

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.02.005

铝粉粒径对含铝煤油凝胶燃料燃烧特性的影响*

薛明帅^① 李建^② 何桂标^② 范源麟^② 马善学^① 包鹏^② 王伯良^②

①南京理工大学安全科学与工程学院(江苏南京,210094)

②南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

[摘要] 为探究铝粉粒径对含铝煤油凝胶燃料激波诱导点火的影响规律,利用纹影法与阴影法对铝粉粒径为1.20、7.05 μm 及23.63 μm 的含铝煤油凝胶燃料在激波管内的点火过程进行了观察。通过分析测得的压力信号和铝粉燃烧产物光信号,对比了含不同粒径铝粉的凝胶燃料在激波诱导作用下的点火和燃烧特性。结果表明:随着铝粉粒径的增大,凝胶燃料雾化后云团的均匀性变差,点火延迟时间也随之增加,火球的持续时间以及火球表面的最高温度均有一定程度的减小。

[关键词] 铝粉粒径;含铝煤油凝胶燃料;激波诱导点火;燃烧特性

[分类号] TQ560.7;O373

Effect of Aluminum Particle Size Combustion Characteristics of Aluminum-Kerosene Gel Fuel

XUE Mingshuai^①, LI Jian^②, HE Guibiao^②, FAN Yuanlin^②, MA Shanxue^①, BAO Peng^②, WANG Boliang^②

① School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to investigate the influence of particle size of aluminum powder on shock wave induced ignition of aluminum-kerosene gel fuel, schlieren method and shadowgraph method were used to observe the ignition process of aluminum-kerosene gel fuel with particle sizes of aluminum powder of 1.20, 7.05 μm and 23.63 μm in shock tube. The ignition and combustion characteristics of gel fuels under shock wave induction were compared by the measured pressure signal and the optical signal of aluminum powder combustion products. The results show that the uniformity of the atomization cloud of the gel fuel deteriorates with the increase of the particle size of the aluminum powder, the ignition delay also increases. The duration of the fireball and the maximum temperature of the fireball surface decrease to a certain extent.

[KEYWORDS] particle size of aluminum powder; aluminum-kerosene gel fuel; shock wave induced ignition; combustion characteristic

0 引言

随着航天科技的发展,推进系统对燃料各方面的性能也提出了更高的要求。传统的液体燃料点火延迟时间长,燃烧完成度低^[1]。在液体燃料中添加金属颗粒可以提高燃料在燃烧方面的性能。此外,添加金属颗粒可以改变燃料体系的燃烧行为^[2-3],缩短点火延迟时间^[4],提高燃速和燃烧热^[5-6]。在燃料高能化方面,铝粉由于具有较高的热值且成本低

廉,受到广泛关注和应用^[7]。

研究表明,向煤油燃料中添加纳米铝粉后,混合燃料的点火延迟时间会缩短,且自燃点会降低至600 $^{\circ}\text{C}$,燃烧效率也会强于纯煤油燃料^[8]。Zhao等^[9]采用LAMMPS软件模拟了铝/甲醇纳米流体燃料液滴的燃烧过程,在缩短点火延迟时间的同时,铝粉的加入也改变了甲醇燃烧的中间产物。此外,铝粉粒径是影响混合燃料燃烧特性的重要因素。Gan等^[10]研究了添加微米级和纳米级铝粉颗粒的铝/正癸烷燃料液滴的燃烧特性,结果表明:使用微米级铝

