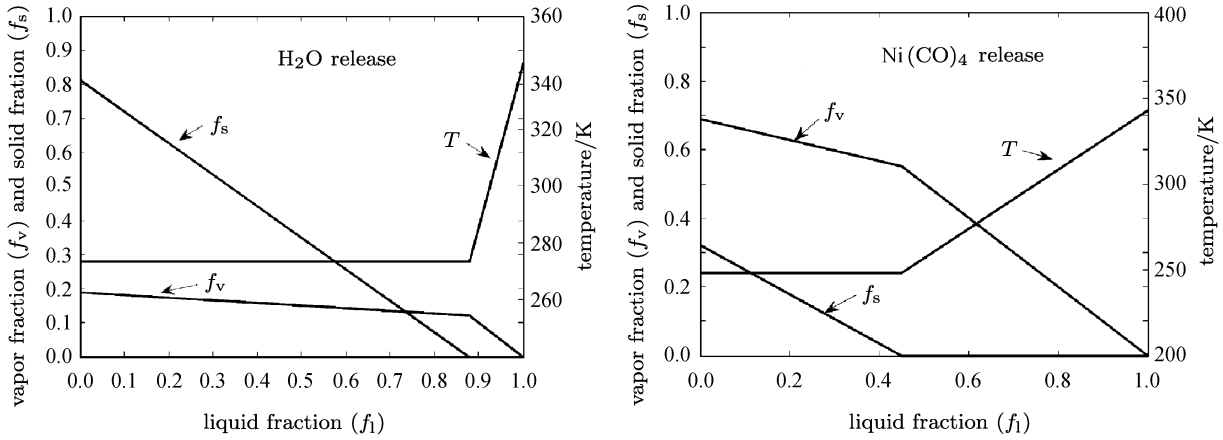


图 1　H_2O 和 $Ni(CO)_4$ 释放后各种状态比例系数及温度变化曲线

Fig. 1　Computed curves for fractions with different states and temperature of H_2O and $Ni(CO)_4$

表 1 释放化学物质的热力学参数

Table 1 Thermodynamic properties of released chemicals

物质种类	分子量	C_l	C_v	H_f	H_v	T_m	T_0	f_{v1}	f_v
		/(cal·g^{-1}·K^{-1})		/(cal·g^{-1})		/K			
H_2	2	3.14	2.5	13.8	80	13.8	···	···	1.0
H_2O	18	1.000	0.33	43.2	539	273.15	343	0.1244	0.1894
CO_2	44	0.548	0.15	79.7	40	216.7	343	0.9850	0.9950
SF_6	146	0.159	0.042	9.5	27.9	222.35	343	0.5396	0.6566
CF_3Br	149	0.110	0.042	···	26.5	168	343	0.5852	···
$Ni(CO)_4$	170	0.288	0.069	16.5	38	248	343	0.5544	0.6893

不同化学物质的热力学参数及释放后的气化比例结果列于表 1. 液态的 H_2 在 32.9 K, 1.3×10^{16} Pa 条件下将会完全被气化, 因此在本文所设定的释放条件下气化率为 1. 由于 CF_3Br 的 H_f 没有查到, 因此对于此种物质, 这里只计算到温度下降至熔点后开始产生固态物质的时刻. 对于空间化学物质释放实验而言, 应选择气化率在 60% 以上的化学物质为宜, 因此可以得出 H_2O 不适合.

对于电离层扰动的主动实验而言, 最终被气化的释放物质分子数目将是实验效果的主要因素之一. 表 2 列出了装载 10 L 的释放物质, 在电离层高度释放后, 对扰动电离层实验起作用的分子数目情况. 表 2 中结果表明, 释放物质应选择 H_2 和 CO_2, 同时可以看出, 由于这两种物质密度小, 还可以降低发射成本.

2 电离层扰动研究

化学物质释放后, 气体分子将与电离层背景的等离子体充分混合, 从而向空间扩散, 离子化学反应也主要发生在这一阶段, 扩散方程为

$$\frac{\partial n_i(h,r,t)}{\partial t}=\nabla[D_i\nabla n_i+G_i(h,t)n_i]-L_i(h,r,t). \quad (13)$$

其中, $n_i(h,r,t)$ 为气体分子的密度, 它是时间和空间的函数 (h 和 r 分别为电离层高度和离释放点的径向距离); D_i 表示粒子的扩散系数, $G_i(h,t)$ 表示粒子在重力场作用下的漂移速度, $L_i(h,r,t)$ 为损失项. 对于常见的中性气体, 在空间的某一固定点, 光致电离和光离解而造成释放物质的损失相对于化学反应引起的损失而言是小量, 因此 L 的大小一般只考虑化学反应因素 [7]. 由粒子扩散方程得出释放气体分子的密度, 进而得出电离层电子密度的改变, 即

$$\Delta n_e(h,r,t)=k_i n_i(h,r,t)n_e(h,r,t)\Delta t. \quad (14)$$

其中, k_i 为不同气体分子与电子的反应系数.

