

高镁含量的铝基合金粉末的水反应活性研究

曾庆顺, 邹 辉*

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

收稿日期: 2023年2月18日; 录用日期: 2023年3月15日; 发布日期: 2023年3月22日

摘 要

使用高温气雾化法制备了Al-40Mg、Al-37Mg-3Li与Al-37Mg-3Eu (wt.%)三种合金燃料粉末, 用XRD和SEM表征其物相组成和表面形貌, 并研究了Al-40Mg、Al-37Mg-3Li与Al-37Mg-3Eu三种合金燃料粉末在高压反应釜中的水反应性能。结果表明, 单质Al粉的产氢效率仅为80.17%, 而Al-40Mg、Al-37Mg-3Li、Al-37Mg-3Eu的产氢效率分别提升至93.69%、94.32%和94.63%。此外, 还表征了三种合金燃料粉末水反应产物的物相组成和微观形貌。

关键词

Al基合金粉末, 高温气雾化法, 高压反应釜, 产氢效率

Study on Water Reactivity of Aluminum-Based Alloy Powders with High Mg Content

Qingshun Zeng, Hui Zou*

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

Received: Feb. 18th, 2023; accepted: Mar. 15th, 2023; published: Mar. 22nd, 2023

Abstract

Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu (wt.%) alloy fuel powders were prepared by high temperature gas atomization method, and their phase compositions and surface morphology were characterized by XRD and SEM. The water reaction properties of Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu alloy fuel powders in high pressure reactor were studied. The results showed that the hydrogen production efficiency of elemental Al powder was only 80.17%, while the hydrogen production ef-

efficiency of Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu increased to 93.69%, 94.32% and 94.63%, respectively. In addition, the phase composition and morphology of the water reaction products of three kinds of alloy fuel powder were characterized.

Keywords

Aluminum-Based Alloy Powder, High Temperature Aerosol Process, High Pressure Reactor Test, Hydrogen Production Efficiency

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

金属可以与水发生放热反应并产生氢气, 因此金属/水反应可以应用于制氢技术[1]-[7], 也可以应用于水下推进系统[8] [9] [10], 反应过程中产生的高温氢气伴随着巨大能量能够推动水下航行体运动。Al 粉的能量密度高, 且价格低廉、与水反应的产物无毒, 单质 Al 粉在水下推进系统中的应用引起了大量关注[11] [12], Al 与水的反应已被广泛研究[13]-[19]。Al 粉与水的反应存在难以启动与持续的问题, 因为 Al 粉颗粒在空气中极易被氧化, 表面会形成一层致密的氧化膜, 这层氧化膜阻碍了内部 Al 和水分子的接触与反应[20]。因此研究人员探索了一些方法来促进铝/水反应, 比如将铝在碱性溶液中反应[6] [21], 使用铝基复合材料[22] [23] [24]等。

Mg 与水反应具有反应启动温度低、反应效率高的优点, 已被广泛应用于水反应产氢领域[25]-[30]。Uda 等人[25]制备的高活性纳米 Mg 粉在室温下即可与水剧烈反应。Liu 等人[26]分别将 Mg 粉与 AlCl₃、KCl、NaCl 和 MgCl₂ 进行混合球磨, 并研究其水反应性能, 发现 AlCl₃ 与 Mg 的球磨混合物的水反应效率最高。

基于此, 研究人员提出 Al 粉中添加 Mg 是一种提高水反应活性的有效方法[11] [31] [32] [33]。Zou 等人[31]对 Mg-Al 合金与海水的反应进行了研究, 发现高能球磨后的 Mg-Al 颗粒更细小, 水反应活性更高。Kozin 等人[32]研究了 Al-Mg-Bi 合金水反应时铝和镁的相互作用机理, 证实 Bi 可以起到活化剂的作用, 使铝和镁具有高反应活性。Yang 等人[33]进行了 Mg 含量为 20 wt.% 的 Al-Mg 混合粉末在高温水蒸气中的热重实验, 并用质量增重来衡量反应效率。试验结果表明, Al-20Mg 混合粉末与 Al 粉相比, 反应效率从 13.52% 提高到了 50.51%, Al-20Mg 的水反应产物包含 Al₂O₃、MgO 与 MgAl₂O₄, 并存在部分剩余单质 Al。

本文采用高温气雾化法分别制备了 Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu(wt.%) 三种合金燃料粉末, 其中 Li 的水反应活性很高, Eu 是一种高活性的稀土元素。然后使用高压反应釜实时监测不同合金粉末水反应的环境温度和压强, 并根据反应启动温度、反应时间、产气量与产氢效率综合评价其水反应活性和性能, 并对反应产物进行了表征。

2. 实验部分

2.1. 试剂与仪器

所用原材料包括 Al 锭(99.9%纯)、Mg 锭(99.9%纯), Li 锭(99.9%纯)与 Eu 锭(99.9%纯), 均购自徐州华中铝业公司。合金燃料粉末通过高温气雾化法制备, 雾化介质为高纯氩气, 雾化压力 5 MPa。所用单质 Al 粉购自江苏威拉里新材料科技有限公司。所有粉末均过 325 目筛(<45 μm)。

2.2. 实验过程

使用场发射扫描电子显微镜(SEM, Nova NanoSEM 450)表征合金粉末及水反应产物的表面形貌。使用带有 $\text{Cu K}\alpha$ 射线的 X 射线衍射仪(XRD, PANalytical B.V.)表征合金粉末及水反应产物的物相组成, 衍射角范围是 $10^\circ\sim 90^\circ$ 。

