

AP/HTPB推进剂组分热分解特性及其 匹配关系对推进剂燃速的影响

张伟 张仁 江瑜

摘 要

本文应用差示扫描量热——热重 (DSC—TG) 技术研究了TMO (过渡金属氧化物) 对过氯酸铵(AP)、端羟基聚丁二烯(HTPB)固化胶片热分解反应动力学参数 (如活化能E、反应温度T、反应速度常数K、以及热分解速率等) 的影响。测定了AP/HTPB/TMO推进剂的燃速。考察了组分热分解动力学参数与推进剂燃速的关系。结果表明, TMO对AP热分解特性和推进剂燃速的影响不是等效的, TMO对HTPB固化胶片的热分解基本无催化作用。由凝聚相燃烧模型进行理论分析发现, 若要推进剂维持稳态燃烧, 则氧化剂的热分解速率(r_{ox})、热着火延迟时间(t_{ign})与粘合剂的热分解速率(r_f)之间必须具备一定的匹配关系: $r_{ox}(1 - t_{ign}/t)/r_f \leq 1$ 。推进剂试样的中止燃烧电镜照片验证了这一理论分析的正确性。

一、引 言

复合固体推进剂是由氧化剂、有机粘合剂及其它附加组分构成的非均相混合物。其燃烧过程是由一组同时发生在气相、液相和固相的化学反应以及扩散、传热等物理过程所构成的一种相当复杂的物理——化学过程。整个燃烧过程不同程度地受火焰区的气相反应、燃烧表面及亚表面的凝聚相反应所控制。

Schmidt, W.G.^[1]和Kishore, K., Pai Venerker, V.R.等人^[2,3]得出了在固相中必定要先发生一系列热分解反应的结论。他们认为凝聚相反应应该是推进剂整个燃烧过程的控制步骤。K.Kishore和Pai Venerker, V.R.等人^[3]用DSC技术研究了氧化剂热分解特性对其推进剂燃速的影响。他们发现, AP/PS(聚苯乙烯)推进剂的热分解曲线与AP的热分解曲线相似, 两者的分解活化能均为83.74 kJ/mol。因此, 他们认为推进剂的热分解特性主要由氧化剂的热分解特性决定。他们又发现, AP的热分解速率与其推进剂的燃速存在对应的关系。W.G.Schmidt^[4]发现在不同压力下的AP高温分解温度与相应压力下的推进剂燃速呈线性关系。K.Shirotha^[5]发现多数催化剂能加速AP的高温分解, 并得到了AP高温分解温度 (起始分解温度 T_i 和峰温 T_p) 与AP/CTPB推进剂燃速的对应关系。

近些年来, 由于HTPB推进剂的一些突出优点而得到了迅速的发展和广泛的应用^[6]。随着粘合剂类型的变更, 对其推进剂的燃烧特性将会产生一定的影响^[7]。然而, 有关AP/HTPB推进剂的组分热分解特性与其燃烧性能的关系, 至今未见到有报导。

因此, 本研究的目的在于应用热分析方法全面考察一组TMO催化剂 (CuO、Fe₂O₃、Co₂O₃、Cr₂O₃、Ni₂O₃、TiO₂和MnO₂) 对AP和HTPB固化胶片热分解反应动力学参数的影响, 并进一步研究这些动力学参数与其推进剂燃速的关系。

二、实 验

全部实验所用的AP均为二级配,即粗(60目—80目)/细(35—45 μ)=3.5/1。热分析实验采用日本理学(Rigaku)Thermoflex热分析仪。每次取样为5mg左右,在空气气氛中分别在升温速率 β 为6、8、10、12和14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 下做DSC—TG实验。活化能E采用Ozawa法^[8,9]求得,其它动力学参数均采用经典的Kissinger法^[8,9]求得。全部数据应用最小二乘法直线拟合^[9]。本研究所用的推进剂配方如表1所示。所有配分均用两升的捏合机进行药料混合。全部固体组分在投料前均经过干燥处理。药料的捏合、浇注和固化均取50 $^{\circ}\text{C}$,固化时间7—8天。推进剂的燃速由靶线法测得。

