

# 高温高压环境中凝相颗粒粒度分布实验研究\*

彭小波,张胜敏,万小鹏

(西北工业大学,西安 710072)

**摘要:**为了研究固体火箭发动机燃烧室内凝相颗粒的分布规律,改进了一种固体推进剂凝相燃烧产物收集装置,针对典型的HTPB复合推进剂,开展了不同聚集状态下凝相颗粒的收集实验。研究表明,凝相燃烧产物在 $0.27 \sim 100\mu\text{m}$ 之间都有颗粒存在,凝相颗粒主要集中在 $0.27 \sim 10\mu\text{m}$ 之间,粒径大于 $20\mu\text{m}$ 的颗粒较少;工作压强对颗粒粒径分布有较大影响,随着工作压强的升高,凝相颗粒粒径变小,粒度分布更为集中;工作压强相同的条件下,随着聚集角度的增加,凝相颗粒粒径变大。

**关键词:**固体火箭发动机;燃烧室;凝相颗粒;粒子收集;粒度分布

**中图分类号:** V435 **文献标志码:** A

## The Experimental Investigation on Condensed Particle's Size Distribution in High-temperature and High-pressure Condition

PENG Xiaobo, ZHANG Shengmin, WAN Xiaopeng

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A device was improved to collect the condensed particles of the solid propellant. The typical HTPB composite propellant containing 17% aluminum was experimentally investigated under different condition. Collection experiments and particle size analysis were performed so as to investigate the effects of operation pressure and concentration degree on particle size distribution. The experimental results show that the range of particle size is from  $0.27\mu\text{m}$  up to about  $100\mu\text{m}$ . The majority of particle size is from  $0.27\mu\text{m}$  to  $10\mu\text{m}$ . The result indicates that the particle size distribution is primarily dictated by the operation pressure. The particle size is reduced with increasing pressure, at the same time the diameter distribution is concentrated. It is found that the particle diameter is raised with the increase of the concentration degree.

**Keywords:** solid rocket motor; combustion chamber; condensed particle; particle collection; size distribution

### 0 引言

随着对导弹性能要求的不断提高,大多固体火箭发动机采用含铝量较高的复合推进剂,发动机工作过程中将产生大量的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒。由于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒粒径分布对发动机工作性能有较大影响,因此有必要开展发动机燃烧室内凝相颗粒的粒度分布实验研究。

国内外对固体火箭发动机燃烧室内的凝相颗粒开展了大量的研究工作,得到一些有价值的研究成果。文献[1]设计了一种独特的飞镖系统,对静止点火的固体火箭发动机羽流场中的颗粒进行了采集和测量,测量结果表明,颗粒尺寸分布从亚微米到 $40\mu\text{m}$ ,质量平均粒径为 $8 \sim 11\mu\text{m}$ 。文献[2]运用激光全息装置测量了含铝推进剂燃烧场凝聚相的尺寸分布,分析了滞留时间、铝含量和燃烧室压强对凝相颗

粒尺寸分布的影响。文献[3-4]对聚集状态下固体火箭发动机的颗粒粒度进行了实验研究,由于实验过程中随流性好的小粒子从喷管排出,因此得到的实验结果较真实情况偏大。文献[5]对固体脉冲推力器排气羽烟中的颗粒粒度进行了分析,得到推进剂燃烧产物的中位径约为 $39\mu\text{m}$ 。文献[6]发展了一种双容器粒子收集装置,但实验过程中压强波动较大,不利于准确分析压强对凝相燃烧产物粒度分布的影响。文献[7]设计了一种对称双喷管结构的粒子收集装置,对固体火箭发动机燃烧室收敛段不同部位的颗粒进行了收集与分析,结果表明,颗粒质量平均粒径在 $22.3 \sim 34.2\mu\text{m}$ 之间。

