

文章编号: 1006-9941(2015)10-1004-06

超级铝热剂反应特性研究

郑保辉, 王平胜, 罗观, 卢校军

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 以 Fe_2O_3 、 CuO 、 Fe_3O_4 、 MoO_3 为氧化剂, 分别以 50 nm 和 5 μm 的铝颗粒为还原剂, 超声复合制备了 12 种不同组成的铝热剂。采用扫描电镜 (SEM) 研究了铝热剂的结构和形貌, 发现纳米铝颗粒与 MoO_3 的相互分散效果最佳。用差示扫描量热分析和激光点火试验研究了氧化剂种类、颗粒粒径对铝热剂反应活性的影响。结果表明, 反应活性次序均为 $\text{Al}/\text{MoO}_3 > \text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}/\text{CuO} > \text{Al}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。相对于微米铝颗粒, 纳米铝颗粒可以使超级铝热剂的临界反应温度降低 200 ~ 400 $^\circ\text{C}$, 而相对于微米级金属氧化物, 纳米粒径的金属氧化物仅能使铝热剂临界反应温度降低 10 ~ 30 $^\circ\text{C}$ 。表明铝颗粒粒度是铝热剂反应活性的决定因素, 氧化剂的超细化对于铝热剂的反应活性改善仅能起到辅助作用; 当铝颗粒粒径在同一量级时, 铝热剂的反应活性主要取决于氧化剂种类。

关键词: 超级铝热剂; 粒径; 激光**中图分类号:** O614; TJ55**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.016

1 引言

由活性金属和金属/非金属氧化物组成的混合物被称为铝热剂, 其中纳米级铝颗粒组成的铝热剂又称为超级铝热剂 (super thermites) 或亚稳态分子间复合物 (metastable intermolecular composites, MIC), 其氧化还原反应过程中会迅速释放出巨大热量。纳米粒子具有表面积大、比表面能高和比表面活性高等优点, 而且通过一些特殊的结构设计或者组成设计还能有效保护纳米铝颗粒的活性, 这都使超级铝热剂具有极高的能量释放速度、能量转化效率和能量释放的高度可调性。超级铝热剂的反应速度和能量释放最大可比微米级铝热剂提高千倍以上^[1], 超级铝热剂良好的性能及广泛的应用前景使其成为近年研究的热点, 其制备方法^[2]、新型组成的铝热剂 (Al/MnO_2 、 Al/KMnO_4 、 Sb/KMnO_4 、 $\text{BaI}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{nano-B}/\text{Al}/\text{CuO}$ 、 $\text{NC}/\text{Al-CuO}$)^[3-9] 和新型的结构 (Al/CuO 多层膜材料、 Al/CuO 核-壳型一维纳米线材料)^[10-11] 都得到了丰富和发展。

超级铝热剂可以作为汽车安全气囊的气体发生

剂、接触式爆炸发射药、环境友好型弹药雷管、电点火具^[12-16], 在燃烧弹、安全裂石、弹药销毁、火工药剂、微型推进器、含能表面涂层、纳米焊接^[17-23] 和推进剂^[24] 中都已开展了广泛应用研究。但超级铝热剂在含能材料中的应用还存在诸多问题: (1) 虽然纳米级颗粒具有较高的活性, 但以铝颗粒为例, 由于表面氧化层较厚, 难以同时兼顾其反应活性与总体能量^[25], 因此活性金属与金属氧化物的粒度对铝热剂及含能材料反应性能的贡献程度必须综合评价和平衡; (2) 不同铝热剂的反应活性存在差异, 铝热剂的反应性能有必要与组成、颗粒度及应用环境统一研究。激光以其输出能量高且可调、点火时间和能量可控制、无干扰等特点, 已经在点火药和复合推进剂点火性能研究方面获得了广泛应用^[26-27], 因此铝热剂的激光点火性能和热引发点火性能对其在炸药、推进剂和火工品等含能材料中的应用具有重要意义。

本研究超声复合制备了由不同粒径铝颗粒 (还原剂)、氧化铁、氧化铜、四氧化三铁、氧化钼 (氧化剂) 组成的 12 种铝热剂, 研究了其热性能、激光点火性能, 对比了铝热剂中还原剂和氧化剂的不同粒度、不同组成以及在不同环境下的反应性能, 以期对上述问题的进一步深入研究提供一定的实验数据支撑。