对于式 (13) 的求解, 利用解析法近似得到释放化学物质的时空分布, 其计算结果与一些实验观测结果近似一致 [8−9]. 本文利用 FES 方法进行数值求解 [10], 计算时背景电离层的参数和电子密度分布分别由国际电离层参考模式 MSIS90 和 IRI_2001 给出, 离子化学反应及反应速率列于表 3.

在数值计算时, 化学物质的释放高度选择为 260 km, 物质的气体分子数目均取为 500 mol. 图 2 给出了物质释放 100 s 后电离层电子密度的二维分布情况, 从图 2 可以明显看出, 电离层电子密度不再

表 2 10 L 液态物质释放后形成的气态物质分子数

Table 2 Number of vapor molecules from 10 L liquid chemicals release

物质种类	密度/(g·cm^{-3})	分子数密度/L^{-1}	气态物质分子数
H_2	0.070	2.0×10^{25}	2.0×10^{26}
CO_2	1.101	1.5×10^{25}	1.4×10^{26}
SF_6	1.88	7.7×10^{24}	0.45×10^{26}
CF_3Br	1.57	6.3×10^{24}	0.37×10^{26}
$Ni(CO)_4$	1.22	4.3×10^{24}	0.30×10^{26}

表 3　化学反应及其反应系数

Table 3　Chemical reactions and their rate coefficients

物质名称	反应方程	反应系数
H_2	$H_2 + O^+ \rightarrow OH^+ + H$	$k_1 = 1.7 \times 10^{-9}$
	$OH^+ + e^- \rightarrow O^* + H$	$k_2 = 7.5 \times 10^{-8}(300/T_e)^{0.5}$
H_2O	$H_2O + O^+ \rightarrow H_2O^+ + O$	$k_3 = 3.2 \times 10^{-9}$
	$H_2O^+ + e^- \rightarrow OH^* + H$	$k_4 = 6.5 \times 10^{-8}(300/T_e)^{0.5}$
CO_2	$CO_2 + O^+ \rightarrow O_2^+ + CO$	$k_5 = 9.4 \times 10^{-10}$
	$O_2^+ + e^- \rightarrow O^* + O^{**}$	$k_6 = 1.9 \times 10^{-7}(300/T_e)^{0.5}$
SF_6	$SF_6 + e^- \rightarrow SF_5^- + F$	$k_7 = \dfrac{2.2 \times 10^{-7}}{1 + 0.0016\exp(4770/T_e)}$
	$SF_5^- + O^+ \rightarrow SF_5 + O^*$	$k_8 = 5 \times 10^{-8}$
CF_3Br	$CF_3Br + e^- \rightarrow Br^- + CF_3$	$k_9 = \dfrac{2.8 \times 10^{-7}}{1 + 0.6\exp(998/T_e)}$
	$Br^- + O^+ \rightarrow Br^* + O^*$	$k_{10} = 2 \times 10^{-7}$
$Ni(CO)_4$	$Ni(CO)_4 + e^- \rightarrow Ni(CO)_3^- + CO$	$k_{11} = 1 \times 10^{-7}$
	$Ni(CO)_3^- + O^+ \rightarrow Ni(CO)_3 + O$	$k_{12} \approx 4 \times 10^{-8}$

注　星号 (*) 表示处于激发态的原子或分子. 反应系数单位均为 $cm^3 \cdot s^{-1}$, T_e 为电子温度.

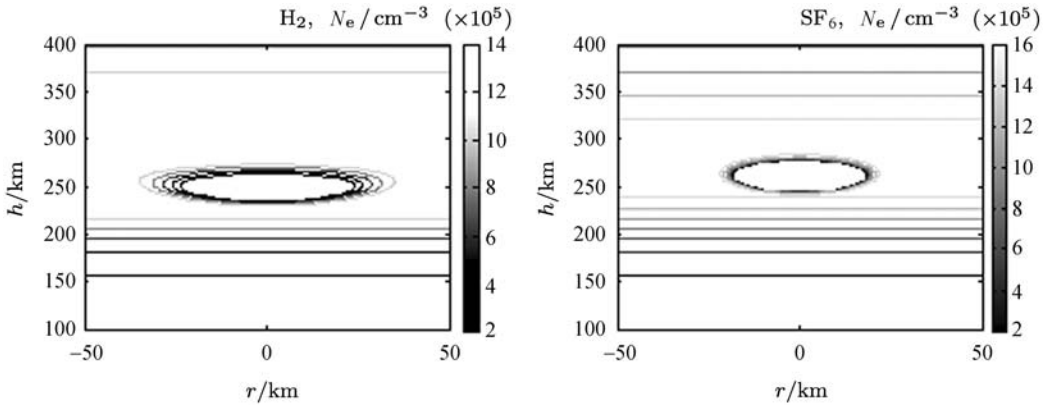


图 2　气体释放后电离层电子密度的空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of electron density at the moment of 100 s after gas release

是平面分层的结构, 其在一定的尺度范围内发生了扰动, 扰动区域形成了电子空洞. 为更直观地分析物质对电离层的扰动效果, 图 3 给出了 H_2 气体和 SF_6 气体释放后, $r = 0$ 处几个不同时刻的电离层电子密度剖面.

