

同轴数字全息用于铝燃烧颗粒的测量研究^{*}

金秉宁¹, 王志新², 刘佩进¹, 徐 庚¹

(1. 西北工业大学 燃烧、流动和热结构国家级重点实验室, 陕西 西安 710072;

2. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 为获得三维空间范围内固体推进剂铝颗粒动态燃烧的粒径信息, 采用同轴数字全息技术对固体推进剂中铝动态燃烧颗粒粒径分布的测量进行了研究。在常温常压下, 采用两种放大倍数(1.1倍和2.7倍)的成像系统对两种推进剂进行了全息测量, 分别从两种推进剂铝燃烧颗粒的全息重建图像中提取了所有铝燃烧颗粒的粒径信息, 采用Log-Normal多峰拟合方法获得了颗粒粒径分布的详细参数。实验结果表明: 在颗粒重建全息图的基础上, 采用插值方法极大地提高了颗粒粒径的测量精度, 在 $10\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ 内, 相对测量误差可降低至0.4%。该方法能够清晰获得 $10\mu\text{m}\sim 900\mu\text{m}$ 内所有铝燃烧颗粒粒径分布和平均粒径等信息, 说明该方法适用于固体推进剂铝颗粒燃烧的精细化测量。

关键词: 固体推进剂; 铝燃烧; 同轴数字全息; 图像重建; 概率密度粒径分布

中图分类号: V434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 06-1399-10

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 180371

Measurement of Particle Size of Aluminum Combustion in Solid Propellant Using Digital In-line Holography

JIN Bing-ning¹, WANG Zhi-xin², LIU Pei-jin¹, XU Geng¹

(1. National Key Laboratory of Combustion, Flow and Thermo-Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to obtain the particle sizes of three-dimensional dynamic combustion of aluminum particles in the solid propellant, a new method used digital in-line holography (DIH) techniques for measuring the size of aluminum particle during solid propellants combustion was studied. Under normal pressure and temperature, two propellants were measured with two magnification times (1.1 times and 2.7 times) DIH system, the particle size information of all aluminum combustion particles was extracted from the holographic reconstructed image, and the detailed parameters of particle size distribution were obtained by Log-Normal multi-peak fitting method. The experimental results show that: Based on the particle reconstruction hologram image, the measurement accuracy of particle size is greatly improved by interpolation method, and the relative measurement error can be reduced to 0.4% in the range of $10\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$. The method can clearly obtain the information such as particle size distribution and average particle size of all the aluminum combustion particles in the range of $10\mu\text{m}\sim 900\mu\text{m}$, and it is proved that this method is suitable for refine measurement of the aluminum particles combustion in solid propellant. So, it can provide fine measuring means and important data support for inform aluminum and agglomeration combustion model and evaluate new propellant formulations.

^{*} 收稿日期: 2018-06-17; 修订日期: 2018-08-21。

基金项目: 国家自然科学基金 (51706186)。

作者简介: 金秉宁, 博士, 助理研究员, 研究领域为固体火箭发动机燃烧不稳定及控制技术。E-mail: jinbingning@nwpu.edu.cn

通讯作者: 刘佩进, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为火箭发动机燃烧不稳定及激光燃烧诊断。E-mail: Liupj@nwpu.edu.cn

Key words: Solid propellant; Aluminum combustion; Digital in-line holography (DIH); Image reconstruction; Particle distribution function (PDF)

1 引言

金属铝粉在固体推进剂中被广泛使用,一方面可以有效提高推进剂的燃烧能量,另一方面也可以抑制燃烧不稳定的产生^[1]。含铝固体推进剂在燃烧过程中,随着推进剂燃烧表面的退移,大部分微米尺度的初始铝颗粒受气相燃烧热反馈的作用,在燃烧表面产生聚集、团聚和融合等现象,形成粒径超过百微米的球形团聚燃烧颗粒。受燃面燃气流的作用,团聚燃烧颗粒从燃烧表面逸出后进入气相反应区域燃烧形成带有尾焰的氧化物颗粒;而另一部分初始铝颗粒未在燃面处产生团聚等现象,而是随着燃面退移和燃气流的作用直接从燃烧表面逸出,进入气相区燃烧形成氧化物颗粒^[2-4]。由此表明:在推进剂燃烧过程中铝颗粒的燃烧并不是瞬时完成的,其燃烧颗粒的尺寸与最终形成凝相燃烧产物的颗粒尺寸并不相同。凝相燃烧产物的状态并不能完全表征铝颗粒的动态燃烧情况。因此,对于建立铝颗粒及团聚燃烧模型和分析新配方推进剂的燃烧特性,铝动态燃烧颗粒的粒径及其空间分布以及速度等参数的精确测量显得尤其重要。

目前,光学测量法具有非接触和高精度等优点,被广泛应用在颗粒尺寸的测量中,其中包括高速相机直接成像法^[5-7]、Malvern激光粒径分析法^[8-10]和相位多普勒分析法^[11-13]。这些方法在有限的时间和空间条件下可获得颗粒燃烧的动态过程。然而,在推进剂燃烧过程中,受燃烧压强、燃气流动以及声场振荡等因素的影响,铝在推进剂燃烧场中的燃烧过程十分复杂,并且其反应速度快、反应区域厚度薄、燃烧颗粒运动速度较快,使得铝颗粒瞬时动态燃烧过程以及颗粒粒径的精细化测量对于时间和空间的要求较高,仅获得少量在焦平面上的颗粒信息已无法满足研究需求,需要光测系统具有较大景深的能力,获取整个燃烧场宽空间范围内的颗粒粒径信息,使得传统的方法较难实现。因此,有必要建立一种推进剂铝动态燃烧颗粒的精确测量方法。

激光全息技术由于具有三维、瞬态以及多参数(颗粒速度、粒径和浓度等)同时测量的优势,在颗粒燃烧动态精确测量开展了大量的研究。国外方面,Meng等和Gao等^[14-16]提出了利用重建图像复振幅信息提高颗粒的深度方向定位精度的方法;Coetmellec