2 实验部分

2.1 试剂

铝颗粒 (Al, 球形, 平均粒径 5 μm , 分析纯), 鞍钢实

收稿日期: 2014-08-25; 修回日期: 2015-03-08

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (2012B0302038), 国防基础科研计划重大专项 (C1520110001)

作者简介: 郑保辉 (1985-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为材料科学与工程。e-mail: zhengbaohui305@126.com

通信联系人: 罗观 (1972-), 男, 研究员, 研究方向为混合炸药技术。e-mail: luoguan@caep.cn

业微细铝粉有限公司, 纳米铝颗粒 (n-Al, 球形, 平均粒径 50 nm, 样品中铝元素占金属元素的质量比大于 99.9%), 上海超威纳米科技有限公司, 氧化铁 (Fe_2O_3 , 球形, 平均粒径 1 μm , 分析纯)、四氧化三铁 (Fe_3O_4 , 球形, 平均粒径 4 μm , 分析纯)、氧化钼 (MoO_3 , 片状, 平均粒径 4 μm , 分析纯), 天津市科密欧化学试剂有限公司、纳米磁性氧化铁 (n- Fe_2O_3 , 球形, 平均粒径 20 nm, 纯度 99.5%)、纳米氧化钼 (n- MoO_3 , 片状, 平均粒径 100 nm, 纯度 99.95%), 阿拉丁试剂、氧化铜 (CuO , 球形, 平均粒径 35 μm , 分析纯), 广东光华化学厂有限公司, 正己烷 (分析纯)、对甲苯磺酸钠 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司。

2.2 超级铝热剂的制备

将铝颗粒与氧化物按化学计量比加入到 100 倍体积的正己烷中, 再加入 0.1% 的对甲苯磺酸钠, 超声振荡 30 min, 静置、滤除上清液, 将铝热剂用 50 倍体积的正己烷洗涤三次, 干燥、真空保存, 制得微米级和纳米级铝热剂共 12 种, 如表 1 所示。

表 1 12 种铝热剂的组成

Table 1 Composition of 12 kinds of thermites

sample	formulation	average particle size/nm		mass ratio of Al to oxidizer
		aluminum	oxidizer	
1#	Al/ Fe_2O_3	5×10^3	1×10^3	1/2.96
2#	Al/n- Fe_2O_3	5×10^3	20	1/2.96
3#	n-Al/ Fe_2O_3	50	1×10^3	1/2.96
4#	n-Al/n- Fe_2O_3	50	20	1/2.96
5#	Al/ CuO	5×10^3	3.5×10^4	1/4.42
6#	n-Al/ CuO	50	3.5×10^4	1/4.42
7#	Al/ Fe_3O_4	5×10^3	4×10^3	1/6.44
8#	n-Al/ Fe_3O_4	50	4×10^3	1/6.44
9#	Al/ MoO_3	5×10^3	4×10^3	1/2.67
10#	Al/n- MoO_3	5×10^3	100	1/2.67
11#	n-Al/ MoO_3	50	4×10^3	1/2.67
12#	n-Al/n- MoO_3	50	100	1/2.67

2.3 仪器与测试条件

S-4800 型场发射扫描电镜, 日本日立公司; STA 449 F3 Jupiter 型热重-差示扫描量热仪 (测试条件: 气氛氮气, 升温速率 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 温升范围室温 ~ $1200\text{ }^\circ\text{C}$), 德国 Netzsch 公司; SpitLight 1500 型激光器, 德国 Innolas 公司, 整个激光点火测试系统如图 1 所示, 将激光能量计所检测到的输出光束能量, 反馈至激光器, 通过不断调整激光器功率以判断铝热剂的临界点火能量; 激光点火测试样品的装配示意图及实物如图 2 所示。铝热剂装药量约 30 mg, 脉宽: 6 ~ 7 ns,

