

# 转鼓造粒复合肥产品防结块性能探索与创新改造

晏祥瑞, 徐 睿, 阙仁江, 马兴买, 冯伟珍

(云南云天化云峰化工有限公司, 云南 宣威 655400)

**[摘要]** 复合肥结块是制约其生产、储运及应用的关键难题, 转鼓造粒工艺生产的复合肥尤易出现结块问题。基于毛细黏合、晶桥等结块理论, 从内在因素与外部因素分析复合肥结块机制, 围绕转鼓造粒全流程提出工艺改进、防结剂系统优化、设备升级的一体化技术改造方案。通过优化喷浆系统与氯化工艺、单段干燥改双段干燥并配套逆流冷却、扩大筛分面积与完善返料流程、升级防结剂雾化及精准添加系统等措施, 有效降低了产品水含量, 提升了颗粒均匀度与强度。结果表明, 改造后产品储存1个月结块率由25%降至8%, 结块强度显著下降, 颗粒圆整度、养分均匀性与商品价值大幅度提升; 生产效率提高、成本降低, 年节约成本1600万元, 增加利润超3200万元, 同时减少肥料损耗与能源消耗。该方案可为复合肥行业防结块技术升级与可持续发展提供实用参考。

**[关键词]** 转鼓造粒; 复合肥; 结块机制; 工艺改进; 防结剂系统优化; 设备升级

**[中图分类号]** TQ444 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 03-0048-06

## Exploration and innovation modification of anti-caking performance of compound fertilizer produced by drum granulation technology

YAN Xiangrui, XU Rui, QUE Renjiang, MA Xingmai, FENG Weizhen

(Yunnan Yuntianhua Yunfeng Chemical Co., Ltd., Xuawei 655400, China)

**Abstract:** The caking of compound fertilizers is a key problem restricting their production, storage, transportation and application. Compound fertilizers produced by the drum granulation process are particularly prone to caking issues. Based on the theories of capillary adhesion and crystal bridges, the caking mechanism of compound fertilizers from both internal and external factors is analyzed. An integrated technical transformation scheme for the entire process of drum granulation is proposed, including process improvement, optimization of anti-caking agent system, and equipment upgrading. Through measures such as optimizing the spraying system and ammoniation process, replacing single-stage drying with double-stage drying and supporting counterflow cooling, expanding the screening area and improving the return material process, upgrading the atomization and precise addition system of anti-caking agents, etc., the moisture content of the products is effectively reduced, the caking rate of the products after one month of storage is decreased from 25% to 8%, the agglomeration strength is decreased significantly, the particle roundness, nutrient uniformity and commercial value are significantly improved. The production efficiency is increased, the cost is reduced, and annual cost savings reach 16 million RMB Yuan, with an increase in profit of over 32 million RMB Yuan. At the same time, the fertilizer loss and energy consumption are reduced. This scheme can provide practical reference for the upgrade of anti-caking technology and sustainable development of the compound fertilizer industry.

**Key words:** drum granulation; compound fertilizer; caking mechanism; process improvement; optimization of anti-caking agent system; equipment upgrading

### 0 引言

在农业生产中, 化肥是保障农作物产量与质量

的关键投入要素, 对农业的可持续发展起着至关重要的作用。复合肥作为肥料领域的重要品类, 因其

收稿日期: 2025-12-11

作者简介: 晏祥瑞(1993—), 男, 云南宣威人, 助理工程师, 从事磷酸、复合肥产品生产和技术开发等工作。

能够同时提供氮、磷、钾等多种主要养分,满足作物在不同生长阶段的多样化需求,在农业生产中占据举足轻重的地位。

然而,在复合肥的生产、运输与储存过程中,结块问题一直是困扰行业发展的一大难题。结块现象不仅严重影响产品的外观和物理性状,使颗粒不再均匀、松散,降低了产品的商品价值,还会给后续的使用带来诸多不便。在生产环节,结块的肥料会导致设备堵塞,降低生产效率,增加生产成本。例如,在转鼓造粒生产过程中,结块的肥料会附着在转鼓内壁和造粒机的部件上,影响造粒的均匀性和稳定性,导致造粒效率下降,次品率增加<sup>[1]</sup>。

