

高压物理学报

表面活性剂改性硝酸铵性能

汪鑫齐 吴红波 胡鹏飞 任梦雨 谢孟治 夏文杰 朱磊磊

Properties of Surfactant-Modified Ammonium Nitrate

WANG Xinqi, WU Hongbo, HU Pengfei, REN Mengyu, XIE Mengzhi, XIA Wenjie, ZHU Leilei

引用本文:

汪鑫齐, 吴红波, 胡鹏飞, 等. 表面活性剂改性硝酸铵性能[J]. 高压物理学报, 2026, 40(5):050110. DOI: 10.11858/gywlb.20251252

WANG Xinqi, WU Hongbo, HU Pengfei, et al. Properties of Surfactant-Modified Ammonium Nitrate[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2026, 40(5):050110. DOI: 10.11858/gywlb.20251252

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251252>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无机盐对硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能的影响

Influence of Inorganic Salts on the Dissolution Temperature of Ammonium Nitrate and the Explosive Performance of Expanded Ammonium Nitrate Explosives

高压物理学报. 2025, 39(4): 045102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240914>

低温环境对乳化炸药爆炸性能的影响

Effect of Low Temperature Environments on the Explosive Properties of Emulsion Explosives

高压物理学报. 2024, 38(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240712>

水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响

Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive

高压物理学报. 2025, 39(3): 031302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240885>

ANPyO@PDA复合材料的制备、表征及热分解性能

Preparation, Characterization and Thermal Decomposition Properties of ANPyO@PDA Composites

高压物理学报. 2023, 37(6): 063402 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230697>

六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响

Effect of Hexamethylenetetramine Content on the Performance of Ammonium-Amine Explosives

高压物理学报. 2023, 37(5): 055201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230691>

甲酸铵含量对现场混装乳胶基质流变及热分解性能的影响

Influence of Ammonium Formate Content on Rheological and Thermal Decomposition Properties of On-Site Mixed Emulsion Matrix

高压物理学报. 2025, 39(1): 011302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240845>

DOI: 10.11858/gywlb.20251252

表面活性剂改性硝酸铵性能

汪鑫齐, 吴红波, 胡鹏飞, 任梦雨, 谢孟治, 夏文杰, 朱磊磊

(安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 多孔硝酸铵因其多孔结构常被用于特定作业,但其运输成本较高。为此,以离子表面活性剂 PST 为添加剂,通过喷雾造粒法制备了多孔改性硝酸铵,研究了不同质量分数(0~0.4%)的 PST 对硝酸铵孔隙结构、吸油率、热稳定性及爆炸性能的影响。结果表明:随着 PST 含量的增加,硝酸铵由致密颗粒逐步转变为具有明显连通孔隙的多孔结构,热稳定性基本保持不变,基体化学组成未发生本质改变,但吸附水降低。改性后样品与油相的结合能力提高,所配装药的爆速由未改性时的“未正常起爆”提升至 2 831.85 m/s。微量 PST 可在基本不损害热安全性的前提下,诱导硝酸铵形成多孔结构,并显著改善爆速表现,具有较大的工程应用潜力。

关键词: 改性硝酸铵; 喷雾造粒; 孔隙率; 热稳定性; 爆炸性能

中图分类号: TQ110; TB332; O521.9

文献标志码: A

硝酸铵(ammonium nitrate, AN)作为工业炸药的主要成分,长期以来在民用爆破领域发挥着至关重要的作用^[1]。普通硝酸铵在实际应用中存在吸油率低、感度不足、爆炸性能差等问题^[2-3],从而限制了其在爆破领域的进一步应用。多孔硝酸铵特有的孔隙结构使其满足爆破工程对原材料性能的要求,但其生产工艺复杂,且能耗较高;此外,多孔结构导致较低的堆积密度,单位质量产品的仓储与物流空间占用增大,进而提高了综合成本。为了克服这些局限性,本研究将提出一种将普通硝酸铵或硝酸铵溶液改性为具有多孔结构硝酸铵的方法。