表1 推进剂配方

组 分 名 称	含 量 (% , 重量)
AP (60-80目)	64.6
AP (35-45 μ)	18.4
HTPB粘合剂系统	15
癸二酸二辛酯	2
TMO	1.5 (外加)

三、实验结果和讨论

一、热分解反应

1. AP和AP/TMO体系的热分解

在表2中给出了本研究测得的AP高温分解和低温分解活化能、晶型转变热及总热效应与文献值的比较。由表2可见,本研所得的数据与文献值基本相同或相似。

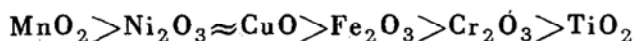
表2 AP热分解参数与文献值的比较

参 数 类 别	kJ (低温) (kJ/mol)	E_H (高温) (kJ/mol)	ΔH (J/g)	
			晶 型 转 变	总 放 热
实 验 值	134	155	89.6	1238.4
文 献 值	134-142.4 ^[10] 137 ^[11]	162.4 ^[12] 171.2 ^[11]	85 $\pm$ 2.51 ^[13]	1164 $\pm$ 41.9 ^[13]

TMO催化剂对AP热分解动力学和热力学参数的影响如表3所示。由表3所列的数据可以得出如下几点结论:

(1) TMO对AP晶型转变和低温分解反应基本没有影响。

(2) 不同的TMO对AP的高温热分解有不同的影响,按TMO对AP高温分解温度的影响来比较时,则催化活性顺序为



若按TMO对AP高温分解活化能的影响来比较时,则催化活性顺序为

表 3 TMO对AP热分解特性的影响 ($\beta = 6^\circ\text{C}/\text{min}$, 静态空气)

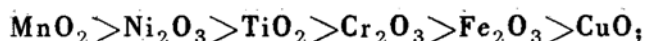
参 数	类 别	AP/CO ₂ O ₃	AP/MnO ₂	AP/Ni ₂ O ₃	AP/CuO	AP/Fe ₂ O ₃	AP/Cr ₂ O ₃	AP/TiO	AP
晶型转变	Tr (°C)	243	243	243	243	243	243	243	243
	ΔH_r (KJ/g)	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08
低温分解	T _{IL} (°C)	214±1	260±1	259±1	259±1	258±2	259±1	260±1	260±1
	T _{PL} (°C)	278±1	279±1	280±1	279±1	279±1	280±1	279±1	280±1
	E _L (KJ/mol)	92.7	117.3	120.3	141.2	132.3	134.0	124.3	133.5
	ΔH_L (KJ/g)	1.24	0.18	0.25	0.32	0.25	0.29	0.33	0.32
	r _L (%/min)	6.7	5.0	4.6	3.9	3.9	3.5	4.1	3.6
	T _{IH} (°C)		295	309	308	322	325	336	344
高温分解	T _{PH} (°C)		320	337	337	363	364	372	376
	E _H (KJ/mol)		99.2	114.2	197.9	161.1	149.4	131.4	156.5
	ΔH_H (KJ/g)		0.76	0.91	1.09	0.94	0.89	0.89	0.92
	r _H (%/min)		7.7	7.6	8.9	7.5	7.1	7.0	6.4

注: Tr-晶型转变温度, ΔH_r -晶型转变热, T_{IL}、T_{IH}-分别为低、高温起始分解温度, T_{PL}、T_{PH}-分别为低、高温分解峰温, E_L、E_H-分别为低、高温分解活化能, r_L、r_H-分别为低、高温分解速率。AP/CO₂O₃体系在低温段全部分解完。

