

氧化剂对 Al/PTFE 热分解性能的影响

景甜媛, 王金英, 苏子璇, 崔锐宁, 李元鑫

(中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 采用湿混法分别制备了含 KNO_3 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 KClO_4 、 Fe_2O_3 氧化剂的 Al/PTFE 体系(氧化剂质量分数 3%、12%、15%), 并利用同步热分析仪分析了氧化剂类型、质量分数及升温速率对材料热分解性能及反应活性的影响。研究表明: 引入氧化剂能够破坏 Al_2O_3 壳层和促进碳产物完全氧化, 从而提升了 Al/PTFE 的反应活性。 KNO_3 质量分数为 12% 的 Al/PTFE 体系效果最为显著, 失重温度提前了 6.97%, 表观活化能降至 $128.63 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; Fe_2O_3 、硝酸盐单一氧化剂体系的反应活性高于 Fe_2O_3 与硝酸盐复配体系, 说明所研究的复合氧化体系之间存在相容性问题。

关键词: 活性材料; Al/PTFE; 热分解; 反应活性; 活化能

中图分类号: TQ560.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.07.0004

引用格式: 景甜媛, 王金英, 苏子璇, 等. 氧化剂对 Al/PTFE 热分解性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 776-783.

JING Tianyuan, WANG Jinying, SU Zixuan, et al. Influence of oxidants on the thermal decomposition properties of Al/PTFE[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 776-783.

Influence of Oxidants on the Thermal Decomposition Properties of Al/PTFE

JING Tianyuan, WANG Jinying, SU Zixuan, CUI Ruining, LI Yuanxin

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Al/PTFE composites incorporating KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KClO_4 , and Fe_2O_3 (mass fractions: 3%, 12%, and 15%) were prepared via wet mixing. The effects of oxidant type, mass fraction, and heating rate on thermal decomposition behavior and reactivity were investigated using simultaneous thermal analysis (STA). The results demonstrate that oxidant addition enhances reactivity by disrupting the inert Al_2O_3 shell and promoting complete oxidation of carbonaceous residues. The most significant improvement was observed in Al/PTFE composites with KNO_3 mass fraction of 12%, which advanced the onset decomposition temperature by 6.97% and reduced the apparent activation energy to $128.63 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Furthermore, systems with a single oxidant (Fe_2O_3 or nitrate) exhibited superior reactivity compared to those containing combined Fe_2O_3 /nitrate oxidizers, suggesting a compatibility issue within the studied specific composite oxidizers.

Key words: reactive materials; Al/PTFE; thermal decomposition; reaction activity; activation energy

0 引言

活性材料毁伤元通过动能侵彻和内爆化学能

释放双重毁伤机理的联合作用, 实现对打击目标更高效、致命的结构毁伤^[1-2]。铝/聚四氟乙烯(Al/PTFE)是其中较典型的一类活性材料, 在武

收稿日期: 2025-07-08

作者简介: 景甜媛(2000—), 女, 硕士生, 主要从事纳米含能材料的制备与表征研究。

通信作者: 王金英(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事纳米含能材料的制备与表征研究。E-mail: wjyzhy@126.com。

器毁伤和推进剂方面有着巨大的应用潜力^[3-7]。Al/PTFE 在质量比为 26.5/73.5 条件下的单位质量热值可达 8.53 MJ/kg, 是 TNT 的 2 倍^[8-9]。然而, Al/PTFE 体系在初始反应阶段存在反应活性低和能量释放效率不足的问题: 一方面, 反应过程中因缺乏氧化剂, 造成碳产物的不完全氧化而导致释能和产气降低^[10-11], 造成热值损失; 另一方面, Al 颗粒表面可能存在的钝化层 Al_2O_3 阻碍了氟化反应而导致点火延迟。

针对氧化剂对 Al/PTFE 反应活性的影响, 前人研究主要集中在高氯酸盐和金属氧化物两类氧化剂。理论研究表明, 氧化剂的添加可通过释放活性氧原子、降低反应活化能等机制, 促进碳产物的完全氧化, 进而加速 Al/PTFE 的热分解进程, 提升其反应活性^[12]。高氯酸盐作为强氧化剂, 广泛应用于烟火制造、航空航天、军火工业及染料涂料等领域^[13-14]。Wang 等^[15]将不同含量的高氯酸铵(AP)引入 Al/PTFE 体系, 发现 AP 分解释放的氧气可与碳产物反应生成 CO/CO_2 , 显著提升体系的反应活性, 且当 AP 质量分数为 9% 时, Al/PTFE 的热性能优化效果最佳; 周丹等^[16]研究了 $\text{KClO}_4/\text{Al}/\text{PTFE}$ 及 $\text{NaClO}_4/\text{Al}/\text{PTFE}$ 三元活性材料热性能, 证实高氯酸盐可通过强化碳产物利用提升能量释放效率, 且 KClO_4 效果优于 NaClO_4 。同时, 金属氧化物与 Al 的强烈铝热反应也有助于提高 Al/PTFE 的反应活性^[17-18]。Zhou 等^[19]对比 Al/CuO、Al/ Fe_2O_3 和 Al/ZnO 三种体系的铝热反应特性, 发现 Al/ Fe_2O_3 反应放热量最大; Wu 等^[20]探究了 PTFE/Al/ MoO_3 含氟铝热剂的热分解与反应过程, 证实体系内各组分存在协同促进作用; Al/CuO 的反应阈值较低, Ding^[21]和 Lan^[22]等通过研究进一步表明, 添加 CuO、 Bi_2O_3 、 Fe_2O_3 和 MoO_3 等金属氧化物可以显著提高 Al/PTFE 体系的反应效率。