文中改进了一种凝相颗粒收集装置,针对目前常用的HTPB复合推进剂,通过精确控制实验器中的压强,获得了不同聚集状态下的凝相燃烧产物,进而利用

\* 收稿日期:2011-06-02

作者简介:彭小波(1972—),男,陕西汉中,研究员,博士研究生,研究方向:航空宇航推进理论与工程。

粒度分析仪、扫描电镜对凝相燃烧产物进行了分析。

### 1 实验装置与测量方法

#### 1.1 实验装置

文献[6]发展了一种双容器粒子收集装置,其基本设计思想是利用冷却液来冻结固体推进剂的燃烧产物,用两个连通的高压容器分别来实现粒子收集功能和压强保持功能。该装置的优点在于整个实验装置是个密闭空间,能够对燃烧产生的全部粒子进行收集,保证了粒度分析的精确性。不足之处是在推进剂燃烧过程中,高压容器内的压强波动较大(实际压强峰值比预设压强要高出 1.3MPa),不利于准确分析工作压强对凝相燃烧产物粒度分布的影响。

要准确分析工作压强对凝相粒子燃烧特性的影响,必须保证推进剂燃烧过程中工作压强的平稳。文中在文献[6]的基础上改进了粒子收集系统,去掉了压强保持容器,在粒子收集容器底部增加了排水卸压流量控制装置,燃气生成的瞬间从粒子收集容器底部喷射出水,来保持粒子收集容器内部工作压强的稳定。

为了研究高过载及潜入喷管在背壁区出现的高浓度颗粒流聚集现象对发动机工作性能的影响,需要研究高浓度颗粒流中的颗粒粒径。文中通过改进燃烧室构型,增加收敛段,可以较好的研究不同聚集状态下颗粒的粒度分布情况。粒子收集实验装置如图 2 所示,主要有燃烧室、收敛段、收集罐、充气孔、排气阀、冷却水以及排水与过滤装置等部分组成。

#### 1.2 颗粒测量方法

目前,粒度测定的方法有多种,文中采用激光粒

度分析仪 Mastersizer2000 对收集到的凝相颗粒进行粒度测定。该仪器应用了完全的米氏(Mie)光散射理论,提高了对微小粒子测量的精度(测量精度可达  $0.001\mu\text{m}$ ),克服了老式粒度分析仪采用夫朗和费(Franhofer)近似光散射理论所带来的测量范围受限制、漏检率大等问题。采用 JSM-5800 扫描电镜对凝相颗粒样品进行分析。

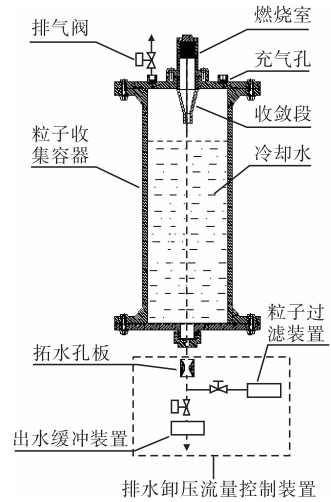


图 2 粒子收集装置示意图

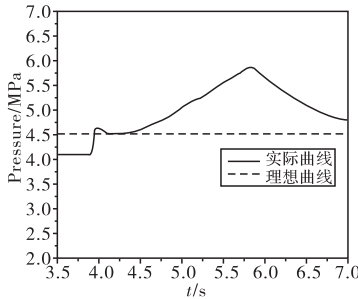


图 1 压强 - 时间曲线(文献[6])

### 2 实验结果与分析

#### 2.1 实验状态参数

采用含铝量 17% 的 HTPB 复合推进剂,燃气温度约 3410K,药柱直径为  $\Phi 30\text{mm}$ ,端面燃烧。燃烧室分别采用无收敛角和收敛角度为  $25^\circ$  和  $50^\circ$  三种构型的燃烧室,三种构型燃烧室的总长度相同, $25^\circ$  和  $50^\circ$  收敛段的出口截面相等。

#### 2.2 实验结果分析

有效开展粒子收集实验 5 次。图 3 为本实验装置典型的压强 - 时间曲线图,从图 3 中可以看出,在推进剂燃烧过程中,收集器内的工

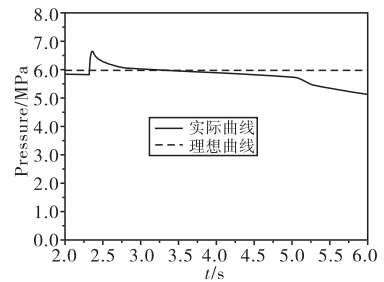


图 3 压强 - 时间曲线(5.88MPa)

