

双级配的氧化剂粒度对推进剂中 铝燃烧的影响

中国科技大学 李疏芬 红星化工厂 金乐骥

摘 要

本文通过实验研究,从凝聚程度的大小和燃烧完全性两方面,证实了氧化剂AP粒度是影响推进剂中铝燃烧的重要因素,实验结果支持了Cohen, N.S.提出的“口袋模型”。本文对双级配的AP粒度的影响进行了较为详细的讨论,提出在实际配方中较为合适的氧化剂级配比例范围。

在复合固体推进剂中,为了提高能量和抑制某些频率的震荡燃烧,通常加入一定量的铝粉。但是,由于铝粉在推进剂燃烧过程中存在着凝聚现象^[1~4],使得推进剂燃烧所产生的高温燃气与凝聚铝滴或固相产物之间存在着两相流能量损失,同时,较大的铝凝团容易燃烧不完全,降低比冲效率,George, D.曾指出,凝滴大小直接影响比冲效率,并给出凝滴大小与未燃烧铝粉百分数和比冲效率的关系^[5],因此,研究铝粉在推进剂中的燃烧行为及其影响因素已成为含铝推进剂性能研究的重要内容。

影响铝粉凝聚与燃烧的因素是很复杂的,要找出主要因素,必须系统地对各变量进行实验及理论上的探讨。Cohen, N.S.曾提出“口袋模型”^[6]通过Ap粒度与铝粉粒度的几何尺寸关系,从理论上阐明了两者对铝凝聚的影响。本文拟从凝聚与燃烧完全性两个方面探讨配方中选用单一的粗Ap,中等粒度的Ap以及级配的Ap对铝的凝聚与燃烧过程的影响。

一、实 验

1. 实验样品 按不同的目的,将试样分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ(双配)三大类,共十组样品,考察不同粗细Ap对铝的凝聚与燃烧的影响。配方中全部使用 $5\mu\text{m}$ 左右的细铝粉(Ⅰ、Ⅲ类用 $5.5\mu\text{m}$,Ⅱ类用 $5.7\mu\text{m}$),试样组成如表1。

表1 试样组成(粘结剂HTPB+固化剂占14%,氧化剂占69%,铝粉占14%增塑剂占3%)

样 品 编 号		Ⅰ—A	Ⅰ—B	Ⅱ—A*	Ⅱ—B	Ⅲ—A	Ⅲ—B	Ⅲ—C	Ⅲ—D	Ⅲ—E	Ⅲ—F
氧化剂 Ap	粒度(目)	40~60	<180	40~60	100~140	40~60:<180					
	双 配 比					95:5	90:10	80:20	60:40	40:60	20:80
	平均粒径 $d_{45}(\mu\text{m})$	246.1	10.0	346.1	133.0	343.0	330.4	304.8	353.6	202.4	151.2
燃速 $v_{70}(\text{mm/s})$		7.5	17.5	9	8.8	6.1	6.2	6.6	6.4	8.7	15.4

* 含催化剂1.5%。

2. 试验设备与方法

(1) 实验在充氮加压的有两个透明视窗的燃烧室里进行, 用KD-4203型近距摄影装置拍摄燃烧火焰得到燃烧过程中气相区凝聚铝滴的有关参数。

(2) 对负片上的铝滴运动轨迹, 用光谱投影仪测量其核心宽度, 并以此作为燃烧铝滴的直径, (该测量方法是基于对运动发光体的模拟实验^[7]), 同时, 应用ZeissMD-100型显微密度计分析负片上铝滴运动轨迹的光密度分布, 判别铝凝滴的聚集状态。

(3) 收集燃烧后的残渣^[7], 并用日立X650型扫描电镜进行残渣的形貌观测及粒度分析。

(4) 用D/max r_A型转靶x射线衍射仪对残渣进行晶化后的铝与三氧化二铝的相对含量的测定, 并用化学方法检测残渣中活性铝的含量。

(5) 用量热计测定推进剂的定容爆热。用CMT型透射密度计测定底片上火焰的光密度, 在严格统一曝光参数和冲洗条件的前提下, 它可反映火焰的亮度。

(6) $\phi 65$ 发动机试验。

二、实验结果

为排除样品不均匀性及摄影记录某一瞬间的偶然性, 一般选取约15张底片进行测量统计。实验是在不同阶段进行的, 每一类的测试条件完全相同, 但各类间的个别测试条件略有

