

改善再入通讯的化学减轻实验研究

朱宗厚 王柏一 林烈

(中国科学院力学研究所)

摘要 化学减轻改善再入通讯是现实可行的技术途径,它是通过固体烧蚀和液体喷射的方法实现的。本文探讨化学减轻的机理和利用电弧风洞进行模拟实验研究的方法。实验是在H11DF电弧风洞中完成的,采用微波和探针两种诊断手段。通过大量实验确定了耐热材料的烧蚀产物对流场电子密度和对电波传输的影响,以及喷射各种亲电子液体对流场电子密度的影响,为筛选耐热材料及鉴定其性能提供依据。

一、引言

当高速飞行器再入地球大气层时,激波的压缩加热和物面边界层的摩擦阻力,使飞行器所具有的动能一部分转变为周围空气的内能即热能。因此激波和飞行器之间的空气温度高达几千度,从而使空气的中性粒子被电离成自由电子和正离子,形成等离子体。它还会馈入飞行器后部的尾流,形成长度比飞行器直径大几十倍的热电离的明亮尾迹。再入大气层飞行器周围的这种电离气体层通称为“再入等离子体鞘”。

在再入等离子体鞘中含有大量自由电子,它们吸收、反射和散射电磁波,轻则干扰电波传输,重则导致通讯中断。再入通讯中断在洲际导弹、返地卫星和航天飞机的再入飞行中均已被发现,有的中断持续时间长达一刻钟。因此,再入通讯中断对飞行器设计和地面遥控设施带来一系列困难,特别是对实时讯号传输的使命,例如末制导、电子对抗和引爆、目标识别以及语言通讯等。这是各国研制战略导弹和发展空间技术所共同遇到的一个难题。

改善再入通讯有多种技术途径^[1-5]。本文探讨改善再入通讯的化学减轻方法的机理以及利用电弧风洞进行模拟实验研究的方法。采用探针和微波两种诊断手段,实验测定各种耐热材料的烧蚀产物对流场电子密度和对电波传输的影响,以及喷射亲电子液体对流场电子密度的影响,并与飞行试验数据作了比较^[6,7]。模拟与再入通讯中断有关的再入等离子体鞘时,主要的模拟参数是气流的电子密度和碰撞频率,而高焓低密度电弧风洞在一定条件下可以满足这种模拟要求。

二、化学减轻机理

当电磁波通过等离子体时,等离子体的带电粒子在电磁波作用下产生受迫振荡,振荡

本文于1983年2月4日收到。

消耗的能量与带电粒子质量成反比,其关系为

$$W(t) - W(0) = \frac{1}{2M_e} \left(\frac{eE_0}{\omega} \right)^2 (\cos \omega t - 1)^2 \quad (1)$$

式中 $W(t)$ 和 $W(0)$ 分别表示带电粒子在 t 时刻和初始时刻所具有的动能, M_e 为带电粒子的质量, e 为电子电荷, E_0 为交变电场强度的幅值, ω 为电波角频率. 由于原子质量一般比电子质量大三个数量级以上, 所以电子是造成电磁波能量损耗的主要带电粒子. 因此, 只要设法将电子附着在中性分子上形成负离子, 就可大为改善电磁波对等离子体的传输性能.

化学减轻技术是通过在再入飞行器天线窗上游一定距离处布置某些特殊的耐热材料或喷射某些亲电子液体使其被添加到再入等离子体鞘中实现的. 利用这些添加剂的化学亲电子特性将鞘中自由电子吸附在中性分子上变为相应的负离子, 从而降低鞘层电子密度, 使电波得以从鞘层传输出去. 一般说来, 电离电位高的原子或分子其负离子的电子亲合势亦高. 由图 1 可见, 碱金属和碱土金属的电离电位很低, 容易电离; 卤族元素的电离电位很高, 故亲电子性强. 所以聚四氟乙烯、氟里昂、六氟化硫和四氯化碳等含卤素化合物都是可供选择的减轻剂. 对烧蚀减轻而言, 一方面应尽量减少材料中碱金属和碱土金属等杂质含量; 另一方面可添加某些亲电子化学物质做成复合材料, 利用鞘层高温气流对材料的烧蚀, 使其中的减轻剂进入鞘层. 对喷液减轻而言, 利用压力系统将亲电子液体以射流形式注入鞘层. 由于射流被高速气流偏转并破碎成细小的雾化液滴后在鞘层被迅速蒸发并与其电离气体发生一系列物理化学过程, 从而达到降低鞘层电子密度的效果.