本研究旨在深入探究转鼓造粒生产复合肥产品结块的各种影响因素,并在此基础上提出针对性的、切实可行的技术改造方案,以有效解决转鼓造粒生产复合肥产品的结块问题,显著提高其防结块性能。该研究成果有望为复合肥行业提供可借鉴的技术方案 and 实践经验,推动行业技术水平提升,促进复合肥行业的可持续发展。

## 1 复合肥结块的原理与影响因素

复合肥结块是一个复杂的物理化学过程,涉及多种因素的相互作用。目前,关于复合肥结块的原理主要有毛细黏合理论、晶桥理论、化学反应理论和塑性变形理论。复合肥结块受到多种因素的影响,这些因素相互交织,共同作用,使得结块问题变得复杂多样。总体而言,可将这些影响因素分为内在因素和外部因素两大类。内在因素包括化学组成、含水量、杂质、颗粒大小和形状等。外部因素包括空气湿度、温度、压力和储存时间等<sup>[2]</sup>。

## 2 转鼓造粒复合肥生产工艺流程

转鼓造粒工艺是复合肥生产中应用广泛的传统工艺之一,其核心是通过转鼓旋转使物料在筒体内实现团聚成粒。该工艺成熟,适应性强,设备成本相对较低,适用于多种配方复合肥的生产。转鼓造粒工艺流程主要包括以下几个环节。

1) 原料预处理。将大块或结块的基础肥料,如尿素、磷铵、钾肥等,通过破碎机破碎至粒径 $150 \sim 180 \mu\text{m}$ 的粉状,以保证物料粒径均匀。根据复合肥配方,如氮磷钾15-15-15、18-9-18等,通过自动配料系统将各原料按比例计量,送入混合机进行预混合,确保物料成分均匀。

2) 造粒。预混后的粉状物料送入转鼓造粒机,同时向筒内喷入定量的工艺水、蒸汽或黏结剂。转鼓倾斜角度通常为 $3^\circ \sim 5^\circ$ ,转速控制在

$10 \sim 20 \text{ r/min}$ ,物料在筒内从高端向低端移动的过程中,完成滚动团聚,形成粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 的湿颗粒。在这个过程中,物料的运动轨迹和相互作用较为复杂,受到转鼓的旋转力、重力以及黏结剂的作用,颗粒逐渐形成并长大。

3) 干燥与冷却。湿颗粒先进入回转干燥机与由热风炉提供的热气流(温度一般在 $120 \sim 180^\circ\text{C}$ )接触,将颗粒 $w(\text{H}_2\text{O})$ 降至1.5%以下,避免后续结块和返潮。干燥后的高温颗粒,温度为 $80 \sim 100^\circ\text{C}$ ,进入冷却机,通过常温或低温气流降温至 $40^\circ\text{C}$ 以下,同时进一步去除残余水分,提升颗粒稳定性。干燥过程中,热气流与颗粒的接触方式、速度以及温度分布等都会影响干燥效果和颗粒质量。

4) 筛分分级与返料。冷却后的颗粒进入振动筛,分为三级。粒径 $>4 \text{ mm}$ 的大颗粒送入破碎机破碎后返回造粒工序;粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 的合格颗粒进入包裹工序;粒径 $<2 \text{ mm}$ 的细粉返回转鼓造粒机重新造粒。筛分分级过程中,振动筛的筛网孔径、振动频率等参数对颗粒的分离效果有重要影响。

5) 包裹与成品包装。合格颗粒进入包裹机喷涂防结剂,如滑石粉、石蜡乳液等,防止储存过程中结块。经计量、包装后,成为最终复合肥成品入库。包裹过程中,防结剂的喷涂量、均匀性以及颗粒的结合方式等都会影响防结块效果<sup>[3]</sup>。

转鼓造粒工艺虽然具有诸多优点,但也存在一些不足之处。该工艺生产的复合肥容易出现结块问题,影响产品质量和使用效果。在造粒过程中,由于物料的团聚方式和颗粒的形成机制,可能导致颗粒内部结构不均匀,增加了结块的风险<sup>[4]</sup>。

## 3 复合肥防结块性能技术改造方案

云南云天化云峰化工有限公司(以下简称公司)40万t/a复合肥装置存在造粒机进口结疤问题,需要频繁清理;产品颗粒圆润度、粒径均匀性差,外观质量差;储存1个月后结块率为25%左右,结块率较高。为有效解决复合肥结块问题,提高其防结块性能,从造粒工艺改进、防结块剂优化应用2个方面提出技术改造方案。通过对生产工艺的优化、防结块剂的创新应用,以及关键设备的选型改造,全面提升复合肥产品的品质和防结块性能。