表 2 第I类和第II类实验结果

样 品		I-A*			I-B**			II-A			II-B		
压力 (Mpa)		1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
铝滴直径 $<100\mu\text{m}$ (%)		26	6	12	~100	~100	100	4.3	5.3	9.2	83	66	68
铝滴直径 $>500\mu\text{m}$ (%)		~20	~35	~20	0	0	0	18.8	15.6	9.2	0.2	0.2	0.2
总数50%的直径 (μm)		200	400	270	未 验 出			300	290	230	50	95	80
火焰平均高度 (mm)		9.6	7.5	5.8	20	15	10	12.1	11	12	13	12	12.4
最高粒子离燃面平均距离(mm)		19.1	17.5	21.3	—	—	—	24	21	20	23.4	23	23
铝滴平均值		—	—	—	—	—	—	380	380	320	96	130	130
显 微 密 度	液滴型	89%			(无铝条)			40	30	25	0	0	0
	微滴型	11%			(无铝条)			55	68	73	83	75	66
	过渡型	0			(无铝条)			5	2	2	17	25	34
残渣成分分析	Al/Al ₂ O ₃	—			—			0.19	0.57	0.23	0.04	0.02	0.05
	活性铝 (%)	—			—			未测出	未测出	4.36	0.72	1.19	1.09
残渣粒度分布(%重量)	$>4\mu$	—			—			86.73			24.32		
	$2\mu-4\mu$	—			—			7.53			5.01		
	$<2\mu$	—			—			5.74			70.67		
爆 热 (Cal/g)		—			—			1301.0			1375.6		

* 样品托架上灰色粒状粗, 残渣甚多, 点火丝上白雾状物质极少。

** 样品托架上有很细的灰色残渣, 点火丝上布满白雾状物质。

差异, 因此, 测试结果的绝对数值适宜于同类之间进行比较。

1. 粗Ap (40~60目) 与细Ap (<180目) 对铝燃烧的影响, 实验结果如表 2 所示。

从燃烧的情况来看, 由细Ap与细铝组成的样品 I - B 燃烧时呈现均匀明亮的火焰, 基

表 3 第Ⅲ类样品实验结果: (燃烧室压力3MPa)

样 品		Ⅲ-A	Ⅲ-B	Ⅲ-C	Ⅲ-D	Ⅲ-E	Ⅲ-F
铝滴直径 $\leq 100\mu$ (%)		25.5	34.3	35	88.6	—	—
铝滴直径 $\geq 500\mu$ (%)		12	5	1	0	—	—
总数50%的铝滴直径 (mm)		220	150	150	56	—	—
铝滴平均直径 (mm)		293	239	235	98	64*	—
火焰平均高度 (mm)		10.3	11.5	12	12.8	16.4	18.2
最高粒子离燃面距离 (mm)		18	19.2	20.5	12.5	—	—
显 微 密 度 曲 线 类 型	液滴型	66.5	41	33	全部为典 型的微滴 型	—	—
	微滴型	33.5	44	43.5			
	过渡型	0	15	23.5			
残渣成分分析	Al/Al ₂ O ₃	0.442	0.342	0.270	0.010	0	0.016
	活性铝 (%)	3.50	3.33	1.60	0.08	0.07	0.03
残渣粒度分析	$>4\mu$ (%)	57.14	46.19	30.87	29.65	27.04	26.11
爆热 (Cal/g)		1284.2	1342.7	1342.4	1379.7	1382.9	1375.0

