

自组装铝/氧化铜和铝/氧化铁及其性能评估

王晓倩 张 琳* 朱顺官 赵 佳

(南京理工大学化工学院, 南京 210094)

摘要: 本文分别采用模板法制备氧化铜纳米花, 水热法制备氧化铁纳米环, 并自组装制备了铝/氧化铜和铝/氧化铁 2 种铝热剂。自组装增大了异相材料之间的接触, 分别使得铝/氧化铜的反应放热量和压力由 $523 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1\,858 \text{ kPa}$ 增加至 $1\,069 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $4\,389 \text{ kPa}$; 铝/氧化铁的反应放热量和压力由 $1\,448 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 749 kPa 增加至 $2\,039 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $2\,280 \text{ kPa}$ 。两种铝热剂的放热量和压力差别较大, 且铝/氧化铜的静电感度高于大多数含能材料, 铝/氧化铁的撞击感度特别低, 显示出不同的应用特点。

关键词: 铝热剂; 放热量; $p-t$ 曲线; 感度

中图分类号: TB383.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2013)09-1799-06

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4861.2013.00.228

Preparation and Performance of Self-assembled Al/Fe₂O₃ and Al/CuO

WANG Xiao-Qian ZHANG Lin* ZHU Shun-Guan ZHAO Jia

(Chemical Engineering Institute, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Copper oxide nanoflower and iron oxide nanoring were prepared by membrane templating and hydrothermal, respectively. Copper oxide nanoflower and aluminum composite were self-assembled, so did iron oxide nanoring and aluminum. The connection between different materials were enhanced by self-assembly. The heat release and pressure of copper oxide nanoflower and aluminum were increased from $523 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, $1\,858 \text{ kPa}$ to $1\,069 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, $4\,389 \text{ kPa}$. Iron oxide nanoring and aluminum were increased from $1\,448 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 749 kPa to $2\,039 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, $2\,280 \text{ kPa}$. There are great difference between the two thermit, and the static-electric sensitivity of copper oxide nanoflower and aluminum is higher than that of most energetic materials, while the impact sensitivity of iron oxide nanoring and aluminum is lower. Thus different thermit can be used in different fields based on their performance.

Key words: thermit; heat release; $p-t$ curve; sensitivity

纳米金属与纳米金属或非金属氧化物组成的超级铝热剂或者亚稳态复合粒子 MIC (Metastable Intermolecular Composite)^[1], 是一种新型的含能材料^[2], 可以用作微小火工系统的点火药^[3]、推进剂和炸药中的添加剂^[4-6]。MIC 具有燃烧速度快, 保证燃烧可靠和稳定, 降低传热传质过程对燃烧性能的影响等优势^[7-11]。

文献中制备 MIC 的方法有很多, 包括溶胶-凝

胶法^[12-17], 粉末混合^[18-19], 自组装^[20-22], 气相沉积^[3,23-24]等。其中溶胶-凝胶法不易制备纳米氧化物且无法克服粉体团聚, 从而限制其应用^[3,25]; 粉末混合只是简单的物理混合, 材料团聚现象严重^[23,26]; 气相沉积法中能适用的材料有限^[24]。而自组装作为一种新的方法, 使得可燃物粒子有序的排列在氧化物周围, 能够在分子水平操控高能物质和定制具有特定物理和化学性质的 MIC^[3], 从而使得复合物达到最大

收稿日期: 2013-01-11。收修改稿日期: 2013-03-17。

国家自然科学基金(No.61106078); 南京理工大学自主科研重大研究计划(No.2011ZDJH28)资助项目。

*通讯联系人。E-mail: zhangl@mail.njust.edu.cn

能量释放效率和最大的能量密度。

目前关于 MIC 制备及性能方面的报道,大多针对一种铝热剂的制备或者性能研究。Cheng 等利用自组装法制得 $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, 铝粉大多环绕氧化铁, 密闭体系中反应的最大压力为 180 kPa^[27]。王毅等利用溶胶-凝胶法得到了 $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 纳米复合铝热剂, $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的热反应放热峰分别出现在 561.8 °C 和 773.2 °C, 总放热量达到 $1\,648\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[28]。

