

◆新质生产力与产业态势◆

我国磷复肥生产技术现状及趋势

郑秀兴

(中国磷复肥工业协会, 北京 100013)

[摘要] 系统梳理我国磷复肥生产技术的发展过程与现状, 介绍我国磷肥和复合肥主要生产工艺种类及其核心工序工艺流程, 分析典型工艺优劣势等主要特点, 探讨我国磷复肥在产品高质高效、过程绿色低碳、资源高效利用、装备自动化智能化和磷素循环利用等方面的生产技术发展趋势。指出我国磷复肥产业在初步发展阶段依赖自主技术生产低浓度磷肥, 随后通过引进与自主研发相结合, 实现了湿法磷酸、高浓度磷肥及复合肥生产技术的跨越式发展, 逐步达到国际先进水平。当前, 磷复肥生产技术正朝着产品高质高效化、过程绿色低碳化、资源利用高效化、装备智能自动化以及磷素循环利用等方向持续发展, 为我国磷复肥产业的可持续发展和国际竞争力提升提供了重要支撑。

[关键词] 磷复肥; 生产技术; 工艺类型; 典型工艺; 主要特点; 发展趋势; 绿色低碳; 资源利用

[中图分类号] TQ444 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 10-0001-11

Current situation and trends of phosphate and compound fertilizer production technology in China

ZHENG Xiuxing

(China Phosphate & Compound Fertilizer Industry Association, Beijing 100013, China)

Abstract: The development process and current status of production technology for phosphate and compound fertilizers in China are systematically reviewed, the main types of production processes and core process flows for phosphate fertilizers and compound fertilizers in China are introduced, the advantages and disadvantages of typical processes are analyzed, and the development trends of production technology for phosphate and compound fertilizers in China are explored, including high-quality and efficient products, green and low-carbon processes, efficient resource utilization, automated and intelligent equipment, and phosphorus recycling. It is pointed out that China's phosphate and compound fertilizer industry relied on independent technology to produce low concentration phosphate fertilizers in the initial development stage. Subsequently, through the combination of introduction and independent research and development, it achieved a leapfrog development in wet-process phosphoric acid, high concentration phosphate and compound fertilizer production technology, gradually reaching the international advanced level. Currently, phosphate and compound fertilizer production technology is continuously developing towards high-quality and efficient products, green and low-carbon processes, efficient resource utilization, intelligent automation of equipment, and phosphorus recycling, providing important support for the sustainable development and international competitiveness of China's phosphate and compound fertilizer industry.

Key words: phosphate and compound fertilizer; production technology; process type; typical process; main characteristics; development trend; green and low-carbon; resource utilization

0 引言

磷是生物体内的重要元素, 是植物生长所必需的三大营养元素之一, 磷复肥是农业生产的重要生产资料。磷复肥生产将磷矿资源中无效的磷素物质转化成有效的营养物质。磷复肥生产是磷肥和复合肥的产品质量、生产成本和效率, 以及“三

废”排放和资源利用水平的主要决定性环节。我国磷复肥产业起步较晚, 在起步阶段, 主要依靠国内

[收稿日期] 2025-09-24

[作者简介] 郑秀兴(1957-), 男, 江西上饶人, 教授级高级工程师, 长期从事磷复肥生产及技术管理和技术研发工作, 现任中国磷复肥工业协会副总工程师等。

自主研发的生产技术发展磷矿粉、过磷酸钙 (SSP) 和钙镁磷肥 (FMP) 等低浓度磷肥产品; 在快速发展阶段, 实施了国内自主研发与引进国际先进技术并举的策略, 中低品位磷矿的选矿技术、湿法磷酸生产技术、磷酸铵等高浓度磷肥和复合肥产品的生产技术快速发展, 进入世界先进水平行列, 为我国成为磷复肥世界大国和强国奠定了坚实的基础。目前, 我国磷复肥生产技术正在朝着产品高质高效、过程绿色低碳、资源高效利用、装备自动化智能化和磷素循环利用等趋势发展。

1 我国磷复肥生产技术发展概况

20世纪50年代, 我国磷肥的发展开始起步, 生产技术主要依靠国内自主研发。20世纪50年代初期和中期开始发展磷矿粉、过磷酸钙和钙镁磷肥等低浓度磷肥产品。磷矿粉主要通过磷矿的研磨加工制得; SSP主要采用间歇式的化成法工艺, 生产过程较为简单, 先后在哈尔滨、辽阳、济南和衡阳建设的单系列装置规模为2万~6万t/a; FMP主要采用电炉法工艺, 在四川乐山建设的FMP生产装置, 年生产量为1 614 t^[1]。20世纪50年代末期和60年代中期开始, 磷肥生产技术取得了许多创新突破, 一是SSP生产技术趋于成熟, 1958年采用立式搅拌、回转化成工艺分别在太原和南京建设的生产装置, 单系列最大装置规模达到了20万~40万t/a。二是FMP生产技术取得了重大突破, 1956年在四川乐山采用平炉法工艺建设了第一套FMP生产装置, 1958年北京化工实验厂采用冷风直筒型水冷夹套高炉 ($\phi 1.2$ m、高2.8 m) 的FMP生产装置, 产量为30~40 t/d, 江西东乡磷肥厂采用国内自主开发的FMP高炉法工艺, 将闲置的2座炼铁高炉分别改造成3万t/a和6万t/a的FMP生产装置, 该技术当时为我国独创, 属国际领先水平^[1]。三是湿法磷酸和磷酸二铵 (DAP) 生产技术开始实现工业化应用, 磷酸采用二水法工艺、DAP采用“预中和-转鼓氨化粒化”工艺, 在南京磷肥厂建设的湿法磷酸装置规模为 P_2O_5 1.5万t/a, DAP装置规模为3万t/a。

20世纪80年代, 我国开始发展复合肥料 (NPK) 和高浓度磷肥, 生产技术采用了国内自主研发和引进国际先进技术并举的策略。20世纪80年代初期, 开始发展复合肥料, 在江苏无锡等地建设的复合肥料生产装置, 采用国内自主研发的团粒法工艺生产低浓度NPK产品, 装置规模为1万~3万t/a^[2]; 开始发展重过磷酸钙 (TSP) 等高浓度磷肥产品,

采用国内自主开发的化成法工艺, 装置规模达10万t/a; 开始发展磷酸一铵 (MAP) 高浓度磷肥产品, 国内自主开发了料浆浓缩法磷酸铵生产新工艺, 采用二水法湿法磷酸—气氨中和—喷雾干燥流程, 1982年在3 kt/a装置上完成了氨水中和—单效料浆浓缩—滚筒干燥制粉状MAP的中间试验, 1984年又在4 kt/a装置上完成了气氨中和—双效料浆浓缩—喷雾干燥制粉状MAP的中间试验^[3], 1988年该技术获国家科技进步奖一等奖, 同年料浆法MAP—喷浆造粒工艺完成了3万t/a的工业化试验, 完成了3万t/a的通用设计并开始在全国推广^[4]。20世纪80年代末期开始发展硝酸磷肥, 在山西潞城建设的90万t/a硝酸磷肥装置, 采用引进的冷冻法工艺, 单系列装置规模为45万t/a; 开始发展磷酸二铵产品, 在安徽铜陵建设的12万t/a DAP装置, 采用引进的“二段中和—喷浆造粒”工艺, 单系列装置规模为6万t/a。

