◆提质增效产品创制技术◆

硝酸钾协同改性硝铵磷对硝基复合肥防结块性能的调控机制研究

朱　喜[1]，焦士杰[1]，郭　利[1]，蒋宇航[1]，王金刚[1]，俞　超[1]，王靖雯[2]，孙思宇[2]，吴　舒[2]

（1. 中国-阿拉伯化肥有限公司，河北 秦皇岛　066003；
2. 河北环境工程学院 河北省农业生态安全重点实验室，河北 秦皇岛　066102）

［摘　要］针对硝铵磷（ANP）作为硝基高氮复合肥主要原料在储运过程中因温度诱导相变（43.3 ℃）引发的体积膨胀问题，探究硝酸钾（KNO_3）与硫酸钾（K_2SO_4）用量对颗粒肥料防结块性能的调控机制。通过热膨胀分析定量表征ANP体积突变行为，结合KNO_3部分替代ANP中的硝态氮源（NO_3^-），同步降低ANP与K_2SO_4用量，并优化NO_3^-与SO_4^{2-}的摩尔比。差示扫描量热分析（DSC）与X射线衍射分析（XRD）表征表明：K^+嵌入ANP晶格驱动单斜相向立方相转变，有效抑制低温相变，协同提升硝基复合肥的防结块性能。

［关键词］硝基复合肥；热膨胀；防结块；硝酸钾
［中图分类号］TQ441.12　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）10-0069-06

Study on regulatory mechanism of potassium nitrate co-modified ammonium phosphate on anti-caking performance of nitro compound fertilizer

ZHU Xi[1], JIAO Shijie[1], GUO Li[1], JIANG Yuhang[1], WANG Jingang[1], YU Chao[1], WANG Jingwen[2], SUN Siyu[2], WU Shu[2]

(1. *Sino-Arab Chemical Fertilizer Co., Ltd., Qinhuangdao* 066003, *China*;
2. *Hebei Key Laboratory of Agroecological Safety, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao* 066102, *China*)

Abstract: To address the volume expansion issue in ammonium nitrate phosphate (ANP)—the primary raw material of nitro high-nitrogen compound fertilizers—caused by its temperature-induced phase transition at 43.3 ℃ during storage and transportation, the regulatory mechanism of potassium nitrate (KNO_3) and potassium sulfate (K_2SO_4) dosage on the anti-caking performance of granular fertilizers are investigated. Through thermomechanical analysis quantitatively characterizing ANP's abrupt volume changes, KNO_3 is employed to partially substitute the nitrate nitrogen source (NO_3^-) in ANP, simultaneously reducing ANP and K_2SO_4 usage while optimizing the $n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$. DSC and XRD characterization confirm that K^+ embedding into the ANP lattice drives a monoclinic-to-cubic phase transition, effectively suppressing low-temperature phase changes and synergistically enhancing the anti-caking performance of nitro compound fertilizers.

Key words: nitro compound fertilizer; thermal expansionr; anti-caking; KNO_3

随着复合肥品种不断改进，产品提质增效显著，预计2030年我国复合肥需求量将增至5 300万t[1-2]。然而，当前研究与实践更多聚焦于肥料的增效与溶解性能，对其防结块性能的关注严重不足[3-5]。随着机械化施肥成为主流方式，复合肥施用量随机播面积扩大持续增长[6-8]，施肥装备对肥料的流动性与稳定性提出了更严格要求，防结块性能已成为影响机械化施肥效果的关键瓶颈，亟须从原料配方、工艺调控等层面系统突破。

颗粒状复合肥保持良好的自由流动性和松散度对于机械化施肥和养分在土壤中的均匀撒播是至关重要的，这要求肥料颗粒在运输和存储过程中具备优异的防结块性能[9-10]。传统防结块技术采用惰性

［收稿日期］2025-08-05
［作者简介］朱　喜（1989-），男，河北秦皇岛人，复合肥生产车间技术员，主要从事复合肥配方与工艺技术开发。
［通信作者］吴　舒（1985-），男，河北秦皇岛人，博士，高级工程师，主要从事农业资源与环境、新型肥料研发方面的研究。

