

复合固体推进剂燃速及 压力指数的理论预测

彭 培 根

摘 要

本文在原始BDP多火焰燃烧模型的基础上,对多分散的氧化剂颗粒和扩散火焰距离进行了简化计算,对含铝和含催化剂的计算亦进行了简化处理。设计的程序较为简短,能在带FORTRAN语言的各种类型微型机上实行快速运算,计算与实测结果的对比,其精度在10%以内。理论计算还预示:凡能增大AP焰反应速度的燃速催化剂,具有大幅度提高燃速和降低压力指数的效果;选择的氧化剂颗粒级配若D(相当)接近80微米时,能达到提高燃速与降低压力指数的作用。

一、前 言

燃烧速度和燃速压力指数是固体推进剂燃烧性能的重要参数。多年来都是从实验测定这两个示性数。然而,实验测定需要化费很长的时间,且测量精度与测试方法和设备密切相关。如要预测催化剂对推进剂燃速及压力指数的影响,只凭实验是很难办到的。

自1970年Beckstead、Derr、Price^[1]提出的原始多火焰燃烧模型(BDP模型)以来,已能从理论上计算复合固体推进剂的燃烧速度。原始BDP模型只适应于球形、单分散氧化剂且不含铝粉的配方。不久,Chen、Derr和Price^[2]又将原始BDP模型推广到含铝和双模氧化剂的推进剂,随后Sammons^[3]推广到多分散氧化剂的推进剂(即临界粒径燃烧模型)。七十年代中、后期,Glick^[4]最早提出的,其后又为Condon和Osborn^[5]所采用和补充的“小颗粒集合模型”即PEM,对多分散氧化剂颗粒的推进剂燃烧速度的计算达到了较完善的程度。但是,上述作者提出的计算方法,多半只是介绍原理,即使个别发表的计算程序也只适应于不含金属粉和催化剂的复合推进剂,而且程序很大,难以在微型机上进行快速运算。为了解决实际使用的复合推进剂的燃速与压力指数的计算、简化计算过程、以及从理论上深入研究各参量对燃速及压力指数的影响,这正是本文分析研究的目的。

二、基 本 原 理

BDP多火焰燃烧模型仍然是本计算的基本物理模型。数学模拟作如下假设:

- (1) 二维火焰形状拟一维火焰表示,如图1。
- (2) 氧化剂与粘合剂的表面分解速率按Arrhenius方程。
- (3) 气相为简单均相反应,各火焰的化学反应均限制在很薄一层的火焰壳上进行。
- (4) 铝粉的燃烧反应远离燃烧表面,忽略它对燃面的热反馈影响。但是,铝粉的加入要改变(增大)气相的导热系数,降低气、固相的平均热容,同时要考虑铝粉的熔化热。
- (5) 热辐射忽略不计。

