

文章编号 1004-924X(2015)08-2288-08

基于彩色火焰图像的铝、硼纳米颗粒燃烧特性

孔成栋*, 于丹, 姚强, 卓建坤, 李水清

(清华大学热能工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:用彩色数码相机拍照结合图像处理的诊断方法研究了铝、硼纳米颗粒的燃烧特性和机理, 得到了铝、硼纳米颗粒火焰的形貌特征、温度分布及着火时间等。燃烧实验中使用多元扩散平焰燃烧器(Hencken 燃烧器)提供可控的高温环境, 利用固体颗粒乙醇溶解-超声分散-雾化-干燥的给粉方式产生高分散的纳米气溶胶, 并在不同工况下对纳米颗粒火焰进行拍照。从所得彩色图片中提取红、绿、蓝三色通道信号, 结合普朗克辐射定律获得颗粒的辐射强度信息及温度信息。结果表明:不同环境温度会导致不同的颗粒变温历程。高温环境下铝、硼颗粒经着火后颗粒温度逐渐下降, 而低温下由于氧化层多晶相变的影响铝颗粒温度先缓慢升高而后缓慢下降, 硼颗粒温度则几乎维持恒定。硼颗粒着火过程可分为着火延时和着火两个阶段, 通过火焰图像定义了相应的时间, 测得的硼颗粒着火延迟时间为 1.17~2.98 ms, 着火时间为 0.31~0.85 ms。

关键词:铝; 硼; 纳米燃料; 双色法; 火焰温度分布; 火焰彩色图像; 燃烧特性

中图分类号:TK16; TB383 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2288

Combustion characteristics of aluminum and boron nanoparticles based on flame color images

KONG Cheng-dong*, YU Dan, YAO Qiang, ZHUO Jian-kun, LI Shui-qing

(Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering of the Ministry of Education,
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: kcd10@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: The combustion characteristics of aluminum and boron nanoparticles were studied based on the optical diagnostics using a color digital camera and subsequent image processing and their morphologic features, temperature characteristics and the ignition time were obtained. In the experiments, the multi-diffusion flat flame burner (i. e. Hencken burner) was used to support a tunable high temperature ambience. A series of processes including dissolving the nanoparticles into the ethanol, ultrasonically dispersing, atomization, and diffusion-drying were used to generate well-dispersed nanoparticle aerosol. The flame images of the nanoparticles were recorded by a color digital camera under different experimental conditions. The signals of red, green and blue channels were derived from the color images to obtain the radiation intensity and the information of particle temperatures based on the Planck's law. The results indicate different particle temperature profiles at different ambient temperature. At a high temperature, the particle temperatures of Al and B decrease directly after ignition. At

收稿日期: 2014-11-03; 修订日期: 2015-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51206089); 第 51 批博士后科学基金资助项目(No. 2012M510438)

a low temperature, the particle temperature of Al increases slowly to a peak and then decreases due to the polymorphic phase transition of the alumina shell, while the particle temperature of B is nearly constant. The ignition process of B is divided into ignition delay and ignition stage, and the time could be defined from the flame images. The time of ignition delay for B ranges from 1.17 ms to 2.98 ms and the ignition time ranges from 0.31 ms to 0.85 ms.

Key words: aluminum; boron; nanoscale fuel particle; two-color method; flame temperature distribution; flame color image; combustion characteristics

1 引言

与碳氢燃料相比,固体铝、硼颗粒具有较高的体积和质量能量密度^[1-2],是良好的固体火箭推进剂添加剂,在炸药、烟火制造、铝热剂制备中也具有重要应用^[1-5]。铝、硼的纳米颗粒由于具有更小的颗粒尺寸、更大的表面积、更高的反应活性、更快的着火和燃烧速度,在先进推进、水下推进等领域都有着广泛的应用前景^[6-7],因此,纳米铝硼的燃烧特性的研究十分受人关注。目前,纳米铝、硼颗粒的燃烧诊断仍是研究难点,由于实验工况难以控制、测量手段有限,它们的燃烧机理尚不明确,尤其是单颗粒的着火与燃烧机理更需进一步深入研究。

