

固体推进剂燃烧颗粒粒径的在线测量

李永华¹, 潘科玮³, 平力², 杨斌², 于海涛^{1*}, 沈建琪¹

¹上海理工大学理学院, 上海 200093;

²上海理工大学上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;

³上海航天动力技术研究所发动机技术发展研究室, 上海 201109

摘要 提出了一种基于 Fraunhofer 衍射理论的燃烧颗粒粒径在线测量方法。根据固体推进剂药条燃烧火焰辐射光谱特性,选取 450 nm 蓝紫光激光器为光源,采用 450 nm 滤波探测方式消除固体推进剂燃烧的自发光辐射影响,搭建了固体推进剂药条燃烧颗粒粒径的在线测量系统。并利用 10.9 μm 标准颗粒、160 μm 标准颗粒、及混合标准颗粒系对该系统开展粒径测量验证。燃烧实验的结果表明,固体推进剂药条燃烧颗粒的粒径约为 10 μm 和 160 μm ,呈双峰分布特征,数目分布主要集中在 160 μm 左右,随着药条燃烧时间增加,10 μm 附近颗粒数量增多,160 μm 附近颗粒数量减少。对于同一燃速下的固体推进剂,初始测量高度越高,燃烧颗粒的粒径越小。在初始测量高度相同时,不同燃速下燃烧颗粒的平均粒径相差不大。这些结果为固体推进剂燃烧过程研究提供了参考。

关键词 测量; 固体推进剂; 铝颗粒; 粒径分布; Fraunhofer 衍射; 在线测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1512003

Online Size Measurement of Burning Particles of Solid Propellants

Li Yonghua¹, Pan Kewei³, Ping Li², Yang Bin², Yu Haitao^{1*}, Shen Jianqi¹

¹ College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

² Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

³ Solid Rocket Motor Technology Development Research Center, Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China

Abstract This study presents an online size measurement method for burning particles based on the Fraunhofer diffraction theory. According to the spectral characteristics of medicinal strip combustion flame radiation in solid propellants, a blue-violet laser with a wavelength of 450 nm is used as the light source, and a filtering detection method with a passing band of 450 nm is used to eliminate self-luminous radiation influence of solid propellant combustion. An online measurement system for measuring the particle sizes of burning particles in solid propellants is developed. For calibrating this measurement system, standard particles with size of 10.9 μm , 160 μm , and mixed standard particles are measured. The combustion experimental results show that the size of burning particles in solid propellants are approximately 10 μm and 160 μm , presenting a bimodal distribution, and the number distribution is mainly concentrated around 160 μm . As the combustion time increases, the number of particles with a size of 10 μm increases and the number of particles with a size of around 160 μm decreases. For a solid propellant with same burning rate, the higher the initial measurement height, the smaller the combustion particle size. For measurements with same initial heights, there is no considerable difference in the average particle size of burning particles at different burning rates. This study provides a reference for the investigation of the solid propellant combustion process.

Key words measurement; solid propellant; aluminum particle; particle size distribution; Fraunhofer diffraction; on-line measurement

OCIS codes 120.5820; 290.5850; 350.4990; 050.1940

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-03-23; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51506129,51806144)、上海市自然科学基金(19ZR1454500)

* E-mail: yht1025@yahoo.com

1 引 言

固体推进剂是火箭、导弹、空间飞行器中发动机的动力源和工质源,其能量性能优劣直接影响飞行器的航程、航速和载荷,也制约战略战术导弹的生存能力和作战效果^[1]。在固体推进剂中加入铝粉等金属燃料,可以极大提高推进剂的燃烧温度、密度及比冲等参数,同时铝粉燃烧时形成的 Al_2O_3 凝相颗粒产物也可抑制高频燃烧时的不稳定性^[2]。但是在铝颗粒燃烧过程中,会发生复杂的燃烧、团聚等现象,燃烧颗粒粒径会极大地影响推进剂的燃烧性能^[3]。

目前,对固体推进剂燃烧过程中铝颗粒粒径的测量方法主要有凝相燃烧产物收集法、图像分析法、数字全息法^[4]及激光衍射法。李疏芬等^[5]采用凝相产物收集分析法,通过收集推进剂铝燃烧后的凝相产物来分析凝相燃烧产物或其他团聚物的粒径和氧化程度,可以得到实验压强、推进剂燃速、AP(高氯酸铵)粒度等参数对最终团聚物的影响情况,该研究大致了解固体推进剂燃烧过程,但无法获得整个燃烧过程中的动态燃烧信息。刘鑫^[6]利用图像分析法来研究含铝固体推进剂燃烧过程中的铝团聚现象,通过设计合适的燃烧器和光学窗口,可实时获得推进剂燃烧景象,为推进剂燃烧提供了更为直观的在线图像信息,但是推进剂中铝颗粒燃烧火焰自发光及颗粒散射等会导致在图像处理时有较大误差。金秉宁等^[7]运用数字全息法对固体推进剂燃烧颗粒进行测量,获得了燃烧颗粒的三维特征,但是数字全息法更加关注单一颗粒的特征,只有在统计大量颗粒时才能得到较为准确的规律。