1. 燃烧表面连续方程

表达式为

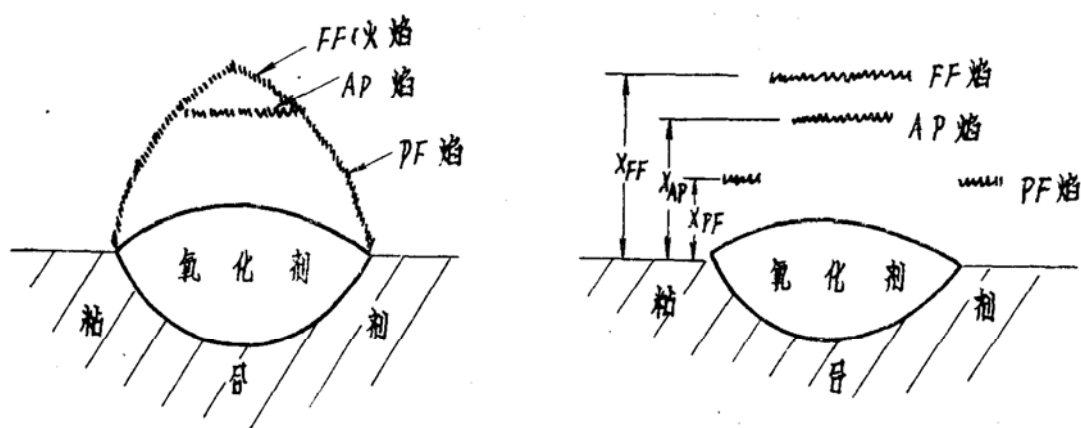


图1 二维火焰形状拟一维表示

$$\dot{m}s_o = \frac{\dot{m}_{ox}s_{ox}}{\alpha} = \frac{\dot{m}_{Al}s_{Al}}{\varepsilon} = \frac{\dot{m}_f s_f}{1 - \alpha - \varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\dot{m}$ 、 $\dot{m}_f$ 、 $\dot{m}_{ox}$ 、 $\dot{m}_{Al}$ 分别表示推进剂、粘合剂、氧化剂和铝粉的质量燃速; s_o 、 s_f 、 s_{ox} 和 s_{Al} 分别表示推进剂、粘合剂、氧化剂和铝粉的表面积; α 、 ε 分别表示推进剂中氧化剂和铝粉的百分含量。

$$\dot{m}_{ox} = \rho_{ox} r_{ox} = A_{ox} e^{-E_{ox}/RT_s} \quad (2)$$

$$\dot{m}_f = \rho_f r_f = A_f e^{-E_f/RT_s} \quad (3)$$

式中: ρ_{ox} 、 r_{ox} 、 E_{ox} 、 A_{ox} 和 ρ_f 、 r_f 、 E_f 、 A_f 分别表示氧化剂和粘合剂的密度, 线分解速度、活化能及指前因子。

$$\frac{s_{ox}}{s_o} = \frac{\xi(6(\frac{h}{D_o})^2 + 1)}{1 + 6\xi(\frac{h}{D_o})^2} \quad (4)$$

式中: ξ 为推进剂中氧化剂的体积分数,

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon \rho_{ox}}{\alpha \rho_{Al}} + \frac{(1 - \alpha - \varepsilon) \rho_{ox}}{\alpha \rho_f}} \quad (5)$$

式中: ρ_{Al} 表示铝粉的密度; h 表示氧化剂凸出或凹进粘合剂表面的距离; D_o 是单分散氧化剂的初始直径, 对多分散氧化剂的 D_o 按相当粒径 $D(\text{相当})$ 计算; $\frac{h}{D_o}$ 也采用相当值 $(\frac{h}{D})_{\text{相当}}$ 计算。

如果氧化剂颗粒有 N 个级分, 在第 j 个级分中的最大粒子直径为 $D_{\max(j)}$, 最小粒子直径为 $D_{\min(j)}$, 第 j 级分氧化剂粒子占氧化剂的百分数为 $\text{sig}(j)$, 则氧化剂粒子的相当粒径为

$$D(\text{相当}) = \sum_{j=1}^N \text{sig}(j) e^{DZE(j)} \quad (6)$$

$$\text{而 } DZE(j) = \frac{1}{2} [\ln(D_{\max}) + \ln(D_{\min})]_j \quad (7)$$

$\left(\frac{h}{D}\right)$ 按下式计算
相当

$$\left(\frac{h}{D}\right)_{\text{相当}} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \left(1 - \frac{r_{ox}}{r_f}\right) + r_{ox} \left(\frac{tign}{D}\right)_{\text{相当}} \quad (8)$$

式中 $\left(\frac{tign}{D}\right)$ 按下式计算
相当

$$\left(\frac{tign}{D}\right)_{\text{相当}} = \frac{Cign}{p^n} \sum_{j=1}^N \left\{ (D_{min})^m + \left[\frac{(D_{max} - D_{min})}{N} + D_{min} \right]^m \right\}_j \text{sig}(j) \quad (9)$$

