文章编号:1674-2869(2025)03-0291-07

改性多孔铝粉复合微球的制备及其性能研究

王 菲,李朝东,吴艳光*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:铝(Al)粉作为一种高能活性金属可燃剂,在推进剂和炸药等含能材料中具有重要的研究价值。为了增加Al粉与其他组分间的接触面积,缩短传质传热距离,采用化学刻蚀法对普通Al粉表面进行改性,研制了表面具有孔洞结构的多孔铝(p-Al)粉,并利用硝化纤维素(NC)和聚偏氟乙烯(PVDF)对其进行了表面包覆,制备了一种新型多孔铝基复合微球。通过扫描电子显微镜、能量色散X射线谱仪、傅里叶变换红外光谱仪、X射线衍射仪和同步热分析仪表征了复合微球的结构与热性能。结果表明:经过刻蚀改性后的p-Al与常规Al有显著差异,表面有明显"蚀刻"孔洞结构,有效地提高了其比表面积;在350~500 ℃范围内,NC/p-Al出现放热双峰,放热量为578 J/g,总放热量为1 922 J/g,较NC/Al提升了27.7%;p-Al可以催化PVDF的分解,提前发生预点火反应;对比不同的复合微球,其燃烧残留物表明p-Al的热分解反应更完全。

关键词:含能材料;多孔铝粉;硝化纤维素;接触面积;热性能
中图分类号:V512 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202412023

Preparation and properties of modified porous aluminum powder composite microspheres

WANG Fei, *LI Chaodong*, *WU Yanguang**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: As a high-energy reactive metal combustible agent, aluminum (Al) powder is of great value for the research on energetic materials such as propellants and explosives. To enhance the contact area between Al powder and other components and shorten the mass and heat transfer distances, the surface of conventional Al powder was modified by a chemical etching method. Porous aluminum (p-Al) powder with pore structure on the surface was developed, and its surface was coated with nitrocellulose (NC) and polyvinylidene fluoride (PVDF) to prepare novel porous aluminum-based composite microspheres, whose structure and thermal properties were characterized using scanning electron microscope, energy-dispersive X-ray spectrometer, Fourier transform infrared spectrometer, X-ray diffractometer and synchronous thermal analyzer. The results indicated that after etching modification, p-Al with obvious "etched" pore structures on the surface effectively increases its specific surface area; at 350-500 ℃, NC/p-Al exhibits two exothermic peaks, with a heat release of 578 J/g and a total heat release of 1 922 J/g, 27.7% higher than that of NC/Al; p-Al can catalyze the decomposition of PVDF and cause the pre-ignition reaction to occur in advance; comparing different composite microspheres, the combustion residues indicate that the thermal decomposition reaction of p-Al is more complete.

Keywords: energetic material; porous aluminum powder; nitrocellulose; contact area; thermal performance

收稿日期:2024-12-26
基金项目:湖北省自然科学基金(2020CFB649);武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2023092)
作者简介:王 菲,硕士研究生。Email:wangfay9590@163.com
***通信作者**:吴艳光,博士,副教授。Email:wygddxyz@163.com
引文格式:王菲,李朝东,吴艳光. 改性多孔铝粉复合微球的制备及其性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(3):291-297.

固体推进剂是固体火箭发动机的“心脏”,其性能直接影响火箭发动机的性能[1-2]。铝基含能材料具有高能量密度、成本低、易获取等优势[3-5],与其他常见的含能材料组分(如氧化剂、黏结剂等)之间有较好的相容性,常被用作固体推进剂的重要组分,在军事和民用工业方面具有广泛的应用前景[6-8]。与纳米Al相比,微米Al活性铝含量较高,易于分散和加工,并且具有较高的安全性,已成功应用于高能固体推进剂等含能材料的组分中[9]。然而,微米Al表面致密的氧化壳层使得Al钝化,且活性Al与各含能组分间的接触面积小,导致点火延迟、烧结团聚及能量释放不完全,极大地限制了微米Al的实际应用[10-14]。因此,提高微米Al的反应活性及与其他组分间的接触面积,并解决其团聚问题,是实现微米Al广泛应用所面临的重大难题[15]。