* 收稿日期:2024-10-31

第一作者:薛明帅(2000—),男,硕士研究生,主要从事燃料安全和燃烧特性的研究。E-mail:xuemingshuai@163.com

通信作者:王伯良(1964—),男,教授,博导,主要从事混合炸药配方设计及应用技术研究。E-mail:boliangwang@njust.edu.cn

粉颗粒制备的燃料液滴表现出了更强烈的微爆行为。Yu等^[11]的研究表明,对于氢气、铝粉和空气的混合云团,铝粉粒径的减小会导致混合燃料的反应速率增加。然而,铝粉粒径对混合燃料燃烧特性的影响程度受限于铝粉的添加量。Shi等^[12]研究发现,当铝粉添加质量分数小于8%时,铝粉粒径的减小会增大铝/甲醇纳米燃料喷雾爆炸的最大爆炸压力和最大火焰传播速度;当铝粉添加质量分数大于8%时,由于铝粉的团聚行为,铝粉粒径的变化不会对喷雾爆炸强度和火焰传播速度产生显著影响。Qiu等^[13]发现,当铝粉颗粒的粒径较小时,乙醇-生物柴油混合液滴的燃烧持续时间会随着铝粉含量的增加而增加;而当铝粉颗粒较大时,液滴的燃烧持续时间则会缩短。当前,关于混合燃料燃烧特性的研究方向主要集中在混合燃料处于静止状态下的燃烧现象,缺乏动态条件下混合燃料的点火、燃烧演化行为研究。基于此,选定以添加质量分数30%铝粉的含铝煤油凝胶燃料作为研究对象,探究铝粉粒径对凝胶燃料燃烧特性的影响规律。利用激波对含铝煤油凝胶燃料进行诱导点火试验,观察在激波诱导点火过程中的响应行为,探讨铝粉粒径对于含铝煤油凝胶燃料燃烧特性的影响。

1 实验部分

1.1 燃料制备

称取一定质量的煤油于烧杯中,添加无机凝胶剂,使煤油凝胶化^[14]。用手持式高速匀浆机预混合10 min,向混合后的煤油凝胶基质分别加入3种不同粒径的铝粉。然后,采用高速变频分散器对凝胶基质与铝粉的混合体系进行分散,分散时间为10 min,得到含铝煤油凝胶燃料。3种铝粉的中位粒径 d_{50} 分别为1.20、7.05 μm 及23.63 μm ,粒径分布如图1所示。根据铝粉粒径的不同,将凝胶燃料命名为KA-1.20、KA-7.05及KA-23.63。煤油凝胶燃料中各组分质量比为 $w(\text{煤油}) : w(\text{无机凝胶剂}) : w(\text{铝粉}) = 13 : 1 : 6$ 。

1.2 实验方法

1.2.1 测试系统

采用如图2所示的水平激波管。激波管全长2.68 m,包括高压段、低压段与测试段。其中:高压段长1.30 m,内径为69 mm,左端面布置点火电极,可连接高压点火器;低压段长0.88 m,内径为69 mm,左端连接高压段,右端连接测试段;测试段长

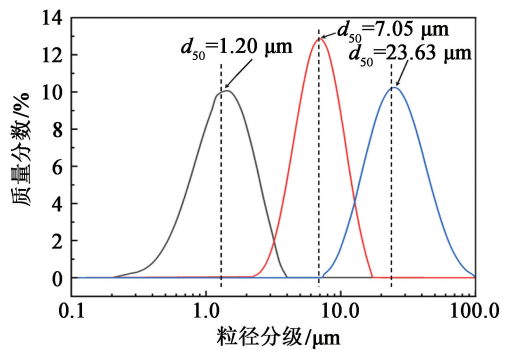


图1 铝粉粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of aluminum powder

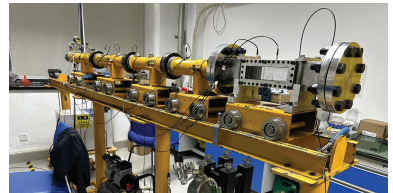


图2 激波管装置实物图

Fig. 2 The shock tube device

0.50 m。内部尺寸为50 mm × 50 mm,中间开有190 mm × 50 mm观察窗,末端放置尺寸为50 mm × 50 mm的钢制垫块,延伸至观察窗末端。

在激波管上共布置5个压力传感器。其中:低压段布置2个压力传感器(PT1和PT2);测试段布置3个压力传感器(PT3、PT4和PT5)。测试段传感器位置如图3所示。压力传感器PT3位于距观察窗左侧85 mm处;PT4位于观察窗左侧,用于测量入射激波射入观察段时的激波压力;PT5位于观察区末端与钢制垫块交界处,用于测量反射激波压力。通过PT3与PT4测得的激波到达时间,可计算得到入射激波的马赫数 Ma ,计算公式如下:

$$Ma = \frac{\Delta l}{c_0 \Delta t} \quad (1)$$

式中: Δl 为PT3与PT4间距; Δt 为PT3与PT4激波到达的时间差; c_0 为当地声速。

凝胶燃料放置于观察窗中心位置,正上方布置有光纤测温探头,采集铝粉燃烧时发出的光辐射信

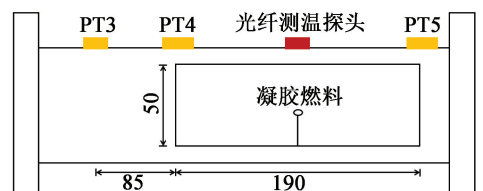
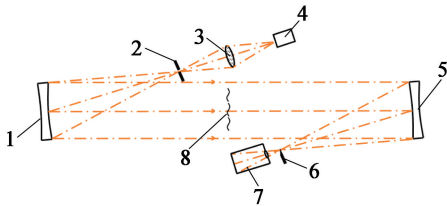


