

聚集状态下凝相颗粒的收集与测量^{*}

刘 洋, 何国强, 李 江, 陈 剑, 娄永春

(西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 发展了一种可以收集燃烧室中聚集状态颗粒的方法, 研制了收集实验装置。数值计算表明, 通过改变实验装置的收敛角和实验状态参数可以模拟真实发动机中的颗粒聚集状态。利用该实验装置开展了聚集颗粒收集实验, 实验工况模拟了某高过载发动机在横纵向过载均为 40 g 时的颗粒聚集状态。对实验收集到的颗粒进行了电镜分析, 发现大颗粒是由多个小颗粒聚合而成, 说明聚集状态下颗粒间碰撞聚合的概率大大增加。对粒径分布进行了半定量的统计, 与非聚集状态下的发动机燃烧室中的粒径分布作了比较, 证明聚集状态下粒径要比非聚集状态下的的大得多。

关键词: 固体推进剂火箭发动机; 燃烧室; 复合推进剂; 颗粒; 粒度分布; 颗粒大小

中图分类号: V512.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 05-0477-04

Collection and measurement condensed particle under aggregation condition

LIU Yang HE Guo-qiang LI Jiang CHEN Jian LOU Yong-chun

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract A method to collect high-density particle stream in chamber of SRM was developed. A particle collection facility was designed based on the rule of particle colliding and congregating in high acceleration SRM. Three-dimensional two-phase numerical simulations were carried out to show the feasibility of this method and that the facility could simulate the state of condensed particle in aggregation condition. The particle collecting experiments were carried out by test facility and the case was similar to that in the chamber of rocket motor with 40 g longitudinal and lateral accelerations. The collected particles were analyzed by Scanning Electron Microscope. The coagulate pattern of particle showed that the diameter of particle increasing with concentration of particle cluster. Semi-quantitative Statistics was applied to measure the particle size. Compared with the particle size distributions measured by laser holographic in normal motor, it can be concluded that particle size under aggregation condition was greater than normal.

Key words Solid propellant rocket motor; Combustion chamber; Composite propellant; Particle; Granularity distribution; Particle size

1 引 言

随着对固体火箭发动机性能提高的不断要求, 现在大多发动机都采用较高含铝量的复合推进剂, 这样发动机工作过程中将产生大量的凝相颗粒, 形成典型的两相流动。而在很多情况下, 发动机内会形成颗粒聚集现象, 例如飞行过载会改变发动机内凝相颗粒的运动规律, 造成颗粒的局部聚集^[1~2]; 复杂装药 (深窄

翼槽) 的发动机在工作过程中颗粒也会产生聚集。颗粒聚集后浓度增加, 颗粒之间发生碰撞、聚合、破碎的概率大大增加, 其粒径大小会发生很大变化。不同粒径的凝相颗粒聚集后会对发动机燃烧室内流动、燃烧、热结构等产生较大的影响, 这些影响与粒度特性有很大关系, 因此开展聚集状态下颗粒的收集和测量具有重要的意义。

国内外在颗粒收集和测量方面开展了较多研

^{*} 收稿日期: 2004-11-08 修订日期: 2005-01-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50376054)。

作者简介: 刘 洋 (1979—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

究^[3~5],也得到了有价值的研究结果。目前对发动机颗粒收集方法主要通过机械方法^[6]来实现,有硬质盘法、密闭容器法、探针采样法和带有微粒采样器的飞行器法等。但上述的方法对于进行聚集状态下的颗粒收集都有一定的局限性。一是聚集状态下的颗粒反应的是燃烧室中的一种局部特性,创造这种聚集状态并收集下来具有一定的难度;二是上述方法多采用收集发动机羽流中的颗粒,与燃烧室内会有一定差别。因此上述方法对于聚集条件下的颗粒收集都不能直接采用,需要采用其他方法来进行开展。文献[7,8]中提出了一种产生聚集颗粒流的试验方法,用来模拟高过载条件下发动机内形成的高浓度颗粒流。主要原理是利用燃气经过收缩通道时,凝相颗粒由于惯性作用会向中心聚集,从而形成高浓度颗粒流。数值模拟和烧蚀实验表明颗粒浓度、速度以及冲刷角度都是可以模拟高过载状态的。本文在此基础上发展了一种产生高浓度颗粒流并且可以收集燃烧室中聚集颗粒的方法。

2 实验装置设计

发动机尾流中收集到的颗粒经过了一个加速、与喷管撞击破碎以及相变的过程,不可能真实的反映燃烧室中颗粒的状态,并且尾流中的颗粒是整个燃烧室中的颗粒集合,不能代表聚集状态下的颗粒特性。因此,如何收集到能够真实反映燃烧室中聚集状态的颗粒,是本文重点解决的问题。本文利用颗粒的运动特点提出了一种颗粒收集方法。