目前,研究铝、硼等含能颗粒的着火、燃烧性能的主要方法有激波管^[7-9]、高压燃烧器^[10]、差热-热重分析^[11-14]、激光点火^[15-18]及平焰燃烧器^[19-22]等。燃烧特性可通过有限体积内压力信号变化^[10]、热辐射信号变化^[17]及特征发射谱信号^[21]的强弱等进行表征。总的来说,差热-热重分析并不能真实模拟实际燃烧过程,激波管、高压燃烧器对设备要求比较高,而激光点火则主要研究点火过程而不能对高温环境中的燃烧、燃尽历程进行研究。平焰燃烧器的制作相对简单,且易与各种在线光谱诊断技术、在线采样技术结合,能更全面地研究燃烧过程。因而,本文采用 Hencken 平焰燃烧器进行着火、燃烧的研究^[22]。

纳米颗粒由于颗粒间范德华力作用而相互团聚^[23],导致实验为颗粒团燃烧而非单颗粒燃烧。颗粒团聚对传质、换热、表面反应都有复杂的影响,增加了燃烧机理研究的复杂性和不确定性。例如 Zachariah 实验组^[21]利用 Mckenna 平焰燃烧器研究了纳米硼颗粒的燃烧性能。发现原始平均粒径只有 62 nm 的硼颗粒在实验中团聚成粒

径为 200 nm 的颗粒团,使得点火时间与 2~3 μm 的硼颗粒^[19]相比并无明显缩短。

本文基于平面扩散火焰 Hencken 燃烧器,利用自制的给粉系统,有效控制了颗粒间团聚,产生了高分散度的纳米铝、硼纳米颗粒气溶胶进行燃烧实验。在诊断方法方面,采用低成本且高分辨的彩色数码相机来记录颗粒火焰的形貌,通过后期图像处理获得沿程温度信息以及着火、燃尽时间等关键燃烧特性。

2 实验系统及诊断技术

为了有效控制纳米颗粒间团聚,实现颗粒的有效分散与近似单颗粒燃烧,本课题组开发了一套基于超声分散、雾化、扩散干燥的纳米气溶胶发生方法,如图 1 所示。首先将铝或硼固体颗粒超声分散于无水酒精中,形成稳定的悬浊液,然后利用自制雾化器把悬浊液雾化为亚微米液滴。产生的液滴气溶胶通过充满无水氯化钙的扩散干燥器后,乙醇挥发并被无水氯化钙吸收,最终形成干

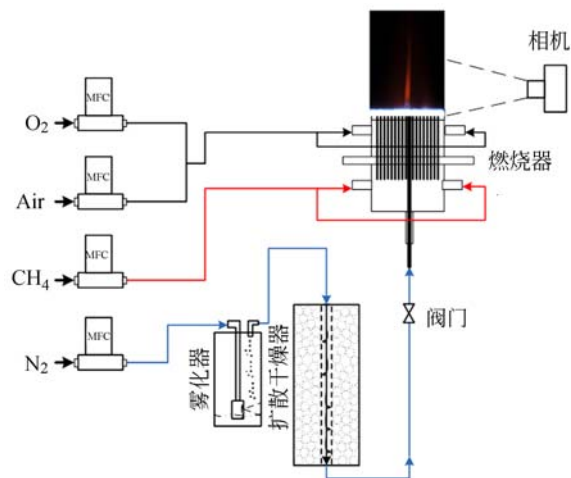


图 1 实验系统与相应诊断技术示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system and diagnostics

燥的金属颗粒气溶胶。将高度分散的金属颗粒气溶胶通入 Hencken 平焰燃烧器维持的高温环境进行着火、燃烧实验。具体颗粒分散效果参见文献[22]。Hencken 型平焰燃烧器通过许多小的扩散火焰来营造一维的高温环境,由于是贫燃料配气,使得甲烷燃尽同时在焰后区形成氧化性气氛,碳烟在此环境下可以被有效抑制,并不干扰后续的颗粒火焰测量。

利用彩色数码相机(尼康 D300s)对不同工况下的纳米颗粒火焰拍照成像。拍摄过程中控制锐度、对比度、饱和度、ISO、白平衡、光圈等不变,变化曝光时间以获得清晰且强度不饱和的火焰照片。

3 图像处理

得到的火焰图像分辨率为 $4\ 288\ \text{pixel} \times 2\ 848\ \text{pixel}$ 。使用 Matlab 将图像进行矩阵表示,即空间与灰度离散化,以及空间采样和灰度量化,得到火焰的辐射强度及光谱信息。分析处理这些高像素图像数据可得到纳米铝、硼颗粒的高分辨率火焰温度分布和着火、燃烧时间。

