

30~60 μ m 粗铝粉 (球形、非球形) 在丁羟推进剂中使用研究*

夏强 金乐骥 王桂兰 赵秀媛

(湖北红星化学研究所, 襄樊, 441003)

李 疏 芬

(中国科技大学近代化学系, 合肥, 230026)

摘 要: 研究了 30~60 μ m 粗铝粉 (球形、非球形) 对丁羟推进剂主要性能的影响, 并着重研究了粗铝粉的燃烧特性和能量特性。结果表明粗铝粉在推进剂中使用是可行的。

主题词: 端羟基聚丁二烯推进剂, 含铝推进剂, 铝粉, 燃烧效率, 能量性能

分类号: V435.12

AN INVESTIGATION ON APPLICATION OF 30~60 μ m COARSE ALUMINIUM (SPHERICAL, ASPHERICAL) POWDER IN HTPB PROPELLANT

Xia Qiang Jin Leji Wang Guelan Zhao Xouyuan

(Hubei Red-Star Chemical Institute, Xiangfan, 441003)

Li Shufen

(Department of Modern Chemistry, China University
of Science and Technology, Hefei 230026)

Abstract: The effect of 30~60 μ m coarse aluminium powder (spherical, aspherical) on main performance of HTPB propellant is researched. The emphases are on the combusting and energy characteristic of coarse alluminium powder. The experimental results indicate that coarse aluminium powder can be used in HTPB propellant.

* 本文 1993 年 11 月 22 日收到

Keywords: Hydroxy terminated polybutadiene propellant, Aluminized propellant, Powdered aluminium, Combustion efficiency, Energetic property

1 前 言

目前推进剂使用的铝粉其粒度 $<33\mu\text{m}$, 铝粉军标规定粒度为 $30\pm 3\mu\text{m}$, $24\pm 3\mu\text{m}$, $13\pm 2\mu\text{m}$, 美国军用标准也没有大于 $30\mu\text{m}$ 的铝粉, 文献[1]介绍了用 $60\mu\text{m}$ 铝粉取代 $20\mu\text{m}$ 铝粉在高燃速丁羟推进剂中应用, 使推进剂燃速升高, 压强指数降低。1981年美国三军推进会议报道^[2], 在硝酸酯推进剂中使用了 $90\mu\text{m}$ 铝粉, 但是正式型号推进剂配方中还没有使用粗铝粉的报道。

本文研究了 $30\sim 60\mu\text{m}$ 粗铝粉(含球形、非球形)对丁羟推进剂主要性能的影响, 并着重研究了粗铝粉的燃烧特性, 并通过高精度的BSF165A型发动机比冲测试, 验证了对粗铝粉燃烧行为的分析。试验结果表明, 粗铝粉在推进剂中使用是可行的。

2 试验和试验结果

2.1 试验用原材料及配方

试验用铝粉的化学分析和粒度测试结果列于表1。配方基本组成列于表2, 并按燃速范围将配方划分为A、B、C、D系列。

2.2 粗铝粉对工艺性能及力学性能的影响

粗铝粉对丁羟推进剂工艺性能的影响结果列于表3。从表3可见, 粗铝粉有利于改善推进剂的工艺性能, 尤其是在高燃速配方表现突出。

表1 所用铝粉分析测试结果

铝粉类型	批 号	粒径 $d_{50}\mu\text{m}$	Al%	Fe%	Cu%	Si%
非球形	FLT-3	12.6	97.38	0.26	0.0058	0.263
	FLT-1	31.0	99.36	0.11	0.0038	0.228
	FLT-0	52.0	99.31	0.12	0.0038	0.148
球 形	9002	9.6	99.26	0.18	0.0014	0.084
	90014-1	37.8	99.24	0.14	0.0039	0.125
	QFLV-0 混	59.0*	99.05	0.20	0.0008	0.082

* 用筛分法则 $d_{4.3}$

表2 试验配方基本组成

编号	燃速范围	配 方 组 成 %			
		粘合剂体系	AP	Al	燃速调节剂
A	中燃速	13	73	14	C·C+At 1.15%
B	中燃速	12	70	18	
C	高燃速	15.5	67	16	
D	低燃速	13.5	66	16.5	T ₂₉ 4%