上述研究证实高氯酸盐和金属氧化物均可有效促进 Al/PTFE 的热分解和反应活性, 但氧化剂种类覆盖不全, 如硝酸盐作为氧化剂在含能材料领域应用广泛, 然而目前关于硝酸盐及其含量对 Al/PTFE 体系反应活性影响的研究相对较少; 而且现有研究多集中在单一氧化剂, 复配氧化剂对 Al/PTFE 反应活性影响的相关研究较为缺乏。基于此, 本文选取硝酸盐(KNO_3 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)、高氯酸盐(KClO_4)、金属氧化物(Fe_2O_3), 探究氧化剂种类与含量对 Al/PTFE 反应活性的影响规律。此外, 设计了含 Fe_2O_3

与硝酸盐复配氧化剂的 Al/PTFE 基活性材料, 旨在研究 Fe_2O_3 与硝酸盐复配氧化剂协同作用对 Al/PTFE 反应活性的影响。

1 实验方案

1.1 原材料的选择与处理

引入适配的氧化剂——释放活性氧原子以促进 Al/PTFE 反应。王惠娥等^[23]证实增加 KNO_3 含量可强化与石墨反应的放热效应, 另外, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 成本价格优异, 是一种富氧材料, 故选取二者作为硝酸盐类氧化剂; KClO_4 吸湿性小^[24], 具有较好的热稳定性与安全性, 且密度、有效含氧量高^[25], 故选取其作为金属氧化物类氧化剂。为确保混合物接触界面充分增大, 对氧化剂进行研磨, 并通过 300 目 ($48\ \mu\text{m}$) 筛网进行筛分使所用氧化剂粒度达到微米级别。Al/ Fe_2O_3 型铝热剂因其燃烧热高^[26]、热性能好^[27]而展现出良好的应用前景, Fe_2O_3 (粒径 $1\ \mu\text{m}$) 可通过铝热反应的剧烈放热协同提升 Al/PTFE 的反应活性, 故选取其作为金属氧化物类氧化剂。

1.2 Al/PTFE 基活性材料的制备

采用湿混法制备样品: 按设计配比, 依次将氧化剂、PTFE、Al 粉加入无水乙醇中, 磁力搅拌各 30 min 使其充分混合。之后将悬浮液转移至 $60\ ^\circ\text{C}$ 恒温烘箱中干燥至恒重。为避免固液分离可能造成的组分损失和宏观团聚, 本研究采用直接干燥法。为最大限度确保样品的均匀性, 在干燥过程中辅以间歇性人工搅拌, 以扰动可能产生的沉降。最后, 对干燥所得团聚体使用 70 目 ($212\ \mu\text{m}$) 标准筛进行解聚过筛, 获得混合均匀、流动性良好的活性材料粉末。

1.3 测试方案

使用日本岛津公司的 DSC-60 同步热分析仪对 Al/PTFE 及 Al/PTFE 基活性材料进行 TG-DSC 测试, 测试条件为: 室温升温至 $600\ ^\circ\text{C}$, 升温速率为 $10\ ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 样品质量为 3 mg, 气氛为氮气。

2 实验结果与分析

2.1 Al/PTFE 的热分解性能

图 1 为 Al/PTFE 的 TG-DSC 曲线, 在 $300\sim 350\ ^\circ\text{C}$ 之间存在吸热峰 A, 对应 PTFE 的熔融吸热过

程。TG曲线在526.75℃时,出现明显失重,DSC曲线也出现了较大的放热峰B,样品的质量损失50.74%,推测PTFE在此温度分解生成了气态产物。

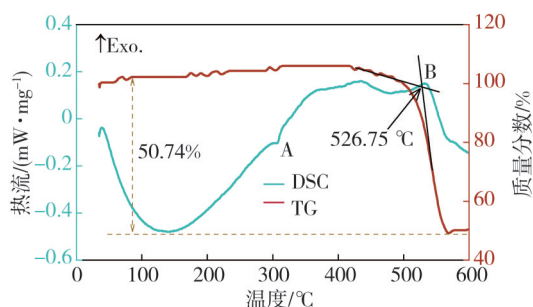
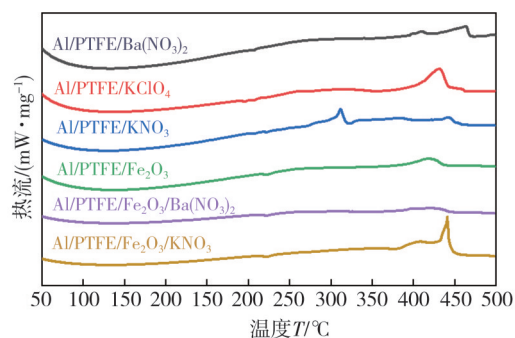


