

文章编号: 1006-9941(2018)04-0290-07

添加纳米铝的高密度悬浮燃料点火性能

鄂秀天凤¹, 张磊¹, 谢君健¹, 张香文¹, 徐胜利², 邹吉军¹

(1. 天津大学化工学院 先进燃料与化学推进剂教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 清华大学航天航空学院, 北京 100074)

摘要: 为了探究含金属颗粒悬浮燃料的点火和燃烧特性, 制备了含 5% 纳米铝颗粒 (Al NPs) 的 HD-01 和四环庚烷 (QC) 的高密度悬浮燃料, 采用雾化激波管测试了两种悬浮燃料在不同压力和温度下的点火延时, 通过拟合计算得到了表观点火活化能, 分析了悬浮燃料的点火燃烧机理, 采用高速摄像机记录了点火燃烧的流场图像。结果表明, 悬浮燃料静置 4 周后无颗粒聚沉现象; 在 0.05 MPa 和 0.1 MPa 下、1450 K 和 1750 K 内, Al NPs 可使 HD-01 和 QC 燃料的点火延时缩短约 50%, 表观点火活化能由 161.4 kJ·mol⁻¹ 和 120.3 kJ·mol⁻¹ 分别降低至 156.5 kJ·mol⁻¹ 和 112.8 kJ·mol⁻¹; 推测燃烧机理为铝原子优先与 O₂ 反应生成 O 自由基, 进而加速燃烧反应。此外, Al NPs 能够完全燃烧并促进燃料燃烧过程中的能量释放。

关键词: 纳米铝颗粒; 高密度燃料; 悬浮燃料; 激波管; 点火延迟; 燃烧

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.001

1 引言

人工合成的高密度液体碳氢燃料可提高航天飞行器性能 (航程、载荷、速度), 具有高密度、高体积热值和高安全性等优点。例如, 美国研制的 JP-10、RJ-4、RJ-5、RJ-7, 俄罗斯研制的 T-10^[1-4], 以及本实验室前期合成的 HD-01、QC 和 HD-03 高密度燃料^[5-9]。但是这类高密度燃料比传统碳氢燃料的碳氢比高, 在实际应用中存在点火困难和燃烧不充分的问题, 尤其是超声速飞行环境 (高空低温缺氧), 燃料在发动机燃烧室停留时间短 (约 1 ms), 对点火燃烧性能要求更加苛刻。因此, 改善点火和燃烧是高密度碳氢燃料应用的关键技术之一。

目前, 向燃料中加入燃烧或裂解催化剂是促进裂解、改善点火的有效方式。例如, Van Devener 等^[10] 采用 CeO₂ 和 Fe₂O₃ 纳米颗粒催化热解 JP-10 燃料; Shimizu 等^[11-12] 采用 Pd 和 PdO 纳米颗粒促进甲烷点火燃烧; 郭永胜等^[13] 制备间苯二酚杯芳烃改性的 Ni-B 颗粒并应用于催化 JP-10 裂解; 邹吉军等^[14-15] 采用油胺对纳米 Pt 和 Pd 颗粒进行表面改性, 使其分散

在 HD-01 燃料并催化其裂解。这些工作中所采用的催化剂多为贵金属纳米颗粒, 不仅成本较高, 而且添加量多为百万分比浓度级别, 对增加燃料能量的效果甚微。向燃料中添加价格相对便宜且能量密度较高的纳米铝颗粒 (Al NPs) 是促燃的另一种途径。例如, Starik 等^[16] 发现 Al NPs 可缩短 CH₄ 的点火延时; Smirnov 等^[17] 采用 Al NPs 促进正癸烷等燃料的点火和燃烧。目前尚没有关于纳米含能颗粒 (例如铝颗粒) 促进高密度液体燃料点火的报道。

本课题组前期研究了一种采用表面活性剂使 Al NPs 在液体燃料中稳定分散, 并配置成高密度悬浮燃料的方法^[18-19]。在此基础上, 本研究制备了含 5% Al NPs 的 HD-01 和四环庚烷高密度悬浮燃料和相应的纯燃料, 采用清华大学航天航空学院的雾化激波管^[20-21], 在温度为 1450 ~ 1750 K, 压力为 0.05, 0.1 MPa 条件下, 测试了其点火延时, 讨论 Al NPs 对两种高密度燃料点火性能的影响, 初步探究其燃烧机理; 同时, 采用高速摄像机拍摄燃料点火燃烧的流场图像, 分析纳米铝对燃料能量释放的影响。

2 实验部分

2.1 试剂及仪器

试剂: Al NPs (平均尺寸 50 nm, 表面未经钝化处理), 纯度 99%, 北京德科岛金科技有限公司; 油酸, 纯度 98%, 阿拉丁试剂有限公司; 实验室自制高密度