本文采用自组装方式制备铝/氧化铜纳米花、铝/氧化铁纳米环两种铝热剂。并重点评估了两种铝热剂的性能。实验发现两种铝热剂的放热量、p-t 曲线和感度差别很大。因此其应用范围也应有所区别。而组装使得可燃物与氧化物之间的有效接触增大, 反应更加完全。本研究将为不同应用背景的铝热剂选择提供参考。

1 实验部分

1.1 自组装合成铝/氧化铜纳米花复合物

1 g $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.6 g NaOH 分别在 5.3 mL PEG-400 和 2.7 mL 蒸馏水组成的混合液中超声 20 min, 之后混合并加入 40 mL 乙醇继续超声 30 min, 离心得到沉淀, 利用蒸馏水及无水乙醇反复洗涤离心, 产物在 95 °C 下干燥 12 h, 研磨, 400 °C 下煅烧 6 h 得到氧化铜纳米花。

0.5 g 氧化铜纳米花在 500 mL 溶有 0.5 g P4VP (4-乙烯吡啶均聚物) 的异丙醇中超声 4 h, 离心分离。为了包覆完全, 产物在 200 mL 异丙醇中继续超声 2 h, 再离心, 120 °C 下干燥 1.5 h 得到包覆有 P4VP 的氧化铜纳米花。0.4 g 由 P4VP 包覆的这种氧化铜纳米花与 0.127 g 纳米铝在 1.5 mL 的异丙醇中混合并超声 1 h, 异丙醇稀释后离心, 在 95 °C 下干燥 10 min, 得到复合物。

1.2 自组装合成铝/氧化铁纳米环复合物

基于我们已有的技术基础, 利用水热法制得氧化铁纳米环^[29]。再将 0.12 g 氧化铁纳米环置于 200 mL 溶有 0.2 g P4VP 的异丙醇中超声 4 h, 离心得到被包覆的氧化铁, 65 °C 下干燥 12 h。在 0.1 g 被包覆的氧化铁纳米环和 0.045 g 纳米铝粉的混合物中加入 1.5 mL 的异丙醇并超声 1 h。用丙醇稀释后离心, 在 65 °C 下干燥 12 h 获得复合物。

1.3 形貌及性能表征

D8 Advance 型 X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker 公司, Cu 靶, $\lambda=0.154\,06\text{ nm}$, 扫描速率 $4^\circ\cdot$

min^{-1} , 步长 0.02° , 扫描范围 2θ 为 $20^\circ\sim 80^\circ$), Quanta FEG 250 型场发射扫描电子显微镜 (FESEM, FEI 公司), NETZSCH STA 449 C 型 DSC-TG 联用 ($20\sim 500^\circ\text{C}$ 和 $20\sim 1\,000^\circ\text{C}$, $10^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率, Ar 吹扫)。

2 结果与讨论

2.1 自组装合成铝/氧化铜纳米花复合物的表征

为了了解所得氧化铜的结晶状况和形貌, 及复合物中产物的组成和形貌, 采用 X 射线衍射分析及扫描电镜分析。

从图 1 氧化铜纳米花的 XRD 可以看到 2θ 为 35.47° 、 38.89° 、 48.83° 、 53.47° 、 58.39° 、 61.39° 、 66.16° 、 68.07° 对应于标准卡片库中的单晶黑铜矿, 并且几乎没有杂质。自组装铝/氧化铜纳米花的 XRD 图中不仅有氧化铜纳米花的衍射峰, 在 44.74° 、 65.20° 、 78.31° 处也有 Al 的衍射峰 (由于氧化铜的衍射峰比较强, Al 在 38.50° 的衍射峰与氧化铜在 38.89° 的衍射峰重叠)。由此可知自组装后的产物为氧化铜与铝的复合物。从图 2 的氧化铜纳米花的 SEM 图中可以看到, 所得产物为球状颗粒堆叠而成的花, 每个球大小均匀。堆叠的纳米花粒径大约 180 nm, 每个小球的粒径在 80~90 nm 左右。

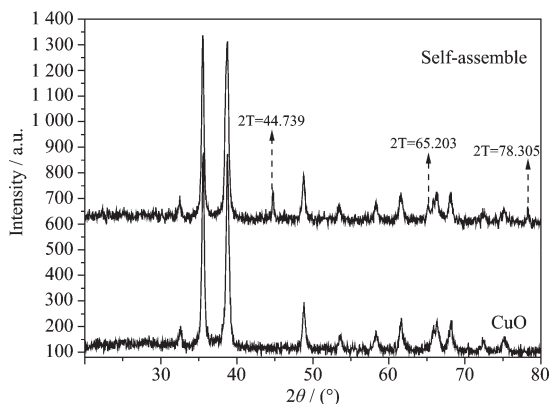


图1 氧化铜纳米花和自组装铝/氧化铜纳米花的 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of copper oxide nanoflower and self-assembled aluminum and copper oxide nanoflower