国内外学者对硝酸铵进行了大量研究。陈阳等^[4]为了提高硝酸铵炸药的安全性,以尿素和硫酸铵为添加剂,对硝酸铵进行结构改性,改善了其表面结构,提高了活化能,延缓了反应终止峰的到来。刘博^[5]针对硝酸铵固有的吸湿性问题,优化了硝酸铵的热分解行为。张洪^[6]对硝酸铵进行了改性膨化处理,利用喷雾干燥重结晶法制取改性硝酸铵,通过加入十八烷胺醋酸盐,达到了明显改善硝酸铵性能的效果,使用十八烷胺醋酸盐与十二烷基苯磺酸钠为主的复合表面活性剂改性的硝酸铵的各项性能明显优于未改性的粒状硝酸铵。郭紫卿等^[7]通过加热并混合多孔粒状硝酸铵与膨化剂溶液,经真空脱水处理后得到表面敏化改性 PGAN,进而制备了多种工业炸药。戴礼等^[8]选用阴、阳离子表面活性剂及其复合改性剂对硝酸铵进行表面处理,改性后硝酸铵的吸湿性得到了较好的改善。叶志文^[9]研究发现, Gemini 表面活性剂对膨化硝酸铵具有较好的改性能力,使其满足工程中对爆炸性能和物理性能的需求。Ruhchemie 公司开发了一种可作用于硝酸铵表面的聚乙烯薄膜材料^[10],减少了水分子的吸附。

多孔结构显著提高了硝酸铵的比表面积和孔隙率,增强其对燃料油的吸附能力和爆轰感度^[11]。在民用爆破领域,多孔硝酸铵主要用于制造铵油炸药等产品,广泛应用于爆破工程、采矿、建筑、公路和铁路建设等领域^[12-13]。本研究选用以 Na₂SO₄ 为主体的离子表面活性剂 PST 对硝酸铵进行改性,以改变硝酸铵颗粒的结构和表面性质;采用喷雾造粒工艺制备改性硝酸铵颗粒,并从微观孔隙结构、吸油性、热稳定性和爆炸性能等方面进行系统评估。

* 收稿日期: 2025-11-06; 修回日期: 2025-12-11

基金项目: 安徽高校自然科学研究重大项目(2024AH040070)

第一作者: 汪鑫齐(2000—),男,硕士研究生,主要从事工业炸药研究. E-mail: 93114508@qq.com

通信作者: 吴红波(1975—),男,博士,教授,主要从事爆破器材与安全研究. E-mail: hbwu@aust.edu.cn

1 实 验

1.1 试剂与仪器

试剂: 硝酸铵, 工业级, 河南晋开化工集团有限公司; 离子表面活性剂 PST; 去离子水, 自制; 0 号柴油, 中国石油化工集团有限公司。

仪器设备: X 射线衍射仪, 日本理学公司; 实验室喷雾干燥机, 上海雅程仪器设备有限公司; 真空干燥箱, 上海博迅实业有限公司; 台式扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM), 日本 Hitachi 公司; 同步热重气质红外联用仪, 梅特勒托利多科技 (中国) 有限公司; 吸油性能测试装置, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司; BSW-3A 型爆速测试仪, 湖南湘西州奇博矿山仪器厂。

需要说明的是, 本研究中离子表面活性剂 PST 的作用更侧重于作为一种结构导向剂, 通过改变硝酸铵结晶过程中的离子环境, 干扰晶体的正常生长, 从而在宏观上实现类似表面活性剂调控界面性质的效果, 诱导形成多孔结构。

1.2 改性硝酸铵的制备

依据表 1 所示的改性硝酸铵溶液配方, 控制加入添加剂 PST 的质量分数, 制备 5 组不同 PST 浓度的硝酸铵混合溶液, 其中, E1 为空白对照组。

表 1 改性硝酸铵溶液配方
Table 1 Modified ammonium nitrate solution formulation

No.	Mass fraction of PST/%	Mass fraction of AN/%	Mass fraction of H ₂ O/%
E1	0	60.00	40
E2	0.06	59.94	40
E3	0.12	59.88	40
E4	0.18	59.82	40
E5	0.24	59.76	40

将硝酸铵改性溶液 E1~E5 分别加热至完全溶解, 搅拌均匀, 利用喷雾干燥仪对 5 组溶液进行重结晶造粒^[14], 如图 1 所示。先对仪器预热, 防止溶液在输送过程中发生结晶造成堵塞, 随后将溶液分别经供料系统加压, 蠕动速度为 35 r/min, 通过喷嘴形成高速液膜, 随后分裂为微小液滴, 进风温度设置为 135 °C, 硝酸铵液滴在高温气流作用下迅速干燥并固化为颗粒状产物, 最终收集于样品瓶中。

获得改性硝酸铵粗样品后, 采用真空干燥箱对其进行进一步脱水处理。设定干燥温度为 70 °C, 通入热空气并维持约 3 h, 直至样品质量恒定为止, 此时可视为干燥过程完成。对干燥后的改性硝酸铵进行筛分处理, 收集 10~30 目样品, 最终获得粒度分布相对集中的改性硝酸铵样品 E1~样品 E5, 对应的 PST 质量分数分别为 0、0.1%、0.2%、0.3% 和 0.4%。