* 仅有很少照片有可见的细铝滴

上看不见凝聚的铝滴, 燃烧得比较充分; 由粗Ap与细铝组成的样品 I - A, 在火焰中可见明显的凝聚铝滴, 残渣多而且粒径大。由于两种样品Ap粒度相差悬殊, 因此, 造成燃速差异也较大, 仅从上述结果, 还很难肯定究竟是Ap粒度的影响还是燃速的影响。

2. 将样品 I - A 的燃速予以调正, 使其与中等粒度Ap组成的样品燃速相近, (即第Ⅱ类样品), 其实验结果如表 2 所示。从表 2 中可看出两种样品仅由于Ap粒度不同, 使得各项结果有很大的差别, 这说明 I - B 的燃烧完全性优于 I - A。

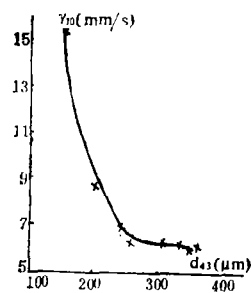


图 1 Ap平均粒径与静态燃速

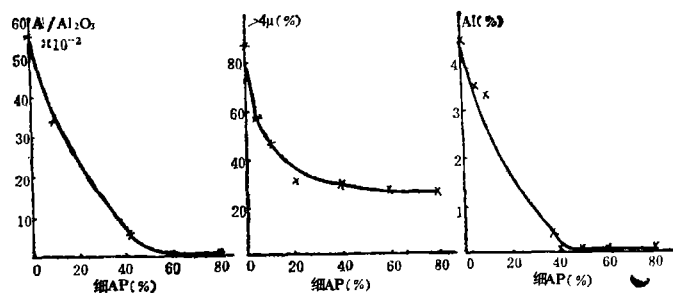


图 2 (a)、(b)、(c)

3. 在真实推进剂中一般不使用单一粒度的Ap, 因此, 必须选取不同级配的Ap (或以

不同量的细Ap取代粗Ap)进行研究,即第Ⅲ类样品,其实验结果如表3所示。

在推进剂中加入细Ap将会导致燃速增加,但细Ap取代量小于40%时(即样品Ⅲ-D以前),燃速无明显变化,因氧化剂平均粒径小于 $200\mu\text{m}$ 时对燃速才有明显的影响^[8]。燃速测试结果如图1所示。在样品Ⅲ-F中Ap的平均粒度虽然与Ⅲ-B相近,但前者的燃速却几乎比后者高一倍,这是由于Ⅲ-F中加入了细Ap所致。随着细Ap加入量的增加,铝粉在表面集聚减少,凝滴变小,有助于铝粒点火,使火焰更为明亮,底片上火焰的光密度(黑度)值也随之增高。

细Ap含量与残渣的粒度及成份关系,如图2(a)、(b)、(c)所示。

三、分析与讨论

1. 气相中凝聚铝滴大小的变化规律:

从以上结果可以看出,样品中仅仅Ap粒度不同,对气相中凝聚铝滴大小却有很大影响。为了分析其原因,首先必须了解铝在推进剂中的燃烧历程。

配方中的铝粉嵌入于粘结剂与氧化剂颗粒的混合物之中,当推进剂燃烧时,这些铝颗粒从推进剂的初始温度被加热并发生膨胀,随着燃面的后退,这些铝颗粒逐渐暴露出固相燃面,而处于燃面上的液相薄层中(该液相由中间分解物和熔融状的燃烧产物所组成)。当这时的温度达到铝的熔化温度时(933 K),铝开始发生相变,从固相变为液相,表面张力使得铝颗粒呈球状,它们受到横向气流力的作用,在燃面上滚动,增加了彼此间碰撞机会,由于铝颗粒外表面有一层约 $0.05\mu\text{m}$ 厚的氧化膜^[9],其热膨胀系数比铝小,在膨胀应力下,膜发生破裂,铝液从裂缝中溢出,使得相邻铝颗粒粘附在一起,形成了比原来铝粒大得多的凝聚铝粒。通常,它们在燃面停留的时间越长,凝聚的趋势就越严重。由于局部氧化剂与粘结剂的予混焰的影响,个别铝粒或凝聚铝粒可先点燃,但大部分凝聚铝粒要在显露于火焰区以后才开始点燃,并进入气相区。