等^[17]提出了基于小波变换和分数傅里叶变换的颗粒场数字全息图的数值重建算法,分别对喷雾颗粒场、气泡颗粒场、煤粉颗粒场等开展了颗粒粒径的实验测量研究;Chen和Guildenbecher等^[18-20]首次将数字全息技术应用于固体推进剂铝燃烧的研究上,解决了高速相机拍摄图像景深过小的问题,获得三维空间不同位置处的颗粒聚焦图像,为铝燃烧的实验研究提供了一种新的、准确的测量手段;Jeenu等^[21]采用密闭燃烧器法对固体推进剂铝燃烧燃烧物粒径分布进行实验测量,并用Log-Normal多峰拟合的方法对粒径分布结果进行了分析。国内方面,张明信等^[22]利用激光全息技术开展了含铝复合推进剂凝相燃烧产物粒径分布影响因素实验研究;天津大学Lü等^[23]对全息重建理论、重建图像改善、颗粒识别定位以及喷雾中液滴的三维测量等方面进行了研究;重庆理工大学Yang等^[24]对喷雾场的颗粒定位、粒径标定、三维速度等进行了较全面的研究;浙江大学吴学成等^[25-26]对基于小波变换的数字全息重建理论及粒子场粒径测量进行了基础研究,并对射流、射流燃烧、喷雾、喷雾燃烧、管道流、微流体等多种场合的颗粒场进行了测量。西北工业大学刘佩进等^[27-30]分别采用产物粒子收集法、高速显微成像法和激光数字全息技术等手段对推进剂铝燃烧开展了大量的实验研究,建立了一系列推进剂铝燃烧测量方法,并对铝颗粒的动态燃烧过程有深入的认识。研究表明:相比于传统的铝燃烧研究方法,激光数字全息(DH)技术在铝燃烧测量上的优势主要表现为:(1)非接触式测量,不会对被测流场产生干扰。(2)相比于传统的直接显微成像技术,DH技术可以利用数值重建算法获得燃烧流场空间不同位置处的铝颗粒清晰聚焦图像,解决景深过小的难题。(3)DH技术能够分辨燃烧铝颗粒的气相火焰区与凝相颗粒区,避免火焰辐射发光对铝颗粒粒径的测量干扰,从而准确获得燃烧颗粒的真实粒径以及粒径的变化。(4)相比于产物粒子收集方法,DH技术能够实时获得铝颗粒的动态燃烧过程,通过识别图像中的颗粒可以获得燃烧过程中粒径分布。(5)相比于激光全息技术,DH技术更容易记录、保存和后处理。综上分析,为精确测量推进剂铝燃烧颗粒的粒径及空间分布,需要基于DH技术,建立更精细的铝燃烧颗粒粒径的测量方法,实现推进剂燃烧过程中铝颗粒粒径的精细化

测量。

本文利用激光同轴数字全息(DIH)技术,搭建了激光同轴数字全息测量系统,重点开展了固体推进剂铝动态燃烧颗粒的粒径及其空间分布的测量分析。

2 实验系统及方法

2.1 实验系统

实验系统主要由密闭燃烧器、DIH测量系统、推进剂试件及点火控制系统、稳压气路控制系统和数据监测系统组成,如图1所示。推进剂试件放置在密闭燃烧器的底端,通过点火控制系统对电热丝加热,完成推进剂试件的点火。

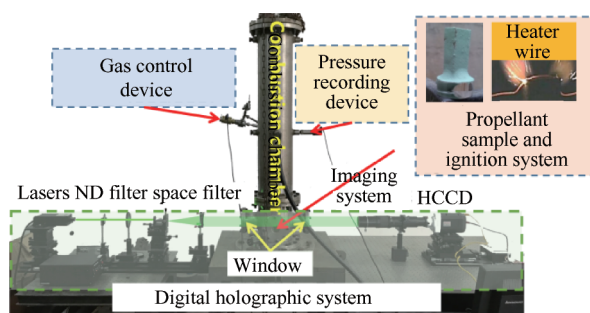


Fig. 1 Experimental system for DIH measurement of the burning aluminized propellant

DIH系统主要由532nm波长的单纵模半导体连续激光器、连续可调衰减片、空间滤波器、扩束透镜、成像系统和采集HCCD组成。实验中,激光经过空间滤波器和扩束透镜后变为直径 $\phi 50.8\text{mm}$ 的高斯激光束,穿过被测流场。CCD相机像元尺寸大小为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$,分辨率为 1280×960 。针对铝燃烧颗粒粒径分布较大($1\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$)的特点,分别采用两种放大倍数(1.1倍和2.7倍)的成像系统,相应测量区域分别为 $11.63\text{mm} \times 8.73\text{mm}$ 和 $4.74\text{mm} \times 3.56\text{mm}$ 。

图2为采用直接拍摄测量法获得推进剂铝燃烧颗粒的结果。从图中可已看出,推进剂在燃烧表面

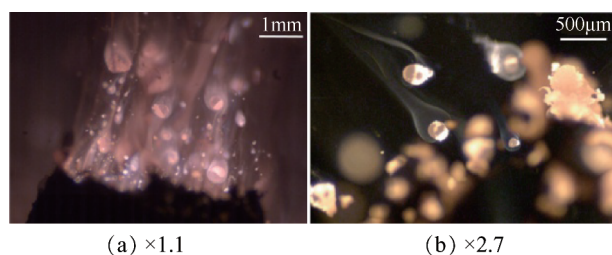


Fig. 2 Typical results of propellant aluminum particle combustion using HCCD

均产生明显的团聚颗粒,并且随着燃气流的作用从表面逸出,在燃面上方进一步燃烧。但由于景深浅的问题,燃面和燃烧场内只有少量的铝燃烧颗粒是清晰的,大量的颗粒并没有在成像焦面上,测量的图像均是模糊的,这对于精确测量推进剂全部铝燃烧颗粒的粒径分布是十分不利的。因此,需要采用DIH测量技术进行测量。