表 4 Kissinger法得出的AP热分解动力学参数

参 数	类 别	AP/CO ₂ O ₃	AP/MnO ₂	AP/Ni ₂ O ₃	AP/CuO	AP/Fe ₂ O ₃	AP/Cr ₂ O ₃	AP/TiO ₂	AP
Z _K		6.1×10 ¹¹	2.4×10 ⁹	1.8×10 ⁹	6.8×10 ¹⁹	3.6×10 ¹¹	2.0×10 ⁹	7.5×10 ⁸	1.4×10 ¹³
K		120.50	7.90	4.13	165.57	3.04	1.81	1.08	2.86

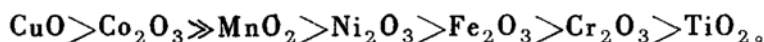
注: (1)计算K值时, T取为700K



若按TMO对AP高温热失重速率的影响来比较时,则催化活性顺序为



应用Kissinger法计算所得的AP/TMO体系的高温分解反应的指前因子 Z_k 和反应速度常数 K 如表 4 所示。由表 4 可以得出AP/TMO体系高温分解反应速度常数 K 的顺序为



综合上述各种因素可见CuO、 Co_2O_3 、 MnO_2 和 Ni_2O_3 都是催化AP热分解效果较显著的催化剂。

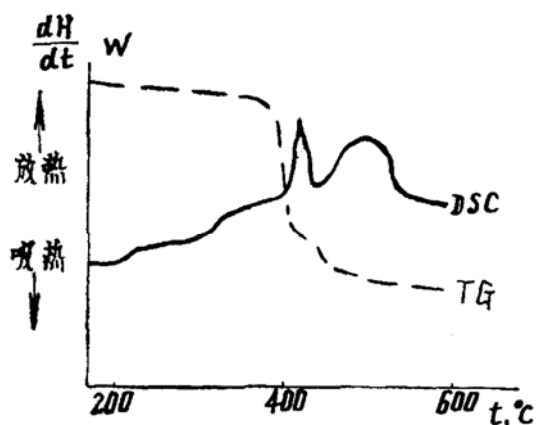


图1 HTPB固化胶片的热分解曲线

2. HTPB和HTPB/TMO固化胶片的热分解

HTPB 固化胶片的热分解曲线如图1所示。由图1可见,HTPB 固化胶片的热分解可以分为三个温度区域:(1)180—420°C为缓慢热分解;(2)420—500°C为快速分解;(3)480—600°C为胶片分解残渣(主要是炭)的氧化。与上述前两个温度区域相对应的具体化学反应分别是大分子网状结构中某些未交联的HTPB 予聚体的支链或小分子的热解和大分子

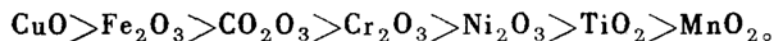
网状结构的破坏。

由上可见,采用快速分解阶段的热分解特性来表征HTPB 固化胶片的热分解是比较合适的。

表5给出了HTPB/TMO 固化胶片快速分解阶段的热分解参数。由表5可以看出,TMO 的加入使HTPB固化胶片的活化能有所增加,而其它参数变化很小。可见TMO 对HTPB固化胶片的热分解无催化作用。

二、TMO对AP/HTPB推进剂燃速的影响

在本研究中所用的TMO催化剂对AP/HTPB推进剂燃速的影响如表6所示。由表6可见,除 MnO_2 外,其余的TMO均使AP/HTPB 推进剂的燃速增高。按其催化效果的顺序可排列如下:



由表6还可以看出,在不同压力下TMO对推进剂燃速的催化作用趋势是基本相同的。

三、氧化剂和粘合剂热分解的匹配关系对推进剂燃速的影响

首先考察氧化剂的热分解特性与其推进剂燃速的关系。图2和图3分别给出了AP/TMO 体系热分解参数与AP/HTPB/TMO推进剂燃速的关系。由图2和图3看出,TMO对AP 热分解和对其推进剂燃速的催化作用并不完全等效。一些显著加速AP热分解的催化剂(如 Co_2O_3 、 MnO_2 和 Ni_2O_3 等),并不一定是提高推进剂燃速显著的催化剂。由此可见,前人的有关结论并不适用于AP/HTPB/TMO推进剂。