从表2和表3中可看出样品中凝聚铝滴的变化规律。Ⅱ-A凝聚铝滴较大,而Ⅱ-B基本上无凝聚,只在 0.5MPa 压力以下才出现凝聚;Ⅲ-A的凝聚铝滴明显大于Ⅲ-B,这样就排除了第Ⅱ类样品由于燃速差异较大而造成的影响。第Ⅲ类样品随着配方中细Ap比例的增高,铝凝滴的直径逐渐变小,燃面从坑凹不平逐渐变得平整,铝的燃烧状况逐步改善。

从大量燃烧照片看出,第Ⅲ类样品在 3MPa 压力下,Ⅲ-A、Ⅲ-B、Ⅲ-C有明显的铝凝滴飞行轨迹,而样品Ⅲ-D只有一部分出现铝凝滴,在 2MPa 压力以下才全部有细小的铝凝滴出现;样品Ⅲ-E出现铝凝滴的几率更小,在 1.5MPa 压力下,约有50%的几率出现;在 1MPa 压力以下,才全部有铝凝滴出现;样品Ⅲ-F基本上无铝凝滴,呈现一片均匀明亮的火焰,在 1MPa 压力以下,开始隐隐约有铝凝滴出现,在 0.7MPa 压力下,才全部有铝凝滴出现。综上所述,细Ap含量越高,出现凝聚的临界压力范围也就越低,越不易发生凝聚。

2. 铝凝滴的显微密度分布曲线的区别:

在底片上,宏观看起来是一条条外观相似的铝凝滴飞机轨迹,但在显微光学密度分布曲线上却表现出有很大的区别,它反映了铝点火时的聚集状态不同。

对有明显液滴“核心”的铝亮带,其光密度扫描曲线是比较规则的,并有一反映液滴大小的“平台”存在,为了便于叙述,姑且称之为“液滴型”;有的铝亮带的光密度曲线肩部极为狭窄,已无明显的“平台”存在,暂称之为“微滴型”;还有一种光密度分布曲线极不规

则, 整条分布曲线由若干“小峰”围成, 暂称之为“液—汽过渡型”; 对于没有铝亮带出现的, 则称之为“汽相型”。典型的光密度分布曲线如图3(a)、(b)、(c)所示^[7]。它们燃烧的完全程度是依次提高的。

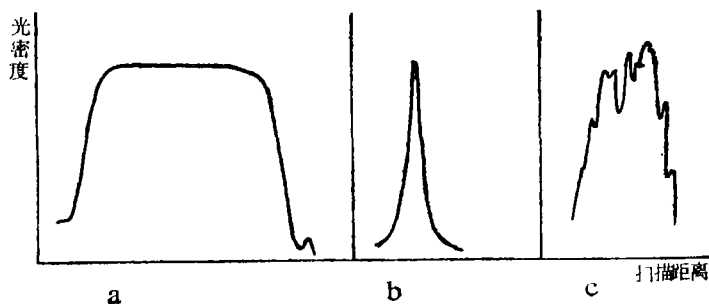


图3 (a)液滴型 (b)微滴型 (c)过渡型典型的光密度曲线

从实验结果可看出, 随着 A_p 粒度变细, “液滴型”的显微密度分布曲线逐渐变少, 而“过渡型”显微密度分布曲线逐渐增多, 也就是说, 铝的燃烧性能是逐渐改善的。

3. 定容爆热的测定:

不含铝的固体推进剂可用量热的方法精确地测出爆热, 而含铝推进剂由于燃烧不完全使得测试结果与计算值偏差较大, 但也可反映一定的规律性。

4. 残渣粒度分析与剩余铝的检测:

燃烧后的残渣粒度分布可以很好地反映铝在推进剂中的燃烧历程, 实验研究认为^[10]: 气相燃烧产生细的三氧化二铝微粒, 而凝聚相燃烧产生粗的残渣, 它主要由铝的表面反应所形成。增加气相反应减少表面燃烧反应有利于铝粉燃烧效率的提高, 残渣中细粒子比例增高, 残渣颜色偏白; 而铝粉以表面燃烧为主的推进剂, 其残渣中大粒子比例较高, 残渣偏深灰色, 燃烧效率也较低。

推进剂燃烧后的残渣粒度分布范围是很宽的, 它给粒度观测与分析带来了很大困难, 必须事先对被观测的样品进行预分级。残渣经过一系列处理之后, 用沉降法进行粒度预分级, 该原理是基于Stokes, S.G.定律。当沉降高度为已知时, 从中可得到沉降时间与颗粒大小的对应关系^[11]。从实验结果可知, 凡是残渣中大粒度比例高者, 其铝与三氧化二铝的相对比值及活性铝含量就较高, 铝的燃烧也就不够完全。

表4 $\phi 65$ 发动机试验 (工作压力为6.86MPa)

样 品	比 冲						燃 速					
	Isp ¹⁶ (S)				均值	S	r (mm/s)				均值	S
Ⅱ—A'	228.2	227.6	230.9	237.6*	228.6	1.43	10.10	10.11	10.66	10.08	9.92	0.375
	227.3		228.9				9.72	9.46	9.44	9.89		
Ⅱ—B	234.6	235.7	235.6	235.9	235.5	0.58	9.23	8.76	8.77	8.69	8.85	0.245
							8.88	8.77	9.24	8.82		
Ⅱ—A''	231.1	231.5	233.4		230.5	2.02					8.42**	
	230.6	227.6	228.7									
Ⅲ—D	229.4	233.2	233.3		232.8	2.29					6.42**	
	232.2	235.8										

*: 按格拉布斯准则该数值舍去

** : 静态燃速数据

5. $\phi 65$ 发动机试验:

$\phi 65$ 发动机测试比冲的精度一般认为是较低的,但若同时进行同台测试,其随机误差不是很大,在进行配方性能比较时尚可使用。为了消除由于燃速的差别所造成的影响,在配方 I-A 中分别加入 1% 与 0.2% 的燃速催化剂,组成样品 I-A' 与 I-A'', 并分别与 I-B 和 I-D 进行比较。测试结果如表 4 所示。(由于是两次试验的结果,故只适宜于两两比较)。

试验结果表明,样品 I-A' 燃速虽然比 I-B 高 1.1mm/s , 但比冲却低 7 秒左右, (即 $68.6\text{N}\cdot\text{S/kg}$), 考虑燃速修正, 实际比冲 I-A 比 I-B 要低 8 秒多, (即 $78.5\text{N}\cdot\text{S/kg}$); 样品 I-D 比冲比 I-A'' 高 2.3 秒, (即 $22.6\text{N}\cdot\text{S/kg}$), 考虑燃速修正之后, I-D 实际比冲比 I-A 高约 4.5 秒 (即 $44.1\text{N}\cdot\text{S/kg}$)。由此可见, 在单级配推进剂中, 氧化剂 Ap 粒径 (d_{43}) 若选用 $133\mu\text{m}$ 与 $346\mu\text{m}$, 前者发动机比冲比后者高; 在双级配推进剂中, 用细 Ap 取代粗 Ap, 其比冲也得到提高。

四、结 论

通过上述实验研究可以看出, 氧化剂粒度越粗, 铝凝聚就越明显, 这与“口袋模型”相符。按 King, M.K. 提供的 Beckstead, M.W. 经验公式^[12]计算配方 I-A 中铝的凝聚分数 $F_{Ag} = 0.308$, 铝凝滴直径为 $D_{Ag} = 123.4\mu\text{m}$; 而配方 I-B 的 $F_{Ag} = 0.118$, $D_{Ag} = 34.4\mu\text{m}$ 。这与本实验的结果是一致的。