1.3 实验方案

(1) 添加剂成分分析: 对离子表面活性剂 PST 样品进行干燥处理, 研磨成粉, 采用 X 射线衍射仪对其进行物相分析, 鉴定 PST 成分, 进而分析其对硝酸铵改性的影响机制。

(2) 改性硝酸铵微观结构观测: 采用 SEM 分别对改性前、后的硝酸铵样品进行形貌观测, 通过对

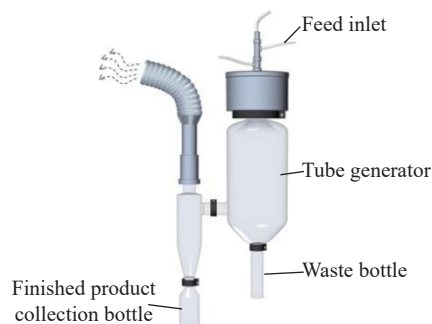


图 1 喷雾干燥制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spray drying preparation

比,分析 PST 在硝酸铵结晶过程中的作用机理。

(3) 热稳定性分析:采用热重-傅里叶变换红外光谱(thermogravimetry-Fourier transform infrared spectroscopy, TG-FTIR)联用技术,对改性前、后的硝酸铵样品在程序升温条件下的热分解行为进行研究^[15],通过实时监测样品在热分解过程中的质量损失变化,同步分析释放出的气相产物组成,综合评价改性处理对硝酸铵热稳定性和分解机制的影响。

(4) 吸油性能表征:为评价 PST 对硝酸铵表面特性及疏油性能的影响,采用真空抽滤法,对改性前、后的硝酸铵样品进行油吸附能力测试。混合液在压差作用下迅速通过滤纸,实现固液分离。每组实验重复 3 次。吸油率(x)^[6]为

$$x = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为样品吸油前的总质量, m 为样品吸油后的总质量。

(5) 爆速测试:将改性前、后的硝酸铵样品与柴油按 94.5 : 5.5 的质量比均匀混合,制备成铵油炸药^[16]。参照 GB/T 13228—2015《工业炸药爆速测定方法》测定爆速。每组样品重复测试 2 次,最终的爆速值取 2 次测量结果的平均值,分析改性处理对铵油炸药爆轰性能的影响。

2 实验结果分析

2.1 PST 的 X 射线衍射分析

将研磨后的添加剂 PST 均匀地填充至样品架的凹槽中,经过压实处理后,置于 X 射线衍射仪的样品台上进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试。图 2 为 PST 的 XRD 谱。与标准卡片进行对比,结果显示,PST 的主要成分为 Na_2SO_4 。