从图 3 可以明显看出, 两类物质对电离层电子密度扰动的程度及过程不尽相同, 在 H_2 释放后的 100 s, 电子密度在中心 ($r = 0$ km, $h = 260$ km) 减少到 88%, 而对于 SF_6 而言则减少到 65%; 在释放后的 300 s, H_2 使得中心处电子密度减少到 39%, 而 SF_6 使得电子密度在释放点周围一定高度范围内完全耗空; 另外, H_2 释放后约 600 s 时电子密度减少到最小值, 此后电离层电子密度又不断增加并逐渐恢复到原始状态, 而 SF_6 气体释放后的 3000 s, 仍有很大区域的电子密度被完全耗空. 上述现象产生的原因可能为, 一是随着释放气体分子的不断扩散稀释、反应损耗以及周围电子的不断填充, 扰动区域电子密度最终逐渐恢复; 二是与 H_2 相比, SF_6 扩散较慢, 反应较快 (SF_6

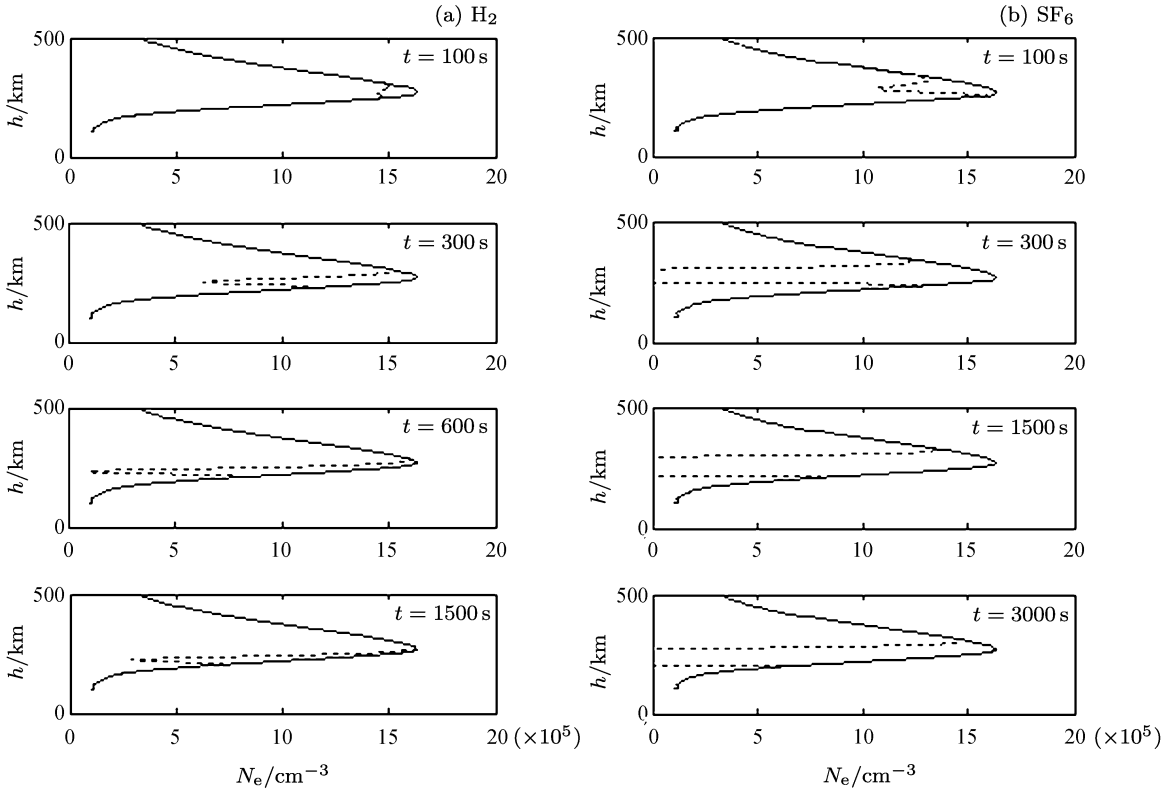


图 3 $r = 0$ km 处电离层电子密度的变化

Fig. 3 Evolution of electron density at different moment where $r = 0$ km

表 4 释放不同物质的扰动半径

Table 4 Chemical depletion radius

物质名称	r_m/km	物质名称	r_m/km
H_2	16.3	SF_6	165
H_2O	69.8	CF_3Br	206.4
CO_2	41.0	$Ni(CO)_4$	480

直接与电子发生反应, H_2 首先与电离层中的 O^+ 发生反应, 如表 3 所示), 因此其对电离层扰动的程度更深, 时间更长.