在测量过程中,激光衍射法无需取样,不会对待测环境造成干扰。与其他粒径测量方法相比,激光衍射法具有测量精度高、范围大、速度快、重复性好等优点,基于衍射理论的激光粒度仪已被广泛应用。在解决了固体推进剂药条燃烧强自发光对衍射光强分布测量影响的前提下,激光衍射法可以不受实验压强、推进剂燃速、AP 粒度等影响,从而得到固体推进剂燃烧过程中各区域燃烧颗粒的粒径在线信息。邱俊等^[8]直接将固体推进剂药条燃烧自发光强度分布作为背景信号,来消除自发光对激光衍射法测量时的影响,但忽略了不同燃烧实验自发光及其分布不同的问题。

本文通过分析推进剂药条燃烧火焰辐射的光谱特性,选取 450 nm 蓝紫光激光器为光源,采用 450 nm 滤波探测方式消除固体推进剂燃烧自发光

影响。并提出基于 Fraunhofer 衍射理论的固体推进剂火焰中颗粒在线测量方法,搭建了固体推进剂药条燃烧过程中颗粒粒径在线测量系统。

2 测量原理和实验系统

2.1 测量原理

激光衍射颗粒测量系统是基于光散射原理的,激光光束照射到待测颗粒上时将向四周发生散射,散射光强分布与颗粒粒径密切相关。Mie 散射理论是一种关于求解颗粒散射问题的方法,用 Fraunhofer 衍射理论代替 Mie 散射理论时,需要考虑散射角度范围、入射光波长、颗粒粒径及折射率等。当颗粒与周围介质相对折射率 $m > 1$ 时,对于无因次参数 $\alpha \gg 1$ 或者粒径大于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒,在前向小角度范围内,可用 Fraunhofer 衍射理论代替 Mie 散射理论^[9]。与 Mie 散射理论相比, Fraunhofer 衍射理论计算简便快捷,不需要预先知道待测颗粒的折射率,应用时限制量少。

在多元光电探测器上,颗粒的衍射光强分布 $I(\theta)$ ^[10]为

$$I(\theta) = I_0 \frac{\pi^2 D^4}{16 f^2 \lambda^2} \left(\frac{2J_1(X)}{X} \right)^2, \quad (1)$$

式中: I_0 为平行入射光的强度; f 为接收透镜的焦距; $X = \pi D \sin \theta / \lambda$, θ 为衍射角, D 为颗粒直径; $J_1(\cdot)$ 为一阶 Bessel 函数。

光电探测器由 31 个探测单元组成,各单元的扇形角度均为 π 。对每个扇形面上的光强进行积分,可获得每个单元上的衍射光能 E_n :

$$E_n = \int_{S_{n,1}}^{S_{n,2}} I(\theta) \times \pi S dS, \quad (2)$$

式中: $S_{n,1}$ 为光电探测器第 n 环的内径, $S_{n,2}$ 为第 n 环的外径,对应的衍射角为 $\theta_{n,1}$ 和 $\theta_{n,2}$, $n = 1, 2, \dots, M$, M 为多元光电探测器的总环数。

当 $f \gg S_{\max}$ 时, $\sin \theta \approx \tan \theta$, 则 X 的表达式为

$$X = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \approx \frac{\pi D \tan \theta}{\lambda} = \frac{\pi D S}{\lambda f}. \quad (3)$$

由 Bessel 递推公式可得第 n 环上的衍射光能量^[11]为

$$E_n = I_0 (\pi D^2 / 8) [J_0^2(X_{n,1}) + J_1^2(X_{n,1}) - J_0^2(X_{n,2}) - J_1^2(X_{n,2})], \quad (4)$$

式中: $J_0(\cdot)$ 为零阶 Bessel 函数。

(4)式针对测量区只有一个颗粒的情况。如果测量区中有许多大小不同颗粒组成的颗粒系,则假设直径为 D_i 的颗粒数为 N_i , i 表示颗粒粒径分档,

共 K 档, $i=1, 2, \dots, K$, 此时第 n 环上的总衍射光能量为

$$E_n = I_0(\pi/8) \sum_i N_i D_i^2 [J_0^2(X_{i,n,1}) + J_1^2(X_{i,n,1}) - J_0^2(X_{i,n,2}) - J_1^2(X_{i,n,2})] \quad (5)$$

由此可得光能分布列向量 $\mathbf{E} = (E_1, E_2, E_3, \dots, E_M)^T$ 。根据线性矩阵方程 $\mathbf{E} = \mathbf{T}\mathbf{W}$, 可得颗粒尺寸分布向量 $\mathbf{W} = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_K)^T$ 。光能分布系数矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{2,1} & t_{3,1} & \dots & t_{K,1} \\ t_{1,2} & t_{2,2} & t_{3,2} & \dots & t_{K,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{1,M} & t_{2,M} & t_{3,M} & \dots & t_{K,M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

矩阵中每一个元素 $t_{i,n}$ 表示直径为 D_i 的颗粒所产生的衍射光在探测器的第 n 个环上的光能。

根据颗粒尺寸分布曲线, 以体积(质量)为基准, 粒径 D_{V10} 、 D_{V50} 及 D_{V90} 分别表示小于该粒径的颗粒占总颗粒的 10%、50% 及 90%。假设颗粒