由 1.1 可知, 在组装过程中, 氧化铜纳米花在溶有 P4VP 的异丙醇中超声包覆。为了解最终所得氧化铜纳米花表面 P4VP 的包覆量, 对包覆有 P4VP 的氧化铜纳米花进行热重分析, 结果如图 3。从图中可以看到 P4VP 在 320 °C 左右开始失重, 整个过程中失重大约是 3.53%, 说明包覆有 P4VP 的氧化铜

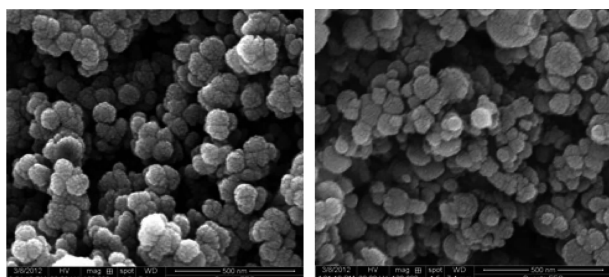


图2 氧化铜纳米花和自组装铝/氧化铜纳米花的SEM图

Fig.2 SEM images of copper oxide nanoflower and self-assembled aluminum and copper oxide nanoflower

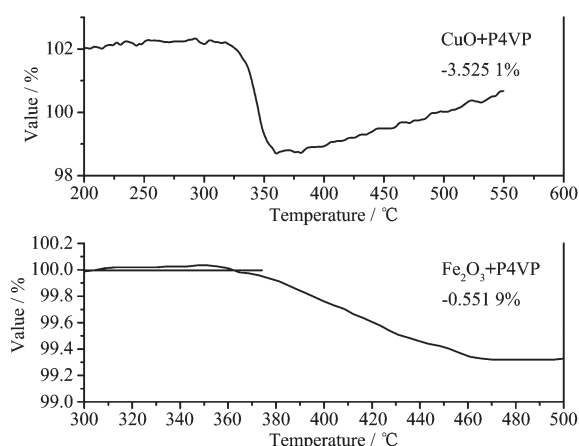


图3 覆盖有P4VP的氧化铁纳米环与氧化铜纳米花的TG图

Fig.3 Thermogravimetric curves of P4VP coated copper oxide nanoflower and iron oxide nanoring

纳米花中约有3.53%的P4VP。从图2中自组装铝/氧化铜纳米花的SEM图可以看到纳米花的表面散落了許多球狀顆粒,組裝過程中使用的納米鋁粉平均粒徑為50 nm,由此可知這些大小不均的球狀顆粒為納米鋁粉。由於P4VP的粘結作用使得氧化銅納米花的表面由納米鋁粉包圍,從而增加了氧化物與可燃物之間的有效接觸^[30]。

2.2 自組裝合成鋁/氧化鐵納米環複合物的表征

為了解所得氧化鐵的結晶狀況和形貌,以及複合物中產物的組成和形貌,採用X射線衍射分析及掃描電鏡分析。

水熱法所得氧化鐵納米環為 α - Fe_2O_3 , 外徑為200~240 nm, 內徑為90~120 nm, 高度為120~150 nm^[29]。圖4中組裝後的XRD圖不僅有 α - Fe_2O_3 的衍射峰, 並在38.496°、44.744°、65.203°、78.335°也有Al的衍射峰, 由此可知組裝後的產物為氧化鐵與鋁的複合物。

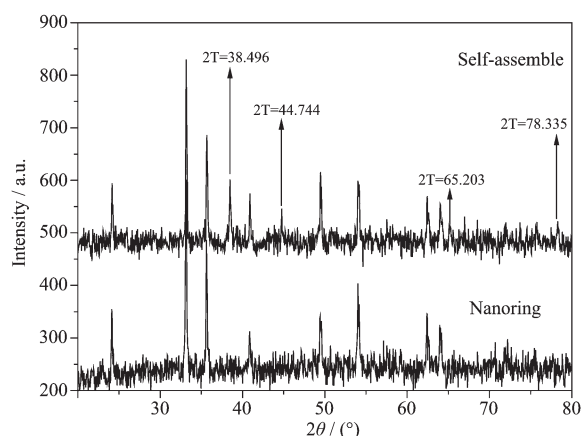


图4 氧化铁纳米环和自组装铝/氧化铁纳米环的XRD图

Fig.4 XRD patterns of iron oxide nanoring and self-assembled aluminum and iron oxide nanoring