颗粒收集试验装置结构如图1所示。颗粒收集原理是:燃气发生器产生的燃气流经过收缩管时达到一定速度,其中的颗粒在收敛段的汇聚作用下达到一定的浓度和速度,聚集颗粒流由于惯性作用继续向前运动进入收集罐,收集罐内盛有冷却介质,颗粒射入后被瞬时冻结,从而保持了在燃烧室中的颗粒聚集几何形态,实现颗粒的收集。

根据以往研究和已经开展的高过载发动机地面试验的颗粒残渣结果,认为燃烧室压强、颗粒群的聚集状态(包括颗粒云浓度、颗粒速度等)、颗粒在发动机中的滞留时间以及颗粒初始大小等因素对最终粒径大小有影响作用。因此要开展高过载条件下的粒度特性研究,需要进行试验来分析以上这些影响因素和粒度之间的关系,这就要求实验装置能对这些影响因素的程度进行调节和控制,并能确定实验状态下的参数数值。本文发展的实验装置采用如下的参数调

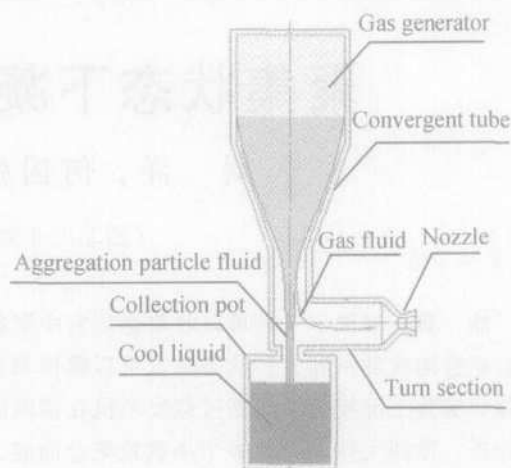


Fig 1 Sketch of particle collecting facility

节和确定方法:

(1)压强可以通过改变燃面和喉径来进行调节,实验时测量燃烧室压强;

(2)颗粒浓度主要通过调整推进剂中铝粉含量以及调节收缩通道构型,聚集后的颗粒浓度要通过两相流数值模拟来确定。

3 数值验证

这种实验装置能否模拟并收集到聚集状态下固体火箭发动机燃烧室内形成的高浓度颗粒,需要开展两相流数值模拟来予以验证。两相流计算模型采用欧拉-拉格朗日法,即气相流场在欧拉坐标系下求解三维N-S方程,颗粒相在拉格朗日坐标下跟踪求解,颗粒相与气相之间的质量、动量和能量交换通过控制方程中的源项作用到气相上。气相流场采用二阶迎风格式进行离散,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。碰撞恢复系数和颗粒粒径分布对于计算来说是很关键的参数,恢复系数根据文献[9]及以往研究中积累的经验取值,法向和切向大小均为0.8。但粒径大小是我们所要研究的对象,根据以前高过载发动机实验后的颗粒残渣,可知颗粒直径大小分布很广,因此选取粒径大小在10~200 μm 之间的多点进行了计算。计算发现在设计状态的燃气冲刷速度下,粒径在20 μm 以下的由于随流性好,大部分颗粒流出喷管,而大于20 μm 的颗粒绝大部分进入收集罐中。图2为粒径大小为50 μm 时的颗粒运动轨迹计算结果。

另外,收集装置是否能够模拟真实发动机在高过载条件下颗粒的聚集状态,这也需要进行数值来验证,文献[4]中针对某种高过载发动机开展了不同过载条件下的三维两相流场的数值模拟,在纵横向过载为40g条件下的颗粒最大浓度为135 kg/m^3 ,本文对

于不同收敛角度 ($20^\circ \sim 80^\circ$) 下的实验装置进行了数值验证, 通过计算结果可以得知颗粒聚集状态随着收敛角度不同而改变。计算结果表明, 收敛角为 40° 时颗粒浓度达到了 130 kg/m^3 , 另外实验装置和高过载发动机中的颗粒速度大小也是相当的, 因此数值计算表明该实验装置可以模拟高过载发动机中的颗粒状态。

