

氧浓度对锆粉点火燃烧特性的影响研究^{*}

刘 庆¹, 陈林泉¹, 周禹男², 苑继飞², 王健儒¹, 刘建忠²

(1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025;

2. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为探究氧浓度对锆粉点火燃烧特性的影响规律, 利用激光点火、高速摄影仪、双色红外测温仪和光纤光谱仪等手段对锆粉的燃烧过程进行研究, 获得了锆粉燃烧过程中的点火延迟时间、燃烧时间、燃烧强度和燃烧温度等参数。随后又利用XRD手段分析了燃烧产物的物相特征。通过实验发现: 根据火焰形态可以将锆粉燃烧过程分为起燃、剧烈燃烧、平稳燃烧和火焰熄灭等四个阶段。氧浓度对锆粉的点火燃烧性能具有重要影响。C1~C4四种工况下锆粉的点火延迟时间分别为15ms, 17.5ms, 22.5ms和25ms; 燃烧温度分别为1542℃, 1520℃, 1425℃和1405℃。因此增大氧浓度有利于缩短点火延迟时间和燃烧时间, 提高燃烧温度和燃烧强度, 改善锆粉的点火燃烧性能。氧浓度增大, 火焰尺寸, 火焰亮度和剧烈程度呈增大趋势。同时还发现锆粉在四种不同氧浓度下的反应产物主要为ZrO₂, 未产生ZrN和ZrC等。

关键词: 固体推进剂; 推进剂添加剂; 氧浓度; 点火特性; 燃烧特性; 激光点火

中图分类号: V435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 03-0693-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190127

Effects of Oxygen Concentration on Ignition and Combustion Characteristics of Zirconium Powder

LIU Qing¹, CHEN Lin-quan¹, ZHOU Yu-nan², YUAN Ji-fei², WANG Jian-ru¹, LIU Jian-zhong²

(1. Xi'an Aerospace Solid Propulsion Technology Institute, Xi'an 710025, China;

2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To study the effects of oxygen concentration on the ignition performance of zirconium powder, the combustion process of zirconium powder was observed by CO₂ laser ignition bench, high-speed camera, two-color infrared thermometer and fiber optic spectrometer. The ignition delay time, combustion time, combustion intensity and combustion temperature parameters during the combustion of zirconium powder were obtained. Subsequently, the phase characteristics of the combustion products were analyzed by XRD. It is known from the experimental results that the combustion process of zirconium powder can be divided into four stages: lighting, intense combustion, stable combustion and flame extinction according to the flame shape. The oxygen concentration has an important influence on the ignition and combustion performance of zirconium powder. The ignition delay times of zirconium powder in the four working conditions of C1~C4 are 15ms, 17.5ms, 22.5ms and 25ms, respectively. The combustion temperatures are 1542℃, 1520℃, 1425℃ and 1405℃, respectively. Therefore, increasing the oxygen concentration is beneficial to shorten the ignition delay time and combustion time, increase the combustion temperature and combustion intensity, and improve the ignition and combustion performance of the

^{*} 收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-05-22。

通讯作者: 刘 庆, 硕士生, 研究领域为含锆推进剂应用。E-mail: liuqing_htsy41@163.com

引用格式: 刘 庆, 陈林泉, 周禹男, 等. 氧浓度对锆粉点火燃烧特性的影响研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3):693-699.
(LIU Qing, CHEN Lin-quan, ZHOU Yu-nan, et al. Effects of Oxygen Concentration on Ignition and Combustion Characteristics of Zirconium Powder[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3):693-699.)

zirconium powder. As the oxygen concentration increases, the flame size, flame brightness and combustion intensity show an increasing trend. At the same time, it was found that the main phase of the combustion product of zirconium powder at four different oxygen concentrations is ZrO_2 , and no phase such as ZrN and ZrC is produced.