图3 测试段示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the test section (Unit: mm)

号,对铝粉燃烧时产生的 510、650、700、750 nm 波长光进行收集与处理,得到燃料燃烧的温度。

采用纹影法对激波的传播过程进行观察。纹影法被广泛应用于流场的可视化^[15],具有高灵敏度,可以直观地观察激波的位置、传播过程以及波后区域状态。采用 Z 型双反射镜光路纹影,如图 4 所示。光源经聚光透镜后,从狭缝中射出至凹面反射镜,反射至另一凹面反射镜,经刀口后射入高速摄像机。

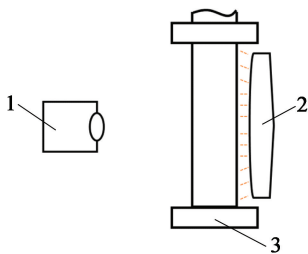


1 - 抛物面反射镜;2 - 狭缝;3 - 聚光透镜;4 - 光源;
5 - 抛物面反射镜;6 - 刀口;7 - 相机;8 - 测试区域。

图 4 Z 型双反射镜纹影系统光路图

Fig. 4 Optical path diagram of Z-type double mirror schlieren system

采用阴影法采集燃料燃烧过程的图像,获得燃料点火延迟时间及火球发展过程,实验装置如图 5 所示。在观察窗后布置光源,将高速相机布置在观察段另一侧,布置光源用以增强燃料雾化后云团与环境的对比度,获得燃料雾化及燃烧的更多信息。同时,采用数据采集仪搭配压力传感器记录压力信号,多谱线测温系统搭配光纤接头采集光纤信号,压力信号与光纤信号采样频率均为 1 MHz。采用高速摄像机采集可视图象,采样频率为 60 000 帧/s。



1 - 高速相机;2 - 光源;3 - 测试段。

图 5 阴影法实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of shadowgraph device

1.2.2 实验过程

如图 6 所示,在距离点火端 1.3 m 处安装厚度 0.05 mm 的聚氨酯膜片,对高压段进行抽真空处理,充入一定量的氢氧混合气体;点燃氢氧预混气体后,高压段发生燃烧转爆轰,爆轰波破膜后形成向低压段传播的入射激波;随后运动至观察段,并作用于观察窗中心处的凝胶燃料。

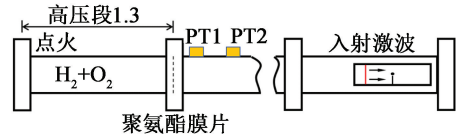


图 6 测试流程示意图(单位:m)

Fig. 6 Test procedure (Unit: m)

2 结果与分析

2.1 激波传播过程

将入射激波作用于燃料的时刻定义为 0 时刻,该时刻燃料受到激波带来的强扰动,在入射激波及波后高速气流作用下,燃料开始发生雾化。剥离下来的燃料被高速气流带走,形成羽流状云雾。入射激波作用于激波管右端面产生左行反射激波,将反射激波与雾化后的燃料云团发生接触的时刻定义为 t_1 时刻。反射激波与燃料云团接触后,经过一段时间,云团出现火焰,将初始燃烧时刻定义为 t_2 时刻,点火延迟时间 Δt 为 t_2 时刻与 t_1 时刻之差:

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (2)$$

图 7 为入射激波 $Ma = 3.12$ 时压力传感器记录的激波时程曲线,纵坐标为与 PT5 的间距。图 7 中,蓝色点划线表示入射激波的传播过程,斜率代表入射激波的传播速度;红色点划线展示了反射激波的传播过程与传播速度;橙色虚线表示经固壁面反射后形成的反射激波于 t_1 时刻作用于燃料。膜片破裂后,激波进入激波管低压段,先后经 PT1 和 PT2,在此处的峰值压力分别为 2 433.79 kPa 和 1 245.70 kPa。随后激波进入测试段,传感器 PT3 测得压力为 1 302.01 kPa,观察窗入口处压力传感器 PT4 测得压力为 1 107.76 kPa。激波于 0 时刻作用于燃料,使燃料发生雾化。伴随燃料的雾化,入射激波右传到达激波管右端面,此时,入射激波压力衰减至