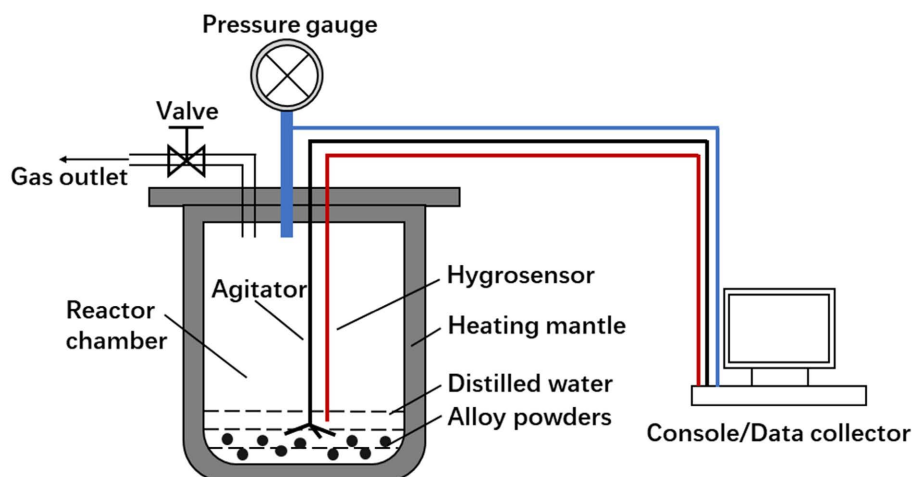


Figure 1. Diagram of high pressure reactor equipment

图 1. 高压反应釜设备示意图

为了研究不同种类合金粉末高温高压条件下的水反应特性, 使用高压反应釜进行水反应实验。图 1 为高压反应釜设备示意图。具体实验步骤如下: 使用高精度电子天平准确称量一定质量的合金粉末样品, 并置于反应釜中, 使用移液枪准确量取 30 mL 蒸馏水(过量)并加入反应釜中, 蒸馏水与样品物质的量之比为 10:1。将反应釜盖子拧紧, 气阀关闭, 以保证气密性。启动设备电源, 设置炉温为 500°C , 搅拌速率为 500 r/min, 开始加热和搅拌。加热炉温度升高的同时将热量传递给内部的反应釜, 该设备可以自动监测整个反应过程中的加热炉温度、反应釜温度和反应釜压强。反应结束后停止加热和搅拌, 待反应釜冷却至室温后将其打开并收集反应产物, 并对设备记录的温度、压强数据进行处理和分析。为了排除反应釜内过量水对体系温度及压强的影响, 设计了一个空白对照组, 即在反应釜中只加入 30 mL 蒸馏水, 在同样参数下进行实验, 并将此空白实验与水反应实验进行比较。

3. 结果与讨论

3.1. Al 基合金粉末的物相组成与表面形貌

高温雾化法制备的三种合金粉末的 XRD 图谱如图 2 所示。Al-40Mg 合金粉末由 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 两种物相组成, 这符合 Al-Mg 二元合金相图的规律。Al-37Mg-3Li 和 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的衍射峰均分别对应 Al_3Mg_2 和 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 两种物相, 没有检测到明显的含 Li 或 Eu 的物相, 这是由于 Li 元素和 Eu 元素的含量太低, 低于 XRD 设备的监测下限。

Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的 SEM 照片显示在图 3 中。显然, 三种合金粉末颗粒的球形度很高, 表面非常光滑, 并且分散性良好, 没有明显的团聚, 表明这三种合金粉末具有良好的流动性。图 4 为 Al-37Mg-3Eu 合金粉末单颗粒的 SEM 照片及 EDS 面扫描结果。从图中可以看出, Al-37Mg-3Eu 合金粉末颗粒表面均匀分布着 Al、Mg、Eu 三种元素, 其中 Al、Mg 的含量较高, Eu 含量偏低, 采用雾化法所制备的合金粉末中三种金属元素熔合得较好。

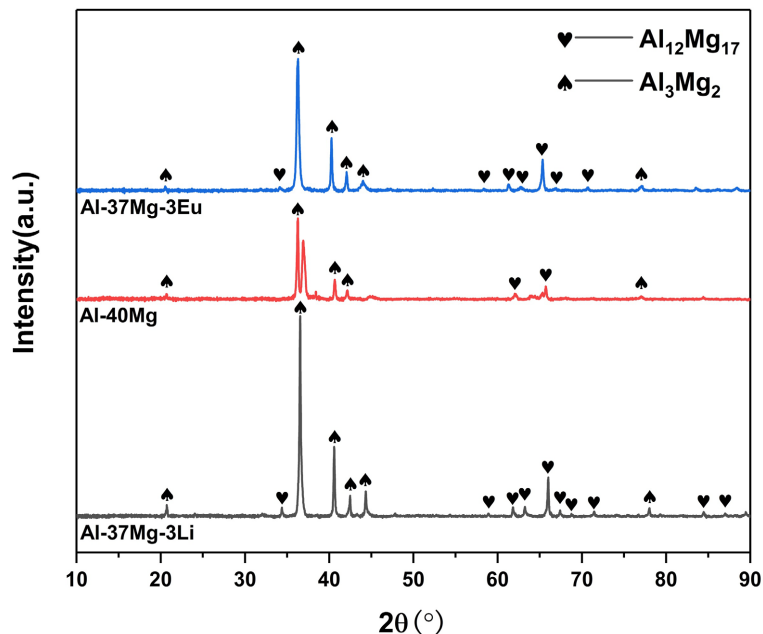


Figure 2. XRD patterns of Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu alloy powders
图 2. Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的 XRD 图谱