矿物粉末（包裹粉）与疏水性有机油脂（包裹油）对颗粒表面进行涂布处理[11-12]，但该方式存在局限性[13-14]：（1）田间机械化作业时，外裹粉末扩散形成粉尘污染；（2）疏水性油膜在水肥一体化系统中堵塞过滤装置及滴头；（3）外源不溶性包裹粉降低肥料水溶性，制约滴灌适用性；（4）外涂布防结块剂无法抑制肥料中硝酸铵组分因温度变化而引发的相变和体积膨胀。尤其高氮硝基复合肥，因其核心原料硝铵磷（ANP）在 25 ~ 50 ℃存在热致相变，导致晶格反复胀缩，在昼夜/季节性温度波动显著地区更易通过晶桥生长引发结块[15-17]。本研究对硝基高氮肥的主要原料 ANP 进行热膨胀分析，发现其在低温区存在体积膨胀，磷酸一铵（MAP）、磷酸二铵（DAP）、聚磷酸铵（APP）与 ANP 混合，并不能改变 ANP 的晶型，而提高造粒过程中游离 K^+ 浓度可诱导 ANP 晶格重构。基于此，笔者提出改性新策略，通过引入 KNO_3 取代部分 ANP，降低 ANP 和 K_2SO_4 在颗粒复合肥配方中的用量，协同调整 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 的比例，通过 K^+ 嵌入重构 ANP 晶格，消除低温区相变引发的体积膨胀，从源头阻断结块诱因，同时缓解粉尘污染和改善滴灌兼容性。该研究为开发无包裹剂、防结块的硝基复合肥提供了技术参考。

1 材料与方法

1.1 硝基复合肥制备

1） MAP、DAP、APP 改性 ANP 样品的制备

为探究磷酸盐对 ANP 晶型的改性效果，参照复合肥造粒工艺条件，将 MAP、DAP、APP 与 ANP 按照质量比 1∶9 在造粒机中充分混合，反应结束后，在 105 ℃烘干至 $w(H_2O)\leqslant 0.5\%$，研磨至粒径 ≤0.106 mm（150 目），获得改性粉末，待测。

2） KNO_3 与 K_2SO_4 改性 ANP 样品制备

将 KNO_3 或 K_2SO_4 按 ANP 质量的 5% 添加，造粒及反应后处理同 1）节，获得样品用于 DSC 分析。

3） 硝基复合肥样品制备

硝基复合肥选用 $w(N)\geqslant 18\%$ 的品级，造粒过程：①将所有粉状原料混合均匀；②混合料置于鼓式造粒机中，用热风将物料加热至 80 ℃；③应用雾化去离子水使粉状物料的表面溶解成液相并黏结成颗粒状；④颗粒转移到热风干燥机进行烘干，颗粒 $w(H_2O)$ 被降至 0.15% 以下；⑤筛出粒径 3.0 ~ 3.8 mm 的颗粒，冷却至室温。

1.2 样品的表征

差示扫描量热分析（DSC）：美国珀金埃尔默公司（PE）仪器，以 5 ℃/min 的升温速率，在 15 ~ 100 ℃的氮气气氛中对样品进行分析。

X 射线衍射分析（XRD）：利用铜 Kα 辐射在 40 kV 下进行测量，在 10° ~ 70° 内扫描每个样品，扫描速度为 2°/min。

结块实验装置：均匀筛选粒径 3.0 ~ 3.8 mm 的颗粒，放入内径 4 cm、高 5 cm 的圆柱桶中。设定条件为：压块质量 10 kg，压块温度 25 ~ 60 ℃周期性变化，压块时长为 5 d。在该设定条件下，松散的颗粒板结成直径 4 cm 的柱形的团块，团块的剪切力越大板结越严重，剪切力越小板结程度越轻。压块实验重复 10 次，10 次剪切力取平均值。颗粒肥料防结块性能测试装置具体结构见图 1。