为了进一步提高微米Al的能量释放速率与效率,国内外学者开展了大量研究,发现对Al进行表面改性或包覆处理是提升其反应活性和能量性能的有效手段。Wang等[16]采用全氟十二烷酸对Al_2O_3壳层进行表面刻蚀,形成AlF_3的多孔壳层,增加了Al与氧化剂的接触面积并为其反应形成了新的反应通道,显著提高了铝基含能材料的燃烧性能与能量输出。Tang等[17]将纳米级缺陷引入Al_2O_3壳层中,延缓了壳层从非晶态向γ晶态的相变,显著破坏了壳层的连续性,形成多通道氧化路径。壳层缺陷通过诱发局部应力集中,加速了壳层破裂及Al核的完全氧化。Wang等[18]将Al颗粒均匀分散在硝化纤维素(nitrocellulose,NC)中,明显抑制了颗粒之间的团聚,NC/Al复合材料的点火延迟时间明显缩短。柯香等[19]成功制备了粒径分布较窄(2.5~4.5 μm)的Al/聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride,PVDF)含能微球,燃烧过程释放的含氟气体使Al活性增强,且微球的抗氧化性较纯Al更好,更利于贮存。姜一帆等[20]采用两步低温液相法将Al、PVDF和不同氧化物(CuO等)制备成双层核壳结构的亚稳态分子间复合物,Al与PVDF形成的紧密接触型核壳结构能够显著增强Al的热反应活性。CuO在低温时充当燃烧催化剂,高温时与Al发生铝热反应,促进热释放。Wang等[21]将1,1-二氟乙烯和六氟丙烯的共聚物(Viton A)包覆在Al表面,在加热过程中,Viton A分解并与Al_2O_3反应,破坏致密的Al_2O_3壳层,暴露出核心Al,发生预点火反应,表现出优异的燃烧特性,且Viton A的存在也降低了Al颗粒的烧结。刘石硕等[22]采用溶剂非溶剂法制备了二硝酰胺铵@高氯酸铵球形复合粒子,其吸湿性和撞击感度比简单机械混合更佳,置信度更高,性能更稳定。上述研究表明,PVDF可提高Al的燃烧效率,将Al分散在NC中可减少Al的团聚现象,球形药以其特殊形态减少颗粒间摩擦,为实际应用提供了高效安全的方案。

为进一步提高Al粉与其他组分间的接触面积和能量释放性能,本研究通过化学刻蚀法制备了表面具有孔洞结构的多孔铝(porous aluminum,p-Al)粉[23],以增大其比表面积和反应活性。NC的产气特性,可以破坏Al表面的Al_2O_3。PVDF可以与Al_2O_3进行反应,进一步提升活性Al含量。结合以上特点,本文采用内溶法[24],以p-Al、NC、PVDF为原料,制备了铝基硝化棉微球NC/Al和NC/p-Al,以及铝基聚偏氟乙烯微球PVDF/Al和PVDF/p-Al。对复合微球的微观结构、化学组成及热性能进行了测试与表征,观察Al烧结团聚的现象,为提高铝基含能体系的燃烧性能和能量释放效率提供了新思路。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

N, *N*-二甲基甲酰胺(*N*, *N*-dimethylformamide,DMF)、三乙胺(triethylamine,Et_3N)和乙醇(ethanol,EtOH)(上海泰坦科技股份有限公司);氢氟酸(HF,质量分数为40%,津市天力化学试剂有限公司);Al粉(粒径为25 μm,北京伊诺凯科技有限公司);NC(氮元素的质量分数为12.0%,山西北方兴安化学工业有限公司);乙酸乙酯、明胶和十二烷基硫酸钠(sodium dodecylsulfate,SDS)(国药集团化学试剂有限公司);无水硫酸钠(Na_2SO_4,北京化工厂);PVDF(相对分子质量为400 000,上海麦克林生化科技股份有限公司)。

傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer,FTIR)(美国赛默飞公司,Nicolet 8700型);扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)(日本日立公司,S4800型);X-射线衍射仪(X ray diffractometer,XRD)(德国Bruker公司,D8 Focus);同步热分析仪(simultaneous thermal analysis,STA)(德国NETZSCH公司,STA449F3型)。

1.2　试验方法

1.2.1　p-Al粉的制备　在30 mL DMF溶液中加入一定量的Al粉，机械搅拌并超声分散5 min，使其分散均匀，滴加40 mL刻蚀液（刻蚀液由DMF、HF、Et_3N和EtOH以质量比为77.7∶7.6∶5.5∶9.3组成），反应7.5 min后立即将混合液以600 r/min的转速进行低速离心，分离出下层沉淀，用适量EtOH清洗后抽滤，在真空中干燥24 h，制得p-Al粉。