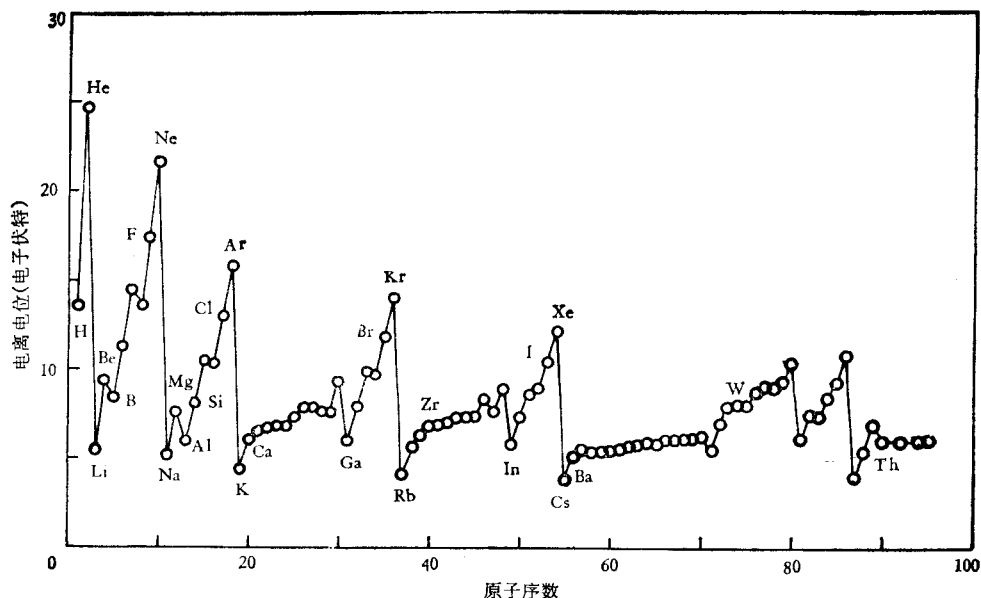


图 1 原子的电离电位

化学减轻的主要物理化学过程有三个. 一是多相复合过程. 液滴或颗粒作为第三体构成催化表面, 加速鞘层正离子和自由电子的复合反应; 同时它们在蒸发和气化等相变过

程中吸收热量冷却气流也可加速复合反应,其结果是生成中性分子.二是液滴充电过程.在等离子体内由于自由电子和正离子的无规热运动能被悬浮着的液滴表面所收集,使液滴充上负电形成较强的表面电场,通过不断蒸发转变为气相负离子.三是气相吸附过程.大部分减轻剂在鞘层高温高速气流中经化学反应后都能生成一些亲电子的原子、分子和化合物.它们的电子亲合势都很高,因此可以依靠其亲电子特性来吸附自由电子形成稳定的负离子.这是化学减轻的主要过程.现以聚四氟乙烯为例说明鞘层中其化学反应过程.当温度超过 1000K 时,聚四氟乙烯迅速裂解成单体:



气态单体与鞘层内空气组元起化学反应.鞘层内空气的平衡组元主要是 N_2 , N 和 O . 单体通过与氮组元的碰撞而裂解:



式中 M 可以是 N_2 或 N . 单体通过与氧原子的碰撞而起氧化反应:



CF_2 和 CF_4 进一步与空气组元起化学反应:



实际上出现的各种组元的分布量取决于鞘层内烧蚀产物与空气的相对浓度、热量随时间的变化和反应诱导时间

实验研究时为定量评价各种减轻剂的实际效果,现作如下简单分析.减轻剂与鞘层自由电子的反应是在气相分子水平上发生的,反应过程是可逆的



式中 A 、 e 、 X^- 和 Y 分别表示减轻剂、自由电子、一价负离子和其它生成物.正向过程是使自由电子减少的吸附过程, k_a 表示电子吸附速率常数;反之, k_b 表示逆向过程的电子脱吸速率常数.在等离子体中,自由电子数密度随时间变化的关系为

$$\frac{dN_e}{dt} = -k_a N_e N_a + k_b N_X^- N_Y \quad (11)$$

式中 N_e 、 N_a 、 N_X^- 和 N_Y 分别表示自由电子、减轻剂、一价负离子和正向反应其它生成物的数密度, t 为反应时间.对于减轻剂来说,总是有 $k_a \gg k_b$, 所以上式可简化为

$$\frac{dN_e}{dt} = -k_a N_e N_a \quad (12)$$

粒子数守恒方程为

$$N_a(0) - N_a = N_e(0) - N_e \quad (13)$$

式中 $N_a(0)$ 和 $N_e(0)$ 分别表示减轻剂和自由电子的初始数密度.把式(13)代入式(12)积分可得

$$\frac{N_e}{N_e(0) N_e + [N_a(0) - N_e(0)]} = \exp\{-[N_a(0) - N_e(0)]k_a t\} \quad (14)$$

若反应后自由电子数密度显著下降, 即 $N_e(0) \gg N_e$, 则上式可简化为

$$\frac{N_e}{N_e(0)} = \frac{N_a(0) - N_e(0)}{N_a(0)} \exp\{-[N_a(0) - N_e(0)]k_a t\} \quad (15)$$

由上式可见, 若以 $N_e/N_e(0)$ 评价减轻效果, 影响因素有: 电子吸附速率常数 k_a 、减轻剂的注入量 $N_a(0)$ 和反应作用时间 t 。

亲电子物质吸附自由电子生成的负离子有时不稳定, 尤其在高温下又会重新离解, 这就是逆向脱吸过程。负离子的稳定性取决于电子亲合势。电子亲合势越高, 从负离子移走一个电子从而恢复原子或分子电中性所需作的功也就越大。因此卤素的负离子是相当稳定的, 因为其电子亲合势都较高。

三、实验设备和诊断手段

我们利用 *H11DF* 电弧风洞进行模拟实验研究, 它具有高焓、低密度等特点。图 2 和表 1 分别表示风洞的系统图和运行参数。氮气经加热器加热后流入混合室, 氧气直接送入混合室, 氮和氧按空气比例在混合室混合后通过超声速喷管以射流形式进入试验段, 在