为均质球形颗粒, 用 D_{VMD} 表示颗粒的体积平均粒径^[12]。

2.2 实验系统

本实验装置主要由激光发射系统、推进剂燃烧系统、光电探测系统、数据采集和处理系统组成, 如图 1 所示。激光器发出一束高斯光束, 光束经扩束透镜后成为直径约为 10 mm 的平行光束, 该平行光经推进剂药条的燃烧颗粒时会发生衍射现象, 衍射光通过滤波片后进入到遮光罩内的光电探测系统和数据采集系统。接收透镜(傅里叶透镜)将衍射光会聚到位于接收透镜焦平面的多元光电探测器上, 同时将入射光束透射的部分会聚成一点并通过光电探测器的中心小孔射出。光电探测器将衍射光能转换成相应的电信号, 电信号经过放大模块和模拟数字(A/D)转换模块后被传入到数据处理系统。利用 Chahine 反演算法^[13]求解出被测颗粒的粒径分布和平均粒径。图 1 中 h 为测量高度, 随着药条的燃烧, 燃面会逐渐下移, 测量高度 h 会增大。

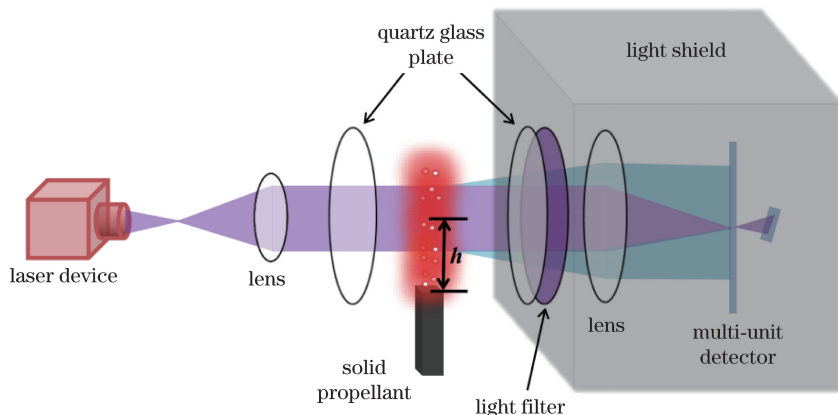


图 1 燃烧颗粒测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of measurement system for burning particles

利用光纤光谱仪测量推进剂药条燃烧火焰的辐射光谱, 结果如图 2 所示, 辐射光谱由连续特征光谱和在特定波段上的非连续特征辐射峰组成。连续光谱的分布符合普朗克定律^[14], 随波长的增大, 燃烧火焰的光谱辐射越强, 同时, 在特定波段上的非连续特征辐射峰也有较强的辐射。为了避免固体推进剂药条燃烧过程中的强自发光对衍射光强的影响, 选择波长为 450 nm 的多模光纤激光器作为激光发射系统, 经过光纤光谱仪检测, 该激光器发出的波长为 450~453 nm, 具有单峰性, 符合实验要求。

为了降低燃烧系统的强自发光对实验结果的干扰, 在遮光罩开口处安装带通滤波片, 其参数如表 1

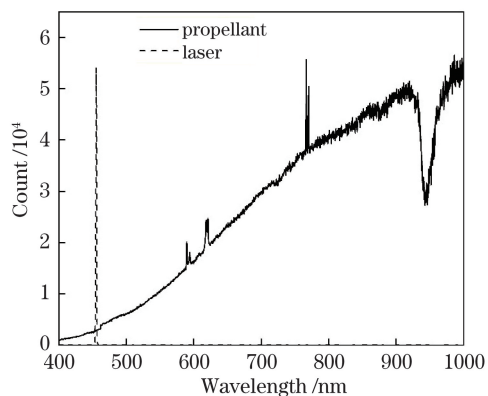


图 2 辐射光谱

Fig. 2 Radiation spectra

所示。遮光罩和滤波片的存在使波长为 410~

490 nm 的光进入探测系统,根据推进剂药条燃烧火焰的辐射光谱可得,该装置可有效滤除推进剂的强自发光波段。当激光器关闭时,在燃烧系统中燃烧

固体推进剂药条,探测器各单元的光强分布无明显变化,从而消除了推进剂药条燃烧辐射对衍射光探测的干扰。

表 1 带通滤波片参数

Table 1 Parameters of band pass filter plate

Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	Transmissivity /%	Cut-off wavelength /nm	Thickness /mm	Diameter /mm
450	±40	75	300-1100	3	6

推进剂燃烧系统由尺寸为 5 mm×5 mm×10 mm 的某固体推进剂药条(铝粉初始粒径为 29 μm)、燃烧台、耐高温石英玻璃片组成。燃烧台前后的石英玻璃片用来隔绝燃烧产生的高温和喷射出来的颗粒,起隔热保护作用。测量系统主要由扩束透镜、傅里叶透镜($f=250$ mm)、光电探测器组成。数据采集和处理系统主要由信号放大器、A/D 转换器及计算机组成。光电探测器由中心小孔和 31 个半圆环的单片固态多元件阵列组成,如图 3 所示,中心小孔可允许透射光通过。相对于 632.8 nm 的红光,光电探测器和 450 nm 激光器的匹配效率有所降低,实验中采用了能适当增大探测器放大倍数和光源强度的方法来补偿匹配效率,从而解决了响应匹配问题。