3.1 颗粒温度

纳米铝、硼颗粒在高温环境下燃烧时以非均相表面反应为主。反应过程中颗粒温度升高并向外辐射,从而形成红黄色火焰。彩色数码相机通过对红(R)、绿(G)、蓝(B)3种基本色彩的记录来表征物体的色彩空间。而 R、G、B 的区分是通过在 CMOS 感光芯片的每个像素点前添加滤光片来实现的,因而每一张彩色照片不但包含信号强度信息,而且还包含一定的光谱信息。通过分析图像中蕴含的辐射强度及光谱信息能够获取火焰的温度。

火焰颜色主要来源有热辐射和自由基及中间体的化学荧光辐射两类,对于一般气体火焰,比如甲烷,产生的蓝色火焰主要来自于化学荧光,而当 Soot 浓度高时出现黄色火焰则来自于 Soot 的热辐射。对于固体颗粒的非均相燃烧,气相自由基浓度相对低,火焰辐射主要以颗粒热辐射为主(尤其是温度较低时)。热辐射谱线为连续谱且满足普朗克辐射定律,如式(1)所示:

$$I(\lambda, T_p) = \epsilon(\lambda, T_p) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{\lambda k T_p}) - 1]}, \quad (1)$$

式中: ϵ 为颗粒发射率, λ 为波长, c 为光速, h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, T_p 为颗粒温度。普朗克辐射定律明确了辐射信号强度随波长的分布规律及温度对分布的强烈影响。相机拍摄时每个像素点探测到的颗粒热辐射信号强度为:

$$S_i(z, T_p) = \tau_{\text{expose}} N_p \int_i 4\pi r_p^2 I(\lambda, T_p) \eta_i(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中: z 表示像素点位置, τ_{expose} 为拍摄曝光时间, N_p 为每像素点对应颗粒数浓度, η 为考虑镜头、滤光片透射率及几何因子等的探测效率, i 代表 R、G、B 3 种不同的滤光片。Kuhn 等^[24]给出了相应尼康相机的 R/G/B 三通道对应的光谱相应曲线,表明 R/G/B 分别对应不同波段, B 通道主要通过 450 nm 波长附近的光线, G 通道主要让 530 nm 附近的光通过, R 通道则主要让波长大于 560 nm 的光通过。对不同波段信号求比值便可得到温度的单值函数:

$$\frac{S_i(z, T_p)}{S_j(z, T_p)} = \frac{\int_i I(\lambda, T_p) \times \eta_i(\lambda) d\lambda}{\int_j I(\lambda, T_p) \times \eta_j(\lambda) d\lambda} = f(z, T_p). \quad (3)$$

由于实验中颗粒燃烧辐射对 B 通道的贡献较小且常受到甲烷火焰的干扰,因而选用 R、G 两通道的信号强度比值来获取颗粒的温度信息。当然要对温度进行定量化需要更多的标定工作,此处仅考虑相对值及二维分布,不考虑绝对温度值。此外 G/R 值在辐射信号弱时会出现翘尾现象(即

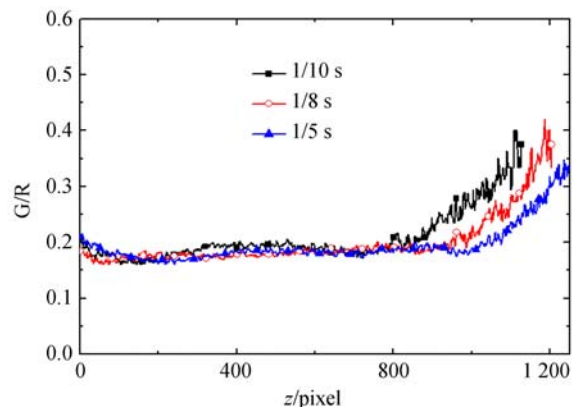


图 2 不同曝光时间下铝颗粒火焰 G/R 值随流线变化曲线

Fig. 2 G/R ratio of aluminum flame along streamline at different exposure time

G/R 值不降反升),此时 G/R 比值便不能有效地表征颗粒温度。图 2 记录了不同曝光时间下将 G/R 值在垂直流线方向平均后的 G/R 曲线,表明曝光时间越长,信号强度越强,G/R 翘尾现象推迟出现,因而在利用 G/R 值表征颗粒温度时需要选择合适的曝光时间,以保证足够的信号强度。

