

固体推进剂喷气羽烟对微波衰减 的理论模拟

彭培根 柳青

(国防科学技术大学)

摘要: 本文根据流体力学理论和等离子体知识,建立了推进剂喷气羽烟电磁特性的理论模型,并利用非平衡化学反应模拟了二次燃烧和电子捕获剂对喷气羽烟电磁特性的影响。计算值与实验结果的一致性较好,误差的最大值约为10%。模拟计算表明:添加少量电子捕获剂和降低铝粉含量,能有效地改善喷气羽烟的微波透射性。

主题词: 排气尾迹, 模拟, 计算, 微波衰减

THEORETICAL MODEL OF MICROWAVE ATTENUATION FOR EXHAUST PLUME OF SOLID PROPELLANTS

Peng Peigen Liu Qing

(National University of Defence Technology)

Abstract: Based on the theory of fluid mechanics and the knowledge of plasma a theoretical model of electromagnetic properties of propellant exhaust plume is developed. The effect of afterburning or electron-capturing additives on electromagnetic properties of exhaust plume is modeled by application of the model together with nonequilibrium chemistry reactions. The calculation coincides with the experimental results well, the maximum error is about 10%. The calculation results showed that microwave attenuation can be reduced by additives of capturing free electron and reducing quantity of aluminium.

Keywords: Exhaust trail, Simulation, Calculation, Microwave attenuation

一、前 言

火箭发动机喷出的羽烟是一种高浓度、高碰撞率、湍动非常剧烈的高温非均匀等离子体。微波通过羽烟时,会使强度衰减、相位漂移,强度衰减可达十几dB以上,从而使通信失真甚至中断。另外,羽烟中的自由电子和气体密度的涨落也能引起微波信号相位与幅度的快速涨落,这就是通常所说的喷气羽烟引入的噪声。噪声能以两种不同的方式影响导弹的制导:首先,它能减弱目标的多普勒信号;其次更重要的方面是参考信号上的边频噪声能掩盖目标的多普勒信号。因此,喷气羽烟对微波信号的影响严重削弱了导弹的命中精度。

国外有的学者根据流场理论,曾对双基推进剂固体火箭喷气羽烟对微波的衰减进行过模拟计算^[1,2]。但是,模拟含不同组份(包括含电子捕获剂和二次焰抑制剂)的复合推进剂的喷气羽烟对微波衰减的影响,没有报道过。国内有关这方面的报道更是少见。

我们根据流体力学理论、等离子体知识,利用非平衡化学反应,考虑喷气羽烟的二次燃烧,对固体推进喷气羽烟的微波透射性尝试理论模拟。

二、喷气羽烟的流体力学和等离子体模型

1. 流体力学模型

流场用下述方程来模拟^[3,4]:

轴向动量分量交换方程

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

径向动量分量交换方程

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2)$$

静止总焓方程

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial r} = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu r}{\sigma_H} \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu r \left(1 - \frac{1}{\sigma_H} \right) \right. \\ & \left. \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu r \left(\frac{1}{\sigma_K} - \frac{1}{\sigma_H} \right) \frac{\partial K}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

物质种类交换方程

$$\rho u \frac{\partial F_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial F_i}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu r}{\sigma_m} \frac{\partial F_i}{\partial r} \right) + \dot{w}_i \quad (4)$$

湍流模型采用k-ε两方程:

湍动能交换方程

$$\rho u \frac{\partial K}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu r}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial r} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍动能消失速度方程

$$\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu r}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \frac{c_2 \rho \varepsilon^2}{K} \quad (6)$$

流体粘度系数用 K 和 ϵ 表示, 即

$$\mu = C_D \rho K^2 / \epsilon \quad (7)$$

非平衡化学反应的影响由 $\dot{\omega}_i$ 引入, 化学反应写成:

$$\sum_i \alpha_{ij} x_i - \sum_i \beta_{ij} x_i = 0 \quad (8)$$

这里, α_{ij} 和 β_{ij} 为 x_i 种物质参加第 j 个反应中, 每进行单位反应时反应物及产物的分子数。

非平衡化学反应速度的计算很复杂。喷气羽烟中的炽热可燃气体与冷空气混合时能发生的反应很多, 本文仅考虑主要的化学反应、热电离和电子复合反应。

计算中还考虑了电子捕获剂捕捉自由电子的反应, 和二次燃烧抑制剂抑制燃烧的反应。

2. 等离子体模型

发动机喷出的燃气温度很高, 羽烟中的某些组分产生部分电离, 形成弱电离的等离子体。它与电磁波相互作用导致微波衰减。喷气羽烟中的电离气体包括: 质量轻、易于移动的电子, 质量大、移动不便的阴、阳离子。气体中还含有基本上不移动的中性原子和分子。电磁波通过时能与电子、离子和中性粒子作用, 但由于离子的质量 m_i 远大于电子的质量 m_e , 电磁波作用下, 离子获得的速度与电子速度相比可忽略不计。因而等离子体中的离子流比电子流小得多。

假设等离子体无辐射源, 忽略离子的影响。这样, 等离子体的有效介电常数和有效电导率可由等离子体动力学求得^[5]。

羽烟为非均匀等离子体, 本文作如下处理: 把羽烟按电磁波传播方向分层, 认为每一层内是均质的。同时, 考虑层与层之间的反射, 仅有一部分能透射到下一层。电磁波在介面上的反射及透射特性取决于各层介质的相对复折射率, 即

$$K = K_r + iK_i \quad (9)$$

式中 K_r 为折射系数, K_i 为吸收系数。

根据微波原理中的不变量镶嵌原理分析得出, $(n-1)$ 层体系中的功率透射系数为

$$T = \frac{K_{r,n}}{K_{r,n}} |T_n|^2 \quad (10)$$

相应地电磁波穿透 $n-1$ 层体系的功率传输衰减分贝数为

$$A = 10 \log T \quad (11)$$

式中 T_n 为电磁波在第 n 层的透射系数。

三、计算方法

令流量函数 $\psi = 2\pi \int \rho u r dr$, 无量纲变量 $y = (\psi - \psi_I) / (\psi_E - \psi_I)$, 式中 ψ_E 和 ψ_I 分别表示内外边界。改进后的微分方程有统一的形式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} + (a + by) \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(c \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{d}{\rho u} \quad (12)$$

Φ 代表 u 、 H 、 F 、 K 、 ϵ , d 为源项,

$$a = - \frac{1}{\psi_E - \psi_I} \frac{d\psi_I}{dx}$$

$$b = -\frac{1}{\psi_E - \psi_I} \frac{d(\psi_E - \psi_I)}{dx}$$

$$c = \frac{\rho u r^2 \mu}{(\psi_E - \psi_I) \sigma_{\phi, eff}}$$

式中 $\sigma_{\phi, eff}$ 代表 σ_H 、 σ_K 、 σ_m 和 σ_e 。

很明显, Φ 是 x 、 y 的函数, 对确定的 x 、 y 值, Φ 有唯一确定值。沿 x 方向, 可逐一求出 x 的定值和 y 变化时的 Φ 值。

令 u 、 D 分别代表上、下游 i 值, 则有

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\Phi_u - \Phi_D}{x_u - x_D} = \frac{\Phi_D}{x_D - x_u} - \frac{\Phi_u}{x_D - x_u} \quad (13)$$

(12) 式中两边乘 dy 并积分得

$$\begin{aligned} & \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} \left(\frac{\Phi_D}{x_D - x_u} - \frac{\Phi_u}{x_D - x_u} \right) dy + \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} (a + by) \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy \\ &= \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} d \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} c \right) dy + \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} \frac{d}{\rho u} dy \end{aligned} \quad (14)$$

对一阶微分的积分项

$$\begin{aligned} \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} Q dy &= \frac{1}{8} [Q_{i-1}(y_i - y_{i-1}) + 3Q_i(y_{i+1} - y_{i-1}) \\ &\quad + Q_{i+1}(y_{i+1} - y_i)] \end{aligned} \quad (15)$$

对二阶微分项进行估值, 一般写成如下形式

$$f \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(c \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \right]_u + (1-f) \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(c \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \right]_D$$

这里, $0 \leq f \leq 1$, 通常取 $0 \leq f \leq 0.5$ 可避免不稳定性。本文取 $f = 0$, 即为隐式表达,

$$\begin{aligned} & \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} d \left(c \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = \left(c_u \frac{\partial \Phi_D}{\partial y} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \left(c_u \frac{\partial \Phi_D}{\partial y} \right)_{i-\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{2} (c_{i+1}'' + c_i'') \frac{\Phi_{i+1}^D - \Phi_i^D}{y_{i+1} - y_i} - \frac{1}{2} (c_i'' + c_{i-1}'') \frac{\Phi_i^D - \Phi_{i-1}^D}{y_i - y_{i-1}} \end{aligned} \quad (16)$$