2.2 SEM 分析

采用 SEM 对硝酸铵改性前、后的样品进行表面形貌观测,对比分析差异及变化趋势,结果如图 3 所示。

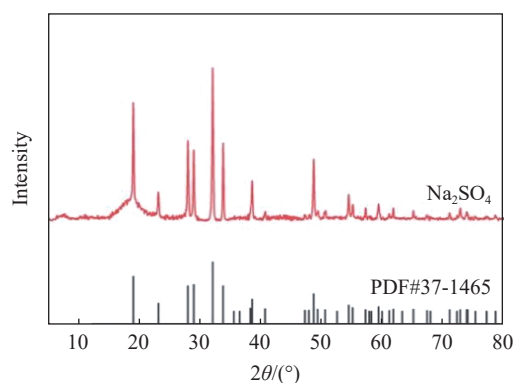


图 2 PST 的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of PST

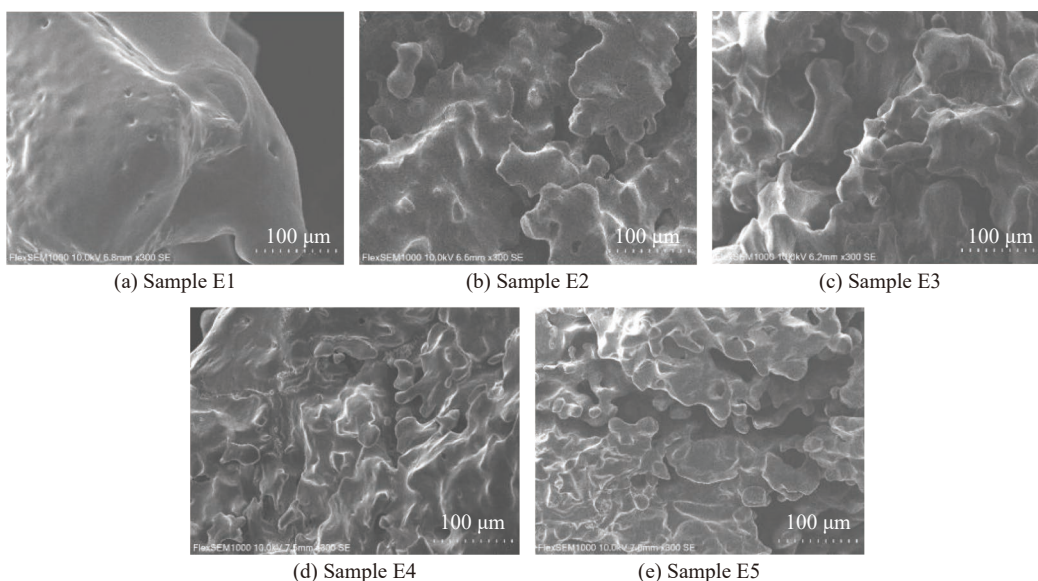


图 3 改性硝酸铵表面的 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of surface morphology of modified ammonium nitrate

图 3(a) 为未添加 PST 的空白对照组 E1 的 SEM 图像。可见, 硝酸铵表面以连续晶面与少量浅凹为主, 孔洞稀疏且尺度极小, 大多为闭口孔, 连通性近乎缺失, 整体的孔隙度最低, 属于致密基体的代表, 其微观结构与普通硝酸铵相似。

经 PST 改性处理后的样品表面形貌和内部结构发生显著变化。如图 3(b) 所示, 当 PST 的质量分数为 0.1% 时, 改性硝酸铵样品 E2 的表面出现不规则孔隙, 孔径为 20~80 μm , 孔壁较厚, 局部孔洞相互接近, 但贯通有限, 孔洞分布不均匀, 连通性较空白对照组略有提高, 表明 PST 已对硝酸铵晶体表面产生初步蚀刻或抑制晶体完整生长。

如图 3(c) 所示, 当 PST 的质量分数为 0.2% 时, 改性硝酸铵样品 E3 的局部区域发生明显坍塌和聚合, 形成发达的多级孔隙系统; 大量卷曲边缘与薄壁构成三维海绵状骨架, 形成以开口孔为主的连通网络; 孔径主要为 50~150 μm , 通道贯通性较强, 渗透通量潜力较高, 孔隙度较大。

图 3(d) 显示了 PST 的质量分数为 0.3% 的改性硝酸铵样品 E4 的形貌。其结构变化较为显著: 原始晶体轮廓基本消失, 形成高度发达的多孔团聚体, 孔隙呈交错连通状, 比表面积极大地增加; 表面呈层状、波纹状褶皱, 发育狭长的裂缝和孔腔, 孔径为 10~50 μm , 喉道较窄, 且路径曲折; 宏孔数量少于样品 E3, 但分布相对均匀, 连通性和整体孔隙度有所提高。

图 3(e) 给出了 PST 的质量分数为 0.4% 的改性硝酸铵样品 E5 的 SEM 图像。可见, 样品 E5 形成典型的泡沫状结构, 宏孔(孔径 30~120 μm)之间由小喉道(直径 5~20 μm)相连, 表现出明显的多级孔特征; 以开口孔为主, 连通性强, 孔壁较厚, 兼具较高的孔隙度与一定的结构稳定性。

综上, 样品 E1 为致密基体基准, 样品 E2 显示出多孔化初期特征, 样品 E3 形成较为发达的宏孔连通网络, 样品 E4 以缝隙-片层通道为主且均匀性较好, 样品 E5 则呈现宏孔与细喉道协同的多级孔结构。

2.3 TG-FTIR 分析

采用 TG-FTIR 对改性前、后的样品进行热分解行为与挥发产物表征^[17]。图 4(a) 为 5 个样品的 TG (thermogravimetry) 曲线, 图 4(b) 为 DTG (derivative thermogravimetry) 曲线。

