

文章编号: 1006-9941(2000)02-0072-03

铝粉形态对低燃速丁羟推进剂燃烧性能的影响

焦继革¹, 周克¹, 张炜²

(1. 江河化工厂, 湖北 远安 444200;

2. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

摘要: 通过静态燃烧性能测试及 >112 mm 发动机动态评定等实验方法, 研究了球形铝粉及非球形铝粉对低燃速丁羟推进剂燃烧性能的影响。结果表明, 含球形铝粉推进剂的燃速和燃速压强指数略高于含非球形铝粉的推进剂, 而且其燃速可通过调节氧化剂的粒度级配来改变, 而燃速温度敏感系数没有显著变化。

关键词: 铝粉; 燃烧性能; 丁羟推进剂

中图分类号: V512.3

文献标识码: A

1 引言

铝粉是复合固体推进剂常用的金属添加剂之一。它具有提高推进剂的燃烧热和密度、抑制推进剂不稳定燃烧等作用。最初在推进剂中使用的是非球形铝粉, 但因球形铝粉具有形状规整、表面氧化膜(Al_2O_3)薄、活性铝含量高等优点, 近年来出现以球形铝粉取代非球形铝粉的趋势^[1,2]。为了提高推进剂的性能, 适应铝粉更新换代的要求, 我们研究了铝粉形态对低燃速丁羟推进剂燃烧性能的影响。

2 实验

本实验采用低燃速丁羟复合推进剂配方, 分别添加等量的球形及非球形铝粉, 制药工艺过程均相同。采用静态燃烧性能测试和 >112 mm 发动机动态评定等实验方法, 考察含球形铝粉的推进剂与含非球形铝粉推进剂燃烧性能之间的差异。

实验所用两种铝粉的理化性能(见表1)符合 GJB 1738-93 要求。由表1可看出球形铝粉的活性铝含量略高于非球形铝粉。

3 实验结果及讨论

3.1 铝粉形态对燃速的影响

推进剂燃速是发动机设计的重要依据。采用球形

铝粉替代非球形铝粉能否满足推进剂燃速要求并保证燃速的可调性是本研究的重点。研究表明^[3,5]: 改变氧化剂粒度级配是调节燃速的一种有效方法, 而采用 >112 mm 发动机实测有效燃速可预示推进剂在全尺寸发动机中的燃速。为此, 我们通过改变含不同形态铝粉的两种推进剂中氧化剂的粒度级配, 考察了推进剂燃速与氧化剂级配的关系及燃速的可调性。

表1 球形和非球形铝粉的理化性能

Table 1 Properties of spherical and non-spherical aluminum

铝粉规格	活性铝含量/%	平均粒径/ μm	Fe/%	Cu/%	Si/%
FLT1 ¹⁾	99.02	32	0.140	0.0044	0.136
FLQT1 ²⁾	99.60	31	0.136	0.0024	0.138

注: 1) FLT1 为特细1号非球形铝粉;

2) FLQT1 为特细1号球形铝粉。

由实验数据(表2)回归得到了这两种推进剂的 >112 mm 发动机的有效燃速($r'_{6.18}$, 燃烧室压强 $p_c = 6.18$ MPa 时的有效燃速^[3])与氧化剂粒度级配(JP , 为100~140目AP与40~60目AP的粒度之比)之间的关系式。对含球形铝粉的推进剂, 其关系式为:

$$r'_{6.18} = 6.0628 - 0.0319JP \quad R = -0.9873$$

对含非球形铝粉的推进剂, 其关系式为:

$$r'_{6.18} = 5.9534 - 0.0303JP \quad R = -0.9873$$

由上述两个回归关系式可看出, 含球形铝粉及非球形铝粉的低燃速丁羟推进剂配方中氧化剂粒度级配影响燃速的规律基本一致, 均可通过调节氧化剂粒度级配来调节推进剂的燃速。

