

固体推进剂火箭发动机 贮存性能规律研究*

李 随 河

(陕西省高陵县科委, 西安, 710200)

摘 要: 依据固体推进剂火箭发动机大量试验数据的统计规律, 提出了估算固体推进剂火箭发动机主要参量随贮存年限、温度变化而改变的数学关系式: $R' = K_R R_0 (1 + \alpha)^{\Delta-1}$, 并通过了反算、验证试验和实际中的应用。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 推力, 双基推进剂, 推进剂弹道性能

分类号: V435.6

A STUDY ON PERFORMANCE VARIATION OF SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINES IN STORAGE

Li Suihe

(Science and Technology Committee Gao Ling, Xi'an, 710200)

Abstract: A mathematical expression $R' = K_R R_0 (1 + \alpha)^{\Delta-1}$ is proposed in this paper to predict thrusts varying with duration and temperature in storage of solid propellant rocket engine, according to statistics of massive test data. The expression has been verified with calculations and tests.

Keywords: Solid propellant rocket engine, Thrust, Double base propellant, Ballistic properties of propellant

符 号 表

A : 流量系数

F : 喷喉面积 (cm^2)

α : 温度变化 1°C 时性能的变化率; 年变时
为贮存一年的变化率

I_k : 总冲

K_R : 不同发动机装药及包覆层贮存后性能变

* 本文1993年5月10日收到, 1994年1月25日收到修改稿

化的修正系数

p : 压力

r : 装药比重

R : 推力

R_0 : 已知推力

R' : 计算推力

S : 初始燃面积

t_k : 燃烧时间

t_R : 推力达到7.85kN 时的时间

R_{ini} : 燃烧0.15s 时的推力

Δt : 温度变化时为温差; 年变时为贮存年限

u_0 : 压力系数

1 引 言

固体火箭发动机装药在贮存过程中性能有变化。某空-空导弹火箭发动机装药是双芳镁-3双基药柱。该装药内弹道数据随试验温度、贮存年限而变化, 其变化规律如下:

$$R' = K_R R_0 (1 + \alpha)^{\Delta t - 1} \quad (1)$$

2 内弹道数据变化量的预估

2.1 装药初温变化1°C 时的推力变化量

根据发动机延寿试验的推力平均值(见表1)及试验时温差值, 用公式(1)求出的 e 值是0.007848; 另外根据该发动机合格证提供的高、低温下的平均推力值, 用公式(1)求出的

Table 1 Thrust from grain certificate of some batch,
from prolonged life test and from calculation

Thrust Data resource	$R_{50^\circ\text{C}}$ (kN)	$R_{20^\circ\text{C}}$ (kN)	$R_{-50^\circ\text{C}}$ (kN)	α
Certificate	21.7		11.2	0.006709
Prolonged life test	18.9	15	8.73	0.007848
Calculation		14.96		

e 值是0.006709。两种计算数据基本相似, 说明计算是接近装药变化规律的。由此可以计算出常温时的推力为14.96kN。该计算值与延寿试验数据15kN 基本近似, 从而证明公式(1)可参考使用。根据

$$\Delta R_{\text{低}} = e R_{-50^\circ\text{C}} \quad (2)$$

得出在温度每升高1°C 时的推力增量为68.65N。也可以用同样的方法计算在试验温度增加1°C 时压力、总冲等主要数据的增量。

2.2 装药贮存一年低温最小推力的减量

根据表1出厂合格证及9年后延寿试验最小推力, 用公式(1)求出的 α 值为0.031429。根据

$$\Delta R_1 = R_{\text{合}} \cdot \alpha \quad (3)$$

得出装药贮存一年最小推力减少了353N。根据表1数据及公式(3)可以计算出贮存1~9年间的

推力减量及贮存期内各年的发动机推力计算数据（见表2）。

Table 2 The thrust data calculated from prolonged life test of some batch stored for 1~9 years

Years Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Decrease each year (N)	0	343	324	324	314	294	294	284	275	265
Thrust after years of storage (kN)	11.2	10.84	10.52	10.2	9.88	9.58	9.28	9.0	8.72	8.47

根据2.2中的计算方法，也可计算出压力、总冲等主要内弹道数据贮存年间的变化量。

2.3 统计出厂合格证、延寿试验的点火延迟时间及差值
数据见表3。

Table 3 The ignition delay time from prolonged life test and from certificate, and their difference

Name Serial number	Storage years	Prolonged life test t_R (s)	Certificate t_R (s)	Difference (s)	Nate
1	9	0.08 (mean value)	0.05 (mean value)	0.029	
2	6	0.05	0.03 (mean value)	0.02	
3	9	0.06	0.04 (mean value)	0.02	
4	9	0.05	0.03 (mean value)	0.02	
5	10	0.09	0.07 (mean value)	0.02	

从表3可以看出，贮存年限的增长对延迟时间变化的影响不大，一般贮存5~10年的装药，延迟期约增长0.02s 左右。

3 估算在装药发动机中的应用

装药内弹道性能随初温、贮存年限而变化，变化后能否使用，是否安全可靠，都是非常重要的。在生产中，根据合格证提供的数据，正确了解它的变化量，采取适当的措施，如改变喉径，使性能已经降低的装药得以合理地使用。