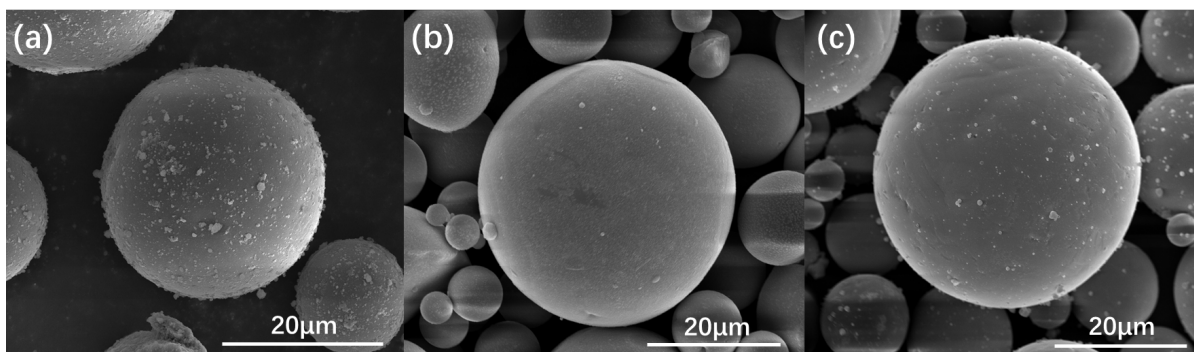
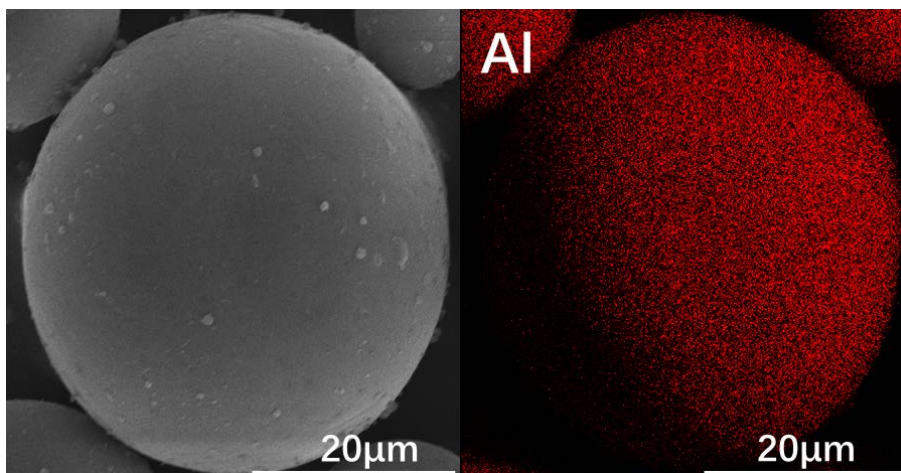


Figure 3. SEM images of Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu alloy powders: (a) Al-40Mg, (b) Al-37Mg-3Li, (c) Al-37Mg-3Eu

图 3. Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的 SEM 照片: (a) Al-40Mg, (b) Al-37Mg-3Li, (c) Al-37Mg-3Eu



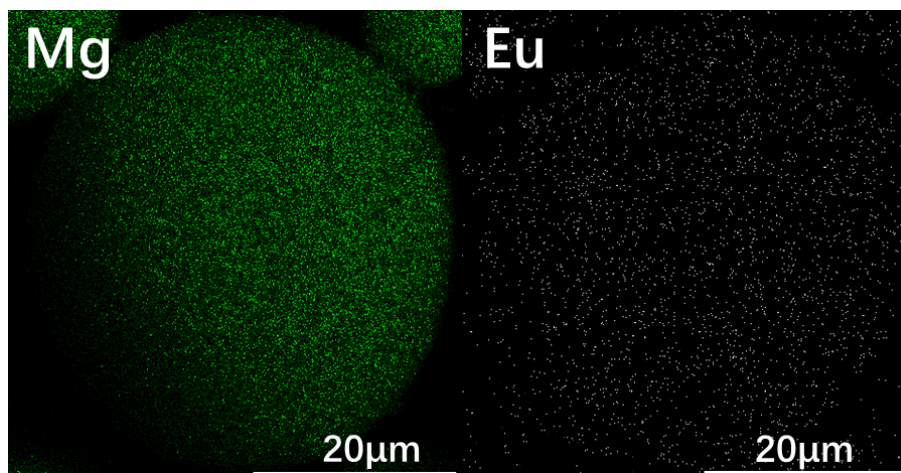


Figure 4. SEM image and EDS scanning results of single particle Al-37Mg-3Eu alloy powder
图 4. Al-37Mg-3Eu 合金粉末单颗粒的 SEM 照片及 EDS 面扫描结果