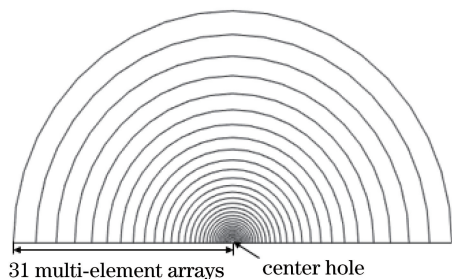


图 3 多元光电探测器示意图

Fig. 3 Schematic of multi-unit detector

装置的粒径测量范围与激光器波长、傅里叶透镜焦距、多元光电探测器的径向尺寸有关,根据无因次准则数 X 来估算该实验装置测量颗粒粒径的上下限^[15],得

$$X = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \approx \frac{\pi D \tan \theta}{\lambda} = \frac{\pi D S}{\lambda f} = 1.357. \quad (7)$$

将多元光电探测器的径向尺寸 $S_{\max}=15.9$ mm、 $S_{\min}=0.149$ mm,傅里叶透镜的焦距 $f=250$ mm 和激光器波长 $\lambda=450$ nm 代入(7)式,得该装置粒径测量范围 D 为 3.1~326.3 μm。关于激光粒度仪测量上限的问题,胡华等^[16]利用奇异值分解法分析了激光粒度仪的光能系数矩阵特性,定义了可以反映粒度分布随光能分布变化的灵敏度参数,推导

出了更为合理的测量上限与仪器物理参数之间的解析表达式。

3 测量结果与讨论

3.1 标准颗粒测量验证实验

为验证衍射式激光颗粒测量系统的可行性,首先对聚苯乙烯(二乙烯苯)乳胶标准颗粒进行了测量验证实验。用样品池代替推进剂燃烧系统,从而实现对实验系统的冷态(即非燃烧状态)测量校对。实验时,首先放置好遮光罩和滤波片,将盛有蒸馏水的样品池放置在实验燃烧系统的位置,开启激光器,记录此时探测器上的光强分布并将其作为背景光;然后向样品池中加入标准颗粒并且充分混合,再次记录探测器上的光强分布,扣除背景光之后得到颗粒衍射光信号。实验分别对 10.9 μm 标准颗粒、160 μm 标准颗粒、它们的混合状态进行测量。冷态测量下标准颗粒的粒径频度分布如图 4 所示,等效粒径如表 2 所示。

表 2 标准颗粒的等效粒径

Table 2 Equivalent particle size of standard particles

Parameter	10.9 μm	160 μm
$D_{V10} / \mu\text{m}$	7.5	131.8
$D_{V50} / \mu\text{m}$	9.3	153.5
$D_{V90} / \mu\text{m}$	11.18	167.90
$D_{VMD} / \mu\text{m}$	9.9	155.2
Error value /μm	1.0	4.8

图 4 的横坐标为颗粒粒径,纵坐标为不同粒径颗粒对应的体积频度分布。由图 4 可知,10.9 μm 标准颗粒频度峰值出现在 10 μm 附近,160 μm 标准颗粒频度峰值出现在 160 μm 附近,混合标准颗粒系出现了双峰现象,峰值分别出现在 10 μm 和 160 μm 附近。由表 2 可得,10.9 μm 标准颗粒的体积平均粒径 $D_{VMD}=9.9$ μm,与标准相差 1 μm,160 μm 标准颗粒的体积平均粒径 $D_{VMD}=155.2$ μm,与标准相差 4.8 μm,冷态测量下的校对误差均在允许范围内,验证了衍射式激光粒度测量