3.2 着火、燃烧时间

实验中,铝、硼纳米颗粒随气流运动进入甲烷/氧气/空气燃烧产生的焰后高温区,沿程发生着火、燃烧、燃尽过程。着火、燃烧时间可通过空间距离与颗粒速度的比值获得。为了将照片像素与空间尺寸相关联,相机和镜头等固定后在火焰位置放置一钢尺,拍下照片用于标定空间尺寸和照片像素的关系。给粉气流速度可利用激光相位多普勒测速仪(Laser Phase Doppler Anemometer, PDA)测量。由于纳米颗粒的随流性较好,假定颗粒速度和流体速度相同,即可利用 PDA 测得的速度来表征颗粒速度。高分辨的空间距离与合理的颗粒流速保证了计算所得着火与燃烧时间的高分辨率。

纳米颗粒的燃烧程度可通过火焰的辐射强度进行表征。对于非均相燃烧过程,颗粒温度可直接表征燃烧的程度^[12],而由于颗粒温度一般在 1 000~3 000 K,其热辐射主要集中在红色波段,

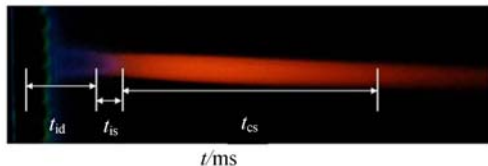


图 3 硼纳米颗粒着火与燃烧阶段划分示例图

Fig. 3 Ignition delay (t_{id}), ignition (t_{is}), combustion (t_{cs}) stages of boron nano-particles

实际处理结果也表明红色 R 通道的信号最强,因而选用红色通道信号来表征燃烧过程。如图 3 所示,红色信号对时间求一阶导数,由于红色信号强度和颗粒温度正相关,其对时间的导数可表征颗粒的升温速率。一般在着火过程中颗粒温度变化最大,因而将一阶导数谱峰的半高全宽作为硼纳米颗粒的着火阶段。半高全宽前沿到燃烧器表面为着火延迟阶段,半高全宽后沿到红色信号谱峰的半高全宽后沿定义为燃烧阶段。

4 结果与讨论

4.1 纳米颗粒火焰形貌

高分散纳米金属颗粒在甲烷/氧气/空气的焰后区燃烧时呈现红黄色火焰,如图 4 所示。比较

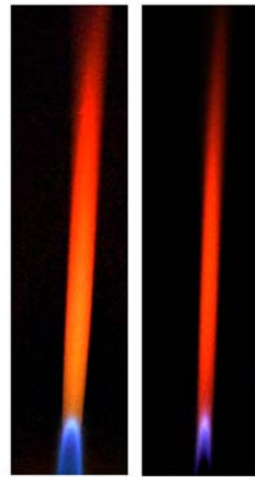


图 4 硼颗粒(左)与铝颗粒(右)火焰形貌

Fig. 4 Flames of boron (left) and aluminum (right) nanoparticles

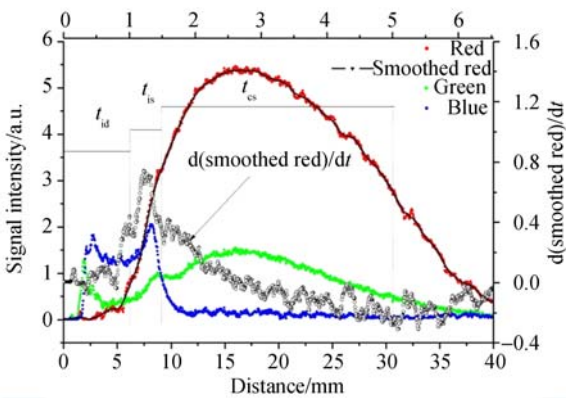


图 3 硼纳米颗粒着火与燃烧阶段划分示例图

Fig. 3 Ignition delay (t_{id}), ignition (t_{is}), combustion (t_{cs}) stages of boron nano-particles

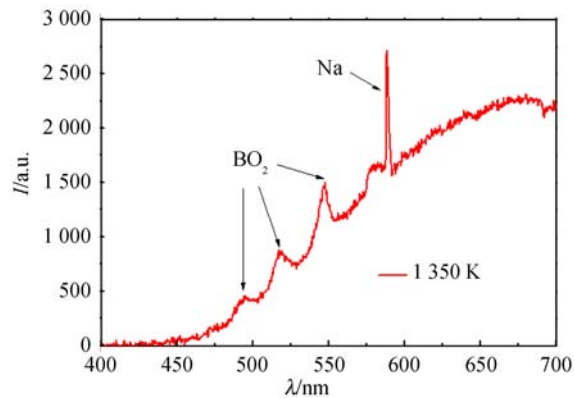


图 5 硼颗粒火焰辐射光谱

Fig. 5 Emission spectra from burning B particles

铝、硼纳米颗粒的火焰形貌,可发现两者的色彩相似。这是由于火焰颜色主要来自颗粒热辐射,而燃烧颗粒温度的主要辐射波段位于红色波段。但仔细观察发现硼颗粒火焰比铝颗粒更加黄绿些;光谱仪对辐射光谱的分析也证实硼颗粒火焰在 480~580 nm 内存在来自 BO_2 的特征峰,如图 5 所示,从而使得火焰更加黄绿。