图1 Al/PTFE的TG-DSC曲线

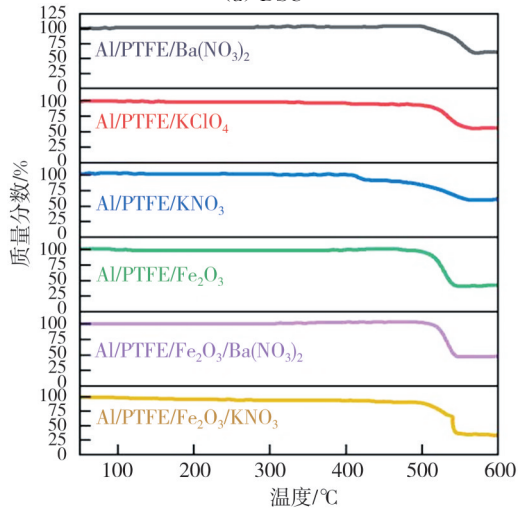
Fig. 1 TG-DSC curve of Al/PTFE

2.2 氧化剂类型对Al/PTFE反应活性的影响

图2是含12%不同类型氧化剂的Al/PTFE基活性材料的TG-DSC曲线。



(a) DSC



(b) TG

图2 12%不同氧化剂掺杂Al/PTFE基活性材料的TG-DSC曲线

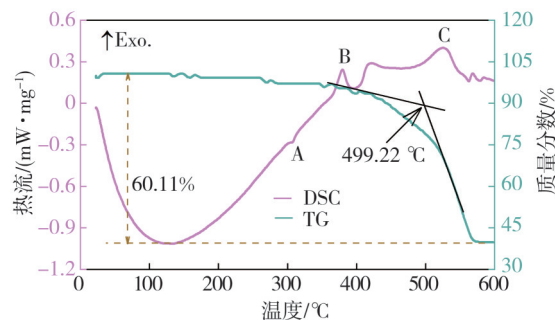
Fig. 2 TG-DSC curves of Al/PTFE-based reactive materials doped with 12% oxidizers

由图2可知,所有添加氧化剂的体系,其主反应放热峰温均低于纯Al/PTFE(526.75℃),表

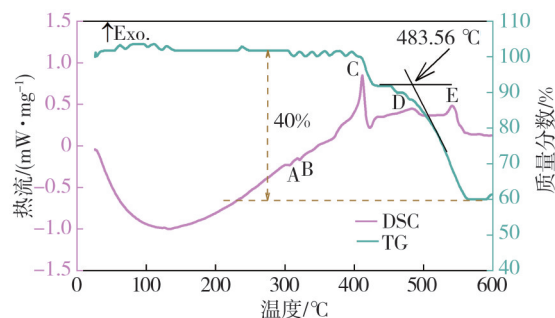
明反应活性均得到提升。其中, KNO_3 体系峰温最低(492.26℃),表现出最优的活化效果; KClO_4 体系放热量最大(193.311 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$),值得注意的是, Fe_2O_3 /硝酸盐复配体系(分解温度分别为504.25℃和516.55℃)的表现逊于相应的单一氧化剂体系。这表明,并非所有氧化剂的简单叠加都能产生协同效应。这是由于 Fe_2O_3 (依赖固-固接触的铝热反应)与硝酸盐(气相氧化与产气)的反应机理和触发时序存在本质差异,导致了反应时序与热量的失配。而不同氧化剂分解产物之间相互作用生成惰性相,共同抑制了主反应进程,从而降低了体系的整体反应活性。

2.3 氧化剂质量分数对Al/PTFE反应活性的影响

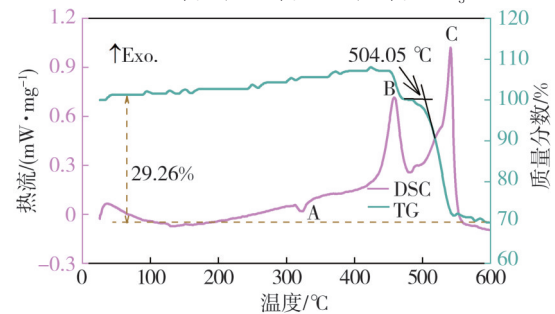
图3是 KNO_3 质量分数在3%、12%和15%情况下的Al/PTFE/ KNO_3 活性材料的TG-DSC图。



(a) 25.7%Al/71.3%PTFE/3%KNO₃



(b) 23.3%Al/64.7%PTFE/12%KNO₃



(c) 22.5%Al/62.5%PTFE/15%KNO₃

图3 不同 KNO_3 质量分数下的Al/PTFE/ KNO_3 的TG-DSC曲线
Fig. 3 TG-DSC curves of Al/PTFE/ KNO_3 composites with varying mass fractions of KNO_3

