

Study on Thermal Properties of Al₃Zr/Al Composite Fuels

Wen Shi, Hui Zou*, Shuizhou Cai

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: 289024545@qq.com, *zouhui@hust.edu.cn

Received: Mar. 28th, 2018; accepted: Apr. 19th, 2018; published: Apr. 26th, 2018

Abstract

In order to study on thermal properties of Al₃Zr/Al composite fuels, Al₃Zr/Al composite fuels were prepared by non-consumable arc-melting technique and close-coupled gas-atomization. The laser particle size analyzer, X-ray diffraction, electron microscopy and thermal analysis were used to characterize particle size distribution, phase composition, structure, morphology and oxidation process of the composite powders, respectively. The results showed that the phase composition of Al₃Zr/Al composite fuels is mainly consists of Al and Al₃Zr. The addition of Zr made a special structure that intermetallic compound Al₃Zr is embedded in the Al matrix form in the interior of Al₃Zr/Al composite fuels. The special structure and non-selective oxidation of Al₃Zr/Al composite fuels played a key role in oxidation process. The results of TG-DTA showed that, compared with pure Al powders, Al₃Zr/Al composite fuels had more intensive heat release and lower exothermic temperature, showing a stronger thermal reactivity. In addition, the oxidation process and oxidation mechanism of Al₃Zr/Al composite fuels were discussed.

Keywords

Al₃Zr/Al Composite Fuels, Thermal Properties, Non-Consumable Arc-Melting Technique, Close-Coupled Gas-Atomization, Non-Selective Oxidation

Al₃Zr/Al复合燃料的热性能研究

石文, 邹辉*, 蔡水洲

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉

Email: 289024545@qq.com, *zouhui@hust.edu.cn

收稿日期: 2018年3月28日; 录用日期: 2018年4月19日; 发布日期: 2018年4月26日

*通讯作者。

摘要

为研究 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料热性质的影响,本文采用非自耗电弧熔炼技术以及紧耦合气雾化法制备了 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料,并通过激光粒度仪、XRD、SEM和热分析对复合粉末的粒径、物相、形貌、结构以及热性质做了表征。结果表明, $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料主要物相组成为Al和 Al_3Zr 。锆的加入使得 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的内部形成了金属间化合物 Al_3Zr 内嵌到铝基体的特殊结构。 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的特殊结构以及 Al_3Zr 的非选择性氧化促进了 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的氧化。TG-DTA结果表明 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料与纯铝粉相比,放热更加集中,放热温度更加提前,表现出更强的热反应活性。此外,本文还对 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的氧化过程和氧化机理进行了探讨。

关键词

$\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料, 热性质, 非自耗电弧熔炼, 紧耦合气雾化, 非选择性氧化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属燃料作为含能添加剂和燃烧催化剂填充到推进剂和炸药中能提高其密度、爆热和发动机的比冲,因而广泛应用于航天与军事领域[1] [2] [3]。目前,金属燃料的研究主要集中在单质铝粉和铝基合金粉末当中,例如Al-Mg、Al-Li、Al-Ni、Al-Ti等等[4] [5] [6] [7]。这些合金粉末在一定程度上能缩短点火延迟时间、降低点火温度以及增强氧化程度,因而它们拥有更高的能量释放效率和能率释放速率[8] [9]。然而,这些金属依然存在一些本质上的缺陷。比如铝粉易团聚、燃烧不完全[10] [11] [12];镁在发动机应用中存在低空燃比的问题[13]。锆是一种比较有代表性的高密度含能金属。一方面,高密度能够提高含能配方的体积比冲和能量密度[14]。另一方面,锆具有良好的点火性能和燃烧性能,它即使在高的负载下也能被点燃[15] [16]。这些优势使得锆渐渐成为研究金属燃料的重点。然而,锆也存在严重的不足。高的熔点以及熔炼过程中的成分偏析都严重限制了锆的发展,而且锆的含能远低于铝。因此,将铝和锆进行合金化形成 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料不失为一个解决锆缺陷的新途径。目前,Al-Zr合金粉末的制备方法主要集中在自蔓延高温合成(SHS)以及非自耗电弧熔炼[17] [18] [19] [20]。然而,这些方法制备的粉末大都呈无规则块状,严重影响了合金燃料在含能配方中的使用性能。本文采用非自耗电弧熔炼以及紧耦合气雾化法制备 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料,对其形貌、结构、物相以及热性质作了表征,并探究了 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的氧化机制。

2. 实验

2.1. $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的制备

不同锆含量的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料制备过程如下所述:在水冷模具中采用电弧熔炼技术对质量比为30:70的海绵锆(纯度,99.99%)和铝锭(纯度,99.95%)进行熔炼,得到Al-Zr合金锭子。熔炼之前,熔炼炉的样品室被抽成高真空状态(真空度 $\leq 4 \times 10^{-3}$ Pa),然后充入氩气作为保护气氛直到常压。样品室内的残余氧气通过熔融的钛球吸收。制备的Al-Zr合金被反复熔炼八次以上以确保成分均匀。将熔炼好的Al-Zr