1.2.2　NC/p-Al的制备　将由乙酸乙酯充分溶解的NC溶液倒入三口烧瓶中，加入Al或p-Al粉，在250 r/min的转速下搅拌30 min，加入适量去离子水，升温至60 ℃后以450 r/min的转速继续搅拌1 h。加入分散剂SDS后将转速提高到550 r/min，继续搅拌50 min，再加入明胶搅拌1 h。将温度升高至70 ℃，蒸馏出部分乙酸乙酯。然后将温度降至60 ℃，加入无水Na_2SO_4脱水30 min，逐步升温至85 ℃，驱除剩余乙酸乙酯。最后将沉淀物用60 ℃去离子水清洗3次制得NC/p-Al复合微球，其具体制备工艺见图1。

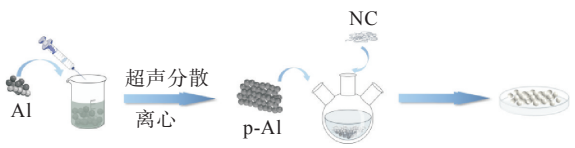

图1　NC/p-Al复合微球的制备工艺

Fig. 1　Preparation process of NC/p-Al powder composite microspheres

1.2.3　PVDF/p-Al制备　称取一定量的PVDF溶解在DMF中，加入Al或p-Al粉，缓慢滴加0.4 mol/L的SDS水溶液，在400 r/min下搅拌1 h使其充分混合均匀。反应结束后抽滤得到样品，真空干燥后备用。

2　结果与讨论

2.1　微观结构

为了研究化学刻蚀法对Al粉颗粒表面的影响以及p-Al与NC、PVDF复合的效果，对原始Al、p-Al及其复合微球进行了SEM测试，结果如图2所示。

图2(a)显示，原始Al粉为表面较平整的球形颗粒，粒径在20~25 μm之间，因受空气氧化，颗粒表面有轻微凸起。图2(b,c)为经过HF刻蚀改性后的p-Al的表面形貌，可以看出改性使其表面氧化膜被“蚀刻”出大小不一的孔洞[图2(c)][23]。与原始Al粉相比，p-Al具有更大的比表面积，增加了与氧化剂(O_2或其他氧化剂组分)的接触面积，提升了Al颗粒反应活性与氧化组分反应的均匀性。

为防止p-Al在储存过程中的氧化，对其进行表面包覆改性，并进一步制备了铝基复合微球。PVDF/p-Al[图2(d)]与NC/p-Al[图2(e)]均呈规整的球型颗粒，且两种复合材料的粒径均明显增大。图2(f)为NC/p-Al表面形貌放大图，可观察到p-Al成功复合在NC微球中。

2.2　红外结构分析

利用FTIR测定铝基复合材料中PVDF和NC的特征官能团，如图3所示。

图3(a)中，两组铝基硝化棉微球在3 450 cm^{-1}处均有较强的羟基(—OH)振动峰。1 657和1 282 cm^{-1}处分别有硝基(—ONO_2)的对称伸缩振动峰和非对称伸缩振动峰[25]，该结果与NC分子中硝酸酯基团的结构特性一致。1 072 cm^{-1}处为醚键(—C—O—)的特征峰，837 cm^{-1}处为硝酸酯基团(—C—O—NO_2)的伸缩振动峰，这些特征峰的出

