

◆提质增效产品创制技术◆

基于高塔工艺的尿基颗粒水溶肥防结块技术及调控策略

曾 锐, 高璐阳, 郭 婷, 王小蒙, 张 建, 钟 振, 张汉卿

(新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000)

[摘 要] 针对尿基高塔颗粒水溶肥在储存运输中易结块的行业难题, 系统剖析结块诱因, 并构建“化学调控—工艺优化”协同防结块技术体系, 明确了尿素晶型转变、吸湿诱导的盐类再结晶及颗粒间机械嵌合是导致结块的核心因素。基于表面活性剂复配原理与造粒过程参数优化, 筛选出聚丙烯酰胺 (PAM) 与十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 复合抗结剂体系, 结合造粒温度 (105 ~ 110 °C)、冷却速率 (≤ 10 °C/min) 及喷头压力 (0.5 ~ 0.6 MPa) 的精准控制, 实现了颗粒表面能降低 (28 mN/m) 与晶型转变抑制 (β -尿素特征峰强度下降30%)。工业验证试验表明, 该技术使产品60 d储存结块率从35%降至8%, 显著提升了产品应用性能, 为高湿环境下熔体造粒类肥料的防结块提供了标准化解决方案。

[关键词] 高塔工艺; 水溶肥; 抗结剂; 造粒; 晶型调控

[中图分类号] TQ444 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 11-0045-05

Anti-caking technology and regulation strategy for urea-based granular water-soluble fertilizer based on high tower process

ZENG Rui, GAO Luyang, GUO Ting, WANG Xiaomeng, ZHANG Jian, ZHONG Zhen, ZHANG Hanqing
(Xinyangfeng Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: In response to the industry problem of easy caking of urea-based high-tower granular water-soluble fertilizers during storage and transportation, the causes of caking are analyzed and a “chemical regulation - process optimization” collaborative anti-caking technology system is constructed. It is clarified that the transformation of urea crystal form, hygroscopy-induced salt recrystallization and mechanical interlocking between particles are the core factors causing coalescence. Based on the principle of surfactant compounding and the optimization of granulation process parameters, a composite anti-caking agent system of polyacrylamide (PAM) and sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) is screened out. Combined with the precise control of granulation temperature (105 - 110 °C), cooling rate (≤ 10 °C/min), and nozzle pressure (0.5 - 0.6 MPa), The reduction of particle surface energy (28 mN/m) and the inhibition of crystal form transformation (the intensity of the characteristic peak of β -urea decreased by 30%) are achieved. Industrial verification test shows that this technology has reduced the caking rate of the product during 60 days of storage from 35% to 8%, significantly enhancing the application performance of the product. It provides a standardized solution for preventing caking of melt granulation fertilizers in high-humidity environments.

Key words: high tower technology; water-soluble fertilizer; anti-caking agent; granulation; crystal form regulation

0 引言

尿基高塔颗粒水溶肥因速溶性与养分高效性, 在南方高湿农业区的精准追肥中占据重要地位。然而, 其储存过程中频发的结块问题 (储存30 d结块率可达62%), 严重影响了机械化施肥效率与用户体验。国内外研究表明, 高湿度环境下的吸湿溶解-重结晶循环、颗粒表面能差异及储存压力诱导

的机械嵌合, 是导致尿基肥料结块的主要诱因。尽管现有技术通过添加无机盐类抗结剂 (如磷酸二氢

[收稿日期] 2025-09-04

[作者简介] 曾 锐(1987-), 男, 湖北荆门人, 工程师, 主要从事新型肥料的研发和推广工作。

[基金项目] “十四五”国家重点研发计划项目“精准智能化施肥技术与装备研发及产业化”(2023YFD1701000)

钾)或优化干燥工艺取得一定成效,但针对高塔熔体造粒工艺特有的“无干燥环节—晶型转变敏感”体系,仍缺乏系统性防结块解决方案。本研究结合南方地区年均相对湿度>75%的气候特征,从化学机制与物理工艺双维度开展技术攻关,旨在构建适用于高湿环境的高效防结块技术体系^[1-2]。研发高效的尿基高塔颗粒水溶肥防结块技术,对于提升南方地区肥料使用效率、保障农业生产顺利进行意义重大。

1 尿基高塔颗粒水溶肥结块原因分析

高塔造粒工艺通过将熔融尿素与磷酸肥料浆混合后喷淋固化,形成颗粒均匀、养分高度融合的水溶肥产品。其优势在于生产过程无需干燥,能耗低,且颗粒抗压强度高、水溶性好。然而,该工艺生产的尿基高塔颗粒水溶肥因尿素分子与水分形成“氢键链”,易引发晶粒间的吸附与再结晶,导致结块。此外,颗粒表面针孔结构及储存环境湿度、温度波动也是结块的重要诱因。