收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2017-10-01

基金项目: 装备预研教育部联合项目 (625010304)

作者简介: 鄂秀天凤 (1990-), 女, 博士研究生, 研究领域为航天燃料化学与技术。e-mail: xtf_e@tju.edu.cn

通信联系人: 邹吉军 (1978-), 男, 教授/博导, 研究领域为航天燃料化学与技术。e-mail: jj_zou@tju.edu.cn

燃料 HD-01 (挂式四氢双环戊二烯含量 99%); QC, 纯度 99.5%。

仪器: JA3003/0.001g 精密电子天平, 上海景迈仪器设备有限公司; DZF-6050 型真空干燥箱, 北京莱凯博仪器设备有限公司; Super 型惰性气氛手套箱, 北京米开罗那(中国)有限公司; NDJ5S 型旋转粘度仪, 上海昌吉地质仪器有限公司; ET-320 电子比重计, 北京仪特诺电子科技有限公司。

2.2 燃料的制备

根据文献^[18-19], 采用油酸对 Al NPs 表面进行改性处理, 选取油酸与 Al NPs 质量比为 0.1 : 1; 为保证燃料雾化效果, 在氩气气氛手套箱中, 配制含纳米铝质量分数为 5% 的高能燃料 (Al/HD-01 和 Al/QC)。

2.3 激波管实验和测试系统

雾化激波管^[20-21]示意图如图 1 所示, 不锈钢管体长约 5 m、截面为 130 mm×80 mm、壁厚 10 mm, 4 μm 双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 膜片将激波管分为高压段和低压段。采用混气罐 (250 L) 和拉瓦尔喷管雾化燃料, 得到的气溶胶液滴粒径在 2~5 μm^[22], 通过调节燃料进料量调节当量比 (燃料 : 氧气), 控制当量比 ϕ 为 1。试验前, 采用真空泵对高压段、低压段以及混气罐同时抽气至 20 Pa, 漏气率为 0.5 Pa·min⁻¹。之后向高压段通入氦气 (纯度 99.999%) 作为高压驱动气, 并通过与管体成 45° 扩张管道向低压段通入燃料气溶胶。采用针刺破膜方式刺破 BOPP 膜片形成激波。低压段沿管轴线方向安装 3 个高频响应压力传感器 PCB113B26, 测量入射激波速度并确定入射激波马赫数。与低压段端面压力传感器垂直相同位置配有滤波片 (中心波长为 307 nm, 半带宽为 5 nm) 和带有高压电源的光电倍增管 (PMT, Hamamatsu CR115), 测量混合气着火过程中 OH* 自发光信号。采用高速摄像机 (Photron FASTCAM UX100) 显示激波管低压段燃烧区混合气自点火和燃烧过程。整个过程近乎绝热, 利用一维理想正激波关系, 通过调节低压段混合气压力和高压段氦气压力, 求得燃烧区气体热力学状态, 即温度范围在 1450~1750 K, 压力为 0.05 MPa 和 0.1 MPa。

以一次 HD-01 燃料点火为例 (压力为 0.1 MPa, 温度为 1635 K), 对点火延迟时间进行了定义, 如图 2 所示。BOPP 膜片破裂后, 高压段气体沿激波管轴线向低压段形成平面激波, 同时向高压段回传膨胀稀疏波。当激波到达 PCB 压力传感器时, 实验混合气温度和压力提升, 出现第一次压力阶跃。入射激波在低压

段端面固壁反射, 形成反射激波, 再次提升实验混合气温度和压力, 出现压力的第二次阶跃, 即点火延时的开始时刻, 如图 2 中黑色曲线所示。图 2 中红色曲线是 PMT 测得的自发光信号, 当出现强烈的光信号时说明已完成点火进入燃烧阶段, 将曲线斜率最大处作为点火结束时刻; 同时, PCB 信号也出现了明显的突跃, 这是由于燃烧区能量释放导致的局部压力上升, 并以扰动波形式向四周传播, 遇到低压段端面又会发生反射, 并与燃烧区相互作用产生压力振荡, 造成黑色曲线后面的压力波动。由此定义点火延时为低压段端面压力曲线第二次阶跃和 OH* 自发光曲线斜率最大值之间的时间间隔。

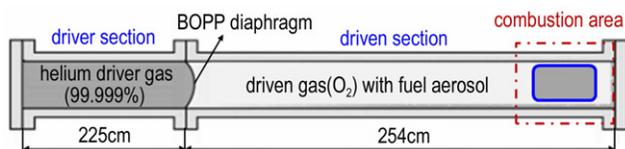


图 1 激波管装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of shock tube test setup

