

高塔工艺硝硫基颗粒水溶肥料防结块研究

曾 锐, 王小蒙, 张 建, 钟 振

(新洋丰农业科技股份有限公司, 湖北 荆门 448000)

[摘 要] 高塔工艺硝硫基颗粒水溶肥料易结块主要是因为硝酸铵具有多晶性、吸湿性等特性引起的。为了改善硝硫基颗粒水溶肥的结块情况, 使用相稳定剂改变硝酸铵的晶变温度从而改善产品的结块性。介绍几种硝酸铵相稳定剂 KNO_3 、聚磷酸铵、聚丙烯酸钾, 以及聚丙烯酸钾与聚磷酸铵共用对产品防结块作用效果。结果表明, 添加聚磷酸铵(APP)或聚丙烯酸钾能改善硝硫基颗粒水溶肥的防结块性; 添加16%APP和1% MgSO_4 的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥室温放置30 d, 外形变化测试无变形; 添加1%聚丙烯酸钾和5%聚磷酸铵的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥室温放置60 d, 外形变化测试无变形。添加聚磷酸铵或聚丙烯酸钾有效解决了其易结块的问题。

[关键词] 高塔工艺; 硝硫基颗粒水溶肥; 防结块; 相稳定剂

[中图分类号] TQ444 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 02-0066-05

Research on anti-caking of high tower process nitrate sulfur based granular water-soluble fertilizer

ZENG Rui, WANG Xiaomeng, ZHANG Jian, ZHONG Zhen

(Xinyangfeng Agricultural Technology Co., Ltd., Jingmen 448000, China)

Abstract: The high tower process nitrate sulfur based granular water-soluble fertilizers is prone to clumping mainly due to the polycrystalline and hygroscopic properties of ammonium nitrate. In order to improve the agglomeration of nitrate sulfur based water-soluble fertilizers, a phase stabilizer is used to change the crystallization temperature of ammonium nitrate, thereby improving the agglomeration of the product. The anti-caking effect of several ammonium nitrate phase stabilizers, such as potassium nitrate, ammonium polyphosphate, potassium polyacrylate, and combined of potassium polyacrylate and ammonium polyphosphate on the product are introduced. The results indicate that adding ammonium polyphosphate or potassium polyacrylate can improve the anti-caking properties of nitrate sulfur based water-soluble fertilizers; Nitrate sulfur based 17-17-17 granular water-soluble fertilizer added with 16% APP and 1% magnesium sulfate is placed at room temperature for 30 day, and the shape change test shows no deformation; Nitrate sulfur based 17-17-17 granular water-soluble fertilizer added with 1% potassium polyacrylate is placed at room temperature for 60 days, and the shape change test shows no deformation. Adding APP or potassium polyacrylate can effectively solve the problem of easy caking of nitrate sulfur based granular water-soluble fertilizer.

Key words: high tower process; nitrate sulfur based granular water-soluble fertilizer; anti-caking; phase stabilizer

0 引言

水溶肥料作为一种可以随水施用的新型肥料, 已大量应用到喷灌、滴灌等设施农业中。高塔工艺硝硫基复合肥同时含有铵态氮和硝态氮, 具有溶解快、肥效快等优点, 非常适合用作水溶肥料。但是, 将高塔硝硫基复合肥做成硝硫基颗粒水溶肥料后产品变得极易结块, 严重影响了其推广和应用。

高塔工艺硝硫基颗粒水溶肥料具备全水溶、溶解快、无残渣的特点, 但在肥料生产过程中肥料易

结块。高塔工艺硝硫基颗粒水溶肥料极易结块主要是由硝酸铵引起的, 因为硝酸铵具有多晶性、吸湿性等特性。一般认为在 $-17 \sim 170$ °C范围内, 硝酸铵在常压下有5种热力学上稳定的晶型, 每种晶型仅在一定温度范围内存在。当硝酸铵由一种晶型转变成另一种晶型时, 体积将随着晶体结构和晶格体