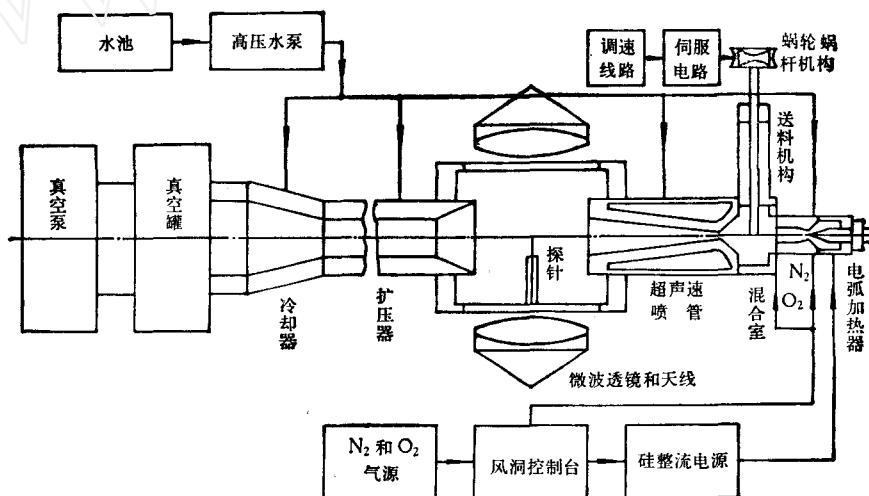


图 2 *H11DF* 电弧风洞系统图

表 1 *H11DF* 电弧风洞运行参数

电弧加热器		混合室		试验段	
电弧电压	90 伏	总焓	5800 卡/克	M_a 数	5.4
电弧电流	250 安	总温	6800 K	静压	1 毛
电弧功率	22.5 千瓦	总压	0.658×10^3 牛顿/米 ²	静温	900 K
氮气质量流量	0.36 克/秒	电子密度	10^{14} 1/厘米 ³	气体密度	6×10^{-7} 克/厘米 ³
		氧气质量流量	0.11 克/秒	电子密度	10^{14} 1/厘米 ³
				空气总质量流量	0.47 克/秒

表 2 风洞实验数据与飞行试验数据的比较

添加剂	飞行试验数据		H11DF 实验数据	
	\dot{m}_i/\dot{m}_p	n_e (1/厘米 ³)	\dot{m}_i/\dot{m}_p	n_e (1/厘米 ³)
无	0	$\sim 10^{11}$	0	$\sim 10^{11}$
聚四氟乙烯	0.033	$\sim 10^9$	0.500	$\sim 10^9$
氟里昂	0.646	$\sim 10^8$	1.0	$\sim 10^9$

试验段内测量流场特性。当进行烧蚀减轻实验时,用伺服电机带动蜗轮蜗杆机构把材料试样送进混合室内烧蚀,这时在射流内就含有其烧蚀产物,在试验段就可测得有烧蚀产物时的流场特性。当进行喷液减轻实验时,利用安置在喷管出口附近的喷液嘴向气流注入亲电子液体,喷液方向垂直于气流流动方向。从喷液嘴喷出的液体射流在超声速气流作用下破碎成雾化液滴并与气流相混合一起流向下流,这时在试验段可测得喷液流场的特性。由于本风洞能连续长时间稳定运行,所以一次吹风实验可以同时测得空流场和有烧蚀产物流场或喷液流场的电波传输或电子密度变化状况。

为获得可靠的实验数据,我们采用探针和微波两种不同原理的等离子体诊断手段作相互校测。首先对风洞试验段的流场电子密度进行校测,然后对添加减轻剂后的减轻效果进行鉴定。

静电探针采用圆柱单探针,它由直径 0.5 毫米长 10 毫米的钨丝制成。探针安置在流场中心轴线上各被测点,由外电源供电,风洞壳体作补偿极。当探针电位改变时其电流按一定规律变化,从而测得伏安特性曲线。特性曲线与被测等离子体的带电粒子的数密度和温度有关,探针理论给出其间的定量关系。图 3 表示探针测得的伏安特性曲线。探针