合金置于紧耦合雾化设备当中雾化成粉。雾化条件为：雾化气氛为氩气，喷射压力 5 MPa，最高加热温度为 1500℃，真空度为 20 Pa。雾化后，收集到的粉末通过 200 目的拍击筛进行分选。

2.2. 材料的表征

使用带 EDS 功能的电子显微镜观察粉末形貌，背散射图片用来观察粒子的形状与尺寸。适量的粉末被镶进环氧树脂中，经磨制与抛光，最后以体积比为 HF:HCl:HNO₃:H₂O = 1:1.5:2.5:95 的腐蚀液进行金相腐蚀。得到的样品用作粒子的横截面分析。激光粒度仪用来表征粉末的粒径分布。粉末的物相通过 XRD 来表征，图谱采集角度在 10°~90° 区间。粉末的热性质通过 TG-DTA 以及 DSC 来表征。TG-DTA 的实验条件：加热温度从室温到 1300℃，加热速度为 20℃/min，气氛为 O₂，气流速度为 20 mL/min；DSC 的实验条件：加热温度从室温到 1000℃，加热速度为 10℃/min，气氛分别为 O₂ 和 Ar，气流速度为 20 mL/min。

3. 结果与讨论

3.1. Al₃Zr/Al 复合燃料的物相、粒径和形貌分析

图 1 为新工艺制备的 Al₃Zr/Al 复合燃料的 XRD 图谱，纯 Al 粉作为参照。从图中可以看出，Al₃Zr/Al 复合燃料的物相组成为 Al 和 Al₃Zr 两相。Al₃Zr/Al 复合燃料的 XRD 图谱中并没有单质锆的特征峰出现，这说明 Zr 与 Al 完全合金化，形成了金属间化合物 Al₃Zr。

图 2 为过 200 目筛分后的 Al₃Zr/Al 复合燃料的粒径分布图。从图中可以看出，过筛后的粉末的平均直径为 25.7 μm，尺寸分布较为均匀，有少量的大尺寸粒子出现，可能是由于少量 Al-Zr 复合粉末的流动性较差造成颗粒彼此之间的粘合形成的。图 3 为 Al₃Zr/Al 复合燃料的 SEM 形貌图，从图中可以看出，除少数情况外，绝大部分粉体材料都呈高度球形，且没有明显的团聚现象发生。从图 3(b) 可以看出，颗粒表面粗糙，有鳞片状表皮堆积，晶界分明。鳞片状表皮的形成是由于颗粒在凝固过程中存在优先结晶面和结晶方向。因此，颗粒内部的某一相定然存在优先结晶面优先结晶出来。颗粒表面并非完全致密，这就为氧化提供了多个氧通道。相比于纯铝粉表面形成的致密氧化膜，Al₃Zr/Al 复合燃料拥有更高的热活性，更加容易被氧化。

适量的 Al₃Zr/Al 复合燃料经热镶过程嵌入到环氧树脂中，后经研磨与抛光，得到横截面样品，在 SEM 背散射模式下观察 Al₃Zr/Al 复合燃料内部结构组织。如图 4 所示，是 Al₃Zr/Al 复合燃料复合燃料的

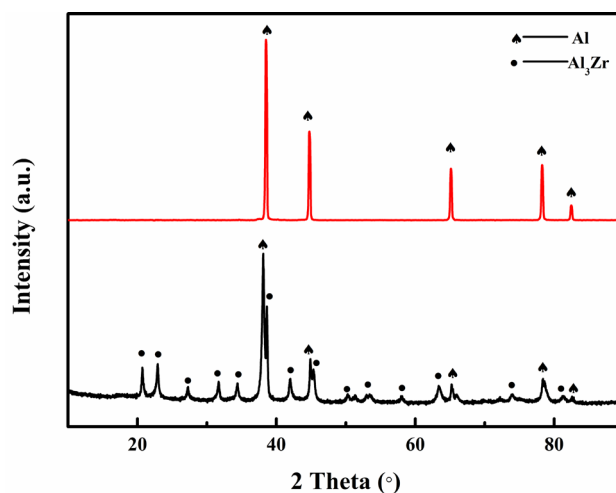


Figure 1. XRD patterns of Al₃Zr/Al composite fuels

图 1. Al₃Zr/Al 复合燃料的 XRD 图

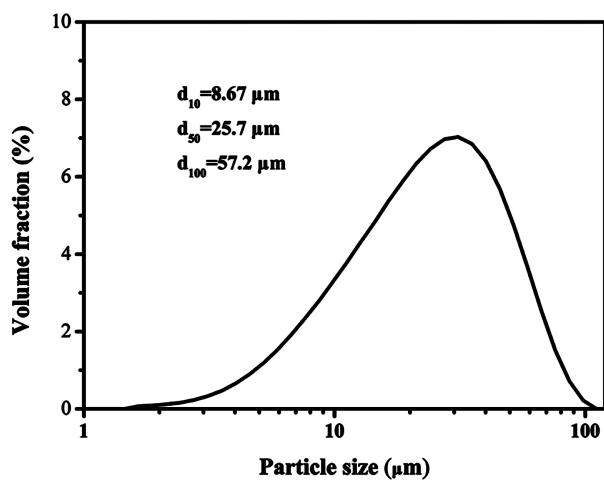


Figure 2. Particle size distribution for Al₃Zr/Al composite fuels
图 2. Al₃Zr/Al 复合燃料的粒径分布