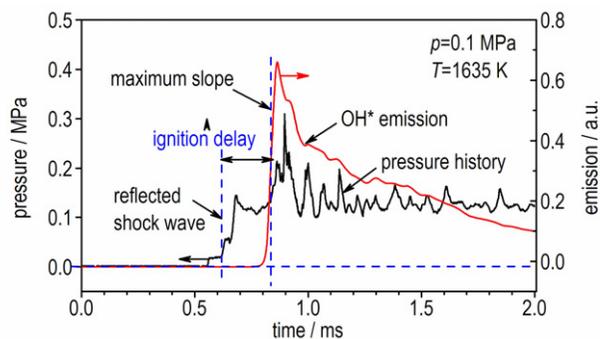


图 2 定义点火延迟时间的示意图

Fig.2 Schematic diagram of defining ignition delay time

3 结果与讨论

3.1 燃料基础性质

前期工作中对纳米铝粒径及其分布、分散稳定性进行了相应的测试和表征, 改性后的 Al NPs 粒径分布在 50~100 nm^[18-19]。如图 3 所示, 采用同样原料和方法改性后的 Al NPs 能很好地分散在 HD-01 或 QC 中, 形成稳定的悬浮液, 且静置存放 4 周没有出现沉淀 (图 3b)。采用比重计、粘度计等仪器测试了燃料的密度、粘度等基础性质, 结果如表 1 所示, 由表 1 可知, 添加 5% Al NPs 后, Al/HD-01 和 Al/QC 燃料的密度、体积热值均有所增加, 而粘度增加不明显, 即不影响燃料在管路中的运输。

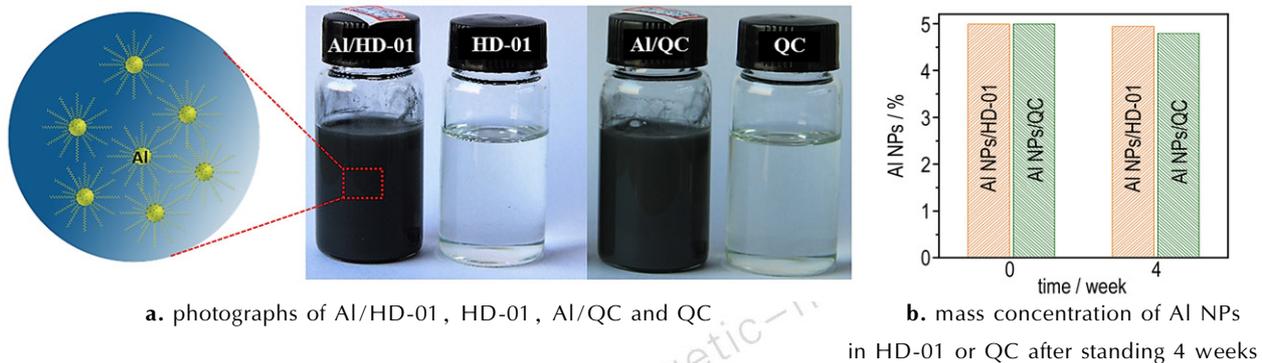


图3 悬浮燃料样品照片和 Al NPs 在燃料中的分散稳定性

Fig.3 Photographs of suspension fuel samples and dispensability of Al NPs in fuel

表1 Al NPs 及四种燃料的基础物理性质

Table 1 Basic physical properties of Al NPs and four kinds of fuels

fuels	density (20 °C) /g · mL ⁻¹	viscosity (20 °C) /mPa · s	combustion heat /MJ · kg ⁻¹	volumetric energy /MJ · L ⁻¹
Al	2.70	—	31.1	83.9
HD-01	0.93	3.2	42.1	39.1
QC	0.98	1.02	44.4	43.5
5% Al/HD-01	0.96	9.4	41.6	40.0
5% Al/QC	1.02	4.5	43.7	44.6

3.2 点火延迟时间

对每个工况重复三次实验,由于激波管在实际实验操作中,存在诸如膜破裂情况、夹膜法兰间对接的松紧程度等因素很难做到完全相同的情况,即便初始条件一致时测得的燃烧区温度和点火延时也略有不同,其温度偏差小于2%,点火延时偏差小于10%,每个工况的三次数据平均值列于表2中。图4给出了HD-01和Al/HD-01在0.05 MPa和0.1 MPa压力时点火延时与初始温度的关系。结果表明,两种燃料的点火延时均随温度升高而降低,当压力相同,Al/HD-01燃料点火延时明显低于HD-01,即添加纳米铝有利于HD-01点火。例如,压力为0.1 MPa时,HD-01和Al/HD-01的延时分别为80 μs、50 μs(高温1750 K)和900 μs、400 μs(低温1450 K)。为逼近飞行器处于高空低压环境参数,将实验压力减小至0.05 MPa,HD-01和Al/HD-01燃料点火延时均有所增加,HD-01和Al/HD-01分别为300 μs、180 μs(高温1750 K)和600 μs、200 μs(1600 K)。上述规律同样适用QC和Al/QC(图5),即添加纳米铝有利于QC点火。但是,四环庚烷C/H较大,点火和充分燃烧均比HD-01更