由1.2的組裝過程可知, 氧化鐵納米環在混有P4VP的異丙醇中超聲包覆, 為了解P4VP在氧化鐵納米環上的包覆量, 對包覆有P4VP的氧化鐵納米環進行熱重分析, 結果如圖3。從圖中可以看到包覆有P4VP的氧化鐵納米環在360℃左右開始失重, 在470℃之後重量恒定。在整個加熱過程大約失重0.55%, 即在包覆有P4VP的氧化鐵納米環中大約有0.55%的P4VP。由於在組裝中採用的納米鋁粉平均粒徑為50 nm, 環的內徑又大於50 nm, 從圖5自組裝鋁/氧化鐵納米環的SEM圖可以看到, 部分環被納米鋁粉裝填, 環的周圍又有納米鋁粉環繞。這種圍繞和裝填使得氧化鐵、鋁之間的接觸面積增大, 使得反應作用更加完全。

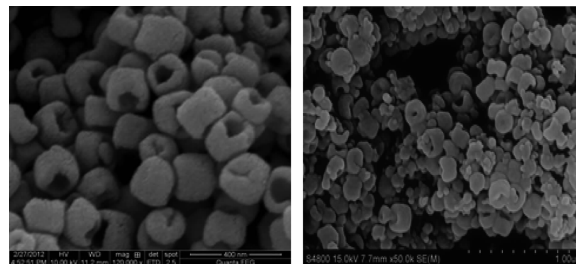


图5 氧化铁纳米环和自组装铝/氧化铁纳米环的SEM图

Fig.5 SEM images of iron oxide nanoring and self-assembled aluminum and iron oxide nanoring

2.3 放热量

放热量是评估含能材料性能的重要指标。为了解不同铝热剂及组合方式对放热量的影响, 分别对比粉末混合和自组装下铝/氧化铜, 铝/氧化铁在Ar氛围下以20℃·min⁻¹的升温速度加热的差热分析。

结果如图 6。其中粉末混合的铝/氧化铜在 577.9 °C 有 1 个放热峰, 对应于铝/氧化铜的铝热反应放热, 820.2 °C 有 1 个弱的吸热峰对应于氧化铜的高温分解。组装的铝/氧化铜在 346 °C 有 1 个放热峰对应于 P4VP 的分解, 在 575.7 °C 有 1 个强的放热峰对应于铝/氧化铜的铝热反应放热。由于组装进一步增大了氧化物与可燃物之间的有效接触, 使反应进行得更加完全, 基本没有未反应的氧化铜, 所以在热分析图谱中未看到氧化铜的高温分解吸热峰。粉末混合的铝/氧化铜的放热量为 $523 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 组装的铝/氧化铜为 $1\,069 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。粉末混合的铝/氧化铁在 570 °C 和 747 °C 有 2 个放热峰, 两峰之间的最低点为 650 °C, 放热量为 $1\,448 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$; 自组装制备的铝/氧化铁在 569 °C 和 772 °C 处分别有 2 个放热峰, 放热量为 $2\,039 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 两峰之间的最低点在 660 °C 左右。铝的理论熔化温度为 660 °C 对应于两峰之间的最低点, 因此可以认为由于铝粉的熔化吸热将铝热反应分为 2 个放热峰^[31]。