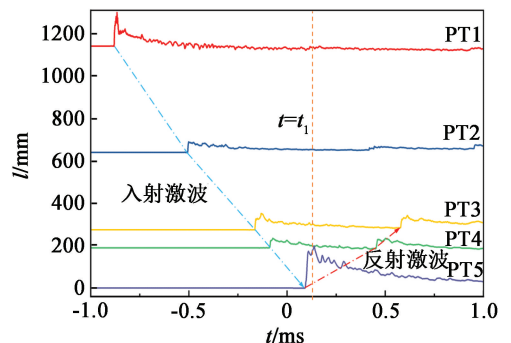


图 7 压力信号时程曲线

Fig. 7 Time history curves of pressure signals

845.54 kPa。在激波管右端面处,入射激波作用于固壁面发生反射,形成反射激波,反射激波压力为4 272.90 kPa,远远大于入射激波的压力,约为入射压力的3.85倍。可以看出:入射激波在传播过程中持续衰减,但压力在PT3处有略微回升,这是由低压段进入观察段时管径变小导致的。

由PT1与PT2测得的压力可知,膜片破裂后激波以 $Ma = 3.97$ 进行传播,传播至测试段入口处,衰减至 $Ma = 3.25$,且以该状态进入测试段。测试段激波传播的 $Ma = 3.12$,与入口处相比衰减了3.4%。

2.2 燃料雾化过程

燃料的雾化特性会对燃烧效果产生影响。当境内燃料云团到达可燃浓度范围时,云团才能顺利点燃,过高或过低的燃料浓度都会对燃料点火产生影响。图8为 $Ma = 3.12$ 条件下KA-1.20、KA-7.05及KA-23.63燃料的雾化过程,时间段为0~133.2 μs 。受到入射激波的强扰动作用,部分燃料脱离凝胶燃料主体部分并随激波向右传播,形成雾状的云团,将云团分为雾化区域和核心区域。

当云团浓度较小时,云团的透光程度较强,图像上反映为云团灰度减小、颜色变浅。随着铝粉粒径的增大,雾化区域的灰度减小,核心区域与雾化区域的分界变得明显。这是由于铝粉粒径增大,使得燃料的黏度减小^[14],被高速气流剥离,进入雾化区域的燃料更少,致使雾化区域浓度变小,核心区域与雾化区域的燃料云团浓度差变大,均匀性变差。同样,由于黏度的减小,被入射激波剥离进入雾化区域的燃料会更迅速地雾化成更小的颗粒,而这一现象加

剧了2个区域之间燃料云团的浓度差。

对比KA-1.20与KA-7.05可看出:KA-1.20燃料云团整体灰度变化不明显,浓度相差较小,只有云团末端灰度有较为明显的差距;而KA-7.05雾化后,雾化区域与核心区域有着明显的灰度差距,且根据KA-7.05的 t_1 时刻(133.2 μs)图像可以看出,云团距核心区域越远,灰度越小;在雾化过程中,燃料KA-23.63一经离开核心区域,迅速雾化破碎为更为细小的颗粒,在图像上较难观测区分出雾化区域。

2.3 燃料燃烧过程

为进一步说明入射激波作用后燃料的响应行为,选取KA-1.20结合纹影场进行阐述与分析。如图9所示,入射激波以 $Ma = 3.12$ 在测试段进行传播,在0时刻接触KA-1.20。由于燃料与支架相对于入射激波为超音速运动,所以在入射激波左侧出现了脱体激波,随着波后高速气流的速度衰减,脱体激波逐渐变弱。99.9 μs 时刻,入射激波作用于右端面,发生反射,形成超压反射激波,并于 t_1 时刻(133.2 μs)与右行的可燃性云团接触,而后继续左传。由149.8、166.5 μs 以及183.2 μs 3幅不同时刻的图片可以看出,当反射激波掠过可燃性云团时,被反射激波掠过部分云团的运动速度几近停滞,且逐渐有左行的趋势,未被掠过部分的运动方向则保持不变。如300.0 μs 所示,随着反射激波完全掠过可燃云团,云团的右行运动停滞,转而向左缓慢移动,但更多则是向上、下两侧扩散。