由图 3 可知,所有体系在 300~400 °C 均出现吸热峰 A,对应 PTFE 的熔融吸热过程。含 3% KNO₃ 的体系在 367.74 °C 时出现放热峰 B,对应 KNO₃ 分解,放热量为 16.805 J·g⁻¹;在 470.43 °C 时 TG 曲线出现明显失重,同时 DSC 曲线出现放热峰 C,放热量为 53.159 J·g⁻¹,质量损失 60.11%,此处存在 PTFE 分解、Al/PTFE 反应、Al₂O₃ 壳层氟化等多重反应。含 12% KNO₃ 的体系在 317.74 °C 时出现吸热峰 B,为 KNO₃ 的熔融;在 369.63 °C 时出现放热峰 C, TG 曲线下降,表明 KNO₃ 分解放热,放热量为 65.805 J·g⁻¹;在 483.56 °C 时,体系出现明显失重,同时 DSC 曲线出现放热峰 D,质量损失 40%,放热量为 15.788 J·g⁻¹,表明 PTFE 分解并与 Al 反应。含 15% KNO₃ 的体系在 456.52 °C 出现放热峰 B,对应 KNO₃ 的分解放热;在 504.05 °C 时体系 TG 曲线出现明显失重,同时 DSC 曲线出现放热峰 C,样品质量损失 29.26%,释放热量为 138.98 J·g⁻¹,存在 PTFE 分解、Al/PTFE 反应、Al/KNO₃、Al₂O₃ 壳层氟化等多重反应。

引入 KNO₃ 后,Al/PTFE 体系的失重温度均有所提前,表明其反应活性得到提升;当 KNO₃ 含量为 12% 时,提升效果最为显著。分析认为,当 KNO₃ 含量较低时,活性氧供应不足,导致反应进行不充分;含量过高时,分解产生的固态产物(如 K₂O₂、K₂CO₃)可能包裹铝颗粒,阻碍气相氟化物向铝表面扩散,从而抑制 Al 与 PTFE 之间的有效接触。

图 4 是 Ba(NO₃)₂ 质量分数在 3%、12% 和 15% 情况下的 Al/PTFE/Ba(NO₃)₂ 活性材料的 TG-DSC 图。由图 4 可知,所有体系在 300~400 °C 均出现吸热峰 A,对应 PTFE 的熔融吸热过程。含 3% Ba(NO₃)₂ 的体系在 500.9 °C 时 TG 曲线出现明显失重,同时 DSC 曲线出现放热峰 B,判断是 Ba(NO₃)₂ 分解释放的氧气及 PTFE 的分解产物与 Al 发生了反应;550 °C 出现放热峰 C,同时伴随 TG 曲线下降,样品质量损失 54.04%,表明 Ba(NO₃)₂ 分解产物与 PTFE 的分解产物反应,放热量为 2.710 J·g⁻¹。含 12% Ba(NO₃)₂ 的体系在 498.65 °C 时 TG 曲线出现明显失重,同时 DSC 曲线也出现了放热峰 B,此阶段为 Al 与 Ba(NO₃)₂ 分解释放的氧气及 PTFE 的分解产物发生反应,放热量为 33.333 J·g⁻¹,质量损失 40.68%;563.30 °C 时出现放热峰 C, TG 曲线出现下降,表明 Ba(NO₃)₂ 分解产物与 PTFE 的分解产物发生了反应,放热量为 55.010 J·g⁻¹。含 15%

Ba(NO₃)₂ 的体系 514.76 °C 时 TG 曲线体系出现明显失重,推测 PTFE 发生分解,其产物与 Al 及 Ba(NO₃)₂ 分解产物之间相互发生反应,放热量为 89.976 J·g⁻¹,质量损失 56.72%。

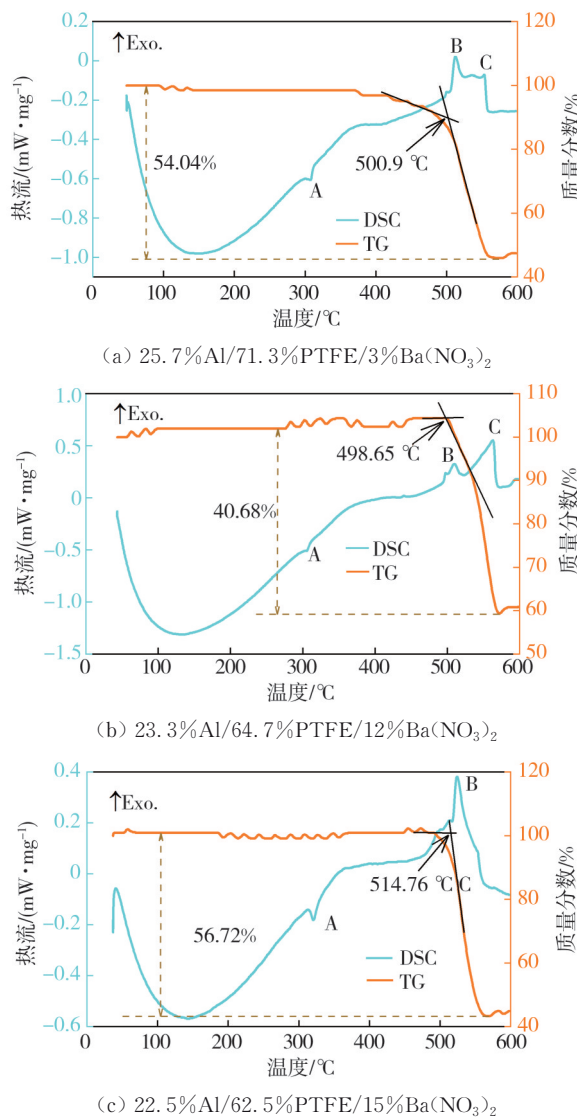


图 4 不同 Ba(NO₃)₂ 质量分数下的 Al/PTFE/Ba(NO₃)₂ 的 TG-DSC 曲线

Fig. 4 TG-DSC curves of Al/PTFE/Ba(NO₃)₂ composites with varying Ba(NO₃)₂ mass fractions