### 3.1 工艺改进

#### 3.1.1 优化造粒工艺

针对硝基复合肥产品结块问题,公司对硝酸铵溶液料浆和磷铵料浆喷浆系统进行了创新性改造。

从产品物理结构角度出发,公司将硝酸铵溶液

喷头移到原料浆喷头位置,增大硝酸铵溶液出口与造粒机进口距离,避免硝酸铵溶液喷洒至造粒机入口处筒体上,减少入口处结疤问题。同时,料浆喷头移至第一、二氨分布器中间,延长了硝酸铵溶液喷头和料浆喷头的距离,显著增加了硝酸铵溶液和磷铵料浆喷洒的距离。这一调整使得硝酸铵溶液能够更充分地喷洒至返料料床,有效提升硝酸铵溶液与固体物料的均匀混合及涂布,避免了局部浓度过高导致的结疤问题,同时为磷铵料浆包裹硝酸铵创造了有利条件。通过这种方式,将容易结块的硝酸铵包裹在产品粒子内部,从物理结构上有效降低了产品结块的风险。技术人员通过详细分析物料在造粒机内的运动轨迹和分布情况,对不同喷嘴间距下物料的混合、涂布和造粒过程进行了深入研究。结果表明,增大喷嘴间距后,硝酸铵溶液在返料料床的喷洒均匀度提高了30%,为后续磷铵溶液的均匀涂布提供了基础<sup>[5]</sup>。改造前后喷浆系统分布分别见图1、图2。

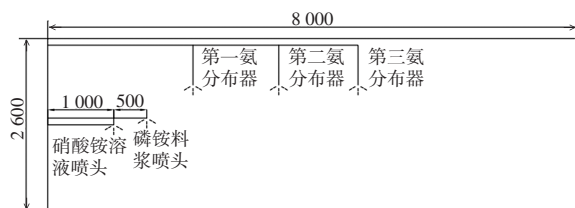


图1 改造前喷浆系统分布

Fig. 1 Distribution of the spraying system before renovation

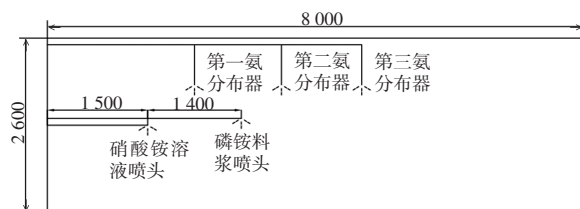


图2 改造后喷浆系统分布

Fig. 2 Distribution of the spraying system after renovation

在产品化学特性方面,公司在氨分布器两侧开孔,确保氨与硝酸铵溶液及料浆充分反应。同时,增加第一氨分布器的通氨量,将硝酸铵溶液及硫酸钾中的游离酸进行中和,从而提高产品pH。通过增加通氨量,产品pH从原来的5.5提高到了6.5,有效中和了游离酸,降低了产品的吸湿性,提高了产品的抗结块性能。

从微观层面来看,pH的提高使得物料分子间的相互作用力发生改变,减少了分子间因游离酸而产生的异常吸附,从而使产品的晶体结构更加规整,进一步抑制了结块的形成。此外,公司还对造

粒机内的温度和湿度环境进行了精准控制。合适的温湿度条件有助于氨化反应的顺利进行,同时也能避免因环境因素导致产品吸潮结块。在这样稳定的环境下,氨化反应更加充分,产品的化学稳定性得到进一步提升。

公司对造粒后的产品粒径分布进行了优化。通过调整造粒机的转速和筛网的孔径,使得产品的粒径更加均匀,减少了不同粒径颗粒之间的空隙和压力差异,降低了因颗粒挤压而导致的结块可能性。经过反复试验和调整,产品粒径在2~4 mm范围内的占比从原来的70%提高到了85%以上,有效提高了产品的整体抗结块性能<sup>[6]</sup>。

