

固体火箭喷管中的烧蚀控制机制

何洪庆 周 旭

(西北工业大学)

摘 要: 对碳基材料,以热化学烧蚀三方程模型为基础,在考虑粒子侵蚀,烧蚀与传热耦合的情况下,进行了全喷管烧蚀控制机制的研究,喷管中的烧蚀控制机制有化学动力学控制,扩散控制和双控制三种机制。通过研究,得到如下结论:1)对于由扩散控制和化学动力学控制确定的烧蚀率相差约20倍以上时,可以简化为按烧蚀率低的一种控制机制来计算;否则,应当按既考虑扩散控制,又考虑化学动力学控制的双控制机制来计算。2)在固体火箭喷管中,大体上喉部和扩张段的烧蚀是化学动力学控制的,而收敛段的烧蚀是由扩散控制的。3)由于在收敛段由两种机制控制的烧蚀率相差较小,因此,在收敛段的烧蚀率应当按双控制机制来计算。喉部和扩张段的烧蚀可简化为动力学控制机制。

主题词: 固体火箭发动机, 喷管, 烧蚀性能, 控制

ABLATIVE CONTROL MECHANISM IN SOLID ROCKET NOZZLE

He Hongqing Zhou Xu

(Northwestern polytechnical University)

Abstract: According to the aerodynamic-thermochemical ablation model, the ablative mass calculation equations are deduced. According to the transient equivalent thermo-capacity heat-conduction equation, its implicit scheme is deduced under the condition of ablative moving boundaries for multi-layer construction of nozzle. Then, these equations are coupledly solved.

By study, authors find that there are different ablative control mechanisms on different positions of nozzle: kinetics, diffusion or double control mechanism, and following conclusions may be obtained:

(1) It is important to divide ablative mechanisms into diffusion, kinetics or double control mechanisms for ablative calculation in nozzle.

(2) When the difference between ablative rate determined by diffusion and that by ki-

netics control mechanisms is equal to or more than 20 times, the ablative rate may be simply calculated according to that control mechanism which brings about lower ablative rate.

(3) In solid rocket nozzle, roughly, the ablation is controlled by diffusion in convergent portion, but by kinetics in throat and divergent portions.

(4) In solid rocket nozzle, the ablative rates in throat and divergent portions may be simply calculated by the kinetics control mechanism, but the ablative rate in convergent portion must be calculated by double control mechanism.

Keywords: Solid rocket engine, nozzle, Ablation property, Control

符 号 表

A	指前因子	T	温度
B	无量纲烧蚀率	t	时间
C_H	热输运系数	u, v	流速
C_K	当量热容	$\dot{\alpha}$	氧化性组分的质量率
E	活化能	ρ	密度
f	总气化分数	$\dot{\omega}$	化学反应质量生成或消耗率
f_w	炭化材料的热解组分分数		下标
K	组分浓度	C	碳
M	分子量	ch	化学动力学控制
$M_{g,w}$	燃气平均分子量	d	扩散控制
$\dot{m}$	质量率	e	附面层外缘
p	压强	g	气体
q	热流	i	$i=1, 2, \dots, 6$, 表示组分
R	气体常数	w	壁面
$\dot{r}$	线烧蚀率	$-\infty$	材料内部

1 引 言

在火箭发动机运行和飞行器再入大气层的热防护烧蚀计算中,盛行采用热化学烧蚀模型。这种模型认为,气流在热防护层的表面形成附面层,主流中的组分通过附面层向壁面扩散,其中具有氧化性的组分与热防护材料中热解产生的具有氧化性的组分一起,与表面材料发生化学反应,反应时吸收大量的热,因此材料的消耗有效地保护了基体。这一机理说明,材料烧蚀退移的速率(烧蚀率)取决于两种因素:一是主流中具有氧化性的组分向壁面扩散的速度,另一是化学反应的速度。如果扩散过程极快,以致能充分供应发生化学反应的氧化性组分,而化学反应的速度较慢,则烧蚀受到化学反应速度的限制,因此说烧蚀是受化学动力学控制的,称为动力学控制机制。相反,如果化学反应速度极快,而扩散过程较慢,扩散到壁面的氧化性组分很快被化学反应用完,来不及充分供应,那么,烧蚀便受到扩散过程的限制,因此说