经典的“晶体架桥”理论认为,湿度波动导致颗粒表面盐类溶解-重结晶循环,在接触点形成晶桥连接,这与尿基肥料中尿素-钾盐体系的吸湿性密切相关。而“毛管黏附”机制则强调,颗粒受压变形后形成的微米级孔隙(5~10 μm)会产生毛细管力,促使水分在颗粒间隙富集,加速盐类迁移与团聚。这两种理论在高湿度环境(如南方地区年均相对湿度>75%)下协同作用,导致结块风险显著提升^[1-2]。

1.1 化学因素

1.1.1 尿素的晶型转变

尿素在生产过程中,从熔融态冷却结晶时,会发生晶型转变,从高温的 α -尿素转变为低温稳定的 β -尿素,这一过程中晶体结构变化,颗粒间易形成化学键合,导致结块。南方地区昼夜温差相对较小,但在部分山区或季节交替时段,温度波动仍会促使这种晶型转变发生,尤其是在夜间温度快速下降时,转变更为明显^[1-3]。

1.1.2 化学反应

尿基高塔颗粒水溶肥中的尿素会与其他成分如钾盐等发生化学反应。以尿素与硫酸钾为例,在一定的湿度和温度条件下,二者会发生反应生成硫酸脲钾复盐。这种复盐的生成会改变肥料颗粒的表面性质,使得颗粒之间更容易发生黏连,进而导致结块。由于南方地区空气湿度常年处于较高水平,在高温高湿的环境下,尿素与其他成

分之间的化学反应更容易发生,从而加速了肥料结块的进程^[4]。

1.2 物理因素

1.2.1 水含量

肥料中的水含量是引发结块的一个重要物理因素。根据《南方地区肥料储存环境白皮书(2022)》中的数据,广东、福建等地年均相对湿度达到了82%,夏季极端相对湿度甚至可超过95%。在此条件下,尿基高塔水溶肥的平衡水质量分数(EMC)很容易突破0.5%的安全阈值,导致颗粒表面形成液膜(厚度5~10 μm)。液膜中的尿素和钾盐会不断发生溶解-重结晶循环过程,最终在颗粒之间形成硫酸脲钾复盐晶桥,使得结块的风险大幅度增加^[4-6]。

1.2.2 颗粒大小与形状

生产过程中,粒径分布离散度较高(CV>15%),细颗粒容易填充在大颗粒的间隙中,这样会显著增加颗粒之间的接触面积,从而加快结块速度。同时,与球形颗粒相比,不规则形状的颗粒更容易相互勾连缠绕,这也会导致肥料结块。在南方地区,部分小型肥料生产企业由于受设备和工艺条件的限制,生产出的肥料颗粒在大小和形状方面存在较大差异,因此其生产的肥料结块问题更为突出。

1.3 储存与运输因素

1.3.1 压力作用

在肥料的储存和运输过程中,肥料堆垛的高度和所承受的压力会对结块情况产生影响。根据《中国化肥仓储现状白皮书(2023)》的内容,华南地区由于仓储成本的限制,水溶肥的平均堆垛高度达到了4.2 m,这一高度超过了行业推荐值2.5 m。在这种情况下,下层颗粒所承受的压力达到了65 kPa,而GB/T 36207—2018标准规定的安全压力应≤50 kPa。在如此高的压力下,颗粒表面针孔结构(5~10 μm)的嵌合概率会提升40%。再结合南方地区年均85%的高湿度环境,肥料储存30 d时,结块率可高达62%^[6]。

1.3.2 温度波动

尽管南方地区整体气温较高且相对稳定,但在季节交替时,仍然会出现较为明显的温度波动。当肥料经历温度的频繁升降变化时,颗粒内部的水分会发生迁移,这种迁移会导致局部区域出现过饱和状态,使得盐分结晶析出,进而促使结块现象的发生。例如,在春秋季节交替时,早晚温差可达10~15℃。当温度升高时,颗粒会吸收水分,而到了

夜间温度降低时，水分会在颗粒间隙中凝结，形成“微液池”，这会加速盐类的溶解-结晶循环过程。通过模拟实验发现，肥料经历10次温度波动（15~30℃）后，其结块强度相较于恒温储存条件下提升了1.5倍，这对肥料的储存稳定性构成了较大的挑战^[7-8]。

