

◆磷及关联产业工艺创新◆

## 磷酸铁生产工艺母液结晶制备大颗粒硫酸铵研究

刘家琪<sup>1</sup>, 杜建波<sup>1</sup>, 薛河南<sup>1</sup>, 唐宏<sup>1</sup>, 刘海雄<sup>1</sup>, 邱则龙<sup>2</sup>, 杜加磊<sup>1</sup>, 刘爱玲<sup>1</sup>, 龙文恒<sup>1</sup>

(1. 云南云天化股份有限公司 研究院, 云南 昆明 650228; 2. 云南云聚能新材料有限公司, 云南 昆明 650300)

**[摘要]** 为获得铵法磷酸铁母液制备大颗粒硫酸铵产业化生产工艺技术条件, 云南云天化股份有限公司研发中心在完成小试试验及放大试验的基础上, 建成1 000 t/a大颗粒硫酸铵中试装置。以40%工业硫酸铵溶液为原料, 采用FC-OSLO消结晶耦合工艺连续生产大颗粒硫酸铵, 考察结晶反应的温度、时间、pH、蒸发量、循环强度、模板剂添加量对硫酸铵大颗粒率及产量的影响, 得到最佳工艺参数: 结晶循环频率200 Hz、蒸发速率400 L/h (对应过饱和度1.33%)、结晶温度65 ℃、模板剂添加量0.5%、pH 4.5、结晶时间4 h, 大颗粒硫酸铵产品大颗粒率 $\geq 62\%$ 。N、S、水分、游离酸等各项指标达到肥料级硫酸铵要求, 为铵法磷酸铁副产硫酸铵的消化利用拓宽了路径。

**[关键词]** 大颗粒硫酸铵; OSLO结晶; 工艺流程; 过饱和度; 铵法磷酸铁

**[中图分类号]** TQ44 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0029-06

### Research on preparation of large particle ammonium sulfate from the mother liquor of iron phosphate production process

LIU Jiaqi<sup>1</sup>, DU Jianbo<sup>1</sup>, XUE Henan<sup>1</sup>, TANG Hong<sup>1</sup>, LIU Haixiong<sup>1</sup>, QIU Zelong<sup>2</sup>, DU Jialei<sup>1</sup>, LIU Ailing<sup>1</sup>, LONG Wenheng<sup>1</sup>

(1. *Research Institute, Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China;*  
2. *Yunnan Yunjuneng New Materials Co., Ltd., Kunming 650300, China*)

**Abstract:** In order to obtain the technical conditions for the industrial production process of large particle ammonium sulfate from the mother liquor of ammonium process iron phosphate. The R & D center of Yunnan Yuntianhua Co., Ltd. has built a 1000 t/a large particle ammonium sulfate pilot plant based the completion of small scale exploration tests and scale up tests. The process of continuous production of large-particle ammonium sulfate is carried out using 40% industrial ammonium sulfate solution as raw material with FC-OSLO crystallization coupling process. The effects of temperature, time, pH, evaporation volume, cycle intensity and template agent addition amount of the crystallization reaction on the large-particle rate and output of ammonium sulfate are investigated. The optimal process parameters are obtained: crystallization cycle frequency of 200 Hz, evaporation rate of 400 L/h (corresponding to supersaturation of 1.33%), crystallization temperature of 65 ℃, template agent addition amount of 0.5%, pH of 4.5, crystallization time of 4 h, large particle rate of large-particle ammonium sulfate products  $\geq 62\%$ . All indicators such as N, S, moisture content and free acid meet the requirements of fertilized ammonium sulfate, broadening the path for the digestion and utilization of by-product ammonium sulfate from the ammonium process of iron phosphate.

**Key words:** large particle ammonium sulfate; OSLO crystallizer; process flow; supersaturation; ammonium method iron phosphate

### 0 引言

硫酸铵俗称“硫铵”、“肥田粉”, 是目前使用较为普遍的氮肥品种, 具有速溶、见效快、不烧苗等特点, 适用于一般土壤和作物, 能使枝叶生长旺

盛, 提高果实品质和产量, 并增强作物对灾害的抵抗能力<sup>[1]</sup>。我国硫酸铵主要来自电池用磷酸铁产业、焦化、己内酰胺、电厂和各类化工副产品, 制取工艺主要是合成氨或炼焦、炼油、有机化合物工业生