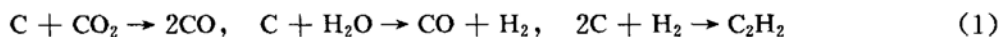
烧蚀是受扩散控制的,称之为扩散控制机制。如果说扩散速度和化学反应速度相当,那么烧蚀就既受到扩散控制,又受到动力学控制,称之为烧蚀的双控制机制。受扩散和动力学两种控制同时作用的双控制烧蚀率才是实际的、真正的烧蚀率。

在什么条件下,应当按哪一种控制机制,如何来计算烧蚀率,便是需要明确回答的问题。文献〔1〕回答了飞行器再入大气层烧蚀中的问题,本文则回答固体火箭喷管烧蚀中的问题。

2 处理问题的方法

烧蚀模型采用热化学烧蚀模型,材料针对以碳为基础的非炭化或炭化材料,例如石墨、碳-碳、碳酚醛等。

燃气主流和炭化材料热解产物中具有氧化性的组分主要是 H_2O 、 CO_2 和 H_2 , 它们与碳发生的反应为(三方模型)



将不参加壁面化学反应的惰性组分都折合归纳入 N_2 , 将组分按次序排列为 H_2O 、 CO_2 、 H_2 、 CO 、 C_2H_2 、 N_2 , 并依次对应表示为 $i=1, 2, \dots, 6$ 。

设 $\dot{\alpha}$ 表示氧化性组分的质量率; 下标 ch 表示动力学控制机制, d 表示扩散控制机制。则由动力学控制的氧化性组分质量消耗率为

$$\dot{\alpha}_{\text{ch},i} = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_w}\right) p_{w,i} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

由扩散控制的氧化性组分质量流率为

$$\dot{\alpha}_{\text{d},i} = \rho_c u_c C_H K_{e,i} \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

而双控制下氧化性组分的质量消耗率 $\dot{\alpha}$ 为

$$\dot{\alpha}_i = \frac{1}{1/\dot{\alpha}_{\text{ch},i} + 1/\dot{\alpha}_{\text{d},i}} \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

表面化学反应中组分的质量生成率为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_1 &= -\dot{\alpha}_1, \quad \dot{\omega}_2 = -\dot{\alpha}_2, \quad \dot{\omega}_3 = \frac{M_3}{M_1} \dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\omega}_4 &= \frac{2M_4}{M_2} \dot{\alpha}_2 + \frac{M_4}{M_1} \dot{\alpha}_1, \quad \dot{\omega}_5 = \frac{M_5}{M_3} \dot{\alpha}_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

而表面碳的消耗率为

$$\dot{m}_c = \frac{M_c}{M_1} \dot{\alpha}_1 + \frac{M_c}{M_2} \dot{\alpha}_2 + \frac{2M_c}{M_3} \dot{\alpha}_3 \quad (6)$$

由此得线烧蚀率为

$$\dot{r} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c} \quad (7)$$

各气体组分的分压为

$$p_{w,i} = \frac{M_{g,w} p_c}{M_i} K_{w,i} \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (8)$$

附面层中各组分分压之和与燃气中的静压相等

$$\sum_{i=1}^6 p_{w,i} = p_e \quad (9)$$

定义无量纲烧蚀率 B 和总气化分数 f 分别为

$$B = \frac{(\rho V)_{-\infty}}{\rho_e u_e C_H}, \quad f = \frac{(\rho V)_w}{(\rho V)_{-\infty}}$$

