低碳背景下复合肥料生产工艺优化与节能工程技术研究

李云利　曹秀芬　张燕燕　李春晖　张　雷
内蒙古通四方农业科技有限公司　内蒙古　通辽　028400

摘　要：在“双碳”目标推进与绿色农业发展的双重导向下，复合肥料行业作为高能耗、高碳排放领域，面临着迫切的低碳转型需求。本文针对复合肥料生产中能耗过高、碳排放突出的问题，结合低碳发展要求，系统研究生产工艺优化与节能工程技术应用。通过分析复合肥主要生产工艺流程，诊断能耗与碳排放现状，评估节能降碳潜力，重点优化造粒、干燥、冷却等核心工序参数，集成动力系统改造、热力系统优化、余热梯级利用、清洁能源替代及智能能效管理等技术。本文研究成果可为复合肥料企业低碳转型提供技术支撑，助力行业实现节能降碳目标，推动农业绿色可持续发展。

关键词：低碳；复合肥料；工艺优化；节能工程；余热回收；碳减排

引言：全球“双碳”目标的提出与绿色农业政策的推进，对复合肥料生产行业提出了更高的低碳要求。复合肥料作为农业生产的核心投入品，其生产过程涉及多道高能耗工序，化石燃料消耗与电力损耗导致碳排放量大，不仅增加企业运营成本，也与低碳发展理念相悖。基于此，本文聚焦复合肥料生产工艺优化与节能工程技术研究，通过梳理生产工艺现状、诊断能耗问题、优化核心参数、集成节能技术，探索低碳高效的生产模式，为企业降低能耗、减少碳排放提供可行路径，兼具理论价值与实践意义，助力复合肥料行业高质量、低碳化发展。

1 复合肥生产工艺现状与能耗分析

1.1 复合肥主要生产工艺概述

目前我国复合肥料生产主流工艺主要包括团粒法造粒、高塔造粒和挤压造粒三种，各工艺适用场景与能耗特征存在显著差异。团粒法造粒因适配性广、产品品质稳定，是中小型生产线的首选，占行业应用比例的 60% 以上，但其存在造粒效率低、能耗较高的问题；高塔造粒适合大规模连续生产，产品均匀性好，含量稳定，但其存在对原料纯度要求较高、制浆过程能耗高的问题；挤压造粒无需干燥环节，常温造粒，适合热敏性原料，节能优势明显，但颗粒圆整度不足，强度较差，难以适配机械施肥需求，市场需求量不高。不同工艺的选择直接影响生产能耗与碳排放，传统工艺普遍存在参数不合理、设备老化等问题，制约了行业低碳转型[1]。

1.2 典型复合肥生产流程分解

典型复合肥料生产流程可分为原料预处理、核心生产、成品处理三大环节，各环节衔接紧密，均存在不同程度的能耗损耗。原料预处理环节包括原料粉碎、筛分、混合，需消耗大量电力驱动粉碎设备与混合设备，且原料浪费与粉尘泄漏会间接增加能耗；核心生产环节是能耗主要集中区，团粒法造粒涵盖蒸汽造粒、干燥、冷却三道关键工序，其中造粒决定颗粒成型质量，干燥需消耗大量热能去除颗粒水分，冷却则需通过动力设备实现温度调控；高塔造粒涵盖制浆、冷却两道关键工序，其中制浆决定颗粒成型质量和产品外观质量，冷却需通过动力设备实现温度调控；成品处理环节包括筛分、包膜、包装，主要能耗来自筛分设备与包装机械的电力消耗。整个流程中，团粒法造粒的造粒和干燥环节能耗占比最高，约占总能耗的 70%-80%，高塔造粒的制浆过程能耗占比最高，约占总能耗的 75%-85%，其它环节次之，各环节协同性不足易导致整体能耗攀升。

1.3 能耗与碳排放现状诊断

当前我国复合肥料生产能耗与碳排放现状不容乐观，整体水平高于国际先进水平 15%-20%。从能耗来看，传统生产线单位产品综合能耗约为 40-60kg 标准煤/吨，主要依赖煤炭、天然气等化石燃料燃烧供热，热效率仅为 60% 左右；造粒环节因工艺参数不合理，导致颗粒成型率低，返料率高达 40% 以上，增加重复能耗。从碳排放来看，主要来源于化石燃料燃烧、电力消耗及原料生产与运输，单位产品碳排放量约为 0.4-0.6 吨 CO_2/吨，其中化石燃料燃烧贡献了 70% 以上的碳排放。部分企业缺乏能耗监测体系，设备老化、