[收稿日期] 2024-11-13

[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。

积而改变^[1]，尤其是在32.3℃时，Ⅲ-Ⅳ的变化，其晶格体积变化最大。对Ⅲ-Ⅳ晶型转变温度32.3℃需要做以下说明：多篇文献指出^[2-4]，在进行DSC测试时，硝酸铵在84℃附近检测不到转晶峰，而是在53℃附近有一个转晶峰。为了改善硝硫基颗粒水溶肥的结块情况，从其结块源头硝酸铵进行研究，使用相稳定剂改变硝酸铵的晶变温度从而改善产品的结块性^[5-7]。

在硝硫基颗粒水溶肥料的生产过程中，约150℃的熔融料浆从高塔喷下，被空气冷凝成60℃左右的肥料颗粒，肥料颗粒再被冷却至35℃左右进行包装，且在储存的前几天肥料可能出现约5℃的温升，如此肥料便经过了硝酸铵的多个晶型转变点，而且还可能多次经过32.3℃时Ⅲ-Ⅳ的晶型转变点，随着晶型的转变，其产品体积和密度都将发生变化，从而产生结块现象。为解决这一问题，科研人员研发了相稳定硝酸铵，即向硝酸铵中加入相稳定剂，改变硝酸铵在使用温度范围的晶变温度，从而降低其宏观的体积变化率。硝酸铵相稳定剂种类有很多种，主要包括无机盐、金属氧化物、表面活性剂及聚合物等，它们均是通过影响硝酸铵晶体中NH₄⁺和NO₃⁻这两种离子的相互作用来改变晶变特性的^[8-9]。

笔者尝试向硝硫基复合肥中添加单一的水溶性的硝酸铵相稳定剂，或者添加复配的水溶性的相稳定剂组合，通过抑制硝酸铵的相转变，尤其是其在约32.3℃时Ⅲ-Ⅳ之间的相转变，以解决硝硫基颗粒水溶肥料的结块问题。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

实验原料及仪器分别见表1、表2。

表1 实验原料

Table 1 Experimental material

名称	规格	产地
硝酸铵	34.5-0-0	新洋丰农业科技股份有限公司
硫酸铵	20.8-0-0	新洋丰农业科技股份有限公司
磷酸二氢钾(MKP)	0-52-34	湖北强兴化工有限公司
工业级磷酸一铵(MAP)	12-60-0	新洋丰农业科技股份有限公司
聚磷酸铵(AAP)	18-58-0	云南天耀化工有限公司
聚丙烯酸钾(KPAM)		湖北楚烁生物科技有限公司
曼海姆硫酸钾	0-0-52	新洋丰农业科技股份有限公司
硝酸钾	13.5-0-46	潍坊达康化工有限公司
氯化钾	0-0-60	青海盐湖工业股份有限公司
无水硫酸镁		济南金昊化工有限公司

表2 实验仪器

Table 2 Experimental instrument

仪器	型号	制造商
干燥箱	101型	北京市永光明医疗仪器有限公司
天平	BSA124S/BSA4202S	赛多利斯莱珀思(上海)贸易有限公司
电热板	ML-1.5-4	北京市永光明医疗仪器有限公司
pH计	PHS-3C	上海仪电科学仪器股份有限公司
可见分光光度计	721E型	上海光谱仪器有限公司

1.2 实验方法

原料的准备。将实验所需原料放在80℃干燥箱中烘干至恒质量后备用。

样品的制作。根据高塔硝硫基17-17-17颗粒水溶肥配方，称取所需原料共200g。先将硝酸铵倒入250mL玻璃杯中，放置到电热板上加热至熔融，然后将剩余原料倒入熔融硝酸铵中制备成均一的肥料料浆，搅拌5min后将肥料料浆倒入专用模具中自然冷却就制得了直径约120mm、厚2~5mm的圆饼形肥料样品。

样品外形变化测试。将肥料样品装入自封袋中，放在室温下观测样品外形变化情况，或者将肥料样品放入干燥箱内加热数小时，然后取出放在室温下，如此高低温循环数日，每次循环后观测样品外形变化情况。外形变化情况分以下4种：严重变形、一般变形、轻微变形、几乎不变形。根据样品变形情况判断其发生的晶变程度从而得出其结块概率。