粘合剂是复合固体推进剂的粘弹母体,氧化剂颗粒镶嵌于粘合剂之中。当推进剂被点燃后,宏观上燃面是按平行层推进的,而微观上燃速则是由无数氧化剂颗粒和粘合剂的分解速度以及燃面上方的气相反应速度等共同决定的一个统计平均值。

表 5 HTPB/TMO固化胶片快速分解段热分解特性

参 数	类 别	f/空白	f/CuO	f/Fe ₂ O ₃	f/CO ₂ O ₃	f/Cr ₂ O ₃	f/Ni ₂ O ₃	f/TiO ₂	f/MnO ₂
E ₀ (KJ/mol)		171.5	311.7	278.2	287.4	273.8	252.7	187.9	262.3
K		0.147	0.146	0.155	0.150	0.155	0.170	0.165	0.141
T(°C) (a = 0.5)		444	444	447	444	443	444	445	446

注: K值计算时, 取T = 700K, f代表固化胶片, a-分解百分数。

表 6 推进剂/TMO体系的燃烧性能

参 数	类 别	AP/CuO	AP/Fe ₂ O ₃	AP/CO ₂ O ₃	AP/Cr ₂ O ₃	AP/Ni ₂ O ₃	AP/TiO ₂	AP/MnO ₂	AP 基础
r, mm/s (29.4 × 10 ⁵ Pa)		9.0 ± 0.37	7.9 ± 0.41	6.9 ± 0.16	6.8 ± 0.10	5.7 ± 0.16	5.5 ± 0.24	5.1 ± 0.14	5.1 ± 0.09
r, mm/s (49.1 × 10 ⁵ Pa)		11.6 ± 1.07	10.3 ± 0.66	8.8 ± 0.34	8.9 ± 0.27	7.6 ± 0.42	6.7 ± 0.26	6.0 ± 0.02	6.0 ± 0.14
r, mm/s (58.9 × 10 ⁵ Pa)		12.7 ± 0.43	11.3 ± 0.29	9.4 ± 0.68	9.4 ± 0.68	8.4 ± 0.30	7.3 ± 0.02	6.6 ± 0.21	6.8 ± 0.28
r, mm/s (68.7 × 10 ⁵ Pa)		13.6 ± 1.12	12.8 ± 0.69	10.0 ± 0.41	10.0 ± 0.41	9.3 ± 0.63	8.0 ± 0.23	7.0 ± 0.03	7.2 ± 0.24
r, mm/s (78.5 × 10 ⁵ Pa)		14.6 ± 0.57	14.1 ± 1.12	11.0 ± 0.48	10.4 ± 0.34	10.3 ± 0.39	8.1 ± 0.54	7.5 ± 0.30	7.7 ± 0.74
n		0.49	0.59	0.47	0.44	0.59	0.42	0.39	0.43
a		1.68	1.05	1.41	1.55	0.75	1.30	1.35	1.17
r, mm/s (2.94 × 10 ⁵ Pa)		2.6 ± 0.03	2.4 ± 0.08	2.2 ± 0.06	2.2 ± 0.13	2.0 ± 0.67	2.0 ± 0.05	1.8 ± 0.04	1.8 ± 0.05

注: n, a是燃速表达式 $r = ap^n$ 中的系数。

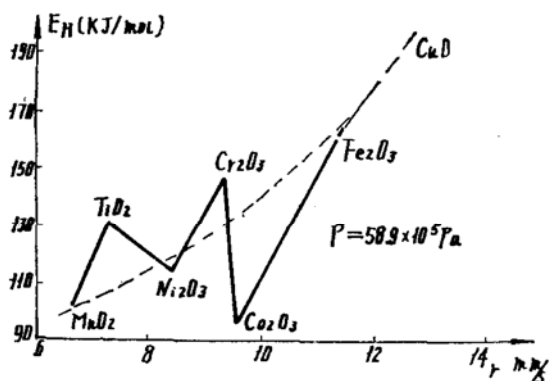


图2 AP/TMO高温分解活化能与其推进剂燃速的关系 (虚线表示 E_H 与燃速相互关系的总趋势)