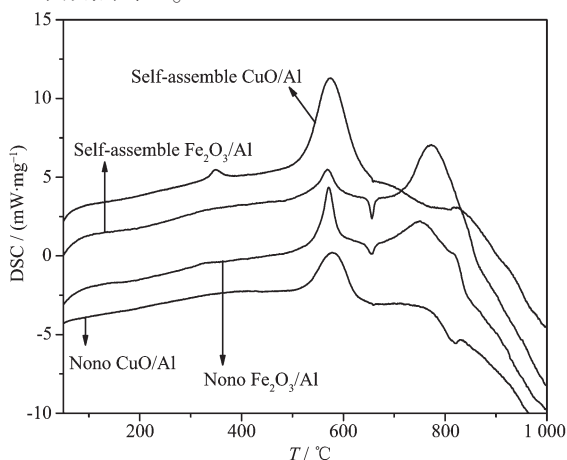


图 6 不同铝热剂及组合方式下反应放热量对比

Fig.6 Heat release of different thermite at different mixing method

通过对比不同复合方式下 2 种铝热剂的放热量可知, 自组装中加入聚合物, 增加了氧化物与可燃物之间的接触, 使得氧化物与可燃物之间的作用面积增加, 反应放热更多。通过 2 种铝热剂的对比

可知, 铝热剂种类不同, 放热量相差很大。

2.4 p-t 曲线

铝热剂在反应过程中的压力变化是影响其性能的关键因素, 压力可以推动铝热剂点燃下层装药, 从而保证有效作用。为了衡量不同铝热剂及复合方式对其压力变化的影响, 分别比较了粉末混合及自组装下 2 种铝热剂在密闭体系中的压力变化。结果如图 7 及表 1。

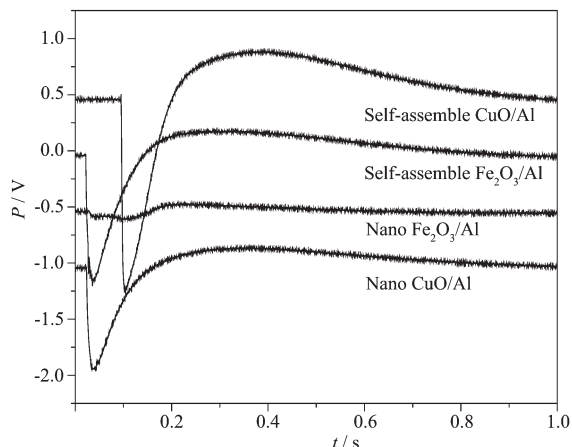


图 7 不同铝热剂及复合方式下压力变化

Fig.7 Pressure of different thermite at different mixing method

图 7 中反应起始的平台是反应的延迟时间, 向下的峰是传感器对反应的响应, 向上的峰是反应过程中压力的变化。相同药量下, 粉末混合的铝/氧化铜在 0.331 s 达到最大压力 1 858 kPa, 自组装铝/氧化铜复合物在 0.366 s 达到最大压力 4 389 kPa。粉末混合的铝/氧化铁在 0.220 s 达到最大压力 749 kPa, 自组装铝/氧化铁在 0.266 s 达到最大压力 2 280 kPa。通过不同复合方式对比可知: 一方面组装后氧化物与可燃物之间的接触更加紧密, 使得反应迅速进行, 热量释放到密闭体系中, 加热介质; 另一方面自组装中加入的聚合物分解时也可释放一部分气体使得压力增大。

通过 2 种铝热剂对比可知, 自组装后铝/氧化铁的放热量为 $2\,039 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 铝/氧化铜的放热量为

表 1 不同铝热剂及复合方式下在密闭体系中的压力

Table 1 Pressure of different thermite at different mixing method

Sample	Delay time / s	$t_{\max} / \text{s}$	$P_{\max} / \text{kPa}$	$(dP/dt)_{\max} / (\text{kPa} \cdot \text{s}^{-1})$
Nano copper oxide and aluminum	0.018 45	0.331 4	1 858	5.607×10^4
Self-assembled copper oxide and aluminum	0.091 98	0.366 2	4 389	1.199×10^5
Nano iron oxide and aluminum	0.03	0.22	749	3.405×10^4
Self-assembled iron oxide and aluminum	0.002 235	0.277 4	2 280	8.219×10^4

1 069 J·g⁻¹, 铝/氧化铁体系的放热量是铝-氧化铜体系的近乎两倍。另一方面, 铝/氧化铁的最大压力为 2 280 kPa, 铝/氧化铜的最大压力为 4 389 kPa。同时表 1 数据表明, 铝/氧化铜体系反应压力的最大上升速率高达 1.199×10^5 kPa·s⁻¹, 而铝/氧化铁体系为 8.219×10^4 Pa·s⁻¹。实验中也发现, 同等药量下的点火实验, 爆声明显大。这些实验数据和现象说明了两种铝热剂的反应特性, 两种铝热剂的性能差别大, 放热量与压力之间无线性关系。