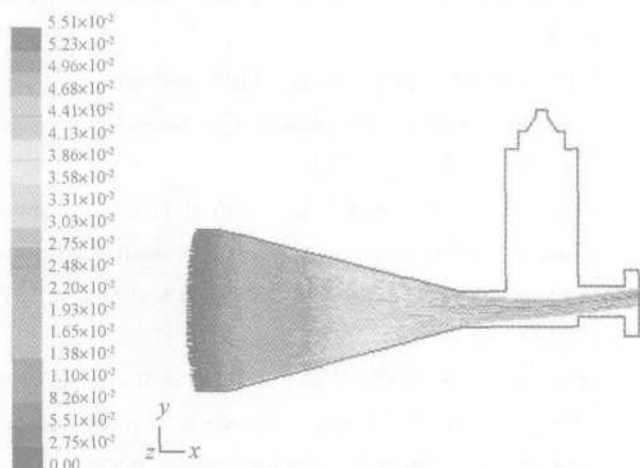


Fig 2 Computational result of particle traces

4 颗粒收集实验

4.1 实验状态参数

推进剂采用含铝 17% 的复合推进剂, 燃气温度约为 3400 K 。装药为端面燃烧, 燃气流量为 0.12 kg/s 设计压强 5 MPa 收敛段夹角为 40° , 工况模拟某高过载发动机纵横向过载为 $40g$ 条件下的颗粒聚集状态。

4.2 实验结果分析

实验测得平均压强为 4.75 MPa 工作时间 1.5 s 。理论计算凝相颗粒 (认为全部反应为 Al_2O_3) 质量为 57.6 g 实验结束后, 收集罐中收集到颗粒质量为 24.5 g 主要原因是收敛段表面有大量凝相成分沉积。

对收集到的颗粒进行了扫描电镜分析, 图 3 和 4 分别是颗粒群 (放大 60 倍) 和单个颗粒 (放大 800 倍) 在扫描电镜下的形态。从颗粒群图像中可以看出, 颗粒群是典型的多尺寸分布, 且无论颗粒直径大小, 均无因破裂产生尖锐棱角形态, 因此认为颗粒在进入冷却介质时由于相变引起的热应力并未对其造成破坏。一小部分颗粒的形状接近球体, 而大部分的颗粒形状不规则, 可以发现不规则颗粒一般是由多个颗粒聚合而成的, 而且很多大颗粒上还嵌有若干小颗

粒。从单个颗粒的微观图像上也可以清楚地看到颗粒的聚合形态。

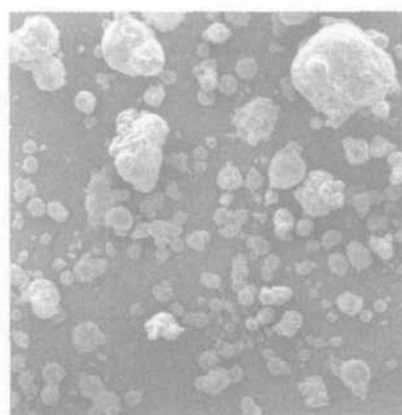


Fig 3 Particle cluster image under SEM

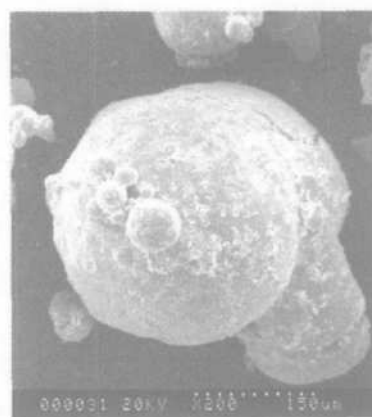


Fig 4 Single particle image under SEM

由此表明, 随着颗粒的密集程度升高颗粒之间聚集的概率也大幅度增加, 因此颗粒的大小也会相应增加, 这个过程与高过载发动机中稠密颗粒流形成的过程相似。

5 粒径分布

粒径测量结果是通过扫描电镜图像进行数据处理获得的, 该结果为半定量值, 较精确数值可通过马尔文激光粒度分析仪对收集到的颗粒进行测量而获得。由于颗粒直径统计是事后进行的, 考虑到燃烧室的颗粒温度和测量时的温度相差很大, 温度对直径的影响不容忽视, 因此对收集到的颗粒直径测量结果进行了修正, 根据颗粒物质密度随温度变化的关系可以计算得到燃烧室内粒子的粒径比室温下约大 18.6% 。图 5 中分别给出了文献 [10] 中发动机燃烧室中非聚集状态下粒径按颗粒数分数分布, 以及本文试验得到的聚集状态下的粒径 (已修正) 按颗粒数分数分布, 文献中颗粒直径是利用激光全息方法测量得