Key words: Solid propellant; Propellant additive; Oxygen concentration; Ignition characteristics; Combustion characteristics; Laser ignition

1 引 言

固体推进剂药柱是一种具有特定性能的含能复合材料,是空间飞行器、战略导弹和战术导弹等固体发动机的动力源^[1-2]。固体推进剂在推动固体发动机发展中备受重视。通过加入某些反应性粉末,如 Al, Mg, B 和其它金属颗粒,可以提高推进剂的能量特性。不同的颗粒对复合推进剂的特性(如流变性能,燃烧性能和危险性能等)有显著影响^[3]。Zr 密度为 6.5g/cm^3 ,作为一种高密度复合推进剂新型添加物,可以将推进剂密度增加 35% 以上,达到 $2.3\sim 2.5\text{g/cm}^3$ 。增大推进剂密度可以提高推进剂的密度比冲,进而提高导弹有效载荷质量^[4]。Min 等^[5]在研究中发现, $35\mu\text{m}$ 锆颗粒与 $5\mu\text{m}$ 铝颗粒对推进剂燃烧特性(包括燃速 r 和压力指数 n)的影响基本一致。Lempert 等^[6]在研究中发现锆含量为 46%~49% 的推进剂燃烧产物中 ZrO_2 含量为 65%,而含 20% Al 推进剂的燃烧产物中有 37% 的 Al_2O_3 。另一方面 ZrO_2 的热容量 ($0.49\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$) 比 Al_2O_3 的热容量 ($1.05\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$) 的一半还小。因此含锆推进剂的两相流损失可能要低于含铝推进剂。邢娅^[7]发现,在由 HTPB 和 AP 组成的少烟复合推进剂中加入少量的(质量含量 0.5%~1.2%)锆或者氧化锆,有效地抑制了这种推进剂原本产生的声压震荡的燃速响应函数。因此锆粉作为固体推进剂的含能添加剂有以下几个优点:(1)密度大,密度比冲高;(2)点火性能好,有利于提高燃速;(3)两相流损失小;(4)有效抑制不稳定燃烧^[4-8]。

锆粉由于其高燃速和高能量密度等优势,因此其燃烧特性和燃烧过程受到国内外学者的广泛关注。文献[9-11]通过开展铁氧体磁铁矿包覆的 Zr 粉颗粒的燃烧过程研究,获得了包覆层厚度、颗粒粒径等对火焰传播速度、放热量等的影响规律。Arimondi 等^[12]从宏观动力学和微观动力学两个方面来研究燃烧状态下 Zr 颗粒的氧化过程,探究了氧分压、颗粒尺寸和颗粒分散度对化学反应机理的影响规律。Ewald 等^[13-14]基于传热、热损失和热量产生过程的二维有限差分模型对锆在氧气中的燃烧进行了模拟。同时开展了锆粉在氧气和空气中燃烧过程的研究。研究发

现火焰传播速度和火焰温度是分散度的函数,证明了火焰传播速度与粒径的倒数呈线性关系。Badiola 等^[15]利用 CO_2 激光点火器点燃锆粉颗粒,滤波的光电倍增管测定燃烧颗粒温度的手段对单颗粒锆粉的燃烧过程进行了研究,实验发现在燃烧过程中锆粉颗粒上存在条纹,燃烧室存在微爆炸现象。国内外对锆粉燃烧过程的研究已经有一些比较成熟的模型了。虽然对锆粉燃烧过程已经建立了一些模型,但是对于锆粉反应机理的研究相对较少。在锆粉颗粒燃烧实验研究方面,一些学者采用激光点火和光学测量仪器对锆粉颗粒的燃烧过程进行了一定程度的研究。但是对锆粉燃烧特性的研究还不够全面,因此还需要做进一步深入研究。

本文利用 CO_2 激光点火台对 Zr 粉进行点火,并同时利用高速摄影仪、光纤光谱仪和双色红外测温仪对 Zr 粉燃烧过程进行研究。获得燃烧过程中的物质发射光谱和燃烧温度,进一步计算 Zr 粉点火延迟时间、燃烧时间,燃烧强度等能量特性释放参数,分析锆粉点火特性和燃烧特性,并获得了氧浓度对锆粉点火燃烧特性的影响规律。

2 实验部分

2.1 实验材料

本文对标称直径为 $30\mu\text{m}$ 的锆粉颗粒进行了研究,所用锆粉来自于上海肖冕纳米科技有限公司。

2.2 实验系统

本实验采用 CO_2 激光点火实验台(如图 1 和图 2 所示)对 Zr 粉的燃烧过程进行研究。该实验系统包括点火控制模块、点火燃烧室模块、燃烧诊断模块和数据处理模块。测试装备包括高速摄影仪、双色红外测温仪和光纤光谱仪。实验过程中,每次称量 40mg 的锆粉样品,在 $24\text{mm}\times 24\text{mm}$ 的钨片上堆成圆饼状,利用 CO_2 激光点火器的激光束加热并点燃锆粉,高速摄影仪实现燃烧过程的可视化,测温仪读取测量实时温度,被激光器同步触发的光纤光谱仪捕捉燃烧过程中不同物质的特征光谱。