源项 $\dot{d}$ 采用最简单的估算法, 即用 u 线上的值估算。

为简化计算, 不考虑纵向压力梯度, 上述统一形式的微分方程可化成三对角差分方程组:

$$A\Phi_{i-1} + B\Phi_i + C\Phi_{i+1} = D \quad (i = 2, 3, \dots, N-1) \quad (17)$$

A 、 B 、 C 为系数。 i 为 1 及 N 时, Φ_0 、 Φ_{N+1} 超出边界, 为此作如下处理: $i = N$, $\Phi_{N+1} = \Phi_N$, 这是外边界条件; 内边界则进行插值 ($y = 0$, $\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0$)。

计算中步长取边界层厚度的 2~5%, 若 DX 表示步长, 则

$$DX = \text{const} \cdot \int_0^1 (\psi_E - \psi_I) / (\rho u y) dy \quad (18)$$

很明显, $\psi_E - \psi_I$ 值很重要, 它控制着整个差分方程, 其计算方法为

$$(\psi_E - \psi_I)_D = (\psi_E - \psi_I)_u + \left[-\frac{d(\psi_E - \psi_I)}{dx} \right]_u D X \quad (19)$$

利用追赶法可方便地求出 $\Phi_i^D (i=1, N)$ 值, 根据 Φ_i^D 值可计算出下一个步长, 然后把已求得的 Φ_i^D 作为 Φ_i^* 值, 重复上述步骤逐步推进, 求得整个流场之值。

四、计算结果与讨论

图1是文献〔2〕的计算值与本文计算结果的对比。显然, 这两条曲线的特征相同, 但本文的计算结果与实验值更为接近。图中阴影部分表示实验结果, 之所以用阴影表示, 是因为实验值有一定的误差, 真值可能是阴影内的某个点。本文由于采用了 $k-\varepsilon$ 方程来描述流场的湍流特性, 比用 $k-w$ 方程〔6〕更为准确。

HTPB推进剂的实验与计算结果的比较如表1所示。表中 A 为微波衰减值 (dB)。本文编制的程序既能考虑非平衡化学反应影响, 又能计算无化学反应时羽烟对微波的衰减。两种计算结果分别用 $A_{\text{计算-1}}$ 和 $A_{\text{计算-2}}$ 表示。由表1中的数据看出: $A_{\text{计算-1}}$ 的值与实验结果比较接近, 误差不超过10%; 而 $A_{\text{计算-2}}$ 的值与实测结果差别较大, 差别的大小与配方有关。HR-2、HR-4配方中贫氧程度加深, 燃气中可燃成份增加, 不考虑化学反应的估值与实测结果的差别就明显加大。HA-3中含有电子捕获剂, $A_{\text{计算-1}}$ 值比实测结果偏低些, 可能是电子捕获剂粒度较粗没有充分发挥作用。

表1 计算值与实验结果的比较

推进剂代号	HA-1	HR-2	HR-4	HA-3
A实测(dB)	2.553	2.539	2.214	1.862
A计算-1(dB)	2.682	2.401	2.200	1.695
A计算-2(dB)	2.102	1.424	0.208	—

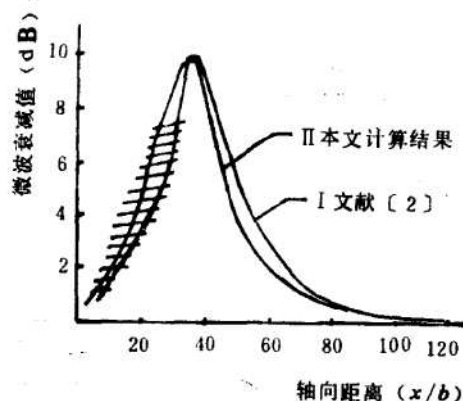


图1 计算结果与文献〔2〕的比较

图2为同一配方实测值与计算结果的比较。图3为两种少烟推进剂的计算值与实测结果的对比。图中: 曲线I为加有电子捕获剂的少烟推进剂的计算结果; 曲线II的配方与I相同, 但额外加有二次燃烧抑制剂。