4.2 纳米颗粒火焰温度分布

图 6 和图 7 所示为不同环境温度下铝、硼纳米颗粒的 G/R 值二维分布图。火焰根部 G/R 值较大主要是由于甲烷火焰的干扰,但图中可以明显地区分颗粒火焰而排除甲烷火焰影响。对于硼颗粒火焰,在高温下的火焰长度明显大于低温情况,而铝颗粒则相反,总的来说沿垂直气流方向信号强度均匀。为了更加直观地表征 G/R 值随流线的变化,将信号在垂直气流方向取平均后得到不同环境温度下 G/R 值随流线变化曲线,如图 8、图 9 所示,图中已将颗粒火焰的起始位置平移至同一位置以便于比较火焰长度。可发现高温时铝、硼火焰的 G/R 值沿携流方向直接下降;低温时铝火焰的 G/R 值先缓慢上升而后下降,形成一个小山包的形状,而硼火焰的 G/R 值则沿流线几乎不变。

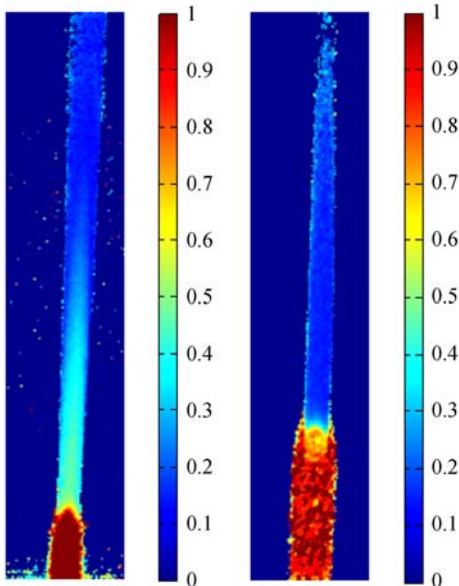


图 6 高温环境 1 406 K(左)和低温环境 1 235 K(右)下硼火焰的 G/R 值分布

Fig. 6 Two-dimensional distribution of G/R ratio of boron flame at 1 406 K (left) and 1 235 K (right)

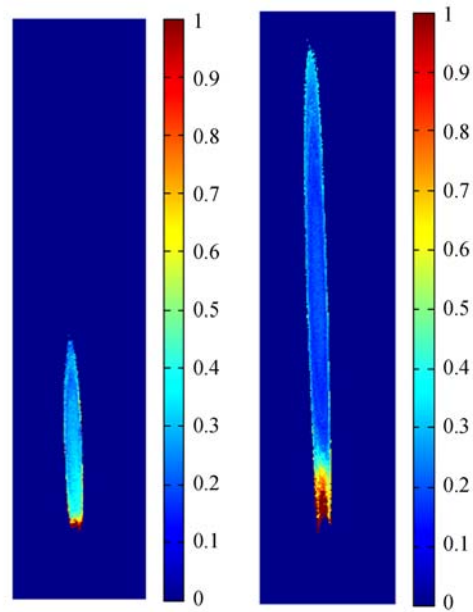


图 7 1 400 K(左)和 1 200 K(右)环境温度下铝颗粒火焰的 G/R 值分布

Fig. 7 Two-dimensional distribution of G/R ratio of aluminum flame at 1 400 K (left) and 1 200 K (right)

温度场的空间分布反映了颗粒流在燃烧过程中的温度变化历程。本质上,颗粒温度受能量方程,即反应放热和颗粒与环境散热控制:

$$\frac{d \sum_j^{N_p} c_{p,j} m_j T_p}{dt} = \dot{Q}_h(t, T_p, T_g) + \dot{Q}_{ch}(t, T_p), \quad (4)$$