作压强平稳度较好,说明排水卸压流量控制装置作用效果明显。表 1 为各次实验的颗粒粒度测量结果。

表 1 颗粒粒度测量结果

实验序列	压强/MPa	收敛角/ $(^\circ)$	粒子数随粒径变化的百分比/%				$d_{43}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{32}/\mu\text{m}$
			0.27 ~ 1.0 $\mu\text{m}$	1.0 ~ 10.0 $\mu\text{m}$	10.0 ~ 20.0 $\mu\text{m}$	> 20.0 $\mu\text{m}$			
1	9.15	0	22.86	77.14	—	—	2.37	2.05	1.44
2	7.18	0	17.58	78.30	2.39	1.73	3.72	2.59	1.67
3	5.88	0	9.61	79.95	6.89	3.55	5.43	4.36	2.83
4	5.92	25	8.90	73.08	15.12	2.90	8.39	6.43	3.24
5	5.86	50	4.93	58.46	29.89	6.72	9.62	7.56	3.63

注:  $d_{43}$  - 质量平均粒径;  $d_{50}$  - 中位径;  $d_{32}$  - 体积平均粒径。

图4为不同压强下凝相颗粒粒度分布曲线图。由图4结合表1可以看出,燃烧室压强为5.88MPa时,颗粒质量平均粒径为 $5.43\mu\text{m}$ ,颗粒粒径主要集中在 $0.5\sim 20\mu\text{m}$ 之间,约有96.5%的颗粒粒径小于 $20\mu\text{m}$ 。燃烧室压强为7.18MPa时,颗粒质量平均粒径为 $3.72\mu\text{m}$ ,颗粒粒径主要集中在 $0.27\sim 10\mu\text{m}$ 之间,约有96%的颗粒粒径小于 $10\mu\text{m}$ 。燃烧室压强为9.15MPa时,颗粒的质量平均粒径为 $2.37\mu\text{m}$ ,颗粒粒径主要集中在 $0.27\sim 6.5\mu\text{m}$ 之间,约有98%的颗粒粒径小于 $6.5\mu\text{m}$ 。由此可见,压强对燃烧室内的颗粒粒度分布影响较大,随着压强的升高,颗粒粒度分布向小粒径方向集中,颗粒的质量平均粒径变小。分析原因,随着燃烧室压强的升高,推进剂的燃速增大,熔融态的铝颗粒受到的热应力和气动压力之和更容易大于其表面张力,使得铝颗粒更容易发生破碎,铝颗粒的燃烧效率增加,更容易生成小颗粒。

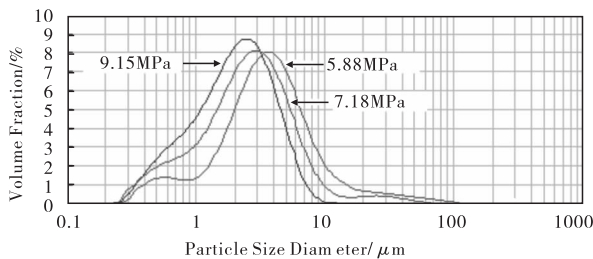


图4 不同压强颗粒粒度分布

图5为不同收敛角度下的颗粒粒度分布曲线图。由图5结合表1可以看出,在燃烧室压强基本相同的条件下,颗粒不经过汇聚作用时,颗粒质量平均粒径为 $5.43\mu\text{m}$ ,约有10.4%的颗粒粒径大于 $10.0\mu\text{m}$ ;颗粒经过 $25^\circ$ 收敛段的汇聚作用后,颗粒质量平均粒径为 $8.39\mu\text{m}$ ,约有18%的颗粒粒径大于 $10.0\mu\text{m}$ ;当颗粒经过 $50^\circ$ 收敛段汇聚作用后,颗粒质量平均粒径为 $9.62\mu\text{m}$ ,约有36.6%的颗粒粒径大于 $10.0\mu\text{m}$ 。由此可见,收敛角度对燃烧室内的颗粒粒度有一定的影响,随着收敛角度的增加,颗粒之间发生碰撞聚合的效应增强,使得颗粒粒径增大。