2 实验结果与讨论

2.1 无机盐防结块剂的应用

一些无机盐能与肥料中的水分结合，抑制因水分引起的肥料溶解和毛细吸附，可作为肥料的内置防结块剂，如无水硫酸镁、硝酸镁、一水硫酸锌、硫酸铝等^[10-13]。由于无水硫酸镁有很强的干燥能力，因此本实验使用无水硫酸镁作为防结块剂。

2.2 相稳定剂硝酸钾对产品防结块性的影响

硝酸钾与硝酸铵混合可使得硝酸铵晶相稳定，硝酸钾添加量10%左右。譙娟研究了一系列无机钾盐对硝酸铵相稳定性的影响^[5]，如图1、表3所示。从图1DSC曲线可以看出，纯硝酸铵在53℃附近有一个转晶峰，KOH相稳定硝酸铵(PSAN-16)在35℃附近Ⅲ-Ⅳ相变峰变弱，而KF相稳定硝酸铵PSAN-09和KNO₃相稳定硝酸铵PSAN-15在35℃附近Ⅲ-Ⅳ相变峰消失，Ⅱ-Ⅲ相变温度提高至约95℃。从这里也可以看出，选择

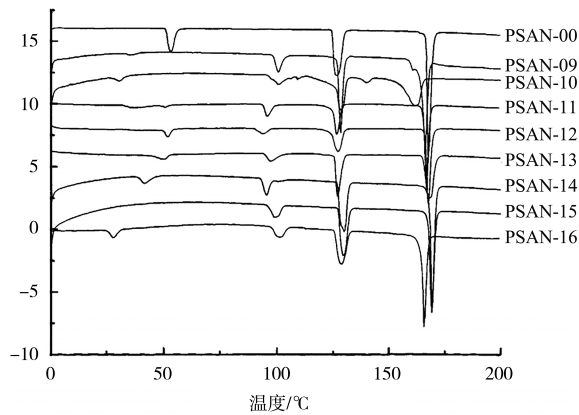


图1 无机钾盐相稳定硝酸铵的DSC曲线图谱数据

Fig. 1 DSC curve of ammonium nitrate stabilized by inorganic potassium salt phase

注:PSAN-00代表纯硝酸铵,PSAN-09代表2%KF相稳定硝酸铵,PSAN-15代表2%KNO₃相稳定硝酸铵,PSAN-16代表2%KOH相稳定硝酸铵。

60 °C作为高低温循环温度是合理的。

根据KNO₃相稳定硝酸铵的相关研究,设计了一系列添加KNO₃的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥配方,制作样品并进行了外形变化测试,如表3所示。从表3结果可以看出,添加相稳定剂KNO₃未改善硝硫基17-17-17颗粒水溶肥的结块问题。分析原因是,在硝酸钾和硝酸铵的二元体系中硝酸钾对硝酸铵的相稳定性有效,但是硝硫基17-17-17颗粒水溶肥中还含有较多其他物质,在多种物质和硝酸铵的多元体系中多种物质共同作用导致硝硫基颗粒水溶肥的防结块性未得到明显改善。

表3 添加相稳定剂KNO₃的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥外形变化测试结果

Table 3 Test results of shape charge of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer with phase stabilizer potassium nitrate

编号	配方及处理	外形变化测试
0	原配方	60 °C ~ 室温,高低温循环,第一次就严重变形
1	原配方基础上5% KNO ₃ +2.5%MgSO ₄	60 °C ~ 室温,高低温循环10次,严重变形
2	13%MKP+5% KNO ₃ +2.5%MgSO ₄	60 °C ~ 室温,高低温循环10次,严重变形
3	20%MKP+5% KNO ₃ +2.5%MgSO ₄	60 °C ~ 室温,高低温循环10次,严重变形

2.3 相稳定剂APP对产品防结块性的影响

设计了一系列添加聚磷酸铵的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥配方,制作样品并进行了外形变化测试,结果分别见表4、表5、表6。

表4 添加相稳定剂APP的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥外形变化测试结果(第一组)

Table 4 Test results of shape charge of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer with phase stabilizer APP (Group 1)

