

通讯中断喷液减轻机理探讨

林烈 朱宗厚 王柏一

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文以水、四氯化碳和氟里昂等液体为例,对通讯中断的喷液减轻技术进行了探讨。用一个一维流动模型导出了电子密度的简化表达式,并且分析了电子密度和注入液流量、气流速度、液滴半径及雾化区尺寸等参数的关系,作出了它们之间的关系曲线。

一、前言

在再入流场中喷入亲电子物质是解决通讯中断问题的重要途径之一^[1,2]。这种方法简单可靠、穿透性强、减轻效果明显。喷入的物质可以是水、四氯化碳和氟里昂等液体。目前国外还在研究用注入一些金属氧化物和氟化物的方法来减轻飞行器尾迹中的电子密度^[3,4]。关于用此类方法来猝灭等离子体的研究,在其它一些领域有广泛的应用。

在飞行器再入大气层时,由于飞行器周围的等离子体鞘的影响,会发生通讯中断^[2]。当电磁波通过等离子体时,带电粒子在电磁波的作用下产生受迫振荡,这种振荡消耗了电磁波的能量。消耗能量的大小和带电粒子的质量成反比,

$$W(t) - W(0) = \frac{1}{2M_e} \left(\frac{eE}{\omega} \right)^2 (\cos \omega t - 1)^2 \quad (1)$$

上式中 $W(t)$ 和 $W(0)$ 分别表示粒子在时刻 t 及初始状态时所具有的能量, M_e 表示带电粒子的质量, e 为电子电荷, E 为电场强度的幅值, ω 为电波的角频率。通常离子的质量要比电子的质量大三个以上的数量级,所以自由电子是造成电磁波能量损耗的主要带电粒子。为了改善电波的传输性能,必须大大降低等离子体中的自由电子密度。这可以通过电子和正离子的复合及电子对中性粒子的附着来达到。在高温下,电子和正离子的复合反应是一个可逆过程。一些实验结果表明^[5],亲电子物质注入等离子体后,正离子的密度不会发生很大的变化。因此,利用复合反应很难达到满意的降低电子密度的效果。但是在高温下,电子和中性粒子的附着反应能形成较稳定的负离子。因此喷入亲电子物质以后负离子的形成是提高电磁波穿透能力的主要原因。

二、减轻机理分析

用喷射亲电子液体来提高电波穿透能力的主要机理有以下几方面。

本文于1983年10月24日收到,1984年1月12日收到修改稿。

1. 液体的蒸气分子在气态下和电子发生附着反应, 形成稳定的负离子, 从而减少了等离子体中的自由电子密度。对于四氯化碳及氟里昂等电子附着速率常数较大的液体来讲, 附着反应是降低电子密度的主要原因。

为了提高减轻剂对电子的吸附能力, 通常选择含有卤族元素的化合物作为亲电子液体。因为卤族元素的电子亲合能较大, 它们的最外层电子都为七个, 这样它们就很容易吸附一个电子形成具有八个外层电子的稳定结构。

负离子是在电子和注入物的中性分子发生碰撞以后的离解附着过程中形成的。具有一定能量的电子和亲电子物质的中性分子碰撞后, 形成一个受振动激励的带负电的分子, 这个受激分子常常是不稳定的, 它可以通过和其它粒子的碰撞或自发辐射, 释放出部分能量, 形成较稳定的负离子。其过程见图1。离解附着过程可以用下式表示(以双原子分子为例),

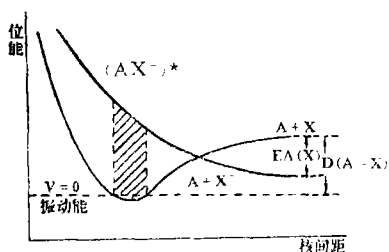
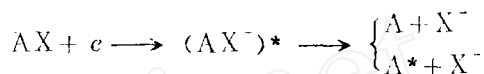