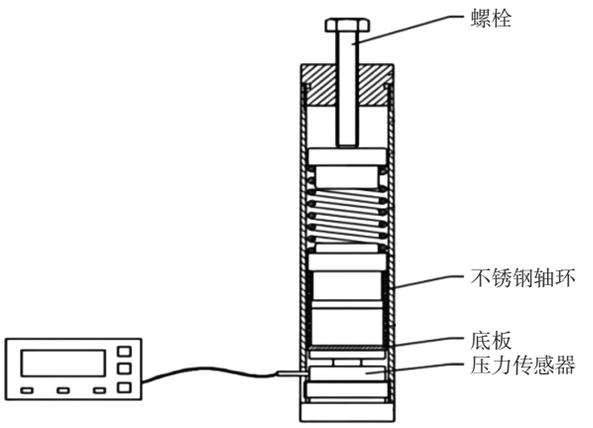

图 1 颗粒肥料防结块性能测试装置

Fig. 1 Device of anti-caking performance test for granular fertilizer

2 结果与表征

2.1 ANP 体积膨胀

ANP 是工业硝酸铵（AN）经抗爆改性制得的高效氮肥，通过 AN 熔融液与磷酸一铵、复合抗爆剂共熔造粒形成。其改性本质是磷酸根（PO_4^{3-}）不可逆阻断 AN 爆炸链式反应，使产物安全等级提升，完全丧失爆炸性。ANP 凭借水溶性、高硝态氮含量等农化特性及低成本优势，已成为复合肥核心原料。当前行业研究聚焦于 ANP 的养分调控与热安全性能，但对 ANP 晶体结构–物性关联机制的系统解析仍属空白。尤为关键的是，磷酸一铵与抗爆剂的加入仅实现安全性提升，并未抑制 AN 的Ⅲ↔Ⅳ相之间的转变，其体积非线性膨胀仍是硝基高氮复合肥结块的主因之一。ANP 的 TMA（热机械分析）体积膨胀曲线见图 2。

如图 2 所示，ANP 的体积依然会随着温度升高而膨胀，其膨胀行为并非简单的线性关系。在约 43.3 ℃时仪器检测到样品的尺寸发生显著、非线性

变化，表明在该温度附近，ANP的晶体结构发生了重组。温度发生变化会引起ANP经历固–固相变，伴随着晶体密度的显著变化，导致其热膨胀系数发生剧烈变化。在相变点之前（低温区），膨胀率较高；在相变点之后（高温区），膨胀率显著降低。

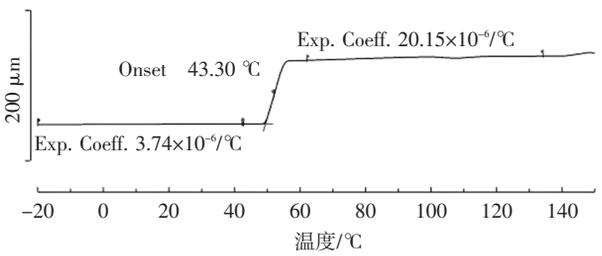

图2　ANP的TMA体积膨胀曲线

Fig. 2　TMA volume expansion curve of ANP

2.2　ANP的DSC分析

ANP的差示扫描量热（DSC）曲线（见图3）在43.3 ℃处存在特征吸热峰，明确证实磷酸一铵与抗爆剂未能抑制AN固有的Ⅲ↔Ⅳ型固–固相变。该相变行为是ANP作为硝基复合肥主要原料促结块的核心诱因：在昼夜温差大（例如25～45 ℃波动）的储运环境中，即使包装袋密封良好，温度每日反复跨越43.3 ℃相变点，会引发ANP晶格周期性重组与体积非线性膨胀。这一过程通过三重路径加剧结块：①颗粒接触点因反复胀缩产生塑性变形，机械互锁力增强；②相变诱导的微裂纹增强毛细效应，吸附环境中微量水分形成高离子浓度溶液膜；③晶格重组释放的细粉充当黏结介质，在颗粒间形成晶桥。密封包装可隔绝外界水分但无法抑制温度波动导致的颗粒本征体积突变，因此结块不可避免。为解决该问题，需从原料本征改性入手，抑制43.3 ℃相变（DSC吸热峰消失），同时优化NO_3^-与SO_4^{2-}摩尔比远离2.0，规避复盐结晶风险。