2.3 实验表征参数

对于点火燃烧过程的研究,点火延迟时间 t_d 和燃

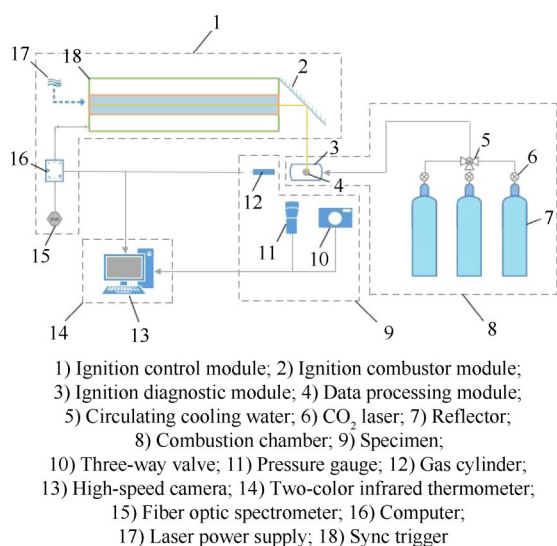


Fig. 1 Schematic diagram of the laser ignition test bench



Fig. 2 Physical diagram of laser ignition test bench

烧时间 t_b 是两个非常重要的参数,因此本文将这两个参数作为 Zr 粉点火燃烧过程的表征参数。ZrO 是 Zr 粉燃烧的直接产物,因此 ZrO 的产生就表明了燃烧过程的发生,因此在光谱特征峰中找到 ZrO 物质特征峰,即可认为 Zr 已经开始燃烧。文献[16-17]中给出 ZrO 的特征峰谱段在 620nm~680nm,主要的光谱峰波长为 625nm, 635nm, 640nm 和 655nm,其中 655nm 谱峰为最强峰。实验光谱中 ZrO 特征峰如图 3 所示。本文所定义的点火延迟时间即为开始点火到这一特征峰出现的时间;燃烧时间即为这一特征峰从出现到消失所持续的时间。另外对 655nm 特征峰强度进行全时段的积分,来作为反应的燃烧强度。

3 实验结果分析

3.1 不同氧浓度下的 Zr 粉点火燃烧特性分析

为探究不同氧浓度对 Zr 粉点火燃烧特性的影响,分别进行了锆粉样品在纯氧,氧气氮气 3:1,氧气氮气 1:1 和氧气二氧化碳 1:1 四种气氛下的燃烧实

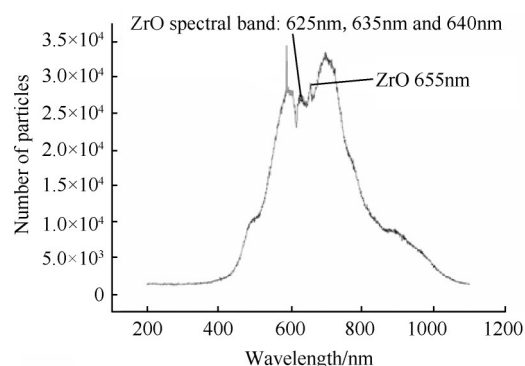


Fig. 3 Characteristic peak spectrum of ZrO

验,依次分别记作工况 C1~C4。图 4 为不同氧浓度下 ZrO 特征谱(655nm)强度随时间的变化情况。由图 4 可知,工况 C1 曲线首先开始上升,且上升速率非常大,达到最大值后进入一个相对稳定段,随后又先下降后上升达到最大值,最后在 1200ms 左右下降。其次是工况 C2 曲线,开始逐渐上升,但随后又迅速下降,且下降至起始光谱强度值,持续大约 250ms 左右后又开始上升,达到最大值后缓慢下降。再次是工况 C3 曲线,先上升后下降,下降至起始光谱强度值后持续大约 800ms 后缓慢上升,达到最大值后逐渐下降。最后是工况 C4, C4 曲线的变化趋势大致与工况 C2 和 C3 一致。将各工况的 655nm 波长特征谱强度对时间积分,可以得到这一波长全时长的光谱强度,即燃烧强度。