因此

$$fB = \frac{(\rho V)_w}{\rho_e u_e C_H} = \frac{\dot{m}_c + \dot{m}_g}{\rho_e u_e C_H} \quad (10)$$

根据碳基材料的热化学烧蚀质量守恒关系推得的化学反应质量计算方程的统一形式^[2]为

$$(1 + fB)K_{w,i} = K_{e,i} + Bf_{w,i} + \frac{\dot{\omega}_i}{\rho_e u_e C_H} \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (11)$$

对于热解材料多层结构统一形式的导热方程为

$$-C_k \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla q \quad (12)$$

式中 C_k 为当量热容。

在这里, 有 (9) ~ (12) 9 个方程, 可求解 $K_{w,i}$ ($i=1, 2, \dots, 6$), $M_{g,w}$, B , T_w 9 个未知数, 特别是在求得无量纲烧蚀率 B 和壁表面温度 T_w 的同时, 通过求烧蚀与传热的耦合, 可求得全喷管的烧蚀率和温度分布。

计算方程组是非定常的, 求解过程也相当复杂, 方程 (12) 按轴对称形式推导的隐式求解格式及计算方法详见文献 [3]。考虑粒子侵蚀时进行烧蚀与传热耦合计算的联系方程 (能量守恒方程) 和耦合计算方法见文献 [2、4]。

3 计算结果及分析

文献 [4] 指出, 受扩散、动力学、双控制下烧蚀率之间的关系为

$$\dot{r} = \frac{1}{1/\dot{r}_d + 1/\dot{r}_{ch}} \quad (13)$$

为了帮助分析计算结果, 我们画出各种不同控制机制下的烧蚀率之间变化的典型代表曲线, 如图 1 所示。

图 1 (a)、(b)、(c) 的左侧, 总的来说, 烧蚀机制属于动力学控制, 右侧则属于扩散控制。

我们以图 1 (a) 的右半侧为例来进行分析。假设受扩散控制的烧蚀率为某一常数 A , 而受动力学控制的烧蚀率为变量, 从 A 递增, 直至 ∞ 。在这种情况下, 受两种控制同时作用的双控制烧蚀率由 $A/2$ 逐渐增大, 趋近 A 。可见:

1) 受双控制的烧蚀率比受某一种单控制的烧蚀率低。因双控制既受到扩散控制, 又受到动力学控制, 即扩散慢了, 化学反应慢了, 烧蚀率自然就要低了。

2) 当 $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 之值相差悬殊时, 双控制烧蚀率 $\dot{r}$ 趋近于受控制的那一个较低的烧蚀率值。在图 1 (a) 中, 为 $\dot{r}_{ch} \gg \dot{r}_d$ 时, $\dot{r} \rightarrow \dot{r}_d$ 。这说明, 当 $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 相差悬殊时, 烧蚀可以简化为仅受烧

蚀率低的那一个机制的控制。在图 1(a)中,当 $\dot{r}_{ch} \gg \dot{r}_d$ 时,烧蚀可简化为仅受扩散控制。具体地说,当 $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 相差 20 倍时,可以作这种简化,这时产生的误差,在工程上允许的范围之内。

3) 当 $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 之值相差不太大 (小于 20 倍时), 应当采用双控制机制来计算烧蚀率。

图 1 (b)、(c) 的右半侧也是扩散控制的, 所不同的是受扩散控制的烧蚀率取为或递减或递增的有限变量, 而受动力学控制的烧蚀率为一直递增至 ∞ 的变量, 图上示出了在两种控制同时作用下的双控制烧蚀率的变化范围。图 1 (a)、(b)、(c) 左半侧图形的曲线与右半侧是对称的, 所不