最大脉冲能量: 1.1 J (触靶), 能量稳定性: 1%, 光斑大小: 9 mm (出口)。

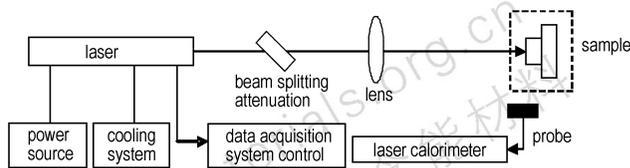
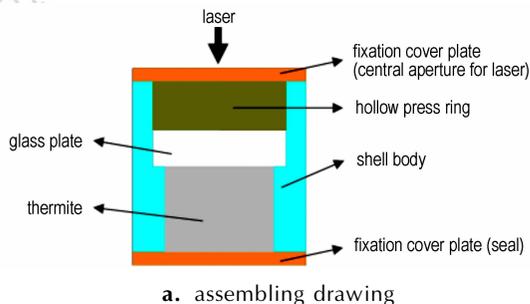
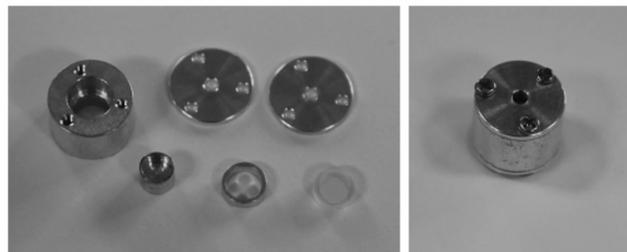


图 1 铝热剂激光点火测试装置

Fig. 1 Schematic diagram for laser ignition test of thermites



a. assembling drawing



b. components

c. assembly object

图 2 激光点火试验样品装配示意图及实物图

Fig. 2 Assembly drawing and physical map for laser ignition test

3 结果与讨论

3.1 铝热剂微观形貌

研究表明, 铝热反应是扩散控制反应, 即铝热还原反应速率受液体金属铝通过氧化剂的扩散传质控制^[28-29], 因此铝热剂的微观形貌特别是相界面形态对其反应特性有重要影响。本研究对比了不同粒径铝颗粒与球形氧化剂纳米颗粒 (图 3a 和图 3b)、球形氧化剂微米颗粒 (图 3c 和图 3d)、片状氧化剂纳米颗粒 (图 3e 和图 3f) 组成的铝热剂的微观形貌, 考察采用超声混合制备的铝热剂中氧化剂和还原剂间的相互分散混合效果。由图 3c Al/ CuO 和图 3e Al/n- MoO_3 的微观形貌可以看出, 5 μm 铝颗粒与氧化铜或纳米氧化钼颗粒难以相互均匀分散; 在 Al/n- Fe_2O_3 (图 3a) 中, 由于材料超声制备时 n- Fe_2O_3 团聚体被破坏, 纳米粒度 Fe_2O_3 紧密覆盖在微米级铝颗粒的表面, 对铝颗粒

的包覆效果较好。而纳米铝颗粒易团聚,在 $n\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 CuO 中的分散性均不理想, $n\text{-Al}/n\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (图 3b)、 $n\text{-Al}/\text{CuO}$ (图 3d) 中团聚铝颗粒粘连在大颗粒氧化物表面,但在 $n\text{-Al}/n\text{-MoO}_3$ (图 3f) 中,片状 $n\text{-MoO}_3$ 表面

覆盖一层较为致密的纳米铝颗粒,颗粒间分散效果最佳。纳米铝颗粒在 $n\text{-MoO}_3$ 中的良好分散效果有利于提高铝热剂整体的反应活性,这可以由其热反应特性和激光点火特性得到证实。