收稿日期: 2025-11-19

作者简介: 刘家琪(1993—), 男, 云南曲靖人, 工程师, 研究方向为磷复肥及湿法磷酸深加工。

通信作者: 龙文恒(1989—), 男, 云南弥勒人, 高级工程师, 研究方向为磷复肥及湿法磷酸深加工。

产中的副产品回收氨，经硫酸中和反应得到<sup>[2]</sup>。硫酸铵具有较好的水溶性，当硫酸铵作为大田肥料使用时，容易被作物吸收利用，但是在雨量充沛的地方施用，小颗粒硫酸铵容易被淋失；而大颗粒硫酸铵因其致密的晶体结构及较大的单体体积，相较于粉状或小颗粒硫酸铵具有较长的肥效期，因而更具有广阔的市场前景。

目前我国硫酸铵市场以0.5 mm粒径为主，而运途短、易板结、肥效流失严重、国际市场薄弱等缺点在很大程度上制约了硫酸铵的使用。工业上硫酸铵的生产工艺以FC强制循环结晶工艺、DTB结晶工艺以及OSLO结晶工艺为主<sup>[3]</sup>，各项工艺主要优缺点见表1。

为了实现大颗粒硫酸铵产品的规模化生产，云

表1 硫酸铵结晶工艺优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of ammonium sulfate crystallization process

| 工艺方法       | 优点                                     | 缺点                          |
|------------|--|-----------------------------|
| FC强制循环结晶工艺 | 生产能力大,对母液总溶解性固体(TDS)要求不高,易结晶疤、晶型差      | 无法生产大颗粒结晶,一般粒径为0.15~0.30 mm |
| DTB结晶工艺    | 母液具有较低过饱和度,流体运动均匀,内阻力小,动力消耗低,操作弹性大     | 无法生产大颗粒结晶,一般粒径为0.2~1.2 mm   |
| OSLO结晶工艺   | 无物理换热面,系统稳定性强,晶体可梯度悬浮生长,晶型稳定,晶体粒径≥2 mm | 大颗粒结晶收率低,相对生产成本高            |

天化股份有限公司(以下简称公司)开展了利用磷酸铁副产硫酸铵母液生产大颗粒硫酸铵晶体试验研究<sup>[4]</sup>。笔者课题组采用FC-OSLO连续消结晶耦合工艺,以铵法磷酸铁工艺副产40%硫酸铵溶液为原料,将各类结晶工艺优势有效整合,开发出可控的、连续的、粒径≥2 mm的大颗粒硫酸铵工艺技术路线,并在某铵法磷酸铁厂成功通

过技术验证,得到大颗粒率≥60%且指标均达到肥料级硫酸铵标准(GB/T 535—2020)I型要求的硫酸铵产品。

### 1 铵法磷酸铁工艺母液制备大颗粒硫酸铵的工艺

#### 1.1 原料

所用硫酸铵溶液原料分析结果见表2。

表2 硫酸铵溶液原料分析结果

Table 2 Analysis results of the raw materials of ammonium sulfate solution

| pH   | w(N)/% | w(S)/% | w(TDS)/% | w(Mn)/%   | w(Zn)/%  | w(Al)/%   | w(Ca)/%   | w(Cr)/%   | w(Co)/%   | w(Pb)/%   | w(Fe)/%   |
|------|--------|--------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3.28 | 7.97   | 9.11   | 42.62    | 0.004 444 | 0.000 66 | 0.000 025 | 0.007 638 | 0.000 012 | 0.000 514 | 0.000 023 | 0.000 093 |

### 1.2 工艺流程

铵法磷酸铁工艺副产硫酸铵溶液制备大颗粒硫酸铵的工艺包含消晶、真空结晶、干燥分离等步骤,工艺流程见图1。

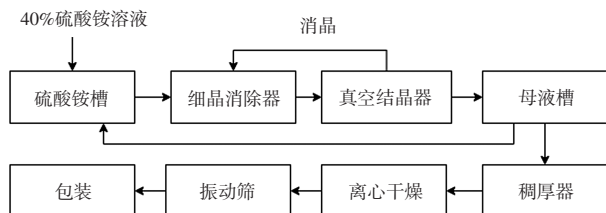


图1 铵法磷酸铁工艺副产硫酸铵溶液制备大颗粒硫酸铵工艺流程

Fig. 1 Process flow for preparing large particle ammonium sulfate from by-product ammonium sulfate solution of phosphate iron production by ammonium method

消晶工序: 将来自真空结晶工序细晶加热消

除,通过强制循环进行溶液过饱和度回收,控制硫酸铵溶液质量分数约48%,温度控制在90℃左右。

结晶工序: 将来自细晶消晶工序的硫酸铵溶液,与结晶循环母液混合后送至OSLO结晶器蒸发室,过饱和硫酸铵溶液经中心筒进入结晶悬浮区结晶成长。结晶器上部硫酸铵溶液、新鲜硫酸铵溶液经结晶循环泵送至结晶器蒸发室,连续不断提供料浆的过饱和度,实现蒸发-结晶循环,达到要求粒度的硫酸铵结晶从结晶器下部通过晶浆输送泵送至稠厚器。