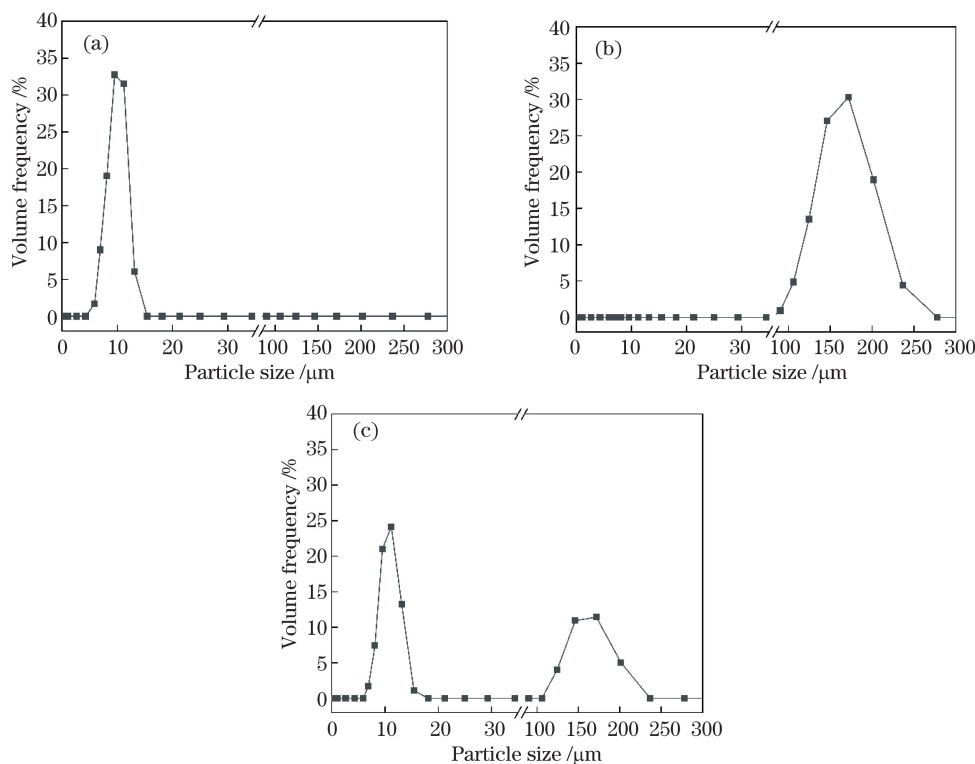


图 4 标准颗粒的体积频度分布。(a) 10.9 μm 标准颗粒;(b) 160 μm 标准颗粒;(c)混合标准颗粒系

Fig. 4 Volume frequency distributions of standard particles. (a) Standard particles with size of 10.9 μm ;
(b) standard particles with size of 160 μm ; (c) mixed standard particles

系统的准确性。

3.2 初始测量高度为 25 mm 时燃烧颗粒粒径在线测量实验

利用衍射式激光粒度测量系统,在 6 MPa 压力下,对燃速分别为 7.8~8.4 mm/s 和 17.9 mm/s 的两种固体推进剂药条燃面上方 25 mm 和 50 mm 区域处燃烧颗粒的粒径进行多次在线测量,并对燃烧产物进行冷态测量和分析,而后对在线测量结果和冷态实验结果进行比较。

将固体推进剂药条置入燃烧系统,开启激光器,记录此时探测器上的光强分布并将其作为背景光;然后点燃固体推进剂药条,再次记录探测器上的光强分布。遮光罩和带通滤波片消除了药条燃烧的自发光影响,扣除背景光之后可以得到固体推进剂燃烧颗粒衍射光信号。颗粒燃烧过程中,颗粒和周围介质都会存在温度梯度,这会引入颗粒和周围介质的折射率梯度问题。实验采用的是激光衍射模型,无需考虑颗粒的折射率问题。同时,相比大角度探测,前向小角度探测衍射光强分布时介质的折射率梯度影响较小。由于温度扰动是随机的,实验采用剔除粗差的方式对衍射光进行多次平均,进而得到较为稳定的结果。

在固体推进剂药条燃烧过程中,当初始测量高度 $h=25\text{ mm}$ 时,对不同燃速下的燃烧颗粒的粒径分布进行测量,结果如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,低燃速下,固体推进剂药条燃烧颗粒的粒径约为 10 μm 和 160 μm ,呈双峰分布特征,数目分布主要集中在 160 μm 左右。7 组数据是同一推进剂药条在不同燃烧时刻的测量结果,可见随着燃烧时间的增大,10 μm 附近颗粒数量增多,160 μm 附近颗粒数量减小,这是因为铝颗粒剥离燃面后发生燃烧反应,随着距离燃面越高,燃烧越充分,小粒径颗粒增多,大粒径颗粒相对减少。由图 5(b)可以看出,高燃速下,固体推进剂药条燃烧颗粒的粒径主要为 150 μm 。燃烧初始阶段,药条的燃烧颗粒粒径分布呈明显的单峰性,这是因为高燃速下的推进剂燃气流速快,燃烧更为剧烈,高温燃烧时颗粒更易团聚。随着药条的燃烧,有小粒径燃烧颗粒出现,这说明高燃速下的药条在燃烧时也会出现铝颗粒剥离燃面发生燃烧的现象。

3.3 初始测量高度为 50 mm 时燃烧颗粒粒径在线测量实验

图 6 为两种不同燃速的固体推进剂药条燃烧过程中颗粒的粒径分布结果,测量区距离燃面上

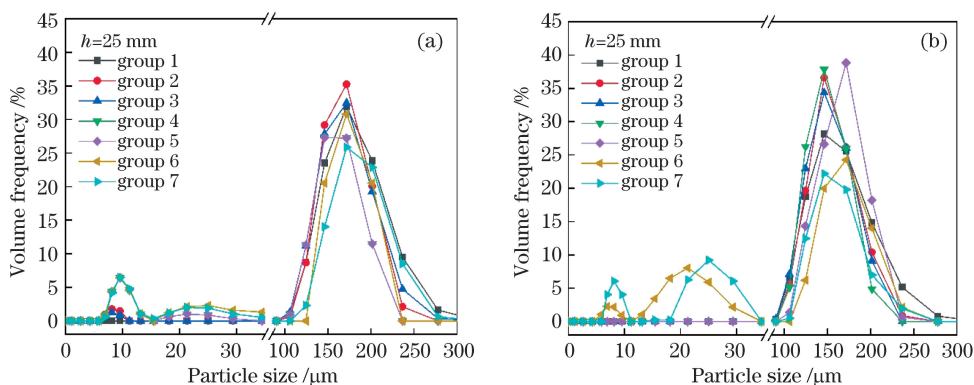


图 5 初始测量高度为 25 mm 时燃烧颗粒的体积频度分布。(a)低燃速;(b)高燃速

Fig. 5 Volume frequency distributions of combustion particles at initial measurement height of 25 mm.