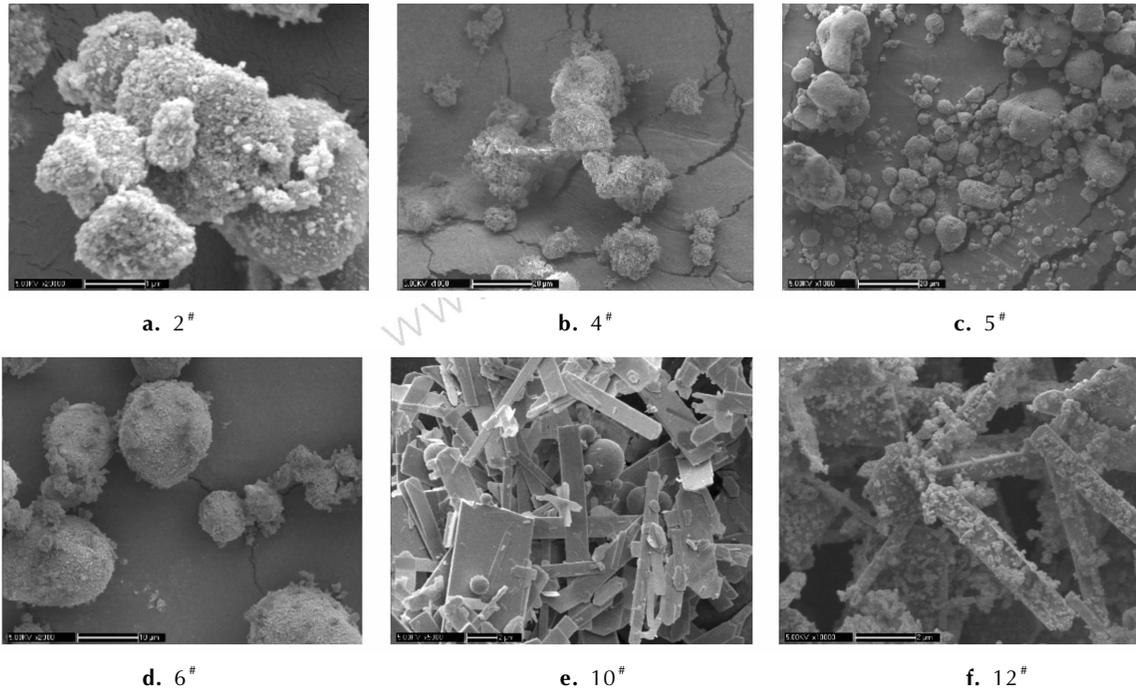


图 3 不同铝热剂的 SEM 图

Fig.3 SEM images of different thermites

3.2 铝热剂热反应特性

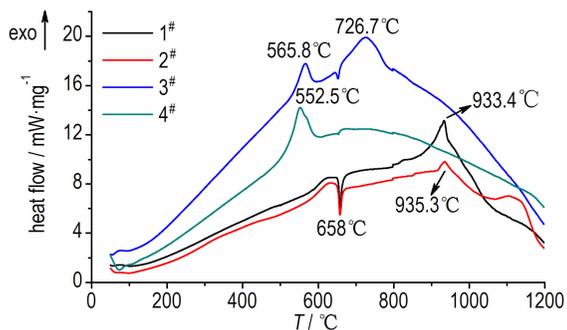
铝热剂在热流作用下的临界反应温度是研究其反应活性的重要指标。图 4 为各铝热剂的差示扫描量热 (DSC) 曲线,由图 4 可知,658 $^{\circ}\text{C}$ 附近的特征峰为铝的熔化吸热峰,在微米铝颗粒组成的铝热剂中 (1 $^{\#}$ 、2 $^{\#}$ 、5 $^{\#}$ 、7 $^{\#}$ 、9 $^{\#}$ 、10 $^{\#}$),此峰较大,在纳米铝颗粒组成的铝热剂中 (3 $^{\#}$ 、4 $^{\#}$ 、6 $^{\#}$ 、8 $^{\#}$ 、11 $^{\#}$ 、12 $^{\#}$),此峰较小,DSC 曲线中铝熔化吸热峰面积大小、铝热反应与铝熔化吸热的出峰相对位置说明,在微米铝颗粒组成的铝热剂中,铝热反应发生在铝颗粒熔化之后,为液-固相反应;在纳米铝颗粒组成的铝热剂中,铝热反应一部分在铝颗粒熔化之前,一部分在铝颗粒熔化之后,为固-固相和液-固相的混合反应,因此铝颗粒熔化吸热峰较小。

根据各种铝热剂的 DSC 曲线及对应铝热剂中铝颗粒与金属氧化物颗粒的粒度,实验发现:微米铝颗粒组成的铝热剂,临界反应温度在 700 ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$;而纳米铝颗粒组成的铝热剂,临界反应温度在 500 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$,这说明纳米铝颗粒组成的超级铝热剂表现出非常明显的高反应活性。