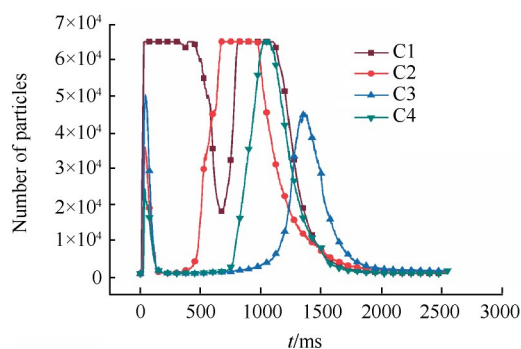


Fig. 4 Curve of ZrO characteristic spectrum intensity with time at different oxygen concentrations

不同氧浓度下 Zr 粉燃烧的实时温度随时间的变化曲线见图 5。由图 5 可知,工况 C1 最高温度约 1542℃;工况 C2 最高燃烧温度约为 1520℃;工况 C3 最高燃烧温度约为 1424℃;工况 C4 最高燃烧温度约为 1405℃。由图 5 还可以看出,工况 C1 燃烧温度迅速上升,达到稳定温度后,持续 1000ms 开始下降。而工况 C2~C4 均出现温度先增大后减小,再增大,最后燃烧结束温度下降的过程。由图 4 可知,工况 C2,

C3,C4的光谱强度曲线的变化趋势与温度相似。通过对 C2~C4这三个工况可视化燃烧过程分析发现:在这三个工况气氛下,出现表面 Zr 粉燃烧开始后火焰突然“熄灭”(火焰亮度较暗,并未真正熄灭),随后下层 Zr 粉又重新燃烧的现象。因此这三个工况的光谱强度会下降至起始光谱强度值,温度也出现大幅下降的现象。

四个工况的点火燃烧表征参数见表 1。由表 1 可知,氧浓度增大,点火延迟时间和燃烧时间缩短,而燃烧强度和燃烧温度呈增大趋势。在点火阶段,氧分压会影响锆与氧的异相反应速率,氧分压越大,反应速率越大,点火促进越明显。因此,氧浓度增大,锆粉更易着火,点火延迟时间缩短。在燃烧阶段,无论是扩散控制机理还是动力学控制机理下,氧浓度增加有助于增大锆粉的燃烧速率。因此反应燃烧时间缩短,燃烧强度和燃烧温度增大。此外,可以发现氧浓度增大,锆粉越容易燃烧,且火焰“熄灭”的持续时间越短。推测出现这一现象的原因是,激光加热了表面锆粉,表面锆粉更易燃烧,底层锆粉由于激光加热时间短,受激光加热少,温度较低,在氧浓度降低后不易燃烧。另一方面,表面锆粉燃烧后,会在表面产生 ZrO_2 氧化层,这不利于氧气扩散到底层,氧浓度越大,氧气扩散速率越大,底层锆粉更易燃烧。

3.2 Zr 粉燃烧过程的可视化分析

锆粉样品在纯氧中的燃烧可视化过程见图 6~图 9。根据燃烧过程中各个阶段的不同特点,将这一过

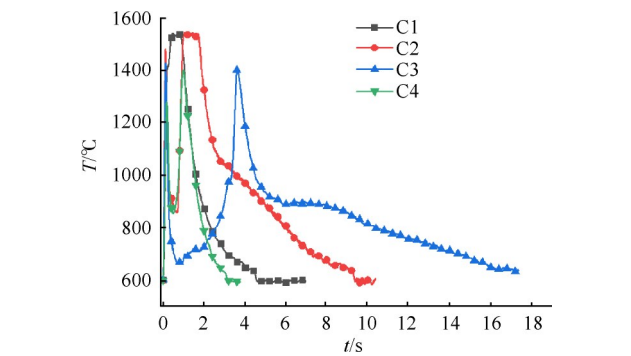


Fig. 5 Curve of combustion temperature with time under different oxygen concentrations