引入 Ba(NO₃)₂ 后 Al/PTFE 的失重温度均提前,提高了 Al/PTFE 的反应活性;尤其 12% Ba(NO₃)₂ 的提升效果最为明显,这是因为在 Ba(NO₃)₂ 含量较低时分解释放的活性氧不足,对 PTFE 裂解和铝氧化的促进作用较弱,而当其含量过多时,O₂ 过浓时会与 Al 生成 Al₂O₃,并与 PTFE 起竞争反应,消耗了部分活性铝。

图 5 是 KClO₄ 质量分数在 3%、12% 和 15% 情况下的 Al/PTFE/KClO₄ 活性材料的 TG-DSC 图。

由图5可知, 300~400 °C时所有体系均出现吸热峰A和吸热峰B, 吸热峰A对应 KClO_4 的晶型转变过程, 吸热峰B为PTFE的熔融吸热过程。含3% KClO_4 的体系在522.78 °C时TG曲线出现明显失重, 同时DSC曲线出现了较大的放热峰C, 放热量为 $184.732 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 质量损失57.85%。含12% KClO_4 的体系在518.25 °C时DSC曲线出现放热峰C, TG曲线也出现明显失重, 放热量为 $193.311 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 质量损失45.09%。含15% KClO_4 的体系在516.83 °C时TG曲线出现明显失重, 放热量为 $244.908 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 质量损失35.34%, 原因是放热峰C存在 KClO_4 分解放氧并与Al反应、PTFE分解产物与 KClO_4 、Al和 Al_2O_3 反应。

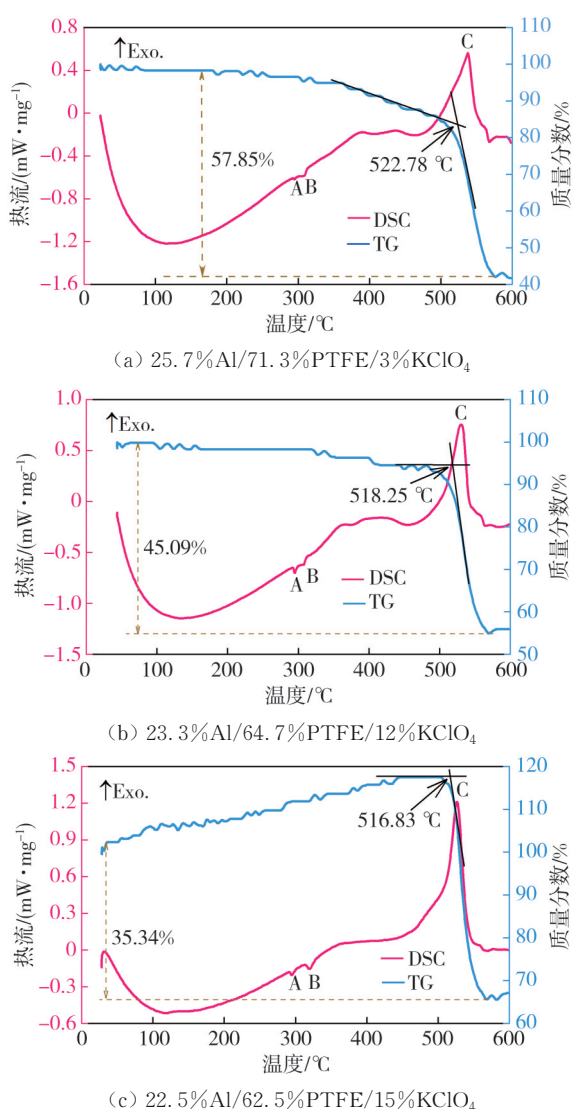


图5 不同 KClO_4 质量分数下的Al/PTFE/ KClO_4 的TG-DSC曲线
Fig. 5 TG-DSC curves of Al/PTFE/ KClO_4 composites with varying KClO_4 mass fractions

引入 KClO_4 后Al/PTFE失重温度均有提前, 提高了Al/PTFE的反应活性; 其中15% KClO_4 提高更

为显著。这主要归因于 KClO_4 分解释放的大量氧气与PTFE分解过程产生热协同效应, 共同促使反应失重阶段提前。随着 KClO_4 含量的增加, 更多氧气可有效破坏 Al_2O_3 钝化层, 从而进一步促进PTFE的分解。