如图9的166.5 μs 时刻所示,云团右侧出现了微弱火焰,该时刻为云团燃烧的初始时刻 t_2 ,即点火

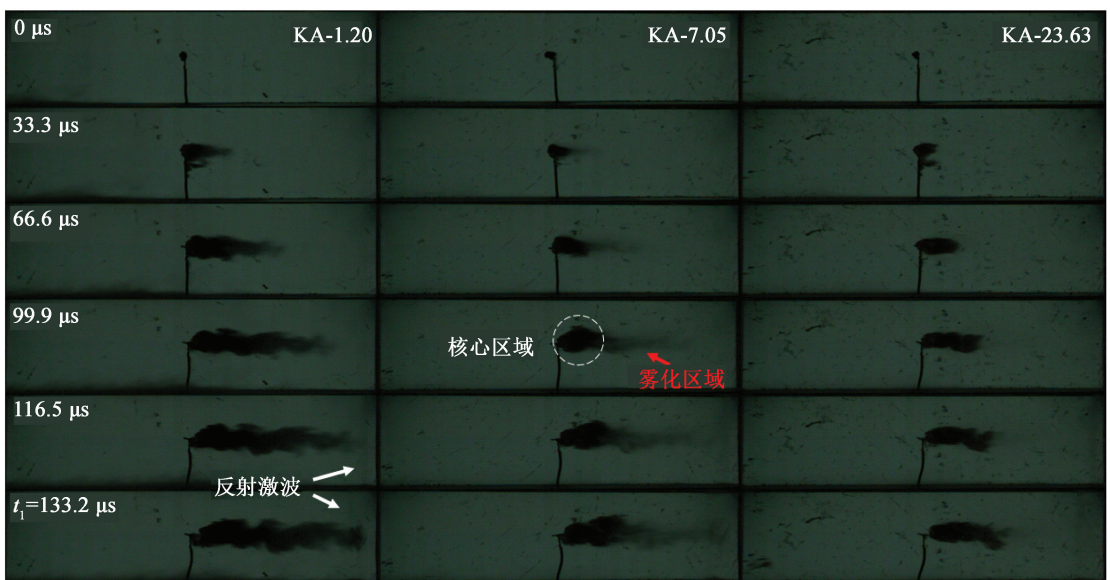
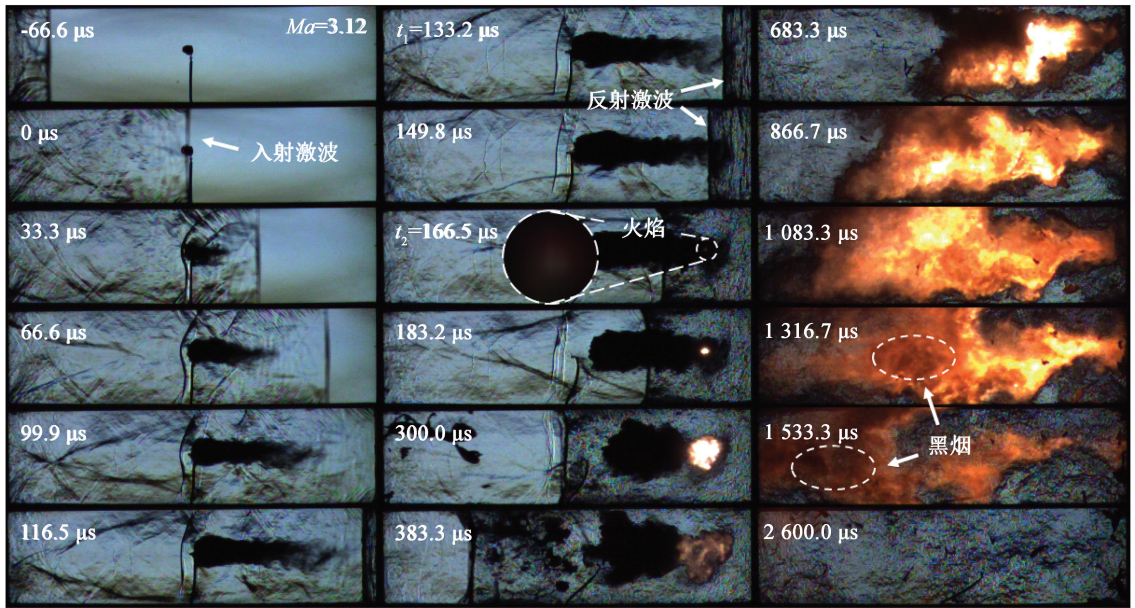


图8 雾化过程($Ma = 3.12$)

Fig. 8 Atomization process($Ma = 3.12$)

图9 激波诱导点火过程($Ma = 3.12, KA-1.20$)Fig.9 Shock wave induced ignition process($Ma = 3.12, KA-1.20$)