尽管铝/氧化铜的放热量低于铝/氧化铁, 但其反应迅速, 热量迅速释放到密闭体系中, 加热介质使得压力变化更大。同时具有高的对外做功能力, 而铝/氧化铁体系反应相对温和持久, 放热量大。

2.5 感 度

在一定条件下, 含能材料在外界能量刺激作用下, 自行加速化学反应, 发生爆炸或发火的难易程度称为火工品药剂的敏感度, 简称感度。感度越高,

材料越敏感, 两种铝热剂的在各种刺激下的作用结果如表 2。火焰感度数据显示, 铝/氧化铜 50%发火高度为 20.60 cm, 铝/氧化铁 50%发火高度为 11.73 cm, 说明铝/氧化铜在较远的距离下依然可以被火焰点燃, 因此火焰感度高于铝/氧化铁。静电感度数据显示, 铝/氧化铜的发火能量为 0.3 J, 铝/氧化铁的发火能量为 11.4 J, 说明在较小的能量刺激下铝/氧化铜即可发火, 因此其静电感度高于铝/氧化铁。摩擦感度数据显示, 铝/氧化铜在 60°摆角、0.88 MPa 的表压下的发火率为 68%, 铝/氧化铁在 45°摆角、0.51 MPa 的表压下发火率为 72%, 铝/氧化铁在较小的摩擦力作用下即发火, 因此其摩擦感度高于铝/氧化铜。撞击感度数据显示, 铝/氧化铜在 73.9 cm 的落高下的发火率为 32%, 铝/氧化铁在 100 cm 的落高下 25 发全不发火, 推测氧化铁的环状结构对撞击有着缓冲作用, 因此铝/氧化铁的撞击感度低于铝/氧化铜。

表 2 铝/氧化铁和铝/氧化铜的感度

Table 2 Sensitivity of Fe₂O₃/Al and CuO/Al

	Fe ₂ O ₃ /Al	CuO/Al
Static-electric sensitivity	Detonating energy is 11.4 J	Detonating energy is 0.3 J
Flame sensitivity	Height of 50% firing probability is 11.73 cm	Height of 50% firing probability is 20.60 cm
Friction sensitivity	Firing rate is 72% at the pressure 0.51 MPa, angle 45°, temperature 4 °C, humidity 58%	Firing rate is 68% at the pressure 0.88 MPa, angle 60°, temperature 3 °C, humidity 73%
Impact sensitivity (10 kg hammer weight)	Firing rate is 0 at the height 100 cm, ambient temperature 6 °C, humidity 49%	Firing rate is 32% at the height 73.9 cm, ambient temperature 6 °C, humidity 60%

3 结 论

本文分别采用了模板法制备氧化铜纳米花, 水热法制备氧化铁纳米环, 自组装制备铝/氧化铜纳米花、铝/氧化铁纳米环复合物, 重点评估了两种铝热剂的性能。

(1) 自组装铝/氧化铜纳米花放热量为 1 069 J·g⁻¹, 压力达到 4 389 kPa, 自组装铝/氧化铁纳米环的放热量为 2 039 J·g⁻¹, 压力达到 2 280 kPa。性能均优于粉末混合下的复合物。自组装明显增加可燃物与氧化物之间的有效接触, 使得反应更加完全、快速。

(2) 两种铝热剂的放热量和压力变化并无线性关系, 显示出不同的反应特性。除此之外两者的感度差别也比较大, 铝/氧化铜的静电感度高于大多数含能材料, 铝/氧化铁的撞击感度又特别低。因此应用范围也应有所区别。本研究将为不同的应用背景

的铝热剂选择提供参考。

参考文献:

- [1] Valliappan S, Swiatkiewicz J, Puszynski J A. *Powder Technol.*, **2005**, **156**(2):164-169
- [2] WANG Xin(王昕). *Chin. J. Explos. Propellants* (Huozhaoyao Xuebao), **2006**, **29**(2):29-32
- [3] Rossi C, Zhang K L, Estève D, et al. *J. Microelectromech. Syst.*, **2007**, **16**(4):919-931
- [4] AN Ting(安亭), ZHAO Feng-Qi(赵凤起), GAO Hong-Xu(高红旭), et al. *J. Mater. Engin.* (Cailiao Gongcheng), **2011**, **11**: 23-28
- [5] AN Ting(安亭), ZHAO Feng-Qi(赵凤起), HAO Hai-Xia(郝海霞), et al. *Chin. J. Explos. Propellants* (Huozhaoyao Xuebao), **2011**, **34**(1):67-72
- [6] AN Ting(安亭), ZHAO Feng-Qi(赵凤起), PEI Qing(裴庆), et al. *Chinese J. Inorg. Chem.* (Wuji Huaxue Xuebao), **2011**,