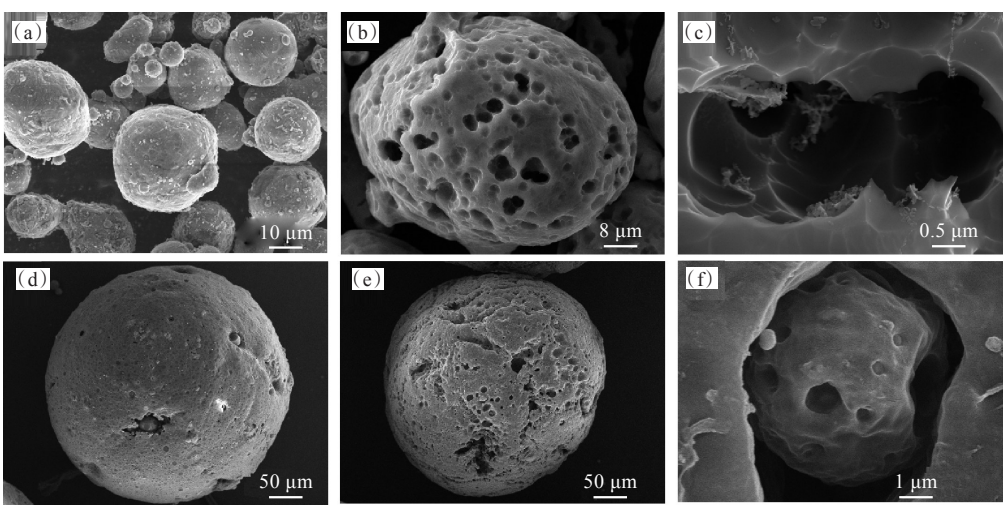

图2　不同微球的表面形貌：(a) Al，(b) p-Al，(c) p-Al表面孔隙，(d) PVDF/p-Al，(e,f) NC/p-Al

Fig. 2　Surface morphology of different microspheres: (a) Al, (b) p-Al, (c) surface pores of p-Al, (d) PVDF/p-Al, (e,f) NC/p-Al

现有效证实了铝基硝化棉微球中NC分子结构的完整性。

图3(b)中显示了两组铝基聚偏氟乙烯微球均在1 404 cm^{-1}处[26]与880 cm^{-1}处表现出PVDF有机骨架中—CH_2基团的面内弯曲振动和C—C键的骨架振动峰,并且二者在1 188 cm^{-1}处都表现出了—CF_2的振动特征峰。

FTIR测试表明,在乙酸乙酯/水体系内,通过内溶法可以成功制备改性铝基NC微球,且PVDF对Al进行了较好的包覆。采用SDS水溶液为非溶剂,DMF为溶剂的溶剂/非溶剂方法,成功实现了PVDF在Al粉表面的可控析出,进而制备出完整的包覆产物。

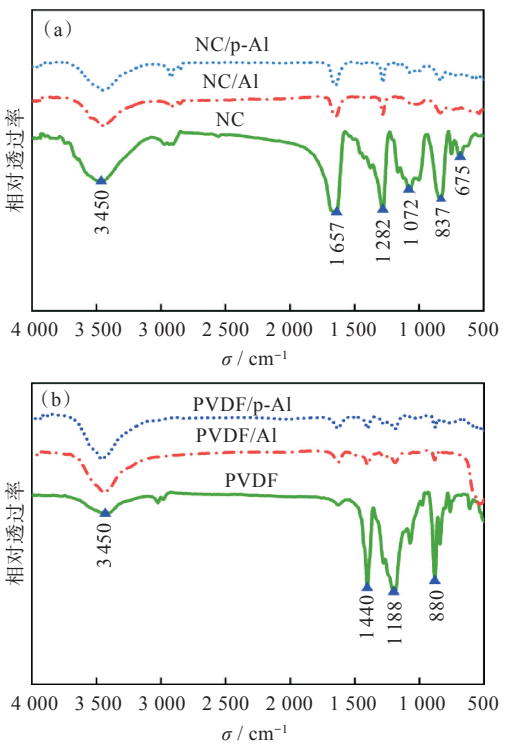

图3 FTIR谱图:(a)铝基硝化棉微球,(b)铝基聚偏氟乙烯微球

Fig. 3 FTIR spectra: (a) Al-based nitrocotton microspheres, (b) Al-based polyvinylidene fluoride microspheres

2.3 热性能测试

采用同步热分析仪对NC/Al、NC/p-Al、PVDF/Al和PVDF/p-Al进行了热重(thermogravimetric analysis, TG)分析和差示扫描量热(differential scanning calorimetry, DSC)分析,结果如图4所示,其中exo方向为放热方向。

图4(a)显示,NC/Al复合微球在150~250 ℃范围内有明显的NC受热分解放热峰,放热量为1 505.0 J/g;在657.7 ℃处有Al吸热熔融峰。这表明NC/Al复合微球在低于700 ℃时仅显示NC的受