编号	配方及处理	外形变化
0	原配方	60 °C至室温,高低温循环,第一次就严重变形
1	10%MKP+5% APP+1%MgSO ₄	60 °C至室温,高低温循环10次,一般变形
2	15%MKP+5% APP+1%MgSO ₄	60 °C至室温,高低温循环10次,轻微变形
3	20%MKP+5% APP+1%MgSO ₄	60 °C至室温,高低温循环10次,轻微变形

表5 添加相稳定剂APP的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥外形变化测试结果(第二组)

Table 5 Test results of shape charge of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer with phase stabilizer APP (Group 2)

编号	配方及处理	室温放置30 d外形变化
1	15%MKP + 5% APP + 1%MgSO ₄	一般变形
2	15%MKP + 7% APP + 1%MgSO ₄	一般变形
3	15%MKP + 9% APP + 1%MgSO ₄	一般变形
4	15%MKP + 16% APP + 1%MgSO ₄	无变形

注:室温放置15 d左右,均无明显变形。

表6 添加相稳定剂APP的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥外形变化测试结果(第三组)

Table 6 Test results of shape charge of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer with phase stabilizer APP (Group 3)

编号	配方及处理	室温放置30 d外形变化
1	10%MKP + 9% APP + 0% MgSO ₄	一般变形
2	15%MKP + 9% APP + 1% MgSO ₄	一般变形
3	10%MKP + 9% APP + 2% MgSO ₄	几乎无变形

注:室温放置15 d左右,均无明显变形。

从表4可以看出,添加5%APP对改善硝硫基颗粒水溶肥的防结块性有效果,而且在同样量的APP下,随着MKP含量提高,硝硫基颗粒水溶肥的防结块性性能更好。分析原因是, MKP含量的提高最终表现为肥料中K⁺含量升高, K⁺取代硝酸铵晶格中的NH₄⁺就增多,使得NO₃⁻与NH₄⁺之间的氢键减弱,而不易发生硝酸铵III-IV的相转变^[14-16]。

从表5可以看出,在同样量的MKP下,随着APP含量提高,硝硫基颗粒水溶肥的防结块性更佳。分析原因是,聚磷酸铵中的极性基团聚合态磷

酸根与硝酸铵晶格中的 NH_4^+ 形成氢键,使得 NO_3^- 与 NH_4^+ 之间的氢键减弱,在常温状态下更容易转变为Ⅲ相,而不发生硝酸铵Ⅲ-Ⅳ的相转变。

从表6可以看出,在同样量的APP下,无水硫酸镁含量高的硝硫基颗粒水溶肥的防结块性更佳。

2.4 相稳定剂聚丙烯酸钾及其与聚磷酸铵共同作用对产品的影响

聚丙烯酸钾(KPAM)属于高吸水性树脂,易溶于水,常用作保水剂、水处理剂、井壁稳定剂等。相关聚丙烯酸钾相稳定硝酸铵研究表明^[8, 11],聚丙烯酸钾作为硝酸铵的晶相稳定剂,一方面是 K^+ 取代 NH_4^+ 破坏原有的晶胞结构,防止硝酸铵的Ⅳ-Ⅲ相转变,并将Ⅲ-Ⅱ相转变温度提高;另一方面是聚丙烯酸钾附着在硝酸铵的表面上,在其表面形成了一层疏水保护膜。当聚丙烯酸钾的添加量(质量分数)达到或大于1.1%时,就能消除硝酸铵其在32.3℃下Ⅳ-Ⅲ的相转变,并将Ⅲ-Ⅱ的相转变温度由84.2℃提高到100℃左右。

根据以上研究,设计了只添加聚丙烯酸钾的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥配方并对其外形变化进行了测试,如表7所示。本实验所用相稳定剂聚丙烯酸钾为钟祥楚烁贸易公司提供的样品,其水含量较高, $w(\text{H}_2\text{O})$ 为3.18%,使用时将其烘干至 $w(\text{H}_2\text{O})$ 为0.43%。

表7 KPAM对硝硫基17-17-17颗粒水溶肥防结块的影响

Table 7 Effect of KPAM on the anti-caking of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer

编号	配方及处理	外形变化测试
1	7%MKP + 22%工业MAP	室温放置2 d开始严重变形
2	7%MKP + 22%工业MAP + 0.5%KPAM	室温放置15 d一般变形
3	7%MKP + 22%工业MAP + 1%KPAM	室温放置30 d轻微变形
4	7%MKP + 22%工业MAP + 2%无水硫酸镁 + 1%KPAM	室温放置30 d轻微变形