2.2 测量原理

本文采用同轴的光路布置方法,即参考光、待测颗粒物体、全息图像处在同一轴线上,如图3所示。

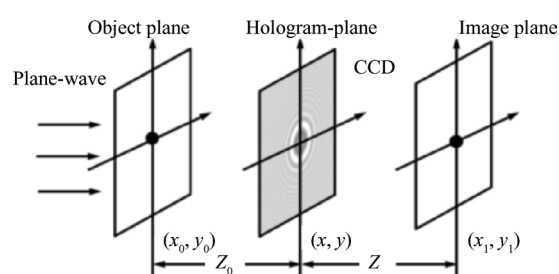


Fig. 3 Schematic diagram of DIH optical

激光数字全息技术包含两个步骤:全息记录与波前重建。平面波经过颗粒后,颗粒的散射光与未经过颗粒的参考光形成干涉,干涉条纹被CCD记录形成全息图像。利用标量衍射理论,计算机编写程序完成光波的数值逆衍射实现物光场的重建,当再现距离 Z 与全息记录距离 Z_0 相等时就能够获得物光场复振幅,再经过图像处理算法能够同时获得颗粒的粒径、空间位置分布等信息。通过对全息图像进行重建,可以获得颗粒清晰的聚焦图像,如图4所示。

图4(a)为典型的燃烧铝颗粒全息图像。由于成像系统的前焦面距离燃烧颗粒较远,捕捉到的全息图像表现为一系列的同心条纹,经过数值重建后可以获得燃烧铝颗粒的聚焦图像,如图4(b)所示。图4中的(c)~(f)分别为燃面处团聚颗粒、燃面上方小尺度燃烧颗粒、燃面上方大尺度颗粒以及非球形燃烧产物。从重建图像图4(c)和图4(e)中可以清晰地看到燃烧铝颗粒的形貌,包括燃烧颗粒的凝相区、氧化帽以及包裹颗粒的气相火焰。

2.3 粒子图像测量方法

固体推进剂铝颗粒燃烧的全息图像存在较多的静态和动态噪声,为了提高全息图像的信噪比,获得质量更高、更精确的全息重建图像,需要在重建前进行一系列的图像处理。动态噪声主要来源于流场流动和燃烧反应引起的流场脉冲,该噪声通常不是固

定在某个位置,因此较难处理。静态噪声主要来源于激光中的不均匀性和观察窗、成像系统以及相机灰尘等一些不可避免的干涉条纹,该噪声条纹在全息图中是固定的,易于处理,如图5(a)所示。可以通过一系列全息图像 $I_{\text{raw}}(i)$,对所有全息图取平均值,获取背景全息图像 I_{BG} ,如图5(b)所示。

$$I_{\text{BG}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{raw}}(i) \quad (1)$$

再利用背景相减法,除去原始全息图像中背景,即可获得高信噪比的颗粒全息图像,同时也保证了图像中颗粒信息的准确性,如图5(c)所示。再根据数值重建算法,获得颗粒的聚焦图像,再通过数字图像处理可准确地获得颗粒等效粒径。对于大部分球形团聚燃烧颗粒,其颗粒粒径即由等效圆的直径获得,而对于少量的非球形团聚颗粒,颗粒粒径则需要采用与之面积相等的等效圆的直径获得,因此存在一定的误差。但由于非球形团聚颗粒相对数量较

少,大部分均为球形颗粒。因此该部分误差对于整体的粒径分布影响较小。

全息图像中颗粒的直径 D 计算与图像内的像素数量、CCD 像元尺寸和成像系统的放大倍数有关。当颗粒图像尺寸较小,甚至与像元尺寸同一数量级时,颗粒粒径计算相对误差会非常大。因此,需要对重建后的颗粒全息图像进行二维图像插值^[31],使粒子图像突破像元尺寸的限制,然后再进行直径 D 的计算,从而提高粒径测量的精度。图6(a)为一颗粒径 $d=20\mu\text{m}$ 粒子的重建图像,成像面像元尺寸为 $6.3\mu\text{m}$ 。采用传统灰度阈值 G_{50} 提取粒子图像并换算得到的颗粒粒径为 $d_{\text{DIH}}=18.9\mu\text{m}$ 。图6(b)是经过图像线性差值计算后的粒子重建图像,同样利用灰度阈值 G_{50} 提取粒子图像,并换算得到的颗粒粒径为 $d_{\text{DIH-LI}}=19.96\mu\text{m}$ 。结果表明,图像插值提高了颗粒图像直径测量的精度。