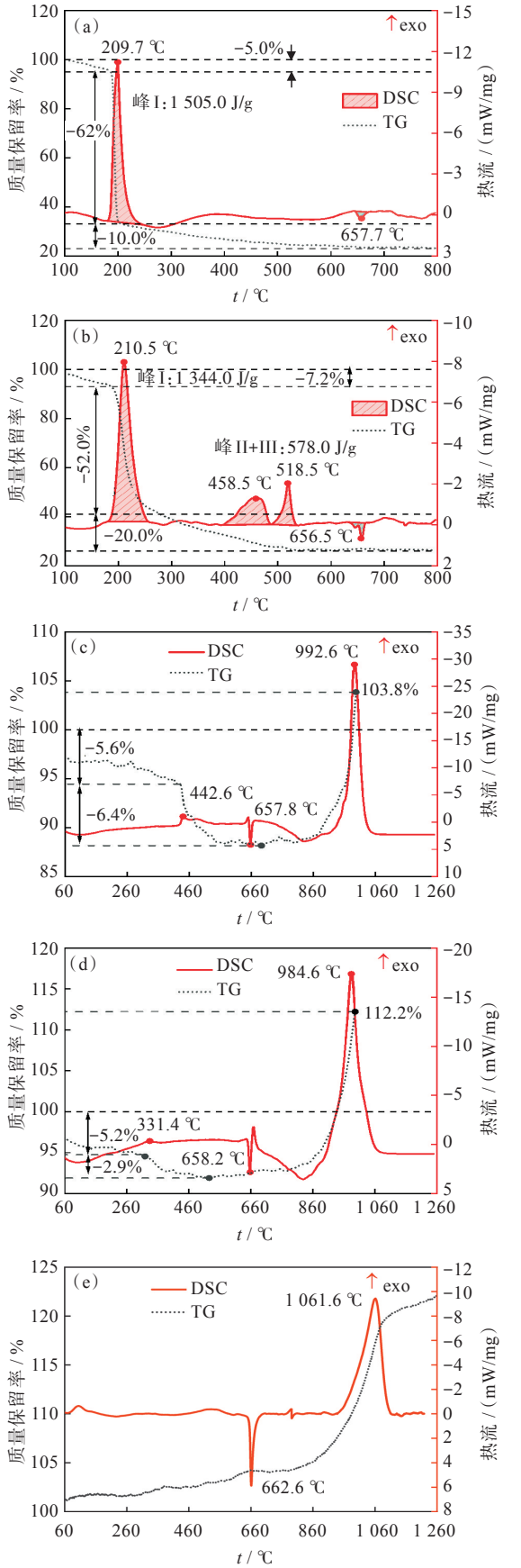

图4 TG-DSC曲线:(a) NC/Al,(b) NC/p-Al,(c) PVDF/Al,(d) PVDF/p-Al,(e) Al

Fig. 4 TG-DSC curves: (a) NC/Al, (b) NC/p-Al, (c) PVDF/Al, (d) PVDF/p-Al, (e) Al

热分解，改性效果较差。

图4(b)显示，NC/p-Al复合微球在150~250 ℃范围内，NC受热分解，放热量为1 344.0 J/g，较NC/Al低10.7%。在350~550 ℃范围内有明显的放热双峰，放热量为578.0 J/g。656.5 ℃为铝粉吸热熔融峰，即NC/p-Al总放热量为1 922.0 J/g，较NC/Al提升27.7%。这可能是因为p-Al与NC复合较紧密，p-Al表面的Al_2O_3氧化壳层被破坏，NC分解产生的NO_2、$HONO^-$和C_xO_y等氮氧化物小分子、碳氧化物小分子或中间体，更易与p-Al反应生成一些不完全氧化产物，降低了250 ℃以内NC分解的放热量。随着温度的升高，这些氧化产物遇到氧气进一步氧化，导致350~550 ℃时双峰的出现。另外，由于NC/p-Al微球复合的较为紧密，在初始分解过程中p-Al可能受热碎裂，进一步增大了Al与氧气的接触面积，并且可能会有部分碎裂的p-Al体积较小，达到了纳米尺度，在350~550 ℃下受热快速氧化。

图4(c)显示，PVDF/Al样品在442.6 ℃有较小的放热峰，这是PVDF的分解峰，PVDF分解释放出较多CF、HF粒子，促使Al粉发生预点火反应，样品在预点火反应前失重约5.6%。预点火反应出现后至657.8 ℃，Al失重约6.4%。由于PVDF质量分数约为6%，因此，其预点火反应可能分解了一定量Al_2O_3，并转换成易溢出的气体或其他物质。

图4(d)显示，PVDF/p-Al样品在331.4 ℃有较小放热峰，可能是PVDF的分解峰，其分解促使Al粉发生预点火反应，此反应前失重约5.2%，反应后p-Al失重约2.9%。对比图4(c)，PVDF/p-Al样品的PVDF分解峰提前，可能是由于多孔结构的p-Al与PVDF的接触较紧密，在发生预点火反应时，Al元素的氟化放热也会催化PVDF分解。在658.2 ℃出现的峰为Al粉熔融的吸热峰，其位置与图4(c)中Al粉熔融吸热峰的位置相同。图4(d)中Al的核心氧化放热峰出现在984.6 ℃，其温度比普通Al的核心氧化放热峰[图4(e)]提前约77 ℃，样品在氧化过程中的总增重率约20.3%。因此，PVDF对Al粉的改性可以引发预点火反应，并且p-Al可以催化PVDF的分解。