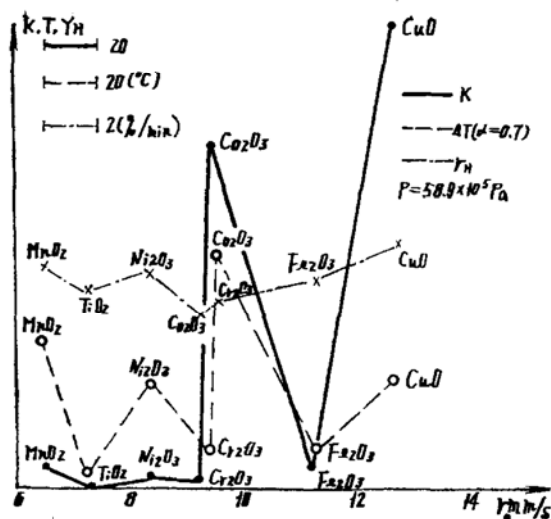


图3 AP/TMO高温分解参数 ($K, \Delta T, r_H$) 与其推进剂燃速的关系 ($\Delta T = T_{AP} - T_{iAP/TMO}$)

若假设初始燃面是平坦的, 当推进剂点燃后氧化剂的分解速度很快, 以致于大大超过了粘合剂的分解速度时, 那么在推进剂燃面上就会剩下大量的来不及分解的粘合剂熔化液, 这种熔化液就会局部覆盖推进剂燃面上的AP, 使燃面局部熄火, 结果反而使燃速降低。

现以BDP多火焰模型^[14]为基础, 并假设:

- (1) 燃烧过程为一维稳定燃烧;
- (2) 凝聚相中氧化剂和粘合剂的分解反应速度均遵循Arrhenius方程, 即两者均为零级反应;
- (3) 初始燃面是平坦的;
- (4) 当氧化剂存在不同的颗粒尺寸时, 仅考虑最大的颗粒, 即小颗粒氧化剂在燃面上迅速完全分解;
- (5) 氧化剂颗粒为球形;
- (6) 粘合剂在燃面上呈熔融状。

根据BDP多火焰燃烧模型, 推进剂的质量燃速 $\dot{m}_r$ 可以表示为

$$\dot{m}_r = \rho_f r_f \frac{S_f}{S_o} + \rho_{ox} r_{ox} \frac{S_{ox}}{S_o} \quad (1)$$

式中: ρ_f, ρ_{ox} ——分别为粘合剂和氧化剂的密度,
 S_f, S_{ox} ——分别为粘合剂和氧化剂的表面积,
 r_f, r_{ox} ——分别为粘合剂和氧化剂的线性分解速度,
 S_o ——推进剂的总燃烧面积。

因为在推进剂燃烧时, 氧化剂的消耗量与粘合剂消耗量之比等于它们在推进剂中的重量比, 即

$$\frac{\rho_{ox} r_{ox} (s_{ox}/s_o)}{\rho_f r_f (s_f/s_o)} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (2)$$

式中 α ——氧化剂在推进剂中的重量百分数。

$$\text{所以, } \dot{m}_r = \frac{1}{\alpha} \rho_{ox} r_{ox} \frac{s_{ox}}{s_o} \quad (3)$$

又根据假设(2), 燃面上氧化剂和粘合剂的分解速率分别为:

$$\dot{m}_{ox} = \rho_{ox} \cdot r_{ox} = Z_{ox} \exp\left(-\frac{E_{ox}}{RT_s}\right) \quad (4)$$

$$\dot{m}_f = \rho_f \cdot r_f = Z_f \cdot \exp\left(-\frac{E_f}{RT_s}\right) \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_{ox}, \dot{m}_f$ ——分别为氧化剂和粘合剂的热分解速率,

