

低燃速 HTPB 推进剂燃速控制研究^{*}

崔瑞禧

(江河化工厂, 远安, 444200)

摘 要: 研究了低燃速 HTPB 推进剂药柱燃速的控制规律, 结果表明: 球形高氯酸铵的粒度是决定燃速的主要因素; 在粒度相同的情况下, 原材料换批等其它工艺因素的差异导致的燃速变化值小于设计公差; 经粉碎处理的细粒使高氯酸铵在存放期结块导致燃速缓慢的下降; 10 L 预示燃速略高于 500 L 随机燃速。

主题词: 端羟基聚丁二烯推进剂, 燃速测试, 控制

分类号: V512.3

STUDY ON BURNING-RATE CONTROL OF LOW BURNING-RATE HTPB PROPELLANT

Cui Ruixi

(Jianghe Chemical Factory, Yuanan, 444200)

Abstract: The methodology to control the burning rate of Low burning-rate HTPB propellant is studied. The results showed that the burning rate of the propellant is mainly dependent on the particle size of spherical ammonium perchlorate (AP). The variations in burning rate caused by different batches of the raw materials are lower than the design tolerance. The blocking of non-spherical AP particles in storage decrease the burning rate. The burning rate of the propellant manufactured in 10 L mixer is little higher than that in 500 L mixer.

Subject terms: Hydroxy terminated polybutadiene propellant, Burning rate test, Control

1 引 言

某固体火箭发动机装药采用低燃速 HTPB 推进剂配方。在某一阶段, 共分 7 个批次装药 82 台。本文对这 82 台发动机的预示燃速及随机燃速进行了研究, 得到了低燃速 HTPB 推进剂燃速控制的一些规律。研究中按规定根据全尺寸发动机燃速控制的要求, 确定随机 (500 L 装药) $\phi 112$ 发动机的标准有效 (30°C , 6.18 MPa) 燃速控制范围, 用高氯酸铵 (AP) 级配 (JP) 变化调节推进剂燃速, 级配值由原材料组批后的 10 L 预示和首台随机性能决定, 燃速数据用数理统计方法进行处理分析^[1~3]。

2 实验结果及讨论

2.1 7 批燃速控制水平的比较

燃速控制水平可用两个参数来表征: 同批装药燃速的离散程度 (以 $s/x\%$ 来表示) 和该批装药燃速的平均值与控制中值的偏差。7 个批次共 82 台装药燃速平均值及偏差见表 1。

* 收稿日期: 1998-08-06, 修回日期: 1998-10-05

Table 1 Average burning rate and deviantion of 82 rocket motors (7 batches)

Group	01	02	03	04	05	06	07
$r/(\text{mm/s})$	4.489	4.490	4.551	4.532	4.546	4.527	4.457
$s/(\text{mm/s})$	0.06701	0.04953	0.04008	0.04031	0.03566	0.03473	0.04011
$(s/x)/\%$	1.5	1.1	0.81	0.89	0.78	0.77	0.88
n	14	11	12	6	13	15	11

由表 1 可看出,从 03 批以后,燃速控制水平趋于稳定,燃速控制比中值偏上,变异系数约为 0.8%。

2.2 燃速与粒度、级配的关系

按最小二乘法原理,将燃速与粒度及级配进行一元线性回归得:

$$r's = a_1 + b_1JP \quad r's = a_2 + b_2d_{4,3}$$

燃速与粒度、级配的对应值可以从 10 L 预示性能中得到。 JP 为 40 目~60 目 AP 的百分数, $d_{4,3}$ 为 40 目~60 目 AP (d_1) 及 100 目~140 目 AP (d_2) 的质量加权平均粒度。各批所用氧化剂的批号及粒度见表 2。各批 10 l 所用的级配及燃速、平均粒度见表 3。

Table 2 Average Particle size of AP

Group	02	02'	03	04	05	06	07
$d_1/\mu\text{m}$	338	338	344	340	347	343	346
$d_2/\mu\text{m}$	128	129	129	128	127	131	126

Table 3 Particle size combination of oxidizer burning rate and average particle size of oxidizer of the rpopellant by 10 L mixer (7 bathes)

Group	$r'_{s1}/d_{4,3}/\text{gradation}$	$r'_{s1}/d_{4,3}/\text{gradation}$	$r'_{s1}/d_{4,3}/\text{gradation}$
01	4.45/-/52	4.150/-/48	4.598/-/44
02	4.400/301.3/52	4.462/288.0/48	4.532/274.7/44
03	4.408/294.50	4.576/275.0/44	4.799/255.1/38
04	4.514/296.3/50	4.627/279.2/44	4.837/262.6/40
05	4.392/300.8/50	4.631/279.4/45	4.691/266.7/40
06	4.435/299.3/50	4.548/282.9/45	4.761/256.6/40
07	4.337/300.6/50	4.485/283.1/-	4.746/265.7/40