2.4　燃烧残留物分析

在空气气氛下，对NC/Al、NC/p-Al、PVDF/Al、PVDF/p-Al进行快速升温燃烧，以25 ℃/min的升温速率升温至1 000 ℃，不进行保温。待样品冷却至室温后，取其燃烧残留物进行XRD、SEM测试。

燃烧残留物的XRD图如图5所示，对比图5(a)与图5(b)，可以发现燃烧残留物在38.5°、44.7°、65.1°、78.2°和82.5°处的衍射峰，分别代表Al的晶面峰(111)、(200)、(220)、(311)和(222)，且强度差异显著，说明燃烧后原始Al的残余Al含量较高。p-Al经PVDF与NC改性后，复合微球快速点火燃烧残留物的Al含量显著降低，表明刻蚀改性后的p-Al可以显著提升Al在点火燃烧过程中的能量释放性能。

由图5(a)与图5(b)燃烧残留物的XRD图可知，PVDF/Al和NC/Al中Al峰强度较PVDF/p-Al和NC/p-Al中Al峰强度更明显，表明前者未氧化的铝含量更高。与AlF_3(PDF#85-1327)、Al_2O_3(PDF#97-005-2024)的XRD标准卡对比，图5(b)中PVDF/p-Al有较明显的AlF_3、Al_2O_3峰，结合图4(d)中核心氧化放热峰的提前，进一步说明了PVDF与p-Al反应效果较优。

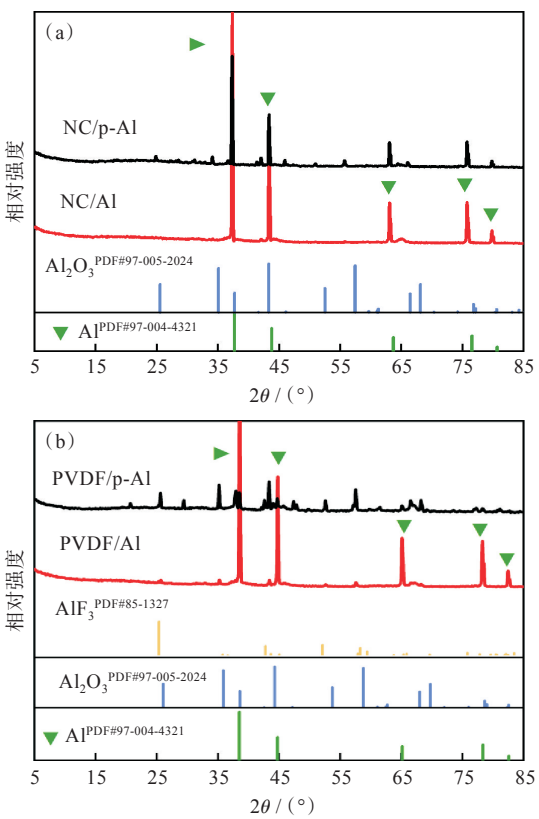

图5　燃烧残留物的XRD图：(a) NC/Al和NC/p-Al，(b) PVDF/Al和PVDF/p-Al

Fig. 5 XRD patterns of combustion residues: (a) NC/Al and NC/p-Al, (b) PVDF/Al and PVDF/p-Al

4种燃烧残留物的SEM表面形貌如图6所示，可以看出NC/Al体系与PVDF/Al体系的颗粒表面存在较大差异，结合图5可知，Al在NC微球分解过程中受热熔融，导致较多的小颗粒黏结在一起，形成整体表面氧化层，降低了Al与O_2的接触面积

及彼此间的氧化程度。对比图6(a)与图6(b)发现,NC/p-Al燃烧残留物表面烧蚀效果更明显,燃烧效果更好。图7与表1显示NC/p-Al燃烧残留物中O元素的质量分数为43.80%,高于NC/Al中O元素的质量分数(35.49%),NC/p-Al燃烧残留物燃烧效果更好,未氧化的Al含量更低。

PVDF/Al[图6(c)]与PVDF/p-Al[图6(d)]的燃烧残留物的SME图显示,PVDF/p-Al的燃烧残留物表面更为粗糙,呈现不规则孔洞与凹坑,表明p-Al在PVDF分解过程中受到了较大破坏。图7表明两者的元素占比差异显著,PVDF/p-Al燃烧残留物中O元素的质量分数为42.88%,而PVDF/Al中的O元素的质量分数为33.33%(表1)。