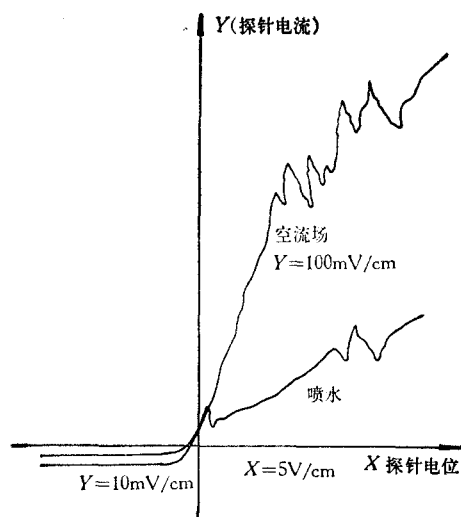


图 3 静电探针测得的空流场和喷水后流场的伏安特性曲线

测量的优点在于装置简单,动态范围宽,可测当地值和分布;缺点是接触式测量对流场产生一定干扰,烧蚀产物会污染探针表面影响测量精度。

利用探针测量空流场的电子密度是比较简单的,因为这时流场的电子密度和离子密度相等。但当流场含有烧蚀产物或喷液产物时,由于负离子的存在使探针的伏安特性发生变化,正探针的饱和电流(由电子和负离子贡献)显著下降,负探针的饱和电流(由正离子构成)稍有增加。特别是当流场的负离子分量很大时,单探针的特性曲线甚至可接近对称形式。在这种情形下,只能利用浮置电位法来确定电子密度的相对比较。针对我们的实验条件,电子浮置电位关系可简化为

$$\frac{n_e}{n_{e0}} = \frac{j_i/j_{i0}}{\exp[(e/kT_e)(V_{f0} - V_f)} \quad (16)$$

式中 n_e 和 n_{e0} 分别表示有或无减轻剂时的流场电子密度, $(V_{f0} - V_f)$ 和 (j_i/j_{i0}) 分别为添加减轻剂前后的浮置电位差和正离子饱和电流比, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度。

利用微波在等离子体中的传播特性, 可以对等离子体参数例如电子密度和碰撞频率等进行诊断。优点在于可以实现无接触测量并且响应快, 缺点是它只能测得积分的或平均的参数。我们采用 G_z 、 X_s 和 K_A 频段的三套微波透射仪作流场诊断, 其方块图见图4。微波透射仪可测得功率传输系数。

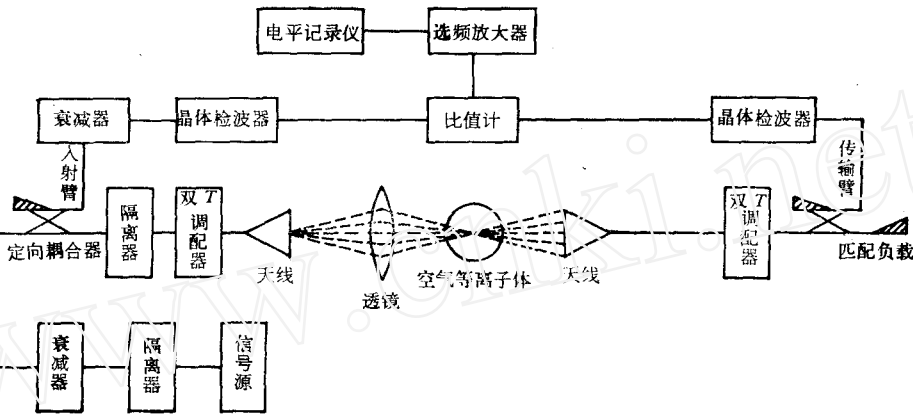


图4 微波透射仪方块图

电磁波在等离子体中传输是一个十分复杂的问题。作为初级近似, 我们把实验条件简化成均匀平面波垂直入射到均匀无磁场有边界的厚层等离子体的一维情形。根据微波与等离子体相互作用的理论, 有如下二维方程:

$$T = \frac{(1-r)^2 \exp(-2\alpha d)}{1-r^2 \exp(-4\alpha d)} \quad (17)$$

$$r = \frac{(1-\mu)^2 + \chi^2}{(1+\mu)^2 + \chi^2} \quad (18)$$

$$\chi = \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\mu = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \chi \quad (21)$$

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 n_{e0}}{m_e} \quad (22)$$

式中 T 、 r 、 χ 、 μ 、 α 和 ω 分别表示微波的功率传输系数、边界功率反射系数、衰减指数、折射指数、衰减系数和频率; ω_p 、 ν 、 n_{e0} 和 d 分别表示等离子体的频率、碰撞频率、电子密度和等效厚度; e 和 m_e 表示电子电荷和质量。上述六个方程有五个已知量: T 、 d 、 ω 、 e 和 m_e , 有七个未知量: r 、 χ 、 μ 、 α 、 ω_p 、 ν 和 n_{e0} 。利用双频传输诊断技术和叠代计算方法,