式中: Cign为氧化剂(过氯酸铵)点火延滞参量; m和n分别为氧化剂直径指数和氧化剂单元推进剂的压力指数。

2. 燃烧表面的能量平衡方程

推进剂由初温 T_0 升至燃面温度 T_s 所需的热量, 加上氧化剂、粘合剂的气化和铝粉熔化所需的热量应等于三个火焰传达到燃面的热量加氧化剂(过氯酸铵)凝相反应放出的热量。因此, 燃面能量平衡的数学表达式为

$$\begin{aligned} & \dot{m} c_p (T_s - T_0) + \alpha \dot{m} Q_{ox} + \varepsilon \dot{m} Q_{Al} + (1 - \alpha - \varepsilon) \dot{m} Q_f \\ & = \beta_F \dot{m} Q_{PF} e^{-\xi_{PF}} + (1 - \beta_F) \alpha \dot{m} [(1 - \eta) Q_{AP} e^{-\xi_{AP}} + Q_{FF} e^{-\xi_{FF}}] + \alpha \eta \dot{m} Q_{AP} \end{aligned} \quad (10)$$

从而求得

$$\begin{aligned} T_s = T_0 - \alpha Q_{ox} / C_p - \varepsilon Q_{Al} / C_p - (1 - \alpha - \varepsilon) Q_f / C_p + \\ + \frac{\beta_F Q_{PF} e^{-\xi_{PF}} + (1 - \beta_F) \frac{\alpha}{C_p} [(1 - \eta) Q_{AP} e^{-\xi_{AP}} + Q_{FF} e^{-\xi_{FF}}] + \alpha \eta Q_{AP} / C_p}{C_p} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: C_p 为平均比热; Q_{ox} 、 Q_f 、 Q_{Al} 分别表示氧化剂、粘合剂的气化热和铝粉的熔化热; η 是氧化剂凝相反应的程度($0 < \eta < 1$); β_F 是小于1大于零的参数; ξ_{PF} 、 ξ_{AP} 、 ξ_{FF} 分别表示初焰(PF焰)、过氯酸铵焰(AP焰)和终焰(FF焰)的无因次火焰高度。

无因次火焰高度按下式计算

$$\xi_{AP} = \frac{\dot{m}_{ox} C_p}{\lambda} \left(\frac{\dot{m}_{ox}}{K_{AP} P^{\delta_{AP}}} \right) = \frac{C_p \dot{m}_{ox}^2}{\lambda K_{AP} P^{\delta_{AP}}} \quad (12)$$

$$\xi_{PF} = \frac{\dot{m} C_p}{\lambda} \left(X_{PD} + \frac{\dot{m}}{K_{PF} P^{\delta_{PF}}} \right) \quad (13)$$

$$\xi_{FF} = \frac{\dot{m}_{ox} C_p}{\lambda} \left(\frac{\dot{m}_{ox}}{K_{AP} P^{\delta_{AP}}} + \bar{X}_D \right) \quad (14)$$

$$X_{PD} = X_D, \quad \bar{X}_D = A_{fh} X_D \quad (15)$$

$$\beta_F = \left(\frac{\dot{m}_{ox}}{K_{AP} P^{\delta_{AP}}} \right) / X_D - \left(\frac{\dot{m}}{K_{PF} P^{\delta_{PF}}} \right) / X_D \quad (16)$$

$$X_D = \frac{\dot{m} B^2}{D_a \rho_a} \left(\frac{T_0}{T_{av}} \right)^{0.75} \quad (17)$$

$$B = \frac{D(\text{相当})}{2} \left[\left(\frac{\pi}{6} \right) / \xi \right]^{1/3} \quad (18)$$

(12) 式—(18) 式中的各参数为: K_{AP} 、 K_{PF} 分别表示AP焰、PF焰的准反应速度常数;

δ_{AP} 、 δ_{PF} 分别为AP焰、PF焰的反应级数； λ 为气相导热系数； X_{PD} 、 X_D 为PF焰和FF焰的扩散混合距离； $\bar{X}_D$ 为FF焰有效热转移距离； A_{fh} 是平均火焰高度因子（ $0 < A_{fh} < 1$ ）； D_a 、 ρ_a 为1个大气压和初温下的燃气扩散系数和密度； T_{av} 为气相平均温度。

Q_{AP} 、 Q_{FF} 为AP焰、FF焰上单位氧化剂质量流释放的热量； Q_{PF} 为PF焰上单位推进剂质量流释放的热量。 Q_{AP} 、 Q_{FF} 、 Q_{PF} 按下式计算