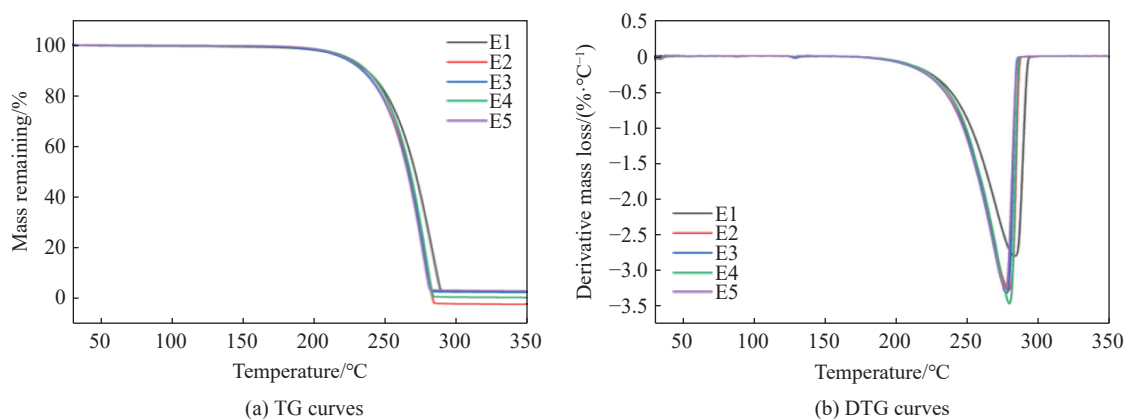


图 4 改性硝酸铵的 TG 和 DTG 曲线

Fig. 4 TG and DTG curves of modified ammonium nitrate

在惰性氛围与线性升温条件下, 5 组样品的质量在 30~230 $^{\circ}\text{C}$ 基本恒定, 未见明显失重。随后, 在 250~290 $^{\circ}\text{C}$ 出现明显失重台阶, 300 $^{\circ}\text{C}$ 时接近零, 符合硝酸铵在惰性气氛中主要生成气相产物的特征。DTG 曲线仅出现 1 个尖锐的失重峰。与样品 E1 相比, 改性硝酸铵样品 E2~样品 E5 的起始分解温度和峰温仅有数摄氏度的轻微左移, 而 DTG 曲线峰高略增, 改性硝酸铵的分解动力学被 PST 温和调控, 即主分解时间略微提前, 主分解速率略有提高。改性后的 4 个硝酸铵样品的 TG 和 DTG 曲线相似。

图 5 为硝酸铵改性前后样品的红外吸收光谱。整体上看, 各样品的主要吸收峰位置保持一致, 说明改性过程中, 硝酸铵的基本化学组成未发生根本变化, 随着 PST 含量的增加, 峰强出现细微差异。

3 500 cm^{-1} 附近的吸收峰对应于N—H及O—H伸缩振动。样品E1中该峰的强度较高,说明体系中存在较多自由水或弱结合的水;随着PST含量的增加,该峰逐渐减弱并略有移动,说明PST的添加削弱了硝酸铵表面吸附水的能力,同时形成了较稳定的氢键网络结构。1 306和2 237 cm^{-1} 附近的特征峰分别对应 NO_3^- 的对称和反对称伸缩振动,是硝酸铵的典型吸收峰。在各样品中,该特征峰的形状和位置基本保持一致,改性过程中相关化学键的振动特征未发生显著变化。

综上,随着PST含量的增加,硝酸铵颗粒内部的氢键网络被重新构建,吸附水含量逐渐降低,分子间作用力与晶格微环境发生变化,促使体系由致密结构向多孔结构转变。

2.4 吸湿吸油性能

对改性前后的样品进行吸油率检测,结果显示,样品E1、E2、E3、E4和E5的吸油率分别为6.84%、8.76%、9.09%、9.25%和9.91%。

随着PST含量的增加,硝酸铵样品的吸油率呈持续上升趋势,由6.84%增至9.91%。样品E1的吸油率最低,表明其颗粒结构较为致密,孔隙率较低,不利于油相物质的渗入与吸附。当PST的质量分数增至0.1%时,吸油率提升至8.76%,增幅达28%,说明PST在样品表面及晶格间产生了一定的扰动作用,促进了孔隙形成,使颗粒结构由致密向疏松转变。当PST的质量分数增加至0.2%和0.3%时,吸油率分别提升至9.09%和9.25%,增长趋缓,表明孔隙结构逐渐稳定,新增PST对吸油性能的提升作用减弱。当PST的质量分数增加至0.4%时,吸油率达到9.91%,较未改性样品E1提高约44.9%。此时,样品内部形成了较为发达的多孔网络结构,能够有效吸附并保存油相,从而显著增强整体吸油性能。改性后样品表面由平整致密转变为粗糙多孔,孔隙数量与连通性明显提高。

综上,PST通过重构硝酸铵晶体间的微观结构、提高比表面积和孔隙率,显著提高了硝酸铵的吸油率。

2.5 爆速测试

基于改性前、后的硝酸铵样品制备铵油炸药,测试炸药的爆速,结果显示,由样品E1制备的铵油炸药为半爆,基于样品E2、E3、E4、E5的铵油炸药的爆速分别为2 536.59、2 734.76、2 790.02、2 831.85 m/s。