E_{ox}, E_f ——分别为氧化剂和粘合剂的热分解活化能,

Z_{ox}, Z_f ——分别为氧化剂和粘合剂热分解反应的指前因子,

T_s ——推进剂燃烧表面温度。

由(3)式和(4)式可得

$$\begin{aligned} \dot{m}_r &= \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{s_o} \cdot s_{ox} \cdot Z_{ox} \cdot \exp\left(-\frac{E_{ox}}{RT_s}\right) \\ &= C' \cdot s_{ox} \cdot r_{ox} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 C' 为常数, $C' = \frac{1}{\alpha s_o}$ 。

由(6)式可见, 要提高推进剂燃速, 不仅要提高氧化剂的分解速度, 而且要使燃面上的氧化剂颗粒有较大的表面积。现考虑一个氧化剂粒子的情况(见图4)。在初始时刻 $t=0$ 时, 即推进剂开始点火一瞬间, 氧化剂粒子处于燃面之下, 表面是平坦的。经过时间 t 后, 由于表观的氧化剂分解速度和粘合剂热分解速度不同, 使燃面高低不平。如要考察氧化剂粒子始终凸出于燃面的情况时, 显然应有氧化剂的表观分解速度小于粘合剂的分解速度这个限制条件

$$r_{ox, a} / r_f \leq 1 \quad (7)$$

式中 $r_{ox, a}$ ——氧化剂的表观分解速度。

这里我们之所以要提出氧化剂表观分解速度的概念, 是由氧化剂的燃烧特征决定的。由于氧化剂AP的燃烧受两个因素——热分解特性和热着火特性共同决定, 因此在研究推进剂的燃烧性能时, 不仅要AP的热分解特性, 而且要对AP的热着火特性(点火延迟时间)给予足够的重视。

在 t 时刻时, 粘合剂热分解使其表面向下推进的距离为

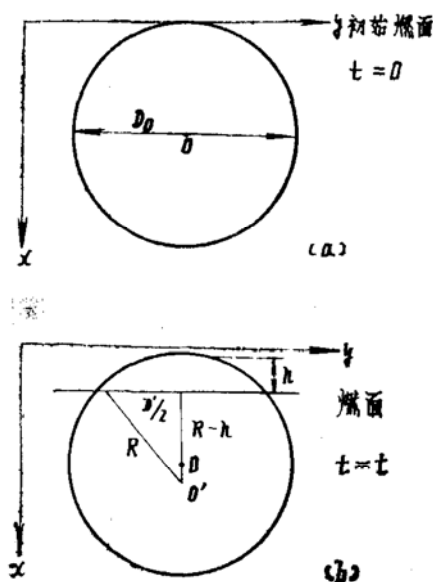


图4 单个AP粒子燃烧时的情况

$$h_f = \int_0^t r_f dt = r_f \cdot t \quad (8)$$

氧化剂AP颗粒上切面向下推进的距离为

$$h_{ox} = \int_0^{t-t_{ign}} r_{ox} dt = r_{ox}(t-t_{ign}) \quad (9)$$

式中 t_{ign} 为AP点火延迟时间。暴露于燃面上的氧化剂球冠高为

$$h = h_f - h_{ox} = r_f \cdot t - r_{ox}(t-t_{ign}) \quad (10)$$

根据统计规律可知, 燃面上无数个不同状态的氧化剂颗粒的截面直径 D' 为^[15]

$$D' = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot D \quad (11)$$

式中 D 为氧化剂的初始直径。球冠曲率半径为

$$R = \frac{h}{2} + \frac{\left(\frac{D'}{2}\right)^2}{2h} \quad (12)$$

氧化剂表面积为

$$s_{ox} = 2\pi Rh = \pi \left[h^2 + \left(\frac{D'}{2}\right)^2 \right] \quad (13)$$