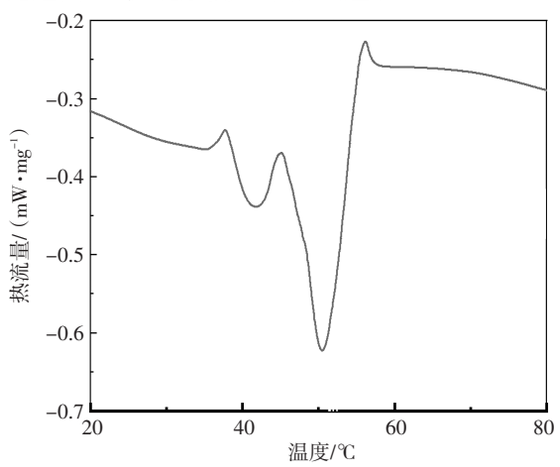

图3　ANP的DSC曲线

Fig. 3　DSC curve of ANP

2.3　MAP、DAP、APP改性ANP的XRD衍射分析

图4是硝基复合肥常用磷原料对ANP改性后的XRD衍射图，a、b、c、d、e分别是KNO_3改性ANP、聚磷酸铵改性ANP、磷酸一铵改性ANP、ANP、磷酸二铵改性ANP。

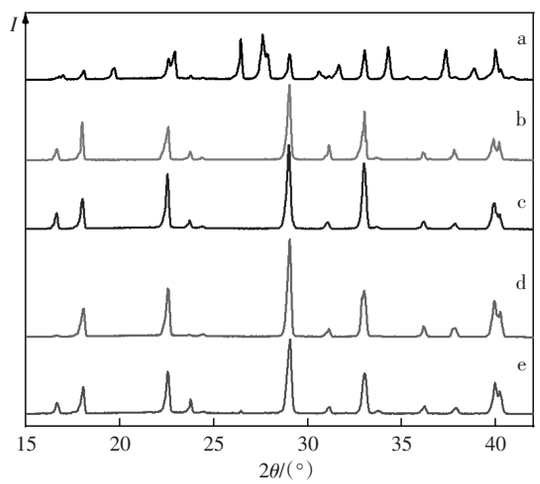

图4　不同物料改性ANP的XRD衍射图

Fig. 4　XRD diffraction patterns of ANP modified with different materials

d曲线中，强单斜晶系特征峰（2θ=18.7°、23.1°）对应ANPⅢ型相（易相变结构）。通过对比图4衍射峰的峰型、峰位、峰高，变化最大的是KNO_3改性ANP。K^+（离子半径138 pm）部分取代NH_4^+（143 pm），压缩晶胞体积，破坏氢键网络，提升晶格热稳定性[18]。而b、c、e曲线峰位无偏移，说明聚磷酸铵、磷酸一铵、磷酸二铵与ANP反应，并不会改变ANP的晶格，其相变未抑制。

这一结果明确显示，KNO_3在与ANP复合过程中可能通过离子交互、晶格嵌入或形成新相的方式改变了原有晶体排列，而其他磷原料则仅物理混合或表面作用，未破坏ANP的本体晶体结构。基于此，若需通过改性ANP以调控其晶体形态从而改善理化性能，优先选用溶解度较高的富钾化合物作为改性剂。

复合肥造粒过程的物料温度为70～80 ℃，在此温度下硝酸钾的溶解度显著高于硫酸钾（见图5），能够溶解并电离出更多的钾离子，从而更有效地与硝铵磷发生相互作用，实现对其颗粒结构、防结块性和养分释放特性的优化改性。而在存储温度（通常为常温范围）下，两者溶解度差异显著减小，这意味着尽管硝酸钾在高温造粒阶段具有显著的溶解优势，但在成品储存环境中并不会因溶解度差异而导致盐析或稳定性问题，反而保持了与硫酸

钾相近的低析出趋势，有利于产品长期稳定。正因硝酸钾在高温加工时的高溶解性和反应活性，可在达到相同改性效果的前提下，适当降低硝铵磷在配方中的比例，从而优化成本与养分配比，同时避免存储阶段可能出现的质量风险。因此，应用硝酸钾不仅提升了造粒过程中的钾离子可用性与改性效率，也为降低硝铵磷用量提供了科学依据，兼顾了生产高效性与存储安全性。