困难,所以在高温条件下,相应的点火延迟时间较长;同时,四环庚烷的高张力环结构反应活性较高,开环能量低,因此在低温条件时点火延迟时间比HD-01短。此外,温度过低时,燃料点火延时过长(超过了示波器的量程范围)或不能点火,将该温度定义为当前条件下燃料的最低点火温度。表3给出了四种燃料的最低点火温度,由表3可知,添加Al NPs可以降低燃料最低点火温度。

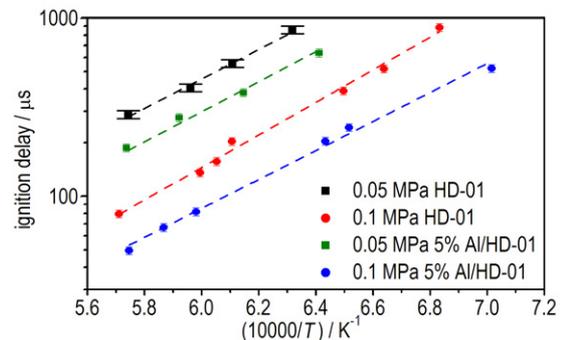


图4 HD-01 和 Al/HD-01 燃料的点火延迟时间

Fig.4 Ignition delay time of HD-01 and Al/HD-01 fuels

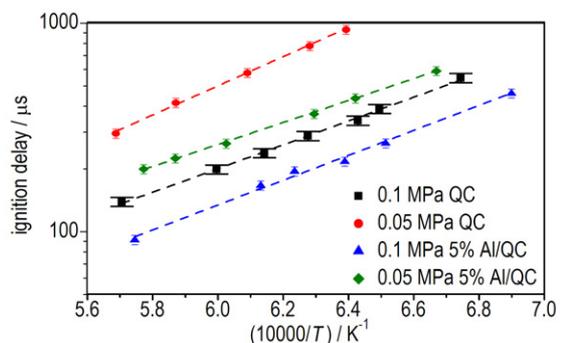


图5 QC 和 Al/QC 燃料的点火延迟时间

Fig.5 Ignition delay time of QC and Al/QC fuels

表 2 四种燃料在不同压力/温度下的点火延迟时间

Table 2 The ignition delay time of four kinds of fuels at difference pressure and temperature

fuels	p / MPa	T / K	Ma	τ_{ig} / μs
HD-01	0.101	1460	3.28	888
	0.103	1506	3.34	521
	0.102	1539	3.23	392
	0.098	1652	3.13	157
	0.101	1668	3.19	136
	0.105	1637	2.98	204
	0.103	1750	3.25	80
	0.055	1580	3.47	853
	0.058	1637	3.32	552
	0.050	1680	3.17	403
0.053	1740	3.38	286	
Al/HD-01	0.104	1425	3.36	524
	0.101	1534	3.20	244
	0.102	1554	3.26	204
	0.101	1672	2.99	82
	0.103	1704	3.13	67
	0.098	1740	3.32	50
	0.056	1560	3.27	640
	0.059	1626	3.22	383
	0.051	1688	2.97	277
	0.054	1742	2.98	187
QC	0.108	1480	3.64	542
	0.109	1540	3.33	385
	0.106	1555	3.28	338
	0.105	1594	3.12	286
	0.101	1628	3.22	237
	0.103	1668	3.14	198
	0.101	1753	3.06	138
	0.050	1565	3.02	930
	0.059	1592	3.20	776
	0.053	1642	2.88	576
0.051	1703	3.37	415	
0.057	1758	3.27	295	
Al/QC	0.096	1450	3.26	460
	0.098	1535	3.02	265
	0.105	1565	3.06	216
	0.103	1604	3.02	195
	0.106	1630	3.40	166
	0.099	1740	2.95	91
	0.052	1500	3.57	590
	0.050	1557	3.10	436
	0.048	1588	3.35	366
	0.053	1659	3.11	265
0.059	1703	3.03	225	
0.050	1732	3.28	199	

Note: T and p are ignition temperature and pressure, Ma is Ernst Mach of shock wave, τ_{ig} is ignition delay time.