3.2. Al 基合金粉末的水反应性能

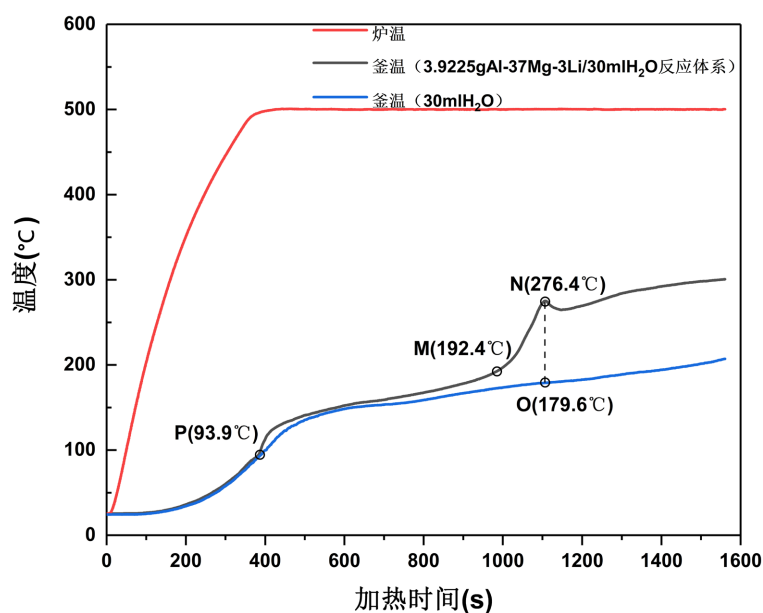


Figure 5. Temperature-time curve of reaction of Al-37Mg-3Li alloy powder with water

图 5. Al-37Mg-3Li 合金粉末与水反应的温度 - 时间曲线

图 5 是 Al-37Mg-3Li 与水反应的温度 - 时间曲线。图中红色曲线是加热炉的温度变化曲线，加热炉的温度快速升高达到设定值后，其温度便保持恒定；黑色曲线是反应釜的温度变化曲线，即表示了水反应体系的温度变化；蓝色曲线是相同条件下，仅在反应釜中加入蒸馏水时的反应釜温度变化曲线(也即空白对照组)。将 Al-37Mg-3Li/H₂O 反应体系的温度变化趋势与空白对照组的温度变化趋势进行对比，分析水反应体系的反应过程和热量变化。

图 5 显示，第一阶段是 P 点之前，Al-37Mg-3Li/H₂O 的 T-t 曲线与 H₂O 的 T-t 曲线基本吻合，此时反应还未进行。第二阶段从 P 点开始，Al-37Mg-3Li/H₂O 的 T-t 曲线开始偏移 H₂O 的 T-t 曲线，此时反应开始进

行, 反应放热使温度升高; 反应进行到 M 点时, 温度开始急剧升高, 此时 Al-37Mg-3Li 与 H₂O 的反应剧烈进行, 直至 N 点, 温度达到一个峰值, 随后温度变化平缓, 与空白组的温度变化趋势相近, 说明在 N 点之后反应体系没有贡献出额外的放热量, N 点处反应基本结束。第三阶段即为 N 点以后, 反应结束。

从图 5 的水反应 T-t 曲线上可以提取出 3 个重要的特征参数:

- 1) 反应起始温度: 图 5 中的 P 点, 93.9°C。在该温度点处, 反应开始启动。对金属/水反应体系而言, 反应起始温度越低越有利。
- 2) 反应时间: 图 5 中的 N 点与 P 点所间隔的时间即为反应时间。反应时间越短, 则反应放热越集中, 金属/水反应活性越强。
- 3) 反应放热量: 当水反应体系处于温度峰值 N 点时, 此时, 蒸馏水对照组的温度点为 O 点, 而 N 点之后反应结束, 因此 $|T_N - T_O|(\Delta T)$ 可以表示反应放热量对温度升高的贡献, ΔT 越大, 则反应放热量越大。

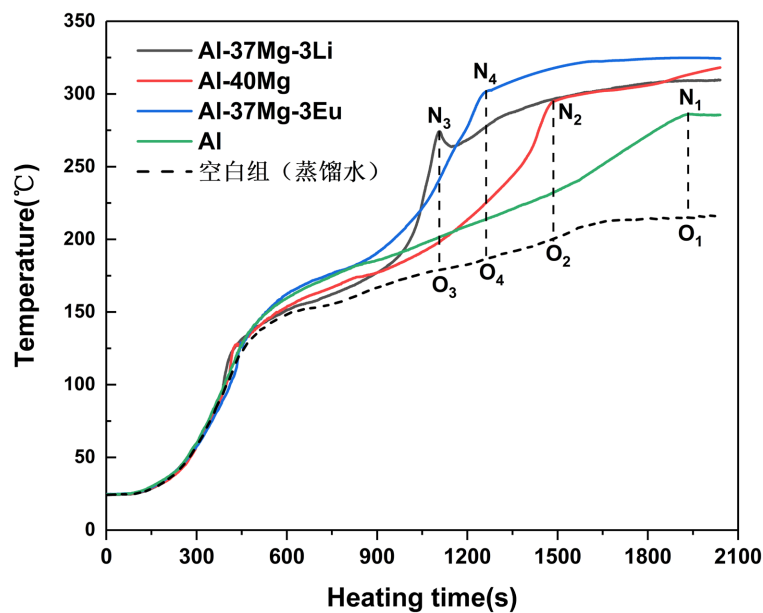


Figure 6. Temperature-time curve of water reaction of Al, Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu powders

图 6. Al、Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 粉末的水反应温度 - 时间曲线

图 6 是在同一水燃比(10:1)、相同量的蒸馏水(30 mL)条件下, Al、Al-37Mg-3Li、Al-40Mg 与 Al-44Mg-1Eu 四种粉末样品与水反应的温度 - 时间曲线。提取四种粉末的水反应启动温度、反应时间、反应温升 ΔT 等反应特征参数, 结果列于表 1。

Table 1. Water reaction characteristic parameters of Al, Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu powders

表 1. Al、Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 粉末的水反应特征参数

粉末类型	反应起始温度/°C	反应时间/s	反应结束时温升 ΔT /°C
Al	119.3	1512.8	70.9
Al-40Mg	101.3	1074	91.9
Al-37Mg-3Li	93.9	725.6	96.8
Al-37Mg-3Eu	100.1	834.9	106.8