2 实验部分

2.1 实验材料与设备

基础肥料：选取典型的尿基高塔颗粒水溶肥作为研究对象，其主要养分规格为19-19-19。基础肥料的实测参数如表1所示。

抗结剂：选择多种不同类型的防结块剂，其中

表1 基础肥料的实测参数
Table 1 Measured parameters of fertilizer

粒径分布 D_{50}/mm	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	抗压强度/ N	pH
2.5	0.8	18.5	6.0

注：①粒径分布采用激光粒度分析仪测定；②水含量采用烘干法（105℃）测定；③抗压强度采用质构仪测定；④pH采用电位法测定。

包括无机盐类（如磷酸二氢钾、硫酸镁等）、有机表面活性剂（如硬脂酸锌、十二烷基苯磺酸钠（SDBS）等）以及高分子聚合物（如聚丙烯酰胺（PAM）、聚乙二醇等）。

实验设备：规格及主要功能如表2所示。

表2 设备规格及主要功能

Table 2 Equipment specifications and main functions

设备名称	型号/规格	生产厂家	主要功能
小型高塔造粒装置	产能 5 kg/h, 塔高 3 m	新洋丰农业科技股份有限公司	模拟工业化造粒过程
恒温恒湿箱	LHS-150SC, 控温范围 10~60℃	上海一恒科学仪器有限公司	储存条件控制
激光粒度分析仪	Mastersizer 3000+	马尔文帕纳科仪器有限公司	粒径分布测定
质构仪	TA-SR01	济南莱博质研仪器设备有限公司	抗压强度测试
红外测温仪	FLUKE 62MAX	安徽世富仪器有限公司	实时温度监测
X射线衍射仪	TD3500型	丹东通达科技有限公司	晶型分析

2.2 实验方法

1) 添加抗结剂实验

将不同类型的抗结剂按照一定比例添加到基础肥料中，分别设置添加量为肥料质量的0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0%。充分混合后，将样品置于相同的储存条件下（温度20~25℃，相对湿度60%~80%），定期观察结块情况，并采用抗压强度测试法测定结块程度。抗压强度越大，表明结块越严重。

2) 优化造粒工艺实验

改变造粒过程中的关键参数，如造粒温度（设置105~110℃）、冷却速率（通过调整冷却风量实现）、喷头压力（设置0.5~0.6 MPa）等。对不同工艺条件下生产的肥料颗粒进行粒径分布分析、水含量测定以及储存稳定性测试。通过激光粒度分析仪测定粒径分布，采用烘干法测定水含量，在设定的储存条件下观察肥料的结块情况。

3 结果与讨论

3.1 添加抗结剂的效果

3.1.1 抗结剂类型的影响

不同类型抗结剂对肥料结块抑制率的影响如表3所示。

由表3可知，无机盐类抗结剂在一定程度上能

表3 不同类型抗结剂对肥料结块抑制率的影响

Table 3 Effect of different types of anti-caking agents on the caking inhibition rate of fertilizer

抗结剂类型	添加量/ %	结块抑制率/ %	表面能/ ($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)
空白对照	0	25	45
磷酸二氢钾(无机盐)	1.0	42	40
十二烷基苯磺酸钠	0.5	78	28
聚丙烯酰胺	0.3	85	23

降低肥料的结块程度，但效果相对有限。有机表面活性剂能在肥料颗粒表面形成一层疏水膜，有效阻止水分的吸收，对防结块有较好的效果。其中，十二烷基苯磺酸钠在添加量为0.5%时，肥料的抗压强度明显降低，结块现象得到显著改善。高分子聚合物具有较强的吸附和分散作用，能将肥料颗粒分散开，减少颗粒间的相互接触，聚丙烯酰胺添加量为0.3%时，防结块效果最佳，结块抑制率显著提升。

同时抗结剂的选择还需要兼顾产品的水溶性，使用可水溶的抗结剂不影响肥料本身的水溶性，做到全水溶、无残渣。

3.1.2 抗结剂添加量的影响

随着抗结剂添加量增加，肥料的结块程度逐渐降低。但当抗结剂添加量超过一定值后，继续增加

其用量，对肥料防结块效果的提升不明显，且可能会影响肥料的其他性能，如水溶性和溶解性等。因此，在实际应用中，需要根据肥料的特性和生产要求，选择合适的抗结剂及其添加量^[9]。

3.2 优化造粒工艺的效果

3.2.1 造粒温度的影响

不同造粒温度对肥料结块抑制率的影响如表4所示。

表4 不同造粒温度对肥料结块抑制率的影响

Table 4 Effect of different granulation temperatures on the caking inhibition rate of fertilizer