图6是 Fe_2O_3 质量分数在3%、12%和15%情况下的Al/PTFE/ Fe_2O_3 活性材料的TG-DSC图。

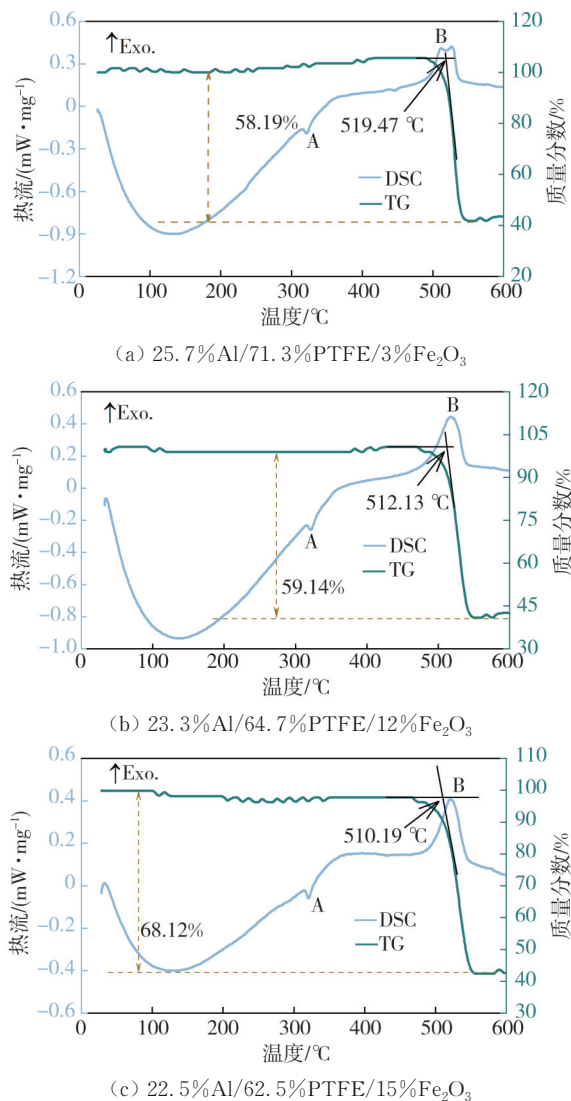


图6 含不同质量分数 Fe_2O_3 的Al/PTFE/ Fe_2O_3 的TG-DSC曲线
Fig. 6 TG-DSC curves of Al/PTFE/ Fe_2O_3 with different mass fractions of Fe_2O_3

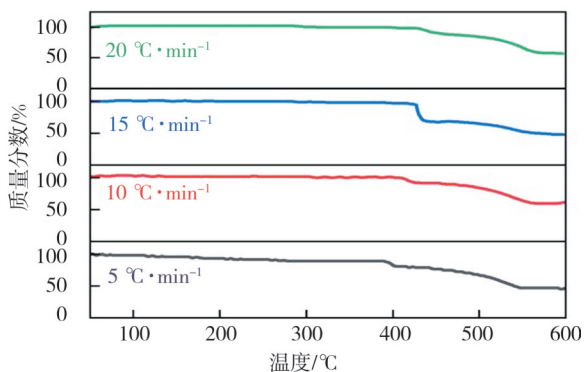
由图6可知, 300~400 °C时所有体系均因PTFE的熔融吸热出现吸热峰A。含3% Fe_2O_3 的体系在519.47 °C时TG曲线出现明显失重, 同时DSC曲线出现放热峰B, 样品质量损失58.19%, 判断是PTFE热分解成气体 C_2F_4 , 并与Al反应且存在铝热反应, 放热量为 $58.819 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 质量损失58.19%。含12% Fe_2O_3 的体系TG曲线在512.13 °C出现明显失重, 同时DSC曲线出现放热

峰 B, 样品质量损失为 59.14%, 判断存在 Al 与 PTFE 分解产物反应、铝热反应等。含 15% Fe₂O₃ 的体系在 510.19 °C 时 TG 曲线出现明显失重, 同时 DSC 曲线出现放热峰 B, 样品质量损失 68.12%, 判断是 PTFE 发生分解并与 Al 反应。

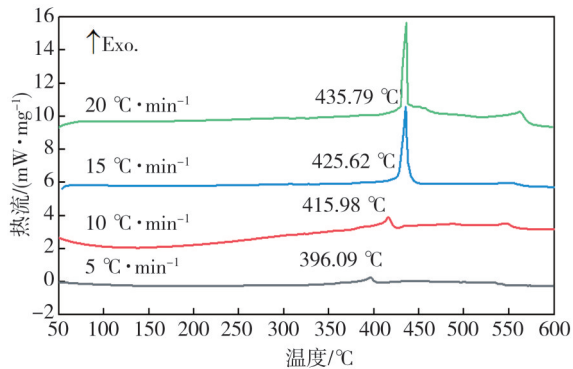
引入 Fe₂O₃ 后 Al/PTFE 失重温度提前效果并不显著, 这是由于 Fe₂O₃ 固体颗粒直接接触铝表面才能触发铝热反应, 无法突破低温高效放热瓶颈, 而前述 3 种氧化剂属于气相氧化剂, 可以通过气体扩散渗透至 Al/PTFE 界面, 实现分子级接触, 故其效果低于气相供氧型氧化剂。

2.4 升温速率对 Al/PTFE 基活性材料反应活性的影响

Guo 等^[28]通过 TG-DSC 分析了 Al/PTFE 在不同升温速率下的热化学行为, 计算得到 Al/PTFE 的活化能为 258.8 kJ·mol⁻¹, 指前因子为 2.495 × 10¹⁵ min⁻¹。采用 TG-DSC 分别测试升温速率为 5, 10, 15, 20 °C·min⁻¹ 时, 12% KNO₃ 及 15% KClO₄ 体系在不同升温速率下对 Al/PTFE 基活性材料反应活性的影响, 测试结果如图 7 和图 8 所示。