延迟时间 Δt 为 $33.3 \mu s$ 。火焰由右向左在可燃云团内传播,初始时传播较慢,逐渐蔓延至整个可燃云团,燃烧现象直至 $2600.0 \mu s$ 时刻结束,火球持续时间为 $2433.5 \mu s$ 。火球整体呈橘红色,为煤油气化燃烧产生的橘红色火焰;而火球内部呈现白色,则是铝粉参与燃烧反应产生的白色火焰。铝粉的添加提高了反应系统的能量,但使得燃料过于富集,出现燃烧不完全现象。这种不完全燃烧产生了大量的碳烟。如图9中 $1316.7 \mu s$ 所示,在火焰图像中可以清晰地观察到燃料不完全燃烧产生的强烈烟雾。

2.4 粒径对燃烧过程的影响

图10为KA-1.20、KA-7.05以及KA-23.63在入射激波 $Ma = 3.12$ 条件下,反射激波诱导后云团点火以及火球的发展过程。可以看出:铝粉粒径小的KA-1.20和KA-7.05点火延迟时间更短,在 $183.3 \mu s$ 时已经发生点火。粒径更小的KA-1.20在该时刻的火焰亮度更大;同时,粒径较大的KA-7.05只出现了零星的火星;而粒径更大的KA-23.63在此时尚未出现火焰。直至 $200.0 \mu s$,KA-23.63出现点火行为。

可燃云团发生点火行为后,火焰从右向左传播。在火焰传播过程中,KA-1.20的火焰传播速度最快,至 $283.3 \mu s$ 时刻,火球面积最大;发展至 $683.3 \mu s$,火焰几乎传播到整个可燃云团。由于液体更容易气化,在燃烧反应中,煤油先于铝粉颗粒气化形成可燃气体,气化后密度减小,可燃气体被推至火球外层参与燃烧。可燃气体燃烧的温度较低,所以火焰呈现

橘红色。铝粉颗粒的气化难度较大,在气化的同时,铝粉颗粒也参与了燃烧反应。因此,铝粉颗粒的燃烧集中在火球中部。KA-1.20黏度较强且铝粉粒径最小,雾化过程中,铝粉被包裹在体系内部,在可燃空气云团中均匀分布,煤油燃烧产生的热量能够有效地传递至铝粉表面,支撑铝粉升温,达到铝粉参加反应的温度。

KA-23.63形成的火球亮度最低,火球并不是成团燃烧,与KA-1.20、KA-7.05成团燃烧的火球有较大区别:1)由于KA-23.63的铝粉颗粒较大,随着粒径的增大,燃烧机理从动力学控制转变为扩散控制^[16],铝粉的点火能呈增大趋势^[17-19]。理论计算和实验表明,铝粉的粒径大于某一值(约 $3 \mu m$)时,铝粉由单个点火燃烧转变为团聚燃烧,导致燃烧效率下降^[16, 20-21]。2)KA-23.63黏度较低,体系对铝粉束缚能力较弱,在雾化过程中,铝粉剥离出体系。使得煤油与铝粉在空间上分布不均匀,煤油燃烧产生的热量未有效地传导至铝粉颗粒,造成铝粉不完全燃烧,且过于分散的铝粉颗粒也使得铝粉难以团聚燃烧。

KA-7.05也有着较小的粒径与较高的黏度,形成的火球与KA-1.20较为类似,中部为白色的高温火球,但火球表面仍能看出与KA-23.63类似的现象:火球表面为松散的颗粒状燃料燃烧,而不是气化煤油燃烧产生的橘红色火焰。