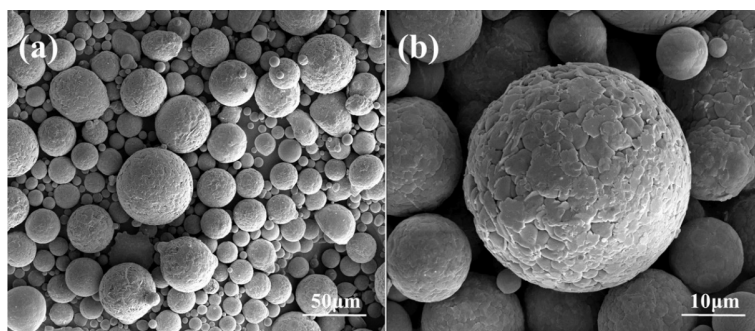


Figure 3. SEM images of Al₃Zr/Al composite fuels
图 3. Al₃Zr/Al 复合燃料的表面形貌图

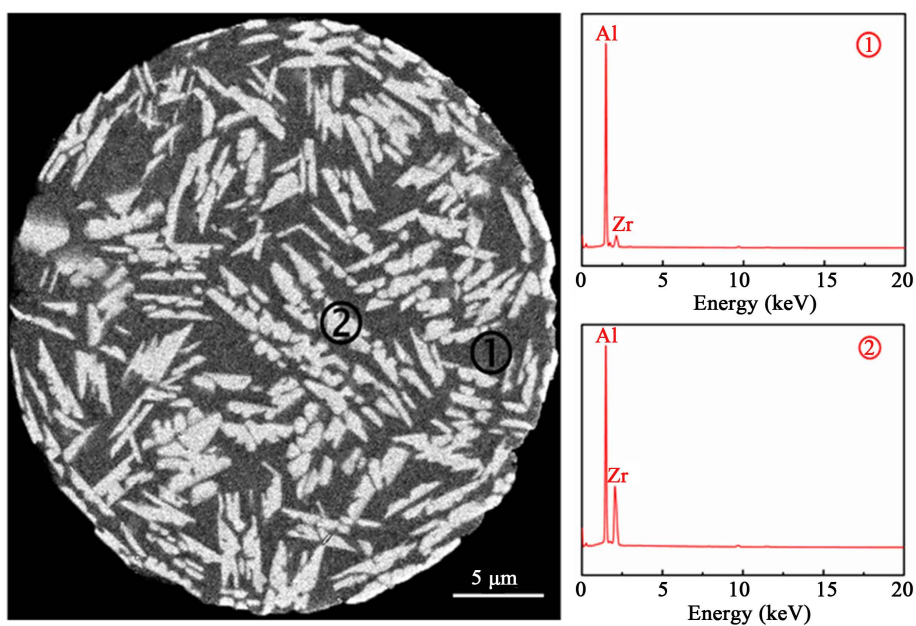


Figure 4. The cross-section morphologies and EDS patterns of Al₃Zr/Al composite fuels
图 4. Al₃Zr/Al 复合燃料截面的 SEM 图以及 EDS 图谱

横截面形貌图和 EDS 图。从图中可以清晰地看到，粉末内部呈现白色针状晶体嵌入到黑色基体当中的特殊结构，这些白色的晶体将基体隔开，具有晶粒细化的作用。EDS 结果表明，白色晶体中的 Al 含量高达 74.66 at%，而 Zr 含量为 25.34 at%。这个结果表明 Al 和 Zr 在熔炼过程中发生了金属间反应，形成了金属间化合物 Al_3Zr 。而从 EDS 结果中 Al 和 Zr 的比例可以推测白色晶体就是 Al_3Zr 。而从黑色基体中的 EDS 结果来看，Al 含量高达 96.82 at%，可以推测黑色基体为过量的单质 Al。而基体中出现的少量 Zr，可能是由于在样品进行机械研磨的过程中，某一层 Al 颗粒被研磨得很薄，场发射的电子束可能检测到下一层的颗粒上导致的。因此，这少量的 Zr 含量可以忽略不计。故 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料是由 Al_3Zr 和过量的单质 Al 组成。这个结果与图中的 XRD 结果一致。 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料内部形成了针状金属间化合物内嵌到基体中的特殊结构，这种特殊结构有可能促进 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的完全氧化。