将(10)式代入(13)式得

$$s_{ox} = \pi \left\{ [r_f t - r_{ox}(t-t_{ign})]^2 + \left(\frac{D'}{2}\right)^2 \right\} \quad (14)$$

将(14)式代入(6)式得

$$\dot{m}_f = c \cdot \left\{ [r_f t - r_{ox}(t-t_{ign})]^2 + \left(\frac{D'}{2}\right)^2 \right\} \cdot r_{ox} \quad (15)$$

由(15)式可见, 推进剂的燃速同时受氧化剂和粘合剂热分解速度、氧化剂的热着火特性等因素的影响, 只是各个因素影响的程度不同而已。因此, 当我们考察组分热分解特性与推进剂燃速的关系时, 必须要同时考虑氧化剂热分解和粘合剂热分解特性以及其它因素的综合影响。

由(7)式和(9)式可以发现

$$r_{ox, a} = r_{ox}(t-t_{ign})/t = r_{ox}(1-t_{ign}/t) \quad (16)$$

即(7)式可以写成

$$r_{ox}(1-t_{ign}/t)/r_f \leq 1 \quad (17)$$

可以认为, 式(17)较好地体现了氧化剂热分解特性、热着火特性和粘合剂热分解特性三者对推进剂燃速影响的互相间的制约关系, 即匹配关系。只有在综合考虑这种匹配关系的前提下, 才能更有效地使用催化剂来提高推进剂的燃速。

从前面的热分析结果可知, AP/TMO体系的反应速度常数 $K > 1$, 而HTPB/TMO体系的反应速度常数 $K < 1$, 所以有 $r_{ox}/r_f > 1$ 。如果推进剂燃面按此规律来燃烧的话, 则就会导致燃面熄火。可见, 氧化剂的点火延迟时间 t_{ign} 是一个不可忽视的影响因素。

由热平衡方程, 在绝热条件下可得^[15]

$$t_{ign} = \frac{\exp(E_{ox}/RT_0)}{\Delta H \cdot r_{ox}} \cdot \rho_{ox} \cdot c \cdot \frac{RT_0^2}{E_{ox}} \quad (18)$$

式中 T_0 为环境温度, C 为比热, ΔH 为燃烧热。

由(18)式可见, 点火延迟时间 t_{ign} 受很多因素的影响, 对于推进剂内部的氧化剂来说,



图5 AP/HTPB/CuO推进剂
中止燃烧电镜照片

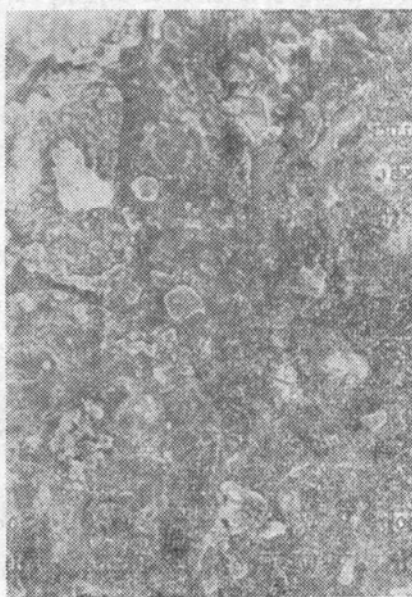


图6 AP/HTPB/CO₂O₃推进剂
中止燃烧电镜照片

它与氧化剂本身的热分解反应特性, 催化剂的催化作用以及包围在它四周的粘合剂的导热性能有关。

AP/HTPB/CuO、AP/HTPB/CO₂O₃ 和 AP/HTPB/MnO₂等推进剂体系的中止燃烧电镜照片(图5-7)证实了上述理论分析的正确性。比较三张电镜照片发现, 三种推进剂中AP粒子凸出燃面的现象, 以AP/HTPB/CuO最为明显, 而AP/HTPB/CO₂O₃燃面较平, AP/HTPB/MnO₂在燃面上很少见到AP粒子。这说明, 只注意加速AP热分解(如CO₂O₃, MnO₂)并不一定能得到较高的推进剂燃速, 而只有当氧化剂和粘合剂的分解速度达到某一匹配关系时, 方可得到较好的催化效果。