温度/℃	平均粒径/mm	结块抑制率/%
95	1.2±0.3	35
100	1.8±0.2	52
105	2.2±0.1	70
110	2.3±0.1	75
115	2.1±0.2(表面熔融)	60

表5 不同冷却速率对肥料结块的影响

Table 5 Effect of different cooling rates on fertilizer caking

冷却速率/(℃·min ⁻¹)	裂纹率/%	颗粒状态描述
5	5	颗粒表面光滑,无明显裂纹,内部应力释放充分
10	8	偶见微小裂纹,整体结构完整,满足储存要求
15	25	颗粒表面出现可见裂纹,部分颗粒边缘破碎,储存时易结块
20	40	裂纹贯穿颗粒内部,破碎率显著增加,结块风险极高
25	60	颗粒大量碎裂,表面发黏,严重影响产品流动性和使用性能

3.2.3 喷头压力的影响

不同喷头压力对肥料结块抑制率的影响见表6。

表6 不同喷头压力对肥料结块抑制率的影响

Table 6 Effect of different nozzle pressures on the caking inhibition rate of fertilizer

喷头压力/MPa	平均粒径/mm	粒径均匀度 CV/%	结块抑制率/%
0.3	3.5±0.5	25	45
0.4	2.8±0.3	18	60
0.5	2.2±0.2	12	75
0.6	2.1±0.2	11	78
0.7	1.8±0.3	15	65

喷头压力对肥料颗粒的粒径大小和分布有重要影响。在一定范围内，随着喷头压力增加，肥料颗粒粒径减小且分布更加均匀。但喷头压力过大，会导致颗粒粒径过小，增加结块风险。由表6可知，最佳喷头压力为0.5~0.6 MPa，此时肥料颗粒的综合性能较好，结块抑制率显著提升^[10-11]。

由表4可知，当造粒温度在105~110℃时，肥料颗粒粒径分布较为均匀，水分蒸发较为充分，颗粒内部应力较小。在此温度范围内生产的肥料，在储存过程中的肥料结块抑制率显著提升。造粒温度过高，会导致颗粒表面熔融过度，冷却后容易相互黏连；造粒温度过低，则颗粒成型不好，小颗粒较多，也容易结块。

3.2.2 冷却速率的影响

适宜的冷却速率能使肥料颗粒结晶良好，强度高，不易破碎和结块。如果冷却速率超过临界值(>10℃/min)，可能导致颗粒内部应力过大，出现裂纹甚至破碎；冷却速率过慢，则可能使颗粒表面发黏，容易结块。适当降低冷却速率，能使肥料颗粒内部的应力得到充分释放，减少因应力集中导致的颗粒变形和黏连。实验发现(见表5)，通过调整冷却风量，使冷却速率≤10℃/min，确保包装时肥料温度控制在40℃以下，肥料的储存稳定性最佳。

4 防结块技术综合应用与效果验证

4.1 综合防结块技术方案

基于上述实验结果，提出一种综合防结块技术方案，即在尿基高塔颗粒水溶肥生产过程中，添加0.3%的聚丙烯酰胺和0.5%的十二烷基苯磺酸钠作为复合防结块剂，并优化造粒工艺，将造粒温度控制在105~110℃，控制冷却速率≤10℃/min，肥料冷却后包装前温度控制在40℃以下，喷头压力控制在0.5~0.6 MPa。

4.2 效果验证

按照综合防结块技术方案生产的尿基高塔颗粒水溶肥，在模拟实际储存条件下(温度20~25℃，相对湿度60%~80%，储存时间60d)进行储存稳定性测试。结果表明，采用综合防结块技术后，肥料的结块程度显著降低，抗压强度降低至10N左右，远远低于未处理肥料的抗压强度(20N)。同时，肥料的外观保持良好，颗粒分散性好，在水中的溶解速度也未受到明显影响，证明该

综合防结块技术方案具有良好的应用效果。

4.3 工业化验证

在年产10万t尿基高塔颗粒水溶肥生产线应用该技术,对比测试结果见表7。

表7 对比测试结果

Table 7 Results of comparative test

项目	储存 60 d 结块率/%	颗粒抗压 强度/N	w(H ₂ O)/ %
对照组	35.0	20.0	0.8
实验组	8.0	10.0	0.4

扫描电镜显示,实验组颗粒表面光滑,无明显晶桥和黏连现象;X射线衍射图谱中 β -尿素特征峰强度降低30%,表明晶型转变得得到有效抑制。田间应用反馈,该技术使施肥机械堵塞频率降低60%,农户破块时间减少40%,综合经济效益提升15%~20%。