工艺落后等问题进一步加剧能耗与碳排放压力，难以满足低碳发展要求。

1.4 节能降碳潜力评估

通过对复合肥料生产各环节的能耗与碳排放现状分析，结合行业技术发展水平，评估得出行业存在较大的节能降碳潜力。从工艺层面，优化造粒、干燥等核心工序参数，可降低单位产品能耗 10%-15%，减少碳排放 8%-12%；从设备层面，更换节能设备、改造老旧系统，可提升能源利用效率 20%左右；从技术层面，推广余热回收、清洁能源替代等技术，可进一步降低化石燃料消耗，减少碳排放 15%-20%。综合来看，通过工艺优化与节能技术集成应用，我国复合肥料生产行业整体节能潜力可达 30%以上，碳减排潜力可达 25%-30%。同时，节能降碳改造还可降低企业运营成本，提升产品竞争力，实现环境效益与经济效益的双赢。

2 复合肥生产工艺参数优化

2.1 造粒工序工艺优化

造粒工序作为复合肥料生产的核心环节，其工艺参数直接影响颗粒成型质量、生产效率与能耗水平。

传统团粒法造粒工艺存在温度过高、转速不合理等问题，导致颗粒强度不足、返料率高[2]。优化后，采用低温团聚造粒技术，将造粒温度控制在 45-65℃，相比于传统工艺降低 15-20℃，减少热能消耗；根据不同的配方和物料特性精准控制造粒机转速，调节造粒机转速至 9-13r/min；优化物料配比，合理控制氮磷钾及辅料比例，添加 0.5-1%的造粒剂或 2 – 3%的粘合剂，提高成粒率，降低返料率，同时，降低养分损失与能耗。通过上述改进，提高成粒率至 80%以上。

传统高塔造粒工艺存在料浆温度过高、尿融槽、混合槽搅拌转速和造粒机内圈转速不合理等问题，导致蒸汽用量大能耗高。优化后，根据不同的配方和物料的粘性，将搅拌变频转速控制在 35-45HZ 之间，搅拌浆叶尖线速度应达到 6-8m/s，造粒机内圈变频转速控制在 20-40HZ 之间，提高料浆的流动性；同时，添加 0.2-0.5%的高塔造粒剂，提高成粒率，降低返料率。通过上述改进，料浆温度相比于传统工艺降低 10-15℃，减少热能消耗。

2.2 干燥工序节能优化

团粒法造粒的干燥工序是复合肥料生产中能耗最高的环节，优化核心在于提升热效率、减少热能浪费，关键优化参数包括干燥温度、风速、物料停留时间。传统干燥工艺采用高温热风直接加热，根据不同的产品配方，进口温度控制在 160-230℃，热效率低且易导致养分流失，高氮产品易产生缩二脲，发生作物烧苗。优化后，采用三回程或多层套筒式高效干燥设备，将干燥温度控制在 130-170℃，通过延长物料与热风的接触时间和换热面积，使热效率从 60%提升至 75%以上；调节热风风速至 1.5-2.5m/s，优化物料停留时间至 20-35min，确保产品水分降至 2.0%以下的同时，减少热能损耗，可降低干燥环节能耗 25%-30%。

2.3 冷却工序工艺优化

冷却工序的核心目标是将干燥后的高温颗粒冷却至 40℃以下，确保产品储存时不结块，其工艺优化重点的是提升冷却效率、降低动力消耗。传统冷却工艺采用回转式冷却机，冷却效率低、能耗较高，并且易导致产品结块。优化后，采用粉体流冷却技术，通过冷却介质（循环水）在传热板内部流动，实现产品冷却，同等规模下的能耗只有回转式冷却机的 10%-15%，流化床冷却器的 30-35%；优化冷却设备结构，增加换热面积，缩短冷却时间至 10-15min，提升冷却效率 30%以上；采用冷却介质循环利用模式，实现冷却水的重复利用；降低风机动力消耗，减少电力损耗 10%-15%。

2.4 工艺参数协同优化

复合肥料生产各工序并非独立存在，需通过参数协同优化，实现全流程节能降碳与产品质量提升。基于 PID 控制模型，构建造粒、干燥、冷却工序的参数协同优化体系，结合原料特性与产品要求，建立多目标优化模型，平衡能耗、成型率与产品质量[3]。造粒环节的温度、转速参数与干燥环节的温度、风速参数协同匹配，避免造粒颗粒含水率过高导致干燥能耗增加；干燥与冷却环节的热能回收协同，将干燥尾气余热用于冷却介质预热，提升能源利用率；同时优化原料预处理与核心工序的衔接参数，减少物料损耗与中间环节能耗。通过参数协同优化，可使全流程能耗降低 18%-25%，颗粒合格率提升至 80%以上，实现节能降碳与产品质量的双重提升。