干燥分离工序: 来自离心机的w(H<sub>2</sub>O)约5%的硫酸铵产品进入流化床除水干燥,筛分后包装。

### 2 结果及讨论

#### 2.1 结晶循环强度对硫酸铵结晶的影响

在蒸发速率400 L/h(对应过饱和度1.33%)、

结晶温度 65 °C、 $w$ (模板剂) 0.5%、pH 4.5、结晶时间 4 h 时的反应条件下, 改变反应强度(结晶循环频率)进行实验, 结果见图 2。

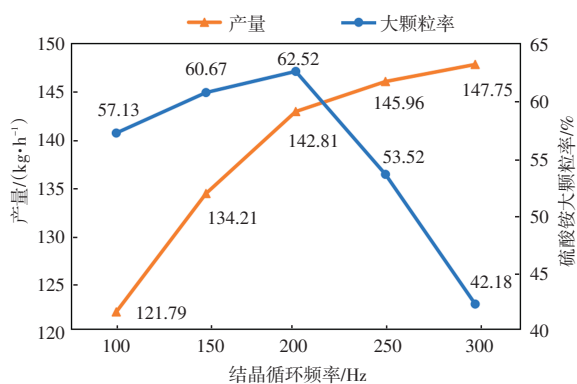


图 2 不同循环频率下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 2 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different cycle frequencies

从图 2 可以看出, 结晶循环频率为 200 Hz 时硫酸铵晶体大颗粒率最高, 这可能是由于处于 OSLO 结晶器体系时, 此时的循环强度提供的上浮力可以使得晶核克服自身重力并悬浮于溶液中, 此时晶核群充分接触溶液体系过饱和度同时又未达到晶核二次爆发成核临界点, 自身晶体生长速度处于较高水平, 得到较高大颗粒率硫酸铵产品。产量则随着硫酸铵晶核碰撞频率的提升而增加, 主要结合硫酸铵大颗粒率情况进行选择。

### 2.2 结晶蒸发速率对硫酸铵结晶的影响

在结晶循环频率 200 Hz、结晶温度 65 °C、 $w$ (模板剂) 0.5%、pH 4.5、结晶时间 4 h 时的反应条件下, 改变结晶蒸发速率进行实验, 结果见图 3。

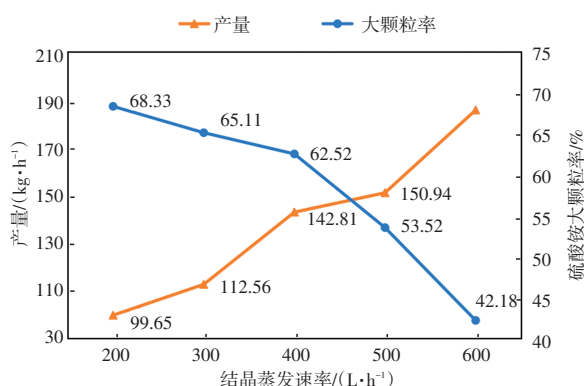


图 3 不同结晶蒸发速率下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 3 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different crystallization evaporation rates

从图 3 可以看出, 当结晶蒸发速率为 400 L/h (本次实验中对过饱和度为 1.33%) 时硫酸铵晶

体大颗粒率与产量综合最高。过饱和度指标控制一直是结晶体系的难点和重点, 在本实验中则体现在溶液的结晶蒸发速率这一关键参数上。综合考虑硫酸铵大颗粒率与产量, 当结晶蒸发速率由 200 L/h 增加至 600 L/h 时, 硫酸铵的大颗粒率逐渐下降, 这可能是由于随着过饱和度增加, 结晶体系逐渐由介稳区向不稳定区偏移, 自发成核比例升高, 导致大颗粒率逐渐下降。与此同时, 产量则随着结晶体系由介稳区向不稳定区的偏移逐渐上升, 这可能是由于随着晶核数量增加, 产量也在不断增加。综合以上特性, 当结晶蒸发速率为 400 L/h 时, 结晶体系处于介稳区, 硫酸铵晶体既处于高速增长区, 又处于晶体数量相对稳定非爆发成核区, 大颗粒率与产量综合最高。

### 2.3 结晶温度对硫酸铵结晶的影响

在结晶蒸发速率 400 L/h (对应过饱和度 1.33%)、结晶循环频率 200 Hz、 $w$ (模板剂) 0.5%、pH 4.5、结晶时间 4 h 时的反应条件下, 改变结晶蒸发温度进行实验, 结果见图 4。