通过高速相机测得的点火延迟时间 Δt 和火球持续时间 t 如表1所示。可以看出:燃料的点火延

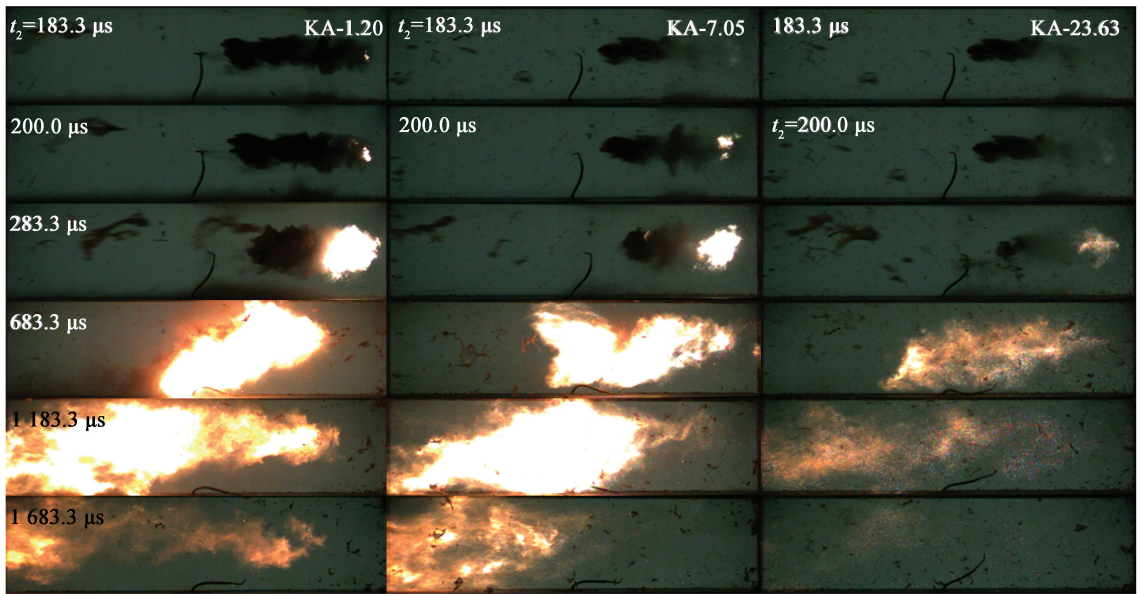


图 10 火球演化

Fig. 10 Flame evolution

表 1 火球时间信息

Tab. 1 Flame time information

| 燃料 | KA-1.20 | | KA-7.05 | | KA-23.63 | |
|-------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | Δt | t | Δt | t | Δt | t |
| 第 1 发 | 50.0 | 2 650.0 | 50.0 | 2 566.7 | 66.7 | 1 633.3 |
| 第 2 发 | 33.3 | 2 616.7 | 66.7 | 2 466.7 | 83.3 | 1 566.7 |
| 第 3 发 | 50.0 | 2 466.7 | 50.0 | 2 600.0 | 83.3 | 1 666.7 |
| 第 4 发 | 50.0 | 2 216.6 | 50.0 | 2 283.3 | 66.7 | 1 716.6 |
| 第 5 发 | 50.0 | 2 600.0 | 66.7 | 2 233.3 | 83.3 | 1 433.3 |
| 第 6 发 | 50.0 | 2 483.0 | 66.7 | 1 733.3 | 83.3 | 1 616.6 |
| 平均值 | 47.2 | 2 505.5 | 58.4 | 2 313.9 | 77.8 | 1 605.5 |

迟时间 Δt 随铝粉粒径的增大而增加;而火球持续时间 t 则逐渐缩短,其中,KA-7.05 与 KA-23.63 的火球持续时间相差较大。铝粉粒径的增大使得燃料在雾化时更为分散,燃料云团未能较好地集聚,链式燃烧反应传播受阻,从而影响了点火时间;且过于分散的燃料分布以及较大的铝粉粒径导致燃料云团不能有效地参与燃烧反应,燃烧反应不完全,使得火球的持续时间 t 缩短。

2.5 粒径对火球温度的影响

火球表面的最高温度如表 2 所示。KA-1.20、KA-7.05、KA-23.63 火球表面的平均最高温度分别为 1 458.2、1 329.8、1 166.9 K。

表明随着铝粉粒径的增大,火球表面的最高温度呈下降趋势。其中,KA-7.05 相较于 KA-1.20,火

表 2 火球表面的最高温度

Tab. 2 Maximum temperature of flame

| 燃料 | KA-1.20 | KA-7.05 | KA-23.63 |
|-------|---------|---------|----------|
| 第 1 发 | 1 456.2 | 1 427.4 | 1 216.2 |
| 第 2 发 | 1 527.5 | 1 363.6 | 1 213.6 |
| 第 3 发 | 1 329.7 | 1 366.6 | 1 170.9 |
| 第 4 发 | 1 329.5 | 1 250.9 | 1 193.0 |
| 第 5 发 | 1 580.6 | 1 232.2 | 1 087.9 |
| 第 6 发 | 1 525.4 | 1 338.2 | 1 119.5 |
| 平均值 | 1 458.2 | 1 329.8 | 1 166.9 |

球表面最高温度下降了 128.4 K,约为 KA-1.20 温度的 8.8%;KA-23.63 与 KA-1.20 相差 291.3 K,下

降了 20.0 %。说明铝粉粒径影响了燃料燃烧时的能量输出,导致火球表面的最高温度下降幅度较大,这与 2.4 节得到的结论相对应。

火球温度的时程曲线能更直观地体现燃料燃烧反应随时间的变化。图 11 是 KA-1.20、KA-7.05 以及 KA-23.63 典型的火球表面最高温度随时间的变化曲线。