从表7可以看出,对照配方(7%MKP+22%工业MAP)在室温放置2 d的条件下就变形了,而只添加了0.5%~1.0%聚丙烯酸钾的小试样(编号2、3和4)可以室温放置较长时间不变形,说明相稳定剂聚丙烯酸钾可改善硝硫基17-17-17颗粒水溶肥防结块性。

在上述基础上,再设计同时添加聚丙烯酸钾和聚磷酸铵的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥配方并对其防结块性进行了测试,如表8所示。

表8 KPAM和APP共同作用对硝硫基17-17-17颗粒水溶肥防结块的影响

Table 8 Effect of KPAM and APP on anti-caking of nitrosulfuryl 17-17-17 granular water-soluble fertilizer

编号	配方及处理	外形变化测试
0	原配方	室温放置6 d变形
1	8%MKP + 15%工业MAP + 5%APP	室温放置20 d变形
2	8%MKP + 13%工业MAP + 7%APP	室温放置30 d变形
3	15%MKP + 5%工业MAP + 9%APP	室温放置60 d未变形
4	13%MKP + 0%工业MAP + 15%APP	室温放置60 d未变形
5	8%MKP + 15%工业MAP + 5%APP + 1%KPAM	室温放置60 d未变形

注:APP规格为14-65-0,贵州川恒化工股份有限公司

从表8可以看出,对照配方0在室温放置6 d的条件下就变形了,当降低工业级磷酸一铵用量、增加聚磷酸铵用量,小试样编号1、2、3和4在室温条件下的变形情况得到改善,但原料成本会相应增加。编号5和2的试样同时与编号1对比,在配方1的基础上增加聚磷酸铵用量的样品没有再添加1%聚丙烯酸钾后的样品的防结块效果好,即编号2的试样没有编号5的试样防结块效果好。样品5可以看到,同时添加1%聚丙烯酸钾和5%聚磷酸铵的硝硫基17-17-17颗粒水溶肥具有很好的稳定性。

原因分析:一是聚丙烯酸钾和聚磷酸铵作为硝酸铵的晶相稳定剂,能防止在储运过程中硝酸铵发生Ⅳ-Ⅲ相转变;二是聚丙烯酸钾作为高吸水性树脂,能有力锁住水分,防止水分迁移,阻止盐桥现象发生,起到内部防结剂的作用。

3 结论

由于硝酸铵的多晶性,尤其是其在室温附近易发生Ⅲ-Ⅳ的相转变,导致硝硫基颗粒水溶肥极易结块。笔者向硝硫基颗粒水溶肥中添加硝酸铵相稳定剂APP,通过抑制硝酸铵的相转变,有效解决了其易结块的问题。

(1) 添加相稳定剂 KNO_3 、相稳定剂 KNO_3 和无水硫酸镁共同作用都未能改善硝硫基17-17-17颗粒水溶肥的防结块性。

(2) 添加APP能改善硝硫基颗粒水溶肥的防结块性,并且高聚合度的聚磷酸盐能更好地改善硝硫基颗粒水溶肥的防结块性。同时在添加APP的情况下加入一定量的无水硫酸镁的硝硫基颗粒水溶肥,在室温和高低温循环情形下防结块性较好。

(3) 添加聚丙烯酸钾能改善硝硫基颗粒水溶肥的防结块性,当添加质量分数0.5%~1.0%的聚丙

烯酸钾时硝硫基 17-17-17 颗粒水溶肥在室温下表现出较好的防结块性,同时添加 1%聚丙烯酸钾和 5%聚磷酸铵的硝硫基 17-17-17 颗粒水溶肥具有很好的稳定性,室温放置 60 d 未变形。

[参考文献]