Table 1 Ignition and combustion characteristics of each working condition

Condi- tion	Characteristic spectrum full-time intensity	t_d /ms	t_c /ms	$T/^\circ\text{C}$
C1	7.08×10^4	15	1502.5	1542
C2	4.55×10^4	17.5	1510	1520
C3	2.07×10^4	22.5	1730	1424
C4	2.89×10^4	25	1520	1405

程分成以下四个阶段。起燃阶段为 0ms~20ms,这一阶段主要是激光束打在样品上,加热样品,达到 Zr 粉样品的着火温度后开始燃烧。由图 6 可知,样品中先出现一个小亮点,随着时间推移,亮点慢慢变大,同时亮度也增强,并开始有火星溅出。剧烈燃烧阶段为 25ms~130ms。如图 7 所示,25ms 时锆粉开始剧烈燃烧,火焰向四周绽放,伴随有小颗粒的飞溅燃烧,

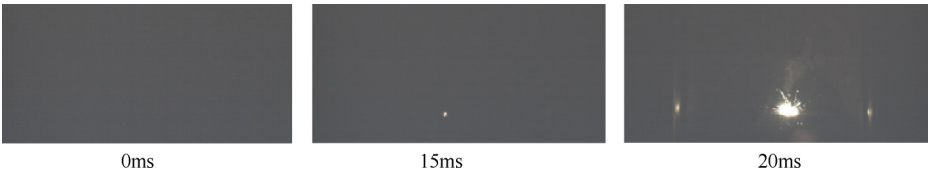


Fig. 6 Lightning stage

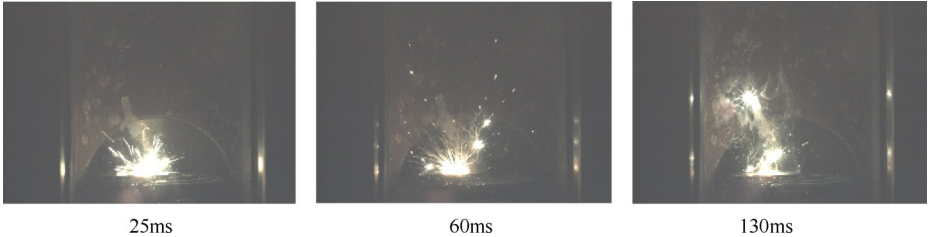


Fig. 7 Intense combustion stage

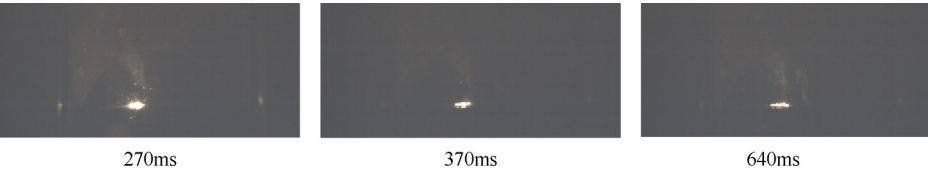


Fig. 8 Stable combustion stage

并存在有大颗粒飞溅燃烧现象。随后到 60ms, 出现火花飞溅式的燃烧, 在 130ms 左右还出现更大粒径的锆粉块飞入火焰上空燃烧。在 60ms~130ms, 出现较明显的扩散燃烧。图 8 为稳定燃烧阶段, 相对于第二个阶段, 这一阶段锆粉的燃烧更平稳, 在 270ms~640ms 都处于一个发光发亮的状态, 没有剧烈的火花四溅。第四个阶段是熄灭阶段, 如图 9 所示, 这一阶段中锆粉燃烧的火焰尺寸越来越小, 亮度也越来越暗, 最后直至完全熄灭。反应开始阶段, 锆粉剧烈燃烧, 随着反应进行, 产生的产物 ZrO_2 含量增大, 会在锆粉表面结成一氧化膜, 而这一氧化膜会阻碍氧气和锆粉的接触, 因此随着时间的推移, 锆粉的燃烧剧烈程度减弱, 最后直至熄灭。



Fig. 9 Flame extinguishing stage

锆粉样品在氧氮 3:1 气氛下的燃烧过程见图 10。由图 10 可知, 火焰的尺寸以及火焰亮度随时间逐渐增大, 但随后火焰尺寸又逐渐减小变暗, 接着又火焰亮度增加, 且开始剧烈燃烧, 火焰中有小颗粒飞溅燃