由表 1 可知, 四种粉末中水反应启动温度最低的是 Al-37Mg-3Li, ΔT 最大的是 Al-37Mg-3Eu, 并且这两种合金粉末的水反应时间都较短。与单质 Al 粉相比, Al-40Mg 的水反应的启动温度降低, 反应时间也极大缩短, Mg 的加入有利于提高合金粉末的水反应活性。Al-37Mg-3Li 比 Al-40Mg 的反应启动温度提前了很多, 且反应时间进一步缩短, 反应也导致了更大的温度升高, 这说明活泼金属 Li 的加入有利于实现更集中地放热。Al-37Mg-3Eu 的反应时间也比 Al-40Mg 的反应时间缩短, 其反应温升相比于 Al-40Mg 也有了很大的提升, Eu 的加入也促进了水反应的进行。

为了计算 Al、Al-40Mg、Al-37Mg-3Li、Al-37Mg-3Eu 粉末与 H_2O 反应的产氢量, 水反应结束后将反应釜停止加热并冷却至室温, 记录室温下反应釜的压强数据, 并通过范德瓦尔斯方程计算产氢量和产氢效率。四种粉末的产氢量和产氢效率汇总在表 2 中。由表 2 可知, Al 粉的产氢效率为 80.17%, 而三种合金粉末的产氢效率都超过了 90%。值得一提的是, Al-37Mg-3Li 和 Al-37Mg-3Eu 这两种三元合金粉末的产氢效率比 Al-40Mg 二元合金粉末的产氢效率更高。

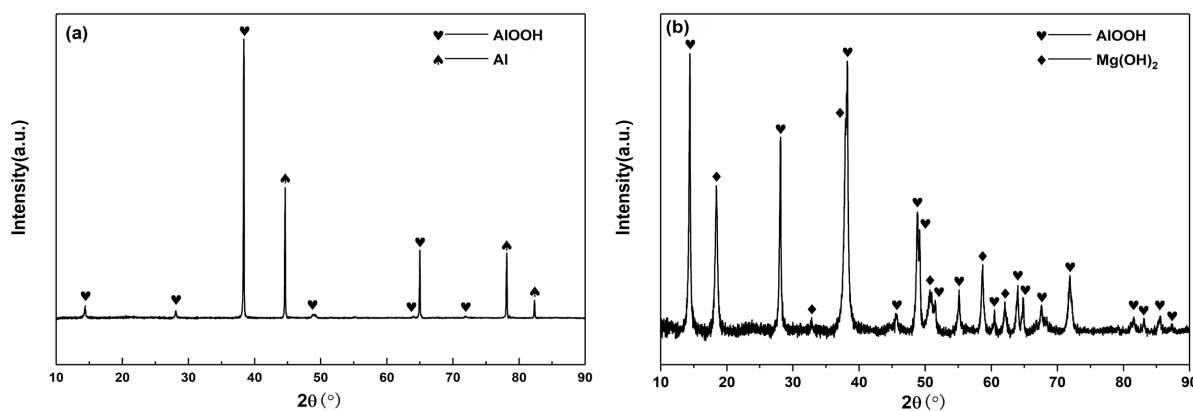
Table 2. Hydrogen production and hydrogen production efficiency of Al, Al-40Mg, Al-37Mg-3Li and Al-37Mg-3Eu powders reacting with water

表 2. Al、Al-40Mg、Al-37Mg-3Li、Al-37Mg-3Eu 粉末与水反应的产氢量和产氢效率

粉末类型	实际产氢量/mol	理论产氢量/mol	产氢效率
Al	0.1925	0.2401	80.17%
Al-40Mg	0.1877	0.1990	94.32%
Al-37Mg-3Li	0.1916	0.2045	93.69%
Al-37Mg-3Eu	0.1991	0.2104	94.63%

3.3. Al 基合金粉末的水反应产物

图 7 是 Al、Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 四种粉末水反应产物的 XRD 图谱。由图可知, Al 粉与 H_2O 的反应不完全, 反应产物由 AlOOH 和残余 Al 组成。而 Al-40Mg、Al-37Mg-3Li、Al-37Mg-3Eu 与 H_2O 的反应都比较完全: Al-40Mg 与 H_2O 反应的产物为 AlOOH 和 $Mg(OH)_2$, 没有残余的 Al、Mg 或 Al-Mg 中间相化合物; Al-37Mg-3Li 与 H_2O 反应后得到 AlOOH、 $Mg(OH)_2$ 和 $LiAl_2(OH)_7$, 反应完全; Al-37Mg-3Eu 的水反应产物为 AlOOH 和 $Mg(OH)_2$, Al_3Mg_2 和 $Al_{12}Mg_{17}$ 已经与 H_2O 反应完全, 在产物中没有检测到 Eu 元素, 可能是因为反应产生的 $Eu(OH)_3$ 单独存在, $Eu(OH)_3$ 太少而没有检测到。结果表明, 在 Al 中添加 Mg 形成 Al-Mg 合金和 Al-Mg 基合金后, 合金粉末与水反应的反应进行得更彻底, 反应完成程度更高。