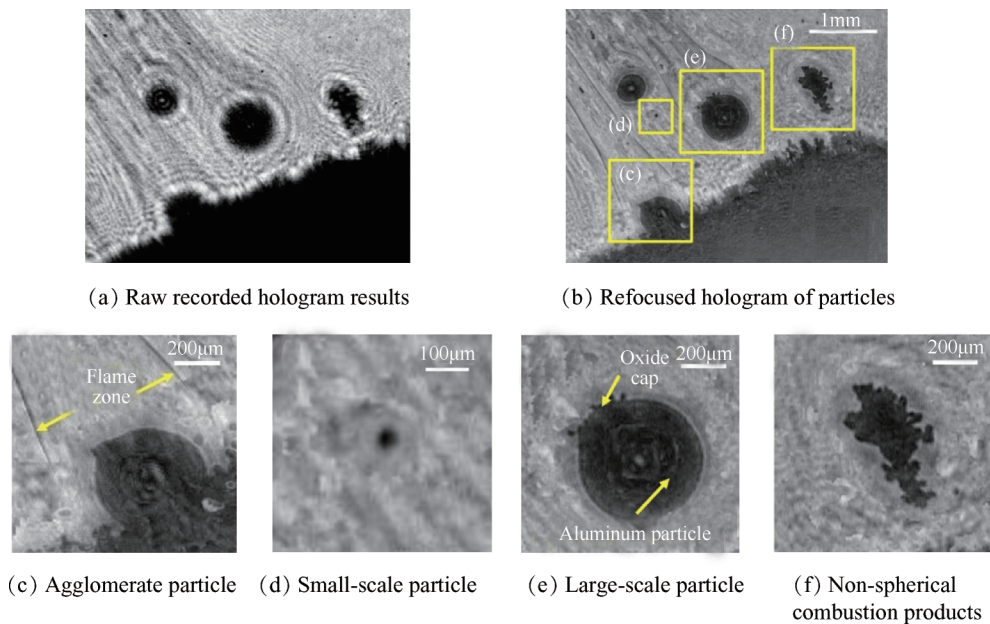


Fig. 4 Holographic image and reconstructed image of aluminum particle combustion

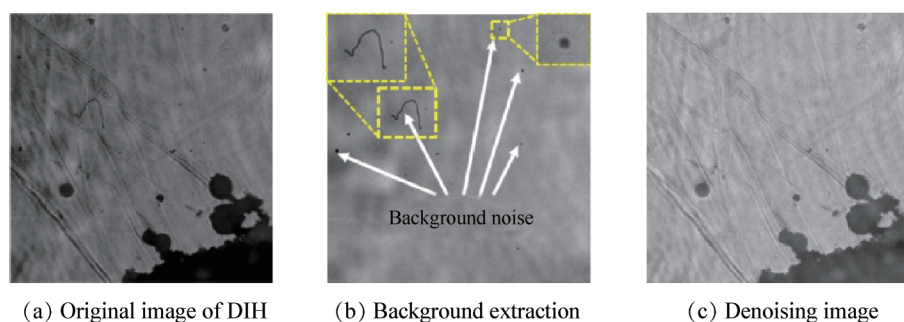


Fig. 5 Denoising method of holographic image

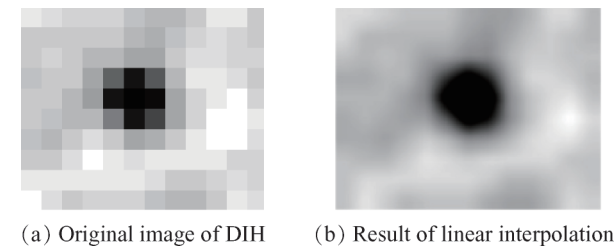


Fig. 6 Particle image size measurement using interpolation

2.4 粒径测量误差分析

为保证 DIH 测量系统测量颗粒粒径的准确性,以标准粒径颗粒板为被测对象,对其颗粒进行全息图像拍摄、重建和颗粒粒径提取,测量结果与颗粒板的准确值进行对比。根据实际推进剂燃烧场中铝团聚颗粒的范围,选取四种典型颗粒粒径测量,分别对两种放大倍数的光测系统进行整体误差分析,测量误差结果如表 1 所示。

Table 1 Measurement error of DIH method				
Standard particle size/ μm	Measurement results/ μm		Relative error/%	
	$\times 1.1$	$\times 2.7$	$\times 1.1$	$\times 2.7$
10	9.1	9.5	9.0	5.0
50	46.1	48.7	7.8	2.6
100	97.4	98.9	2.6	1.1
200	196.8	199.2	1.6	0.4

从表中可以看出,相同粒径条件下,放大倍数越大,相对测量误差越小,测量的更为精确,最小误差可达到 0.4%;相同放大倍数下,粒径越小,相对测量误差变化,但均在 9% 以内。

3 实验测量及分析

3.1 推进剂配方及测量参数

实验测量选用两种不同配方的含铝固体推进剂,其中推进剂 A 采用 $D_{\text{Al}}^0=28\mu\text{m}$ 粒径的铝粉,推进剂 B 采用 $D_{\text{Al}}^0=14\mu\text{m}$ 粒径的铝粉,铝粉含量均为 18%,其他组分含量均相同。两种推进剂试件尺寸均为 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 10\text{mm}$ 。表 2 为两种推进剂采用 DIH 实验测量的相关参数。

Table 2 Measure parameters of DIH experiment of two kinds of propellant								
Case	Propellant sample	Temperature/℃	Pressure/MPa	Burning rate/(mm/s)	Magnification times	Sampling rate/fps	Time/s	Image number
1	A	20	0.1	1.01 ~ 1.08	1.1	2400	2.85	4057
2					2.7	4300	2.41	10374
3	B			1.12 ~ 1.16	1.1	2400	2.85	6845
4					2.7	4300	2.41	10374

3.2 典型 DIH 测量结果

将测量后得到的全息图像进行数值重建,重建距离 Z_r 在 $0\sim 80\text{mm}$,轴向重建采样间距 $\Delta Z=0.01\text{mm}$,并将所有的颗粒在重建距离 $Z_r=0\text{mm}$ 平面上进行融合。两种推进剂测量的典型全息重建融合结果如图 7,图 8 所示。

3.2.1 推进剂 A 测量结果

图 7(a)为推进剂 A 采用 1.1 倍成像系统测量得到的全息重建融合和粒径提取的图像结果。图中在燃烧表面附近,可清晰观测到团聚颗粒基本上以球形为主,铝团聚颗粒的粒径范围约为 $300\mu\text{m}\sim 500\mu\text{m}$ 。在燃烧表面上方的燃烧颗粒粒径相对较小,约为 $50\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 。但对于颗粒粒径 $d<50\mu\text{m}$ 的粒子,该放大倍数下是无法获得清晰的图像。因此,采用 2.7 倍的成像系统对其进行进一步的测量,如图 7(b)所示。

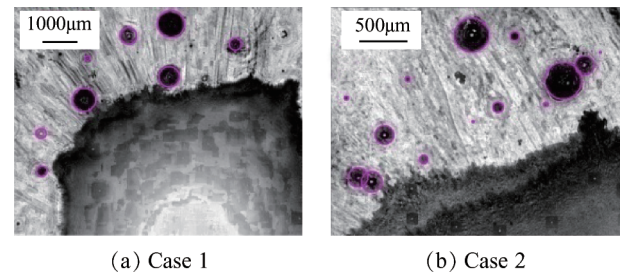


Fig. 7 Typical holographic reconstruction and particle size image of propellant A