其中: c_p 为颗粒的定压比热容, m 为颗粒质量, 右边第一项为颗粒与环境换热项, 右边第二项为化学反应放热项。纳米铝和硼都遵循非均相燃烧模式, 反应在颗粒表面进行。但铝和硼颗粒外层有氧化层包裹, 且氧化铝和氧化硼的沸点都很高, 一般很难自发去除。随着反应进行, 氧化产物向外沉积, 使得反应阻力越来越大。已有研究表明, 纳米铝的着火温度接近铝熔点(933 K), 而硼的着火温度比较高, 微米颗粒着火温度在 1 500 K 以上^[21], 纳米硼颗粒应降低一些(但无明确数据)。在高温情况(1 400 K)下, 纳米颗粒在甲烷平焰的加热下迅速加热并着火, 颗粒温度升至最大值, 由于着火时间太快并受甲烷火焰信号的干扰, 在图 8 和图 9 中难以探测着火的升温过程。升至最高温度后由于氧化层增厚反应速率逐渐下降, 颗粒温度也因此下降, 表现为 G/R 值的减小。对于硼

颗粒,由于高温下会存在部分 BO_2 的发射谱,因而相比之下火焰底部 G/R 值大于铝颗粒。在温度较低时,铝首先在金属铝的熔点附近着火^[25],而后由于氧化层多晶相变对反应的促进作用^[26],颗粒温度进一步升高直至氧化层内相变导致的缺陷修复,之后反应速率下降,颗粒温度也因此降低。正因为氧化层多晶相变的作用使得在图 8 中出现类似小山包的曲线特征。而对于硼颗粒,表面氧化硼的熔点很低($\sim 720\text{ K}$)但沸点很高,不像铝颗粒可通过铝核熔化或氧化层结晶相变来加快反应从而助燃,在类似环境下硼的着火主要依赖于热效应。低温下硼颗粒反应速率慢,颗粒温度也较低,因而图 9 中 G/R 值几乎一致,而且信号迅速减弱出现了翘尾现象,使得图 6 中火焰长度明显短于高温情况。

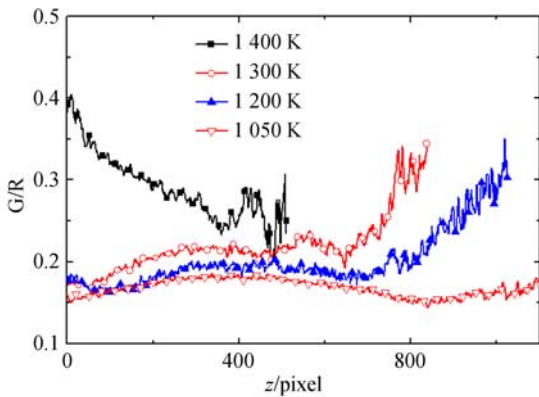


图 8 铝颗粒火焰在不同环境温度下 G/R 值随流线变化曲线

Fig. 8 G/R ratio of aluminum flame along streamline at different temperatures

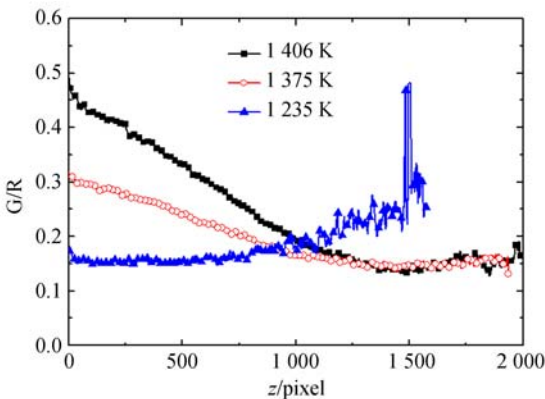


图 9 硼颗粒火焰在不同环境温度下 G/R 值随流线变化曲线

Fig. 9 G/R ratio of boron flame along streamline at different ambient temperatures

4.3 纳米硼颗粒的着火分析

颗粒燃烧的高温环境为甲烷/氧气/氮气火焰的焰后区,通过改变气体比例和流量(尤其是甲烷的流量)可改变环境温度,同时也改变燃后区气体成分($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$)。根据图 3 定义的着火延时和着火时间,从拍摄的火焰照片中得到了不同工况下的着火特征时间,如表 1 所示。可见着火延迟时间为 $1.17\sim 2.96\text{ ms}$,与微米颗粒接近^[19]。着火阶段时间为 $0.31\sim 0.85\text{ ms}$,比微米颗粒小。

表 1 不同工况纳米硼颗粒着火延迟时间与着火时间
Tab. 1 Experimental conditions and ignition delay and ignition time of boron nanoparticles