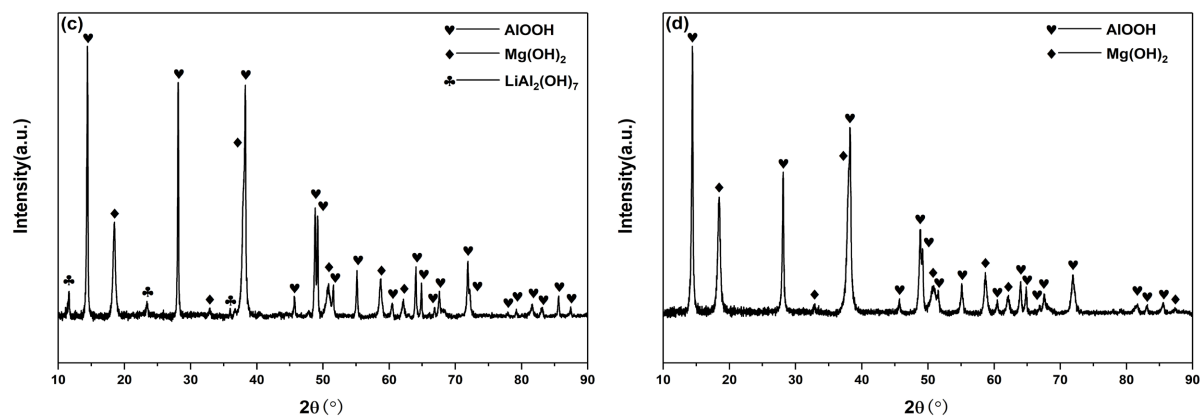


Figure 7. XRD patterns of the reaction products of four powders with water: (a) Al, (b) Al-40Mg, (c) Al-37Mg-3Li, (d) Al-37Mg-3Eu