3.2. $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料热性能及氧化过程分析

$\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的 TG-DTA 曲线如图 5 所示，其中 Al 粉作为参考系。从图中可以看出， $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料对比纯铝粉，热分析曲线明显不同。纯 Al 粉的 DTA 曲线上有一个吸热峰和一个放热峰，吸热峰是由 Al 的熔化吸热造成的，而放热峰是 Al 的氧化放热引起的。对于 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料而言，此时 Al 的吸热峰基本消失，而由一个在 960°C 附近处比较集中的放热峰和 1100°C 处比较平缓的放热峰组成。 960°C 处的放热是由于 Al_3Zr 发生剧烈的氧化反应造成的，而 1100°C 处比较弱的放热则是由过量的单质 Al 氧化形成的。从 TG 曲线上可以看出，Al 粉的增重较低，远低于完全氧化时的增重，表明 Al 粉氧化不完全；而对于 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料，增重达到 69.9%，是 Al 粉的两倍多，接近完全氧化时的增重，说明 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料氧化是比较完全的。相比纯 Al 粉， $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料放热提前，增重更明显。由此证明 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料与纯 Al 粉相比，拥有更高的热反应活性，反应更完全。

为了探究 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料在 960°C 放热的原因，将 Al_3Zr 金属间化合物置于纯 O_2 气氛下的管式加热炉中，在不同温度下进行氧化。图 6 显示的是 Al_3Zr 分别在 600°C ， 800°C ， 900°C 和 1000°C 下氧化后的 XRD 图谱。从图中可以看出， Al_3Zr 在 600°C 时基本没有氧化。随着温度从 600°C 增加到 800°C 时， Al_3Zr 的峰开始消失，取而代之的是 Al_2O_3 ， $t\text{-ZrO}_2$ 和 $m\text{-ZrO}_2$ 的峰。当温度继续增加到 900°C 和 1000°C 时，氧化产物的晶型并没有发生明显的变化。这表明 Al_3Zr 在 800°C 时氧化并不完全，氧化还在进一步发生。然而，氧化产物的类型并没有发生改变，且在 960°C 时并没有发生明显的晶型变化。基于以上分析可以推断， Al_3Zr 在 960°C 的放热反应与产物的晶型转变并无直接关系。

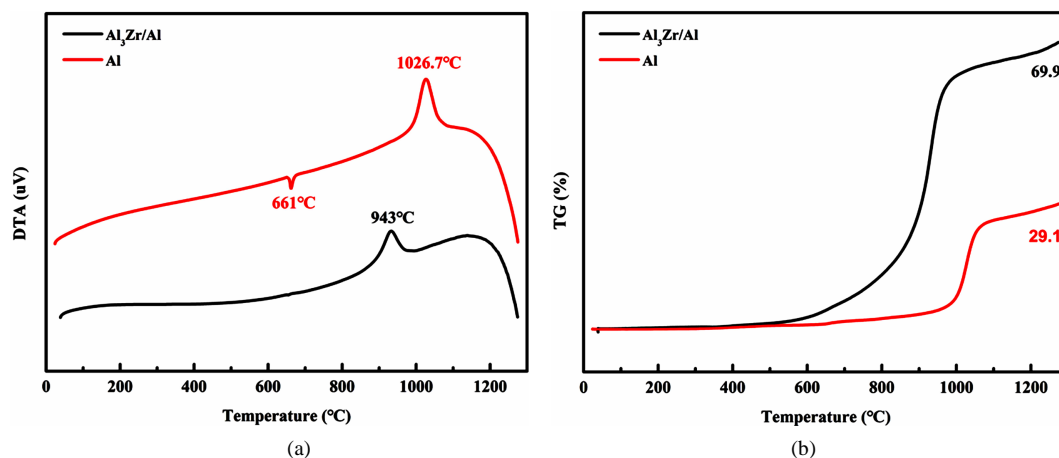


Figure 5. TG-DTA traces of $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ composite fuels
图 5. $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的 TG-DTA 曲线

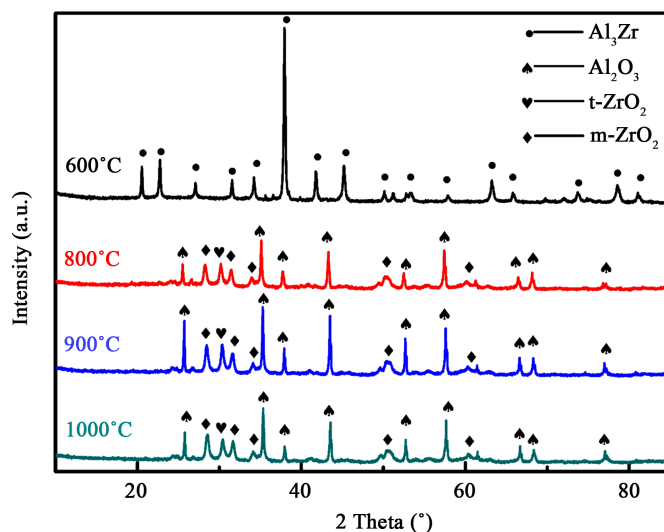


Figure 6. XRD patterns of oxidized Al_3Zr intermetallic powders at different temperature