此次造粒工艺优化取得了显著成效。造粒机进口结疤问题得到了有效解决,在改造前,造粒机进口结疤频繁发生,平均每天停机清理1次,每次清理耗时约2 h,不仅影响生产效率,还增加了设备维护成本。改进后,造粒机进口结疤问题显著缓解,设备能够连续稳定运行5 d以上,生产效率得到了大幅度提升,月产量提高了5%。而且,物料涂布均匀性得到了极大提高,产品颗粒的物理结构更加均匀稳定,颗粒强度提高了20%,有效减少了结块风险。产品的化学组成也更加均匀,氮、磷、钾等主要养分的含量偏差明显减小,保证了肥料的质量稳定性和使用效果的可靠性。

### 3.1.2 干燥与冷却工艺改进

研究表明,干燥与冷却工艺对复合肥的防结块性能有着重要影响,通过优化这两个环节,可以有效降低产品的水含量,减少内部热应力,提高产品的稳定性。

将单段干燥工艺改造为双段干燥工艺,是提升复合肥产品防结块性能的关键技术举措之一,其核心原理在于通过分段精准控温控湿实现对产品水含量的阶梯式调控。公司在10万 t/a复合肥装置B系列开展了系统性的双段干燥改造工程,具体实施过程中,将原有的单台 $\phi 3.2\text{ m} \times 30\text{ m}$ 转鼓干燥机替换为2台串联运行的 $\phi 2.8\text{ m} \times 22\text{ m}$ 干燥机,分别承担一烘干燥与二烘干燥任务。其中,一烘干燥的主要作用是快速去除物料表面游离水,控制出口物料温度在85~90℃、 $w(\text{H}_2\text{O})$ 在1.5%~2.0%;二烘干燥则侧重于深度脱除物料内部结合水,通过降低热风风速、延长物料停留时间(由原单段的15 min延长至双段的25 min),使最终产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 稳定控制在0.5%以下。在试生产15-5-25硫基复合肥产品时,通过设置对照组实验进行对比分析:实验组采用双

段干燥工艺将产品  $w(\text{H}_2\text{O})$  严格控制在 0.3% ~ 0.5%，对照组仍沿用传统单段干燥工艺， $w(\text{H}_2\text{O})$  为 1.0% ~ 1.2%。储存实验结果显示，在相同的储存条件下（温度  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $(65 \pm 5)\%$ 、50 kg 编织袋包装）储存 1 个月后，对照组产品结块率高达 20%，且结块硬度（采用质构仪测定）达到 0.41 MPa；而实验组产品结块率仅为 5%，结块硬度降至 0.18 MPa，用手轻搓即可松散。双段干燥工艺之所以能显著提升防结块性能，主要得益于其独特的分段调控机制：第一段干燥利用高温热风（180 ~ 200  $^\circ\text{C}$ ）快速蒸发物料表面 70% 以上的水分，避免了单段干燥中因长时间高温导致的物料表面熔融；第二段干燥则采用中温热风（120 ~ 140  $^\circ\text{C}$ ）进行温和干燥，在确保水分深度脱除的同时，有效减少了物料内部热应力和晶体缺陷的产生，从而降低了储存过程中因晶桥形成和毛细管吸附导致的结块风险。这一改造不仅解决了传统单段干燥难以精准控制水分的技术难题，更为后续冷却、筛分等工序的稳定运行创造了有利条件<sup>[6]</sup>。

除了双段干燥改造，优化冷却工艺同样关键。公司在该装置的冷却环节采用逆流冷却方式，使冷空气从产品流动的反方向进入冷却器，使产品能够均匀、缓慢地冷却。在试生产过程中，使用传统冷却方式时，产品内部的温度梯度较大，部分区域冷却过快形成硬壳，而内部温度和湿度仍较高，在储存一段时间后容易出现结块现象。采用逆流冷却方式后，产品内部温度梯度明显减小，冷却更加均匀。经过检测，采用逆流冷却的产品颗粒内部热应力降低了 30%，大幅度减少了因热应力导致的结块风险。同时，这种冷却方式还能使产品表面形成一层均匀的保护膜，进一步阻挡外界水分的侵入，增强了产品的防潮能力，从而提高了防结块性能。此外，为了更好地配合双段干燥和逆流冷却工艺，公司还对干燥和冷却设备的通风系统进行了升级。新的通风系统能够更有效的排出湿气，保证干燥和冷却环境的干燥，为提高产品的防结块性能提供了有力保障。