根据表 3 的数据,处理得到下面 2 个一元线性回去归公式:

$$r'_{s1} = 5.849\,9 - 0.0283\,2 \cdot JP \quad (R = -0.904\,6, s_y = 0.0611\,5, n = 24) \quad (1)$$

$$r'_{s1} = 7.087\,8 - 0.008\,954 \cdot d_{4,3} \quad (R = -0.920\,0, s_y = 0.05\,945, n = 21) \quad (2)$$

式 (1) 的子样数 $n=24$, 临界相关系数 ($\alpha=0.05$) $R_{0.05} \cdot (24-2) = 0.404 < 0.904\,6$, 说明 r'_{s1} 和 JP 之间存在线性关系。

式 (2) 的子样数 $n=21$, 临界相关系数 ($\alpha=0.05$) $R_{0.05} \cdot (21-2) = 0.433 < 0.920\,0$,

说明 r'_{s1} 和 $d_{4.3}$ 之间存在线性关系。

按照一元线性回归分析理论,对于已经求出的回归方程 $y=a+bx$,对于给定的 $x=x_0$,可以用 $y_0=a+bx_0$ 作为 y_0 的点估计,而作为随机变量的 y_0 近似地服从正态分布 $(0, s_{y_2})$, s_y 称为剩余标准差。特别对任一给定的 x_0 , y_0 的置信概率为 0.95 的置信区间为:

$$(y_0 - 1.96s_{y,y_0} + 1.96s_y)$$

若要求 y 取值满足 $y_1 \leq y \leq y_2$,则可从 $a+bx_1-1.96s_y=y_1$ 和 $a+bx_2+1.96s_y=y_2$ 中分别得出 x_1 和 x_2 。只要控制 x 取值在 x_1 与 x_2 之间,就能以 0.95 的概率保证 y 的取值在 y_1 和 y_2 之间。

根据燃速控制中值及公差和上述结果,可计算出置信概率为 0.95 时粒度和级配的取值范围分别为:

$$d_{4.3}: (284.2 \mu\text{m}, 291.6 \mu\text{m}), JP: (46.25\%, 48.38\%)$$

同时,也可计算出燃速取中值时的最佳粒度 $d_{4.3} = (4.51-a)/b = 278.9 \mu\text{m}$,最佳级配 $JP_m = (4.51-a)/b = 47.30$ 。此时,燃速 r'_{s1} 的置信概率为 0.95 的置信区间为: $d_{4.3}: (4.394 \mu\text{m}, 4.627 \mu\text{m}), JP: (4.390\%, 4.630\%)$

由上可以看出,调节级配等同于调节粒度对燃速的影响,这是因为:

(1) 设 $r_1 = a_1 + b_1 \cdot d_{4.3}$, $r_2 = a_2 + b_2 \cdot JP$, 因为 $d_{4.3} = [JP \cdot d_1 + (63-JP) \cdot d_2] / 63$, 取 $r_1 = r_2$, 可推导出

$$b_2 = (d_1 - d_2) \cdot b_1 / 6_3 \quad (3) \quad a_2 = a_1 + b_1 \cdot d_2 \quad (4)$$

(2) 由式 (3), 每份级配对燃速的影响值 b_2 与 (d_1-d_2) 成正比,说明 (d_1-d_2) 增大时,级配的变化对燃速的影响值将增大。

(3) 由式 (4), d_2 越大,由于 b_1 为负值,则 a_2 越小。表明,若氧化剂粒度总体增大,即使 JP 保持不变,燃速也将下降。

(4) 从表 2 可以看出,AP40 目~60 目和 100 目~140 目的粒度都相当稳定,这就决定了调节级配等同于调节粒度。 $(d_1-d_2) \approx 210 \mu\text{m}$, 即 b_2 约为 b_1 的 3 倍,与式 (1)、(2) 的结果相符。

(5) 反过来说,若球形 AP 的粒度由于某种原因发生了较大的变化,则需对上述粒度相当稳定的情况下得出的有关规律进行修正。

值得注意的是,式 (1)、(2) 由 7 批原材料的 10 L 预示性能回归得出。 $1.96 s_y$ 均小于燃速公差,说明原材料换批造成的燃速差异小于燃速设计公差。