收稿日期: 1999-05-25; 修回日期: 1999-11-13

作者简介: 焦继革(1969-), 男, 工程师, 发表论文3篇。

表 2 氧化剂粒度级配对接速的影响

Table 2 Effect of oxidizer particle size combination on burning rate measured by >112 mm motor

铝粉规格	氧化剂	$r'_{6.18}^{(1)}$	$s^{(2)}$	$m^{(3)}$
	粒度级配	/mm · s ⁻¹	/mm · s ⁻¹	
FLQT1	54	4.355	0.52	3
	49	4.470	0.43	3
	44	4.674	0.38	3
FLT1	54	4.329	0.27	3
	49	4.445	0.23	3
	44	4.632	0.55	3

注：1) $r'_{6.18}$ 为样本平均值；2) s 为样本标准差；
3) m 为子样数。

3.2 铝粉形态对推进剂有效燃速的影响

推进剂燃速指标要求 $r'_{6.18}$ 为 (4.51 ± 0.10) mm · s⁻¹, 推进剂静态燃速的温度敏感系数 α_r 为 (0.002 ± 0.0005) °C⁻¹。

从表 3 中燃速数据可看出, 满足燃速指标要求的含球形铝粉推进剂的氧化剂粒度级配值一般在 47 ~ 51 之间, 含非球形铝粉推进剂的氧化剂粒度级配值一般在 42 ~ 47 之间。这说明采用球形铝粉后, 为获得满足设计指标要求的燃速所使用的氧化剂粒度级配值相应较高。换言之, 对于本研究采用的低燃速丁羟推进剂, 若采用球形铝粉替代非球形铝粉可以使该类推进剂的有效燃速升高。

表 3 两类低燃速丁羟推进剂的静态燃烧性能

Table 3 Static combustion behavior of low burning-rate HTPB propellant

铝粉规格	氧化剂粒度级配	$r'_{6.18}$ /mm · s ⁻¹	$n_0^{(1)}$	α_r /°C ⁻¹
FLT1	42	4.567	-	-
	43	4.576	0.29	0.0018
	44	4.475	0.32	0.0020
	45	4.570	0.29	0.0020
	47	4.480	-	-
FLQT1	47	4.547	0.34	0.0019
	48	4.520	0.35	0.0021
	49	4.476	0.35	0.0018
	51	4.424	0.32	0.0020

注： n_0 为推进剂的静态燃速压强指数。

3.3 铝粉形态对推进剂燃速压强指数的影响

由表 3 可知, 含球形铝粉推进剂的静态燃速压强

指数略高于含非球形铝粉的推进剂。

将 >112 mm 发动机测得的不同压强下燃速数据回归可得到动态燃速压强指数, 表 4 列出了一部分含球形铝粉低燃速丁羟推进剂动态燃速压强指数及相关系数。

通过统计计算得到: 当 $m = 45$, 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 燃烧室压强 $p_c = 3\ 068.6 \sim 8\ 132.3$ kPa 时, 含球形铝粉的低燃速丁羟推进剂动态燃速压强指数为 $n_p = 0.3115 \pm 0.0183$ 。

当 $m = 140$, $\alpha = 0.05$, $p_c = 279.7 \sim 857.5$ kPa 时, 含非球形铝粉的低燃速丁羟推进剂动态燃速压强指数^[5]为 $n_p = 0.2964 \pm 0.0110$ 。

比较可知, 含球形铝粉推进剂的燃速压强指数略高于含非球形铝粉推进剂。

3.4 两类推进剂的燃速温度敏感系数比较

从表 3 可看出, 铝粉形态对低燃速丁羟推进剂的燃速温度敏感系数没有显著影响。

一般认为, 铝粉在推进剂中的燃烧经历了铝颗粒的相变、结团、着火、燃烧及燃烧产物的凝聚等过程, 而且燃烧历程在很大程度上决定了铝粉对推进剂燃烧性能的影响程度^[4]。