可以看出,放大倍数的增大,相应的测量区域减小,可清晰观测到直径更小的颗粒($D>10\mu\text{m}$),从而弥补了 1.1 倍测量结果的不足。在燃烧表面附近,存在粒径较小的铝燃烧颗粒,粒径范围约为 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$,并且在燃烧表面上方有少量 $300\mu\text{m}$ 以上的颗粒,大部分是颗粒粒径范围约为 $10\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 的小尺度颗粒,这一粒径量值与推进剂 A 中的初始铝粉粒径相接近,可以认为是初始粒径铝粉并未在燃面处产生团聚,而是随着燃气流直接从燃面处逸出进入燃烧场中。

3.2.2 推进剂B测量结果

图8(a)为推进剂B采用1.1倍成像系统测量得到的全息重建融合和粒径提取的图像结果。在燃烧表面附近的团聚颗粒同样以球形为主,粒径约为 $200\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 。在燃面上方区域存在少量的小尺度颗粒,粒径约为 $50\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 。图8(b)为2.7倍成像系统测量的结果,在燃烧表面附近的区域,团聚存在两种尺度的颗粒粒径,一种为大尺度的团聚颗粒,颗粒粒径约为 $100\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$;另一种是小尺度的颗粒,颗粒粒径约为 $10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$,该部分颗粒的粒径量值与推进剂B中的初始铝粉颗粒相接近,同样可认为是未团聚的铝颗粒在燃烧场中燃烧。

与图7的推进剂A的测量结果进行对比,推进剂B中铝燃烧颗粒的粒径相对小于推进剂A的铝燃烧颗粒的粒径。

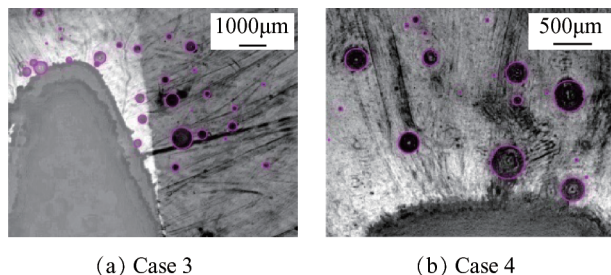


Fig. 8 Typical holographic reconstruction and particle size image of propellant B

3.3 铝燃烧颗粒粒径分布

通常颗粒粒径采用两种分布统计方式来表征:个数概率函数(Number PDF)和体积概率密度函数(Volume PDF)。

Number PDF表达式为

$$N_0 = \frac{N}{\sum N \times \Delta d} \quad (2)$$

Volume PDF表达式为

$$V = \frac{N \times d^3}{\sum (N \times d^3) \times \Delta d} \quad (3)$$

式中 N 为相同粒径的数量, N_0 为数量概率密度函数; V 为体积概率密度函数, Δd 为定义的柱状区间, d 为颗粒粒径。

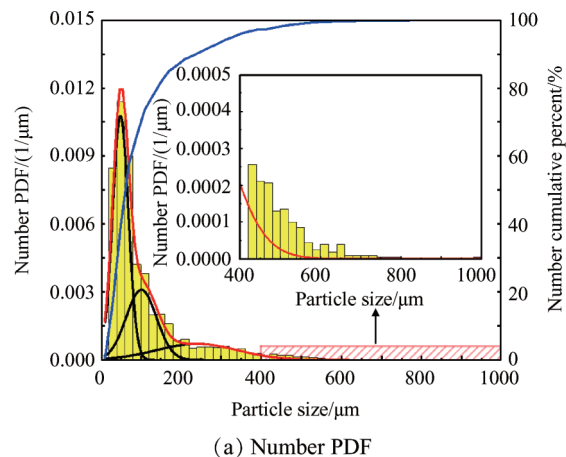
对推进剂A和推进剂B的所有有效的全息图像进行重建,利用本文开发的图像处理算法从重建图像中获得燃烧表面和燃烧场中所有粒子的粒径信息。其中,从推进剂A的Case 1和Case 2的重建图像中,分别提取出11420和7152个粒子,从推进剂B的Case 3和Case 4的重建图像中分别提取出18975和

9610个粒子。根据两种粒径分布函数(式2和式3)可以获得铝燃烧颗粒的粒径分布,结果如图9~12所示。

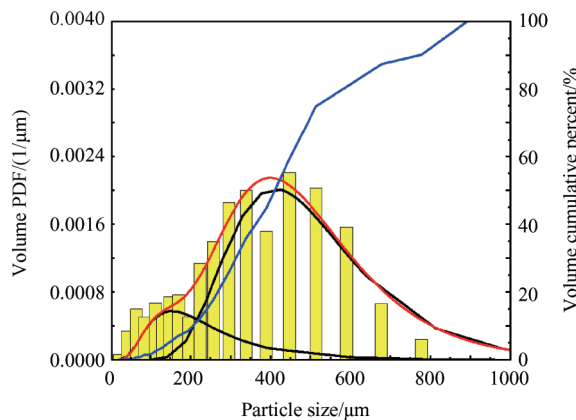
3.3.1 放大1.1倍测量结果

图9为推进剂A在Case 1条件下的颗粒尺寸分布曲线,其中图9(a)为铝燃烧颗粒的Number PDF分布柱状图,团聚物颗粒直径在 $35\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$,Number PDF分布呈三峰分布,其中 $d=50\mu\text{m}$ 左右的数量最多,占总数量的23%左右;而在 $d=100\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总数量的8%左右;团聚物在 $d=250\mu\text{m}$ 左右形成第三个峰,占总数量的2%左右。从整个粒径分布上看,随着粒子直径的增大,粒子数量越来越少,粒子数量百分比逐渐减小,数量概率密度也逐渐减小。燃烧颗粒在直径 $35\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 连续分布,其数量占总数的96.8%。

图9(b)为推进剂A铝燃烧颗粒的Volume PDF分布柱状图,团聚物颗粒直径在 $35\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$ 呈双峰分布,其中在 $d=150\mu\text{m}$ 左右形成第一个峰,占总体积的2%左右,在 $d=400\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总体积的15%左右。