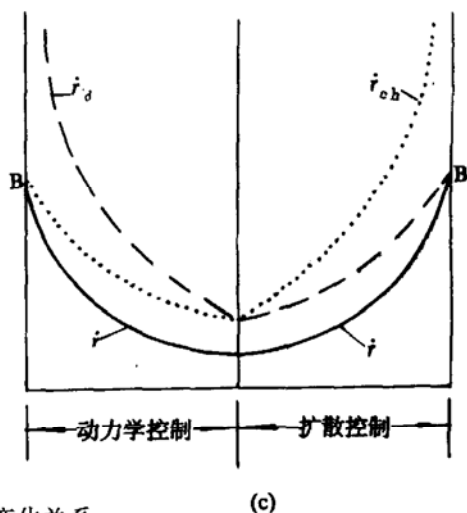
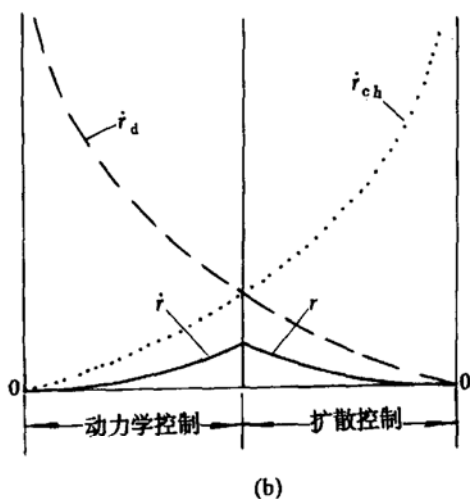
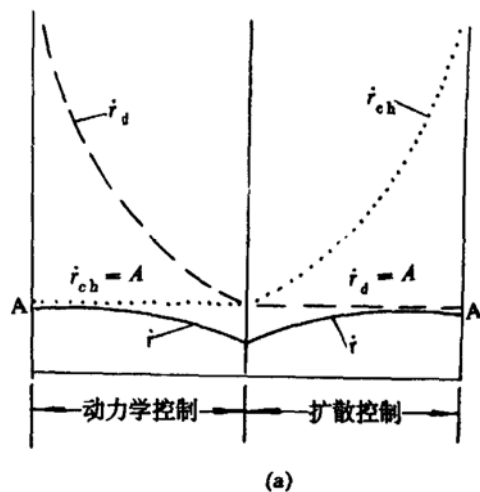


图 1 不同控制机制下烧蚀率之间的变化关系

同的是表示动力学控制。对这些图的分析方法和得出的结论是相同的

关于烧蚀机制的研究, 曾对由碳-酚醛、碳-碳、石墨、石墨渗铜等材料构成的几种复合结构喷管进行过计算, 在进行分析时, 仅需用一种喷管为代表。

喷管的结构如图 2 所示。燃烧室压强为 6MPa, 复合推进剂含铝 14%, 燃烧温度 3400K, 工作时间 23s。计算沿燃气流动方向由喷管收敛段, 经喉衬, 扩张段按逐个截面进行。计算结果如图 3 所示。

图 3 (b) 表示分别按扩散、动力学和双控制机制计算时, 烧蚀率沿喷管长度的分布。由图可见:

1) 在喷管中按不同烧蚀机制进行烧蚀率计算时, 差别明显, 有些地区差别相当大。

2) 大体上, 喷管收敛段烧蚀是由扩散控制的, 其余是动力学控制的。其原因是: 在喷管收敛段, 燃气和壁温较高, 壁面烧蚀化学反应的速度较高; 而气流速度较低, 附面层中燃气组分的扩散过程较慢。因此在喷管收敛段烧蚀往往受到扩散控制。在喉部和扩张段则相反, 易