表 3 四种燃料的最低点火温度

Table 3 The minimum ignition temperature of four kinds of fuels

fuel	minimum ignition temperature/K	
	0.05 MPa	0.1 MPa
HD-01	1580	1460
Al/HD-01	1560	1425
QC	1565	1480
Al/QC	1500	1450

3.3 点火机理分析

燃料点火延时与温度、压力、当量比、燃料及氧化剂浓度均有关^[23-26], 满足 Arrhenius 关系式^[27], 如公式(1)所示:

$$\tau_{ig} = Ap^\alpha \varphi^\beta X_{O_2}^\gamma \exp(E_a/RT) \quad (1)$$

$$\ln(\tau_{ig}) = A + \alpha \ln(p) + E_a/RT \quad (2)$$

式中, p 为压力, MPa, φ 为当量比, X_{O_2} 为氧化剂摩尔百分数, %, A 是指前因子, α, β, γ 为影响因子, T 为温度, K, E_a 为燃料分子的表观点火活化能, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, R 是理想气体常数, $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。本实验当量比和氧化剂浓度均不变, 只有两个独立变量 p, T 。对公式(1)两边取自然对数得到公式(2)。此时, $\ln(\tau_{ig})$ 与温度倒数 $1/T$ 正相关。当量比相同、压力不同时, 点火延时的对数与温度的倒数为一组平行线, 如图 4、图 5 所示。对 $\ln(\tau_{ig}), \ln(p)$ 和 $1/T$ 进行多元线性回归 (R^2 为 0.98), 得到 HD-01、Al/HD-01、QC、Al/QC 四种燃料点火延时公式和相应的表观点火活化能, 见表 4, 从表 4 可知, 四种燃料对压力的依赖性基本一致, 即 $\tau \propto p^{-(0.14 \sim 0.18)}$ 。此外, QC 燃料表观点火活化能低于 HD-01 燃料, 可能是四环庚烷的高张力环结构具有更高的化学活性。同时, 纳米铝的加入可将 HD-01 和 QC 两种燃料的表观点火活化能由 $161.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $120.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 分别降低至 $156.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $112.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

表 4 四种燃料的点火延时公式和相应点火的表观点火活化能

Table 4 The ignition delay formula and corresponding apparent ignition activation energy of ignition for four kinds of fuels

fuels	apparent ignition activation energy / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	ignition correlations
HD-01	161.4	$\tau_{ig} = 0.003 \times p^{-0.14} \exp(161.4/RT)$
Al/HD-01	156.5	$\tau_{ig} = 0.004 \times p^{-0.18} \exp(156.5/RT)$
QC	120.3	$\tau_{ig} = 0.35 \times p^{-0.16} \exp(120.3/RT)$
Al/QC	112.8	$\tau_{ig} = 0.26 \times p^{-0.17} \exp(112.8/RT)$

为分析添加纳米铝缩短燃料点火延时、降低表观点火活化能的原因, 根据 Smirnov 等^[16]的 Al-CH₄-O₂ 链反应机理, 结合本实验点火延时测试结果, 提出了 Al-HD-01/QC-O₂ 链反应机理。如图 6 所示, 因油酸添加量仅为纳米铝添加量的十分之一, 且激波管点火瞬间温度达 1000 K 以上, 高于油酸分解温度 (约

650 K)^[18], 此时燃料汽化, 暴露的铝原子优先与 O_2 反应生成 $AlO \cdot$ 和 $O \cdot$ 自由基, 该反应的速率常数 ($k=2.31 \times 10^{13} \times T^{0.17} \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[17]) 高于 HD-01 或 QC 自身热解的反应速率, 由此产生的 $O \cdot$ 自由基会加速 HD-01 或 QC 的反应, 从而使 HD-01 和 QC 点火延时缩短。