上述研究表明,经过刻蚀改性后的p-Al在不同的燃烧环境中均展现出更优的能量释放性能。

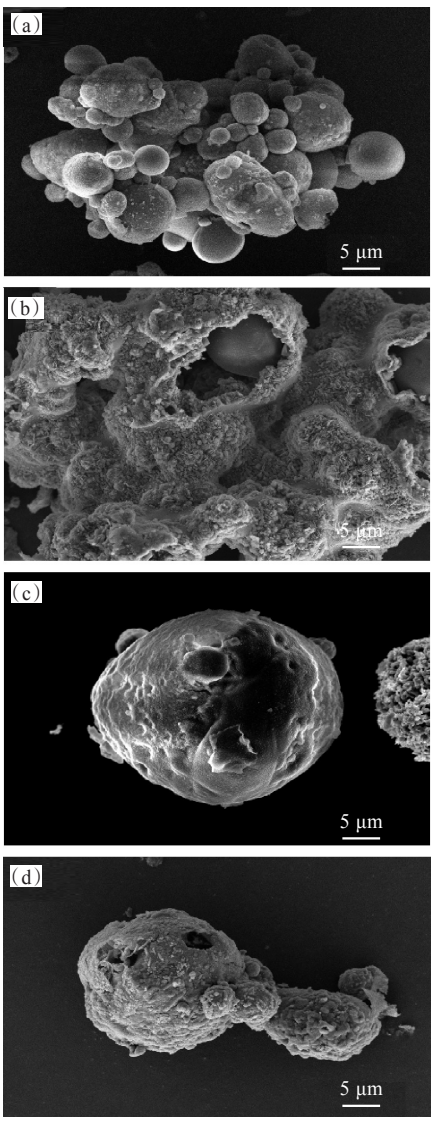

图6 燃烧残留物的SEM图:(a) NC/Al,(b) NC/p-Al,(c) PVDF/Al,(d) PVDF/p-Al

Fig. 6 SEM images of combustion residues:(a) NC/Al,(b) NC/p-Al,(c) PVDF/Al,(d) PVDF/p-Al

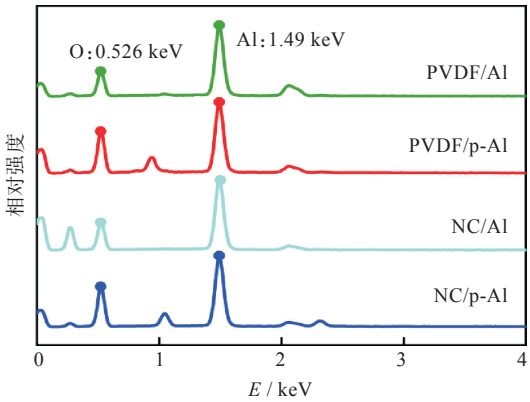

图7 燃烧残留物的EDS谱图

Fig. 7 EDS spectra of combustion residues

表1 燃烧残留物组分

Tab. 1 Combustion residue components

复合材料	残留Al元素的质量分数/%	残留O元素的质量分数/%
NC/Al	64.51	35.49
NC/p-Al	56.20	43.80
PVDF/Al	61.08	33.33
PVDF/p-Al	57.12	42.88

3 结 论

(1)经过刻蚀改性后,Al粉表面呈现明显的蚀刻孔洞。p-Al较原始Al粉具有更高的比表面积。

(2)NC/p-Al在350~500 ℃范围内出现放热双峰,其放热量为578 J/g,总放热量为1 922 J/g,较NC/Al提升了27.7%。

(3)PVDF对Al粉的改性可以发生预点火反应,且p-Al能催化PVDF的分解,提前发生预点火反应。

(4)燃烧残留物分析表明,p-Al在点火过程中会减少产物中Al的残留,提升Al在点火燃烧过程中的热释放性能。

参考文献

[1] BOULKADID M K,LEFEBVRE M H,JEUNIEAU L,et al. Burning rate of artificially aged solid double-base gun propellants [J]. Journal of Energetic Materials,2020,38(1):1-19.

[2] YE B Y,CHEN H Y,SHEN B H,et al. Effect of RGO-MoS_2/MnO_2 nanocomposites with high catalytic activity on the combustion of AP/HTPB composite propellant [J]. Journal of Alloys and Compounds,2023,958:170461.