(a) Number PDF

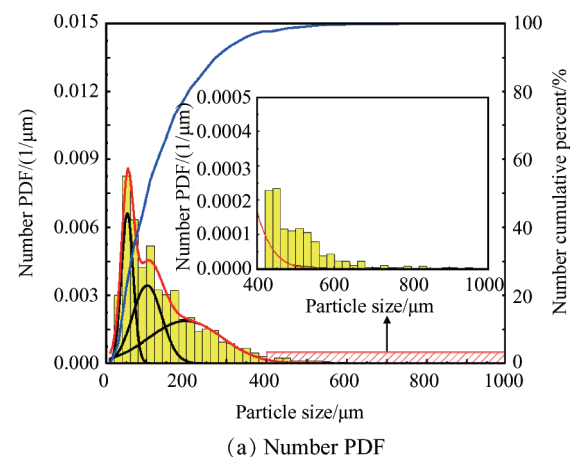


(b) Volume PDF

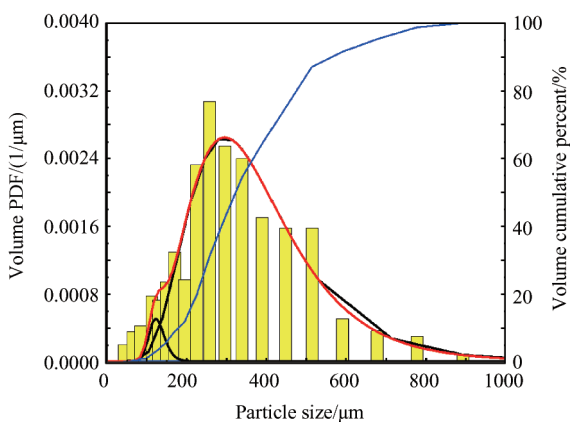
Fig. 9 Aluminum combustion particle size distribution of propellant A (Case 1)

图10为推进剂B在Case 3条件下的颗粒尺寸分布柱状图,其中图10(a)为铝燃烧颗粒的Number PDF分布柱状图,可以看出铝燃烧颗粒的直径在 $35\mu\text{m} \sim 900\mu\text{m}$,个数分布同样呈三峰分布,其中 $d=50\mu\text{m}$ 左右的数量最多,占总个数含量的16.5%左右;团聚物在 $d=90\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总个数含量的7%左右;团聚物在直径 $d=190\mu\text{m}$ 左右形成第三个峰,占总个数含量的4%左右。从整个粒径分布上看,随着粒子直径的增大,粒子数量越来越少,粒子数量百分比逐渐减小,数量概率密度也逐渐减小。颗粒物主要在直径 $35\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 连续分布,其数量占总的97.5%。

图10(b)为推进剂B铝燃烧颗粒的Volume PDF分布柱状图,可以看出团聚物颗粒直径在 $35\mu\text{m} \sim 900\mu\text{m}$ 呈双峰分布,其中在 $d=120\mu\text{m}$ 左右形成第一个峰,占总体积的1.5%,在 $d=300\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总体积的12%。



(a) Number PDF



(b) Volume PDF

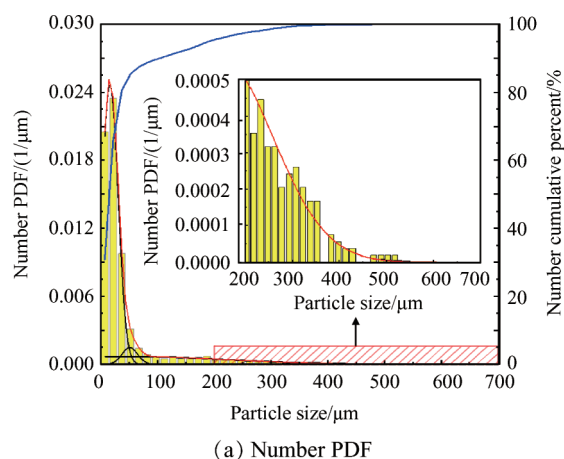
Fig. 10 Aluminum combustion particle size distribution of propellant B (Case 3)

3.3.2 放大2.7倍测量结果

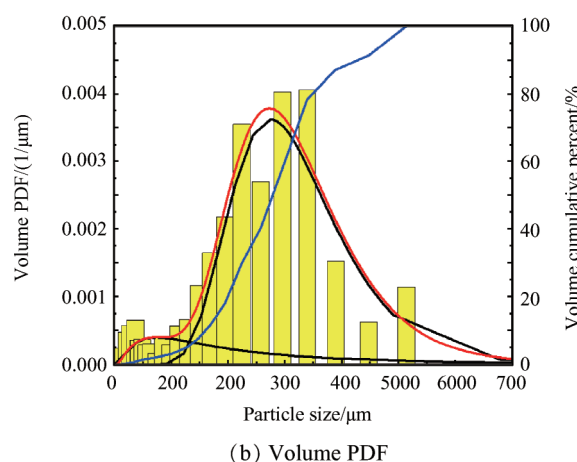
图11为推进剂A在Case 2条件下的颗粒尺寸分

布柱状图,其中图11(a)为铝燃烧颗粒的Number PDF分布柱状图,可以看出团聚物颗粒直径在 $10\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$,个数分布呈三峰分布,其中 $d=20\mu\text{m}$ 左右的数量最多,占总数量的35%左右。而在 $d=50\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总数量的5%左右;团聚物在直径 $d=150\mu\text{m}$ 左右形成第三个峰,占总数量的1%左右。团聚物在直径 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 连续分布,其数量占总的90%。

图11(b)为推进剂A铝燃烧颗粒的Volume PDF分布柱状图,可以看出在团聚物颗粒直径在 $10\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ 呈双峰分布,其中在 $d=70\mu\text{m}$ 左右形成第一个峰,占总体积的0.4%左右,在 $d=270\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总体积的18%左右。



(a) Number PDF



(b) Volume PDF

Fig. 11 Aluminum combustion particle size distribution of propellant A (Case 2)

图12为推进剂B在Case 4条件下的颗粒尺寸分布柱状图,其中图12(a)为铝燃烧颗粒的Number PDF分布柱状图,可以看出团聚物颗粒直径在 $10\mu\text{m} \sim 700\mu\text{m}$ 之间,个数分布呈三峰分布,其中 $d=20\mu\text{m}$ 左右的数量最多,占总数量的33%左右。而在 $d=50\mu\text{m}$