- 27(2):231-238
- [7] Aumann C E, Skofronick G L, Martin J A. *J. Vac. Sci. Technol. B, Microelectron. Process. Phenom.*, **1995**,**13**(2):1178-1183
- [8] Bockmon B S, Pantoya M L, Son S F, et al. *J. Appl. Phys.*, **2005**,**98**(6):064903/1-064903/7
- [9] Granier J J, Pantoya M L. *Combust. Flame*, **2004**,**138**(4):373-383
- [10] Pantoya M L, Granier J J. *Propellants Explos. Pyrotech.*, **2005**,**30**(1):53-62
- [11] Bhattacharya S, Gao Y, Apperson S, et al. *J. Energ. Mater.*, **2006**,**24**(1):1-15
- [12] Gash A E, Tillotson T M, Satcher J H, et al. *Chem. Mater.*, **2001**,**13**(3):999-1007
- [13] Prakash A, McCormick A V, Zachariah M R. *Chem. Mater.*, **2004**,**16**(8):1466-1471
- [14] Prentice D, Pantoya M L, Clapsaddle B J. *J. Phys. Chem., B*, **2005**,**109**(43):20180-20185
- [15] Clapsaddle B J, Sprehn D W, Gash A E, et al. *J. Non-Cryst. Solids*, **2004**,**350**(1):173-181
- [16] Prakash A, McCormick A V, Zachariah M R. *Nano Lett.*, **2005**,**5**(7):1357-1360
- [17] K. B. Plantier. *Combust. Flame*, **2005**,**140**:299-309
- [18] Sun J, Pantoya M L, Simon S L. *Thermochim. Acta*, **2006**,**444**(2):117-127
- [19] Moore K, Pantoya M L. *Propellants Explos. Pyrotech.*, **2006**,**31**(3):182-187
- [20] Cheng J L, Hng H H, Ng H Y, et al. *J. Phys. Chem. Solids*, **2010**,**71**:90-94
- [21] Kim S H, Zachariah M R. *Adv. Mater.*, **2004**,**16**(20):1821-1825
- [22] Rajesh S, Senthil S. *Propellants Explos. Pyrotech.*, **2008**,**33**(2):122-130
- [23] AN Ting(安亭), ZHAO Feng-Qi(赵凤起), ZHANG Ping-Fei(张平飞). *Summarization(Zongshu)*, **2009**,**6**(6):60-67
- [24] Zhang K L, Rossi C, Petrantonio M, et al. *J. Microelectromech. Syst.*, **2008**,**17**(4):832-836
- [25] Tillotson T M, Gash A E, Simpson R L, et al. *J. Non-Cryst. Solids*, **2001**,**285**(1):338-345
- [26] ZHOU Chao(周超), LI Guo-Ping(李国平), LUO Yun-Jun(罗运军). *New Chem. Mater.(Huagong Xinxing Cailiao)*, **2010**,**38**(zl):4-7
- [27] Cheng J L, Hng H H, Lee Y W, et al. *Combust. Flame*, **2010**,**157**:2241-2249
- [28] WANG Yi(王毅), LI Feng-Sheng(李凤生), JIANG Wei(姜伟), et al. *Initiators Pyrotechnics(Huogongpin)*, **2008**,**4**:11-14
- [29] WANG Xiao-Qian(王晓倩), ZHANG Lin(张琳), ZHU Shun-Guan(朱顺官), et al. *Chinese J. Inorg. Chem.(Wuji Huaxue Xuebao)*, **2012**,**28**(11):2313-2320
- [30] Malynych S, Luzinov I, Chumanov G. *J. Phys. Chem., B*, **2002**,**106**:1280-1289
- [31] Wang Y, Jiang W, Liang L X, et al. *Rare Metal Mat. Eng.*, **2012**,**4**(1):0009-0013