### 3.1.3 完善筛分与返料工艺

对筛分系统进行全面的技术升级与改造，是有效解决上述生产瓶颈和产品质量问题的关键所在。针对 10 万 t/a 复合肥装置 A 系列热料筛分环节存在的不足，公司实施了系统性的改造工程，将筛分面积扩大了 30%，同时对筛网的孔径分布和整体结构进行了精细化调整与优化。经过此次改造，筛分效

率显著提升了 25%，颗粒的圆整度有了明显改善，整个系统的返料过程也更加平稳和可控。在改造之前，由于筛分面积严重不足，导致大量颗粒无法得到充分和有效的筛分，致使最终产品中混杂了较多不符合规格的大颗粒及过量细粉，这不仅影响了产品的外观一致性，也降低了其实际使用性能。改造完成后，通过实际生产数据对比，产品中的大颗粒占比减少了 20%，细粉占比降低了 30%，颗粒的整体均匀度得到了显著提升，圆整度指标更是提高了 15%，全面优化了产品质量。

与此同时，对产品包装系统进行了关键升级，增加了高效筛分设施，该设施能够在物料进入散存库和后续包装流程之前，有效识别并分离出其中的不合格粉状及块状物料。通过实施这一精细化的筛分操作，不仅显著改善了最终产品的外观质量，使其更加均匀和符合标准，还有效去除了那些比表面积较大、容易吸湿结块的细小颗粒和粉末。在后续储存过程中，经过筛分处理的产品表现出优异的抗结块性能，实际数据表明，储存 2 个月后，其结块率仅为 8%，未经筛分处理的同类产品在同一储存条件下结块率高达 18%。这一对比结果充分证明，增加筛分设施能够显著减少易结块物料的比例，从而全面提升产品的储存稳定性和抗结块能力<sup>[7]</sup>。

### 3.2 防结块剂添加系统的改造优化

以公司 10 万 t/a 转鼓造粒装置 A 系列的包裹油系统改造为例，原工艺设计中，防结剂地槽距离包裹筒较远，100 m 左右，导致包裹油在长距离输送过程中温度下降明显，频繁发生管线堵塞与断流现象，进而造成包裹油在肥料颗粒表面分布不均，严重影响防结块效果。针对这些问题，实施了多项技术改造：首先，将防结剂储槽移至包裹筒正上方，显著缩短输送距离；同时建立防结剂双槽系统，并在低位槽增设温度监测点，接入 DCS 自动控制系统进行实时监控与调节，从根本上保障了物料的连续稳定输送，杜绝了堵塞与断流情况的发生。其次，在防结剂出口管道处增设雾化喷头，并引入压缩空气辅助雾化，使防结剂以更细密、均匀的形态喷入包裹区，大大提高了其与肥料颗粒的接触效率及包覆均匀度。最后，还加装了高精度防结剂流量计，并在 DCS 系统中新增防结剂流量与产品取出量的联锁比值控制点，实现防结剂按实际生产量精准自动添加。

上述综合改造措施显著提升了防结剂在颗粒表面的附着均匀性与包覆质量，增强了防结块的实际效果。改造前，因防结剂添加不稳定、分布不均，

导致部分肥料颗粒未能获得有效包裹,整体结块率偏高;改造后,系统运行稳定,结块率降低 10%,产品抗结块性能获得显著改善,整体质量水平迈上新台阶。

另外,还对包裹筒本身进行了结构优化,通过适当增加包裹桶长度,并在筒体内新增一个油性防结剂加入点,从而能够根据不同产品的防结块需求,灵活选择多种添加模式,例如“油+粉”“油+粉+油”等组合方式,实现防结剂的多层次、多角度均匀添加。实际生产数据表明,采用该优化方案后,产品在仓储 3 个月后的结块率较改造前产品降低 8%,显示出良好的防结块持久性和稳定性<sup>[8]</sup>。

#### 4 技术改造效果验证与分析

##### 4.1 结块情况对比

(1) 在结块率方面,改造前,产品储存 7 d 后,结块率达到 12% 左右。随着储存时间的延长,结块率持续上升,在储存 1 个月后,结块率高达 25%。而改造后产品结块率明显降低,储存 7 d 后,结块率仅为 4% 左右,储存 1 个月后,结块率也仅上升到 8%。从数据对比可以清晰地看出,改进后的工艺使结块率显著下降,在储存 1 个月时,结块率降低了 17 个百分点,有效提高了产品的抗结块性能。