图 6. Al_3Zr 金属间化合物粉末在不同温度下氧化产物的 XRD 图谱

为了证明 Al_3Zr 在 960°C 放热与温度和氧化介质之间的关系, 将对 Al_3Zr 作 DSC 分析。如图 7 所示, 是 Al_3Zr 分别在 Ar 和 O_2 气氛下的 DSC 曲线。从图中可以看出, 在 Ar 气氛下, DSC 曲线上从始至终没有出现放热峰, 这表明温度与 Al_3Zr 在 960°C 下放热并无关联。而反观在 O_2 气氛下, 在 960°C 下有一个十分明显的放热峰。从而可以说明, O_2 作为氧化介质参与到 Al_3Zr 的氧化反应中, 能引起 Al_3Zr 在 960°C 集中放热。该反应过程是后续提到的 Al_3Zr 的非选择性氧化过程。

综合以上描述与分析, 为建立 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的氧化模型, 将 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料置于气氛烧结炉中, 分别在 1300°C 和 1500°C 下进行氧化。图 8 显示的是不同温度下 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料氧化产物的形貌图。从图中可以看出, 粉末表面基本被氧化, 出现大量的裂纹, 甚至有一些外壳已经破裂, 里面熔融的核心被暴露在外面。这个熔融的核心是由熔融的 Al 液包裹着 Al_3Zr 形成的。从图中可以看出, 核心已经消失, 只剩下空壳留下。这个空壳是由 Al_2O_3 和 ZrO_2 构成的。此时, 粉末已完全氧化。图 9 显示的是随炉冷却后的氧化产物的 XRD 图谱。从图中可以看出, 1300°C 下的氧化产物主要由 Al_2O_3 , ZrO_2 , 未反应完的 Al 和 Al_3Zr 组成; 而 1500°C 下的氧化产物仅由 Al_2O_3 和 ZrO_2 组成, 且所有的 t- ZrO_2 全部转变为 m- ZrO_2 。

3.3. $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的氧化机制与模型

图 10 显示的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料氧化过程示意图。这个新的氧化模型可以这样解释: 开始, 少量的 O_2 穿过并不致密的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料表面, 与颗粒内部的少量的铝粉进行缓慢的氧化, 反应方程式如下所示:



随着温度的增加, 达到 Al 熔点时, Al 开始熔化并包裹着嵌在基体中的 Al_3Zr 。 Al_3Zr 由于其密度大略微下沉。当温度进一步升高直到点火温度之前, 此时 Al 已完全熔化, 而 Al_3Zr 在有 O_2 气氛下发生非选择性氧化, 形成 ZrO_2 和 Al_2O_3 。 Al_3Zr 的非选择性氧化过程可由以下方程式来表述:



在这个氧化过程中, 大量的热被释放出来而引起局部过热, 这将导致极大的热膨胀和浓度梯度。加之 Al_3Zr 有很低的收缩率, 在高的体积膨胀下很容易破碎。从而使得晶粒得细化, 反应更容易进行。而

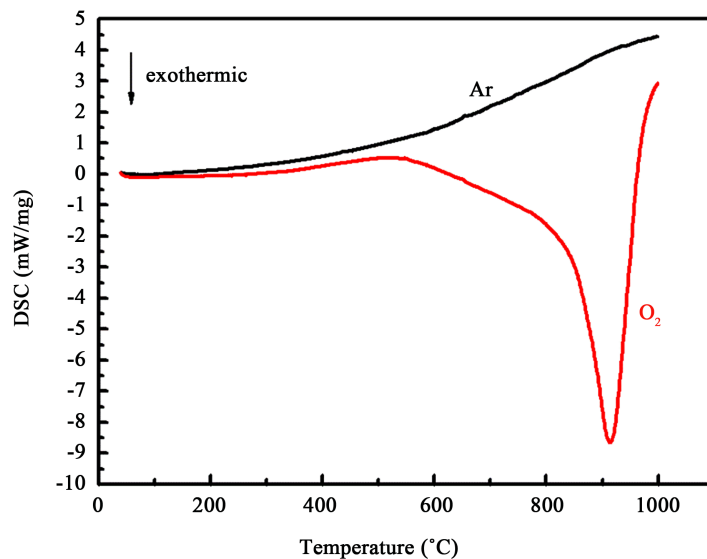


Figure 7. DSC curves of Al_3Zr intermetallic compounds at different atmosphere
图 7. Al_3Zr 在不同气氛下的 DSC 曲线