烧, 最后经过较长时间的演变, 火焰尺寸减小亮度变暗, 直至燃烧结束。在整个燃烧过程中出现火焰变暗又变亮的阶段, 结合温度的变化推测其原因是在燃烧过程中首先表面锆粉着火, 开始燃烧, 但这一燃烧过程没有持续下去, 随着时间推移, 下层锆粉开始着火燃烧, 燃烧过程持续至燃烧结束。工况 C2 的燃烧温度随时间的变化, 中间也出现一个温度先下降后上升的阶段, 因此, 可视化燃烧过程与工况 C2 的温度变化是完全吻合的。

图 11 和图 12 分别为锆粉样品在氧氮 1:1 和氧气二氧化碳 1:1 气氛中燃烧火焰的演变过程。工况 C3 和工况 C4 下锆粉燃烧过程同样出现了先表面锆粉燃烧, 随后下层锆粉燃烧的阶段。由图 5 可知, 这三个工况的温度曲线均出现一个温度先下降后增加的趋势, 所不同的是, 三者这一阶段的持续时间不同, 工况 C2 最短, 而工况 C3 最长。

对比四种工况锆粉燃烧火焰可知, 工况 C1 中 Zr 粉燃烧火焰尺寸更大, 火焰亮度更高, 且剧烈程度最大。工况 C2 次之, 工况 C3 和工况 C4 火焰尺寸相对较小, 亮度较暗。由此可知, 氧浓度增大, Zr 粉燃烧火焰的尺寸增大, 亮度增加, 剧烈程度增大。