由于样品E1的孔隙结构不足,氧化剂与可燃剂的接触效率较低,所制成的铵油炸药未能形成稳定的爆轰波,发生半爆现象。由样品E2制成的铵油炸药的爆速为2 536.59 m/s,其能量传递链已形成基本可持续的反应通道;由样品E3、E4和E5制成的铵油炸药的爆速进一步提高,但差异相对较小。

随着PST含量的增加,炸药爆速呈上升趋势,并呈现“低→高→稳”的变化规律。由样品E3、E4和E5制成的铵油炸药的爆速基本达到平台区,体系的氧化剂、燃料比例及能量传递结构已处于较为合理的平衡状态,炸药性能主要受装填密度及起爆条件等宏观因素影响,而非微观改性差异。继续增加PST或许能够略微提高吸油量,但对能量释放速率的影响有限,并且孔隙率过高反而影响爆轰波的传递,进而影响爆速。

3 机理分析

PST在硝酸铵溶解、喷雾干燥和重结晶这一过程中主动参与了晶体生长和水分挥发,将致密的硝酸铵重塑成具有高度连通孔隙网络的颗粒。硝酸铵晶体依次经历I、II、III和IV多级相变^[18],为颗粒内

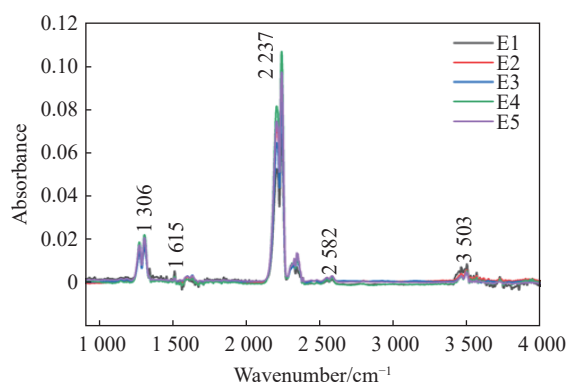


图5 改性硝酸铵的红外光谱

Fig. 5 Infrared spectra of modified ammonium nitrate

部孔隙的萌生、扩展与连通提供了驱动力和结构基础。在 NO_3^- 的对称、反对称伸缩振动等硝酸铵特征区, 改性硝酸铵样品的峰位保持一致, PST 没有引入新的共价键型或生成新的化学相, 硝酸铵主体骨架仍然存在, 体系为被重构的硝酸铵, 性能变化主要来自物理微观结构层级的重排。

图 6 为硝酸铵改性机理示意图。硝酸铵属于高亲水性的离子晶体, 具有明显的晶型转变特征和强烈的吸水性; 在快速干燥过程中, 溶质能均匀成核, 并沿既定晶面规则生长, 得到致密团聚体。引入微量 PST 后, 体系的离子环境被改变, SO_4^{2-} 和 Na^+ 在溶液中会与 NH_4^+ 、 NO_3^- 产生竞争参与配位, 扰乱硝酸铵原本的优先生长晶面, 使结晶过程从规则外延式长大转变为多点异质成核和早期终止生长。

样品 E1 中 $3\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 处的 N—H、O—H 伸缩带的强度最高, 样品 E2~样品 E5 则明显减弱, 说明样品 E1 中存在更多的自由水或弱束缚水, 加入 PST 后, 水分不再以吸附水、结晶水的形式留在晶界, 而是变成在快速干燥中逃逸出来的膨胀源, 使改性样品呈现多孔骨架。

一旦形成孔隙网络, 固相传热与分解产物的扩散路径数量大幅增加, 路径距离大幅缩短; 颗粒在冲击、挤压载荷下更容易形成热点。样品 E1 属于高度致密原料, 能量需要更长的距离、更多的累积才能把分解反应推到稳定爆轰; 样品 E2~样品 E5 内部充满细孔, 这些区域在受到冲击时会更快达到热失稳阈值, 进而在更短的距离内建立稳定的爆轰波。TG/DTG 曲线显示, 样品 E2~样品 E5 的分解温度略提前, 分解速率略增强, 说明硝酸铵颗粒的热点更容易形成, 即 PST 改性后的多孔硝酸铵更容易被点燃并保持燃烧、爆轰的氧化剂骨架, 敏感性略有提高。改性硝酸铵颗粒具有较高的比表面积, 使油相燃料更多地被吸入并锁定在内部孔道中, 将原本局部燃点、局部反应体系改造成准连续反应带。受起爆刺激后, 这种高度互穿结构可以在非常短的距离内迅速建立稳定的能量释放前沿。因此, 由样品 E1 制成的铵油炸药表现为“半爆”, 而由样品 E2~样品 E5 制成的铵油炸药则都能实现完整爆轰, 且爆速从 $2\ 536.59\ \text{m/s}$ 提升到 $2\ 700\sim 2\ 800\ \text{m/s}$ 。当 PST 的质量分数提高到 0.2% 以后, 继续提高 PST 含量, 爆速的提升非常有限, 说明一旦孔隙与燃料网络达到贯通阈值, 进一步增加孔隙度并不会显著增加爆轰波的驱动压力或前沿稳定性, 体系性能转入饱和区, 从反应区结构上看, 已经同属“可稳定爆轰”的一类。