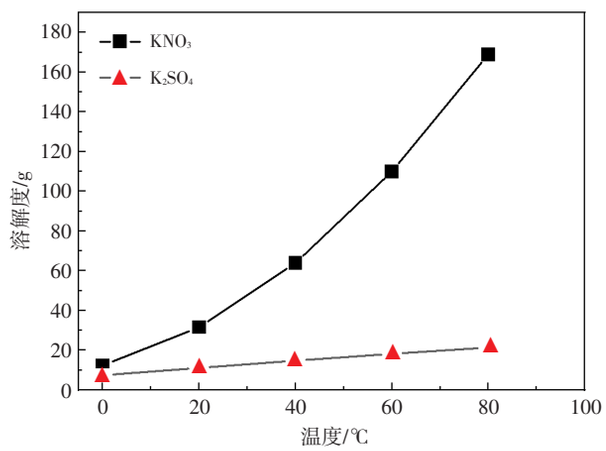

图 5　硫酸钾与硝酸钾在不同温度下的溶解度曲线

Fig. 5　Solubility curves of potassium sulfate and potassium nitrate at different temperatures

2.4　KNO_3、K_2SO_4改性 ANP 的 DSC 分析

KNO_3、K_2SO_4、磷酸一铵+硫酸铵改性 ANP 的 DSC 热分析曲线（见图 6）明确揭示了不同改性剂对 ANP 相变行为的调控差异：KNO_3改性样品在 25 ~ 60 ℃温度区间内无吸热峰，表明其较好地抑制了 ANP 固有的Ⅲ↔Ⅳ型固–固相变；K_2SO_4改性样品虽在 40.5 ℃处存在宽缓肩峰，但峰强度较原始 ANP 降低 60%以上，证明 K^+部分嵌入晶格削弱了相变剧烈程度；而磷酸一铵+硫酸铵改性样品则呈现双相变峰，52.3 ℃峰源于 $(NH_4)_2SO_4$与 ANP 形成的低共熔体新相变，未能解决原相变问题。该结果确证：钾离子对相变的抑制效能依赖其阴离子类型，当 K^+与 NO_3^-协同作用时，可通过晶格钉扎及氢键网络破坏彻底消除相变，而含铵改性剂因引入同质离子加剧晶格畸变，放大结块风险。

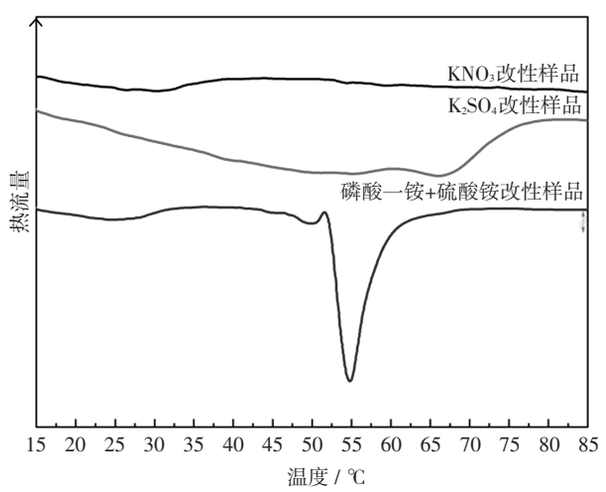

图 6　KNO_3与 K_2SO_4改性 ANP 的 DSC 曲线

Fig. 6　DSC curves of ANP modified with KNO_3 and K_2SO_4

2.5　硝基高氮肥的防结块性能分析

随着配方中 KNO_3用量的增加，硝基复合肥的抗结块性能显著提升（见图 7）。当 KNO_3添加量从 0 增至 28.67%时，肥料横向剪切力从 83.84 N 降至 21.18 N，降幅 75%，证明 KNO_3通过双重路径抑制结块：（1）钾离子改性增效。KNO_3在硝基复合肥造粒温度下的溶解度（169 g）显著高于 K_2SO_4（21.4 g），因此对于硝基复合肥，所用原料中的钾盐以 KNO_3为主，那么造粒机内物料中溶解的 K^+相对更多，有效嵌入 ANP 晶格的 K^+多，抑制相变膨胀越有效。（2）硝态氮源优化。NO_3^-由 ANP 与 KNO_3共同提供，KNO_3用量增大，直接减少易发生Ⅲ→Ⅳ相变（43.3℃）的 ANP 组分，从源头降低体积突变风险。