另外, 图 2 中显示 H_2 气体对电离层等离子体电子密度扰动的区域半径比 SF_6 气体的要大, 但这只是释放后 100 s 时刻的情形, 此时两种气体都未充分扩散, 只有考虑当电离层扰动达到最大时刻 (电离层电子密度开始恢复的临界时刻 t_c) 的扰动区域半径才有意义, 这里根据 $n_e(r_m, t_c)/n_{e0} = e^{-1}$ 来定义扰动半径 r_m 的大小, 不同物质的 r_m 列于表 4.

通过以上计算比较得出, 分子量较小的物质由于扩散较快, 在较短的时间内对电离层电子密度产生扰动; 对于扩散较慢且化学反应较快的物质, 对电离层扰动的程度将会更深、区域更广并且持续时间较长.

3 结论

通过对 6 种不同物质在电离层高度释放后的热力学特征及对电离层扰动特征的研究可以看出, 与电离层成分发生离子化学反应的是气态分子, 高压密封气瓶内存储同样体积的化学物质在电离层释放后, H_2O 只有 19% 转化为气态分子, 若同时考虑发射成本, 应选择密度小的物质, 例如 H_2 和 CO_2. 若实验的目的仅考虑电离层的扰动效果, 那么释放物质应选择扩散较慢且化学反应较快的物质, 例如 SF_6 和 $Ni(CO)_4$, 这些物质可以使电离层电子密度减少更多, 并且受扰动区域更广、持续时间更长.

通过释放化学物质的方法来主动扰动电离层, 在原理上可行并且其物理机制清晰. 结果诊断是实验中必不可少的环节, 除利用雷达探测以外 [11], 光学探测是最直接和简单的方法, 因此, 在选择释放物质

时应考虑到实验结果的易探测性, 这将是进一步的研究重点.

参考文献

[1] Ferguson E E. Rate constants of thermal energy binary ion-molecular reactions of aeronomic interest [J]. *Atmos. Data Nucl. Data Tables*, 1979, **2**(2):159-178

[2] Kolomiitsev O P, Ruzhin Y Y, Egorov I B, *et al.* Ionosphere plasma holes-modeling and diagnostic [J]. *Phys. Chem. Earth*, 1999, **24**(4):393-399

[3] Liu Wen, Jiao Peinan, Wang Junjiang, *et al.* A study of the disturbance in the disturbance in the ionosphere using ray tracing technology [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2005, **48**(3):465-470. In Chinese (柳文, 焦培南, 王俊江, 等. 利用射线追踪研究电离层扰动 [J]. 地球物理学报, 2005, **48**(3):465-470)

[4] Mendillo M. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab [J]. *J. Geophys. Res.*, 1975, **50**(16):2217-2228

[5] Holmgren G, Marklund G, Eliasson L, *et al.* Ionospheric response to chemical releases in the high latitude E and F regions [J]. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**(1):79-83

[6] Choueiri E Y, Oraevsky V N, Dokukin V S, *et al.* Observations and modeling of neutral gas releases from the APEX satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A10):25 673-25 681

[7] Bruskin L G, Koen M A, Sidorov I M. Modeling of neutral-gas release into the earth's ionosphere [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1988, **127**(2):415-446

[8] Huang Wenggen, Gu Shifen. Ionospheric disturbances produced by artificially chemical releases [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4):254-258. In Chinese (黄文耿, 古士芬. 化学物质释放人工改变电离层 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(4):254-258)

[9] Huang Wenggen, Gu Shifen. Artificially created airglow by neutral gas release [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(2):81-85. In Chinese (黄文耿, 古士芬. 中性气体释放人工产生气辉 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(2):81-85)

[10] Mendillo M, Semeter J, Noto J. Finite element simulation (FES): a computer modeling technique for studies of chemical modification of the ionosphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1993, **13**(10):55-64

[11] Jiao Peinan, Si Jiacai. Probing of the artificially created hole in the ionosphere using the HF sky wave radar [J]. *J. Wuhan Univ.* (*Spec. Iss. Wave Prop.*), 1991:37-42. In Chinese (焦培南, 司家才. 利用天波雷达探测人工电离层洞 [J]. 武汉大学学报 (电波传播专刊), 1991:37-42)