

HQ-61 推进剂燃速的实验研究

上海七〇一三厂 李金昆、黄麟

摘 要

本文介绍了燃速仪法和 $\phi 107$ 发动机法在评定HQ-61推进剂燃速波动范围和拣选影响因素方面的若干实验及其试验结果。两种方法试验结果的比较表明：用 $\phi 107$ 发动机法来评定HQ-61推进剂燃速较之燃速仪法为优。它既可比较正确地评价推进剂燃速参数，又可正确敏感地拣选影响燃速的因素。这一实验研究还进一步表明：在精确评价推进剂燃速和为发动机设计提供比较可靠的燃烧性能方面，设计一种用药量少、精度高的标准弹道评定发动机来代替燃速仪是十分必要的。

一、前 言

燃速是固体推进剂的主要特性之一。它的重现性和稳定性将直接影响到导弹的战术技术性能。所以对燃速测试技术的改进仍是深受重视的研究课题之一。燃速测试技术的改进主要包括两个方面：

1. 提高燃速测试精度，以便对推进剂燃速参数作出正确的评定。
2. 在更接近发动机实际工作条件的典型环境下来考虑和测定推进剂燃速。为发动机设计提供比较全面、可靠的燃速性能数据。

当前，测定燃速的方法，一般可分为两种：即燃速仪法和小型发动机法。两法随不同的应用目的而选择使用。据美法等国资料报导，为发动机设计所提供的燃速数据（包括压力指数和燃速温度敏感系数）比较倾向于用所谓弹道评定发动机法而不是燃速仪法。当用于固体推进剂配方组分筛选与质量控制时则采用燃速仪法。

对非均质的复合固体推进剂来说，目前国内大量使用的燃速仪法由于下述两种原因而限制了它所提供数据的使用价值：

1. 由于燃速仪测试药条的限制使其不具备真实发动机燃烧时所具有的那种统计分布均匀性，因而其燃速测试精度较差、波动范围较大。从而对某种推进剂的燃速参数不能作出十分正确的评价。
2. 由于燃速仪中药条的燃烧环境与真实发动机中装药的燃烧环境相差太大（一为动态，一为静态），故两者所得数据可能有相当大的差别。这就使得为发动机设计提供的燃速参数不很可靠，从而增加了研制试验次数，延长了试验周期。正是由于这些原因，使得国内外对弹道评定发动机的兴趣日趋浓厚。一般说来，所谓弹道评定发动机的合适直径应在50~150毫米范围内。目前，国内在型号发动机设计上尚未采用标准的弹道评定

发动机，仍靠用燃速仪来评定推进剂燃速参数和为发动机设计提供燃速数据。本文选用直径为 107 毫米的小发动机，针对 HQ-61 推进剂，用上述两种测试方法进行对比试验，并以最大误差范围 ($\pm 3\sigma$) 作为评定燃速值的波动范围标准。试验结果表明： $\phi 107$ 发动机法优于速仪法。 $\phi 107$ 发动机给出的 HQ-61 推进剂燃速在平均压力 53~66 公斤/厘米² 范围内波动范围小于 ± 0.5 毫米/秒。

二、实验方法

(一) 燃速仪和 $\phi 107$ 发动机燃速测试的对比试验

用 100l 投料分别装 8 个小方皮药柱和 8 个 $\phi 107$ 发动机进行燃速测定，分别确定两种燃速测试方法所得燃速值的波动范围。

① 把推进剂药块加工成 $4 \times 4 \times 100$ 毫米的长方形药条，包复 4 次，待包复干燥后，把药条置于缓冲式燃速仪中进行测试。

② 将直径为 $\phi 107$ 毫米、长 548 毫米，6 角星孔装药的发动机(装药量 6 公斤左右)在 20℃ 下保温 24 小时后置于试车台上进行静态点火试验。

(二) 燃速仪和 $\phi 107$ 发动机燃速对不同粉碎批次细粒度氧化剂燃速影响的响应试验

将不同日期粉碎的八批不同粒度及粒度分布的细粒度氧化剂分别添加于 HQ-61 推进剂，(推进剂其它原材料相同)测得燃速仪燃速数据，分析其对氧化剂换批的响应。用同一批 GT，3 批不同氧化剂进行 20 发 $\phi 107$ 发动机装药，测定其燃速数据，分析其对氧化剂换批的响应，并对上述两者的响应进行比较。