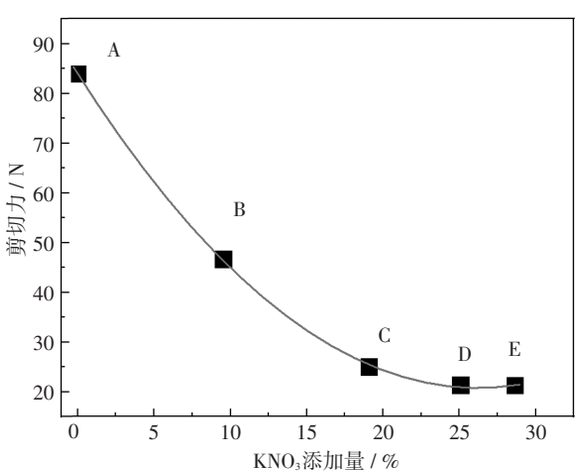

图 7　硝基复合肥压块后的横向剪切力

Fig. 7　Transverse shear force of nitro compound fertilizer after compaction

原料组分差异导致复合肥中硝酸根（NO_3^-）与硫酸根（SO_4^{2-}）含量动态变化。当 $n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$ 显著偏离 2.0，可有效抑制复盐 $3NH_4NO_3\cdot(NH_4)_2SO_4$的生成。这是因为摩尔比在 1.8 ~ 2.2，驱动其自发结晶，复盐在储运温度波动（25 ~ 50 ℃）下反复溶解–重结晶，于颗粒接触点形成刚性晶桥，结块率提升。

根据所提供的横向剪切力与 $n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$ 关系（见图 8），可以清晰地观察到不同配方样品

的防结块能力存在显著差异，且其抗结块性能随$n(NO_3)/n(SO_4)$降低而增强，即比值越小（向小于2.0的方向减小），横向剪切力越低，表明结块倾向越小、颗粒自由流动性越好；例如E样品在$n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$约为1.57时表现出最佳的防结块性能。这一实验结果说明，在一定范围内降低硝酸根相对于硫酸根的比例，可有效改善复合肥的物理稳定性，其机制可能源于离子间相互作用对硝铵磷晶体习性与表面性质的调控：当SO_4^{2-}比例提高时，体系中硫酸根可与铵、钙等离子形成溶解度更低的复盐，或参与构建更稳定的晶体结构，从而减少高温高湿环境下常见的水膜形成和晶桥现象；同时，较低的$n(NO_3)/n(SO_4)$可能促使颗粒表面形成更致密、不易吸湿的覆盖层，抑制了水分吸附和粒子间黏结，从而显著提升抗结块能力。因此，通过合理调控硝酸根与硫酸根的摩尔比，使其适度偏离2.0，可作为优化复合肥产品存储稳定性和物理品质的有效策略。

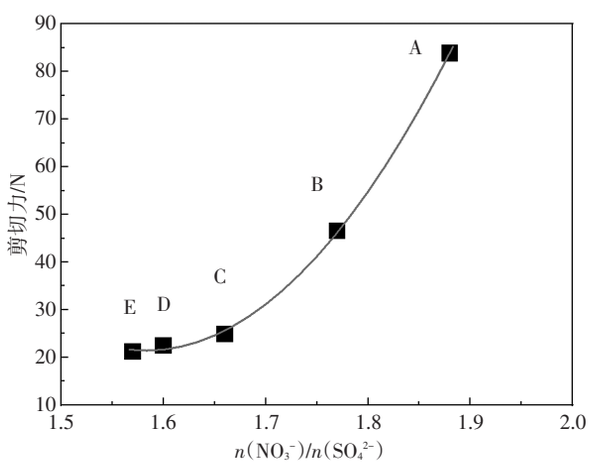

图8　复合肥样品$n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$与防结块性能的关系

Fig. 8　Relationship between $n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$ and the anti-caking performance of compound fertilizer samples