3.3 不同氧浓度下 Zr 粉燃烧产物分析

工况 C1~C4 燃烧产物的 XRD 衍射结果见图 13~

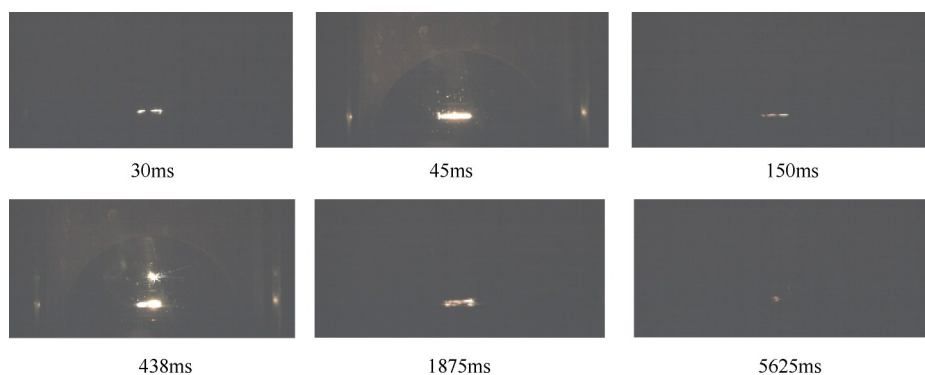


Fig. 10 Evolution of the combustion condition of the C2 combustion condition

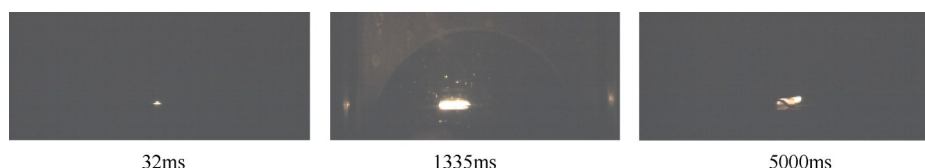


Fig. 11 Evolution of the combustion condition of the C3 combustion condition

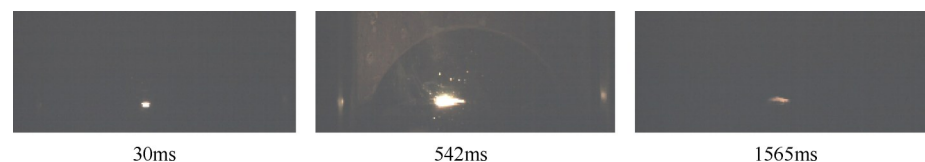


Fig. 12 Evolution of the combustion condition of the C4 combustion condition

图 16。图 13~图 16 分别将各工况的衍射谱和标准 PDF 卡片进行了对比。由图 13 可知,燃烧产物衍射峰与 ZrO_2 相标准谱峰 (PDF#88-2390) 在 2θ 为 24.054° , 28.167° , 31.462° 和 34.139° 这几个位置几乎完全重合。图 14 中燃烧产物 X 射线衍射谱和 ZrO_2 标准 PDF 卡片 (PDF#83-0941) 匹配程度相当高,在 2θ 为 24.449° , 28.176° , 31.464° 等位置峰值高度几乎完全重合。图 15 中燃烧产物 X 射线衍射谱与 ZrO_2 标准 PDF 卡片 (PDF#83-0936),在 2θ 为 24.059° , 28.182° 和 31.473° 等位置的匹配度非常高,谱线峰高几乎一致。图 16 中燃烧产物衍射谱和 ZrO_2 标准卡片 (PDF#83-0936) 的谱峰位置和峰高强度完全一致。由此可知, C1~C4 四个工况下燃烧产物的主要产物均为 ZrO_2 ,工

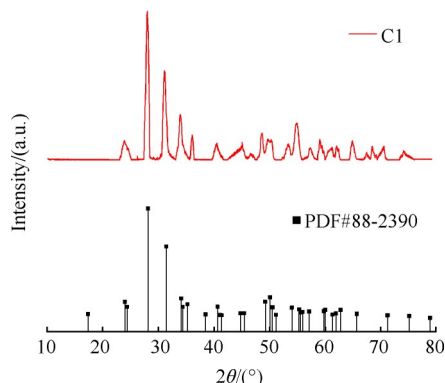


Fig. 13 XRD results of combustion products in working condition C1

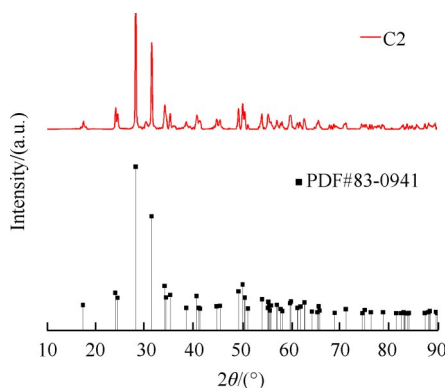


Fig. 14 XRD results of combustion products in working condition C2

况 C2 和 C3 中并未产生 ZrN 物相,工况 C4 中也未发现 ZrC 物相的存在。这一实验结果表明, Zr 粉在 O_2 和 N_2 或 O_2 和 CO_2 的混合气体中,主要是和氧气反应生成 ZrO_2 ,与 N_2 反应生成 ZrN 和与 CO_2 反应生成 ZrC 这两个反应基本没有进行。

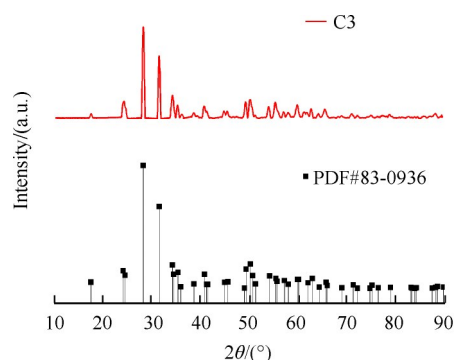


Fig. 15 XRD results of combustion products in working condition C3

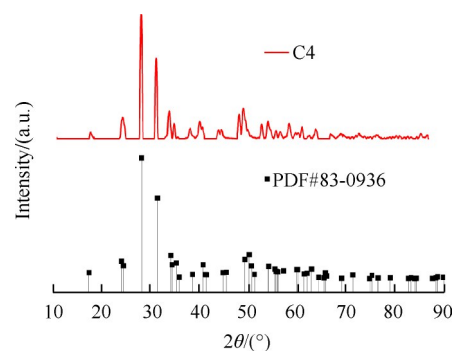


Fig. 16 XRD results of combustion products in working condition C4

4 结 论

基于 CO_2 激光点火台,本文开展了不同氧浓度下的锆粉点火燃烧实验,并分析了燃烧产物的物相特征,获得了氧浓度这一参数对锆粉点火燃烧性能的影响规律。得到的主要结论有:

(1) $30\mu\text{m}$ 锆粉在纯氧中的点火延迟时间 t_d 为 15ms ,燃烧时间 t_c 为 1502.5ms ,燃烧温度 T 为 1542°C ,特征光谱强度为 7.08×10^7 。在氧气氮气 3:1 气氛中 t_d 为 17.5ms , t_c 为 1510ms , T 为 1520°C ,特征光谱强度为 4.55×10^7 。在氧气氮气 1:1 气氛中 t_d 为 22.5ms , t_c 为 1730ms , T 为 1424°C ,特征光谱强度为 2.07×10^7 。在氧气二氧化碳 1:1 气氛中 t_d 为 25ms , t_c 为 1520ms , T 为 1405°C ,特征光谱强度为 2.89×10^7 。由此可知,氧浓度增大,点火延迟时间和燃烧时间缩短,而光谱强度和燃烧温度呈增大趋势。

(2) Zr 粉燃烧过程根据火焰形态可以分为起燃、剧烈燃烧、平稳燃烧和火焰熄灭四个阶段。氧浓度增大,火焰尺寸,火焰亮度和剧烈程度呈增大趋势,燃烧过程中火焰“熄灭”的程度减弱。

(3) 由 XRD 分析结果可知,锆粉在四种不同工况气氛下的燃烧产物主要物相为 ZrO_2 ,未产生 ZrN 和

ZrC等物相。

参考文献

- [1] 唐金兰. 固体火箭发动机原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.
- [2] 庞爱民. 固体火箭推进剂理论与工程[M]. 北京:中国宇航出版社, 2014.
- [3] Pang Wei-Qiang, Fan Xue-Zhong, Zhao Feng-Qi, et al. Effects of Different Nano-Metric Particles on the Properties of Composite Solid Propellants[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2014, 39(3): 329-336.
- [4] Lempert D B, Nechiporenko G N, Manelis G B. Energetic Capabilities of High-Density Composite Solid Propellants Containing Zirconium or Its Hydride[J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2011, 47(1): 45-54.
- [5] Min B S, Hyun H S. Study on Combustion Characteristics and Performance of HTPB/AP Propellants Containing Zirconium[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2015, 28(1): 211-213.
- [6] Lempert D B, Brambilla M, Deluca L T. Ballistic Effectiveness of Zr-Containing Composite Solid Propellants as a Function of Binder Nature and Mass Fraction[J]. *Eucass Proceedings*, 2013, 4: 15-32.
- [7] 邢 娅. 少烟推进剂制作过程中的适用期问题及其测定[J]. 飞航导弹, 1992, (10): 26-29.
- [8] Alekseev A P, Lempert D B, Nemtsev G G, et al. Combustion of Zirconium-Containing Model Compositions of Solid Propellant[J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2012, 5(6): 997-999.
- [9] 王秋红. 锆粉云瞬态火焰及连续喷射火焰特性的实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
- [10] Wang Qinhong, Sun Jinhua, Deng Jun, et al. Combustion Behaviour of Fe_2O_3 -Coated Zirconium Particles in Air[J]. *Energy Procedia*, 2015, 66(6): 269-272.
- [11] 周 琪, 孙金华, 王秋红, 等. 纯锆粉及包覆 Fe_3O_4 锆粉的燃烧特性[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(6): 533-538.
- [12] Arimondi M, Anselmi-Tamburini U, Gobetti A, et al. Chemical Mechanism of the $\text{Zr} + \text{O}_2 \rightarrow \text{ZrO}_2$ Combustion Synthesis Reaction[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, 101(41): 8059-8068.
- [13] Ewald K H, Anselmi-Tamburini U, Munir Z A. Combustion of Zirconium Powders in Oxygen[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, 291(1-2): 118-130.
- [14] Ewald K H, Anselmitamburini U, Munir Z A. A Finite Difference Model for the Combustion of Zirconium in Oxygen[J]. *Journal of Materials Research*, 2000, 15(9): 1922-1935.
- [15] Badiola C, Dreizin E L. Combustion of Micron-Sized Particles of Titanium and Zirconium[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2237-2243.
- [16] Richardson R S. An Investigation of Molecular Spectra in Sun-Spots[J]. *Astrophysical Journal*, 1931, 41(4): 2201-2211.
- [17] 张 强, 康晓丽, 罗江山, 等. Zr粉粒径Zr/KClO₄烟火剂燃烧特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1867-1872.

(编辑:史亚红)