(a) Low burning rate; (b) high burning rate

方的初始高度为 50 mm。从图 6(a)可以看出,低燃速下,固体推进剂药条的燃烧颗粒的粒径约为 9 μm 和 130 μm,呈双峰分布特征,数目分布主要集中在 130 μm 左右。随着燃烧时间的增大,9 μm 附近颗粒数量增多,130 μm 附近颗粒数量相对减

少。从图 6(b)可以看出,高燃速下,固体推进剂药条上方 50 mm 区域处燃烧颗粒的粒径呈单峰分布,燃烧颗粒粒径主要为 130 μm。这些特征规律与初始高度为 25 mm 时的燃烧颗粒粒径测量规律相似。

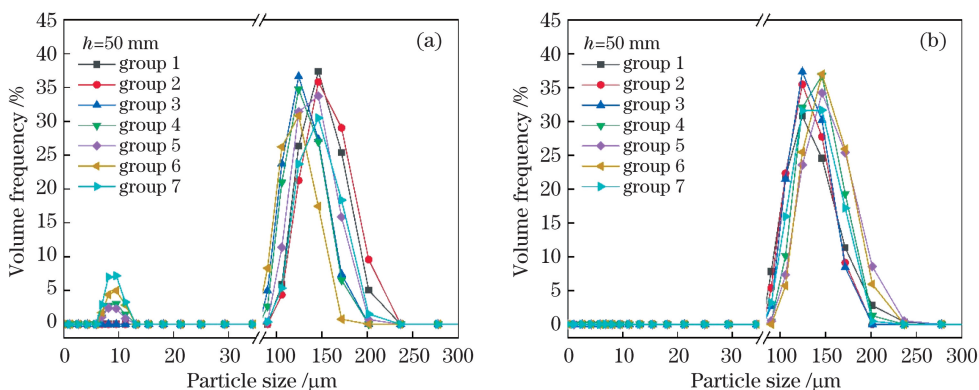


图 6 初始测量高度为 50 mm 时燃烧颗粒的体积频度分布。(a)低燃速;(b)高燃速

Fig. 6 Volume frequency distributions of combustion particles at initial measurement height of 50 mm.

(a) Low burning rate; (b) high burning rate

3.4 不同初始测量高度时燃烧颗粒粒径测量结果比较

在不同初始测量高度下,对得到的燃烧颗粒的等效粒径结果进行比较,如表 3 所示。初始测试高度 $h = 25$ mm 时,低燃速固体推进剂药条燃烧颗粒与高燃速固体推进剂药条燃烧颗粒的 D_{VMD} 相差 $6.5 \mu\text{m}$, D_{V50} 和 D_{V90} 相差不大,造成 D_{V10} 出现较大差异的原因是低燃速固体推进剂燃烧过程中出现了较多的小粒径燃烧颗粒。初始测试高度 $h = 50$ mm 时,低燃速固体推进剂药条燃烧颗粒与高燃速固体推进剂药条燃烧颗粒的 D_{VMD} 相差 $2.5 \mu\text{m}$,忽略小颗粒的影响,累计分布粒径也相差

很小。可见在同一初始测量高度下,不同燃速的固体推进剂燃烧颗粒的等效粒径相差不大,这说明在一定测量区域内,燃速对燃烧颗粒粒径的影响不大。

从表 3 还可以看出,低燃速下的固体推进剂药条在不同初始测试高度下燃烧颗粒的 D_{VMD} 相差 $19 \mu\text{m}$,高燃速下的固体推进剂药条在不同初始测试高度下燃烧颗粒的 D_{VMD} 相差 $15 \mu\text{m}$,可见对于同一燃速下的固体推进剂,初始测量高度越高,燃烧颗粒的等效粒径越小,这是因为颗粒燃烧行程越大,固体推进剂中颗粒燃烧越充分,颗粒粒径越小。

表 3 不同燃速、不同测量高度下燃烧颗粒的等效粒径

Table 3 Equivalent particle sizes of burning particles at different burning rates and different measuring heights

Parameter	$h = 25 \text{ mm}$		$h = 50 \text{ mm}$	
	Low burning rate	High burning rate	Low burning rate	High burning rate
$D_{V10} / \mu\text{m}$	13.2	76.7	112.5	98.9
$D_{V50} / \mu\text{m}$	141.6	133.4	129.0	126.0
$D_{V90} / \mu\text{m}$	186.6	174.1	154.8	158.2
$D_{VMD} / \mu\text{m}$	151.9	145.4	132.9	130.4

3.5 凝相产物收集法测量结果对比

分别将收集到的凝相产物置于循环系统中,待凝相产物与蒸馏水充分混合均匀后,进行粒度测量分析。凝相产物粒径分布如图 7 所示,固体推进剂药条凝相产物颗粒粒径均为单峰分布。低燃速下,固体推进剂药条凝相产物颗粒粒径分布峰值出现在 $110 \mu\text{m}$ 附近,高燃速下,固体推进剂药条凝相产物