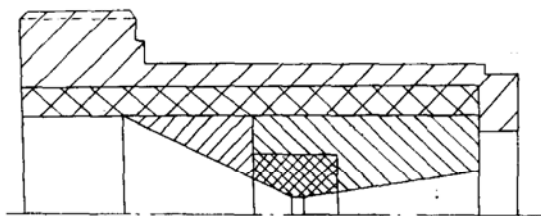


图 2 喷管结构图

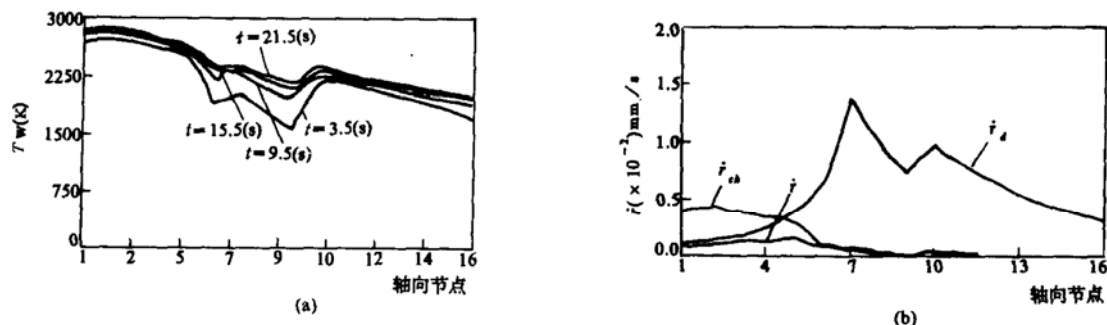


图3 壁温和烧蚀率沿轴向的分布

受化学动力学控制。

3) 在喷管喉部和扩张段, $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 相差悬殊, 可简化为按动力学控制来计算烧蚀率。过去计算中的这种简化是合理的^[6~9]。

4) 在喷管收敛段, 烧蚀机制虽然大体上是受扩散控制的, 但 $\dot{r}_{ch}$ 与 $\dot{r}_d$ 相差不大, 因此烧蚀率应当按双控制机制计算。

4 结 论

本文对以碳为基础的炭化和非炭化材料, 以热化学烧蚀的三方程模型为基点, 在考虑粒子侵蚀, 烧蚀与传热耦合的情况下, 进行了全喷管烧蚀机制的研究。通过研究, 可得到下列结论。

- 1) 对于喷管的烧蚀计算, 区分扩散、动力学和双控制机制是重要的。
- 2) 当由扩散控制和动力学控制确定的烧蚀率值相差约 20 倍以上时, 可以简化为按烧蚀率较低的一种控制来计算; 否则, 应当按双控制机制来计算。
- 3) 在固体火箭喷管中, 大体上, 收敛段的烧蚀是由扩散控制的, 喉部和扩张段的烧蚀是由动力学控制的。
- 4) 固体火箭喷管喉部和扩张段的烧蚀可简化为动力学控制机制, 而收敛段的烧蚀率应当用双控制机制来计算。

参 考 文 献

- [1] 肖育民, 何洪庆, 蔡体敏. 再入过程中 C/C 材料的烧蚀机制分析. 西北工业大学学报, 1992 (1)
- [2] 何洪庆, 周旭. 固体火箭复合结构全喷管的热防护 CAD. 宇航学会、航空学会联合学术会议, 1992. 10
- [3] 何洪庆, 周旭. 固体火箭复合结构喷管传热的隐式计算方法. 推进技术, 1993 (2)
- [4] Kou K K and Keswani S T. A comprehensive Theoretical Model for C-C Composite Nozzle Recession. CPIA Publication 367, 1982. 10: 243~257
- [5] 何洪庆, 冯喜平, 虞企鹤. 火箭喷管硅基内衬的液体层烧蚀模型. 西北工业大学学报, 1989 (1). 美国《EI》, 89-A-105353
- [6] 吴苏平, 王克秀, 虞企鹤. C/C 喷管喉衬烧蚀计算与分析. 推进技术, 1986 (5)
- [7] 何洪庆, 周旭, 潘宏亮. 喷管内衬碳酚醛的烧蚀模型. 固体火箭技术, 1991 (1)
- [8] 唐金兰, 何洪庆. 硅基内衬喷管扩张段烧蚀和温度场的耦合计算. 推进技术, 1991 (3)