KNO_3改性ANP的硝基复合肥的吸湿率见表1。由表1可知，样品A的吸湿速率更快且最终吸湿率更高，24 h达14.24%，而样品E吸湿增长平缓且最终吸湿率较低，仅为9.39%。这种差异源于高吸湿性的ANP在样品A中的高占比，而样品E通过降低ANP比例并引入KNO_3改性，有效抑制了整体吸湿性。吸湿性差异直接影响了防结块性能：样品A因快速吸湿在颗粒表面形成高浓度盐溶液膜，环境温度波动时易通过溶解–重结晶机制形成坚硬“盐桥”，导致严重结块；反之，样品E吸湿缓慢且程度轻，显著减少了表面溶解和盐桥形成的风险，从而大幅度提升了储存稳定性和防结块能力。因此，优化配方（降低高吸湿原料比例、添加KNO_3）是改善硝基复合肥物理性状的关键策略。

表1　KNO_3改性ANP的硝基复合肥的吸湿率

Table 1　Moisture absorption rate of nitro based compound fertilizer with KNO_3 modified-ANP

样品	不同时间（h）吸湿率/%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	24
A	1.01	1.72	2.43	3.02	3.54	4.08	4.6	5.23	14.24
E	0.72	1.21	1.68	2.02	2.32	2.72	3.1	3.58	9.39

3　讨论

本研究通过系统探究硝酸钾对硝铵磷的协同改性作用，揭示了其在提升硝基复合肥防结块性能方面的三重核心机制，为开发防结块、适用于机械化施肥与滴灌系统的高品质肥料提供了新的技术路径和理论依据。首先，传统外涂包裹剂虽在一定程度上可延缓结块，但无法抑制ANP本体在43.3 ℃的固–固相变及其引发的周期性体积膨胀，这是高氮硝基复合肥结块的根本原因。本研究创新性地提出通过KNO_3部分替代ANP和硫酸钾，从原料本征结构改性入手，利用KNO_3在高温（70～80 ℃）造粒下的高溶解度特性，充分释放K^+离子并嵌入ANP晶格，驱动其从易相变的单斜相（Ⅲ型）向稳定的立方相转变，彻底消除了DSC曲线中43.3 ℃处的相变吸热峰，使体积膨胀系数显著降低，从源头上抑制了因晶格胀缩引发的结块动力。其次，研究明确了阴离子类型对改性效果的关键影响：KNO_3提供的NO_3^-与K^+协同作用效果最优，而含硫酸根或铵根的添加剂则可能因形成复盐或共熔体引入新相变点，反而加剧结块风险。第三，通过优化配方中NO_3^-与SO_4^{2-}摩尔比（控制于1.57左右，远离2.0的高危区间），有效抑制了$3NH_4NO_3\cdot(NH_4)_2SO_4$复盐的生成与反复析晶，切断了晶桥形成的化学路径；同时，降低ANP用量也直接减少了高吸湿性组分，使颗粒表面吸湿率和溶解度下降，减少了液桥形成可能。综上所述，KNO_3的引入不仅实现了高温造粒过程中的高效离子改性，也兼顾了成品在存储环境下的物理稳定性，彰显了过程改性与结构调控一体化的技术优势，为行业推进无包裹剂、高流动型复合肥产品的开发提供了切实可行的解决方案。

4　结论

在硝基复合肥配方中，应用KNO_3替代部分

K_2SO_4，通过三重协同路径显著提升防结块性能。

（1）钾离子晶格改性增效：KNO_3在造粒温度下溶解度显著高于K_2SO_4，释放足量游离K^+嵌入ANP晶格，使相变起始点消失，体积膨胀系数显著降低。

（2）硝态氮源优化：KNO_3提供硝态氮，将易相变组分（ANP）占比降低，同步降低颗粒表面组分的溶解度与颗粒的吸湿率，阻断盐桥形成基底。

（3）复盐结晶抑制：调控$n(NO_3^-)/n(SO_4^{2-})$远离高危区（1.8～2.0），规避复盐的晶桥暴增效应。

［参考文献］

［1］ 王玉倩，常斐，武少弟，等.我国复合肥行业现状及发展趋势[J].化学工业，2025，43(2)：37-40.
WANG Y Q，CHANG F，WU S D，et al. Compound Fertilizer Industry Situation and Development Tendency in China[J]. Chemical Industry，2025，43(2)：37-40.

［2］ 卜容燕，韩上，余忠，等.安徽省化肥施用现状分析及思考[J].中国土壤与肥料，2023(5)：60-67.
BU R Y，HAN S，YU Z，et al. Analysis and reflection on the current situation of chemical fertilizer application in Anhui province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2023(5)：60-67.