就可由两个微波频段测得的功率传输系数确定流场的电子密度和碰撞频率。

四、讨 论

在 *H11DF* 电弧风洞稳定运行条件下,对烧蚀和喷液这两种化学减轻方法分别进行了实验研究。目的在于:一是考察电弧风洞从事地面模拟实验的可能性和本实验方案的可行性以及诊断手段的可靠性;二是研究含有各种减轻剂的复合材料的烧蚀产物对电波传输的影响,寻找减轻效果优异的最佳复合材料;三是测定耐热材料中各种杂质含量对流场电子密度的影响,为改进材料工艺提供依据;四是研究喷射各种液体减轻剂对流场电子密度的变化规律,对液体减轻剂进行筛选。通过几百次实验,已圆满地达到了预期目的,讨论如下。

1. 关于流场电子密度的测量:由探针测得 3.0×10^{11} /厘米³,由三套微波透射仪测得的平均值为 3.3×10^{11} /厘米³。两种诊断测得的数据基本一致。由微波测得的流场碰撞频率为 3×10^9 /秒。

2. 图 5 表示不同频段的微波穿透流场时测得的功率传输系数的变化规律,可见提高微波频率能改善功率传输。

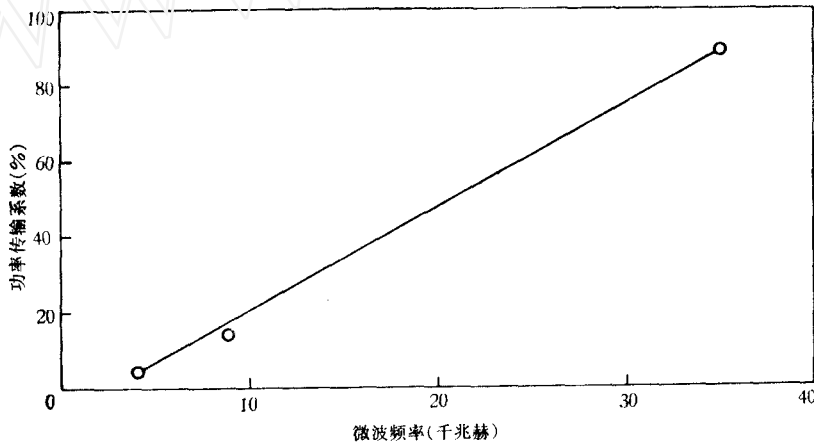


图 5 不同微波频率穿透空气等离子体的能力

3. 图 6 表示含聚四氟乙烯的复合材料的烧蚀产物对微波传输的影响, X 表示复合材料中聚四氟乙烯含量, m_l 和 m_p 表示材料烧蚀量和气流质量流量。由图可见,随着聚四氟乙烯含量的增加,减轻效果随之增加。

4. 图 7 表示向流场喷射四种液体减轻剂对流场电子密度的影响,这里的 m_l 表示减轻剂注入量。由图可见,随着液体注入量的增加,这四种液体都具有程度不同的明显减轻效果,尤其以氟里昂的效果最佳。

5. 表 2 表示本实验结果与飞行试验数据^[4]的比较。由表可见,就聚四氟乙烯和氟里昂这两种减轻剂而言,其变化趋势是基本一致的。从而证实,利用电弧风洞进行化学减轻模拟实验研究是有实际意义的。