20世纪90年代, 我国磷复肥生产技术开始快速发展。国内自主开发成功的喷浆造粒机内返料工艺, 使生产MAP时的返料比由传统的(3~4):1降低到0.5:1; 国内自主开发的料浆法MAP—喷浆造粒工艺和料浆法MAP—塔式喷雾工艺等磷铵生产技术实现了大规模产业化, 生产技术不断趋向成熟, 生产装置趋于大型化。引进技术的大型磷酸和磷复肥装置生产技术快速国产化, 引进工艺和设备的磷复肥生产技术主要类型包括: 在贵溪、黄麦岭、福泉、大峪口等地采用引进的二水法工艺建设的磷酸装置, 单系列产能为 P_2O_5 9万~20万t/a; 在南京、大连采用预中和—转鼓氨化粒化工艺建设的磷铵装置, 单系列产能24万t/a (NPK 21万t/a); 在秦皇岛采用“双管反应器—转鼓氨化粒化”工艺建设的磷铵装置, 单系列产能48万t/a (NPK 60万t/a); 在福泉采用料浆法工艺建设的80万t/a TSP装置, 单系列产能40万t/a (同期改造为预中和+管式反应器—转鼓氨化粒化工艺磷铵装置, DAP单系列产能60万t/a); 在大峪口采用料浆法工艺建设的TSP装置, 单系列产能56万t/a (后改造为双管反应器—转鼓氨化粒化工艺磷铵装置, DAP单系列产能60万t/a); 在贵溪和鹿寨采用“单管反应器—转鼓造粒”工艺改造和新建的磷铵装置, DAP单系列产能30万t/a。这个阶段磷复肥引进技术的创新发展主要有: 一是贵溪在引进美国预中和—转鼓氨化粒化工艺的24万t/a DAP装置国产化过程中, 创新发展了“双

酸” ($w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 48%浓磷酸与 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 28%稀磷酸质量比 86:14) 生产技术, 并在此基础上进一步开发了稀磷酸生产高浓度 NPK 复合肥料技术。二是秦皇岛引进法国双管反应器-转鼓氨化粒化工艺的 48 万 t/a DAP 装置, 采用液氨代替气氨, 实现单管反应器-转鼓氨化粒化生产 DAP (停用 MAP 管式反应器), 简化了流程和生产操作; 并采用 MAP 代替部分磷酸, 48 万 t/a DAP 装置生产 NPK 的产量达到了 72 万 t/a^[5]。

进入 21 世纪后, 我国磷复肥引进工艺和设备技术的国产化、再创新和国产技术快速发展, 磷复肥生产技术实现了装置规模的大型化和技术装备的现代化, 生产工艺和装备水平进入国际先进行列, 向国际输出了大量先进的磷复肥工艺、装备技术 (包括设计、制造、安装) 及整套磷复肥生产建设工程技术。国内自主研发的料浆浓缩法磷酸铵单系列装置规模发展到 MAP 30 万 t/a; 60 万 t/a DAP 装置配套 P_2O_5 30 万 t/a 的二水法湿法磷酸和 80 万 t/a 硫磺制硫酸技术, 实现了大规模产业化 (磷酸单系列装置最大规模达 P_2O_5 45 万 t/a, 硫铁矿制硫酸装置规模达到 56 万 t/a); 团粒法复合肥工艺实现大规模产业化后经不断改进创新, 单系列装置规模发展到 30 万 t/a; 熔体法高塔造粒复合肥工艺实现大规模产业化, 单系列装置规模达 20 万 t/a; 中低品位磷矿的选矿技术达到世界先进水平; 自主研发的半水-二水法磷酸工艺在国内外实现大规模的产业化应用, 单系列装置规模最大达到 P_2O_5 38 万 t/a。磷复肥引进生产技术的创新发展主要有: 一是南京在引进美国预中和-转鼓氨化粒化工艺的 24 万 t/a DAP 装置, 成功嫁接氯化钾低温转化生产技术, 采用稀磷酸 ($w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 约 22%) 替代浓磷酸 ($w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 54%$) 并与熔融硫酸氢钾制成混合料浆生产硫基 NPK 复合肥; 二是秦皇岛在引进法国技术的双管反应器-转鼓氨化粒化 DAP 工艺实现单管反应器-转鼓氨化粒化生产 DAP/NPK 的基础上, 企业自主开发了共溶料浆管式反应器工艺生产尿基和硝基 NPK 复合肥料技术, 在确保产品质量优于或与引进技术相当的前提下, 可进一步提高装置产出率、减少尾气排放、降低生产成本; 三是贵溪引进西班牙单管反应器-转鼓造粒工艺的 30 万 t/a DAP 装置, 企业自主开发了预中和-单管二次氨化技术生产 DAP/NPK 复合肥, 将预中和常压反应器与管式反应器有机结合, 大幅度降低了氨的洗涤回收负荷, 又保持了单管反应器一步氨化 DAP/NPK 工艺在造粒机中

无内件的优势; 四是云南天安化工有限公司引进西班牙技术的 60 万 t/a DAP 国产化装置采用预中和+管式反应器-氨化粒化工艺, 改造成双管工艺 (管式反应器+管式反应器-氨化粒化), 收到了较好效果, 能耗更低, 产品的外观质量和内在质量都有一定改善等^[5]。

近十多年, 高纯全水溶磷酸铵、聚磷酸铵、磷酸二氢钾、磷酸脲和硝酸磷肥等新型磷肥产品的生产技术, 以及具有速效性、缓效性、提高营养功效、增加产品功能和智能供应养分等主要性能特征的各种新型磷复肥产品的生产技术不断发展, 产业化规模不断扩大; 各种磷复肥生产工艺不断改进优化, 生产过程节能、降碳、降耗、减排水平不断提高, 包括回收湿法磷酸生产过程中的氟生产无水氟化氢技术、回收磷矿中的碘生产单质碘技术等取得了重大突破, 不断实现产业化应用; 磷石膏无害化处理和综合利用技术的创新发展取得了许多重大突破, 通过大量研究开发, 水洗、焙烧、浮选、中和、转晶以及这些方法的组合等各种生产工艺和装备技术突破了许多技术瓶颈, 建设了一大批磷石膏无害化处理和综合利用的生产装置, 单系列装置规模达到年消纳磷石膏百万吨以上, 随着磷石膏等副产物的无害化处理和综合利用生产技术快速发展, 综合利用途径不断拓展, 磷石膏无害化处理和综合利用的产业化规模不断扩大, 2024 年磷石膏无害化处理装置规模已超过了 3 000 万 t, 磷石膏综合利用量已达到 5 300 万 t, 综合利用率达 61.6%, 属世界领先水平。

