

# 含铝硝酸推进剂燃速计算研究

刘德辉

(国防科学技术大学化学系,长沙 410073)

**摘要** 详细地描述了硝酸推进剂中铝粒子点火、燃烧及向燃面热反馈的数学处理方法,由此建立的燃烧模型可反映铝粒子含量、粒径及级配对推进剂燃烧性能的影响,可使模拟计算的精度大大提高。

**关键词** 硝酸推进剂 铝粉 燃烧模型

## 1 引言

在含铝固体推进剂燃烧模型中,对铝粒子燃烧的合理描述不仅有助于加深对其燃烧行为的理解,而且可使燃速计算的精度大大提高。但是迄今为止,对含铝硝酸推进剂的燃速计算还不够完善,其表现是对铝粒子的燃烧只进行了简单的处理,认为铝粒子的燃烧远离燃面,只考虑它的熔化吸热和吸热升温,而忽略它向燃面的热反馈<sup>[1]</sup>,事实上铝粒子在燃面附近就着火燃烧,并且向燃面反馈大量的燃烧热。因此,要完善含铝硝酸推进剂的燃烧理论,实现这类推进剂燃速的精确计算,就必须详细地考虑铝粒子的着火燃烧及其向燃面的热反馈。

## 2 计算

### 2.1 铝粒子的点火

铝粒子的点火温度为 932K,气化温度为 2723K。由于硝酸推进剂的燃面温度较低,一般为 700~900K,因此,可以认为燃面上的铝粒子既不会熔化更不会气化,也就是说,可以假定燃面上的铝粒子不会凝聚成块,仅仅以配方中的原始尺寸为开始条件。

由于推进剂中的铝粒子尺寸都较小,因此这些细金属粉末将被其它组分的热分解气体抛向燃面上方,并被灼热气流加热而升温,当达到一定的温度时铝粒子着火。铝粒子从离开燃面到被点燃这段时间称为点火延滞期,点火延滞期与脱离燃面时的铝粒子尺寸  $D_{AlO}$  和气流的速度  $T_g$  有关,可按(1)式计算<sup>[2]</sup>:

$$t_i = 10^{-6} D_{AlO}^2 \exp[32000/(RT_g)] \quad (1)$$

式中,  $t_i$  为点火延滞期,  $\mu s$ ;  $D_{AlO}$  为配方中的铝粒子尺寸,  $\mu m$ ;  $R$  为摩尔气体常数,  $J/(mol \cdot K)$ ;  $T_g$  为气流的速度,  $K$ 。

流动的气流中单个铝粒子的运动方程为<sup>[3]</sup>:

$$dv_p/dt = 3\rho_g C_D (v_g - v_p)^2 / (4\rho_{Al} D_{AlO}) - g \quad (2)$$

式中,  $v_g, v_p$  分别为气流速度和铝粒子的运动速度, m/s;  $\rho_g, \rho_{Al}$  分别为气流和铝粒子的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $C_D$  为牵引系数, 是雷诺数 ( $Re$ ) 的函数, 其关系为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} C_D &= 28(Re)^{-0.85} & Re < 10 \\ C_D &= 12.5(Re)^{-0.5} & 10 \leq Re \leq 1000 \\ C_D &= 0.4 & Re > 1000 \end{aligned} \quad (3)$$

根据已知参数, 运用数值积分法(如龙格-库塔法), 可由(2)式求得  $v_p$  与  $t$  的关系, 进而求得铝粒子加速度与时间及位移与时间的关系。因此, 在  $t_i$  已求出的条件下, 便可确定铝粒子点火时离开燃面的高度。

## 2.2 铝粒子的燃烧

铝粒子点燃后, 其粒径变化为<sup>[3]</sup>:

$$D_{Al}^\delta = D_{Al0}^\delta - \beta_c t \quad (4)$$

式中,  $D_{Al}$  是任意时刻  $t$  时燃烧着的铝粒子的直径, 指数  $\delta$  一般取为 1.5 或 2.0, 而  $\beta_c$  假定为常数, 其值一般为 0.002 ~ 0.004 cm<sup>2</sup>/s。由此可求得一个铝粒子完全燃烧所需的时间  $t_c$  为  $D_{Al0}^\delta / \beta_c$ 。

假设燃烧着的铝粒子的运动仍遵循公式(2)(将  $D_{Al0}$  换成  $D_{Al}$ ), 由于此时铝粒子直径在不断变化, 假定  $C_D$  值为同样雷诺数时未燃粒子的两倍或一倍半, 这样就可应用数值积分法求得燃烧着的铝粒子的速度对时间的关系。考虑铝粒子点火时离开燃面的距离, 进而可得到着火后的铝粒子的位移  $\xi$  与时间  $t$  的变化关系  $\xi(t)$ 。