表3 粗铝粉对推进剂工艺的影响*

配方	铝粉类型	铝粉粒径 d_{50} , μm	药浆起始粘度, Pa·s
高燃速	非球形	31.0	736.5
	非球形	61.4	368.7
	非球形	26.2	403.0
	球 形	35.2	327.8
中燃速	非球形	12.6	573.5
	非球形	61.4	482.4
	非球形	17.5	569.7
	球 形	19.3	372.3
低燃速	球 形	36.8	461.5
	非球形	31.0	312.6
	非球形	52.0	298.1
	非球形	11.7	441.5
	球 形	35.2	383.8

子样数 $N=3$

粗铝粉对丁羟推进剂力学性能的影响结果见表4。从表4可见,粒径大的铝粉其推进剂的力学性能优于细铝粉,球形铝粉优于非球形铝粉,球形粗铝粉更好。

2.3 粗铝粉对燃烧性能的影响

粗铝粉对丁羟推进剂燃速和压强指数的影响结果见表5。由表5可见,粗铝粉能使高燃速推进剂燃速升高;使中、低燃速推进剂燃速降低;对压强指数无不良影响。

表4 粗铝粉对推进剂力学性能的影响

铝粉类型	铝粉粒径 $d_{50}, \mu\text{m}$	25℃, $R=100\text{mm/min}$ $\sigma_m/\epsilon_m/\epsilon_b, \text{MPa}/\%/ \%$		
非球形	17.5	1.0	38.2	41.9
球形	19.3	0.94	45.9	51.5
球形	36.8	0.90	52.1	57.1
非球形	11.2	0.77	40.9	46.8
非球形	34.0	0.76	44.5	49.2
球形	13.2	0.76	46.9	51.9
球形	31.3	0.77	53.9	58.5
球形	59	0.67	57.2	63.4

表5 粗铝粉对推进剂燃烧性能的影响

配方	铝粉类型	铝粉粒径 $d_{50}, \mu\text{m}$	6.86MPa下 燃速, mm/s	压强指数 2.94~8.83MPa
高 燃 速	非球形	31.0	24.49	0.32
	非球形	61.4	25.12	0.36
	非球形	69.4	26.10	0.36
中 燃 速	非球形	12.6	7.70	0.36
	非球形	31.0	6.97	0.39
	非球形	61.4	6.38	0.36
低 燃 速	非球形	31.0	4.68	0.35
	非球形	52.0	4.20	0.38
	球形	9.0	5.05	0.40
	球形	35.2	4.46	0.38

2.4 粗铝粉对推进剂能量的影响

采用BSF165A型标准发动机测试推进剂比冲,试验分两次进行,其结果列表6。

表6 BSF165A 发动机试验结果

组别	铝粉类型	铝粉粒径 $d_{50}, \mu\text{m}$	燃速, mm/s, (6.86MPa)		比冲, N·s/kg	
			r	$\bar{r}$	I_{sp}^{15}	$\bar{I}_{sp}^{15}$
I	非球形	13.0	8.08	8.11	2419	2421
			8.14		2423	
	非球形	61.4	7.14	7.34	2414	2411
			7.34		2415	
			7.26		2407	
			7.77		2411	
II	球形	16.1	7.42	7.63	2408	2411
			7.70		2414	
			7.40		2412	
	球形	59.0	7.35	7.32	2417	2414
			7.21		2413	
			7.21		2413	