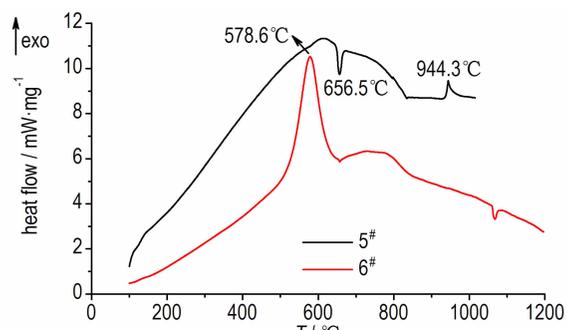
微米铝颗粒组成的几种铝热剂的临界反应温度: 7 $^{\#}$ (1095.5 $^{\circ}\text{C}$) > 5 $^{\#}$ (944.3 $^{\circ}\text{C}$) > 1 $^{\#}$ (933.4 $^{\circ}\text{C}$)、2 $^{\#}$ (935.3 $^{\circ}\text{C}$) > 9 $^{\#}$ (728.2 $^{\circ}\text{C}$)、10 $^{\#}$ (745.3 $^{\circ}\text{C}$),反应活性依次升高。纳米铝颗粒组成的几种铝热剂的临界反应温度: 8 $^{\#}$ (585.1 $^{\circ}\text{C}$) > 6 $^{\#}$ (578.6 $^{\circ}\text{C}$) > 3 $^{\#}$ (565.8 $^{\circ}\text{C}$)、4 $^{\#}$ (552.5 $^{\circ}\text{C}$) > 12 $^{\#}$ (544.4 $^{\circ}\text{C}$),反应活性依次升高, MoO_3 作为氧化剂的铝热剂反应活性最佳,其后依次为 Fe_2O_3 、 CuO 和 Fe_3O_4 。微米级铝颗粒和纳米级铝颗粒组成的铝热剂,其反应活性高低遵循相同的排序。 Al/MoO_3 的高反应活性不仅与其组成有关,其微观结构中铝颗粒与氧化铝的良好分散效果对于反应过程中的传质、传热也是有利的一面。

1 $^{\#}$ 、2 $^{\#}$ 两种铝热剂中,铝颗粒均为微米级,当氧化铁的粒径由 1 μm 降至 20 nm 时,铝热剂的临界反应温度并没有降低;而 3 $^{\#}$ 、4 $^{\#}$ 两种铝热剂中的铝颗粒均为纳米颗粒,当氧化铁的粒径由 1 μm 降至 20 nm 时,铝热剂的临界反应温度由 565.8 $^{\circ}\text{C}$ 下降至 552.5 $^{\circ}\text{C}$,降低了约 13 $^{\circ}\text{C}$,而且铝热反应基本集中于固-固反应阶段。类似的情况也发生于 11 $^{\#}$ 、12 $^{\#}$ 两种铝热剂中,

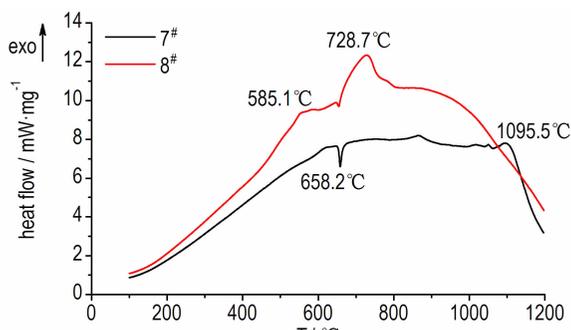
氧化钨的粒度由 4 μm 降至 100 nm 时,固-固相临界反应温度由 576.0 °C 降低至 544.4 °C,降低了约 32 °C,这说明铝颗粒的粒度决定了铝热剂的活性,而氧化剂的超细化对于铝热剂的反应活性改善仅能起到辅助作用。



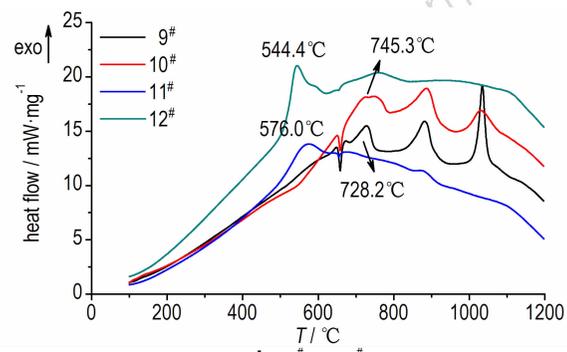
a. 1# ~ 4#



b. 5# and 6#



c. 7# and 8#



d. 9# ~ 12#

图4 各种铝热剂的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of different thermites