(2) 在结块强度方面,改造前产品结块后硬度较大,平均硬度值达到了 0.37 MPa 以上,难以破碎。而改造后产品结块后的肥料样品硬度明显较小,平均硬度值在 0.15 MPa 左右。这说明改进后的工艺不仅降低了结块率,还减轻了结块的强度,使肥料结块更容易破碎,减少了对后续使用的影响。

##### 4.2 产品质量提升

(1) 在颗粒圆整度方面,通过对筛分系统的改造和造粒工艺的优化,实验组产品的颗粒圆整度得到了明显提高。颗粒更加规则、圆润,减少了不规则颗粒和棱角的存在。

(2) 在外观质量上,产品表面更加光滑、色泽均匀,提高了产品的商品价值。通过增加筛分设施,去除了不合格的粉状及块状物料,使产品的外观显著改善。

(3) 在养分分布均匀性方面,优化后的造粒工艺和物料涂布均匀性提高,使得产品中氮、磷、钾等主要养分的分布更加均匀。通过化学分析检测发现,改造后产品中各养分含量的偏差明显减小,保证了肥料的质量稳定性。

(4) 在颗粒强度方面,改进后的工艺使得产品颗粒的物理结构更加致密和稳定,颗粒强度得到了

显著提高。采用颗粒强度测定仪对两组产品进行测试,结果显示实验组产品的平均颗粒强度比对照组提高了 30%,在储存和运输过程中更加不易破碎。

##### 4.3 经济效益分析

技术改造后,复合肥生产企业在经济效益方面取得了显著提升。在产品质量提升方面,由于有效解决了结块问题,产品的外观和物理性状得到显著改善,颗粒更加均匀、松散,产品的商品价值大幅度提高,产品退货率明显降低,客户满意度显著提升,这不仅巩固了公司在现有市场的份额,还为开拓新市场奠定了坚实基础。据统计,改进技术后的产品退货率较之前降低了 40%,客户投诉率也大幅度下降,因产品质量问题导致的经济损失显著减少。

造粒机进口结疤问题解决,使得设备能够连续稳定运行,减少了因设备故障导致的停机,设备的有效运行时间增加,生产能力得到充分发挥,产量相应提高。与改造前相比,设备的月平均运行时间增加了 8%,月产量提高了 5%。而且,物料涂布均匀性提高和干燥、冷却工艺的优化,减少了次品率,提高了产品的合格率,降低了生产成本。经过核算,改进技术后,每吨产品的生产成本降低了约 40 元,按照公司 40 万 t/a 的生产能力计算,每年可节约生产成本 1 600 万元。

通过计算,技术改造后因产品质量提升、退货率降低、生产效率提高、成本降低等带来的经济效益显著。每年因产品质量提升和市场份额扩大,预计可增加销售收入 2 000 万元;同时因生产成本降低和经济损失减少,每年利润可增加 3 200 万元。综合来看,技术改造的投资回报率较高,在短时间内即可收回投资成本,并为企业带来持续的经济效益增长。

##### 4.4 社会效益和环境效益

在社会效益方面,结块问题的解决使硝基复合肥的使用更加方便,施肥的均匀性得到保障,有效提高了肥料的利用率。农民在使用改进后的硝基复合肥时,能够更加准确地控制施肥量,避免了因施肥不均匀导致的作物生长差异,从而提高了农作物的产量和质量。据用户反馈,使用改进后的硝基复合肥,农作物产量平均提高了 12% 左右,农产品的品质也得到了明显改善,如瓜果的糖含量增加、蔬菜的口感更好等。这不仅增加了农民的收入,还保障了农产品的市场供应,对稳定农业生产和农村经济发展起到了重要作用<sup>[9]</sup>。

在推动农业现代化进程中,改进后的硝基复合

肥为机械化施肥提供了有力支持。结块问题曾是机械化施肥的一大障碍,改进后的产品流动性好,不易堵塞施肥设备,使得机械化施肥能够顺利进行。这不仅提高了施肥效率,减少了人工成本,还促进了农业生产的规模化和集约化发展。而且,公司在防结块技术改进过程中所积累的经验和技术创新,为复合肥行业提供了借鉴和参考,推动了行业技术水平的提升。