左右形成第二个峰,占总数量的4.3%左右;团聚物在直径 $d=150\mu\text{m}$ 左右形成第三个峰,占总数量的1%左右。团聚物在直径 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 之间连续分布,其数量占总的88%。

图12(b)为推进剂A铝燃烧颗粒的Volume PDF分布柱状图,团聚物颗粒直径在 $10\mu\text{m} \sim 700\mu\text{m}$ 呈双

峰分布,其中在 $d=40\mu\text{m}$ 左右形成第一个峰,占总体积的0.3%左右,在 $d=210\mu\text{m}$ 左右形成第二个峰,占总体积的14%左右。

3.4 拟合结果分析

对个数和体积PDF分布柱状图进行多峰拟合,并计算 D_{10} (线性平均粒径), D_{32} (体积表面积平均粒径), D_{43} (质量平均粒径), D_{50} (质量中径),拟合结果如表3所示。其中,Number PDF分布采用多峰Gauss函数拟合,而Volume PDF分布采用多峰Log-Normal函数拟合^[18,22],拟合表达式为

$$f(D)_{\text{Number}} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\sigma_i \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(D-\mu_i)^2}{\sigma_i^2}} \tag{4}$$

$$f(D)_{\text{Volume}} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{D\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln D - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \tag{5}$$

从表中可以看出,相同放大倍数条件下,推进剂A中采用 $D_{A1}^0=28\mu\text{m}$ 的铝燃烧颗粒的 D_{32} , D_{43} 和 D_{50} 明显高于推进剂B中采用 $D_{A1}^0=14\mu\text{m}$ 的铝燃烧颗粒的结果。

同时,对于同一种推进剂来说,不同放大倍数测量得到的颗粒分布曲线也不相同。放大倍数越大,相对应实际像元尺寸越小,测量下限降低(2~3个像元尺寸),因此可获得更小粒径的颗粒图像。在分辨率不变的前提下,像元尺寸减小使得测量区域减小,可实际观测到的粒径直径测量范围相应的变窄,适用于小尺度粒径的测量($d<50\mu\text{m}$);而放大倍数小,可观测的清晰的颗粒直径较大,粒径直径测量范围相应较宽,适用于大尺度粒径的测量($d<50\mu\text{m}$)。因此,为获得粒径直径更精细、粒径范围更宽的铝燃烧颗粒的全息图像,需要采用不同放大倍数的手段获得,运用综合的方法对推进剂铝燃烧颗粒粒径的尺寸分布进行表征。

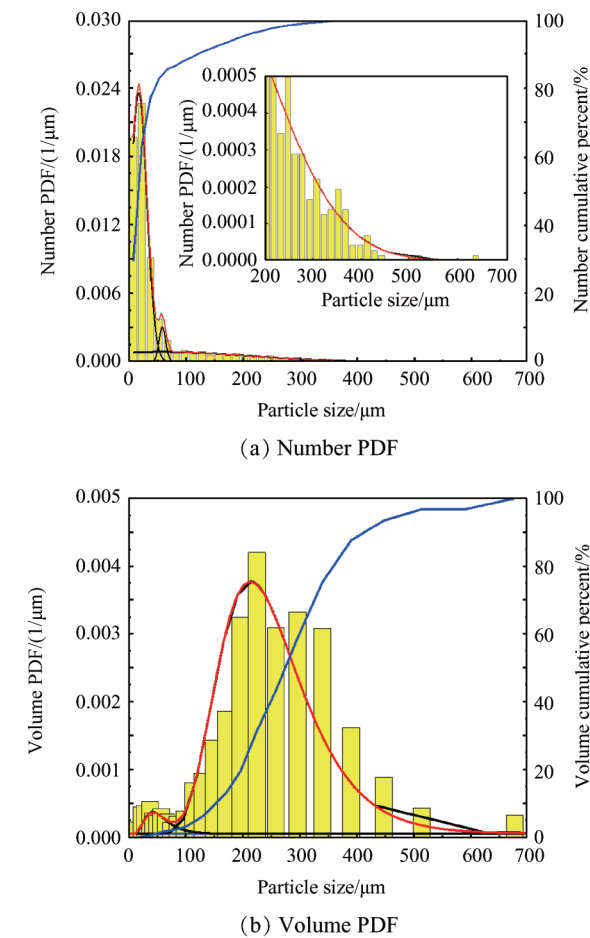


Fig. 12 Aluminum combustion particle size distribution of propellant B (Case 4)

Table 3 Mean diameters and volume PDF fitting result of two propellants

Propellant sample	Case	Particle number	Mean diameters				Volume PDF Log-Normal fit				
			$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{32}/\mu\text{m}$	$D_{43}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	w	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2
A	1	11420	51.9	350.6	474.7	447.7	0.830	2.32	0.57	2.67	0.37
	2	7152	23.6	246.3	303.5	295.8	0.858	2.48	0.32	2.27	0.97
B	3	18975	69.4	300.9	377.8	339.7	0.878	2.54	0.41	2.10	0.15
	4	9610	25.3	241.6	298.7	292.5	0.710	2.37	0.33	1.71	0.45

4 结 论

本文利用所搭建的同轴数字全息系统对固体推进剂铝动态燃烧颗粒的粒径分布进行了测量研究,

主要结论如下:

(1)在重建颗粒全息图的基础上,采用二维线性插值方法提高颗粒粒径的测量精度,在 $10\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 内,相对测量误差可降低至0.4%。

(2)该方法能够清晰获得 $10\mu\text{m} \sim 900\mu\text{m}$ 内颗粒粒径信息,说明该方法适用于固体推进剂铝颗粒燃烧的精细化测量。随着放大倍数进一步的增大,可实现微米级颗粒的测量。

(3)受初始铝粉粒径的不同,两种推进剂铝燃烧颗粒测量范围内的粒径分布和平均粒径等参数各不相同,说明该方法可以为研究铝及团聚燃烧模型和分析新配方推进剂铝的燃烧特性提供精细化的测量手段和数据支撑。