到的。表 1 分别给出了文献和本文试验得到的颗粒的线性平均直径 (d_{10}) 和质量平均直径 (d_{43})。

Table 1 Diameter of particles

	$d_{10} / \mu\text{m}$	$d_{43} / \mu\text{m}$
Test result	43 68	194 07
Reference	14 85	29 55

通过图 5 和表 1 中的数据比较可以得到, 实验状态下, 由于颗粒产生碰撞聚合等原因, 形成较大直径的颗粒, 颗粒直径的峰值集中在 $20 \mu\text{m}$ 附近, 且粒径分布较广, 甚至达到了 $350 \mu\text{m}$; 而常规发动机中的颗粒由于在流场中分布均匀, 发生碰撞聚合的概率较小, 全息测量的结果表明颗粒直径的峰值集中在 $15 \mu\text{m}$ 附近, 直径达到 $50 \mu\text{m}$ 的为数不多。通过比较不同状态下的 d_{10} 和 d_{43} 值, 发现聚集状态下的粒径分布和非聚集状态下的粒径差别是非常大的。

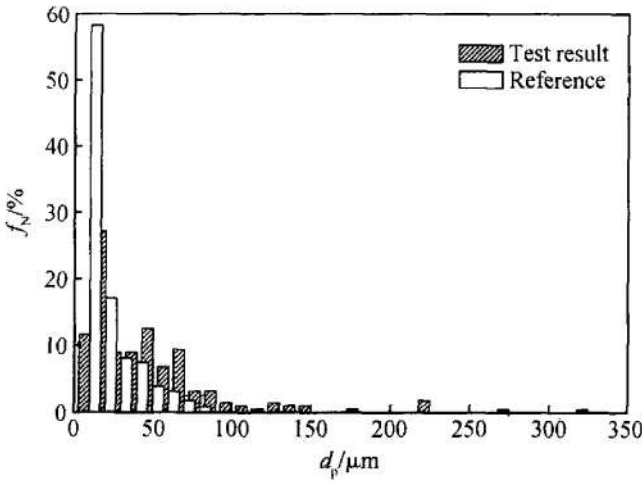


Fig 5 Distribution of particle diameter

6 结 论

- (1) 本文发展了一种可以收集燃烧室中聚集状态颗粒的方法;
- (2) 电镜分析获得了聚集状态下颗粒形状特征, 结果表明试验条件下大颗粒多数是由多个小颗粒聚合而成;
- (3) 实验测量的粒径分布和常规发动机激光全息测量的结果比较, 证明在聚集条件下, 由于颗粒聚集产生碰撞聚合等原因, 颗粒直径要比非聚集条件下大得多。

参考文献:

[1] 何国强, 王国辉, 阮崇智, 等. 高过载条件下固体发动机内流场及绝热层冲蚀研究 [J]. 固体火箭技术, 2001, 24(4).

[2] Sabnis J S, Frederik J, Howard J et al. Calculation of particle trajectories in solid-rocket motors with arbitrary acceleration [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(5).

[3] Jay K, Sambamurthi et al. Al_2O_3 collection and sizing from solid rocket motor plumes [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12(3).

[4] Youndborg E D, Pruitt T E, Smith M J et al. Light-diffraction particle size measurements in small solid-propellant rockets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1990, 6(3).

[5] Brennan W D, Hovland D L, Netzer D W, et al. Measured particulate behavior in subscale solid propellant rocket motor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(5).

[6] 张宏安, 叶定友, 侯 晓. 固体火箭发动机凝聚相微粒分布研究现状 [J]. 固体火箭技术, 2000, 23(3).

[7] 李 江, 何国强, 秦 飞, 等. 高过载条件下绝热层烧蚀实验方法研究 (I) 方案论证及数值模拟 [J]. 推进技术, 2003, 24(4). (LI Jiang HE Guo-qiang QIN Fei et al. Study of experimental method for ablation of insulator of SRM with high acceleration (I) [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(4).)

[8] 李 江, 何国强, 陈 剑, 等. 高过载条件下绝热层烧蚀实验方法研究 (II) 收缩管聚集法 [J]. 推进技术, 2004, 25(3). (LI Jiang HE Guo-qiang CHEN Jian et al. Study of experimental method for ablation of insulator of SRM with high acceleration (II) Convergent tube experimental method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3).)

[9] Murphy P J, Cox R A, Aroberds M, et al. Measurement and analysis of laser transmission through solid-propellant rocket motor exhaust plumes [R]. AIAA 93- 2886

[10] 张明信, 魏建维, 等. 固体推进剂燃烧中凝相颗粒的激光全息测试 [J]. 固体火箭技术, 2000, 23(1).

(编辑: 朱立影)