由此可见, 本文运用流场理论和燃烧反应, 对推进剂喷气羽烟的模拟结果与实测数据的一致性较好。因此, 采用的模型和设计的程序对推进剂喷气羽烟电磁特性的预估是可信的。

在此基础上, 本文预测了某种少烟推进剂喷气羽烟对微波的衰减值。该推进剂加有电子捕获剂和二次焰抑制剂。预估结果如图4所示。

从图4看出, 喷气羽烟对微波的衰减与喷管直径成正比增长; 微波衰减值随铝粉含量的增加而上升; 喷气羽烟在真空中有利于微波穿透。这类推进剂与常规推进剂相比, 羽烟对微波的衰减已降低到40%以上。

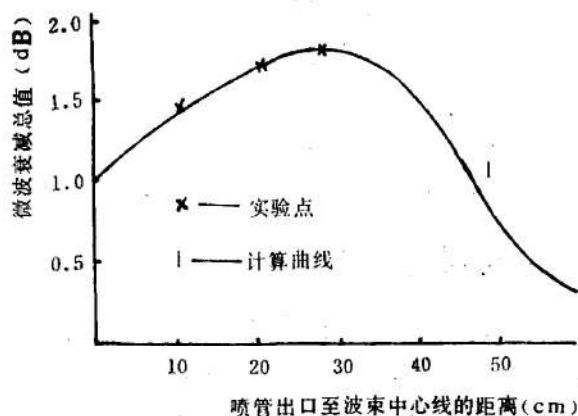


图2 喷气羽烟的微波衰减与距离关系

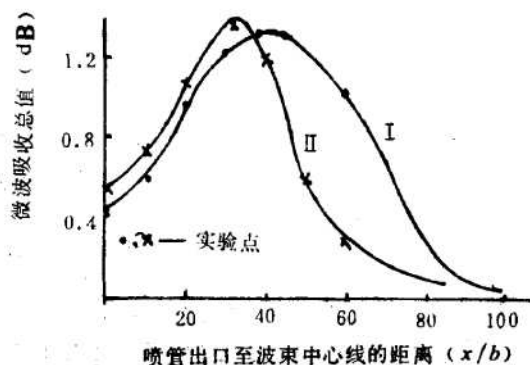


图3 羽烟的微波衰减与距离关系

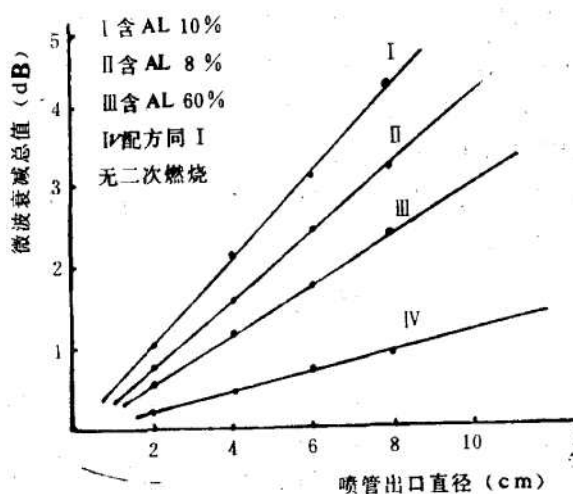


图4 吸收峰值与喷管出口直径关系

五、结 论

根据流场理论、等离子体知识建立的喷气羽烟对微波衰减的模型,由于考虑了非平衡化学反应的影响,计算值与实测结果比较吻合,误差不超过10%。因此,本文发展的模型和计算程序,对预测少烟推进剂性能有实际意义。

参 考 文 献

- (1) Smoot L D. Exhausts Plume Prediction Model for a Low-Altitude Supersonic Missile. AIAA Paper 72-1170
- (2) Jensen D E. Prediction of Rocket Exhaust Flame Structure, Combustion and Flame, Vol. 25, 1975
- (3) Launder B E and Spalding D B. Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, 1972
- (4) Patanker S V and Spalding D B. Numerical Prediction of Flow Heat Transfer, Turbulence and Combustion. New York, Pergamon Press, 1983
- (5) 王伯一, 徐燕侯等. 电磁波在非均匀有损耗再入等离子鞘层中的传播. <宇航学报>, No 1, 1985
- (6) Wolfgang R. Turbulence Buoyant Jets and Plumes. New York, Pergamon Press, 1985