铝粒子燃烧中释放的热量为时间的函数, 而反馈到燃面的热量与时间  $t$  和距离  $\xi$  有关, 单个铝粒子对燃面的反馈热为:

$$Q_{SAI} = \int_{t_i}^{t_i+t_c} (dQ_{SAI}/dt) \exp(-\xi(t)) dt \quad (5)$$

式中,  $dQ_{SAI}/dt = (dQ_{SAI}/dm) \cdot dm/dt$ ,  $dQ_{SAI}/dm$  是铝燃烧的热释放率(约为 31.5 kJ/g),  $dm/dt$  表示铝粒子质量随时间的变化关系, 可由公式(4)确定, 因此, 用方程(5)可得到单个铝粒子的反馈热  $Q_{SAI}$ 。

每克推进剂中铝粒子燃烧对燃面的反馈热  $Q_{SA}$  可由(6)式确定:

$$Q_{SA} = \sum_{i=1}^n n_{Al_i} Q_{SAI_i} \quad (6)$$

式中,  $n$  为推进剂中铝粒子的级配数,  $n_{Al_i}$  为每克推进剂中与粒径  $D_{Al0_i}$  相对应的铝粒子的数目, 而  $Q_{SAI_i}$  则表示粒径为  $D_{Al0_i}$  的单个铝粒子对燃面的反馈热。

## 2.3 推进剂燃面热平衡方程的补充

作者曾建立了一个 AP/RDX 推进剂的复合火焰燃烧模型<sup>[1]</sup>, 在该模型中 AP 和 RDX 分别与其相邻的推进剂其它组分组成燃烧单元, 即 AP 燃烧单元和 RDX 燃烧单元, 推进剂燃速看作是二个燃烧单元的质量燃速之和, 并建立了相应的燃面热平衡方程。但对铝粒子只进行了简单处理, 显然与实际有很大差别, 从实际情况出发就必须考虑铝粒子的热反馈, 即在文献[1]中的燃面热平衡方程式(4)的右边增加如下的一项:

$$\alpha_{Al} Q_S [\dot{m}_A / (1 - \alpha_{RDX}) + \dot{m}_R / (1 - \alpha_{AP})]$$

其中,  $Q_S = Q_{SAA} + Q_{SAR}$ ,  $Q_{SAA}$  和  $Q_{SAR}$  分别表示 AP 单元和 RDX 单元中铝粒子的燃烧反馈热, 它们可分别由(6)式确定, 而  $\alpha$  表示组分的质量百分含量,  $\alpha_{Al}$ 、 $\alpha_{AP}$ 、 $\alpha_{RDX}$ 、 $m_A$ 、 $m_R$  的意义见文献[1]。

### 3 计算结果和讨论

在考虑铝粒子燃烧反馈热的情况下, 计算了 AP/RDX/Al/HTPB 推进剂的燃速。计算中求反馈热的参数取之于文献[3], 而其余参数仍取文献[1]中的值。表 1 中列出了燃速和压强指数的计算结果, 其中计算值 1 和计算值 2 分别表示考虑和不考虑铝粒子燃烧反馈热的结果。表中推进剂的配方见文献[1], 其中 L 系列含铝粉 16%, 而 D 系列含铝粉 8%, 粘合剂系统均为 14%。

表 1 含铝硝胺推进剂燃速和压力指数计算值与实验值的比较

Table 1 Comparison of calculated burning rate and pressure index of aluminized nitramine propellant to the experimental results