[3] DELUCA L T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion [J]. Defence

Technology，2018，14(5)：357−365.

[4] SUNDARAM D，YANG V，YETTER R A. Metal-based nanoenergetic materials：synthesis，properties，and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science，2017，61：293−365.

[5] 朱开天，朱权，何伟，等. 微波辅助Al@PVDF-OH复合燃料的制备及其燃烧性能 [J]. 含能材料，2024，32(11)：1145−1153.

[6] MUTLU M，KANG J H，RAZA S，et al. Thermo-plasmonic ignition of metal nanoparticles [J]. Nano Letters，2018，18(3)：1699−1706.

[7] ZHU Y，ZHOU X，XU J B，et al. In situ preparation of explosive embedded CuO/Al/CL20 nanoenergetic composite with enhanced reactivity [J]. Chemical Engineering Journal，2018，354：885−895.

[8] 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.

[9] CHENG Z P，CHU X Z，ZHAO W，et al. Controllable synthesis of Cu/Al energetic nanocomposites with excellent heat release and combustion performance [J]. Applied Surface Science，2020，513：145704.

[10] CHEN S H，YU H S，ZHANG W，et al. Sponge-like Al/PVDF films with laser sensitivity and high combustion performance prepared by rapid phase inversion [J]. Chemical Engineering Journal，2020，396：124962.

[11] GUO J R，SU Z，TIAN J，et al. Enhanced hydrogen generation from Al-water reaction mediated by metal salts [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2021，46(5)：3453−3463.

[12] 陈苏杭，秦钊，李辉，等. Al/PVDF-Al/CuO/PVDF层间堆积多层膜的制备及其燃烧性能研究[J]. 火炸药学报，2021，44(6)：745−752.

[13] YAN T，REN H，LI Y R，et al. Tailoring structural energetics for enhanced reactivity of nano-aluminum particles based microspheres [J]. Advanced Engineering Materials，2019，21(8)：1900176.

[14] YUAN J F，LIU J Z，ZHOU Y N，et al. Aluminum agglomeration of AP/HTPB composite propellant [J]. Acta Astronautica，2019，156：14−22.

[15] 王靖岩，王义智，韩志伟. 铝-氟聚物反应性物质制备及研究进展[J]. 含能材料，2020，29(1)：78−86.

[16] WANG J，QU Y Y，GONG F Y，et al. A promising strategy to obtain high energy output and combustion properties by self-activation of nano-Al [J]. Combustion and Flame，2019，204：220−226.

[17] TANG W Q，YANG R J，HU J H，et al. Aluminum particles with nano-size defects in their alumina shells and their thermal oxidation properties [J]. Journal of Alloys and Compounds，2021，874：159877.

[18] WANG W M，LI H，YANG Y J，et al. Enhanced thermal decomposition，laser ignition and combustion properties of NC/Al/RDX composite fibers fabricated by electrospinning [J]. Cellulose，2021，28 (10)：6089−6105.

[19] 柯香，张伟强，张大鹏，等. Al/PVDF含能微球的制备及其性能分析[J]. 火炸药学报，2021，44(6)：865−872.

[20] 姜一帆，于宪峰，李辉，等. 双层核壳结构Al/PVDF/MO亚稳态分子间复合物的制备、表征及其热反应特性研究[J]. 火炸药学报，2022，45(4)：494−503.

[21] WANG J Y，LI Y N，HAN Z W，et al. Study on the preparation and combustion performance of Al-F composites prepared by a solvent/non-solvent method [J]. Surface & Coatings Technology，2022，440：128455.

[22] 刘石硕，姚南，王德齐，等. 球形ADN及ADN@AP复合粒子的制备与性能研究[J]. 火炸药学报，2023，46(2)：117−125.

[23] LI C D，PI Z L，WANG F，et al. Pore structure regulation of aluminum powder as a filler for high energy solid propellants [J]. Materials Chemistry and Physics，2024，314：128911.

[24] 羿庄城，柴宽，吴艳光，等. 含不同燃速催化剂的NC/GAP复合球形药的制备与热分解性能[J]. 含能材料，2020，28(8)：759−765.

[25] 柴华，戚凯旋. 含氮量对硝化纤维素热解过程影响研究[J]. 中国安全科学学报，2024，34(10)：158−165.

[26] 楚诗好，郑志皓，何承珂，等. 二氧化硅/聚四氟乙烯疏水海绵的制备[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(2)：170−173，218.

本文编辑：苗　变