2 我国磷复肥典型生产工艺分析

2.1 磷肥主要生产工艺

我国磷资源以中低品位磷矿为主, 生产高浓度磷肥产品必须经过选矿和磷酸生产。选矿工艺主要有反浮选、正浮选、正反浮选和双反浮选; 磷酸工艺主要有二水法、半水法、半水-二水法和二水-半水法; MAP、DAP、TSP、SSP、FMP 等同一类型产品, 按照产品的不同形态以及核心工序的不同特征, 又可以进一步细分成多种不同的工艺; 硝酸分解磷矿工艺主要有采用冷冻法和混酸法 (硝酸-硫酸或硫酸铵) 生产硝酸磷肥或硝基复合肥等工艺。磷肥的生产, 不同的产品及产品形态有不同的工艺, 相同产品按照反应、造粒和干燥等核心工序流程的不同特征, 又可以进一步细分成多种不同的工艺^[6]。

目前磷肥生产主要相关工艺类型见表 1。

表1 磷肥生产主要相关工艺

Table 1 Main related processes for phosphate fertilizer production

| 项目 | 生产工艺 |
|------|--------------------------------|
| 选矿 | 反浮选工艺 |
| | 正浮选工艺 |
| | 正反浮选工艺 |
| | 双反浮选工艺 |
| SSP | 化成法工艺 |
| FMP | 高炉法工艺 |
| MAP | 传统法-塔式喷雾工艺 |
| | 传统法-喷浆造粒工艺 |
| | 料浆法-塔式喷雾工艺 |
| | 料浆法-喷浆造粒工艺 |
| 硝酸磷肥 | 冷冻法工艺 |
| | 混酸法(硝酸-硫酸或硫酸铵)工艺 |
| 磷酸 | 二水法工艺 |
| | 半水法工艺 |
| | 半水-二水法工艺 |
| | 二水-半水法工艺 |
| TSP | 化成法工艺 料浆法工艺 |
| DAP | 二段中和-喷浆造粒工艺 |
| | 预中和-氯化粒化工艺 |
| | 管式反应器-氯化粒化工艺 |
| | 预中和+管式反应器-氯化粒化工艺 |
| | 双管式反应器-氯化粒化工艺 单管式反应器-转鼓造粒工艺 |

2.1.1 选矿和磷酸生产工艺及特点

浮选是目前主要选矿工艺，国内胶磷矿绝大部分采用浮选法富集，主要工艺包括反浮选、正浮选、正反浮选、双反浮选等。反浮选主要特点：流程较短；一般为常温，能耗较低，主要适用于胶磷矿中含钙（镁）脉石矿物的脱除，对于沉积型钙（镁）磷矿浮选指标较好。正浮选主要特点：流程较短，一般需加热，能耗较高，主要适用于硅质磷矿和变质型硅钙质磷矿，分选效果较好。正反浮选主要特点：流程较长，正浮选部分一般也需加热，能耗较高，适用于较难选的沉积型硅钙（镁）质磷块岩。双反浮选主要特点：流程较长，能耗较高，适用于高硅质矿物高/中镁磷矿石浮选。

用于磷肥生产的磷酸的生产工艺主要是指以硫酸萃取磷矿石中的 P_2O_5 制取磷酸的工艺，包括二水法、半水法、半水-二水法和二水-半水法等。二水法磷酸工艺主要优点：二水硫酸钙晶体稳定性好，易于形成粗大晶体，易于洗涤过滤；易操作，弹性大，装置运行率高；对磷矿的适应性强。主要缺点：制得的磷酸浓度较低（ $w(P_2O_5)$ 22%~26%，用于高浓度磷肥生产时须先浓缩，能耗较高；磷石膏中晶间 P_2O_5 的损失大，磷矿的 P_2O_5 转化率较低（一般为95%左右）。半水法磷酸工艺主要优点：能耗低，磷酸浓度一般为 $w(P_2O_5)$ 38%~45%，生产高浓度磷肥比二水法工艺每吨 P_2O_5 可节省蒸汽1.0~1.5 t；产品磷酸质量好， $w(P_2O_5)$ 40%的产品磷酸杂质及固相含量相对低（通常质量分数在1%以下），生产磷复肥产品水溶性 P_2O_5 含量较高；流程短，建设投资较低。主要缺点： P_2O_5 回收率较低（一般为90%~94%）；磷石膏中磷含量偏高，不利于综合利用；对磷矿湿磨矿浆水含量要求高；操作弹性小，控制难度大。半水-二水法磷酸工艺主要优点：与二水法工艺相比，磷酸浓度高、质量好；磷回收率高（可达98%）；磷石膏纯度较高，便于综合利用。主要缺点：流程较长；半水部分在一定程度上存在类似半水法磷酸工艺的缺点。二水-半水法磷酸工艺主要优点： P_2O_5 转化率比二水法工艺高（一般达98%~99%）；产品磷酸浓度较高（ $w(P_2O_5)$ 一般为27%~32%）；磷石膏质量好（ $w(P_2O_5)$ < 0.5%），有利于综合利用。主要缺点：系统的热过程不尽合理，综合能耗较高；半水结晶是介稳定固相，在稀磷酸溶液中的稳定性差，在转化过程的溶液中，半水结晶易于过度脱水成无水物。

2.1.2 MAP工艺核心工序流程及特点

MAP工艺，主要有料浆法-塔式喷雾工艺、料浆法-喷浆造粒工艺、传统法-塔式喷雾工艺、传统法-喷浆造粒工艺等。目前国内MAP生产装置主要采用料浆法，核心工序流程见图1、图2，传统法较少。

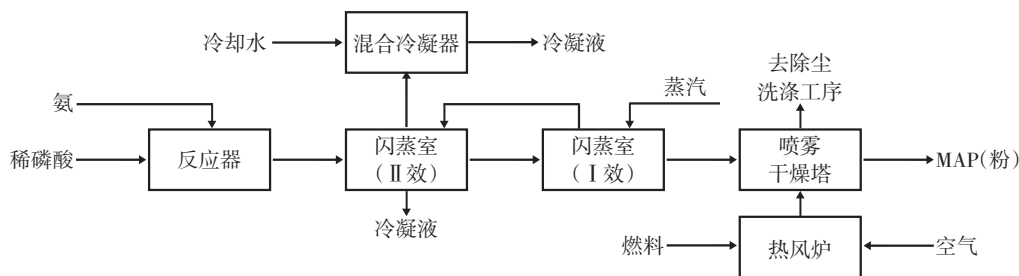


图1 MAP料浆法-塔式喷雾工艺核心工序工艺流程

Fig. 1 Core process flow of slurry-tower spray process of MAP

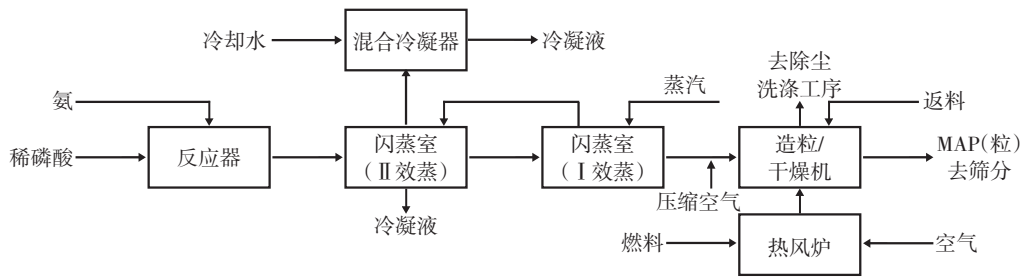


图2 MAP料浆法-喷浆造粒工艺核心工序工艺流程

Fig. 2 Core process flow of slurry-spray granulation process of MAP

料浆法MAP工艺主要优点：浓缩反应料浆比浓缩稀磷酸系统更不易结垢；更适合采用多效浓缩，能耗更低。主要缺点：产品中氟化物含量较高，磷矿或磷酸中的氟资源未得到有效利用。