4 结 论

通过向硝酸铵溶液中添加离子表面活性剂 PST, 经喷雾重结晶造粒后, 在不显著改变其化学组成的前提下实现了结构调控, 达到以下改性效果:

(1) 当 PST 的质量分数由零提高至 0.4% 时, 颗粒由致密结构逐步转变为多孔结构, 孔隙度提高, 吸油率整体上升, 从 6.84% 提高到 9.91%, 比表面积和油相承载能力显著增强;

(2) 改性样品的热稳定性仅小幅下降, 未出现新的热分解, 硝酸铵的基本化学结构未被破坏, 且改性样品的水分含量更低;

(3) 采用改性硝酸铵配制的铵油炸药的爆速由半爆提升至 $2\ 831.85\ \text{m/s}$, 且当 PST 的质量分数在 0.2%~0.4% 区间时, 由改性硝酸铵配制的铵油炸药的爆速基本稳定在约 $2\ 800\ \text{m/s}$ 。

利用常规硝酸铵或硝酸铵溶液等低成本原料, 采用 PST 对其进行多孔化改性, 实现了原位制孔, 为现场制备高性能多孔硝酸铵奠定了工艺基础与理论支撑, 具有潜在的工程推广价值, 在性能优化与整体成本控制方面展现出较强的实际应用价值。

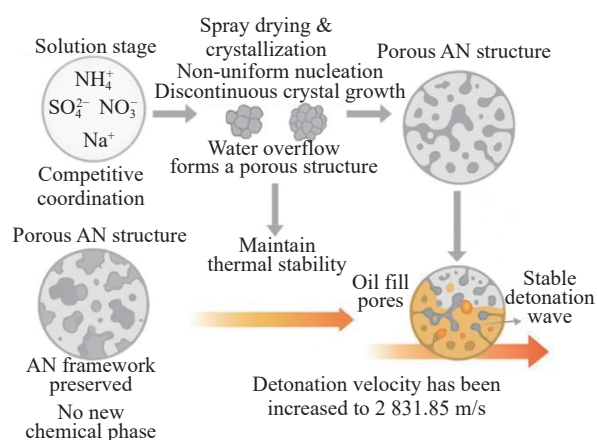


图 6 硝酸铵改性机理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the mechanism of modified ammonium nitrate

参考文献:

- [1] MIYAKE A, TAKAHARA K, OGAWA T, et al. Influence of physical properties of ammonium nitrate on the detonation behaviour of ANFO [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 533–538.
- [2] 刘松华. 工业硝酸铵的改性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
LIU S H. The modification studies of industrial ammonium nitrate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
- [3] OXLEY J C, SMITH J L, ROGERS E, et al. Ammonium nitrate: thermal stability and explosivity modifiers [J]. *Thermochemica Acta*, 2002, 384: (1/2): 23–45.
- [4] 陈阳, 康自华, 陈婷, 等. 尿素和硫酸铵对多孔硝酸铵结构改性的影响研究 [J]. *火工品*, 2024(6): 40–47.
CHEN Y, KANG Z H, CHEN T, et al. Study on the effects of urea and ammonium sulfate on the structural modification of porous ammonium nitrate [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2024(6): 40–47.
- [5] 刘博. 溶剂挥发法改性硝酸铵防吸湿性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
LIU B. Anti-hygroscopic properties of ammonium nitrate modified by solvent evaporation method [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Science and Technology, 2024.
- [6] 张洪. 改性硝酸铵在现场混装中的应用研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
ZHANG H. Application of modified ammonium nitrate in field mixed loading [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [7] 郭紫卿, 唐秋明. 多孔粒状硝酸铵的表面膨化技术及应用 [J]. *爆破器材*, 2025, 54(3): 27–33.
GUO Z Q, TANG Q M. Surface expansion technology and the application of porous granular ammonium nitrate [J]. *Explosive Materials*, 2025, 54(3): 27–33.
- [8] 戴礼, 张洪秀, 周莹, 等. 新型表面活性剂改性硝酸铵的研究 [J]. *化学工程与装备*, 2017(11): 41–42.
DAI L, ZHANG H X, ZHOU Y, et al. Research on modification of ammonium nitrate using novel surfactants [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2017(11): 41–42.
- [9] 叶志文. Gemini 表面活性剂 C_{12} -3(OH)- C_{12} -2Cl 对膨化硝酸铵晶体性能影响的研究 [J]. *精细与专用化学品*, 2006, 14(Suppl 1): 42–45.
YE Z W. Research on influence of Gemini surfactant C_{12} -3(OH)- C_{12} -2Cl on crystal properties of expanded ammonium nitrate [J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2006, 14(Suppl 1): 42–45.
- [10] BORIS G, ABRAHAMS, EVGENYZ, et al. Method for preparing an encapsulated slow-release particulate fertilizer: US5560768 [P]. 1996-10-01.
- [11] ZYGMUNT B, BUCZKOWSKI D. Influence of ammonium nitrate prills' properties on detonation velocity of ANFO [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(5): 411–414.
- [12] 尚德忠, 耿立君, 马宏伟. 铵油炸药在露天矿煤层爆破中的应用 [J]. *露天采矿技术*, 2003(1): 16, 26.
SHANG D Z, GENG L J, MA H W. Application of ammonium nitrate fuel oil mixture to coal seam blasting of open-pit coal mine [J]. *Opencast Mining Technology*, 2003(1): 16, 26.
- [13] 宋占辉. 浅析 ANFO 铵油炸药在隧道工程中的应用 [J]. *中国新技术新产品*, 2015(3): 186–187.
SONG Z H. A brief analysis of the application of ANFO ammonium oil explosives in tunnel engineering [J]. *China New Technologies and Products*, 2015(3): 186–187.
- [14] 李云岗. 利用多孔粒状硝酸铵装置生产高密度硝酸铵产品 [J]. *大氮肥*, 2020, 43(6): 402–404.
LI Y G. Use porous granular ammonium nitrate plant to produce high density ammonium nitrate [J]. *Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry*, 2020, 43(6): 402–404.
- [15] 聂凡, 仝坤, 邵志国, 等. 重质有机质热解过程中挥发物的产出与逸出气体分析研究进展 [J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2322–2331.
NIE F, TONG K, SHAO Z G, et al. Volatile generation during pyrolysis of heavy organic matters and the development of the evolution gas analysis [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(5): 2322–2331.
- [16] 杨文军. 关于多孔粒状铵油炸药性能的研究 [J]. *山西化工*, 2023, 43(9): 31–32.
YANG W J. Research on porous granular ammonium oil explosives in the chemical industry [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2023, 43(9): 31–32.

- [17] 林木良. 热重-红外联用方法在药物热降解和热氧降解研究上的应用 [J]. *广州化工*, 2002, 30(3): 44–47.
LIN M L. Applications of TG-IR on thermal degradation and thermal oxidation degradation of medicine [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2002, 30(3): 44–47.
- [18] DUNUWILLE M, YOO C S. Phase diagram of ammonium nitrate [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 139(21): 214503.

Properties of Surfactant-Modified Ammonium Nitrate

WANG Xinqi, WU Hongbo, HU Pengfei, REN Mengyu, XIE Mengzhi, XIA Wenjie, ZHU Leilei

(*School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China*)

Abstract: Porous ammonium nitrate is frequently used for specific applications due to its porous structure when compared with conventional ammonium nitrate, however, its higher transportation costs increase overall operational expenses. This study investigated the preparation of porous granular modified ammonium nitrate using ionic surfactant PST as an additive via spray granulation. The effects of varying PST concentrations (0–0.4%) on the pore structure, oil absorption capacity, thermal stability, and explosive properties of ammonium nitrate were examined. The research results indicate that increasing PST content gradually transforms dense ammonium nitrate particles into a porous structure with distinct interconnected pores. Thermal stability remains essentially unchanged, and the matrix chemical composition undergoes no fundamental alteration, though its adsorbed water content decreases. The modified samples exhibit enhanced binding capacity with the oil phase. The detonation velocity of the assembled charge increases from “failed to detonate normally” in the unmodified state to 2831.85 m/s. Trace amounts of PST can induce the formation of a porous structure in ammonium nitrate without significantly compromising thermal safety, while markedly improving detonation velocity performance, demonstrating potential for engineering applications.

Keywords: modified ammonium nitrate; spray granulation; porosity; thermal stability; explosive properties