图 7. 四种粉末水反应产物的 XRD 图谱: (a) Al、(b) Al-40Mg、(c) Al-37Mg-3Li、(d) Al-37Mg-3Eu

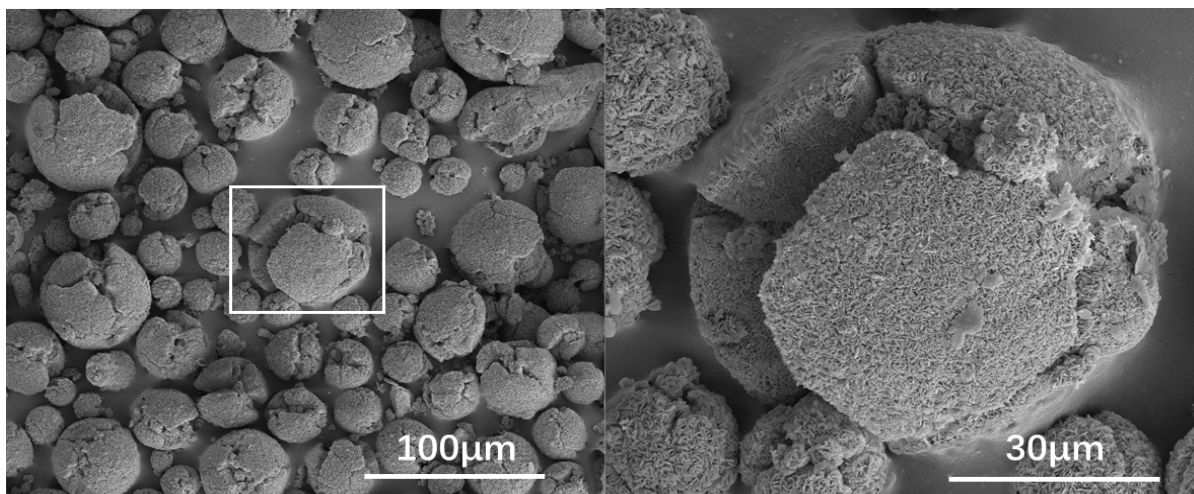


Figure 8. SEM images of reaction product of Al-40Mg with water

图 8. Al-40Mg 水反应产物的 SEM 照片

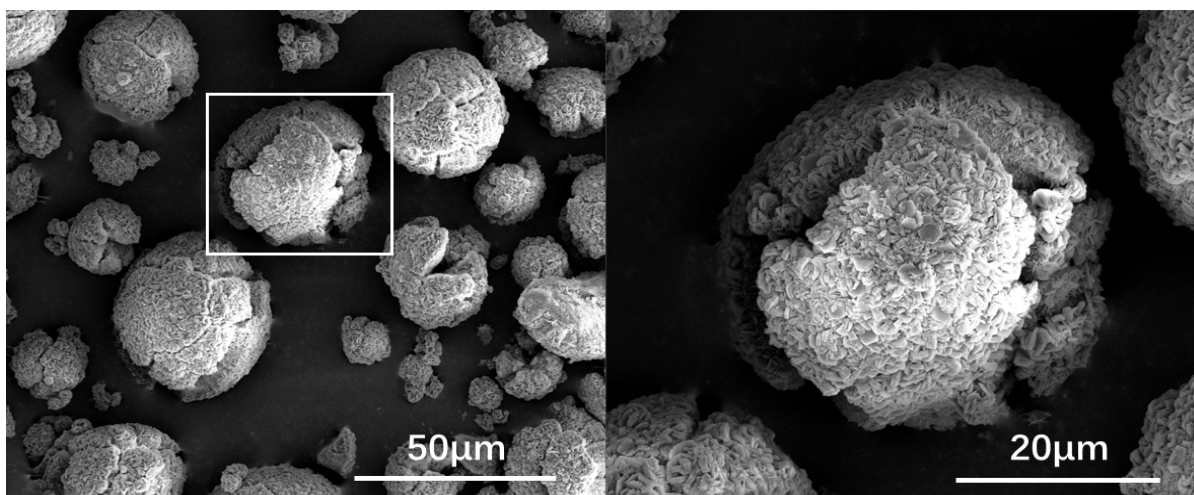


Figure 9. SEM images of reaction product of Al-37Mg-3Eu with water

图 9. Al-37Mg-3Eu 水反应产物的 SEM 照片

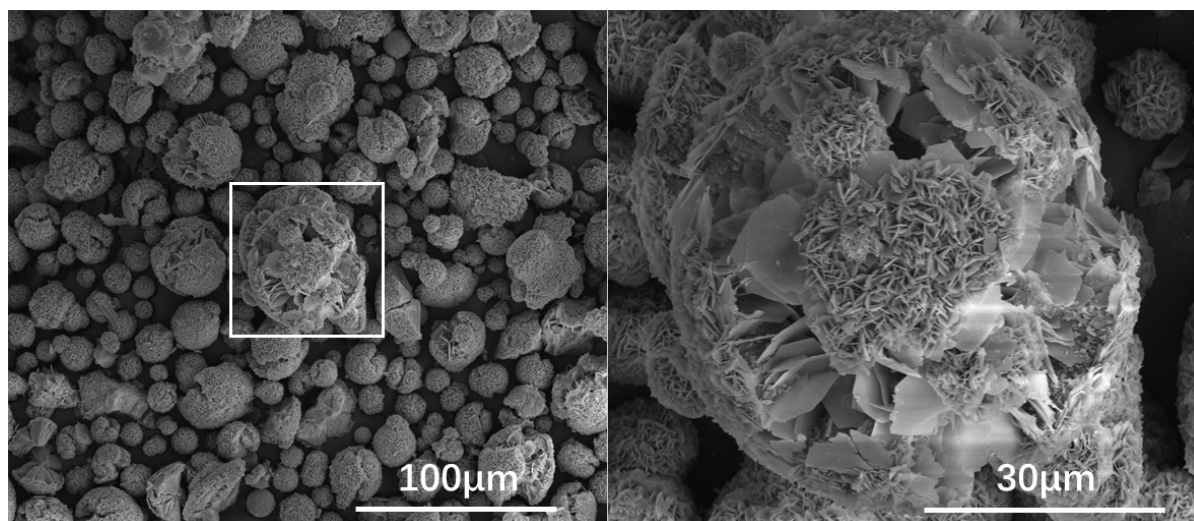


Figure 10. SEM images of reaction product of Al-37Mg-3Li with water
图 10. Al-37Mg-3Li 水反应产物的 SEM 照片

为了进一步分析高镁含量的铝基合金粉末与水反应的过程和机理, 对水反应产物进行 SEM 表征。图 8 是 Al-40Mg 与 H_2O 反应结束后产物的 SEM 图, 球形颗粒破裂, 表面产生了大而深的裂纹, 且表面有大量米粒状的纳米结构。图 9 是 Al-37Mg-3Eu 水反应产物的 SEM 照片, 颗粒表面都出现了极深的裂纹, 且部分颗粒内部产生了空洞, 部分颗粒的球形结构只剩下残留的一小半, 还能观察到一些小碎屑。图 10 是 Al-37Mg-3Li 水反应产物的 SEM 照片。图 10 显示, 产物颗粒表面出现了米粒状结构和薄片状结构, 并且存在孔洞和深裂纹, 其颗粒破碎的程度比 Al-40Mg 破碎的程度更深。通过对比可知, Al-40Mg、Al-37Mg-3Li、Al-37Mg-3Eu 合金粉末水反应产物破碎程度递增, 亦表明其水反应完全程度增加。

4. 结论

1. 使用高温气雾化法分别制备了 Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 三种合金粉末。三种合金粉末均由 Al_3Mg_2 和 $Al_{12}Mg_{17}$ 两种物相组成, 粉末颗粒具有良好的球形度, 表面光滑, 无明显团聚。

2. 水反应实验、水反应产物的表征结果均表明, Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的水反应性能均优于 Al 粉。Li 能够降低合金粉末与水的反应启动温度, 使放热更集中, Eu 也能够促进水反应的进行。Al 粉的产氢效率为 80.17%, Al-40Mg、Al-37Mg-3Li 与 Al-37Mg-3Eu 合金粉末的产氢效率分别提升至 93.69%、94.32% 与 94.63%。

致 谢

感谢华中科技大学分析测试中心的指导和帮助。

基金项目

国家自然科学基金资助(51871106)。

参考文献

- [1] Elitzur, S., Rosenband, V. and Gany, A. (2014) Study of Hydrogen Production and Storage Based on Aluminum-Water Reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 6328-6334. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.037>
- [2] Yavor, Y., et al. (2013) Enhanced Hydrogen Generation from Aluminum-Water Reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 14992-15002. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.070>