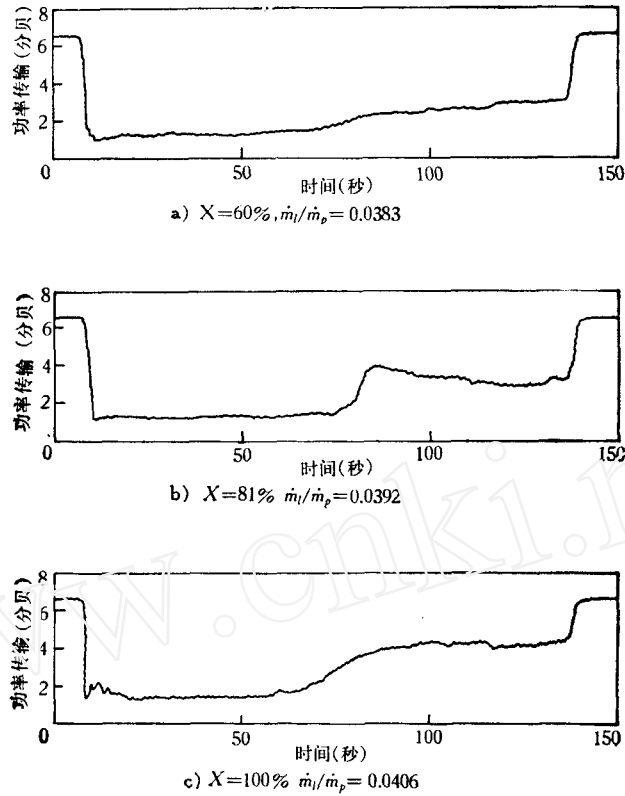


图 6 含聚四氟乙烯的复合材料的烧蚀产物对微波传输的影响

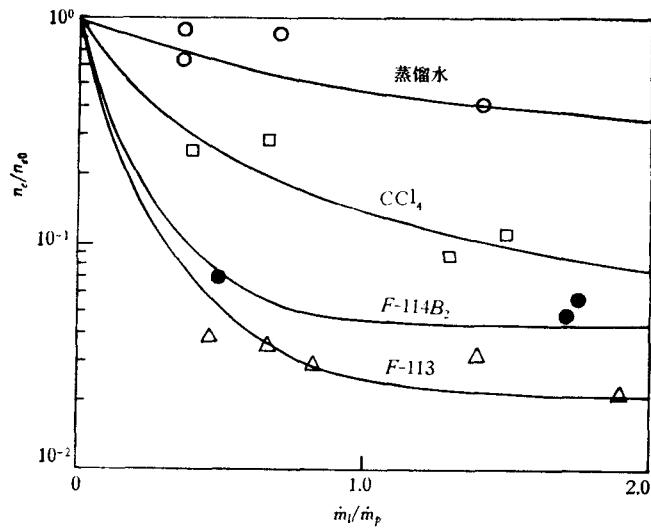


图 7 喷射亲电子液体对流场电子密度的影响

参加本工作的还有陆志云、张秀杰和满秀芬同志。本工作得到吴承康教授和卞荫贵教授的指导和帮助,得到航天部十四所、七〇三所和二十五所同志们的支持和帮助,作者

在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Akey, N. D., NASA sp-252, (1971), 19--32.
- [2] Cowperthwaite, R. L. et al., NASA, sp.-252 (1971), 559--578.
- [3] Shui, V. H. et al., 17th Aerospace Sciences Meeting, AIAA, 79-0252.
- [4] Madson, J. M. et al., 17th Aerospace Sciences Meeting, AIAA, 79-0253.
- [5] Covington, M. A. et al., AIAA paper, 75-262.
- [6] Hayes, D. T. et al., ADAO12250.
- [7] Hayes, D. T. et al., AIAA paper, 75-181.

EXPERIMENTAL STUDY OF CHEMICAL ALLEVIATION FOR IMPROVING REENTRY COMMUNICATION

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

Abstract

Chemical alleviation for improvement of reentry communication by solid ablation and liquid injection has been a practical way. The mechanism of chemical alleviation and the method of experimental studies of simulation in an arc tunnel are discussed in this paper. Studies have been performed in the H11DF arc tunnel by diagnostic methods of heat-protection material upon the electron concentration and the microwave transmission, and the injection of different electrophilic reagents upon the electron concentration have been determined. This has provided basis for selection heat-protection materials and identifying their properties.