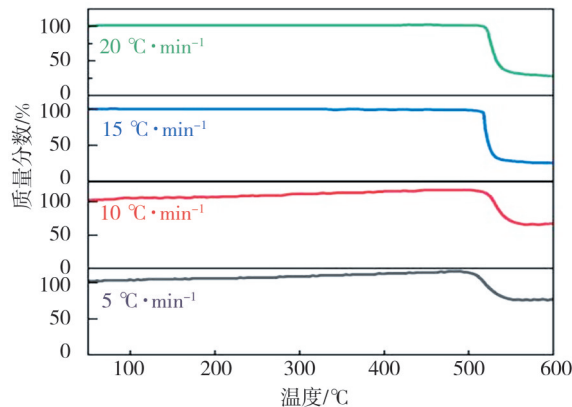
(a) TG



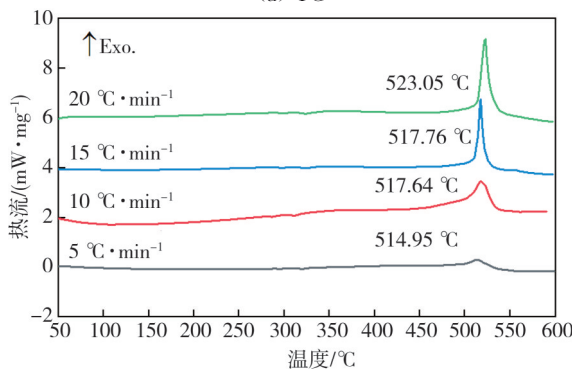
(b) DSC

图 7 不同升温速率下 Al/PTFE/KNO₃(23.3%/64.7%/12%) 的 TG-DSC 曲线

Fig. 7 TG-DSC curves of Al/PTFE/KNO₃(23.3%/64.7%/12%) at different heating rates



(a) TG



(b) DSC

图 8 不同升温速率下 Al/PTFE/KClO₄(22.5%/62.5%/15%) 的 TG-DSC 曲线

Fig. 8 TG-DSC curves of Al/PTFE/KClO₄(22.5%/62.5%/15%) at different heating rates

由图 7 和图 8 可知, 热滞后效应随着升温速率的增加而增强, 使样品的放热峰偏移至高温区域, 这是因为升温快时, 样品内部温度分布不均, 反应滞后于程序升温。

基于本研究中采用的实验方法、样品体系等条件下的热分解反应相关分析, 采用 Kissinger 法对上述两种活性材料的表观活化能进行计算, 12% KNO₃ 体系表观活化能为 128.63 kJ·mol⁻¹, 15% KClO₄ 体系表观活化能为 132.35 kJ·mol⁻¹。因此, 12% KNO₃ 对 Al/PTFE 体系反应活性的提升效果最佳。

3 结论

本研究通过热分析手段评价了各类氧化剂对 Al/PTFE 反应活性的影响, 得出以下结论:

- 1) 在 Al/PTFE 中添加 KNO₃、Ba(NO₃)₂、KClO₄、Fe₂O₃, 均可以提高其反应活性。Fe₂O₃、硝酸盐单一氧化剂体系的反应活性高于 Fe₂O₃ 与硝酸盐复配体系, 这是因为 Fe₂O₃ 与硝酸盐复配体