图1 分子的离解附着过程

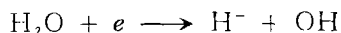


上式中的 AX 表示亲电子物质的分子, e 为电子, $(AX^-)^*$ 表示受激的带负电的分子, A 表示离解后的产物, A^* 表示离解后还具有部份振动激励能的原子, X^- 为生成的负离子。图1中的 $EA(X)$ 表示电子亲合能, 这个值越大, 负离子的稳定性越好。 $D(A-X)$ 为分子的离解能。

某种分子吸附电子的能力可以用附着截面积的大小来衡量, 附着截面积越大, 吸附电子的能力就越大。知道了附着截面积, 还可以计算电子的附着速率常数。电子的附着截面积通常是电子能量的函数。在许多实际问题中, 气流往往处于热力学非平衡态之下, 电子能量并不遵从麦克斯韦分布, 这对速率常数的计算带来许多困难。因此速率常数常常通过实验来测定。

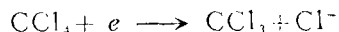
下面讨论水、四氯化碳及氟里昂 C_1F_4 的电子附着过程。

水和电子的附着反应可以表示为^[6]:

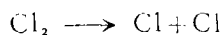
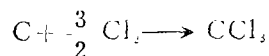
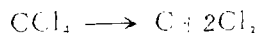


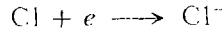
由于水的电子附着速率常数较小(为 1.5×10^{11} 厘米³/克·秒)^[11], 因此对于水、气相附着反应对去电子的贡献较小。

四氯化碳的电子附着过程可用下式表示^[6]:



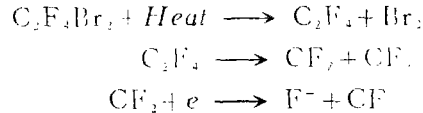
上面的反应式由下面几个反应组成:





四氯化碳的电子附着速率常数为 1×10^{11} 厘米³/克·秒⁻¹。

氟里昂 114B₂ 含有两种卤族元素, F 和 Br, 但测量表明^[4], 在电子附着过程中, F⁻ 的浓度比 Br⁻ 的浓度大两个数量级。因此我们可以着重分析 F⁻ 的附着过程。氟里昂 114B₂ 在高温下裂解后的主要产物是 CF₂, 它的电子附着过程可以用下面的反应式表示:



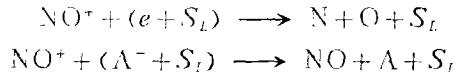
氟里昂 114B₂ 的电子附着速率常数约为 5.4×10^{11} 厘米³/克·秒。

2. 液滴进入等离子体后, 它作为第三体, 可以促进电子和正离子及负离子和正离子在它表面的复合。这个复合速率的大小和液滴的表面积及电子、离子对液滴的随机碰撞通量的大小有关。电子和离子对液滴的随机碰撞通量可表示为:

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_e \sqrt{\frac{8KT_e}{\pi m_e}} \quad (2)$$

$$\Gamma_i = \frac{1}{4} n_i \sqrt{\frac{8KT_i}{\pi m_i}} \quad (3)$$

上式中 Γ_e 和 Γ_i 分别表示电子和离子对液滴的随机碰撞通量, n_e 、 n_i 分别表示电子和离子的数密度, T_e 、 T_i 分别表示电子和离子温度, m_e 、 m_i 分别表示电子和离子的质量, K 为玻耳兹曼常数。其复合过程可用下式表示:

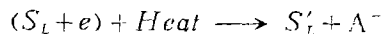


上式中 S_L 表示液滴表面, A^- 表示负离子。对于多相复合来说, 液体射流破碎后的液滴半径越小, 总的表面积就越大, 多相复合也就越有利。破碎后的液滴尺寸除和气流条件有关外, 也和液体的表面张力有关。水、氟里昂 114B₂ 和四氯化碳的表面张力分别为 72.5 达因/厘米、17.9 达因/厘米、27.0 达因/厘米, 表面张力越大, 破碎后的液滴尺寸也越大, 它们之间的关系为:

$$d_{\max} = \frac{2\sigma_l}{\rho u^2}$$

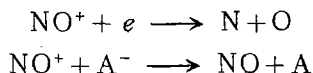
上式中 d_{\max} 为最大液滴尺寸, σ_l 为液体的表面张力, ρ 为气体密度, u 为气流速度。从多相复合这一点看, 氟里昂 114B₂ 和四氯化碳比水好得多。