3.1 某批装药内弹道数据的估算及试验

该批装药50根，合格证给出喷喉直径为 $39.7^{+0.05}$ mm，从出厂到装配已贮存四年多了，外观检查时33根合格。出厂合格证数据为：高温+50℃时平均 $p_{max}=12.37$ MPa，平均 $I_R=39$ kN·s，低温负50℃时7台的数据有平均 $R_{min}=10.16$ kN； t_K 分别是3.14，3.21，3.21，3.22，3.23，3.25，3.27s； t_R 分别是0.03，0.03，0.04，0.04，0.06，0.06，0.09s。

由此可见，出厂时，低温试验7台产品，有6台工作时间超出了规定值。已存放四年多，由于装药贮存后性能的变化，工作时间会更长，性能会不合格。另外，出厂时最大压力已为

12.75MPa (平均为12.37MPa), 已到规定值的上限。根据经验, 贮存后, 燃速将减慢, 可使压力减小约0.687~0.981MPa左右。其次, 合格证中最小推力为9.807kN, 出厂时已到规定值。按估算数据, 贮存四年推力可降到8.66~9.25kN, 将远小于规定值。最后, 合格证中点火延迟时间为0.03~0.09s, 存放四年多, 延迟时间可增长0.01s, 有超出规定值的趋势。

从上述四点分析可看出, 该批装药性能不稳定, 存放四年后, 内弹道数据一般都将超出规定值。

利用公式(1)可估算出贮存四年后低温最小推力为8.94~9.52kN, 已低于规定值。根据合格证数据(喉径), 我们做了二台点火验证试验, 数据见表4。

Table 4 The proof test of thrust and ignition delay time

Item No.	t_R		R_{ini}		R_{min}		t_K (s)	Notes
	R (kN)	t (s)	R (kN)	t (s)	R (kN)	t (s)		
1	8.32	0.098	7.86	0.31	9.27	1.82	3.36	Test temperature -50°C Nozzle throat diameter 39.7mm
2	7.88	0.087	7.89	0.336	9.89	1.56	3.62	
Mean value	8.1	0.0925	7.88	0.323	9.53	1.705	3.49	

从试验数据看, 二台有效产品燃烧时间长, 低温最小推力与估算数据相近似, 延迟时间也大为增加。

3.2 改变喷喉直径的试验

根据选择喷喉尺寸公式:

$$F = \frac{u_0 \cdot s \cdot \gamma}{A \cdot p} \quad 4$$

设 u_0 不变, 利用公式(4)及表1合格证数据(喷喉直径39.9mm), 求出 u_0 (计算时为 u_1) 值约为118.896。同样, 利用公式(4)及表1延寿试验值(喷喉直径39.9mm), 求出 u_0 (计算时为 u_2) 值约为107.689。

设想 u_0 的变化量随着贮存年限在变, 则有

$$\Delta u = 1 - (u_2/u_1)^{\frac{1}{\Delta t-1}} \quad (5)$$

根据(5)式及 u_1 、 u_2 值, 求出的 Δu 约是0.0123。

根据公式(4)及3.1节中合格证数据求出 u_0 (计算时为 u'_1) 约为122.604。同样, 根据(5)式及 u'_1 求出 u'_2 (贮存四年后) 的值约为118.1355。

由直径公式及公式(4)求出喷喉直径应为38.97mm, 修正为39mm。

为便于比较, 根据计算数据选择了三种喷喉尺寸, 进行了点火试验, 试验数据见表5。从表5看出, 在三种喷喉直径中, 计算尺寸39mm的性能数据较好。说明改变喷喉直径能适当地提高产品主要性能, 估算结果是可行的。

后来又对另一批装药248根(贮存五年), 进行相同方法的估算和试验。经估算后认为将喷喉尺寸由原出厂时的40.4mm 缩小到39.8mm 可望改善内弹道性能, 经11发试验证明, 效果比

较理想,产成品全部使用,说明估算是可行的,可参考使用。

Table 5 Test data of different nozzle throat from some batch

Item Serial No.	Throat diameter (mm)	Test temperature (°C)	t_R (s)	R_{min} (kN)	t_K (s)	p_{max} (MPa)
1	39.3	+50				11.1
2	39.3	+50				11.1
3	39.3	-50	0.086	9.75	3.55	
4	39.3	-50	0.081	9.4	3.36	
5	39.3	-50	0.124	9.96	3.45	
6	39	-50	0.41	9.77		
7	39	-50	0.09	9.94		
8	38.6	-50	0.43	9.4	3.40	
9	38.6	-50	0.11	9.38	3.45	
10	38.6	-50	0.088	9.98	3.32	

4 计算公式应用时的修正

固体推进剂火箭发动机随其用途的不同,选用不同的装药和包覆层,故公式(1)应根据不同情况给以修正:

$$R' = K_R R_0 (1 + \alpha)^{\Delta t - 1} \quad (6)$$

K_R 随发动机及其装药形式不同而变化,它可以小于1、等于1和大于1(表6),也可根据经验或实验后的计算值选择。

Table 6 Suggestion for correction coefficient K_R

Name Correction coefficient	Grain							
	Black powder for indigenous rocket		Single-base grain		Double-base grain		Composite grain	
	Without wrap	With wrap	Without wrap	With wrap	Without wrap	With wrap	Without wrap	With wrap
K_R	>1.1	≥1.1	≥1	<1	>1	=1	>1	≥1