(三) 燃速仪和 $\phi 107$ 发动机燃速对不同批次 GT 影响的响应试验

将不同批次的 GT (铜铬催化剂其他原料均相同) 分别装上述规格的小方皮和 $\phi 107$ 发动机，分别分析其燃速测试数据对 GT 换批的响应，并对两者进行比较。

三、实验结果和讨论

1. 装药编号为 HG-61-78-11 的对比试验的 8 个小方皮的燃速仪测试结果如表一。
(测试条件 20℃ $p = 60$ 公斤/厘米²)

表 1 燃速仪燃速测试值

序号	单 根 药 条 燃 速 r				平均燃速 $\bar{r}$
1	9.90	10.01	10.02	10.15	10.02
2	9.80	9.81	10.07	10.07	9.95
3	10.06	10.44	10.04	10.74	10.32
4	10.22	10.30	10.21	10.24	10.24
5	10.31	10.44	10.01	10.29	10.22
6	10.00	10.00	10.28	10.12	10.10
7	10.34	10.10	10.16	11.09	10.42
8	8.14	10.07	12.35	10.44	10.25

对各序号的平均燃速计算得:

$$n=8 \quad \Sigma x_i = 81.52 \quad \bar{x} = 10.19 \quad \Sigma (x_i)^2 = 830.8602$$

$$\frac{(\Sigma x_i)^2}{n} = 830.6888 \quad \sigma = 0.16 \quad 3\sigma = 0.48$$

燃速波动的 3σ 范围为 10.19 ± 0.48

2. 装药编号为 HG-61-78-11 的对比试验的 8 个 $\phi 107$ 发动机的燃速测试值结果如表 2。

表 2 $\phi 107$ 发动机装药燃速测试值

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
平均压力 $\bar{p}$	64.75	65.87	65.14	65.88	66.32	64.59	65.37	
燃 速 r	11.29	11.41	11.25	11.38	11.38	11.19	11.26	11.23

对上述燃速计算结果:

$$n=8 \quad \Sigma x_i = 90.39 \quad \bar{x} = 11.30 \quad \Sigma (x_i)^2 = 1021.3401$$

$$\frac{(\Sigma x_i)^2}{n} = 1021.2940 \quad \sigma = 0.081 \quad 3\sigma = 0.24$$

燃速的 3σ 波动范围为 11.30 ± 0.24

试验结果表明, $\phi 107$ 发动机所测得的燃速值波动范围较燃速仪为小。

2. 细粒度氧化剂粉碎工艺对 HQ-61 推进剂燃速影响试验。

用不同日期粉碎的 8 批细粉度氧化剂进行试验。所制得的 16 个大方皮的燃速仪测试结果如表 3。

表 3 氧化剂粉碎工艺对静态燃速的影响

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
配方编号	HG HG 108 109	HG HG 116 117	HG HG 124 125	HG HG 126 127	HG HG 128 129	HG HG 130 131	HG HG 132 133	HG HG 134 135
燃 速 $p = 60$ 公斤 /厘米 ² $t = 20^\circ\text{C}$	10.63 10.68	10.09 10.25	10.58 10.57	10.19 10.40	10.38 9.95	10.36 10.04	10.04 10.41	10.04
平均燃速	10.65	10.17	10.85	10.30	10.16	10.20	10.23	10.04

对上述平均燃速进行计算得:

$$n=8 \quad \Sigma x_i = 82.33 \quad \bar{x} = 10.29 \quad \Sigma (x_i)^2 = 847.5979$$

$$\frac{(\Sigma x_i)^2}{n} = 847.2786 \quad \sigma = 0.21 \quad 3\sigma = 0.63$$

上述结果表明, 细粒度氧化剂粉碎工艺引起的燃速仪燃速最大误差范围要大于对比

试验时的燃速仪测试误差,故燃速仪测试值能够反映出细粒度氧化剂粒度变化对 HQ-61 配方燃速的影响,所导致的燃速波动范围进一步增大是较大的燃速仪测试误差和氧化剂粒度影响的综合结果。