工况	平面火焰场产物浓度			温度 /K	t_{d}^{E} /ms	t_{s}^{E} /ms	t_{s}^{C} /ms
	$\text{O}_2/\%$	$\text{CO}_2/\%$	$\text{H}_2\text{O}/\%$				
1	0.365	0.114	0.228	1 406	1.17	0.31	0.40
2	0.382	0.106	0.212	1 375	1.22	0.46	0.46
3	0.081	0.116	0.233	1 375	1.16	0.67	0.52
4	0.428	0.088	0.176	1 268	2.34	--	--
5	0.235	0.099	0.198	1 267	2.09	0.85	0.82
6	0.447	0.082	0.164	1 235	2.96	--	--

t_{d}^{E} 为实验测得的着火延迟时间; t_{s}^{E} 为实验测得的着火阶段时间; t_{s}^{C} 为计算所得的着火阶段时间

根据表 1 中的工况条件变化,可分析环境温度、氧气浓度、水分浓度对着火的影响。反应速率总是随温度升高而加快,因而随着环境温度升高,着火延时和着火阶段时间变短;比较工况 2 和 3 可发现氧气浓度越高,着火阶段时间越短;比较工况 4 和 5,虽然温度相同,且工况 4 中氧气浓度高于工况 5,但工况 4 无明显着火发生,说明水的加入确实有利于纳米硼颗粒的着火。氧气与水浓度对着火延迟时间影响则不大。上述因素对硼颗粒的着火性能影响与前人对硼纳米颗粒或微米颗粒的着火性能研究结果一致,说明采用图像分析方法所获取的结果有较高可靠性。

应用 Kuo^[19] 提出的硼单颗粒着火模型,假定氧化硼的厚度为 $45\sim 55\text{ nm}$,可计算纳米硼颗粒的着火时间,如表 1 最后一列所示,与实验值吻合较好。可见,本实验系统及诊断方法可较好地应用于硼纳米单颗粒的研究。

5 结 论

本文对高分散纳米铝、硼颗粒的燃烧性能进

行了分析,得到了铝、硼纳米颗粒火焰的形貌特征、温度分布及着火时间等。通过比较不同环境温度下颗粒温度分布特征,比较了硼颗粒与铝颗粒的燃烧特性,表明铝颗粒在低温环境下氧化层相变对反应的促进作用。硼颗粒的着火过程被分为着火延时及着火两个阶段,1 200~1 400 K 区间内着火延迟为 1.17~2.96 ms,而着火时间为

0.31~0.85 ms。

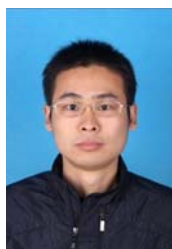
虽然通过拍照-图像处理方法获取了非常重要的燃烧特性,但尚存在一些不足,比如实际颗粒流中的颗粒粒径分布并不单一,存在大、小颗粒,颗粒尺寸直接影响辐射强度、颗粒温度、着火、燃烧时间,因而现有结果仅是一个平均值。后期将会窄化粒度分布来得到更精确的数据。

参考文献:

- [1] ZHOU W. *Numerical Study of Multi-phase Combustion: Ignition and Combustion of An Isolated Boron Particle in Fluorinated Environments* [D]. Princeton: Princeton University, 1998.
- [2] DREIZIN E L. Metal-based reactive nanomaterials [J]. *Prog. Energ. Combust. Sci.*, 2009, 35(2): 141-167.
- [3] ZHUK A Z, SHEINDLIN A E, KLEYMENOV B V, *et al.*. Use of low-cost aluminum in electric energy production [J]. *J. Power Sources*, 2006, 157(2): 921-926.
- [4] VLASKIN M S, SHKOLNIKOV E I, BERSH A V, *et al.*. An experimental aluminum-fueled power plant [J]. *J. Power Sources*, 2011, 196(20): 8828-8835.
- [5] GALFETTI L, DE LUCA L T, SEVERINI F, *et al.*. Nanoparticles for solid rocket propulsion [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2006, 18(33SI): 1991-2005.
- [6] 万俊,蔡水洲,刘源,等. 推进剂铝粉与水反应特性研究[J]. *固体推进*, 2012(2): 207-211.
- WAN J, CAI SH ZH, LIU Y, *et al.*. Study on reaction characteristic of aluminum powder with water applied to propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2012(2): 207-211.
- [7] BAZYN T, KRIER H, GLUMAC N. Combustion of nanoaluminum at elevated pressure and temperature behind reflected shock waves [J]. *Combust. Flame*, 2006, 145: 703-713.
- [8] KRIER H, BURTON R L, SPALDING M J, *et al.*. Ignition Dynamics of Boron Particles in a Shock Tube [J]. *J. Propul. Power*, 1998, 14(2): 166-172.
- [9] SPALDING M J, KRIER H, BURTON R L. Boron suboxides measured during ignition and combustion of boron in shocked Ar/F/O₂ and Ar/N₂/O₂ mixtures [J]. *Combust. Flame*, 2000(120): 200-210.
- [10] FOELSCHE R O, BURTON R L, KRIER H. Boron particle ignition and combustion at 30-150 atm [J]. *Combust. Flame*, 1999(117): 32-58.
- [11] JAIN A, ANTHONYSAMY S, ANANTHA-SIVAN K, *et al.*. Studies on the ignition behavior of boron powder [J]. *Termochimica Acta*, 2010, (500): 63-68.
- [12] TRUNOV M A, SCHOENITZ M, DREIZIN E L. Effect of polymorphic phase transformations in alumina layer on ignition of aluminum particles [J]. *Combust. Theor. Model.*, 2006(10): 603-623.
- [13] TRUNOV M A, SCHOENITZ M, ZHU X, *et al.*. Effect of polymorphic phase transformations in Al₂O₃ film on oxidation kinetics of aluminum powders [J]. *Combust. Flame*, 2005(140): 310-318.
- [14] 樊永平,纪松,张延松,等. 纳米铝粉的活性和放热行为研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2011(2): 93-95.
- FAN Y P, JI S, ZHANG Y S, *et al.*. Activity and exothermic behavior of nano-aluminum powder [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011(2): 93-95. (in Chinese)
- [15] YUASA S, ISODA H. Ignition and combustion of small boron lumps in an oxygen stream [J]. *Combust. Flame*, 1991(86): 216-222.
- [16] GILL R J, BADIOLA C, DREIZIN E L. Combustion times and emission profiles of micron-sized aluminum particles burning in different environments [J]. *Combust. Flame*, 2010(157): 2015-2023.
- [17] MOHAN S, FURET L, DREIZIN E L. Aluminum particle ignition in different oxidizing environments [J]. *Combust. Flame*, 2010(157): 1356-1363.

- [18] 李鑫,赵凤起,郝海霞,等. 不同类型微/纳米铝粉点火燃烧特性研究[J]. 兵工学报, 2014, 3(5): 640-647.
LI X, ZHAO F Q, HAO H X, *et al.*. Research on ignition and combustion properties of different micro/nano-aluminum powders[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 640-647. (In Chinese)
- [19] YEH C L, KUO K K. Ignition and combustion of boron particles [J]. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1996, 22: 511-541.
- [20] ULAS A, KUO K K, GOTZMER C. Ignition and combustion of boron particles in fluorine-containing environments [J]. *Combust. Flame*, 2001, 127: 1935-1957.
- [21] YOUNG G, SULLIVAN K, ZACHARIAH M R, *et al.*. Combustion characteristics of boron nanoparticles [J]. *Combust. Flame*, 2009(156): 322-333.
- [22] KONG C, YAO Q, YU D, *et al.*. Combustion characteristics of well-dispersed aluminum nanoparticle streams in post flame environment [J]. *P. Combust. Inst.*, 2015, 35(2): 2479-2486.
- [23] BRISCOE B J, OZKAN N. Compaction behavior of agglomerated alumina Powders [J]. *Powder Technol.*, 1997, 90: 195-203.
- [24] KUHN P B, MA B, CONNELLY B C, *et al.*. Soot and thin-filament pyrometry using a color digital camera [J]. *P. Combust. Inst.*, 2011(33): 743-750.
- [25] RAI A, PARK K, ZHOU L, *et al.*. Understanding the mechanism of aluminum nanoparticle oxidation [J]. *Combust. Theory and Model.*, 2006, 10(5): 843-859.
- [26] TRUNOV M A, UMBRAJKAR S M, SCHONITZ M, *et al.*. Oxidation and melting of aluminum nanoparticles [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006(110): 13094-13099.

作者简介:



孔成栋(1987-),男,浙江杭州人,博士研究生,主要从事纳米金属颗粒燃烧与诊断。E-mail: kcd10@mails.tsinghua.edu.cn



于丹(1983-),女,吉林长春人,博士后,2005年于东北师范大学获得学士学位,2011年于中国科学院化学研究所获得博士学位,主要从事燃烧化学、等离子体助燃、分子反应动力学等方面的研究。Email: yudan@mail.tsinghua.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)