5 结论

本研究通过对尿基高塔颗粒水溶肥结块原因的分析,开展了添加防结块剂和优化造粒工艺的实验研究。结果表明,不同类型的抗结剂对肥料结块有不同程度的影响,有机表面活性剂和高分子聚合物的防结块效果较为显著。同时,优化造粒温度、冷却速率和喷头压力等工艺参数,能有效改善肥料颗粒的物理性能,减少结块现象。

本研究提出的“复合表面活性剂+工艺参数协同调控”技术方案,不仅适用于尿基高塔水溶肥,而且对同类熔体造粒肥料(如硝基复合肥、高氮型水溶肥)的防结块处理具有参考价值。结合南方地区高湿环境特点,该技术通过抑制 β -尿素晶型转变(特征峰强度降低30%),控制冷却速率(≤ 10 °C/min)和包装温度(< 40 °C),为亚热带气候区肥料储存提供了标准化解决方案,与《水溶肥料生产技术规范》(NY/T 3016—2016)中的防潮要求形成技术呼应。综合应用复合防结块剂和优化造粒工艺,可显著提高尿基高塔颗粒水溶肥的储存稳定性,为尿基高塔颗粒水溶肥的生产企业提供了切实可行的防结块技术方案,有助于提升产品质量和市场竞争能力,促进尿基高塔颗粒水溶肥的广泛应用。未来的研究可以进一步探索新型抗结剂的开发以及智能化生产工艺的优化,以更好地解决尿基高塔颗粒水溶肥的结块问题。

[参考文献]

[1] 母绍红.高塔造粒复合肥装置生产现场的过程控制管理[J].化

肥工业,2018,45(2):19-21.

MU S H. Process control management of high tower granulation compound fertilizer production unit [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(2):19-21.

[2] 董西哲,王学虎,吴广利,等.表面活性剂用于水溶肥防结块剂的研究进展[J]. 中国石油和化工标准与质量,2017,37(8):91-92.

[3] 李书海,黄祥川,徐爱叶.浅析复合肥料结块原因及防结块剂的开发[J].化肥工业,2018,45(4):23-25,49.

LI S H, HUANG X C, XU A Y. Discussion on the reasons of caking of compound fertilizers and development of anti-caking agent[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(4):23-25,49.

[4] 郑世华,唐云,豆永强,等.高塔造粒复合肥的防结块措施[J].磷肥与复肥,2008,23(2):51-52.

ZHENG S H, TANG Y, DOU Y Q, et al. Anti-caking measures for granulation of compound fertilizers in prilling tower [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008,23(2):51-52.

[5] 范金石,刘国飞,徐民.新型水溶性复合肥防结块剂的制备及其防结块效果研究[J].磷肥与复肥,2017,32(3):5-7.

FAN J S, LIU G F, XU M. Preparation of a new water-soluble anti-caking agent for compound fertilizer and study on its anti-caking effect [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(3):5-7.

[6] 杨振军,吴舒,吴沿博,等.高氮复合肥颗粒表面成分与结块关系研究[J].磷肥与复肥,2020,35(3):9-12.

YANG Z J, WU S, WU Y B, et al. Study on the relationship between particles surface composition and caking of high nitrogen compound fertilizer particles [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(3):9-12.

[7] 周帆.高塔尿基复合肥生产优化[J].磷肥与复肥,2018,33(7):9-11.

ZHOU F. Production optimization of urea-based compound fertilizer by high tower [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 33(7):9-11.

[8] 念吉红.高塔造粒全水溶肥料的技术开发[J].硫磷设计与粉体工程,2016(6):41-43.

NIAN J H. Technical development of tower granulation fully water-soluble fertilizer [J]. SP & BMH Related Engineering, 2016(6):41-43.

[9] 宋明凯.提升高塔全水溶硝基复合肥品质的技术与应用[J].磷肥与复肥,2022,37(3):12-14.

SONG M K. Technology of improving the quality of fully water-soluble nitro compound fertilizer with high tower and its application [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(3):12-14.

[10] 曾锐,叶坤国,王刚,等.水溶性硝硫基复合肥生产中存在的问题及对策[J].化肥工业,2018,45(4):17-19.

ZENG R, YE K G, WANG G, et al. Problems and countermeasures in production of water-soluble nitro-sulfur compound fertilizer [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(4):17-19.

[11] 马子华,刘晓波,程希兰,等.高塔复合肥生产操作中温度控制[J].磷肥与复肥,2023,38(8):17-19.

MA Z H, LIU X B, CHENG X L, et al. Temperature control in production operation of high tower compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(8):17-19.