对于不同放大倍数造成测量结果的不同,将在后续的研究中进行深入的讨论和分析。

参考文献:

- [1] 金秉宁,刘佩进,杜小坤,等. 复合推进剂中铝粉粒径对分布燃烧响应和粒子阻尼特性影响[J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1701–1706. (JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, DU Xiao-kun, et al. Effects of Different Aluminum Particle Sizes in Composite Propellant on Distributed Combustion Response and Particle Damping [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35 (12): 1701–1706.)
- [2] Price E W. Combustion of Metalized Propellants [J]. *Fundamentals of Solid Propellant Combustion*, 1984, 90: 479–514.
- [3] Mullen J C, Brewster M Q. Reduced Agglomeration of Aluminum in Wide-Distribution Composite Propellants [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27 (3): 650–661.
- [4] Takahashi K, Oide S, Kuwahara T. Agglomeration Characteristics of Aluminum Particles in AP/AN Composite Propellants [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(4): 555–562.
- [5] Melcher J C, Krier H, Burton R L. Burning Aluminum Particles Inside a Laboratory-Scale Solid Rocket Motor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18 (3): 631–640.
- [6] Mullen J C, Brewster M Q. Reduced Agglomeration of Aluminum in Wide-Distribution Composite Propellants [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27 (3): 650–661.
- [7] Liu T K, Perng H C, Luh S P, et al. Aluminum Agglomeration in Ammonium Perchlorate / Cyclotrimethylene Trinitramine / Aluminum / Hydroxy Terminated Polybutadiene Propellant Combustion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 8(6): 1177–1184.
- [8] Triballier K, Dumouch C, Cousin J. A Technical Study on the Spray Performances: Influence of Multiple Light Scattering and Multi-Modal Drop-Size Distribution Measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35 (4): 347–356.
- [9] Allen T. Particle Size Measurement [M]. London: Chapman and Hall, 1981.
- [10] Gao H, Guo L, Zhang X. Liquid-Solid Separation Phenomena of Two-Phase Turbulent Flow in Curved Pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45 (25): 4995–5005.
- [11] Durst F, Zaré M. Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows [C]. *Copenhagen: Proceedings of LDA, 75 Symposium*, 1976.
- [12] Bachalo W D, Houser M J. Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions [J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(5).
- [13] Boothby C D, Daniel J, Adam S, et al. Use of a Laser Diffraction Particle Size for the Measurement of Mean Diameter of Multicellular Tumor Spheroids [J]. *In Vitro Cellular and Developmental Biology*, 1989, 25 (10): 946–950.
- [14] Meng H, Pan G, Pu Y, et al. Holographic Particle Image Velocimetry: from Film to Digital Recording [J]. *Measurement Science & Technology*, 2004, 15(4).
- [15] Meng H, Anderson W L, Hussain F, et al. Intrinsic Speckle Noise in In-Line Particle Holography [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10 (9): 2046–2058.
- [16] Gao M, Yang P, McKee D, et al. Mueller Matrix Holographic Method for Small Particle Characterization: Theory and Numerical Studies [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (21): 5289–5296.
- [17] Coetmellec S, Verrier N, Brunel M, et al. General Formulation of Digital In-Line Holography from Correlation with a Chirplet Function [J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2010, 5(10).
- [18] Chen Y, Guildenbecher D R, Hoffmeister K N G, et al. Study of Aluminum Particle Combustion in Solid Propellant Plumes Using Digital In-Line Holography and Imaging Pyrometry [J]. *Combustion & Flame*, 2017, 182: 225–237.
- [19] Chen W, Quan C, Tay C J. Extended Depth of Focus in a Particle Field Measurement Using a Single-Shot Digital Hologram [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(20).
- [20] Guildenbecher D R, Gao J, Reu P L, et al. Digital Holography Simulations and Experiments to Quantify the

- Accuracy of 3D Particle Location and 2D Sizing Using a Proposed Hybrid Method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(16): 3790–3801.
- [21] Jeenu R, Pinumalla K, Deepak D. Size Distribution of Particles in Combustion Products of Aluminized Composite Propellant [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 715–723.
- [22] 张明信, 王国志, 魏剑维, 等. 影响 Al_2O_3 凝相尺寸分布的因素[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 250–253. (ZHANG Ming-xin, WANG Guo-zhi, WEI Jian-wei, et al. Factors Influencing Al_2O_3 Condensed Phase Sizing Distribution [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(3): 250–253.)
- [23] Lü Q N, Chen Y L, Yuan R, et al. Trajectory and Velocity Measurement of a Particle in Spray by Digital Holography [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(36): 7000–7007.
- [24] Yang Y, Kang B. Enhanced Measurement Capability of a Digital Particle Holographic System for Flow Field Measurements[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2011, 22(5): 461–468.
- [25] 吴学成, 浦兴国, 浦世亮, 等. 激光数字全息应用于两相流颗粒粒径测量[J]. 化工学报, 2009, 60(2): 310–316.
- [26] Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Yang Jing, et al. Wavelet-Based Depth-of-Field Extension, Accurate Autofocusing, and Particle Pairing for Digital Inline Particle Holography [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): 556–564.
- [27] 刘 鑫, 刘佩进, 关 昱, 等. 复合推进剂中铝的燃烧实验研究方法[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 833–836.
- [28] 刘 鑫, 刘佩进, 金秉宁, 等. 复合推进剂中铝燃烧实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(8): 1579–1585. (LIU Xin, LIU Pei-jin, JIN Bing-ning, et al. An Experimental Investigation of Aluminum Combustion in Composite Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(8): 1579–1585.)
- [29] 王志新, 刘佩进, 金秉宁, 等. 基于同轴数字全息法的推进剂铝燃烧测量方法研究[C]. 大连: 中国航天第三专业信息网会议, 2017.
- [30] 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): 1–8. (JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, WANG Zhi-xin. Application of Digital Holography in 3D Measurement of Aluminum Combustion in Solid Propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(9): 1–8.)
- [31] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415–419.

(编辑: 张 贺)