3.3 铝热剂激光点火性能

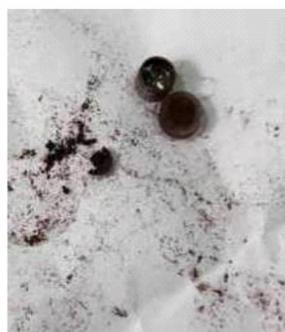
不同功率激光作用下,铝热剂的点火反应情况如表 2 所示。激光器的能量输出范围为 25 ~ 1100 mJ,6#、8# 在最大的 1100 mJ 激光能量下没有发生反应,与之相对应的是 11#、12# 在最低的 25 mJ 激光能量下即可进行点火引发,3#、4# 的临界点火能量分别为 300 mJ 和 670 ~ 790 mJ,在激光引发下分别以 MoO₃、Fe₂O₃、CuO、Fe₃O₄ 为氧化剂的铝热剂的反应活性依次降低,总体上与热引发下各铝热剂反应活性次序一致。

表 2 各种铝热剂的激光点火情况

Table 2 Results of laser ignition for different thermites

sample	reaction results(laser energy/mj)	critical energy/mj
3#	○(1100) ○(790) ○(670) ○(500) ○(300)	<300
4#	○(1100) ○(790) ×(670) ×(790) —	670 ~ 790
6#	×(500) ×(790) ×(1000) ×(1100) —	>1100
8#	×(1100) — — — —	>1100
11#	○(500) ○(200) ○(100) ○(25) —	<25
12#	○(500) ○(25) — — —	<25

Note: “○” represents the reaction of thermite; “×” represents there is no reaction.



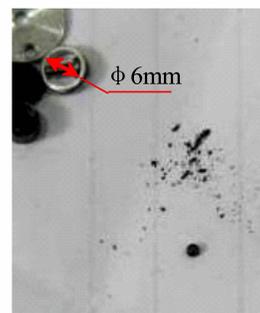
a. 3#(670 mj)



b. 4#(790 mj)



c. 11#(200 mj)



d. 12#(500 mj)

图5 激光点火后的铝热剂

Fig.5 Thermiter residue after laser ignition

由铝热剂 3#、4# 的临界能量点火能量可知,微米

Fe_2O_3 比纳米 Fe_2O_3 更能有效提高激光诱导的铝热反应活性,这与 DSC 分析的结果不一致。这可能是因为在 DSC 测试中试样被缓慢均匀加热,为单一的热作用引发过程,而激光脉冲为纳秒级点源,激光的作用效应包括热作用、火花作用、光化学作用和等离子作用;另一方面虽然激光吸收率主要取决于材料种类,但与材料的吸收波长、粒径、密度、折光率等也有密切关联,这些因素导致了材料活性在热作用和激光作用下的差别。

由于微米铝颗粒组成的铝热剂反应活性较低,其未能在激光器装置中实现点火,因此实验主要考察了纳米铝颗粒组成的各铝热剂的激光点火反应活性,图 5 是 3[#]、4[#]、11[#]、12[#]经激光点火后回收得到的铝热剂产物,在激光点火前铝热剂为超细粉末,当点火能量足够时,仅需一个激光脉冲,装药量在 30 mg 左右的超级铝热剂即可被引燃并完全反应,生成致密金属熔渣,12[#]燃烧后更是形成了毫米级的球状颗粒。

4 结 论

(1) 超声制备方法所得铝热剂,纳米铝颗粒在 Fe_2O_3 、CuO 中的分散性不理想;但在 n-Al/n-MoO₃ 中,片状 n-MoO₃ 表面覆盖一层较为致密的纳米铝颗粒,颗粒间分散效果最佳。

(2) 微米铝颗粒组成的铝热剂,临界反应温度在 700 ~ 1000 °C,铝热反应发生在铝颗粒熔化后,为液-固相反应;而纳米铝颗粒组成的铝热剂,临界反应温度在 500 ~ 600 °C,铝热反应部分发生在铝颗粒熔化前,为固-固相和液-固相混合反应。相对于微米铝颗粒,纳米铝颗粒可以使铝热剂的临界反应温度降低 200 ~ 400 °C,对于微米级金属氧化物,纳米粒径的金属氧化物仅能使铝热剂临界反应温度降低 10 ~ 30 °C。因此,铝颗粒的粒度决定了铝热剂的活性,而氧化剂的超细化对于铝热剂的反应活性改善仅能起到辅助作用。