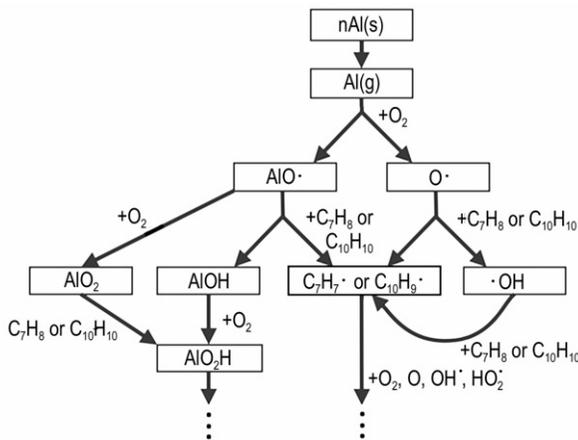


图 6 Al-HD-01/QC- O_2 的链反应机理示意图

Fig.6 Schematic diagram of chain reaction mechanism of Al-HD-01/QC- O_2

3.4 燃烧流场成像

压力 0.1 MPa, 温度 1450 K 和 1750 K 下, HD-01 和 Al/HD-01 在 0 ~ 3.9 ms 不同瞬间的点火燃烧流场图像如图 7 所示。将摄像机拍摄的第一次出现亮光时刻定义为 0 ms (此时燃料已开始燃烧), 在相同温度下, 添加纳米铝颗粒后 HD-01 (图 7b, 图 7d) 开始燃烧的火焰明显比纯 HD-01 (图 7a, 图 7c) 明亮, 并且在整个燃烧过程中火焰也更加明亮和剧烈; 在 1450 K, 3.9 ms 时, HD-01 的图像变暗、燃烧结束, 而 Al/HD-01 仍有火焰、持续燃烧; 随着温度的增加, 两种燃料燃烧发光强度均有所增强, 但 Al/HD-01 火焰亮度强于 HD-01, 燃烧持续时间长于 HD-01。QC 和 Al/QC 燃烧图像与 HD-01 和 Al/HD-01 类似且规律一致。这说明, 添加纳米铝颗粒能够促进燃料的能量释放和完全燃烧。燃烧结束后, 激波管内没有固体沉积, 此外, 前期工作采用小型发动机测试悬浮燃料点火推进性能, 燃烧效率为 95.6% ~ 97.9%^[18], 对燃烧产物测试分析发现铝已完全转变为氧化铝^[28], 说明纳米铝颗粒可以完全燃烧。

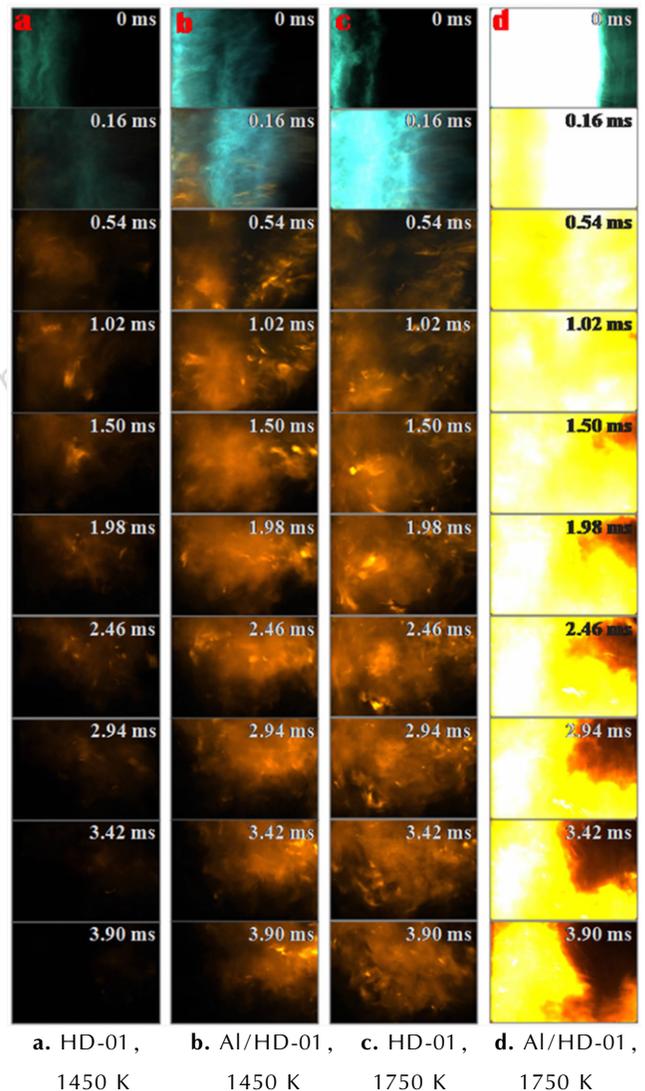


图 7 HD-01 和 Al/HD-01 燃料的燃烧流场图像

Fig.7 The combustion flow field images of HD-01 and Al/HD-01 fuels

4 结论

(1) 采用雾化激波管测试了含 5% 纳米铝颗粒的 HD-01 和 QC 悬浮燃料和相应的纯燃料在 0.05 MPa 和 0.1 MPa, 1450 ~ 1750 K 内的点火延时, 结果显示纳米铝颗粒可缩短 HD-01 和 QC 燃料点火延时约 50%。

(2) 利用 Arrhenius 关系式拟合得到燃料的表现点火活化能, 结果显示 QC 燃料表现点火活化能低于 HD-01, 且纳米铝颗粒可分别降低 HD-01 和 QC 两种燃料表现点火活化能 3% 和 6%, 其原因是铝原子优先与 O_2 反应生成的 O 自由基会加速 HD-01 或 QC 燃