- [3] Chen, X., *et al.* (2013) Hydrogen Generation by Splitting Water with Al-Li Alloys. *International Journal of Energy Research*, **37**, 1624-1634. <https://doi.org/10.1002/er.2978>
- [4] Chen, X., *et al.* (2013) Research of Hydrogen Generation by the Reaction of Al-Based Materials with Water. *Journal of Power Sources*, **222**, 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.078>
- [5] Wang, H.Z., *et al.* (2009) A Review on Hydrogen Production Using Aluminum and Aluminum Alloys. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 845-853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.009>
- [6] Soler, L., *et al.* (2007) Aluminum and Aluminum Alloys as Sources of Hydrogen for Fuel Cell Applications. *Journal of Power Sources*, **169**, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.01.080>
- [7] Shkolnikov, E.I., Zhuk, A.Z. and Vlaskin, M.S. (2011) Aluminum as Energy Carrier: Feasibility Analysis and Current Technologies Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4611-4623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.091>
- [8] Martínez-Salazar, A.L., *et al.* (2020) Hydrogen Generation by Aluminum Alloy Corrosion in Aqueous Acid Solutions Promoted by Nanometal: Kinetics Study. *Renewable Energy*, **146**, 2517-2523. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.103>
- [9] Wollmark, S. and Yavor, Y. (2019) Burning Rates of Nanoaluminum-Water Solid Propellants at Various Pressures. *Journal of Propulsion and Power*, **35**, 173-181. <https://doi.org/10.2514/1.B37098>
- [10] Bergthorson, J.M., *et al.* (2017) Metal-Water Combustion for Clean Propulsion and Power Generation. *Applied Energy*, **186**, 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.033>
- [11] Huang, H.T., *et al.* (2013) Analysis of the Aluminum Reaction Efficiency in a Hydro-Reactive Fuel Propellant Used for a Water Ramjet. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **49**, 541-547. <https://doi.org/10.1134/S0010508213050055>
- [12] Ingenito, A. and Bruno, C. (2004) Using Aluminum for Space Propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, **20**, 1056-1063. <https://doi.org/10.2514/1.5132>
- [13] Deng, Z.-Y., *et al.* (2010) Effect of Different Modification Agents on Hydrogen-Generation by the Reaction of Al with Water. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 9561-9568. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.027>
- [14] Schoenitz, M., Chen, C.-M. and Dreizin, E.L. (2009) Oxidation of Aluminum Particles in the Presence of Water. *The Journal of Physical Chemistry B*, **113**, 5136-5140. <https://doi.org/10.1021/jp807801m>
- [15] Risha, G.A., *et al.* (2006) Combustion of Aluminum Particles with Steam and Liquid Water. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reno, 9-12 January 2006, 14007-14014.
- [16] Dupiano, P., Stamatis, D. and Dreizin, E.L. (2011) Hydrogen Production by Reacting Water with Mechanically Milled Composite Aluminum-Metal Oxide Powders. *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 4781-4791. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.062>
- [17] Wan, J., *et al.* (2012) Reaction Characteristics of Nano-Aluminum and Water by *In-Situ* Investigation. *Materials Chemistry and Physics*, **136**, 466-471. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.07.012>
- [18] Yavor, Y., *et al.* (2015) Comparative Reactivity of Industrial Metal Powders with Water for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 1026-1036. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.075>
- [19] Meng, A., *et al.* (2023) Hydrogen Production Performance of an Al-Ga-In-Sn Quaternary Alloy. *Materials Today Sustainability*, **21**, Article ID: 100284. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100284>
- [20] Aleksandrov, Y.A., Tsyganova, E.I. and Pisarev, A.L. (2003) Reaction of Aluminum with Dilute Aqueous NaOH Solutions. *Russian Journal of General Chemistry*, **73**, 729-734. <https://doi.org/10.1023/A:1026114331597>
- [21] Huang, X.-N., *et al.* (2012) Hydrogen Generation from Hydrolysis of Aluminum/Graphite Composites with a Core-Shell Structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 7457-7463. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.126>
- [22] Deng, Z.-Y., *et al.* (2005) Modification of Al Particle Surfaces by Gamma-Al₂O₃ and Its Effect on the Corrosion Behavior of Al. *Journal of the American Ceramic Society*, **88**, 977-979. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00154.x>
- [23] Fan, M., Xu, F. and Sun, L. (2007) Studies on Hydrogen Generation Characteristics of Hydrolysis of the Ball Milling Al-Based Materials in Pure Water. *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 2809-2815. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.12.020>
- [24] Xiao, F., Yang, R. and Liu, Z. (2022) Active Aluminum Composites and Their Hydrogen Generation via Hydrolysis Reaction: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 365-386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.241>
- [25] Uda, M., *et al.* (2012) Hydrogen Generation from Water Using Mg Nanopowder Produced by Arc Plasma Method. *Science and Technology of Advanced Materials*, **13**, Article ID: 025009. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/13/2/025009>

-
- [26] Liu, Y., *et al.* (2013) Hydrogen Generation from the Hydrolysis of Mg Powder Ball-Milled with AlCl_3 . *Energy*, **53**, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.073>
- [27] Zou, M.-S., *et al.* (2011) The Preparation of Mg-Based Hydro-Reactive Materials and Their Reactive Properties in Seawater. *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 6478-6483. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.108>
- [28] Ouyang, L.Z., *et al.* (2009) Production of Hydrogen via Hydrolysis of Hydrides in Mg-La System. *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 9671-9676. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.068>
- [29] Grosjean, M., *et al.* (2006) Hydrogen Production via Hydrolysis Reaction from Ball-Milled Mg-Based Materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, **31**, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.01.001>
- [30] Miller, T.F. and Herr, J.D. (2004) Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Fort Lauderdale, 11-14 July 2004, 1. <https://doi.org/10.2514/6.2004-4037>
- [31] Zou, M.-S., *et al.* (2012) Preparation and Characterization of Hydro-Reactive Mg-Al Mechanical Alloy Materials for Hydrogen Production in Seawater. *Journal of Power Sources*, **219**, 60-64. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.008>
- [32] Kozin, L.F., *et al.* (2011) Kinetics and Mechanism of Interaction of Aluminum and Magnesium of Al-Mg-Bi Ternary System with Water. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **47**, 171-180. <https://doi.org/10.1134/S2070205111020110>
- [33] Yang, W., *et al.* (2015) Experimental Study on the Effect of Low Melting Point Metal Additives on Hydrogen Production in the Aluminum-Water Reaction. *Energy*, **88**, 537-543. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.069>