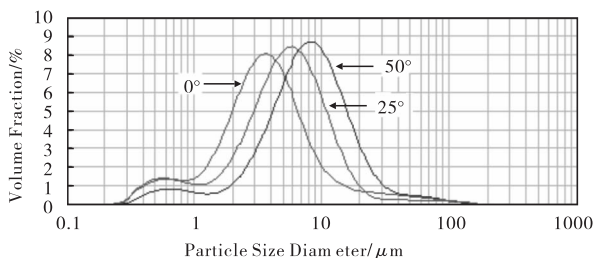
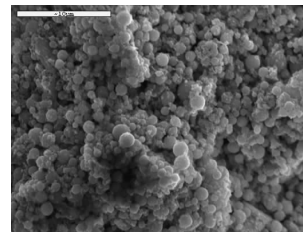


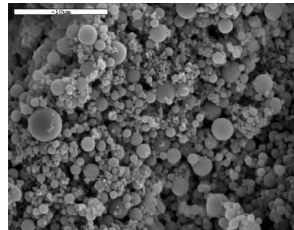
图5 不同收敛角颗粒粒度分布

利用扫描电镜对收集到的凝相颗粒进行分析,图6是凝相颗粒扫描电镜照片,可以看出,绝大多数凝相

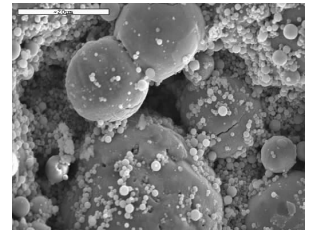
颗粒为表面光滑、外形规则的实心球体,颗粒群是典型的多尺度分布。部分外形不规则(中空、团聚、开裂、哑铃等结构)的大颗粒,多数是由多个小颗粒碰撞聚合而形成的。



(a) 实验1 (4000x)



(b) 实验3 (4000x)



(c) 实验5 (2000x)

图6 扫描电镜照片

### 3 结论

1) 改进了一种固体火箭发动机燃烧室凝相颗粒的收集方法,可以用来开展不同聚集状态下固体推进剂凝相燃烧产物的燃烧特性分析,获得全面、可靠的实验数据。

2) 对含铝量17%的HTPB复合推进剂的实验研究表明,固体火箭发动机燃烧室内的粒子分布在 $0.27\sim 100\mu\text{m}$ 之间,颗粒粒径主要集中在 $0.27\sim 10\mu\text{m}$ 之间,约有96.5%的颗粒粒径小于 $20\mu\text{m}$ 。

3) 工作压强对燃烧室内凝相颗粒的粒度分布有一定的影响,随着工作压强的升高,凝相颗粒粒度变小,粒度分布更为集中;在工作压强基本相同的条件下,随着收敛角度的增加,凝相颗粒的粒径变大。

4) 燃烧室内的凝相颗粒绝大多数为表面光滑、外形规则的实心球体,颗粒群是典型的多尺度分布;外形不规则的大颗粒,多数是由多个小颗粒碰撞聚合而形成的。

#### 参考文献:

- [1] Brennan W D, Hovland O L, Netzer D W. Measured particulate behavior in a subscale solid propellant rocket motor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8 (5): 954-960.
- [2] 张明信, 王国志, 魏剑维, 等. 影响 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 凝相尺寸分布的因素[J]. 推进技术, 2001, 23(1): 250-257.
- [3] 刘洋, 何国强, 李江, 等. 聚集状态下凝相颗粒的收集与测量[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 477-480.
- [4] 李江, 姜永春, 刘洋, 等. 聚集状态对固体火箭发动机颗粒粒度分布的影响[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(4): 265

- 267.

[5] 周海清, 尤政, 张平. 固体脉冲推力器羽烟粒度分布检测 [J]. 推进技术, 2006, 27(3): 285 - 288.

[6] 刘佩进, 白俊华, 杨向明, 等. 固体火箭发动机燃烧室凝相粒子的收集与分析 [J]. 固体火箭技术, 2008, 31(5):

461 - 463.