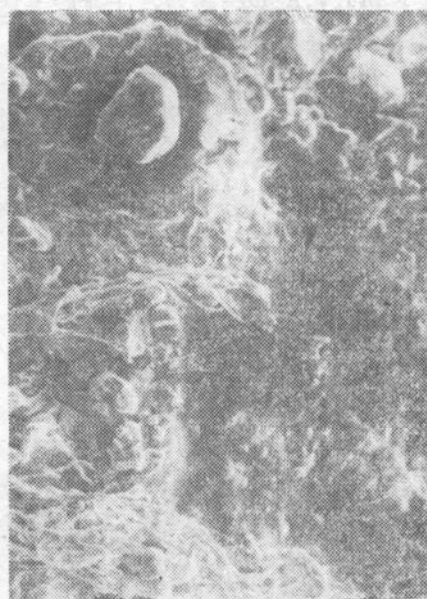


图7 AP/HTPB/MnO₂推进剂中止燃烧电镜照片

四、结 束 语

根据本研究可以得出如下几点简要的结论: (1) CO₂O₃、MnO₂、Ni₂O₃以及CuO等TMO都是催化AP热分解比较显著的催化剂, 但对HTPB固化胶片的热分解无催化作用; (2) TMO对AP/HTPB推进剂燃速的催化活性顺序为: CuO > Fe₂O₃ > CO₂O₃ > Cr₂O₃ > Ni₂O₃ > TiO₂ > MnO₂; (3) 在选择推进剂的燃速催化剂时, 要使AP的热分解速度与粘合剂的热分解速度之间满足匹配关系 $r_{ox, a}/r_f \leq 1$, 才能得到较高的推进剂燃速。

由于复合固体推进剂热分解和燃烧过程的复杂性,因此在推进剂的组分热分解特性与其燃烧性能关系的研究方面,仍有许多问题尚待进一步深入探索,如着火延持时间对燃速的影响,以及用什么动力学数据处理方法更适合于推进剂组分热分解反应的机理等。

参 考 文 献

- 〔1〕 Schmidt, W. G., NASA-CR-112083.
- 〔2〕 Kishore, K. et al., AIAA J. Vol. 13(9), P1240, 1975.
- 〔3〕 Rostagi, R. P. et al., Ahermo. Acta., vol. 17, P. 73, 1976.
- 〔4〕 Schmidt, W. G., NASA-CR-66759.
- 〔5〕 Shirotha, K., Proc. 12th Symp. Inter. on Space Technol. and Sci., P. 475, 1977.
- 〔6〕 田德余:《推进技术》, №3, P. 30, 1982.
- 〔7〕 张仁: 复合固体推进剂的稳态燃烧, 国防科技大学, 1983.
- 〔8〕 云主惠, 周政懋。《火炸药》, №2, P. 24, 1983.
- 〔9〕 张焯: 硕士学位论文, 国防科技大学, 1984.
- 〔10〕 Jacobs, P. W. M. et al., Pro. Roy. Soc., A254, P. 455, 1960.
- 〔11〕 Jacobs, P. W. M. et al., Trans. Frady. Soc., Vol. 63, P. 1737, 1967.
- 〔12〕 Bircumshaw, L. L. et al., Pro. Roy. Soc., A227, P. 228, 1955.
- 〔13〕 Kishore, K. and Pai Venerker, V. R., AIAA, J., Vol. 14, P. 966, 1976.
- 〔14〕 Beckstead, M. W., Dear, R. L. and Price, C. F. AIAA, J. Vol. 18(12), P. 1629, 1970.
- 〔15〕 Kanury, A. M., 等著, 庄逢辰等译, 燃烧导论, 国防科技大学, 1981.