配方	结果	不同压力/(MPa)下的燃速/(mm/s)						压力指数
		3.92	4.90	5.88	6.86	7.85	8.83	
L-1 (0% RDX)	实验值	6.26	6.83	7.37	8.00	9.02	9.51	0.5274
	计算值 1	6.22	6.80	7.41	8.04	8.71	9.40	0.5074
	误差 1	-0.64	-0.44	0.54	0.50	-3.44	-1.16	-3.79
	计算值 2	6.13	6.81	7.46	8.07	8.67	9.28	0.5101
	误差 2	-2.08	-0.29	1.22	0.88	-3.88	-2.42	-3.28
L-2 (10% RDX)	实验值	5.37	5.85	6.41	6.75	7.45	8.08	0.4944
	计算值 1	5.41	5.90	6.40	6.90	7.42	7.94	0.4713
	误差 1	0.74	0.85	-0.16	2.22	-0.40	-1.73	-4.67
	计算值 2	5.43	5.85	6.24	7.16	7.46	7.82	0.4754
	误差 2	1.12	0.00	-2.65	6.07	0.13	-3.22	-3.84
L-3 (20% RDX)	实验值	4.42	4.42	4.66	4.93	5.11	5.50	0.3559
	计算值 1	4.10	4.40	4.69	4.97	5.25	5.53	0.3679
	误差 1		-0.45	0.64	0.81	2.74	0.55	3.37
	计算值 2	4.16	4.43	4.68	5.03	5.20	5.34	0.3205
	误差 2		0.23	0.43	2.03	1.76	-2.91	-9.95
D-1 (30% RDX)	实验值	4.96	5.29	5.57	6.01	6.47	6.84	0.3996
	计算值 1	4.91	5.34	5.72	6.08	6.42	6.77	0.3919
	误差 1	-1.01	0.95	2.69	1.16	-0.77	-1.02	-1.93
	计算值 2	5.02	5.32	5.63	5.92	6.21	6.86	0.3619
	误差 2	1.21	0.57	1.08	-1.50	-4.02	0.29	-9.43
D-2 (40% RDX)	实验值	4.19	4.62	4.83	5.09	5.41	5.65	0.3595
	计算值 1	4.11	4.48	4.80	5.08	5.35	5.60	0.3785
	误差 1	-1.91	-3.03	-0.62	-0.20	-1.11	-0.88	5.29
	计算值 2	4.22	4.61	5.15	5.37	5.55	5.72	0.3828
	误差 2	0.72	-0.22	6.63	5.50	2.59	1.24	6.48

注: 1) 计算值 1——考虑铝粒子燃烧反馈热; 计算值 2——未考虑铝粒子燃烧反馈热。

2) 误差 1 和误差 2 分别为计算值 1 和计算值 2 与实验值的相对误差(%)。

由表 1 可以看出,当考虑铝粒子燃烧反馈热时,燃速的计算误差均在  $\pm 4\%$  以内,而压力指数的计算误差均在  $\pm 6\%$  以内,而不考虑反馈热时,燃速和压力指数的计算误差分别在  $\pm 7\%$  和  $\pm 10\%$  以内。由此可见,当考虑铝粒子燃烧反馈热时计算精度将大大提高。事实上,表 2 可更明显地说明这种情况。

表 2 考虑与不考虑铝粒子燃烧反馈热时的计算误差的比较  
Table 2 Comparison of calculated results considering and unconsidering  
the heat feedback of Al-powder combustion (%)

比 较 项 目	考虑反馈热	不考虑反馈热
燃速的最大计算误差	-3.44	6.63
压力指数的最大计算误差	5.29	-9.95
燃速计算误差小于 2% 的数据所占百分比	83	59

利用表 1 中的计算结果可以作出推进剂燃速-压力曲线,发现曲线上存在拐点,这是硝酸推进剂的特点;由表 1 还可明显地看出,燃速随 RDX 含量的增加而降低,这些都说明计算结果与实际情况相符。

## 4 结 论

4.1 考虑铝粒子燃烧热可使计算结果和实验值更相近,燃速和压力指数的计算误差分别在  $\pm 4\%$  和  $\pm 6\%$  以内,相对于不考虑反馈热时,模拟计算的精度更加提高。

4.2 建立的含铝硝酸推进剂燃烧模型可反映铝粒子的含量、粒径及其粒径级配对推进剂燃速的影响,在研究多种因素对推进剂燃烧性能的影响规律时可作参考。

## 参 考 文 献

- 1 彭培根,刘德辉. 高氯酸铵/硝酸推进剂燃烧模拟. 推进技术,1990(4)
- 2 Cohen N S and Strans L D. Analytical Model of the Combustion Multicomponent Solid Propellants. AIAA/SAE 13th Propulsion Conference, 1977.
- 3 Renie J P and Osborn J R. Combustion Modeling of Aluminized Propellants. AIAA/SAE/ASME 15th Joint Propulsion Conference, 1979.

## A CALCULATION RESEARCH ON BURNING RATE OF ALUMINIZED NITRAMINE PROPELLANT

Liu Dehui

(*National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

**ABSTRACT** The mathematical treatments of ignition and combustion of aluminium powder and the heat feedback to the burning surface of nitramine propellant are described. The combustion model established thereof can explain the effects of content, particle size and granular distribution of aluminium powder on the combustion behavior of the propellant, and the precision of modeling calculation is increased as well.

**KEYWORDS** aluminium powder, combustion model, nitramine propellant.

www.energetic-materials.org.cn  
含能材料