本试验还通过三次氧化剂换批后所装的 20 发 $\phi 107$ 发动机,评价了其燃速对氧化剂换批的敏感性。试验结果如表 4。

表 4 氧化剂粉碎工艺对 $\phi 107$ 发动机燃速的影响

序号	配 方 编 号	单发燃速	平均燃速	序号	配 方 编 号	单发燃速	平均燃速
1	HG-61-78-11 -①	11.29	11.30	3	61-79-100I-01 -①	11.07	11.25
	HG-61-78-11 -②	11.41			61-79-100I-01 -②	11.30	
	HG-61-78-11 -③	11.25			61-79-100I-01 -③	11.40	
	HG-61-78-11 -④	11.38			61-79-100I-01 -④	11.06	
	HG-61-78-11 -⑤	11.38			61-79-100I-01 -⑤	11.24	
	HG-61-78-11 -⑥	11.19			61-79-100I-01 -⑥	11.34	
	HG-61-78-11 -⑦	11.26			61-79-100I-01 -⑦	11.13	
	HG-61-78-11 -⑧	11.23			61-79-100I-01 -⑧	11.43	
2	61-79-02-①	11.07	11.01				
	61-79-02-②	11.15					

对上述平均燃速进行处理得:

$$\begin{aligned} n &= 3 & \Sigma x_i &= 33.56 & \bar{x} &= 11.19 & \Sigma (x_i)^2 &= 375.4726 \\ \frac{(\Sigma x_i)^2}{n} &= 375.4245 & \sigma &= 0.17 & 3\sigma &= 0.51 \end{aligned}$$

试验结果表明,细粒度氧化剂换批对燃速影响,在 $\phi 107$ 发动机所测得的燃速值上得到更为明确的反映,其燃速波动的 3σ 值达对比试验的二倍多。

3. 不同批次燃速催化剂(铜铬催化剂)对 HQ-61 推进剂燃速影响试验。

本试验通过将三批外观不同,质量分析测试结果差异较大的铜铬氧化物燃速催化剂进行 5I 大方皮装药和 $\phi 107$ 发动机装药。

燃速仪测得的燃速结果如表 5。

表 5 燃速催化剂质量对静态燃速的影响

序号	装药编号	GT 批号	单根药条燃速 r	平均燃速 $\bar{r}$
1	HG-143	1 [#]	9.61 9.49 9.60 9.75	9.61
2	HG-144	2 [#]	9.51 9.62 9.59 9.51	9.56
3	HG-145	3 [#]	9.60 9.60 9.36 9.36	9.48

对上述平均燃速进行处理得:

$$n = 3 \quad \Sigma x_i = 28.65 \quad \bar{x} = 9.55 \quad \Sigma (x_i)^2 = 273.6161$$

$$\frac{(\Sigma x_i)^2}{n} = 273.6075 \quad \sigma = 0.065 \quad 3\sigma = 0.20$$

表 6 给出了用与上述试验相同的三批 GT 的另一次试验结果 (除氧化剂换批外其它原料均相同)

表 6 燃速催化剂质量对静态燃速的影响

序号	装药编号	GT 批号	单根药条燃速 r	平均燃速 $\bar{r}$
1	HG-81	1 [#]	10.52 10.54 10.32 10.61	10.50
2	HG-87	3 [#]	10.41 10.44 10.43 10.25	10.38
3	HG-101	10 [#]	11.29 11.24 11.28 10.98	11.20

对上述平均燃速处理得:

$$n = 3 \quad \Sigma x_i = 32.08 \quad \bar{x} = 10.69 \quad \Sigma (x_i)^2 = 343.4344$$

$$\frac{(\Sigma x_i)^2}{n} = 343.0421 \quad \sigma = 0.44 \quad 3\sigma = 1.3$$

三批 GT 在 $\phi 107$ 发动机测得的燃速值如表 7

表 7 燃速催化剂质量对 $\phi 107$ 发动机燃速的影响

配方编号	HG-143-1	HG-143-2	HG-144-1	HG-144-2	HG-145-1	HG-145-2
GT 批号	1 [#]	1 [#]	3 [#]	3 [#]	10 [#]	10 [#]
平均压力 $\bar{P}$	62.90	61.47	63.67	63.01	65.81	65.98
燃速 r	11.10	11.13	11.43	11.45	11.36	11.41
平均燃速 $\bar{r}$	11.11		11.44		11.38	