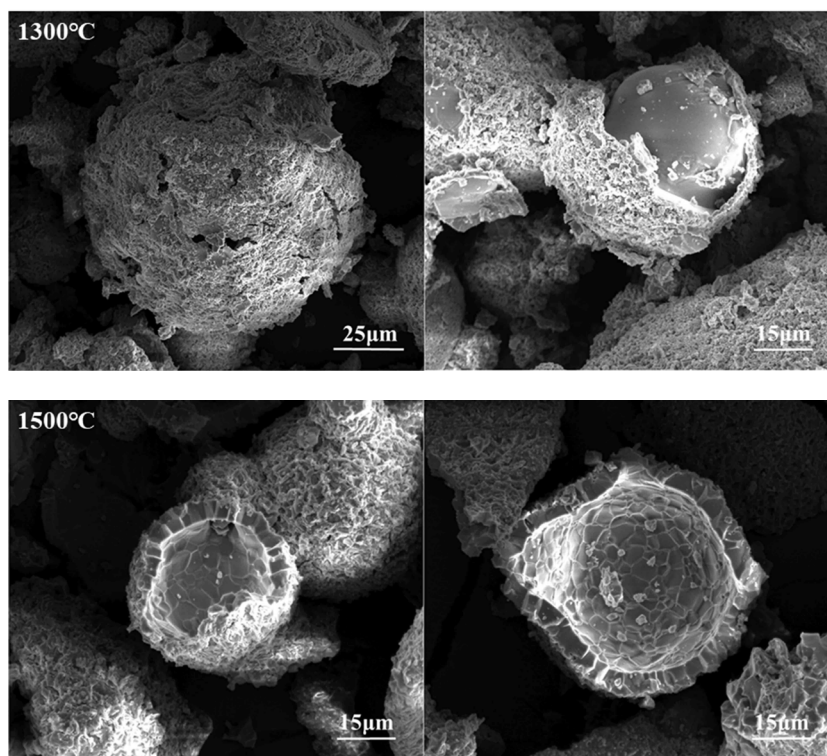


Figure 8. SEM images of $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ composite fuels oxidized at different temperature
图 8. 不同温度下退火后 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的表面形貌图

$\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料内部特殊的结构使得针状的 Al_3Zr 的氧化能够带动基体单质 Al 的氧化燃烧。两者热量叠加使得反应更加剧烈。同时，熔融的 Al 液与周围分散的小粒子也能发生反应[21] [22]，其反应式如下所示：



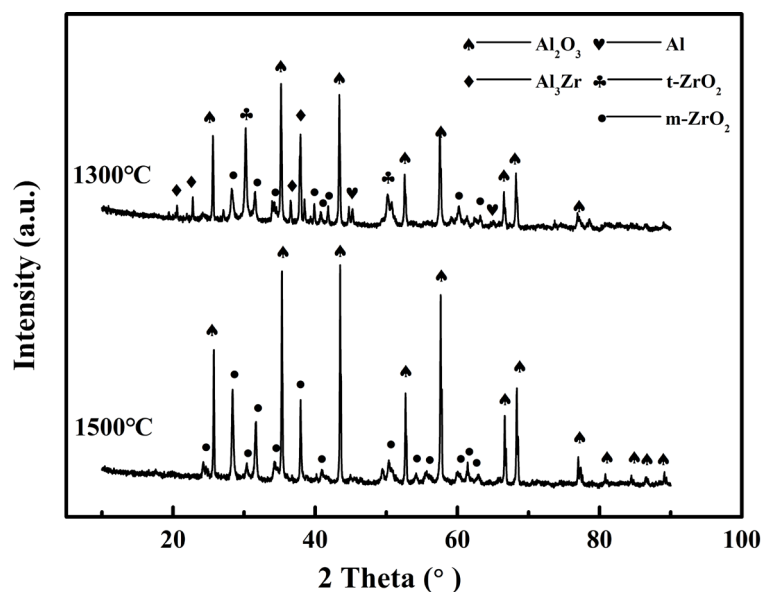


Figure 9. XRD patterns of Al₃Zr/Al composite fuels oxidized at different temperature
图 9. 不同温度下退火后 Al₃Zr/Al 复合燃料的 XRD 图谱