在固体推进剂中, 尽管所用铝粉的规格相同, 若 Ap 粒度不同, 则会造成铝的凝聚程度和燃烧完全性方面有很大差异, 也就直接影响到推进剂的比冲效率, 因此, 在进行配方设计时, 应优先考虑 Ap 粒度, 必须选择合适的氧化剂粒度级配和最佳的铝粉粒度配比。从本实验结果来看, 细 Ap 的含量为 40% 左右较为适宜, 至于在实际应用中, 以哪种粒度级配为最佳, 还应结合发动机试验和制药工艺综合进行考虑。

参 考 文 献

- [1] Price, E.W., et al., "Aluminum Agglomeration and Ignition in Propellants With Bimodal Ap Size Distribution", AD A126986 1982.
- [2] Price, E.W., "Combustion of Aluminum in Solid Propellant Flames", AGARD-CP-259, P14.
- [3] Beckstead, M. W., et al, "Distributed Combustion Effects on Particle Damping", AIAA 82-0357, 1982.
- [4] Renie, J.P. and Osborn, J.R., et al, "Aluminum Particle Combustion in Composite Solid Propellants", AIAA 82-1110, 1982.
- [5] George, D., "Recent Advances in Solid Rocket Motor Performance Prediction Capacity", AIAA 81-0033, 1981.
- [6] Cohen, N.S., "A Pocket model for Aluminum Agglomeration in Composite Propellants", AIAA 81-1585, 1981.
- [7] 中国科技大学近代化学系科研报告 KD4203-821, 832, 841, 851.
- [8] Renie, J.P., Condon, J.A. and Osborn, J.R., "Oxidizer Size Distribution Effects on Propellant Combustion", AIAA J. Vol. 17, P. 877, 1979.
- [9] Price, E.W. et al, "Behavior of Aluminum in Solid Propellant Combustion", AD AO52492, 1978.
- [10] Kraeutle, K.J. et al., "The Role of Particulate Damping in The Control of Combustion Instability by Aluminum Combustion", AGARD-CP-259, P15.
- [11] Diloreto, V.D., "An Experimental Study of Solid Propellant Deflagration Using High Speed Motion Pictures and Postfire Residue Analysis", AD-A092423, 1980
- [12] King, M.K., "Predicted and Measured Effects of Pressure and Crossflow Velocity on Composite Propellant Burning Rate", AD-A098090.

(责任编辑 王慧玉)

A UNITED OPTIMUM METHOD FOR AN AXIAL TURBINE STAGE

Zou Zixiang, Yuan Ding, Li Xiaoling

(Institute of Engineering Thermophysics)

Abstract

A united optimum method for designing an axial turbine stage is provided which combines the blade geometry optimization with the optimization of meridian passage according to the blade twist. The physical models, mathematical expressions and procedures for optimum selection of the blade geometry, meridian passage and its twist are described respectively, and then a united procedure is proposed. A numerical example has been calculated with this procedure. In the result, this method is proven of both theoretical and practical values and may furnish the basis for CAD of a turbine stage.

EFFECT OF BIMODAL AP PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON ALUMINUM COMBUSTION IN PROPELLANTS

Li Shufen

(University of Science and Technology of China)

Jin Leji

(Red Star Chemical Plant)

Abstract

A Series of researches on degree of aluminum agglomeration and combustion in propellants have been completed experimentally. The results show that AP particle size distribution is an important factor effective on aluminum combustion in propellants. It is found that the smaller AP particles are, the less the possibility of aluminum agglomeration is. This conclusion supports the "Pocket Model", submitted by N. S. Cohen and is consistent with the results calculated with empirical formulas. The effect of bimodal AP particle size distribution is elaborated in this paper. It is suggested that the most suitable content of fine AP particle in the composition of propellants be about 40%. The result is helpful to the composition design of new propellants.

TECHNICAL NOTES

PREDICTION OF THE FLAME FRONT IN AN AUGMENTOR WITH SWIRLING FLOW

Tan Haoyuan and Guo Ningqun

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

A computing program has been worked out for prediction of the flame front in a swirl augmentor. The positions of flame front and the coefficients of pressure loss have been calculated for a variety of swirl angles. The results of the analysis indicate that the ratio of