传统法MAP工艺主要优点：以浓磷酸为原料，工艺流程短，特别是采用高浓度磷酸生产粉状产品的工艺流程特别短，无需干燥工序；产品氟含量低，稀磷酸中的氟大部分在浓缩过程中逸出，可回收利用，热效率高，通常可用管式反应器。主要缺点：稀磷酸浓缩过程能耗较高。

2.1.3 DAP工艺核心工序流程及特点

DAP工艺，主要有二段中和-喷浆造粒、预中和-氯化粒化、管式反应器-氯化粒化、预中和+管式反应器-氯化粒化、双管式反应器-氯化粒化和单管反应器-转鼓造粒等传统法工艺。目前，国内DAP生产装置主要采用管式反应器-氯化粒化和预中和+管式反应器-氯化粒化工艺，核心工序流程分别见图3、图4，其他工艺生产装置很少。

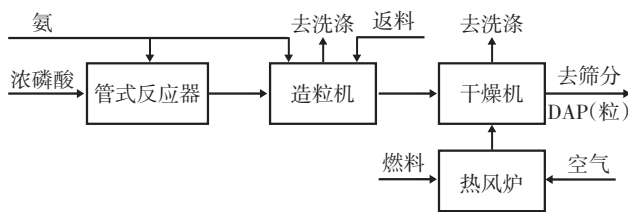


图3 DAP管式反应器-氯化造粒工艺核心工序工艺流程

Fig. 3 Core process flow of tubular reactor-ammoniation granulation process of DAP

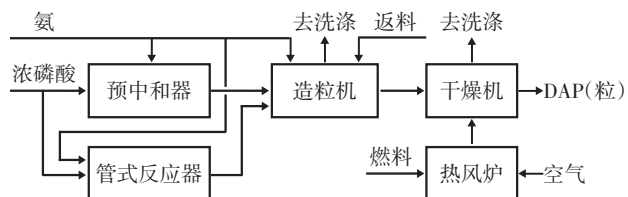


图4 DAP预中和+管式反应器-氯化造粒工艺核心工序工艺流程

Fig. 4 Core process flow of pre neutralization + tubular reactor ammoniation granulation process of DAP

二段中和-喷浆造粒工艺主要优点：磷酸与氨二段常压反应，操作弹性大；喷浆造粒干燥热效率高。主要缺点：料浆中和度较低，产品养分浓度较低（生产 $w(\text{总养分}) > 60\%$ 的产品较困难）；单系列装置规模较小。

预中和-氯化粒化工艺主要优点：原料适应性强，操作弹性大，单系列装置规模大。主要缺点：料浆水含量高（ $w(\text{H}_2\text{O}) \geq 25\%$ ），返料比高（(4~6):1），造粒物料水含量较高（ $w(\text{H}_2\text{O}) 4\% \sim 5\%$ ）。

管式反应器-氯化粒化工艺主要优点：管式反应器热效率高（节能）；料浆水含量较低（ $w(\text{H}_2\text{O}) < 15\%$ ），返料比较低（3:1）；造粒物料水含量低（ $w(\text{H}_2\text{O}) 3\%$ ）；单系列装置规模大。主要缺点：对磷酸质量要求较高，磷酸中金属杂质含量高时管式反应器易结垢堵塞。

预中和+管式反应器-氯化粒化工艺，在一定程度上吸收了预中和-氯化粒化工艺和管式反应器-氯化粒化工艺的优点，也存在这两种工艺类似的缺点。

双管式反应器-氯化粒化工艺，在管式反应器-氯化粒化工艺基础上增加加入干燥机的MAP管式反应器（提高产能），其他主要特点与管式反应器-氯化粒化工艺类似。

单管反应器-转鼓造粒工艺主要优点：流程简单，造粒机无内件（不易结垢），成品率高。主要缺点：管式反应器和氨洗涤回收技术要求高，其他主要特点与管式反应器-氯化粒化工艺类似。

2.1.4 SSP、TSP、FMP和硝酸磷肥工艺核心工序流程及特点

我国SSP工艺主要是以磷矿粉与硫酸混合的化成法工艺，TSP工艺主要是以磷矿粉与浓磷酸混合的化成法工艺，SSP和TSP的核心工序相似，主要是区别是前者用硫酸分解磷矿，后者用浓磷酸分解磷矿；FMP工艺主要是以磷矿石与助熔剂和煤炭等混合的高炉法工艺；硝酸磷肥工艺主要是以硝酸分解磷矿石的冷冻法工艺和混酸（硝酸-硫酸或硫酸