[7] 张胜敏, 胡春波, 徐义华, 等. 固体火箭发动机燃烧室凝相颗粒燃烧特性分析 [J]. 固体火箭技术, 2010, 33(3): 256 - 259.

(上接第 81 页)

降低, 耦合系数大小变化不明显; 宽边尺寸增加时, 共振频率无变化, 耦合系数显著增大。分析认为, 矩形孔缝的共振频率主要受长边的影响, 而孔缝的短边对耦合系数大小具有重要影响, 与文献[2]中实验结论相符。

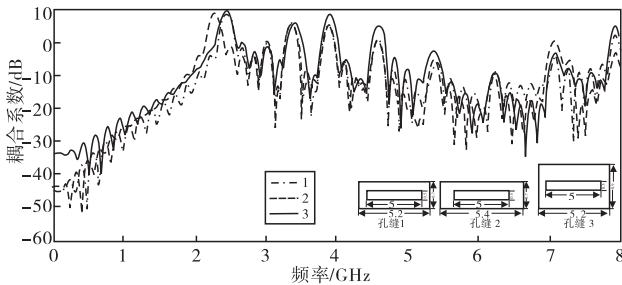


图 9 孔缝参数对耦合系数的影响

### 3.4 弹翼对耦合特性的影响

弹翼对导弹电磁散射具有重要影响, 为分析弹翼对弹体孔缝耦合特性的影响, 在相同孔缝的基础上, 分别对有弹翼时电磁脉冲不同入射方向和无弹翼时电磁脉冲的耦合特性进行仿真研究(图 10)。可见, 弹翼的反射和边缘绕射效应改变了空间中场的分布, 对电磁脉冲耦合产生了影响。斜入射时弹翼使传播到孔缝方向的电磁能量增加, 耦合效应增强, 在 L 频段增强效应比较明显; 但共振频率未见显著变化; 电磁脉冲水平入射时, 弹翼对耦合系数影响较小, 再次说明弹翼的反射和绕射对耦合系数的大小存在影响, 但对孔缝共振频率没有影响。

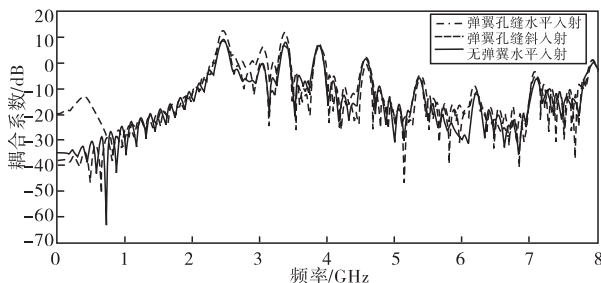


图 10 弹翼对耦合特性的影响

## 4 结论

围绕弹体孔缝强电磁脉冲耦合效应, 采用有限积分法重点研究了弹翼孔缝的耦合特性。通过对比分析不同极化方向、不同入射方向、不同弹体孔缝和弹翼对耦合系数的影响, 得到以下几点看法: 弹翼孔缝与简单腔体上孔缝的耦合特性具有相似的特点, 即: 共振频率与矩形孔缝长边的尺寸密切相关, 宽边尺寸影响耦合能量的大小; 同时弹翼孔缝存在自身特点, 即: 弹体弹翼改变了空间的场分布, 影响孔缝耦合系数的大小, 在分析弹体耦合特性时不能被忽略。为了更深入了解强电磁脉冲对导弹的耦合特性, 还需开展腔体内线缆和部件耦合特性的研究。文中研究的内容对提高强电磁脉冲武器反导作战效能和导弹抗强电磁脉冲打击能力具有一定意义。

### 参考文献:

[1] 王建国, 刘国治, 周金山. 微波孔缝线性耦合函数研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1093 - 1099.

[2] 周金山, 刘国治, 彭鹏. 不同形状孔缝微波耦合的实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 88 - 90.

[3] Weiland T. On the numerical solution of Maxwell's equations and applications in the field of accelerator physics [J]. Particle Accelerator, 1984, 15: 245 - 292.

[4] Weiland T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods [J]. International Journal of Numerical Modeling, 1996, 9(4): 295 - 319.

[5] 李德玺. 圆柱坐标系有限积分方法仿真耦合腔高频特性 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.