对上述平均燃速处理得:

$$n = 3 \quad \Sigma x_i = 33.93 \quad \bar{x} = 11.31 \quad \Sigma (x_i)^2 = 383.8101$$

$$\frac{(\sum x_i)^2}{n} = 383.7483 \quad \sigma = 0.18 \quad 3\sigma = 0.54$$

上述试验结果表明,不同批号 GT 对燃速的影响在燃速仪中或者未能得到反映(所产生的影响和较大的测试误差相互抵消)或者燃速波动范围大大高于实际情况(所产生的影响和较大的测试误差相互叠加)。而 $\phi 107$ 发动机与燃速仪相比却较能正确地反映上述因素对推进剂燃速的影响。换言之, $\phi 107$ 发动机由于其测试精度较燃速仪高故它不仅能够比较敏感地拣选影响燃速的因素而且能够比较真实地反映实际影响程度。

4. 综合评价 HQ-61 全尺寸发动机装药所带方皮的燃速测试值和 $\phi 107$ 发动机的燃速。

78 年以来, HQ-61 全尺寸发动机所带方皮药柱在燃速仪中所测得的全部燃速结果如表 8。

表 8 HQ-61 推进剂的燃速仪测试值 测试条件:60 公斤/厘米²(20°C)

序号	装药批号	燃 速 r	序号	装药批号	燃 速 r
1	61-78-01	9.76	11	61-78-14	9.78
2	61-78-02	9.91	12	61-79-01	9.49
3	61-78-03	9.89	13	61-79-02	9.72
4	61-78-04	9.20	14	61-79-03	9.58
5	61-78-05	10.05	15	61-79-04	10.74
6	61-78-06	9.90	16	61-79-05	9.88
7	61-78-07	9.69	17	61-79-06	9.80
8	61-78-08	9.54	18	61-79-07	9.80
9	61-78-09	9.94	19	61-79-08	9.84
10	61-78-12	9.64	20	61-79-09	9.99
			21	61-79-10	9.79

由上述燃速处理结果得:

$$n = 21 \quad \sum x_i = 205.93 \quad \bar{x} = 9.81 \quad \sum (x_i)^2 = 2021.0463$$

$$\frac{(\sum x_i)^2}{n} = 2019.3888 \quad \sigma = 0.29 \quad 3\sigma = 0.84$$

综合 HQ-61 推进剂由不同试验目的进行的 $\phi 107$ 发动机装药所测得的燃速数据如表 9。

表 9 HQ-61 推进剂的 $\phi 107$ 发动机燃速测试值

序号	配方编号	燃 速 r	序号	配方编号	燃 速 r
1	61-78-11-01	11.29	14	HG-145-02	11.41
2	61-78-11-02	11.41	15	61-79-100/ -01-①	11.07
3	61-78-11-03	11.25	16	61-79-100/ -01-②	11.30
4	61-78-11-04	11.38	17	61-79-100/ -01-③	11.40
5	61-78-11-05	11.38	18	61-79-100/ -01-④	11.06
6	61-78-11-06	11.19	19	61-79-100/ -01-⑤	11.24
7	61-78-11-07	11.26	20	61-79-100/ -01-⑥	11.34
8	61-78-11-08	11.23	21	61-79-100/ -01-⑦	11.13
9	HG-143-01	10.10	22	61-79-100/ -01-⑧	11.43
10	HG-143-02	11.13	23	61-79-02-①	11.07
11	HG-144-01	11.43	24	61-79-02-②	11.15
12	HG-144-02	11.45	25	61-79-08-①	10.93
13	HG-145-01	11.36	26	61-79-08-②	10.87