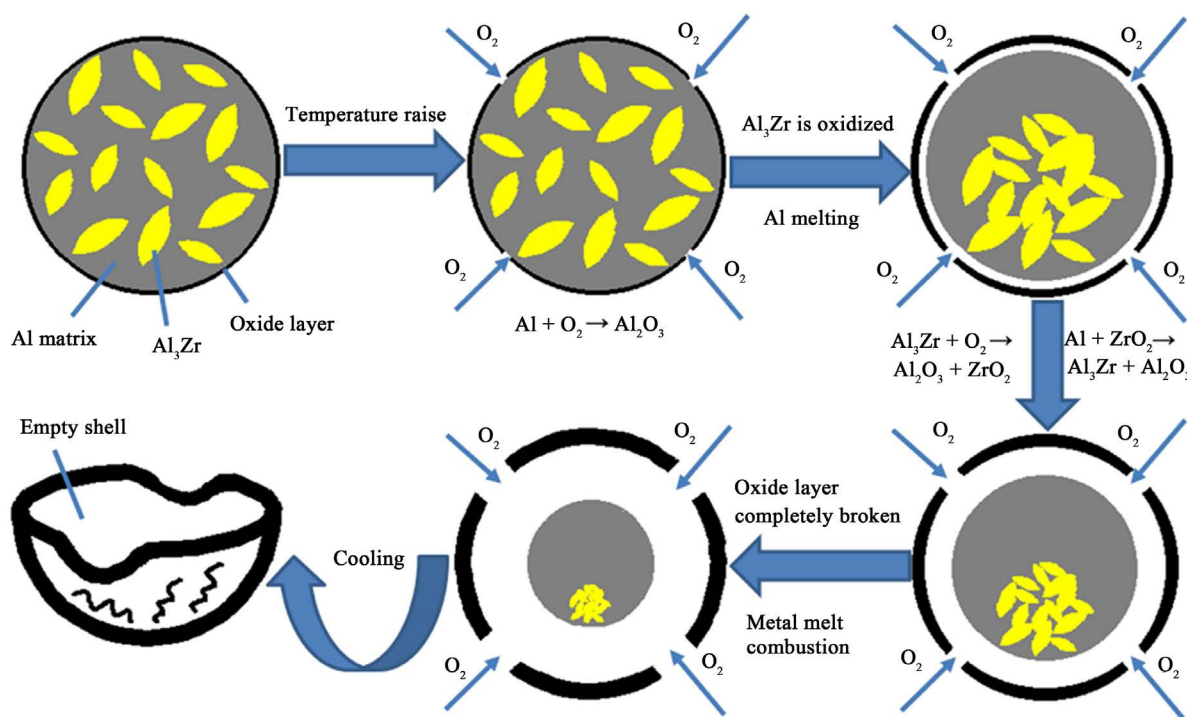


Figure 10. Scheme of oxidation process of Al₃Zr/Al composite fuels
图 10. Al₃Zr/Al 复合燃料的氧化过程示意图

这个反应在放热的同时还生产了新生的 Al₃Zr, 而新生的 Al₃Zr 又能参与到(2)中的反应中去。液态 Al 不断被消耗, 反应剧烈进行。同时, 粒子内部温度急剧上升, 由于粒子内部与表面热膨胀系数的不同产生了巨大的压力差。外层非致密的表皮出现大量的裂纹, 为外部 O₂ 的渗透提供了更多的通道, 从而加速氧化过程的进行, 使得裂纹进一步拓展和延伸, 甚至导致外壳的破裂与剥落, 因而使得内部的熔融 Al

液和 Al_3Zr 完全暴露在 O_2 下, 促进粉末的完全氧化。这个过程足以使得整个颗粒发生崩塌, 实现颗粒的完全氧化。

在 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料氧化过程中, Zr 含量扮演着重要的角色。在 Zr 含量在 10~53 wt% 的区间内, $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料保持着 Al 过量的情况。 Zr 含量的多少决定着合金内部 Al_3Zr 量的多少。而 Al_3Zr 的量决定着反应的剧烈程度, 在整个氧化过程中起至关重要的作用。因此, 具有特殊结构的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料有望在推进剂和火炸药领域具有广阔的应用前景。

4. 结论

本文主要利用激光粒度仪、SEM、XRD、TG-DTA、TG-DSC 等技术手段对新工艺制备的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料的尺寸、形貌、物相以及热性质进行表征, 并探究其氧化机制, 建立新的氧化模型。主要有如下结论:

1) 新工艺制备的 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料成分均匀, 呈高度球形状, 粉末的平均粒径在 25.7 μm 。而 XRD 结果表明, $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料由金属间化合物 Al_3Zr 以及单质 Al 两相组成。

2) 与纯 Al 粉相比, $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料有更低的放热温度, 放热更加集中, 且有更明显的增重, 增重可达 69.9%, 表明 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料比纯 Al 粉有更好的热活性。

3) Al_3Zr 金属间化合物在 O_2 气氛下于 960 $^\circ\text{C}$ 附近有明显的放热。

4) $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料内部特殊的组织结构和 Al_3Zr 的非选择性氧化促使 $\text{Al}_3\text{Zr}/\text{Al}$ 复合燃料均在 960 $^\circ\text{C}$ 附近集中放热, 从而导致整个复合粉末的完全氧化。

致 谢

感谢国家自然科学基金和中国工程物理研究院联合基金(U1530127)、上海航天创新基金(SAST2015096)、航天科学基金以及华中科技大学分析测试中心对本研究工作的大力支持。