(3) 由微米级铝颗粒、纳米铝颗粒分别组成的不同铝热剂,其反应活性高低遵循相同的排序,各种氧化剂组成的铝热剂反应活性次序从高到低依次为: Al/MoO₃ > Al/Fe₂O₃ > Al/CuO > Al/Fe₃O₄; 不同铝热剂在热引发与激光引发下的反应活性次序也基本一致。

参考文献:

[1] Danen W C, Martin J A. Multiple virtual addressing using/comparing translation pairs of comprising a space address and an origin address (STO) while registers as storage devices for a data processing system; US 5226132[P]. 1993-09-27.

- [2] 周超, 李国平, 罗运军. 纳米铝热剂的研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(4): 4-7.
ZHOU Chao, LI Guo-ping, LUO Yun-jun. Research progress on nano-thermite[J]. *New Chemical Materials*, 2010, 38(4): 4-7.
- [3] 安亭, 赵凤起, 高红旭, 等. 超级铝热剂的制备及其与双基系推进剂组分的相容性[J]. 材料工程, 2011(11): 23-28.
AN Ting, ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, et al. Preparation of super thermites and their compatibilities with DB propellants components[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(11): 23-28.
- [4] Prakash A, McCormick A V, Zachariah M R. Synthesis and reactivity of a super-reactive metastable intermolecular composite formulation of Al/KMnO₄[J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(7): 900-903.
- [5] Brown M E, Taylor S J, Tribelhorn M J. Fuel-oxidant particle contact in binary pyrotechnic reactions[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1998, 23(6): 320-327.
- [6] Beck M W, Brown M E. Thermal analysis of antimony/potassium permanganate pyrotechnic compositions[J]. *Thermochim Acta*, 1983, 65(2-3): 197-212.
- [7] 方伟, 赵省向, 陈松, 等. Fe₂O₃/BAI 纳米复合含能材料的制备及性能研究[J]. 火工品, 2012(2): 18-21.
FANG Wei, ZHAO Sheng-xiang, CHEN Song, et al. Preparation and characterization of Fe₂O₃/BAI nano-composite energetic material[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(2): 18-21.
- [8] Sullivan K, Young G, Zachariah M R. Enhanced reactivity of nano-B/Al/CuO MIC's[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 302-309.
- [9] YAN Shi, JIAN Guo-qiang, Zachariah M R. Electrospun nanofiber-based thermite textiles and their reactive properties[J]. *Appl Mater Interfaces*, 2012, 4(12): 6432-6435.
- [10] Xiang Zhou, Ruiqi Shen, Yinghua Ye, et al. Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(9): 4505/1-4505/6.
- [11] Ahn J Y, Kim W D, Cho K, et al. Effect of metal oxide nanostructures on the explosive property of metastable intermolecular composite particles[J]. *Powder Technology*, 2011, 211: 65-71.
- [12] Clapsaddle B J, Zhao L, Prentice D, et al. Formulation and performance of novel energetic nanocomposites and gas generators prepared by sol-gel methods[C]//36th Int Ann Conf ICT, 2005: 39/1-39/10.
- [13] Walker J, Tannenbaum R. Formation of nanostructured energetic materials via modified sol-gel synthesis[C]//ibid, 2004, 800, AA7.8.1-AA7.8.10.
- [14] Son S F. Performance and characterization of nanoenergetic materials at LosAlamos[C]//Mat Res Soc Symp Proc, 2004, 800, AA5.2.1-AA5.2.12.
- [15] Sanders V E, Asay B W, Foley T, et al. Reaction propagation of four nanoscale energetic composites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO and Bi₂O₃) [J]. *Propulsion and Power*, 2007, 23(4): 707-714.
- [16] Naud D L, Hiskey M A, Son S F, et al. Feasibility study on the use of nanoscale thermites for lead-free electric matches [J]. *J Pyrotech*, 2003, 17: 65-75.
- [17] Cooke H H, Holtzclaw J B. Incendiary bomb mixture: US 2445312[P], 1948-07-20.
- [18] 魏有德. 安全裂石药柱及其应用[J]. 爆破器材, 1984(1): 17-19.
- [19] 易建坤, 吴腾芳, 贺五一. 用于弹药燃烧销毁的高热剂配方试验