颗粒粒径分布峰值出现在 $80 \mu\text{m}$ 附近。表 4 为不同燃速下固体推进剂凝相产物的等效粒径,可得,低燃速下凝相产物的 D_{VMD} 为 $106.5 \mu\text{m}$,高燃速下凝相产物的 D_{VMD} 为 $82.7 \mu\text{m}$ 。可见固体推进剂燃速越高,燃烧完全后的凝相产物颗粒粒径越小,说明固体推进剂药条燃速越高,铝颗粒团聚物燃烧越充分。

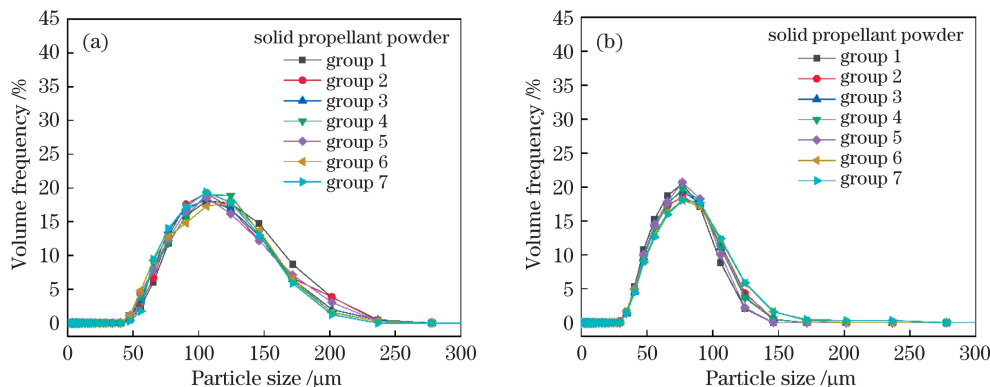


图 7 凝相产物的体积频度分布。(a)低燃速;(b)高燃速

Fig. 7 Volume frequency distributions of condensed products. (a) Low burning rate; (b) high burning rate

表 4 凝相产物的等效粒径

Table 4 Equivalent particle sizes of condensed particles

Parameter	Low burning rate	High burning rate
$D_{V10} / \mu\text{m}$	59.6	47.2
$D_{V50} / \mu\text{m}$	94.0	74.4
$D_{V90} / \mu\text{m}$	142.3	109.2
$D_{VMD} / \mu\text{m}$	106.5	82.7

激光粒度测量系统对固体推进剂药条燃烧颗粒粒径的在线测量结果符合固体推进剂的燃烧特性,为进一步验证衍射式激光粒度测量系统的准确性,将其在线测量结果和凝相产物收集法测量结果进行比较,如表 5 所示。对于低燃速下的固体推进剂药条,当初始测试高度 $h = 25 \text{ mm}$ 时,燃烧颗粒和凝相产物的 D_{VMD} 相差 $45.4 \mu\text{m}$;当 $h = 50 \text{ mm}$ 时,燃烧颗粒和凝相产物的 D_{VMD} 相差 $26.4 \mu\text{m}$ 。对于高燃

表 5 固体推进剂燃烧颗粒和凝相产物的平均粒径

Table 5 Average particle sizes of combustion particles and condensed particles in solid propellant

Parameter	Combustion particle				Condensed particle	
	$h = 25 \text{ mm}$		$h = 50 \text{ mm}$		Low burning rate	High burning rate
	Low burning rate	High burning rate	Low burning rate	High burning rate		
$D_{VMD} / \mu\text{m}$	151.9	145.4	132.9	130.4	106.5	82.7

速下的固体推进剂药条,当初始测试高度 $h=25\text{ mm}$ 时,燃烧颗粒和凝相产物的 D_{VMD} 相差 $62.7\ \mu\text{m}$;当 $h=50\text{ mm}$ 时,燃烧颗粒和凝相产物的 D_{VMD} 相差 $47.7\ \mu\text{m}$ 。可见固体推进剂药条燃烧颗粒体积平均粒径的在线测量结果与凝相产物收集法的测量结果存在较大差异,并且初始测试高度 h 越大,这一差值越小。导致这一差异的原因有:凝相产物收集法收集到的是推进剂药条中已经燃尽的凝相产物,其颗粒粒径小于燃烧状态下的颗粒粒径,颗粒燃烧行程越大,固体推进剂颗粒燃烧越充分,这一差值就越小;凝相产物收集法收到的只是部分颗粒,一些颗粒特别是小粒径颗粒由于气流的作用无法完全被收集。