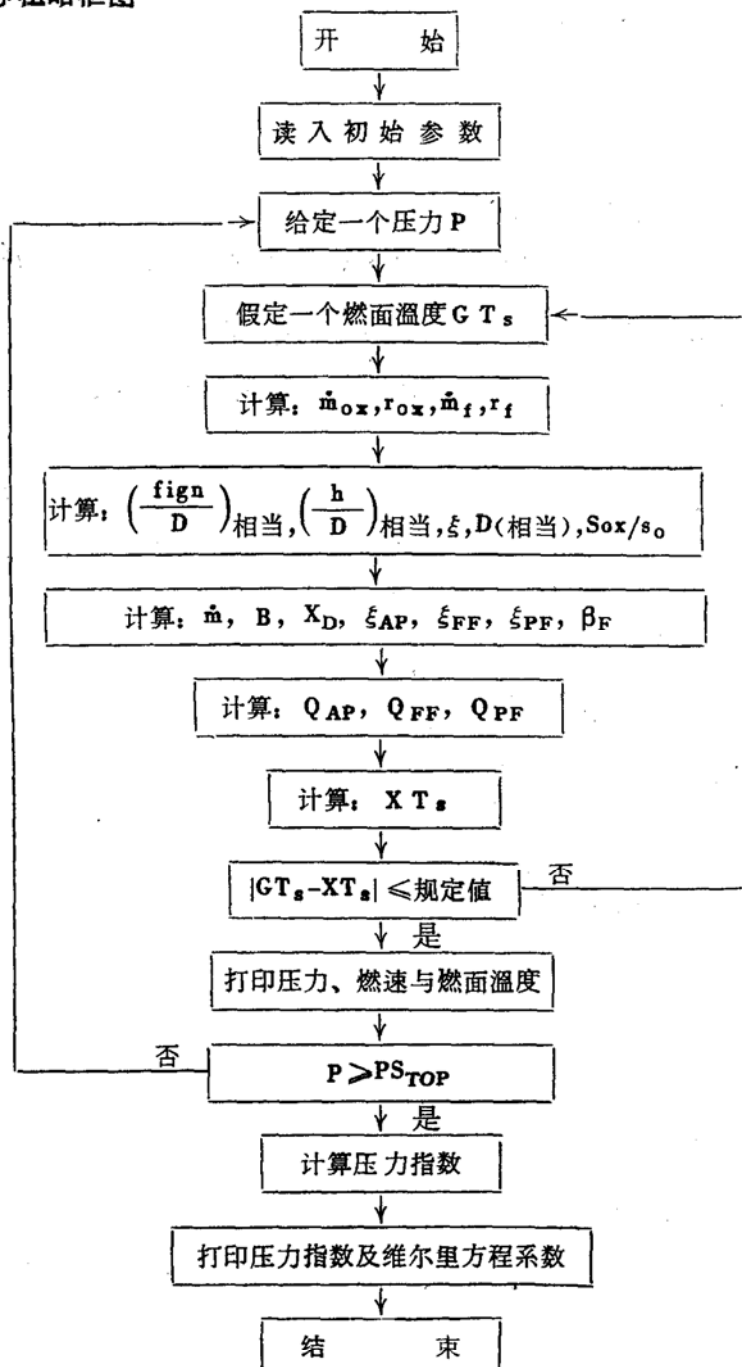
$$Q_{AP} = C_P(T_{AP} - T_0) + Q_{OX} \quad (19)$$

$$Q_{FF} = \frac{C_P}{\alpha}(T_f - T_0) - C_P(T_{AP} - T_0) + \frac{(1 - \alpha - \varepsilon)}{\alpha}Q_f \quad (20)$$

$$Q_{PF} = C_P(T_f - T_0) + \alpha Q_{OX} + (1 - \alpha - \xi)Q_f \quad (21)$$

(19) 式—(21) 式中， T_{AP} 、 T_f 分别为AP焰、FF焰与PF焰的绝热火焰温度。

3. 计算程序粗略框图



三、计 算 结 果

用FORTRAN语言编制了丁羟推进剂的燃速与压力指数的计算程序。语句只有110多条，一次计算出9个压力下的燃速和这个压力区间的压力指数，在DPS-6型计算机上只需4—5秒钟即可得到全部结果，在C-10个人计算机上（任何有FORTRAN语言的微型机均可）只需2—3分钟即可打印出全部计算结果。现将计算结果与实验测定数据对比如下。