铵)法工艺。核心工序工艺流程分别见图5、图6、图7和图8。

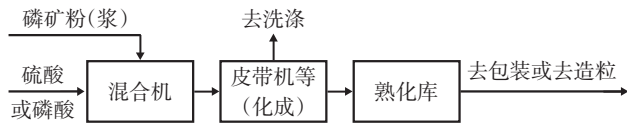


图5 化成法 SSP 或 TSP 核心工序工艺流程

Fig. 5 Core process flow of SSP or TSP by slurry method

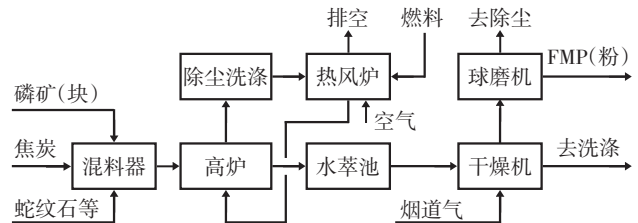


图6 高炉法 FMP 核心工序工艺流程

Fig. 6 Core process flow of FMP by blast furnace method

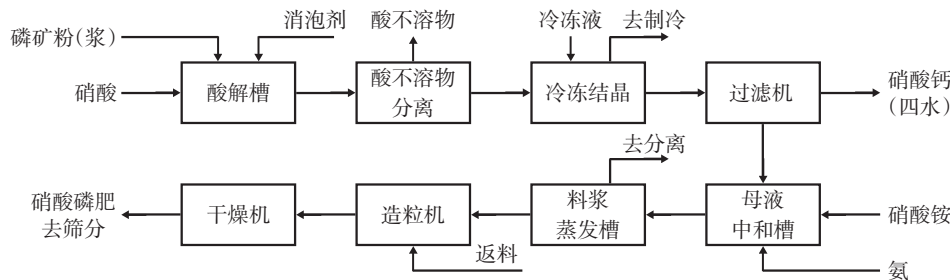


图7 冷冻法硝酸磷肥核心工序工艺流程

Fig. 7 Core process flow of nitrophosphate fertilizer by freezing method

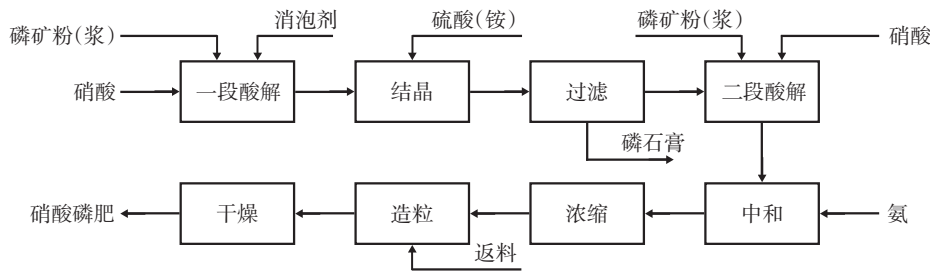


图8 硝酸-硫酸(铵)法硝酸磷肥核心工序工艺流程

Fig. 8 Core process flow of nitrophosphate fertilizer by nitric acid-sulfuric acid (ammonium) method

化成法 SSP 工艺主要优点：流程简短，常温、常压操作，能耗低，没有固废排放，磷矿中的营养元素得到较好利用等。主要缺点：熟化时间长，产品水含量高，易结块，熟化库含氟废气无组织排放，难以收集利用等。

化成法 TSP 工艺主要优点：对磷矿的适应性较强，磷矿分解率较高(90%~95%)，造粒返料比低，过程简单，易操作和控制。主要缺点：熟化时间较长，熟化仓库内逸出的微量氟较难捕集处理。

高炉法 FMP 工艺主要优点：与电炉法工艺比较，装置规模大，能耗低(约5.6 GJ/t)，过程较简单，易操作控制，可用无烟煤和焦炭作燃料，生产成本低等。主要缺点：不能直接用磷矿粉和细颗粒磷矿作原料。

冷冻法硝酸磷肥工艺主要优点：结晶率高，脱

钙效果好(脱钙率达85%)，产品水溶性磷含量较高(水溶磷占比>70%)。主要缺点：工艺流程长，硝酸钙冷冻结晶、中和和料浆浓缩等能耗高；对磷矿的质量要求高(特别是要求镁含量低)。

混酸法硝酸磷肥工艺主要优点：与冷冻法工艺比较，减少了钙盐冷冻结晶的能耗环节。主要缺点：硝酸-硫酸工艺酸解结晶过程中的温度较难控制，易产生半水石膏，影响过滤；采用硝酸-硫酸铵工艺，可较好地避免此问题，但存在酸解尾气氮氧化物含量较高等问题。

2.2 复合肥主要生产工艺

复合肥生产技术的核心是造粒工艺，按照生产方法及尾气排放情况(或处理的难易程度)分类，主要有：以磷酸、合成氨和钾肥等固体肥及助剂为原材料的料浆法工艺，以氮、磷、钾等单一固体肥

及助剂为原材料的团粒法工艺、熔体法工艺，以各种形态肥料及助剂为原材料的掺混和挤压等混合法工艺。每一大类按照反应、造粒和干燥等核心工序流程的不同特征，又可以进一步细分成多种不同的工艺，主要生产工艺类型见表2^[6]。

表2 复合肥主要生产工艺类型

Table 2 Main production process types of compound fertilizer

| 工艺 | 细分类型 | 工艺 | 细分类型 |
|---------|----------|-----|------------|
| 料浆法 | 氨化粒化工艺 | 熔体法 | 高塔造粒工艺 |
| | 喷浆造粒工艺 | | 低塔造粒工艺 |
| | 转鼓造粒工艺 | 混合法 | 挤压(干法)造粒工艺 |
| 团粒法 | 圆盘造粒工艺 | | 挤压(湿法)造粒工艺 |
| | 转鼓造粒工艺 | | 掺混(颗粒)工艺 |
| | 熔融造粒工艺 | | 掺混(粉体)工艺 |
| 氨基酸造粒工艺 | 掺混(液体)工艺 | | |

2.2.1 料浆法工艺核心工序流程及特点

原则上，在 SSP、TSP 工艺中增加钾盐和含 N 养分原料，在 MAP、DAP 和硝酸磷肥等生产工艺中增设钾盐原料的投入等工序及设施，都可以形成相应类型的料浆法 NPK 复合肥生产工艺。料浆法工艺主要有：预中和-氨化粒化工艺、管式反应器-氨化粒化工艺、低温转化-喷浆造粒工艺、料浆浓缩-喷浆造粒工艺、低温转化-转鼓造粒工艺和管式反应器-转鼓造粒工艺等。目前，国内 NPK 生产装

置主要采用管式反应器-氨化粒化、低温转化-喷浆造粒和料浆浓缩-喷浆造粒工艺，3种工艺核心工序流程分别见图9、图10和图11，其他工艺生产装置很少。

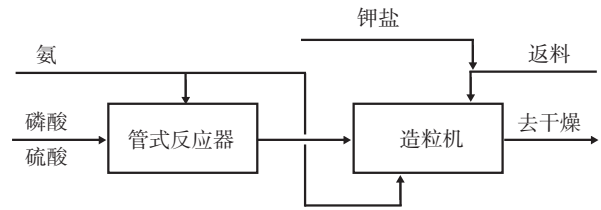


图9 管式反应器-氨化粒化复合肥核心工序工艺流程

Fig. 9 Core process flow of compound fertilizer by tubular reactor-ammoniation granulation method

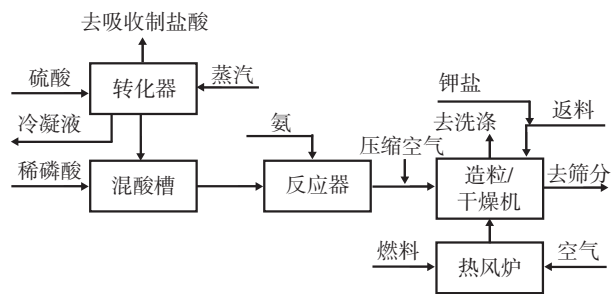


图10 低温转化-喷浆造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 10 Core process flow of compound fertilizer by low-temperature conversion-spray granulation method

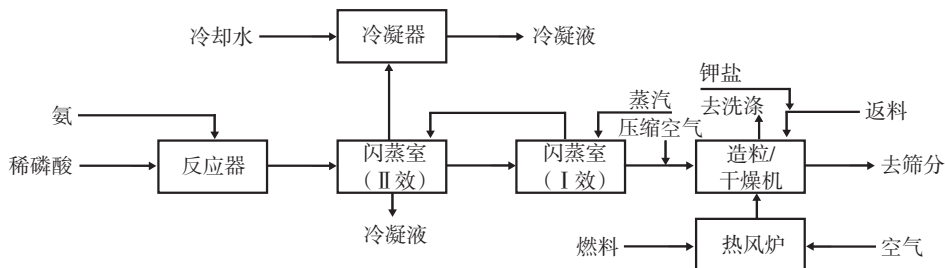


图11 料浆浓缩-喷浆造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 11 Core process flow of compound fertilizer by slurry concentration-spray granulation method