3. 电子在和液滴的碰撞过程中, 被吸附在液滴表面, 在液滴蒸发过程中, 它附着在一个中性分子上一起被蒸发出去, 形成一个气相的负离子。处在等离子体中的液滴表面带负电位, 其蒸发潜热较低。因此负离子比中性分子更容易蒸发出去。其蒸发过程可表示为:



上式中 S'_L 表示蒸发出一个负离子后的液滴表面, A^- 为蒸发出去的负离子。水、氟里昂 114B₂ 和四氯化碳的蒸发潜热分别为 585.6 卡/克、24.6 卡/克、46.6 卡/克 (在 20℃ 时); 它们的沸点分别为 100℃、47.1℃、76.7℃。蒸发潜热较小、沸点较低的氟里昂 114B₂ 及四氯化碳显然比蒸发潜热大、沸点高的水有利得多。

4. 当无数小液滴被喷入等离子体后, 它在蒸发过程中吸收了周围的热量, 在液滴的周围形成了一个温度较低、电子密度也较低的区域。由于温度的降低, 加速了此区域内电子和正离子、负离子和正离子的复合。其反应为:



这种等离子体有人称为“多孔”等离子体。这些小孔的存在, 可以增强电波的穿透能力。计算表明, 当注入液体的流量和气体流量相比不是很大时, 由于液体蒸发引起等离子体的温度变化并不大, 也即去电子作用不明显。

以上讨论了四种减轻机理, 这为选择合适的减轻剂提供了依据。具体到某一种液体, 它的减轻作用以何种机理为主, 要根据它的物理化学性质来定。利用下文给出的计算式, 通过计算可知, 对于电子附着速率常数很大的氟里昂和四氯化碳, 电子附着反应起主要作用, 而对于水, 由于它的电子附着速率常数很小, 因此多相复合和蒸发是主要的。当注入液体的流量和气体流量相比不大时, 降温作用对哪一种液体都不是主要的。

另外, 喷液减轻还有下面两方面的优点:

1. 由于惯性, 液滴在气流中处于逐步加速的过程中, 它的速度远远小于气流速度, 故它有较长的输运时间, 可充分利用它吸附电子的能力。
2. 液相注入穿透性能较好, 它可以减少边界层和激波层中的电子密度, 但烧蚀减轻技术只能减少边界层中的电子密度。

三、电子密度和注入液流量、气流速度、液滴半径等参数的关系

液体注入高温高速气流后的电子密度计算是一个很复杂的问题, 它涉及到空气动力学、化学动力学及二相流等问题。对于实际的再入流场还要考虑到边界层及非平衡流等问题。所以在计算时往往要作大量的简化。

本文为了分析各个参数之间的关系, 用一个简化的一维流动模型来近似, 导出了计算电子密度的解析表达式, 它可以用于分析各种参数之间的关系, 也可以作为粗略的定量计算。为了便于分析, 先作以下假设:

1. 电子密度的变化只和气相电子附着、液滴表面的多相复合及液滴的蒸发等主要因素有关, 略去其它次要因素的影响。
2. 假设液滴的形状是球形, 并在气流内作均匀分布。
3. 液体的注入量较小, 气流参数不受注入液体的影响。
4. 气流的流速截面积保持不变。

下面给出主要的关系式。电子和负离子的速率方程可用下面两式表示:

$$u \frac{d}{dx} \left(\frac{n_e}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} (-K_d m_d n_e N_v - \pi r^2 N_d n_e v_e) \quad (4)$$

$$u \frac{d}{dx} \left(\frac{n_n}{\rho} \right) = -\frac{1}{\rho} (K_d m_d n_e N_v + 4\pi r^2 \Gamma_e N_d) \quad (5)$$