1. 不含燃速催化剂的丁羟推进剂计算结果与实测数据的对比

推进剂配方为：

过氯酸铵——70%（粒度100-140目与60-80目各占50%）

铝 粉——15%（粒度为93微米） 丁羟胶加固化剂与增塑剂——15%

推进剂密度为1.70克/厘米³。

表 1 理论计算与实测结果

压 力 (公斤/厘米 ²)	燃 烧 速 度 (毫米/秒)		误 差 $\frac{ \Delta r }{r_{\text{测}}}$
	理 论 计 算	实 验 测 定 (药条式燃速仪)	
30	—	5.520	0.6%
50	6.730	6.770	
55	7.040	—	
60	7.306	7.204	0.9%
65	7.580	—	
70	7.864	8.070	2.6%
75	8.147	—	
80	8.428	8.720	3.3%
85	8.677	—	
90	8.965	—	
压力指数(n)	0.486	0.510	
维尔里方程	$r = 1.002P^{0.486}$	$r = 0.9205P^{0.510}$	

2. 含正辛基二茂铁的丁羟推进剂的燃速与压力指数计算与实测结果的对比

推进剂配方为：

过氯酸铵——40%（粒度60—80目），20%（粒度100-140目），10%（4—3）

铝粉——18%（粒度为9.3微米） 丁羟胶加固化剂——9%

增塑剂（癸二酸二辛酯）—3%。

表 2 理论计算与实测结果

压 力 (公斤/ 厘米 ²)	计算的燃速 (毫米/秒)				药条燃速仪测定的燃速 (毫米/秒)			
	催化剂加入量 (%)				催化剂加入量 (%)			
	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5
50	6.744	9.002	10.073	10.934	(30公斤/厘米 ²) 5.80±0.07	(30公斤/厘米 ²) 8.10±0.26	(30公斤/厘米 ²) 8.95±0.02	(30公斤/厘米 ²) 8.97±0.20
55	7.042	9.475	10.641	11.572	(45公斤/厘米 ²) 6.87±0.25	(45公斤/厘米 ²) 9.66±0.65	(45公斤/厘米 ²) 10.59±0.2	(45公斤/厘米 ²) 10.63±0.42
60	7.328	9.952	11.214	12.172	8.21±0.24	11.30±0.48	12.07±0.53	12.60±0.53
65	7.570	10.389	11.709	12.619	—	—	—	—
70	7.839	10.841	12.077	13.048	9.20±0.63	11.90±0.12	13.17±1.36	13.29±0.58
75	8.100	11.205	12.479	13.411	—	—	—	—
80	8.318	11.522	12.823	13.756	9.73±0.65	12.66±1.05	13.63±0.34	14.13±0.19
85	8.571	11.879	13.152	14.083	—	—	—	—
90	8.821	12.184	13.468	14.396	—	—	—	—
压力指数 (n)	0.453	0.518	0.490	0.459	0.54	0.46	0.46	0.47
维尔里方 程 系 数	1.145	1.194	1.500	1.184	0.890	1.17	1.84	1.79