4 结 论

针对固体推进剂燃烧颗粒粒径测量的问题,提出了一种基于 Fraunhofer 衍射理论的固体推进剂火焰中颗粒粒径在线测量方法。以 450 nm 蓝紫光激光器为光源,采用 450 nm 滤波探测方式消除固体推进剂药条燃烧自发光辐射的影响,搭建了固体推进剂药条燃烧颗粒的平均粒径及分布的在线测量实验系统。测量系统对于 $10.9\ \mu\text{m}$ 标准颗粒、 $160\ \mu\text{m}$ 标准颗粒的测量偏差分别为 $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $4.8\ \mu\text{m}$,混合标准颗粒系的粒径呈双峰分布,验证了衍射式激光粒度测量系统的准确性。当测量高度为 25 mm 时,低燃速下的固体推进剂药条燃烧颗粒的粒径约为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$,呈双峰分布特征,数目分布主要集中在 $160\ \mu\text{m}$ 左右。随着燃烧时间的增加,燃烧越充分, $10\ \mu\text{m}$ 附近颗粒数量增多, $160\ \mu\text{m}$ 附近颗粒数量相对减少。对于同一燃速下的固体推进剂,初始测量高度越高,燃烧颗粒的粒径越小,这是因为燃烧行程越大,固体推进剂颗粒燃烧越充分。初始测量高度相同时,不同燃速下,固体推进剂药条燃烧颗粒的粒径相差不大,这说明在一定测量区域内,燃速对燃烧颗粒粒径的影响不大。

参 考 文 献

- [1] Tang J L, Liu P J. Principles of solid rocket motor [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 50-54.
唐金兰, 刘佩进. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 50-54.
- [2] Li S F, Jin L J. Effects of aluminum particle size on combustion behavior of propellants [J]. Energetic Materials, 1996, 4(2): 68-74.

李疏芬, 金乐骥. 铝粉粒度对含铝推进剂燃烧特性的影响[J]. 含能材料, 1996, 4(2): 68-74.

- [3] Takahashi K, Oide S, Kuwahara T. Agglomeration characteristics of aluminum particles in AP/AN composite propellants [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38: 555-562.
- [4] Yao L C, Wu X C, Lin X D, et al. Measurement of burning biomass particles via high-speed digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100901.
姚龙超, 吴学成, 林小丹, 等. 基于高速数字全息燃烧生物质颗粒测试 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100901.
- [5] Li S F, Jin R C. Particle size analysis of combustion residue of solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1995, 18(4): 23-28.
李疏芬, 金荣超. 固体推进剂燃烧残渣的粒度分析 [J]. 固体火箭技术, 1995, 18(4): 23-28.
- [6] Liu X. Investigation on aluminum agglomeration on the burning surface of solid propellants by optical observation technology [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016: 31-54.
刘鑫. 基于光学拍摄技术的含铝固体推进剂燃面处铝团聚研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016: 31-54.
- [7] Jin B N, Liu P J, Wang Z X. Application of digital holography in 3D measurement of aluminum combustion in solid propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(9): 2102-2109.
金秉宁, 刘佩进, 王志新. 数字全息在固体推进剂铝燃烧三维测量中的应用研究 [J]. 推进技术, 2018, 39(9): 2102-2109.
- [8] Qiu J, Chen C, Luo X Q, et al. An on-line measurement method for particle diameter determinations of solid-phase products of a SRM combustor [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(3): 303-307, 312.
邱俊, 陈晨, 罗晓庆, 等. 一种固体火箭发动机燃烧室凝相产物粒径在线测量方法 [J]. 固体火箭技术, 2018, 41(3): 303-307, 312.
- [9] Xu F, Cai X S, Zhao Z J, et al. Discussion of Fraunhofer diffraction theory and Mie's theory in particle sizing [J]. China Powder Science and Technology, 2003, 9(2): 1-6.
徐峰, 蔡小舒, 赵志军, 等. 光散射粒度测量中采用 Fraunhofer 衍射理论或 Mie 理论的讨论 [J]. 中国粉体技术, 2003, 9(2): 1-6.
- [10] Xu F, Cai X S, Shen J Q. Geometric approximation of light scattering in arbitrary diffraction regime for absorbing particles: application in laser particle sizing [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1464-1469.
徐峰, 蔡小舒, 沈嘉祺. 米氏理论的近似及在粒度测

- 量中的应用[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1464-1469.
- [11] Cai X S, Su M X, Shen J Q, et al. Particle sizing technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 67-76.
蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪, 等. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 67-76.
- [12] Zhang M G, Weng Z X, Huang Z M, et al. Characterization of statistical average particle size and particle size distribution[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2000, 16(5): 1-4.
张茂根, 翁志学, 黄志明, 等. 颗粒统计平均粒径及其分布的表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(5): 1-4.
- [13] Wang T E, Shen J Q, Lin C J. Vector similarity retrieval algorithm in particle size distribution analysis of forward scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0629002.
王天恩, 沈建琪, 林承军. 前向散射颗粒粒径分布分析中的向量相似度反演算法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0629002.
- [14] Yang B, Guo H R, Gui X Y, et al. On-line combustion temperature measurements of solid rocket propellant by using radiation spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(6): 1958-1962.
- [15] Shen J Q, Wang N N. A discussion on the criterion number X of a small-angle forward scattering laser particle sizer[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 25(10): 891-896.
沈建琪, 王乃宁. 关于小角前向散射激光测粒仪准则数 X 的讨论[J]. 中国激光, 1998, 25(10): 891-896.
- [16] Hu H, Zhang F G, Lü Q N, et al. Measurement upper limit of laser particle size analyzer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0429001.
胡华, 张福根, 吕且妮, 等. 激光粒度仪的测量上限[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0429001.