上式中 n_e 、 n_n 分别为电子和负离子的数密度, u 、 ρ 为气流的速度和密度, m_d 为亲电子液体的分子质量, N_v 为亲电子液体蒸气分子的数密度, N_d 为液滴的数密度, r 为液滴半径, v_e 为电子热运动速度, K_d 为附着速率常数, Γ_e 为负离子的蒸发通量, x 为顺流向的坐标。

液滴的蒸发、加速运动及气流和液滴之间的热交换关系的方程式为^[7]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{(\Gamma_e + \Gamma_n) m_d}{\rho_l} \quad (6)$$

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{3(u - u_d)^2 \rho C_D}{8\rho_l r} \quad (7)$$

$$\alpha_T \left(\frac{3}{2} K T_g + \frac{1}{2} m_g u^2 \right) (\Gamma_g + 4\pi r^2) = (\Gamma_e + \Gamma_n) h_l m_d \cdot 4\pi r^2 \quad (8)$$

上式中 Γ_g 为中性粒子的蒸发通量, ρ_l 为液体的密度, u_d 为液滴的速度, α_T 为液滴和气流之间的传热系数, K 为玻耳兹曼常数, T_g 为气体温度, m_g 为气体分子的质量, Γ_g 为中性气体分子对液滴的随机碰撞通量, h_l 为液体的蒸发潜热, C_D 为阻力系数, t 为时间。在给出方程(8)时, 假定液滴处于沸腾蒸发状态。

如果流动是稳态的, 气流速度和密度顺流向基本不变, 那末(4)式可以简化为:

$$\frac{dn_e}{dt} = -K_d m_d n_e N_v - \pi r^2 n_e N_d v_e \quad (9)$$

为了解上述微分方程, 必须找出 N_v 、 N_d 和时间 t 的关系, N_d 和 u_d 之间有如下关系:

$$N_d = \frac{\dot{m}_l}{\pi r_0^3 \rho_l A u_l} \cdot \frac{4}{3} \quad (10)$$

上式中 A 为气流流束的截面积, r_0 为液滴初始半径, \dot{m}_l 为注入液体的质量流量。

解方程(7)可以求出液滴的速度为:

$$u_d = \frac{K_1 (u - u_{d0}) + u_d}{K_1 t (u - u_d) + 1} \quad (11)$$

上式中 u_{d0} 为液滴的初始速度, $K_1 = 3\rho C_D / 8\rho_l r$, 在推导 u_d 表达式时, 设 r 不变。对于 N_v 有下面的关系式:

$$N_v = \frac{\dot{m}_l f}{A m_d u} \quad (12)$$

上式中 f 为蒸发因子,

$$f = 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^3 \quad (13)$$

在得到(12)式时, 设蒸气分子的速度等于气流速度, 这是因为, 蒸气分子加速很快, 它接近于气流速度。

液滴半径和时间的关系可以从(6)、(8)两式求得^[9]:

$$r = r_0 - K_1 t \quad (14)$$

其中
$$K_1 = \frac{\alpha r_0}{h_d \rho_1} \left(\frac{3}{2} K T_d + \frac{1}{2} m_g u^2 \right) \Gamma_g$$

因此(12)式也可以表示为:

$$N_v = \frac{\dot{m}_1}{A m_1 u} \left[1 - \left(\frac{r_0 - K_1 t}{r_0} \right)^3 \right] \quad (15)$$

将(11)式代入(10)式可得:

$$N_d = \frac{\dot{m}_1 [K_1 t (u - u_{d0}) + 1]}{\pi r_0^3 \rho_1 A [K_1 t u (u - u_{d0}) + u_{d0}]^{4/3}} \quad (16)$$

将(14)、(15)、(16)式代入方程(9), 解微分方程, 并考虑到 $t=0$ 时, $n_e = n_{e0}$, (n_{e0} 为初始电子密度) 可得:

$$n_e = n_{e0} \exp \left\{ - \frac{\dot{m}_1}{r_0 u A} \left[k_1 \ln \left(1 + \frac{u^2 K_1}{u_{d0}} t \right) + k_2 t + k_3 t^2 + k_4 t^3 + k_5 t^4 \right] \right\} \quad (17)$$