3. 不含催化剂的单分散氧化剂的丁羟推进剂, 过氯酸铵粒径变化对燃速与压力指数的影响

表 3 燃速与压力指数随过氯酸铵粒径变化的计算结果

压 力 (公斤/ 厘米 ²)	燃 烧 速 度 (毫米/秒)									
	过 氯 酸 铵 粒 径 (微米)									
	30	50	80	100	120	150	200	250	300	400
50	12.541	10.605	8.478	7.358	6.555	5.768	5.187	5.114	5.145	5.290
55	13.323	11.132	8.830	7.651	6.836	6.043	5.532	5.467	5.490	5.610
60	14.058	11.571	9.080	7.954	7.109	6.319	5.894	5.821	5.832	5.925
65	14.714	11.997	9.352	8.306	7.376	6.630	6.239	6.203	6.172	6.236
70	15.384	12.362	9.568	8.476	7.604	6.918	6.619	6.555	6.510	6.545
75	16.008	12.693	9.808	8.682	7.863	7.212	6.971	6.904	6.845	6.851
80	16.541	12.993	9.999	8.872	8.121	7.547	7.322	7.249	7.177	7.156
85	17.051	13.324	10.214	9.064	8.378	7.855	7.668	7.555	7.505	7.424
90	17.603	13.590	10.453	9.254	8.632	8.167	8.010	7.890	7.795	7.724
压力指数 (n)	0.574	0.418	0.347	0.388	0.465	0.595	0.744	0.742	0.712	0.645
维尔里方 程系数	1.334	2.086	2.194	1.625	1.059	0.5567	0.2806	0.2796	0.3171	0.4233

四、分析与讨论

根据前述数学模型编出的燃速与压力指数计算程序, 计算结果与实测数据吻合较好, 并获得一些重要的启示。

燃速催化剂对参数影响较大的是: 过氯酸铵的分解活化能(E_{OX}); AP焰反应动力学参数 K_{AP} 和 δ_{AP} ; 过氯酸铵凝相反应的程度; 粘合剂分解速率和过氯酸铵颗粒粒径(D 相当)。

1. E_{OX} 下降, 则燃速增大, 同时压力指数也增加。例如, 在其他参数相同的情况下, 改变 E_{OX} 有如下计算结果 (表 4)

由表 4 可知, E_{OX} 降低6.5%, 则在50至90公斤/厘米²压力范围内, 燃速增加 20—31%, 压力指数增大34.7%。

表 4 E_{OX} 对燃速与压力指数的影响

压 力 (公斤/厘米 ²)	燃 烧 速 度 (毫米/秒)	
	$E_{OX} = 26000$ (卡/摩尔)	$E_{OX} = 27800$ (卡/摩尔)
50	8.105	6.745
55	8.519	7.044
60	8.935	7.330
65	9.375	7.572
70	9.788	7.842
75	10.228	8.103
80	10.677	8.321
85	11.133	8.574
90	11.593	8.825
压力指数 (n)	0.610	0.453
维尔里方程	$r = 0.7389P^{0.610}$	$r = 1.144P^{0.453}$

2. AP焰反应动力学参数 K_{AP} 对燃速的影响是显著的, 表 5 足以说明这点。

表 5 K_{AP} 对燃速与压力指数的影响

压力 (公斤/ 厘米 ²)	燃 速 (毫米/秒)							
	K_{AP}/K_{APO}^*							
	1.0	2.7	3.6	5.4	7.1	8.9	13.4	17.9
50	6.744	8.405	9.002	10.073	10.934	11.691	13.146	14.187
55	7.042	8.826	9.475	10.641	11.572	12.371	13.804	14.761
60	7.328	9.209	9.952	11.241	12.172	12.911	14.233	15.175
65	7.570	9.590	10.389	11.709	12.619	13.365	14.686	15.611
70	7.839	10.018	10.841	12.077	13.048	13.782	15.056	15.961
75	8.100	10.374	11.205	12.479	13.411	14.109	15.401	16.285
80	8.318	10.702	11.522	12.823	13.756	14.503	15.724	16.587
85	8.571	10.988	11.879	13.152	14.083	14.827	16.026	16.868
90	8.821	11.271	12.184	13.468	14.396	15.133	16.311	17.132

压力 (公斤/ 厘米 ²)	燃 速 (毫米/秒)							
	K_{AP}/K_{APO}^*							
	1.0	2.7	3.6	5.4	7.1	8.9	13.4	17.9
压力指数 (n)	0.453	0.506	0.518	0.490	0.459	0.428	0.358	0.316
维尔里方 程系数	1.145	1.163	1.194	1.500	1.184	2.219	3.276	4.155