烧反应。

(3) 高速摄像机拍摄的燃烧过程照片显示, 纳米铝颗粒能够促进 HD-01 和 QC 点火过程中的能量释放, 使得燃烧火焰更加明亮。纳米铝颗粒可以完全燃烧, 实验后激波管内无固体沉积。

参考文献:

- [1] Huang M Y, Wu J C, Shieu F S, et al. Isomerization of endo-tetrahydrodicyclopentadiene over clay-supported chloroaluminate ionic liquid catalysts[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2010, 315(1): 69-75.
- [2] Kim J, Han J, Kwon T S, et al. Oligomerization and isomerization of dicyclopentadiene over mesoporous materials produced from zeolite beta[J]. *Catalysis Today*, 2014, 232(5): 69-74.
- [3] 邹吉军, 张香文, 王莅, 等. 高密度液体碳氢燃料合成及应用进展[J]. *含能材料*, 2007, 15(4): 411-415.
ZOU Ji-jun, ZHANG Xiang-wen, WANG Li, et al. Progress on the synthesis and application of high-density hydrocarbon fuels[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 411-415.
- [4] 邹吉军, 郭成, 张香文, 等. 航天推进用高密度液体碳氢燃料: 合成与应用[J]. *推进技术*, 2014, 35(10): 1419-1425.
ZOU Ji-jun, GUO Cheng, ZHANG Xiang-wen, et al. High-density liquid hydrocarbon fuels for aerospace propulsion: synthesis and application[J]. *Journal of Propulsion Technology (Tuijin Jishu)*, 2014, 35(10): 1419-1425.
- [5] Zou J-J, Xiong Z, Zhang X, et al. Kinetics of tricyclopentadiene hydrogenation over Pd-B/ γ -Al₂O₃ amorphous catalyst[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(13): 4415-4420.
- [6] Li Y, Zou J-J, Zhang X, et al. Product distribution of tricyclopentadiene from cycloaddition of dicyclopentadiene and cyclopentadiene: a theoretical and experimental study[J]. *Fuel*, 2010, 89(9): 2522-2527.
- [7] Wang L, Zou J-J, Zhang X, et al. Rearrangement of tetrahydrotricyclopentadiene using acidic ionic liquid: synthesis of diamondoid fuel[J]. *Energy & Fuel*, 2011, 25(4): 1342-1347.
- [8] Wang L, Zhang X, Zou J-J, et al. Acid-catalyzed isomerization of tetrahydrotricyclopentadiene: synthesis of high-energy-density liquid fuel[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(5): 2383-2388.
- [9] 王磊, 张香文, 邹吉军, 等. 密度大于 1 的高密度液体碳氢燃料合成及复配研究[J]. *含能材料*, 2009, 17(2): 157-160.
WANG Lei, ZHANG Xiang-wen, ZOU Ji-jun, et al. Synthesis and blending of high-density hydrocarbon fuels with density beyond 1.0 g · cm⁻³ [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 157-160.
- [10] Van Devener B, Anderson S L. Breakdown and combustion of JP-10 fuel catalyzed by nanoparticulate CeO₂ and Fe₂O₃[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(5): 1886-1894.
- [11] Shimizu T, Abid A D, Poskrebyshev G, et al. Methane ignition catalyzed by in situ generated palladium nanoparticles[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(3): 421-435.
- [12] Van Devener B, Anderson S L, Shimizu T, et al. In situ generation of Pd/PdO nanoparticle methane combustion catalyst: correlation of particle surface chemistry with ignition[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(48): 20632-20639.
- [13] Guo Y, Yang Y, Fang W, et al. Resorcinarene-encapsulated Ni-B nano-amorphous alloys for quasi-homogeneous catalytic cracking of JP-10[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2014, 469(3): 213-220.
- [14] E X-T-F, Zhang Y, Zou J-J, et al. Oleylamine-protected metal (Pt, Pd) nanoparticles for pseudohomogeneous catalytic cracking of JP-10 jet fuel[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(31): 12312-12318.
- [15] E X-T-F, Zhang Y, Zou J-J, et al. Shape evolution in Brust-Schiffrin synthesis of Au nanoparticles[J]. *Materials Letters*, 2014, 118(3): 196-199.
- [16] Starik A M, Kuleshov P S, Sharipov A S, et al. Kinetics of ignition and combustion in the Al-CH₄-O₂ System[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(10): 6579-6588.
- [17] Smirnov V V, Kostrița S A, Kobtsev V D, et al. Experimental study of combustion of composite fuel comprising n-decane and aluminum nanoparticles[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(10): 3554-3561.
- [18] E X-T-F, Pan L, Wang F, et al. Al-nanoparticle-containing nanofluid fuel: synthesis, stability, properties, and propulsion performance[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(10): 2738-2745.
- [19] 鄂秀天凤, 彭浩, 邹吉军, 等. 含有纳米铝颗粒的高密度悬浮燃料研究[J]. *推进技术*, 2016, 37(5): 974-978.
E Xiu-tian-feng, PENG Hao, ZOU Ji-jun, et al. Study on Al NPs-containing suspension as high-density liquid fuel[J]. *Journal of Propulsion Technology (Tuijin Jishu)*, 2016, 37(5): 974-978.
- [20] 张英佳, 黄佐华, 王金华, 等. 激波管研究煤油/空气混合气的自着火特性[J]. *科学通报*, 2011, 56(1): 85-93.
ZHANG Ying-jia, HUANG Zuo-hua, WANG Jin-hua, et al. Shock tube study on auto-ignition characteristics of kerosene/air mixtures[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 85-93.
- [21] 廖钦, 徐胜利. 雾化激波管的研究和煤油点火延时测量[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 70-74.
LIAO Qin, XU Sheng-li. The ignition delay measurement of atomized kerosene air mixture in an aerosol shock tube[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 70-74.
- [22] Xu S, Liao Q. Shock tube study on auto-ignition delay of kerosene aerosol and its cracked mixture[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99(1): 338-343.
- [23] Davidson D F, Horning D C, Herbon J T, et al. Shock tube measurements of JP-10 ignition[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 1687-1692.
- [24] Wang S, Gou H, Fan B, et al. Shock tube study of JP-10 ignition delay time[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2007, 20(1): 48-52.
- [25] Hoang V N, Thi L D. Experimental study of the ignition delay of diesel/biodiesel blends using a shock tube[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 134(4): 1-7.
- [26] Allen C, Mittal G, Sung C-J, et al. An aerosol rapid compression machine for studying energetic-nanoparticle-enhanced combustion of liquid fuels[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3367-3374.
- [27] Davidson D F, Hanson R K. Interpreting shock tube ignition data[J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2004, 36(9): 510-523.
- [28] Luo Y, Xu X, Zou J-J, et al. Combustion of JP-10-based slurry with nanosized aluminum additives[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2016, 32(5): 1-11.