低燃速 HTPB 推进剂的固体组分 86.5%, 而球形 AP 为 63%, 占整个固体组分的 73%。式 (1)、(2) 不仅表明球形 AP 粒度偏差的大小对整个固体组分粒度的偏差起主导作用,还表明其它固体组分(如铝粉、降速剂)的粒度也相当稳定。

2.3 全尺寸发动机随机燃速的分析及讨论

为对比批与批之间燃速的差异,必须对燃速(或级配)进行修正。本文将 7 批 82 台随机燃速,取 b 值为 0.02 进行修正,将各台的实际装药采用的级配值修正到 r'_{s2} 为中值时的最佳级配。通过各批最佳级配值的比较,来比较批间燃速的差别,修正结果见表 4。所此统计出 82 台最佳级配的平均值为 45.40,取整为 45。若这 82 台发动机全采用 $JP=45$ 装药,则燃速的预计值见表 5。

Table 4 Modified results of optimum gradation

Group	01	02	03	04	05	06	07
$x/(\text{mm/s})$	46.32	42.28	47.22	48.10	45.84	44.87	44.21
$s/(\text{mm/s})$	1.97	2.17	1.53	1.41	1.74	1.74	1.50
n	14	13	12	6	13	15	11
$(s/x)/(\%)$	4.25	3.14	3.24	2.93	3.80	3.87	3.38

Table 5 The predicted data of each motor burning rate in adapting optimum gradation average

Group	01	02	03	04	05	06	07
$x/(\text{mm/s})$	4.536	4.456	4.554	4.559	4.536	4.507	4.494
$s/(\text{mm/s})$	0.039	0.043	0.030	0.042	0.020	0.034	0.029
n	14	13	12	6	13	15	11
$(s/x)/(\%)$	0.867	0.976	0.673	0.925	0.458	0.771	0.666

根据表 1 和表 5 的数据,分别计算出 r'_{s2} 实际值、预计值的平均值及偏差,分别为实际值 $r'_{s2}=4.526$ ($n=82, s=0.0465, s/x=1.03\%$), 预计值 $r'_{s2}=4.516$ ($n=82, s=0.0464, s/x=1.03\%$)。由此可见:(1) 批与批之间的燃速存在一定的差异,最大为 02 批与 04 批, JP 差值约为 5, 相当于燃速约 0.1 mm/s, 但小于设计公差值。

(2) 批内各台间的燃速差异较稳定, 变异系数约 0.8%。最具代表性的是 06 批, 因其级配未做调整, 且燃速接近中值。

(3) 表 5 绝大部分单批的变异系数小于表 1。初步分析原因为首台级配选择偏高造成燃速偏低; 往往将某单台燃速的随机性偏差当成系统偏差, 而错误地对后续台份的级配进行修正。

(4) 不考虑批与批之间的燃速差异, 82 台燃速预计值的偏差与实测值相同。各台燃速的预计值均未超出设计指标。全尺寸发动机随机燃速的结果进一步验证了原材料换批造成的燃速差异小于其设计公差的结论。

为研究 10 L 预示燃速、首台燃速与整批燃速间的关系。燃速中值时最佳级配修正的方法。从表 3 得到对应各装药批的 7 个一元线性回归方程 $r'_{s1}=a+b \cdot JP$, 计算出 r'_{s1} 为中值时的最佳级配, 结果见表 6。根据这结果, 就可以对 10 L 预示、首台、整批三者的燃速进行对比。整批最佳级配的平均值不包括首台, 计算结果见表 7。

Table 6 Optimized size combination of oridizer obtained by burning-rate of propellant by 10 L mixer

Group	a	b	R	Optimum gradation
01	5.3933	-0.01812	-0.9987	48.74
02	5.2567	-0.01650	-0.9994	45.25
03	5.4470	-0.01876	-0.9999	50.20
04	6.1142	-0.03230	-0.9876	49.66
05	5.8625	-0.02990	-0.9620	45.23
06	6.0483	-0.03260	-0.9847	47.19
07	6.3632	-0.04090	-0.9875	45.31

Table 7 Comparison of the optimized oxidizer particle size combination

Group	01	02	03	04	05	06	07	$\bar{x}$	s
10 L predictor	48.74	45.25	50.20	49.66	45.23	47.19	45.31	47.37	2.18
First motor	45.45	45.05	49.00	50.55	47.30	47.00	42.25	46.66	2.73
Average	46.38	42.01	47.06	47.61	45.60	44.71	44.41	45.40	1.90