*注: K_{APO} 表示未加催化剂者。

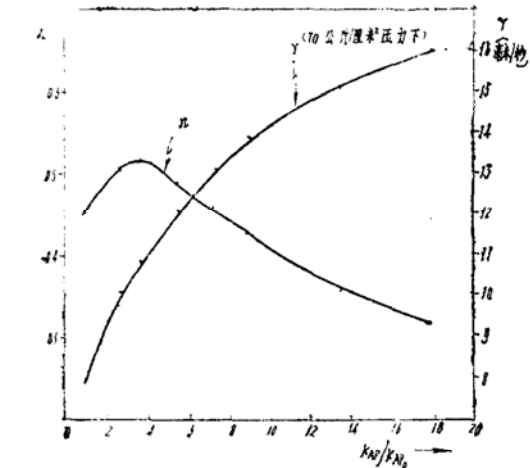


图2 计算的燃速与压力指数随 K_{AP} 的变化

从表5可以看出:随着 K_{AP} 的增大,燃烧速度大幅度提高,而压力指数开始略有增大,然后又随之下降,如图2所示。

显然,大幅度增大AP焰反应速度的催化剂是最理想的燃速催化剂,因为它能大幅度增加燃速且压力指数下降(至少保持不变)。二茂铁衍生物就是这样一种催化剂,实验证明:加入正辛基二茂铁或 γ -二茂铁丁酸丁酯的丁羟推进剂,能起到大幅度提高燃速和稍许降低压力指数的效果;燃烧火焰的单幅摄影照片也表明,二茂铁衍生物的加入降低了火焰高度,明显地显示气相反应速度的增大。二茂铁衍生物

与硫化铜或硫化镉组成的复合催化剂亦有同样的效果。

3. 过氯酸铵凝相反应程度增加,燃速增加,压力指数略有增大。表6说明了这一点。表中数据是以% Q_{AP} 作为过氯酸铵凝相反应程度。

表6 过氯酸铵凝相反应程度对燃速与压力指数的影响

压力(公斤/厘米 ²)	燃 速 (毫米/秒)				
	% Q_{AP}				
	30	50	60	70	80
50	6.276	6.744	7.109	7.572	8.417
55	6.594	7.042	7.394	7.915	8.815
60	6.787	7.328	7.699	8.248	9.207
65	7.032	7.570	7.994	8.574	9.637
70	7.275	7.839	8.282	8.895	10.027
75	7.509	8.100	8.526	9.213	10.383
80	7.707	8.318	8.806	9.530	10.710
85	7.932	8.571	9.082	9.809	10.994
90	8.116	8.821	9.357	10.087	11.274
压力指数 (n)	0.435	0.453	0.467	0.491	0.506
维尔里方程系数	1.448	1.145	1.137	1.104	1.164

4. 粘合剂分解速率起主导作用的是指前因子 A_f ，而分解活化能 E_f 影响较小。 A_f 值对燃速与压力指数的影响如表7所示。

表7 粘合剂分解速率对燃速与压力指数的影响

压力(公斤/厘米 ²)	燃 烧 速 度 (毫米/秒)				
	A_f				
	1000	2000	2990	3500	4000
50	7.622	7.166	6.744	6.464	6.447
55	7.869	7.434	7.042	6.686	6.630
60	8.134	7.691	7.328	6.928	6.835
65	8.385	7.903	7.570	7.130	7.030
70	8.627	8.138	7.839	7.359	7.193
75	8.829	8.365	8.100	7.582	7.380
80	9.060	8.553	8.318	7.768	7.533
85	9.286	8.771	8.571	7.985	7.716
90	9.509	8.986	8.821	8.163	7.863
压力指数 (n)	0.376	0.381	0.453	0.401	0.341
维尔里方程系数	1.745	1.612	1.145	1.344	1.697

由表7可知，指前因子 A_f 增大（亦即分解速率加快），燃烧速度降低，当分解速率较高时压力指数下降。这一点已由采用不同固化体系的丁羟推进剂的实验数据所证实^[6]。