其中的系数分别为:

$$k_1 = \frac{3v_e (u^2 K_1 r_0 + u_{d0} K_1)^2}{4r_0^3 \rho_1 u^5 K_1^3}$$

$$k_2 = \frac{3v_e (u^2 K_1^2 r_0^2 - 2r_0 K_1 u^2 K_1 - u_{d0} K_1^2)}{4r_0^3 \rho_1 u^2 K_1^2}$$

$$k_3 = K_1 \left(\frac{3}{2} K_d + \frac{v_e}{r_0 \rho C_D u} K_2 - \frac{2v_e K_1}{\rho C_D} \right)$$

$$k_4 = K_1^2 \left(\frac{v_e}{4r_0^2 \rho_1} - \frac{K_d}{r_0} \right)$$

$$k_5 = \frac{K_1^3 K_d}{4r_0^4}$$

由于液滴的初始速度 $u_{d0} \ll u$, 所以在推导过程中可以认为 $u \pm u_{d0} \approx u$ 。

当气流密度较低时, (压力小于 2 托左右), 计算表明, $u^2 K_1 t / u_{d0}$ 比 1 小得多, 此时, (17) 式还可以进一步简化:

$$k_1 \ln \left(1 + \frac{u^2 K_1 t}{u_{d0}} \right) + k_2 t \approx k_1 \frac{u^2 K_1 t}{u_{d0}} + k_2 t = \frac{3v_e u}{4\rho_1 u_{d0}} t \quad (18)$$

这样(17)式就可以表示为:

$$n_e = n_{e0} \exp \left\{ - \frac{\dot{m}_1}{r_0 u A} [kt + k_3 t^2 + k_4 t^3 + k_5 t^4] \right\} \quad (19)$$

上式中

$$k = \frac{3v_e u}{4\rho_1 u_{d0}}$$

液体射流在超音速气流中被破碎后的平均初始液滴直径可以用下式来计算^[10],

$$d_{30} = 48d_0 w_1^{-3/8} \left(\frac{Re_0}{M} \right)^{-1/4} \quad (20)$$

上式中 $w_1 = d_0 u^2 \frac{\rho_l}{\sigma_l}$, $Re_0 = \frac{d_0}{2} u \frac{\rho}{\mu_g}$

这里 μ_g 为气体的粘性系数, σ_l 为液体的表面张力, d_0 为喷液嘴的直径, M 为气流的马赫数。

从电子密度的表达式(19)可以看出各个量之间的如下关系:

1. 电子密度 n_e 和液体的注入量 \dot{m}_l 之间呈指数函数关系, \dot{m}_l 增大, n_e 呈指数曲线下降, 当注入量 \dot{m}_l 为零时, 电子密度等于初始电子密度 n_{e0} , 当注入量 \dot{m}_l 远远大于气体流量时, 电子密度趋向于零。

2. 液体射流破碎后的平均液滴半径 r_0 越小, 电子密度下降得越快, 去电子效果越好。这说明, 对一定的注入量, 液滴越小, 对消除电子越有利, 但液滴尺寸的减小会缩短其生存时间, 因此在实际应用中要兼顾到这两方面的要求。

3. 射流破碎后, 液滴分布区域的横截面积 A 也和消除效果有关。在实际应用中, A 的大小是由天线窗口的位置和大小以及再入飞行器的外形来决定的, A 越大, 要求注入的流量就越大。

4. 外界气流速度的大小也和去电子效果有关, 当外流速度较快时, 要求注入较多的液体。

我们利用本文得到的电子密度表达式, 以水和 F114B₂ 为例, 计算了各个量之间的关系曲线。图2表示电子密度和注入液流量之间的关系。图3表示电子密度顺流向的变化。图4表示电子密度和外界气流速度之间的关系。图5表示雾化区截面和注入液流量之间的关系。