上述燃速处理结果得:

$$n = 26 \quad \sum x_i = 292.26 \quad \bar{x} = 11.24 \quad \sum (x_i)^2 = 3285.8748$$

$$\frac{(\sum x_i)^2}{n} = 3285.2272 \quad \sigma = 0.16 \quad 3\sigma = 0.48$$

上述两种方法所得燃速值的统计数据表明,用 $\phi 107$ 发动机测得的燃速值的波动范围较之燃速仪法要窄得多。虽然由于试验条件的限制, $\phi 107$ 发动机的数据还不是最多,但其测试精度高于燃速仪法,这一点是毫无疑问的。

四、结 论

综合上述四种分析结果,我们可以得出如下四个初步结论:

1. 用 $\phi 107$ 发动机来评定 HQ-61 推进剂燃速较之用燃速仪法为优。它既可比较正确地评价推进剂的燃速参数,又可较燃速仪敏感地拣选影响燃速的因素。

2. $\phi 107$ 发动机的燃速评定表明,现有细粒度氧化剂的粉碎工艺和 GT 质量虽然都对燃速有明显影响,但基本上还是在目前 HQ-61 固体火箭发动机战术技术指标可以接受的水平之内。

3. $\phi 107$ 发动机给出的 HQ-61 推进剂燃速在 $\bar{p} = 53 \sim 66$ 公斤/厘米² 的范围内燃速波动小于 ± 0.5 毫米/秒。

4. 在精确评定推进剂燃速和为发动机设计提供燃速数据方面, 用药量少, 测试精度高的标准弹道评定发动机法代替燃速仪法是可行的, 也是十分必要的。

参加本文工作的还有陈桂芳、高忠久、邓文川、徐国冲。

五、参 考 资 料

- [1] 误差分析方法 何国伟著 国防工业出版社 1978
- [2] 关于加强固体推进剂的弹道与燃烧特性应用研究的建议。西北工大 802 教研室 1978 年
- [3] 燃速测试系统的准确度和精度以及 HQ-61、N₅A 燃速的稳定性。七〇一三厂五车间内部资料
- [4] 用于予测全尺寸发动机性能的固体推进剂药条燃速测试技术。 固体火箭技术 No.4 1976 年 10 月
- [5] 固体推进剂的选择及特性鉴定 201 所 〈国外科技资料 (弹箭类)〉 No. 101 1978 年 5 月

附录 I

氧化剂过氯酸铵粉碎前原料规格为 80~100 目的球形粒子, 经 7-2 线的粉碎工艺, 所得无定形细粒度过氯酸铵之粒度及其分布表:

批 号	粒 度 d_{50}	粒 度 分 布				
		0~5 μ	5~10 μ	10~15 μ	15~20 μ	>20 μ
1	10.0	15	35	22	15	13
2	9.3	16	38	21	14	11
3	8.5	18	40	19	13	10
4	9.5	15	37	21	14	13
5	8.8	20	36	21	12	11
6	9.5	22	31	23	16	8
7	10.5	20	27	19	12	22
8	10.0	19	31	21	8	21

附录 II

三批燃速催化剂——铜铬氧化物催化剂质量指标
(原包化厂出厂指标)

批号 分析结果% 检验项目	1#	3#	10#
总 Cr^{6+} (以 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 计)	20.27	19.92	19.00
表 Cr^{6+} (以 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 计)	8.50	8.28	10.39
$\text{Cr}_2 (\text{Cr}_2\text{O}_4)_3$	3.05	3.89	2.57
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	15.33	15.38	15.49
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$	1.37	0.99	1.33
CuCr_2O_4	40.67	39.27	41.03
CuO	34.16	34.13	36.55
K_2SO_4	4.52	5.63	4.68
H_2O	0.70	0.89	0.56
650℃ 灼烧失重率	3.65	3.42	2.57

我厂五车间分析质量指标

批号 结果% 项 目	1#	3#	10#
总 Cr^{6+}	19.75	18.53	18.75
Cr_2O_3	28.30	28.96	29.01
CuO	46.31	45.58	46.13
650℃ 灼烧失重率	3.63	3.86	3.69
水份	0.38	0.48	0.45