- [1] 李君励,张惠坤.复合推进剂中使用的改性硝酸铵[J].推进技术,1994(1):58-64.
LI J L, ZHANG H K. Ammonium Nitrate in the composite propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 1994(1):58-64.
- [2] 何栋,吴舒,肖占梅,等.硝酸铵 AN_N↔AN_M相变机制与改性添加剂研究进展[J].磷肥与复肥,2017,32(2):12-15.
HE D, WU S, XIAO Z M, et al. AN_N↔AN_M phase transition mechanism of ammonium nitrate and research progress of its modified additives[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(2):12-15.
- [3] 刘哲峰,李旭祥,邹忠良.硝酸铵的结块与防止[J].应用化工,2006,35(6):464-466,473.
LIU Z F, LI X X, ZOU Z L. Agglomeration and anti-agglomeration of ammonium nitrate [J]. Applied Chemical Industry, 2006, 35(6):464-466,473.
- [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 fertilizer in prilling tower [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, 23(2):51-52.
- [5] 谯娟.聚合物相稳定硝酸铵的研究[D].南京:南京理工大学,2009.
QIAO J. Study on the phase transition of ammonium nitrate stabilized by polymers [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.
- [6] 高雪.硝基复合肥防结块剂技术的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017.
GAO X. The technology research of nitro-compound fertilizer anti-caking agent [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [7] 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, et al. Discussion on the Reasons of Caking of Compound Fertilizer and Development of Anti-Caking Agent [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018, 45(4):23-25,49.
- [8] 刘东胜.相稳定硝酸铵相转变影响因素研究[D].南京:南京理工大学,2008.
LIU D S. Effects of on phase transition of phase-stable ammonium nitrate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008.
- [9] 宋明凯.硝基复合肥中添加碳酸钠的试验探究[J].山西化工,2022,42(5):12-14.
SONG M K. Experimental Study on Adding Sodium Carbonate into Nitro Compound Fertilizer [J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(5):12-14.
- [10] 梁红江.AZF工艺生产粒状水溶肥的技术开发[D].秦皇岛:燕山大学,2018.
LIANG H J. Development of AZF technology the production of granular water soluble fertilizer [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [11] 尤婷.聚丙烯酸钾相稳定硝酸铵的研究[D].南京:南京理工大学,2010.
YOU T. Effect of acrylic potassium salt polymer on the phase stabilization of ammonium nitrate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [12] 张俊亚.新型硝硫基氮钾复合肥防结块技术研究[EB/OL].(2014-01-20)[2024-11-13].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=94FxnJrPFcuqPn5UfKkFzHNswznyZgJH06vX5C45EZMUQC45dlRrprDPQE6WQdkBHAB1lsWsUe_BQ4PjZJ14NaXh-ue7qUwgHBiFTgLjrOqtXlWEy1pPaKFAwJiMXxvGkueZ62r6M8-ouKa2_g35cqi1Fvrozhc6Vjv-UNIQFpO3vL9Mw6eteBmR3A4zPHf&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
ZHANG J Y. Research on anti caking technology of new nitrate sulfur based nitrogen potassium compound fertilizer [EB/OL]. (2014-01-20)[2024-11-13].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=94FxnJrPFcuqPn5UfKkFzHNswznyZgJH06vX5C45EZMUQC45dlRrprDPQE6WQdkBHAB1lsWsUe_BQ4PjZJ14NaXh-ue7qUwgHBiFTgLjrOqtXlWEy1pPaKFAwJiMXxvGkueZ62r6M8-ouKa2_g35cqi1Fvrozhc6Vjv-UNIQFpO3vL9Mw6eteBmR3A4zPHf&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [13] 李德军,尹连伟.硝基复合肥结块原因分析及应对措施[J].肥料与健康,2023,50(4):60-63.
LI D J, YIN L W. Analysis of the reasons for the caking of nitro compound fertilizer and corresponding measures [J]. Fertilizer and Health, 2023, 50(4):60-63.
- [14] 吴舒,王金铭,任宇红,等.硝铵磷晶型与IV↔III相变温度研究[J].磷肥与复肥,2017,32(11):4-5,21.
WU S, WANG J M, REN Y H, et al. Study on crystal form of ammonium phosphate nitrate and phase transition temperature of IV↔III [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(11):4-5,21.
- [15] 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.
- [16] 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 type water-soluble anti-caking agent for compound fertilizer and study on its anti-caking effect [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(3):5-7.