［3］ 王赛红，孙莹莹，李冬佳，等.生物活性物质在增效肥料行业的应用现状及发展前景[J].中国土壤与肥料，2025(3)：241-250.
WANG S H，SUN Y Y，LI D J，et al. Application status and development prospect of bioactive substances in synergistic fertilizer industry[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2025(3)：241-250.

［4］ 高向南.聚谷氨酸增效复合肥的生产与应用[J].生态产业科学与磷氟工程，2024，39(9)：44-47，65.
GAO X N. Production and application of polyglutamic acid enhanced compound fertilizer[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2024，39(9)：44-47，65.

［5］ 李汝会，陈欣，江志阳.肥料增效剂的种类及作用原理[J].肥料与健康，2024，51(3)：1-9.
LI R H，CHEN X，JIANG Z Y. Types and Working Principles of Fertilizer Synergists[J]. Fertilizer & Health，2024，51(3)：1-9.

［6］ 赵广杰.棉花机械的应用现状及发展趋势[J].农业技术与装备，2024(10)：25-27.
ZHAO G J. Application Status and Development Trend of Cotton Machinery[J]. Agricultural Technology & Equipment，2024(10)：25-27.

［7］ 张宏建，陈修波，李宏立，等.控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J].农业机械学报，2024，55(6)：80-90.
ZHANG H J，CHEN X B，LI H L，et al. Simulated Contact Parameters Calibration and Experiment of Controlled-release Fertilizer Particles[J]. Transaction of Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(6)：80-90.

［8］ 杨振军，王海川，唱润宏，等.硝基低氮高钾硫型复合肥生产控制优化[J].生态产业科学与磷氟工程，2025，40(1)：48-52，119.
YANG Z J，WANG H C，CHANG R H，et al. Production control optimization of nitro low nitrogen and high potassium sulfur compound fertilizers[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering，2025，40(1)：48-52，119.

［9］ ELDIWANI G，HAWASH S，ELIBIARI N，et al. Treatment of Ammonium Nitrate Fertilizer for Cake Prevention[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，1994，33：1620-1622.

［10］ SJOLIN C. The influence of moisture on the structure and quality of NH_4NO_3 prills[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry，1971，19：83-95.

［11］ CAMPBELL A N，CAMPBELL A J. The effect of a foreign substance on the transition：NH_4NO_3 IV-NH_4NO_3 Ⅲ[J]. Canadian Journal of Research，1946，24(B)：93-108.

［12］ CHAN C K，CHAN M N. New Directions：Polymorphic transformation of ammonium nitrate in atmospheric aerosols[J]. Atmospheric Environment，2004，38(9)：1387-1388.

［13］ 杨国江，彭懿，尹飞虎，等.滴灌磷肥在灰漠土中运移的研究[J].中国土壤与肥料，2020(6)：138-146.
YANG G J，PENG Y，YIN F H，et al. Phosphorus migration of monoammonium phosphate via drip-irrigation in gray desert soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2020(6)：138-146.

［14］ 王浩翔，张新燕，牛文全，等.低压滴灌施肥条件下温度对滴头堵塞的影响[J].灌溉排水学报，2020，39(3)：63-71.
WANG H X，ZHANG X Y，NIU W Q，et al. The Effect of Temperature on Emitter Clogging in Low-pressure Drip Fertilization System[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2020，39(3)：63-71.

［15］ 蔡敏敏，陈天云，黄建祯，等.无机盐添加剂对硝酸铵晶变及结块性的影响[J].南京理工大学学报，2000，24(1)：76-79.
CAI M M，CHEN T Y，HUANG J Z，et al. Effect of Inorganic Additives on AN Polymorphism and Caking[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology，2000，24(1)：76-79.

［16］ MARLAIR G，KORDEK M. Safety and security issues relating to low capacity storage of AN-based fertilizers[J]. Journal of Hazardous Materials，2005，123(1-3)：13-28.

［17］ BROWN R N，MCLAREN A C. On the mechanism of the thermal transformations in solid ammonium nitrates[J]. Proceedings of the Royal Society of London：Series A，1962，266：329-343.

［18］ OOMMEN C，JAIN S. Phase Modification of Ammonium Nitrate by Potassium Salts[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry，2004，55(3)：903-918.