表 6 是固体含量为 88% (其中 AP=70%, Al=18%) 中燃速丁羟推进剂配方, 比冲实测结果表明, 与细铝粉比较, 粗铝粉对推进剂能量无不良影响。

3 铝粉表面特性及燃烧性能分析

3.1 球形粗铝粉的表面特性

球形粗铝粉包含二个因素的变化: 球形化和粒度增大。球形粗铝粉的表面特性分析结果如下。

3.1.1 表面形状

图 1 为典型的球形铝粉和非球形铝粉扫描电镜照片, 从相片上看, 球形铝粉表面规整; 而非球形铝粉形状极不规则。

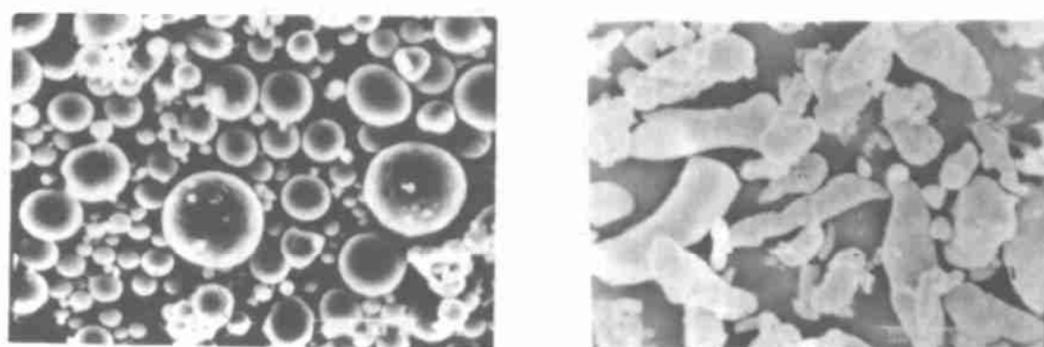


图 1 球形铝粉和非球形铝粉扫描电镜相片

3.1.2 表面氧含量和氧化层厚度

表 7 为不同厂家提供的样品所测得的表面氧含量和氧化层厚度。表 7 的结果表明, 球形铝粉表面氧含量和氧化层厚度显著低于非球形铝粉, 并随粒度增大而急剧下降。

3.1.3 比表面积

不同粒径铝粉比表面积测量结果列于表 8。表 8 的结果表明, 在相同粒径时, 球形铝粉比表面积明显小于非球形铝粉, 并随粒径增大, 有规律地减小。

表 7 铝粉表面氧含量和氧化层厚度

铝粉样品 提供单位	雾化 介质	铝粉 类型	粒径 d_{50} μm	表面含氧 量, ppm	氧化层厚 度, $\text{\AA}$
有色院	Ar	球形	64	25	50
力学所	N ₂	球形	40	850	200~300
矿冶院	H ₂ O	非球形	34	2300	500~600

表 8 不同粒径铝粉的比表面积

样品编号	铝粉类型	粒 径 $d_{50}, \mu\text{m}$	比表面积 m^2/g
9007-1 [#]	球 形	51.1	0.073
9007-2 [#]	球 形	38.9	0.083
9007-3 [#]	球 形	10.7	0.190
FLT-1	非球形	34	0.127

综合以上结果可知, 铝粉球形化和粒度增大, 可降低铝粉的比表面积、表面含氧量和氧化层厚度, 这对于提高活性铝含量、改善推进剂药浆的流动性非常有利。

3.2 粗铝粉燃烧行为

3.2.1 高温显微镜加热试验

使用日本 Union 公司的 HM-41331 高温金相显微镜观察了两种铝粉在加热条件下集聚/凝聚行为。加热到某一温度时的录相记录示于图 2。当温度升至 550℃ 时,非球形铝粉粒子串联成条,已有明显的熔联;而球形铝粉相互靠拢,虽有一定程度的集聚,但没有熔联行为;当加热到 750℃ 时,非球形铝粉已形成大的凝滴,而球形铝粉形成的凝滴小得多。试验所用球形铝粉粒径比非球形铝粉粒度小,按一般规律,铝粉粒度小的凝聚应较严重^[3],但是球形铝粉表面规整,应力集中点少于非球形铝粉,可承受较大的应力,铝不易突破三氧化二铝薄膜,所以熔联程度小。因此,球形铝粉凝聚程度小于相当粒径的非球形铝粉。

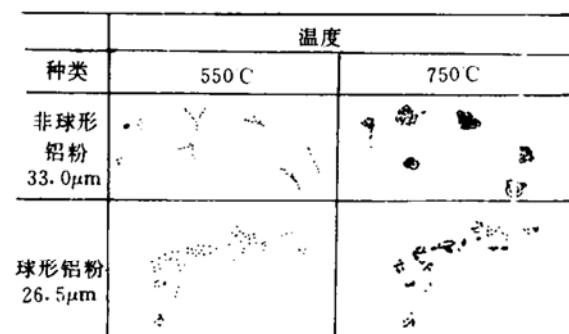


图 2 两种铝粉高温加热试验

3.2.2 单幅近距摄影

利用中国科大近代化学系研制的 KD-4203 型近距摄影装置拍摄全火焰区的单幅照片,并用带自动记录的 MD-100 型显微密度计进行负片光密度分析。

表 9 是固体含量为 83% (其中 AP=69%, Al=14%) 的丁羟推进剂配方近距摄影结果。

从表 9 的结果看,粗铝粉在推进剂燃面的凝滴尺寸明显小于细铝粉,球形粗铝粉的最小。底片光密度反映了铝凝滴在燃面反应的剧烈程度,从光密度数据看,粗铝粉在燃面反应的剧烈程度低于细铝粉。