预中和-氨化粒化工艺和管式反应器-氨化粒化工艺的优缺点与DAP工艺中的预中和-氨化粒化工艺和管式反应器-氨化粒化工艺的优缺点基本相同，主要区别是使用的生产原料和产品种类有所不同（这两种工艺生产DAP时必须使用浓磷酸，生产NPK时可以使用稀磷酸，需增加钾盐原料）。此外，这两种工艺可以生产的NPK产品种类多种多样，几乎不受限制。

低温转化-喷浆造粒工艺主要优点：与采用硫酸钾生产同类NPK产品比较，生产成本低。主要

缺点：单系列装置产能较小，产品氮含量受限，产品中氟含量较高，可生产的产品种类受限。

料浆浓缩-喷浆造粒工艺的优缺点与生产粒状产品的料浆法MAP工艺的优缺点基本相同，主要差别是投入的原料种类和产品种类有所不同。

低温转化-转鼓造粒工艺主要优点：具备低温转化-喷浆造粒工艺主要优点，同时克服了其单系列装置产能规模小，产品氮含量、品种受限等缺点。

管式反应器-转鼓造粒工艺的优缺点与DAP工艺中的单管反应器-转鼓造粒工艺的优缺点基本相

同，主要是使用的原料和产品种类有所不同，生产NPK时尾气洗涤负荷大幅度下降。

2.2.2 团粒法工艺核心工序流程及特点

团粒法工艺主要有圆盘造粒、转鼓造粒、熔融造粒和氨酸造粒等工艺，核心工序流程分别见图12、图13、图14和图15。

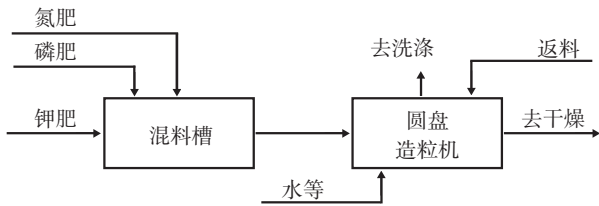


图12 圆盘造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 12 Core process flow of compound fertilizer by disc granulation method

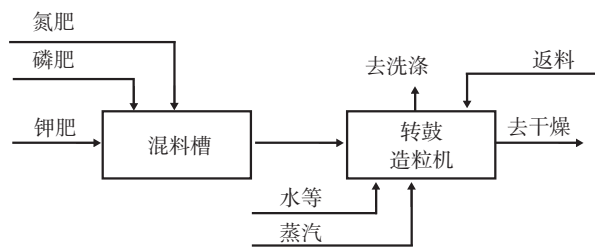


图13 转鼓造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 13 Core process flow of compound fertilizer by rotary drum granulation method

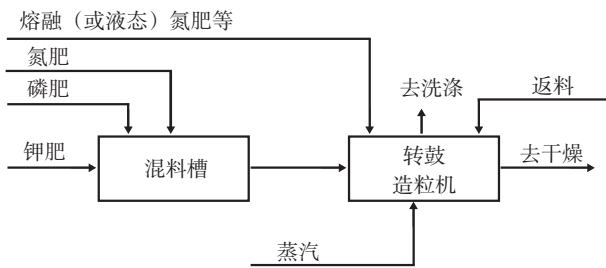


图14 熔融造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 14 Core process flow of compound fertilizer by melt granulation method

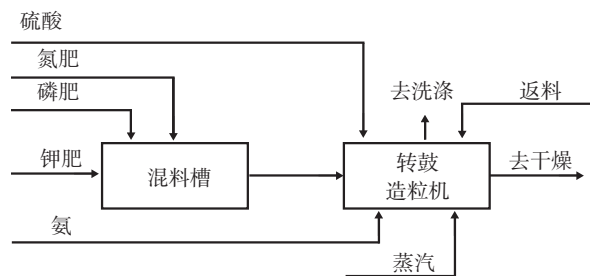


图15 氨酸造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 15 Core process flow of compound fertilizer by ammonium granulation method

圆盘造粒工艺和转鼓造粒工艺主要优点：流程短，投资少。主要缺点：造粒物料水含量高，颗粒强度低，产品易结块粉化。

熔融造粒工艺和氨酸造粒工艺主要优点：与团粒法-转鼓造粒工艺比较，产品颗粒强度提高，成品率提高，产量提高，造粒物料水含量降低。主要缺点：某些品种能补充的液相量有限，有时仍需补充一定量的水或蒸汽。其中氨酸造粒工艺包括图15所示在造粒机内投入一定量硫酸和氨的流程，以及硫酸和氨等通过反应器制得硫酸铵料浆喷在造粒机返料床上的造粒流程。

2.2.3 熔体法工艺核心工序流程及特点

熔体法工艺包括高塔造粒、低塔造粒、油冷造粒、水冷造粒工艺。其中：油冷造粒工艺没有实现产业化应用；水冷造粒工艺产业化装置很少，规模也很小；高塔造粒实现了大规模的产业化，是目前复合肥料造粒的主流工艺；低塔造粒也有一定规模的工业化装置，高塔造粒工艺和低塔造粒工艺的核心工序流程分别见图16和图17。

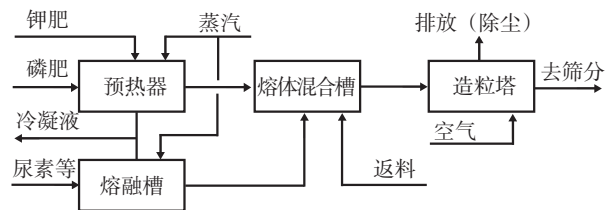


图16 高塔造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 16 Core process flow of compound fertilizer by high tower granulation method

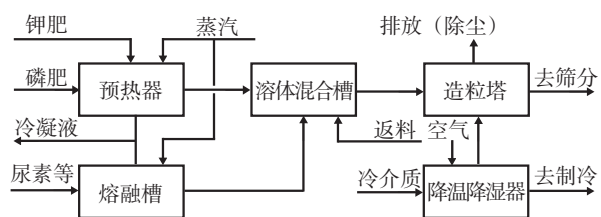


图17 低塔造粒复合肥核心工序工艺流程

Fig. 17 Core process flow of compound fertilizer by low tower granulation method

高塔造粒工艺，即熔融态尿素（或硝酸铵）与磷肥、钾肥等混合形成共熔体喷洒在高塔中经空气冷却凝固成粒。主要优点：颗粒表面圆润、强度高，进入装置水量少。主要缺点：生产低N品种难度较大。低塔造粒工艺的产品优缺点等与高塔造粒工艺基本相同，主要不同点是强化了造粒塔熔体液滴的冷却过程，可降低造粒塔的高度，节省投资，