表8 不同固化体系丁羟推进剂的实验燃速与压力指数

丁 羟 推 进 剂 的 固 化 体 系	燃烧速度 (毫米/秒)							维 尔 里 方 程
	压力 (公斤/厘米 ²)							
	30	40	50	60	70	80	90	$r = bP^n$
甲苯二异氰酸酯 加 己 三 醇	5.14	5.87	6.35	6.62	6.79	/	7.51	$r = 1.73P^{0.33}$ (对应 $A_f = 4000$ 的计算)
甲苯二异氰酸酯 加 氮 丙 啶	5.25	/	6.77	7.24	8.07	8.72	/	$r = 0.921P^{0.51}$ (对应 $A_f = 2990$ 的计算)

表8中以己三醇为交联剂者，固化胶片的差热分析表现出分解温度降低，这表明同一温度下，分解速度加快。这一现象还可以作如下定性解释：由于粘合剂热分解速率加快，对比之下有较多的粘合剂热解熔化液覆盖过氯酸铵晶体的表面，传入过氯酸铵晶体的热量减少，使过氯酸铵的分解速率降低，从而使推进剂燃速降低和压力指数下降。

5. 过氯酸铵颗粒尺寸 ($D_{相当}$) 对燃速与压力指数的影响

第三部分表 3 中的数据绘制 $n-D_{(相当)}$ 关系如图 3 所示

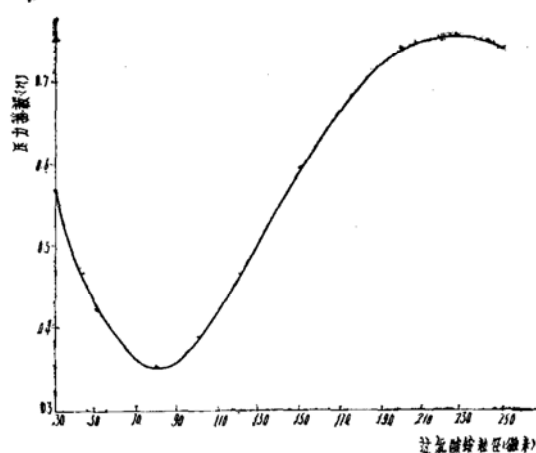


图 3 压力指数随过氯酸铵粒径的变化

从表 3 和图 3 看出, $D_{(相当)} = 80$ 微米时具有较高的燃速和较低的压力指数。因此, 在选择推进剂中氧化剂的级配时, 在满足其他性能的条件下, 要获得较高的燃速和较低的压力指数, 应尽量使 $D_{(相当)}$ 靠近 80 微米。

五、结 束 语

本文在原始 BDP 模型基础上, 修改、扩充和简化的数学模拟获得令人满意的结果。

1. 编制的程序较简短, 能在任何带 FORTRAN 语言的微型机上实现快速运算。
2. 能对各种级配的过氯酸铵、铝粉和贫氧橡胶粘合剂为组成 (包括燃速催化剂与工艺增塑剂) 的常用复合推进剂进行理论燃速与压力指数的快速预测, 预测与实测 (药条燃速仪) 结果对比, 其精度在 10% 以内。
3. 理论计算结果表明: 凡能增大 AP 火焰反应动力学参数 K_{AP} 的燃速催化剂具有明显增加燃速和降低压力指数的效果, 而 K_{PF} 的变化对燃速和压力指数没有多大影响。
4. 选择过氯酸铵粒度级配时, 计算的 $D_{(相当)}$ 在 80 微米左右具有较高的燃速和较低的压力指数。

参 考 文 献

- (1) Beckstead M. W., Derr R. L. and Price C. F., AIAA Journal, Vol. 8, No. 12, pp 2200—2207 (1970).
- (2) Chen N. S., Derr R. L. and Price C. F., CPIA Publication 231, Vol. II, PP. 25—42 (1972).
- (3) Sammons G. D., CPIA Pub. 243, Vol. I, PP. 149—156 (1973).
- (4) ADAO 19674.
- (5) ADAO 56892.
- (6) 张仁、胡景发等: 《降低 HTPB 复合固体推进剂燃速压力指数的实验研究》, 国防科技大学论文报告 (82—5028)。