- 研究[J]. 爆破, 2005, 22(1): 107-111.
- YI Jian-kun, WU Teng-fang, HE Wu-yi. Experimental study on the composition of thermite applied in the ammunition disposal [J]. *Blasting*, 2005, 22(1): 107-111.
- [20] 任晓雪, 彭翠枝. 国外新型火工药剂技术发展研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(2): 20-26.
- REN Xiao-xue, PENG Cui-zhi. Analysis on the development of foreign pyrotechnic composition technology[J]. *Explosive Materials*, 2012, 41(2): 20-26.
- [21] Son S F, Yetter R A, Yang Y. Combustion of nanoscale Al/MoO₃ in microchannels[J]. *J Propul Power*, 2007, 23(4): 643-644.
- [22] Gash A E, Satcher J H, Simpson R L, et al. Nanostructured energetic materials with sol-gel methods[C] // *Mat Res Soc Symp Proc*, 2004, 800, AA2.2.1-AA2.2.12.
- [23] Spitzer D, Comet M, Moeglin J P, et al. Synthesis and investigation of the reactivity of nano thermite mixtures[C] // 7th Int. Ann. Conf. ICT, 2006, (Energetic Materials), 117/1-117/10.
- [24] Danali S M, Palaiah R S, Raha K C. Developments in pyrotechnics[J]. *Defence Science Journal*, 2010, 60(2): 152-158.
- [25] Hoffmann P O, Kintish I L. Cyclotol and thermite explosive composition: US 3297503[P], 1967-01-10.
- [26] 叶迎华, 舒浪平, 沈瑞琪. 酚醛树脂对 B/KNO₃ 点火药激光烧蚀特性的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 33-38.
- YE Ying-hua, SHU Lang-ping, SHEN Rui-qi. Effect of phenolic resin on laser ablation of B/KNO₃ [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 33-38.
- [27] 郝海霞, 裴庆, 赵风起, 等. 固体推进剂激光点火性能研究综述[J]. 含能材料, 2009, 17(4): 491-498.
- HAO Hai-xia, PEI Qing, ZHAO Feng-qi, et al. Summarization of laser ignition characteristics of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(4): 491-498.
- [28] 武斌, 张松林, 秦志桂, 等. 失重条件下含沙铝热剂的燃烧特性[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(9): 2424-2427
- WU Bin, ZHANG Song-lin, QIN Zhi-gui, et al. Combustion characteristics of the sand-containing thermite in the weightlessness field [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(9): 2424-2427
- [29] 张金平, 张洋洋, 李慧, 等. 纳米铝热剂 Al/SiO₂ 层状结构铝热反应的分子动力学模拟[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 086401/1-9.
- ZHANG Jin-ping, ZHANG Yang-yang, LI Hui, et al. Molecular dynamics investigation of thermite reaction behavior of nano-structured Al/SiO₂ system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 086401/1-9.

Reaction Properties of Super Thermites

ZHENG Bao-hui, WANG Ping-sheng, LUO Guan, LU Xiao-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: With Fe₂O₃, CuO, Fe₃O₄, MoO₃ as oxidants, 50 nm or 5 μm aluminum particle as reducer, twelve thermites were prepared by mixing them under ultrasonic shock. Structure and morphology of the thermites were studied by scanning electron microscope (SEM). The effects of oxidizer agent species and particle size of the materials on the reaction activity of thermites were studied by differential scanning calorimetry (DSC) and laser ignition. Results show that the dispersion of nanometer aluminum particle in MoO₃ is the best. The reaction order from high to low is Al/MoO₃>Al/Fe₂O₃>Al/CuO>Al/Fe₃O₄. When using nanometer aluminum particle, the critical reaction temperature of super thermites decreases 200-400 °C, lower than that of micrometer aluminum particle. The critical reaction temperature decreases only 10-30 °C using nanometer oxidants, lower than that using corresponding micrometer materials. All the results indicate that particle size of aluminum particle is the key factor effecting the reaction activity of thermites, and ultra-refinement of oxidizer is only supplementary for the reaction activity of thermites. When the aluminum particle size locates on the same order, the reaction activity of thermites mainly depend on the species of oxidants.

Key words: super thermite; particle size; laser

CLC number: O614; TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.016