但需要增设空气冷却除湿系统,会增加运行费用,此外低塔造粒工艺还具有生产操作受环境温度和湿度影响小的优点。

2.2.4 混合法工艺核心工序流程及特点

混合法工艺,主要包括掺混工艺、挤压工艺等。挤压工艺包括干法挤压造粒工艺和补充一定量水等液体的湿法挤压造粒工艺,掺混工艺包括颗粒肥料掺混工艺、粉体肥料掺混工艺和液体肥料掺混工艺。

挤压工艺,即原(辅)料经均匀混合,再经机械挤压造粒等工序制备产品的工艺。主要优点:流程短,投资少,尾气排放少;产品颗粒强度高,粒度大小可按需求设计调整;单位产品造粒能耗较低。主要缺点:干法挤压造粒,需要热敏性好的固体肥料原料;补充一定量水的湿法挤压造粒,需增加干燥等后续工序;加少量料浆(或液态氮肥)的挤压造粒,介于干法和湿法挤压造粒两者之间;单系列装置规模小。

掺混工艺,即将各种原(辅)料,按产品配方混合均匀后进行包装。主要优点:产品配方灵活,流程短,投资少,能耗低,尾气排放少。主要缺点:粒状产品使用不规则颗粒钾肥等时,远距离输送或机械化施肥易产生离析现象;粉体产品容易结块,不便施用;液体产品则存在包装材料费用高等。

3 我国磷复肥生产技术发展趋势

磷复肥产业是资源性产业,磷矿是不可再生资源,高质量、可持续是产业发展的必然要求。目前,我国磷复肥生产过程中磷的利用率还有进一步提高的空间,磷矿中的钙、氟、碘、铁、镁和稀土等伴生有价资源还未得到充分利用,磷石膏排放量大,综合利用难度大等仍然是世界性难题。我国磷复肥产业,以质量提升、满足现代农业绿色高质量发展需求为主要特征的内涵式发展还处在起步阶段,随着社会主要矛盾,农业从业人口、生产组织、种植结构、机械化、数字化、信息化和智能化等现代农业的发展变化,磷复肥产业的发展既有机遇更有挑战。磷复肥产业的发展有赖于生产技术的创新与突破,产业的发展需求是生产技术发展的方向和动力,生产技术的发展是实现产业发展目标的主要手段。目前我国磷复肥生产技术正在朝着产品高质高效、过程绿色低碳、资源高效利用、装备自动化和智能化以及磷素循环利用等方向发展。

3.1 产品高质高效的生产技术

创新发展高质高效的磷复肥产品,需要创新发展相应的生产技术。目前,MAP、DAP、SSP、TSP、FMP和硝酸磷肥等磷肥和NPK等传统磷复肥产品的生产技术已趋向成熟,但各种高质高效的专用和新型磷复肥产品的生产技术还在持续不断进行优化和创新发展。

一是不断改进优化和创新发展高纯度全水溶磷酸铵、聚磷酸铵、磷酸二氢钾、磷酸脲、硝酸磷肥等新型磷肥产品的生产技术,不断降低能耗物耗、降本提质增效、减少“三废”排放和环境污染,推动新型磷肥产品的市场应用。

二是不断改进优化和创新发展同时满足作物专用、土壤专用和施肥方式专用的磷复肥产品生产技术,满足我国不同区域土壤农业生产增产和农产品品质提升的种植需求和科学施肥的发展需求。

三是不断改进优化和创新发展全水溶、含硝态氮等具有速效性主要性能特征的磷复肥生产技术,满足水、肥、药一体化设施农业,以及无人机施肥和精准施肥等现代农业生产技术的发展需求^[7]。

四是不断改进优化和创新发展含锌腐酸、有机碳等有机物质和螯合型营养元素的磷复肥生产技术,重点提升肥料产品的营养功效以满足作物生长的养分平衡需求、农业生产增产需求和农产品品质提升需求^[7]。

五是不断改进优化和创新发展含有生物刺激、植物保护剂、植物生长调节剂、土壤改良剂等能功能性物质或微生物等的磷复肥生产技术,增加产品“营养功效、物理性状功效”以外的其他促进植物生长和提升农产品品质的功能,实现低成本、高技术支撑的提质增效^[7]。

六是不断改进优化和创新发展含有速效、缓效、高效营养物质和高效功能性物质,并融合其组合和调控技术使肥料中的营养物质和功能性物质能够按照植物生长的养分需求和抗逆等功能需求,及时、合理、智能化地释放养分并发挥功能作用,最大限度实现肥料养分释放和功能性物质的作用与农作物生长需求精准匹配^[7]。

3.2 过程绿色低碳的生产技术

绿色低碳发展是高质量发展的关键环节,已成为时代发展的主旋律。创新发展磷复肥工艺过程中的绿色低碳生产技术,是推动磷复肥产业实

现绿色低碳高质量发展的重要技术保障。目前,部分磷复肥产品的生产过程存在粉尘和含氟气体排放影响环境、部分产品氟含量较高、相同工艺类型的生产装置能耗差异大、部分生产工艺和装备技术有待升级改造等问题。

一是优化改进现有工艺。重点是优化改进MAP、DAP、TSP和NPK等产品的造粒技术,包括实现传统法DAP和料浆法NPK无工艺水、造粒机无内件,以及无补充工艺水的挤压造粒工艺;优化改进磷矿酸解工艺,进一步研究完善半水-二水法、半水法、二水-半水法等湿法磷酸工艺,提高适应性,扩大产业化推广应用;优化改进磷复肥生产过程的粉尘、氨和氟等物质的回收利用技术,包括生产过程的高效除尘和尾气高效净化技术等,实现磷复肥产品生产过程节能、降碳、降耗、减排^[6]。

二是同类型装置标准化。重点是针对我国磷复肥生产装置技术种类多、工艺和装备水平参差不齐等突出问题,对相同种类的磷肥和复合肥生产装置系统,在改进优化的基础上,制定并实施标准化的工程设计、标准化的装备选型,以及标准化的生产装置系统等,逐步实现同类型生产装置系统标准化。

三是开发绿色低碳工艺。重点是开发无磷石膏排放、高效利用磷矿资源的磷复肥新工艺,包括研究开发盐酸、硫酸脲分解中低品位磷矿生产磷复肥,磷尾矿和低品位磷矿生产钙镁磷钾肥,硫酸、盐酸、硝酸和磷酸等酸解磷矿料浆直接生产磷复肥,以及非酸化活化磷矿生产磷复肥的生产技术;开发氯化钾低温转化生产硫酸钾联产复合肥的技术,从根本上解决目前硫基复合肥生产的技术瓶颈,大幅度降低曼海姆法和复分解法等工艺能耗高、废气排放量大等问题,实现磷复肥产业大幅度节能、降碳、降耗、减排^[6]。

3.3 资源高效利用的生产技术

我国磷矿资源以中低品位矿为主,具有杂质含量高、采选难度大、共伴生资源多等特点。目前,我国北方地区少数沉积型磷铁矿的选矿磷回收率可达90%以上;少数先进大型企业针对某些较难选的中低品位磷矿的选矿技术达到了较高水平,磷回收率达到85%~90%;磷收率达到98%的半水-二水法磷酸工艺的产业化已发展到相当规模;利用磷矿中伴生资源制取无水氟化氢和单质碘等生产技术取得一些重大突破,实现了一定规