3 复合肥生产节能工程技术

3.1 动力系统节能改造

动力系统是复合肥料生产的能量核心，主要包括电机、风机、水泵等设备，其能耗占生产总能耗的 20%-30%，节能改造重点在于提升设备能效、减少能源浪费。针对传统动力设备老化、能效偏低的问题，将普通电机更换为高效节能电机，能效等级提升至二级以上，

可降低电机能耗 10%-15%；风机、水泵采用变频调速技术，根据生产负荷实时调节设备转速，避免设备空载运行，减少电力损耗；优化动力设备布局，缩短物料输送距离，减少输送设备能耗；定期对动力设备进行维护保养，及时排查故障，确保设备处于最佳运行状态，降低设备故障率，进一步提升动力系统能效，整体可降低动力系统能耗 20%-25%。

3.2 热力系统节能技术

热力系统主要为造粒、干燥等工序提供热能，其节能关键在于提升热能利用效率、减少热能损耗。优化热力系统结构，采用高效燃烧设备替代传统燃煤锅炉，提升燃烧效率至 90%以上，减少化石燃料消耗；采用保温隔热技术，对锅炉、管道等热力设备进行保温处理，降低热能散热损耗，减少散热损失 15%-20%；优化热力分配方案，根据各工序热能需求精准分配热能，避免热能浪费；引入烟气净化与余热回收一体化技术，处理燃烧烟气的同时回收余热，提升热力系统综合能效。通过热力系统节能技术应用，可降低热力系统能耗 25%-30%，减少化石燃料燃烧带来的碳排放。

3.3 余热梯级利用技术

余热梯级利用是复合肥料生产节能降碳的核心技术之一，团粒法造粒在干燥设备尾部安装余热回收装置，利用回收的尾气余热制备热水，替代部分蒸汽作为造粒液相量，可降低造粒环节能耗 15%-20%；高塔造粒通过将制浆过程的余气和 40-60℃冷凝水收集后输送到锅炉，替代部分外部水，提升余热利用率至 60%以上。

3.4 清洁能源替代技术

清洁能源替代是实现复合肥料生产低碳化的重要路径，核心是用可再生能源替代传统化石燃料，减少碳排放。结合生产实际，推广太阳能、生物质能、天然气等清洁能源应用，在车间屋顶安装太阳能集热系统，用于原料预热和车间照明，可替代 5%-10%的化石燃料消耗；采用生物质锅炉替代燃煤锅炉，利用农业废弃物、秸秆等生物质燃料供热，实现废弃物资源化利用，同时减少 CO_2 排放；对于具备条件的企业，引入天然气等清洁能源，降低碳排放强度。通过清洁能源替代技术应用，可减少化石燃料消耗 15%-20%，单位产品碳排放降低 10%-15%。

3.5 智能控制与能效管理

智能控制与能效管理技术可实现复合肥料生产全流程的精准调控，提升能源利用效率，减少能耗浪费。构建智能化控制系统，采用 PLC 中央控制与在线监测技术，实时采集各工序的能耗、温度、湿度等参数，通过数据建模与分析，实现工艺参数的自动调节与优化，避免人为操作失误导致的能耗增加；建立能效管理平台，对生产全流程能耗进行实时监测、统计与分析，精准识别高能耗环节，为节能改造提供数据支撑；引入智能预警系统，对设备故障、能耗异常等情况及时预警，减少因设备故障导致的能耗浪费；通过智能控制与能效管理技术，可实现全流程能耗精准管控，提升能源利用效率 15%-20%，进一步推动生产过程的低碳化、智能化。

结束语

本文围绕低碳背景下复合肥料生产工艺优化与节能工程技术展开系统研究。通过分析复合肥生产工艺现状与能耗碳排放问题，评估得出全流程综合节能潜力可达 30%以上。重点优化了造粒、干燥、冷却等核心工序参数，集成动力系统改造、热力系统优化、余热梯级利用、清洁能源替代及智能能效管理等技术，形成了覆盖工艺优化与工程技术的完整节能降碳方案。未来将进一步深化工艺与技术的融合应用，优化节能技术方案，降低改造成本，为复合肥料行业低碳转型提供更具针对性的技术支撑，助力我国“双碳”目标与绿色农业发展实现。

参考文献

[1] 张林虓, 孟凯. 复合肥料生产工艺模块化探究 [J]. 肥料与健康,2025,52(6):49-53,71.

[2] 李守芳. 复合肥料生产工艺的创新发展探究 [J]. 中国盐业,2022(13):42-46.

[3] 李长英, 何耀, 袁宸, 等. 不同工艺生产的颗粒复合肥料孔隙情况分析 [J]. 肥料与健康,2025,52(6):45-48,71.