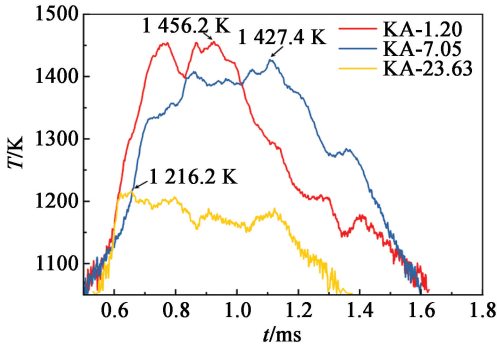


图 11 典型的温度-时程曲线

Fig. 11 Typical time history curves of temperature

在火球发展阶段,KA-1.20 的小粒径铝粉可以更快地参与反应,将火球温度抬升至较高且较为稳定的温度,为 1 450 K 左右;但火球温度维持在较高温度的时间较短,为 0.303 ms。KA-7.05 虽然在火球发展阶段温度上升较慢,火球峰值温度也较低,在 1 300 K 附近,但维持在较高温度的时间较长,为 0.456 ms,约为 KA-1.20 的 1.5 倍。由于 KA-23.63 的峰值温度较低,该燃料在发生燃烧反应后迅速达到 1 200 K 左右的峰值温度,而后一直持续在峰值附近缓慢燃烧,这一过程持续约 0.519 ms。

3 结论

以不同粒径的含铝煤油凝胶燃料作为研究对象,利用纹影法与阴影法对燃料的激波诱导点火现象进行观测,研究了铝粉粒径对燃料雾化特性以及燃烧特性的影响。研究结论如下:

1) 铝粉粒径显著影响含铝煤油凝胶燃料的雾化行为。随着铝粉粒径的增大,含铝煤油凝胶燃料的黏度降低,受激波作用后,核心区域与雾化区域的燃料浓度相差较大;同时,大粒径的铝粉在雾化过程中更容易被剥离出体系,造成煤油与铝粉在空间上分布不均匀。

2) 对不同粒径含铝煤油凝胶燃料的燃烧过程进行对比分析,发现在含大粒径铝粉的煤油凝胶燃料所形成的可燃性云团中,铝粉分布较为分散,导致

点火延迟时间增加;且铝粉粒径的增大造成了铝粉反应不完全,火球持续时间缩短。

3) 由于铝粉粒径增大导致的铝粉反应不完全,使得火球表面的峰值温度减小。随着粒径增大,火球表面的峰值温度会进一步降低。但铝粉粒径适量的增加会延长火球峰值温度的持续时间,粒径由 1.20 μm 增加至 7.05 μm ,火球峰值温度的持续时间增加至原时长的 1.5 倍。

参 考 文 献

- [1] XIU T F, ZHI X M, ZHANG X W, et al. Ignition and combustion performances of high-energy-density jet fuels catalyzed by Pt and Pd nanoparticles [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(2): 2163-2169.
- [2] VAN DEVENER B, ANDERSON S L. Breakdown and combustion of JP-10 fuel catalyzed by nanoparticulate CeO_2 and Fe_2O_3 [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(5): 1886-1894.
- [3] CHEN W Q, ZHU B Z, SUN Y L, et al. Nano-sized copper oxide enhancing the combustion of aluminum/kerosene-based nanofluid fuel droplets [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 240: 112028.
- [4] CHEN B H, LIU J Z, LI H P, et al. Laser ignition and combustion characteristics of Al/JP-10 nanofluid droplet [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 135(2): 925-934.
- [5] SIM H S, PLASCENCIA M A, VARGAS A, et al. Acoustically forced droplet combustion of liquid fuel with reactive aluminum nanoparticulates [J]. *Combustion Science and Technology*, 2020, 192(5): 761-785.
- [6] LIU W J, BAI C H, LIU Q M, et al. Effect of metal dust fuel at a low concentration on explosive/air explosion characteristics [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 221: 41-49.
- [7] 张建侃, 赵凤起, 秦钊, 等. 铝基合金燃料的研究及其在固体推进剂中的应用进展 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(2): 101-116.
ZHANG J K, ZHAO F Q, QIN Z, et al. Research progress of Al-based alloy fuels and perspectives for applications in solid propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(2): 101-116.
- [8] JAVED I, BAEK S W, WAHEED K. Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 774-787.
- [9] ZHAO Y, WANG X H, CHENG Y X, et al. Ignition and