系各氧化剂之间反应时序与热量的失配,以及惰性相的生成引发了竞争反应抑制效应。

2) 4种氧化剂中 KNO_3 对Al/PTFE反应活性的提高最为显著,含 KClO_4 的Al/PTFE体系反应放热量最大。

3) 氧化剂 KNO_3 提升Al/PTFE反应活性的最佳质量分数为12%,活化能降至 $128.63 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] AMES R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials[J]. MRS Online Proceeding Library Archive, 2006, 896(1): 308.
- [2] WANG H F, ZHENG Y F, YU Q B, et al. Initiation behavior of covered explosive subjected to reactive fragment[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(2): 143-149.
- [3] HE W, LIU P J, HE G Q, et al. Highly reactive metastable intermixed composites (MICs): Preparation and characterization [J]. Advanced Materials, 2018, 30 (41): 1706293.
- [4] ZHANG Y X, JIANG H C, ZHAO X H, et al. Fabrication and characteristics of Al/PTFE multilayers and application in micro initiator [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017, 275 (1): 012045.
- [5] ZHOU X, TORABI M, LU J, et al. Nanostructured energetic composites: Synthesis, ignition/combustion modeling, and applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6 (5): 3058-3074.
- [6] SUNDARAM D, YANG V, YETTER R A. Metal-based nanoenergetic materials: synthesis, properties, and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 61(6): 293-365.
- [7] HU Y H, TAO B W, HAO D Y, et al. Fabrication and mechanistic study of AP/nAl/PTFE spherical encapsulated energetic materials with enhanced combustion performance [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 222: 115701.
- [8] 徐松林, 阳世清, 徐文涛, 等. PTFE/Al反应材料的力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 384-388.
XU Songlin, YANG Shiqing, XU Wentao, et al. Research on the mechanical performance of PTFE/Al reactive materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(5): 384-388. (in Chinese)
- [9] 曹林, 于钟深, 方向, 等. Al/TiH₂/PTFE三元活性材料的热行为研究[J]. 火炸药学报, 2019, 42(6): 583-588.
CAO Lin, YU Zhongshen, FANG Xiang, et al. Thermal behaviors of Al/TiH₂/PTFE ternary active materials [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(6): 583-588 (in Chinese)
- [10] KUWAHARA T A. Metal-fluorocarbon based energetic materials[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2012, 37(3): 373.
- [11] ZHENG X, CURTIS A D, SHAW W L. et al. Shock initiation of Nano-Al+ teflon: Time-resolved emission studies[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(9): 4866-4875.
- [12] LOSADA M, CHAUDHURI S. Theoretical study of elementary steps in the reactions between aluminum and teflon fragments under combustive environments [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2009, 113 (20): 5933-5941.
- [13] URBANSKY E T, SCHOCK M R. Issues in managing the risks associated with perchlorate in drinking water [J]. Journal of Environmental Management, 1999, 56(2): 79-95.
- [14] DASGUPTA P K, MARTINELANGO P K, JACKSON W A, et al. The origin of naturally occurring perchlorate: The role of atmospheric processes [J]. Journal of Environmental Science & Technology, 2005, 39(6): 1569-1575.
- [15] WANG J, ZHANG L, MAO Y, et al. An effective way to enhance energy output and combustion characteristics of Al/PTFE [J]. Combustion and Flame, 2020, 214: 419-425.
- [16] 周丹, 李如江, 周鹏, 等. 高氯酸盐对Al/PTFE活性材料热反应行为的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(7): 150-157.
ZHOU Dan, LI Ruijiang, ZHOU Peng, et al. The effect of perchlorate on the thermal reaction behavior of Al/PTFE active materials [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(7): 150-157. (in Chinese)
- [17] HUANG J Y, FANG X, LI Y C, et al. The mechanical and reaction behavior of PTFE/Al/Fe₂O₃ under impact and quasi-static compression [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017 (1): 3540320-350328.
- [18] HUANG J, FANG X, WU S, et al. Mechanical response and shear-induced initiation properties of PTFE/Al/MoO₃ reactive composites [J]. Materials, 2018, 11(7): 1200-1213.
- [19] ZHOU L, PIEKIEL N, CHOWDHURY S, et al.

- Time-resolved mass spectrometry of the exothermic reaction between nanoaluminum and metal oxides: The role of oxygen release [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(33): 14269-14275.
- [20] WU J X, FENG B, GAO Z R, et al. Investigation on the thermal decomposition and thermal reaction process of PTFE/Al/MoO₃ fluorine-containing thermite [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2021, 241: 109676.
- [21] DING L, ZHOU J, TANG W, et al. Impact energy release characteristics of PTFE/Al/CuO reactive materials measured by a new energy release testing device [J]. *Polymers*, 2019, 11(1): 149-170.
- [22] LAN J, LIU J X, ZHANG S, et al. Influence of multi-oxidants on reaction characteristics of PTFE-Al-X_mO_y reactive material [J]. *Materials & Design*, 2020 186: 108325-108334.
- [23] 王惠娥, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 石墨/硝酸钾的热行为及分解反应动力学研究 [J]. *含能材料*, 2012, 20(6): 731-734.
WANG Huie, SHEN Ruiqi, YE Yinghua, et al. Thermal behaviour and decomposition reaction kinetics of graphite/potassium nitrate [J]. *Chinese Journal of Energetic Material*, 2012, 20(6): 731-734. (in Chinese)
- [24] 曾陆平. 高氯酸钾在引火药中的应用 [J]. *河南化工*, 2011, 28(3): 42-44.
- [25] 谭惠平, 薛金根. DSC 法研究高氯酸钾的催化热分解反应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(3): 114-116.
TAN Huiping, XUE Jingen. Study of catalytic thermal decomposition reaction of potassium perchlorate by DSC method [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27(3): 114-116. (in Chinese)
- [26] 高坤, 罗运军, 李国平, 等. 制备方法对 Al/Fe₂O₃ 纳米铝剂性能的影响 [J]. *火炸药学报*, 2012, 35(3): 11-14.
GAO Kun, LUO Yunjun, LI Guoping, et al. Effects of preparation method on the properties of Al/Fe₂O₃ nanothermite [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2012, 35(3): 11-14. (in Chinese)
- [27] 高坤, 李国平, 罗运军, 等. 热处理对 Al/Fe₂O₃ 纳米铝剂性能的影响 [J]. *火炸药学报*, 2012, 35(6): 19-22.
GAO Kun, LI Guoping, LUO Yunjun, et al. Effect of thermal process on the properties of Al/Fe₂O₃ nanothermites [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2012, 35(6): 19-22. (in Chinese)
- [28] GUO M M, LI X R, CHEN Y K, et al. Microscopic chemical reaction mechanism and kinetic model of Al/PTFE [J]. *Polymers*, 2024, 16(11): 1467.