3.2.3 点火性能测试

表 10 为丁羟推进剂药条点火延迟期测量结果。表 10 的结果表明,随着粗铝粉含量的增加,点火延迟期变长,这表明铝粉粒度减小,有利于点火。

表 9 近距摄影测量结果

样品编号	铝粉类型	粒径 d_{50} μm	铝凝滴平均 粒径 d_w , μm	底片光 密度
RA19022	非球形	13	268	0.33
RA19024	球形	11.9	249	0.25
RA19026	非球形	60.4	169	0.18
RA19028	球形	59.1	150	0.14

表 10 点火性能测试结果

配方编号	球形铝粉粒径 d_{50} , μm	6.86MPa 下燃 速, mm/s	τ 点火延迟 期, s
RA19036	13	7.75	2.562
RA19039	13 : 61 = 1 : 1	7.16	3.000
RA19041	13 : 61 = 1 : 3	6.71	3.979

由于粗铝粉单颗铝粉的热容增大和铝粉比表面积降低,使铝粉在推进剂燃面形成的凝滴减小,铝粉球形化后由于表面形状改善和比表面积进一步降低,使球形粗铝粉形成的凝滴会进一步减小,这有利于燃烧。但铝粉粒径增大,点火困难,凝滴燃烧特性变差,球形铝粉表面规整,应力集中点少,不易破裂,点火更困难,不利于燃烧完全。在一般配方中使用 30~60 μm 粗铝粉,这两个因素可能相互抵消,以致不会影响推进剂能量发挥,实验证实了这一点。

4 结 论

在丁羟推进剂中使用 $30\sim 60\mu\text{m}$ 粗铝粉有助于改善丁羟推进剂工艺和力学性能,且球形铝粉优于非球形铝粉;粗铝粉使高燃速丁羟推进剂燃速升高,使中、低燃速丁羟推进剂燃速降低;发动机比冲测试、铝粉表面性能和燃烧性能分析表明粗铝粉对丁羟推进剂能量无影响, $30\sim 60\mu\text{m}$ 粗铝粉在丁羟推进剂中使用是可行的。

参 考 文 献

- [1] McGee L R, Munson W Q. Development of HTPB Propellant for the SRAM Motor. AIAA 78-173
- [2] Gonzmer C. A Low Burn Rate CTBN Propellant. JANNAF Propulsion Meeting, 1981, 1: 447~461
- [3] 金乐骥,李疏芬. 铝粉凝聚的海绵模型. 宇航学报, 1989 (3)

简 讯

航空喷气公司试验俄罗斯 以氧化剂为冷却剂的小推力发动机

作为试验、改进和销售俄罗斯稍大发动机的一种尝试,五月中旬航空喷气公司在萨克拉门托的试验场进行了一台俄罗斯 400N 小推力发动机 (LTRE400N) 的点火试验。几年前航空喷气公司与俄机械工程局的研究设计院 (R&DIME) 签订了借用 LTRE400N 并获得技术援助的合同,此次试验 R&DIME 国际关系负责人和火箭构件设计负责人到场。发动机于 5 月 17 日用船运回俄罗斯。

试验测得的性能与制造厂的要求相符,甚至在使用不同燃料时性能还有所提高。LTRE400N 的新颖之处在于它采用了氧化剂膜冷却燃烧室和喷管。它的成本仅为西方类似发动机的 10%。发动机重 2.5kg,用 3mm 厚的不锈钢制造,喷管扩张比为 $56:1$,出口直径 150mm,额定燃烧室压力 655Pa,氧化剂为四氧化二氮,燃料为偏二甲基肼 (UDMH),航空喷气公司还增加了以一甲基肼 (MMH) 为燃料的试验,以 UDMH 为燃料的氧化剂/燃料混合比为 $1.9:1$,对 MMH 的相应值为 $1.55:1$ 。共进行了 24 次点火,包括用 UDMH 的 10 次。测得的真空比冲为 $2480\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$,在点火 20s 后增大。改用 MMH 时,比冲跃至 $2873\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$,但喷管温度也明显增高,从 366K 到稳定值 644K。

史亚红 供稿