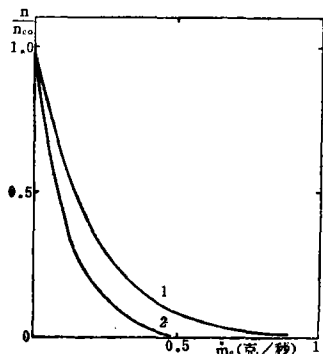


图2 电子密度相对值和注入液流量之间的关系
曲线1为水, 曲线2为 F114B₂

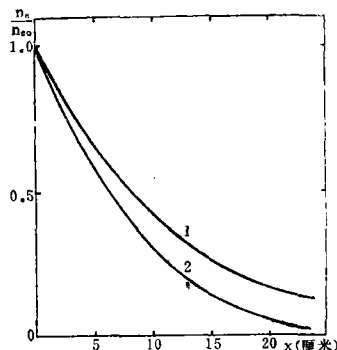


图3 电子密度相对值和顺流向距离之间的关系, 曲线1
为水, 曲线2为 F114B₂, 注入液流量为0.4克/秒

在计算上述曲线时的气流参数为: 气流速度 $u = 3.24 \times 10^5$ 厘米/秒, 气流密度 $\rho = 5.099 \times 10^{-7}$ 克/厘米³, 气流总焓 $h = 5800$ 卡/克, 气流温度 900°K 。

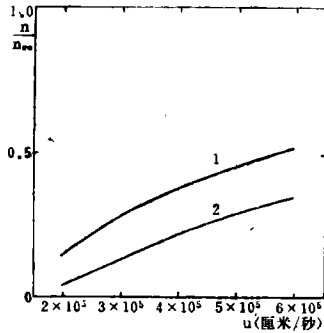


图4 电子密度相对值和气流速度的关系,曲线1为水,曲线2为F114B₂,液体流量0.25克/秒

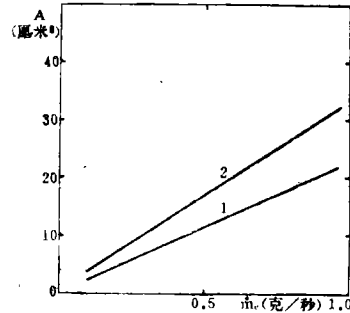


图5 注入液流量和雾化区截面的关系,曲线1为水,曲线2为F114B₂,电子密度相对值为0.1

四、结 束 语

以上讨论了喷液减轻机理的几个主要因素,并且用一个简化模型导出了电子密度的解析表达式,从此表达式可以进一步分析电子密度和注入液流量、液滴半径、顺流向距离、外流条件及雾化截面积等参数的关系。这为各个参数的初步选择提供了依据。当然对于实际的再入流场,还必须考虑许多其它的因素,如再入时,边界层内含有大量的烧蚀产物,它对电子密度有很大的影响,因此选择合适的防热材料也是十分重要的,这些问题这里不加讨论。

参 考 文 献

- [1] Lennon J. F. et al., AD 780510 (1974).
- [2] Rybak J. P., IEEE TRAN. AES-7, No.5, (1971) p.879.
- [3] Shui, V. H. et al., AIAA paper, 79-252.
- [4] Mudson, J. M., AIAA paper, 79-253.
- [5] Hayes, D. T. et al., AD A 012250 (1974).
- [6] Nydick, S. E., AD 656494 (1967).
- [7] Aisenberg S. et al., AD 694437 (1969).
- [8] Madison J. M. et al., AIAA paper, 77-110.
- [9] 林烈、陆志云,空气动力学学报,3(1983),64.
- [10] Dergament, H. S., AIAA paper, 72-670.

APPROACH OF MODIFICATION OF PLASMA BY LIQUID INJECTION

Lin Lie, Chu Zonghou, Wang Boyi
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract

Modification of plasma by liquid injection for reentry communication was approached. An analytical expression that can be used for estimation of electron concentration was obtained. According to the expression we can know more clearly the relation among the electron concentration, the speed of stream, the radius of liquid droplet, the flow rate of injection liquid and the area of spray.

www.cnki.net