Ignition Performance of High-Density Suspension Fuel of Adding Al NPs

E Xiu-tian-feng¹, ZHANG Lei¹, XIE Jun-jian¹, ZHANG Xiang-wen¹, XU Sheng-li², ZOU Ji-jun¹

(1. Key Laboratory for Advanced Fuel and Propellant of Ministry of Education, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the ignition and combustion characteristics of suspended fuel containing metal particles, two kinds of high-density suspension fuels of HD-01 and quadricyclane(QC) with 5% aluminum nanoparticles(Al NPs) were prepared. The ignition delay of two kinds of suspended fuels at different pressure and temperature was measured by atomization shock tube. The apparent activation energy of ignition was obtained by fitting and calculating. The ignition and combustion mechanism of the suspension fuel were analyzed. The flow field images of ignition and combustion were recorded by high-speed camera. Results show that the suspended fuel can stand after 4 weeks without particle aggregation phenomenon; in the range of 0.05 MPa and 0.1 MPa, 1450 K and 1750 K, Al NPs can make the ignition delay of HD-01 and QC fuel shorten by about 50% and the apparent ignition activation energy reduce from 161.4 kJ · mol⁻¹ and 120.3 kJ · mol⁻¹ to 156.5 kJ · mol⁻¹ and 112.8 kJ · mol⁻¹, respectively; Inferring that the combustion mechanism as that aluminum atoms preferentially react with O₂ to produce O radicals, thereby accelerating the combustion reaction. In addition, Al NPs can completely burn and promote the energy release during fuel combustion.

Key words: aluminum nanoparticle; high-density fuel; suspension fuel; shock tube; ignition delay; combustion

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.04.001



《含能材料》“含能共晶”征稿

含能共晶是不同含能分子通过氢键等相互作用力形成的具有稳定结构和性能分子晶体。含能共晶充分组合了单质含能分子的优点,呈现出感度低,综合性能优良的特点,具有潜在的应用前景,共晶研究已经引起国内外含能材料学界的高度关注。为推动含能共晶的研究和交流,本刊特推出“含能共晶”专栏,主要征稿范围包括含能共晶晶体设计与性能预测、含能共晶的制备、结构解析、性能等。来稿请注明“含能共晶”专栏。

《含能材料》编辑部