无论从式 (2) 还是表 7 的结果, 10 L 预示燃速提供的最佳级配比实际值高约 2 个级配, 相当于燃速约 0.04 mm/s。这也就解释了由于 10 L 预示提供的最佳级配偏大, 造成首台装药选用的级配值一般也相应偏大, 而在后继装药中逐步进行调整的现象。所以, 10 L 预示提供的最佳级配有系统的高于实际值的趋势, 约 2 个级配, 这个现象不容忽视。

2.4 批内台与台之间的燃速差异

即使采用同一批原材料, 同一级配, 燃速也有波动。影响燃速差异的因素有些是随机的, 有些是系统性的。在特定的低燃速 HTPB 推进剂配方中, 经粉碎处理的高氯酸铵 (GA7525) 的含量小于 5%。经过气流粉碎得到的非球形细粒度高氯酸铵一直放置在 $(40 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的烘房, 烘干时间大于 7 天后开始使用, 直至用完。

由于非球形细粒度高氯酸铵存放期的长短对燃速的影响值较小, 故必须在各种配方参数完全相同的台份之间对比才有实际意义。在总共 82 台发动机中, 实际采用级配、固体组份批号 (包括非球形细粒度高氯酸铵和降速剂的小批号) 完全相同的发动机共有 14 组, 每组 2 台~4 台, 据此得到 17 组数据, 见表 8。

Table 8 The influence of the storage time of fine partial aspherical AP for burning rate

S/N	Motor number	r'_{s2}	$\Delta r'_{s2}$	Δt	S/N	Motor number	r'_{s2}	$\Delta r'_{s2}$	Δt
1	A-01	4.491	-0.046	41	8	B-07	4.567	+0.014	5
	A-02	4.427				B-08	4.581		
2	A-03	4.492	+0.020	7	9	B-09	4.590	-0.007	7
	A-04	4.512		77		B-10	4.583		
	A-05	4.390							
3	A-06	4.544	-0.090	7	10	C-01	4.449	+0.009	7
	A-07	4.454				C-02	4.508		
4	A-08	4.544	-0.50	9	11	C-03	4.500	-0.069	7
	A-09	4.494				C-04	4.521		
5	A-10	4.550	-0.077	34	12	C-05	4.500	+0.014	7
	A-11	4.473				C-06	4.514		
6	B-01	4.548	+0.033	20	13	C-07	4.548	-0.010	7
	B-02	4.581	-0.026			C-08	4.538		
	B-03	4.555	-0.017						
	B-04	4.538							
7	B-05	4.556	-0.046	21	14	C-09	4.610	-0.04	7
	B-06	4.510				C-10	4.570		

从表 8, 可得回归公式:

$$\Delta r'_{s2} = 0.007487 - 0.001447 \cdot \Delta t \cdot (-0.6231) \quad (5)$$

因为 $t_{0.05}(17.2) = 0.482 < 0.6231$, 故燃速的下降值与非球形细粒度 AP 的存放时间存在线性关系。

由于非球形细粒度 AP 在整个氧化剂系统中占的比例很小, 而在同等质量的情况下其粒度变化对燃速的影响值肯定大于球形高氯酸铵。故在研究非球形细粒度 AP 的粒度对燃速的影响时, 应单独立项而不能放入整个氧化剂系统的平均粒度中进行研究。

式 (5) 的结果表明, 经粉碎处理的细 AP 多存放 15 天, 燃速大致下降 0.02 mm/s, 相当于一个级配。可见非球形细粒度高氯酸铵在有效期结块对燃速的影响不容忽视。如果将燃速下降 0.1 mm/s 作为判断非球形细粒度高氯酸铵是否能用的标准, 那么, 若非球形细粒度高氯酸铵的存放期超过 60 天则应予以报废, 不能投入使用。

4 结 论

(1) 对于低燃速 HTPB 推进剂, 存在一个 AP 粒度 (级配) 中值。在粒度 (级配) 取中值时, 原材料换批造成的燃速差异小于设计公差。

(2) 经粉碎处理的非球形细高氯酸铵在存放期结块导致燃速的缓慢下降, 是影响同批装药燃速稳定性的因素之一。

(3) 10 L 预示燃速提供的最佳级配略高于对应装药的 actual 值。

致谢: 本文得到倪其龄研究员的指正, 深表谢意。

参 考 文 献

- 1 张步景. 一种提高固体火箭推进剂燃速测试精度的数据处理方法. 零六六科技, 1986, 4
- 2 刘朝荣. 工业技术应用数理统计方法. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1985.
- 3 刘培谅. 复合固体推进剂性能及原理 (上、下册). 长沙: 国防科技大学出版社, 1987.