模的工业化和产业化;磷石膏的无害化处理和综合利用技术发展到了一个新阶段,磷石膏的综合利用率达到了60%以上。然而,总体上我国磷复肥生产过程主要环节的磷收率还不高,选矿的磷回收率在80%左右、磷矿酸解的磷收率在95%左右等,创新发展提高磷矿资源磷收率的生产技术,以及磷石膏和磷尾矿等副产物资源高效利用的生产技术,仍然是当前和今后磷复肥生产技术的发展的主流趋势和方向。

一是通过持续改进创新采矿和选矿技术,包括研发无人采矿智能化技术等,实现规模化、集约化和技术化开采磷矿资源;针对不同产地的磷矿资源研发高效的选矿药剂和选矿技术,以及镁等的回收利用技术,不断提高磷矿资源的开采回采率,降低磷矿入选品位,合理定位选矿的精矿品位,提高选矿的磷收率。

二是进一步优化改进推广先进的酸解磷矿工艺技术和磷酸净化技术,包括半水-二水法磷酸工艺、二水-半水法磷酸工艺,以及盐酸分解磷矿和硝酸或硝酸-硫酸(铵)分解磷矿工艺等,提高磷复肥生产的磷收率和伴生资源的利用率;通过磷酸浓缩法、汽提法等强化磷酸浓缩和磷酸净化过程,提高氟等磷矿伴生资源的分离和回收利用技术。

三是加强磷石膏无害化处理方法和综合利用技术研究开发,包括通过添加化学试剂与磷石膏中的杂质反应生成沉淀或者生成惰性物质,在后期处理过程中提取有益元素或去除有害杂质的化学处理技术,以及物理和化学方法组合的技术,高效分离、高值化利用磷石膏中钙、氟、硅、碘、镁等伴生资源。

四是磷尾矿、萃余酸、磷酸淤渣中的磷及其他伴生资源综合利用技术的研究开发,包括磷尾矿再选或酸解,磷酸的梯级利用等工艺过程中有价元素的分离和综合利用技术;利用磷尾矿、净化萃余酸和磷酸淤渣等生产磷复肥的技术,活化其中的难溶和不溶性磷酸盐等物质的营养元素,提高磷资源的利用率,以及高效高值化利用其中的钙、氟、硅、碘、镁等磷矿伴生资源的技术,不断突破技术经济瓶颈,不断实现工业化和产业化。

3.4 装备自动化智能化的生产技术

由于工艺过程中物料的成分复杂、物相变化大等因素,目前我国磷复肥生产装备的自动化和智能化水平普遍较低,如在造粒核心工序,目前基本上

还停留在凭经验手动调控为主的状态。创新发展装备技术,实现生产过程的自动化和智能化控制,是产业高质量发展的客观要求,也是磷复肥生产技术发展的重要趋势。

一是改进、创新计量检测调控等技术,主要包括磷复肥生产过程中易相变物料、固态原(辅)料、微量或痕量增效物质或功能性物质、系统返料和出料成品等在线计量检测调控技术,实现生产原(辅)料和产品质量精准稳定控制^[7]。

二是改进、创新关键设备技术,主要包括氨酸的反应器技术,DAP、NPK等产品的造粒、干燥、冷却、除尘、洗涤等设备技术,主要动力设备的节能和热风循环技术,以及大粒径高强度的挤压造粒技术等,实现节能、降碳、降耗、减排^[7]。

三是改进、创新磷复肥造粒自动化控制技术,攻克磷复肥自动化造粒的世界性技术难题,实现自动化、智能化造粒,提高造粒成品率,提高生产效率^[7]。

四是改进、创新磷矿选矿、磷矿酸解、磷酸或中和料浆(或酸解液中和料浆)等浓缩、系统除尘和尾气洗涤吸收等磷复肥生产工艺过程的自动化和智能化调控技术,全面提升磷复肥生产技术的自动化和智能化水平。

3.5 磷素循环利用的生产技术

磷矿是不可再生资源,随着全球磷复肥及磷化工产业的发展,世界磷矿需求不断增长,在不久的将来,磷复肥产业将面临磷矿资源枯竭的挑战。创新发展磷素循环利用的生产技术,是磷复肥产业可持续发展的必然要求。

目前,欧洲国家在磷的循环利用方面走在世界前列,已开始推广应用磷循环技术并配套相关政策措施,制定了实施计划和规划。我国磷的循环利用目前主要集中在秸秆还田等农业生态系统中的磷循环,物质流的磷循环目前主要处在研究阶段,磷素循环利用技术产业化应用的很少。

一是创新发展从污泥、灰渣、动物骨粉中回收磷的技术,有关研究表明,污泥中 $w(P)$ 为1%~5%,灰渣中 $w(P)$ 高达5%~11%,骨粉中

$w(P)$ 达8%~14%。

二是创新发展畜禽粪便等有机肥和秸秆还田高效磷素循环技术,有关研究表明,动物粪便中 $w(P)$ 为0.14%~0.60%,农作物种植中秸秆产生量大,含有大量的有机磷资源。

三是创新发展从废弃物、污水及海洋生物中回收磷的技术,人类生活废弃物、城市生活污水和海洋生物含有大量的磷资源。

[参考文献]

- [1] 汤建伟,许秀成,化全县,等.新时代我国低浓度磷肥发展的新机遇[J].磷肥与复肥,2018,33(5):8-15.
TANG J W, XU X C, HUA Q X, et al. New opportunities for development of low analysis phosphate fertilizer in new era of China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018,33(5):8-15.
- [2] 姚永发.我国复混肥的生产和发展[J].化肥工业,2001,28(4):3-6.
YAO Y F. Production and Expansion of Compound Fertilizers in China[J]. Journal of the Chemical Fertilizer Industry, 2001,28(4):3-6.
- [3] 王志强.我国磷铵工业的发展概况[J].南化科技,1994,15(4):55-56.
- [4] 钟本和,应建康.改革开放成就了中和料浆浓缩法磷铵工艺[J].磷肥与复肥,2018,33(12):44-47.
ZHONG B H, YING J K. Reform and opening up promoting ammonium phosphate production by neutralized slurry concentration process[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018,33(12):44-47.
- [5] 郑秀兴.复合肥料生产工艺的创新发展[J].磷肥与复肥,2021,36(11):1-6.
ZHENG X X. Innovation and development of compound fertilizer production process[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021,36(11):1-6.
- [6] 郑秀兴.我国磷复肥产业绿色低碳工艺发展方向和路径探讨[J].磷肥与复肥,2023,38(7):6-11.
ZHENG X X. Development direction and path of the green and low carbon process of phosphate and compound fertilizer industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023,38(7):6-11.
- [7] 郑秀兴.我国复合肥料产业发展方向与途径探讨[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(10):1-8.
ZHENG X X. Discussion on the development direction and approach of compound fertilizer industry in China[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2024,39(10):1-8.