从环境效益角度分析,结块问题的解决减少了肥料在储存和运输过程中的损耗,降低了因肥料结块导致的废弃和浪费。据估算,改进技术后,每年可减少肥料损耗约4 000 t,这不仅节约了资源,还减少了因肥料废弃对土壤和水体造成的污染。而且,干燥和冷却工艺的优化,降低了能源消耗,提高了能源利用效率。改进后的干燥设备采用了先进的余热回收技术,将干燥过程中产生的余热回收,用于预热原料或其他生产环节,使能源消耗降低了12%左右。这不仅减少了企业的碳排放,还为应对全球气候变化做出了贡献。

## 5 结论与展望

本研究深入剖析了复合肥结块的原理与影响因素,全面分析了现有复合肥生产工艺及防结块技术的特点和不足,并在此基础上提出了系统的防结块技术改造方案。通过工艺改进、防结块剂的研发与应用等措施,有效解决了复合肥的结块问题,显著提高了其防结性能和产品质量。

在工艺改进方面,优化造粒工艺,调整硝酸铵溶液和磷铵料浆喷浆系统参数,使产品物理结构和化学特性得到改善,造粒机进口结疤问题有效解决,物料涂布均匀性提高,产品颗粒物理结构更加稳定。改进干燥与冷却工艺,将单段干燥改为双段干燥,优化冷却速度和时间,降低了产品水含量和内部热应力,提高了产品的稳定性。完善筛分与返料工艺,扩大筛分面积,增加筛分设施,减少了易导致结块的细小颗粒和粉末,提升了产品的外观质量<sup>[10]</sup>。

通过实验验证,技术改造后复合肥的结块率和结块强度显著降低,在储存1个月时,结块率降低了17百分点,结块强度降低,使结块肥料更容易破碎。产品质量得到提升,颗粒圆整度、外观质量、养分分布均匀性和颗粒强度都有明显改善。经

济效益显著,产品退货率降低,客户满意度提升,生产效率提高,生产成本降低,每年可节约生产成本1 600万元,增加销售收入2 000万元,增加利润3 200万元。社会效益和环境效益突出,提高了肥料利用率,促进了农业生产和农村经济发展,减少了肥料损耗和环境污染,降低了能源消耗。

## [参考文献]

- [1] 郑秀兴.我国磷复肥生产技术现状及趋势[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(10):1-11.  
ZHENG X X. Current situation and trends of phosphate and compound fertilizer production technology in China [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(10):1-11.
- [2] 张允湘.磷肥及复合肥料工艺学[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [3] 江善襄.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [4] 张雪峰,曾志伟.提高磷酸二铵产品平均主导粒径的技术与应用[J].磷肥与复肥,2020,35(6):13-14,17.  
ZHANG X F, ZENG Z W. Technology of increasing SGN of DAP and its application [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(6):13-14,17.
- [5] 崔尚宝,董正远,王洪富,等.滚筒造粒复合肥装置半料浆双氨化工艺技术升级改造[J].磷肥与复肥,2021,36(7):19-22.  
CUI S B, DONG Z Y, WANG H F, et al. Technology upgrading of double ammoniation process of semi slurry in drum granulation compound fertilizer plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021, 36(7):19-22.
- [6] 王春梅,赵天波,李凤艳,等.复合肥防结块剂技术的研究开发现状[J].磷肥与复肥,2008,23(1):60-63.  
WANG C M, ZHAO T B, LI F Y, et al. Research status on anti-caking agents for compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, 23(1): 60-63.
- [7] 高连周,周凯,赵彦武,等.水溶型复合肥防结块设备技术改造[J].盐业与化工,2015,44(4):47-49.  
GAO L Z, ZHOU K, ZHAO Y W, et al. Technical Transformation of Anti-caking Equipment for Water-soluble Compound Fertilizer [J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2015, 44(4): 47-49.
- [8] 白海丹.我国磷酸二铵行业现状、存在问题及发展对策建议[C]//中国化工学会.第三十八届中国硫与硫酸技术年会(2018)暨2018'中国硫磷钛产业链峰会论文集.杭州:出版者不详,2018:37-41.
- [9] 佚名.磷肥企业面临严峻挑战[J].化工矿物与加工,2014,43(6):49.
- [10] 何忠滢.Y公司磷肥事业部经营战略研究[D].昆明:云南大学,2015.  
HE Z Y. Business strategy of Y company's phosphate fertilizer branch [D]. Kunming: Yunnan University, 2015.