在推进剂中当铝粉颗粒加热到铝的熔点 (933 K) 时, 铝开始熔化, 但此时其外层的氧化铝仍处于固态, 由于液态铝的膨胀系数高于固态氧化铝, 在氧化铝外壳的应力集中处可能发生外壳的破裂, 从而导致液态铝的流出。在推进剂燃面上铝熔化液有使铝颗粒结团的倾向, 在气相高温下暴露在氧化环境中的铝发生点火、燃烧反应。显然, 在燃面上铝颗粒的结团程度与铝颗粒的表面形状相关, 球形铝粉表面规整, 在燃面上铝粉颗粒的外壳不易破裂, 因此球形铝粉的结团程度低于非球形铝粉颗粒。这可以使铝粉颗粒在燃面附近充分燃烧, 有利于增加铝粉燃烧热向燃面的热反馈。但另一方面, 球形铝粉颗粒不易破碎, 在气相中点火、燃烧的诱导期较长, 这对提高推进剂燃速不利。在低压下, 球形铝粉点火延迟时间长, 从而导致含球形铝粉推进剂的低压燃速低于含非球形铝粉的推进剂。但在高压下, 铝粉颗粒很接近推进剂燃面, 铝粉氧化反应速度增加, 因此点火延迟期的问题占次要地位, 而球形铝粉颗粒凝聚程度小, 实际粒度小, 燃烧快而充分, 因而在较高压强下含球形铝粉的推进剂燃速反而高于含非球形铝粉的推进剂燃速。

表4 含球形铝粉推进剂的动态燃速压强指数及相关系数

Table 4 Burning-rate exponent and relative parameter of spherical aluminum propellant measured by >112 mm motor

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_p	0.2995	0.3459	0.2828	0.2928	0.3137	0.3258	0.3056	0.2931	0.2968
R	0.9980	0.9983	0.9948	0.9989	0.9971	0.9690	0.9807	0.9934	0.9822

4 结 论

(1) 含非球形铝粉与含球形铝粉的低燃速丁羟推进剂的燃速均可通过改变氧化剂粒度级配来调节,这说明两类推进剂的燃烧过程相似。

(2) 含球形铝粉的低燃速丁羟推进剂在较高压强下的燃速和燃速压强指数略高于含非球形铝粉的推进剂,但铝粉形态对低燃速丁羟推进剂的燃速温度敏感系数没有显著影响。

参考文献:

- [1] 赵秀珍. 球形铝粉在丁羟固体推进剂中的应用[J]. 固体火箭技术, 1994, (2): 35-41.
- [2] 金乐骥, 夏强, 李疏芬. 球形铝粉的凝聚/燃烧特性[J]. 固体火箭技术, 1992, (4): 50-54.
- [3] 张步景. 一种通过固体推进剂燃速测试精度的数据处理方法[J]. 〇六六科技, 1986, (4): 3-7.
- [4] 张炜, 朱慧. 固体推进剂性能计算原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1996.
- [5] 倪其龄, 姚煜. 复合推进剂燃速压力指数与温度敏感系数研究[J]. 湖北航天科技, 1995, (2): 16-21.

Effect of Spherical Aluminum on Combustion Behavior of Low Burning-rate HTPB Propellant

JIAO Ji-ge¹, ZHOU Ke¹, ZHANG Wei²

(1. Jianghe Chemical Plant, Yuan'an 444200, China;

2. National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The effect of spherical and non-spherical aluminum powder on the combustion behavior of the low burning-rate HTPB propellant was studied by means of both static burning-rate measurement and firing test of the >112 mm evaluation test motor. The results showed that the burning-rate of the spherical aluminum propellant could be adjusted by means of variation of the particle size combination of the oxidizer. The results also showed that the burning-rate at high pressure and the burning-rate exponent of the spherical aluminum propellant are higher than those of the non-spherical aluminum propellant. There is no remarkable change in temperature sensitive coefficient of burning rate.

Key words: aluminum powder; combustion behavior; HTPB propellant