参考文献

- [1] Gany, A. and Netzer, D.W. (1985) Fuel Performance Evaluation for the Solid-Fueled Ramjet. *International Journal of Turbo & Jet Engines*, **2**, 157-168. <https://doi.org/10.1515/TJJ.1985.2.2.157>
- [2] Palaszewski, B. and Powell, R. (1994) Launch Vehicle Performance Using Metallized Propellants. *Journal of Propulsion & Powder*, **10**, 828-833. <https://doi.org/10.2514/3.23821>
- [3] Maggi, F., Dossi, S., Paravan, C., Deluca, L.T. and Liljedahl, M. (2015) Activated Aluminum Powders for Space Propulsion. *Powder Technology*, **270**, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.048>
- [4] Umbrajkar, S.M., Schoenitz, M., Jones, S.R. and Dreizin, E.L. (2005) Effect of Temperature on Synthesis and Properties of Aluminum-Magnesium Mechanical Alloys. *Journal of Alloys & Compounds*, **402**, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.03.088>
- [5] Moore, J.T., Turns, S.R. and Yetter, R.A. (2005) Combustion of Lithium-Aluminum Alloys. *Combustion Science & Technology*, **177**, 627-669. <https://doi.org/10.1080/00102200590909256>
- [6] Osório, W.R., Spinelli, J.E., Afonso, C.R.M., Peixoto, L.C. and Garcia, A. (2012) Electrochemical Corrosion Behavior of Gas Atomized Al-Ni Alloy Powders. *Electrochimica Acta*, **69**, 371-378. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.018>
- [7] Shoshin, Y.L. and Dreizin, E.L. (2006) Particle Combustion Rates for Mechanically Alloyed Al-Ti and Aluminum Powders Burning in Air. *Combustion & Flame*, **145**, 714-722. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.11.006>
- [8] Aly, Y., Hoffman, V.K., Schoenitz, M. and Dreizin, E.L. (2013) Preparation, Ignition, and Combustion of Mechanically Alloyed Al-Mg Powders with Customized Particle Sizes. *Combustion & Flame*, **160**, 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>
- [9] Aly, Y. and Dreizin, E.L. (2015) Ignition and Combustion of Al-Mg Alloy Powders Prepared by Different Techniques. *Combustion & Flame*, **162**, 1440-1447. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.11.010>
- [10] Ilyin, A., Gromov, A., An, V., Faubert, F., Izarra, C.D., Espagnacq, A. and Brunet, L. (2002) Characterization of Alu-

- minum Powders. I: Parameters of Reactivity of Aluminum Powders. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, **27**, 361-364. <https://doi.org/10.1002/prop.200290006>
- [11] Ermakov, V.A., Razdobreev, A.A., Skorik, A.I., Pozdeev, V.V. and Smolyakov, S.S. (1982) Temperature of Aluminum Particles at the Time of Ignition and Combustion. *Combustion Explosion & Shock Waves*, **18**, 256-257. <https://doi.org/10.1007/BF00789629>
- [12] Dreizin, E.L. (1996) Experimental Study of Stages in Aluminum Particle Combustion in Air. *Combustion and Flame*, **105**, 541-556. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(95)00224-3)
- [13] Athawale, B.K., Asthana, S.N. and Singh, H. (2013) Metallised Fuel Rich Propellants for Solid Rocket Ramjet: A Review. *Defence Science Journal*, **44**, 269-278. <https://doi.org/10.14429/dsj.44.4182>
- [14] Procinsky, I.M. and Mchale, C.A. (2012) Nozzleless Boosters for Integral-Rocket-Ramjet Missile Systems. *Journal of Spacecraft & Rockets*, **18**, 193-199. <https://doi.org/10.2514/3.57804>
- [15] Suzuki, T., Odawara, T., Kunitou, K., Tanabe, M. and Kuwahara, T. (2004) Combustion and Ignition Characteristics of Zr in Solid Fuel of Ducted Rockets. *Bulletin of Experimental Biology & Medicine*, **94**, 853-856. <https://doi.org/10.2514/6.2004-3727>
- [16] Min, B.S. and Hyun, H.S. (2012) Study on Combustion Characteristics and Performance of HTPB/AP Propellants Containing Zirconium. *Journal of Propulsion & Power*, **28**, 211-213. <https://doi.org/10.2514/1.B34120>
- [17] Song, M., Zhang, M., Huang, B., Zhang, S. and Li, J. (2008) Reaction Synthesis of $ZrAl_3$, Intermetallic Compound and Its Nucleation Behavior. *Rare Metal Materials & Engineering*, **37**, 1570-1574. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(09\)60043-6](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(09)60043-6)
- [18] Song, M.S. and Ran, M.W. (2011) Only Formation of $ZrAl_3$ Phase Obtained by Self-Propagating Reaction from Zr-Al Elemental Powders. *Advanced Materials Research*, **239-242**, 2805-2808. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.2805>
- [19] Paljević, M. (1990) Change of Oxidation Kinetics in the Zr-Al System. *Journal of the Less-Common Metal*, **157**, 289-293. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(90\)90183-K](https://doi.org/10.1016/0022-5088(90)90183-K)
- [20] Paljević, M. (1991) Non-Selective Oxidation of $ZrAl_3$. *Journal of the Less-Common Metal*, **175**, 289-294. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(91\)90014-U](https://doi.org/10.1016/0022-5088(91)90014-U)
- [21] Li, G.R., Zhao, Y.T., Wang, H.M., Chen, G., Dai, Q.X. and Cheng, X.N. (2009) Fabrication and Properties of *in Situ* ($Al_3Zr + Al_2O_3$) p/A356 Composites Cast by Permanent Mould and Squeeze Casting. *Journal of Alloys & Compounds*, **471**, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.037>
- [22] Mandal, A., Das, K. and Das, S. (2016) Characterization of Microstructure and Properties of Al- Al_3Zr - Al_2O_3 Composite. *Bulletin of Materials Science*, **39**, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12034-016-1236-5>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org