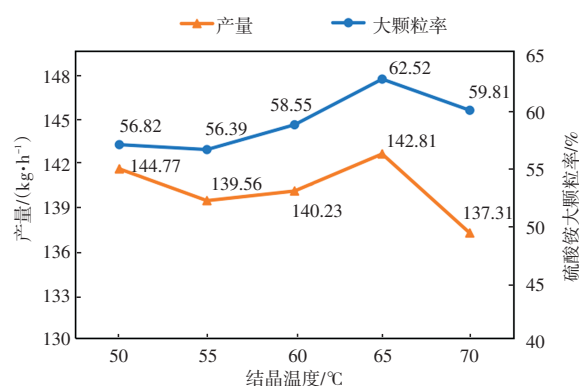


图 4 不同结晶温度下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 4 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different crystallization temperatures

从图 4 可以看出, 当结晶温度为 65 °C 时硫酸铵晶体大颗粒率与产量综合最高。虽然硫酸铵溶解度对于温度变化趋于顿感, 但本实验使用的原料为工业副产的 40% 硫酸铵溶液, 含有铁、镁、铝等金属杂质, 此类杂质的溶解度会随着温度的变化而变化。在实验过程中, 结晶温度为 50 ~ 60 °C, 结晶体系呈浑浊状, 可能是由于金属离子盐析出导致, 但当反应温度升至 65 °C 时, 结晶体系变得透亮清澈, 可观测到硫酸铵晶体在结晶器内部的悬浮状态。当温度由 65 °C 升至 70 °C 时, 由于氨的固有特性, 硫酸铵产品随着结晶温度上升而逐渐分解, 硫酸铵产量大幅度下降。

### 2.4 模板剂添加量对硫酸铵结晶的影响

在结晶蒸发速率 400 L/h（对应过饱和度 1.33%）、结晶循环频率 200 Hz、结晶温度 65 ℃、pH 4.5、结晶时间 4 h 时的反应条件下，改变模板剂添加量进行实验，结果见图 5。

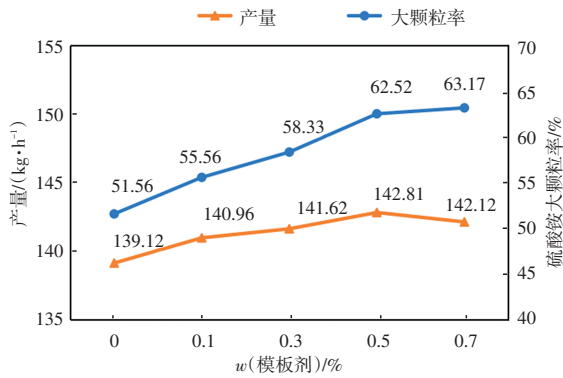


图 5 不同模板剂添加量下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 5 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different amounts of template agent additions

从图 5 可以看出，当  $w(\text{模板剂})$  为 0.5% 时硫酸铵晶体大颗粒率与产量综合最高。添加模板剂的作用本质上是导向调控硫酸铵晶体的生长过程，通过提供成核界面、限定生长空间、调节生长动力学和稳定特定结构，将原本随机、难以控制的结晶过程，转变为一个可预测、可设计的“自下而上”的制造过程<sup>[5]</sup>。当  $w(\text{模板剂})$  由 0 提升至 0.5% 时，硫酸铵大颗粒率提升约 21.26%，可知模板剂的添加有助于硫酸铵结晶大颗粒率提升，但当  $w(\text{模板剂})$  由 0.5% 提升至 0.7%，硫酸铵大颗粒率提升并不明显，说明结晶模板剂的添加存在边际效应，故在工业生产过程中模板剂要按需添加。

### 2.5 结晶体系 pH 对硫酸铵结晶的影响

在结晶蒸发速率 400 L/h（对应过饱和度 1.33%）、结晶循环频率 200 Hz、结晶温度 65 ℃、 $w(\text{模板剂})$  0.5%、结晶时间 4 h 的反应条件下，改变结晶体系 pH 进行实验，结果见图 6。

从图 6 可以看出，当结晶体系 pH 为 4.5 时，硫酸铵晶体大颗粒率与产量综合最高。pH 在本实验中对硫酸铵大颗粒率的影响有限，pH 较低时，结晶体系黏度上升，但因 FC 强制循环的存在，体系黏度对结晶过程影响不大。从装置上来说，低 pH 对设备及管道的腐蚀较为严重；维持高 pH 对大颗粒率的提升相当有限，反而因维持高 pH 导致氨逸出更加严重，造成一定程度的资源浪费。故本实验选择 pH 4.5 作为较优工艺条件。

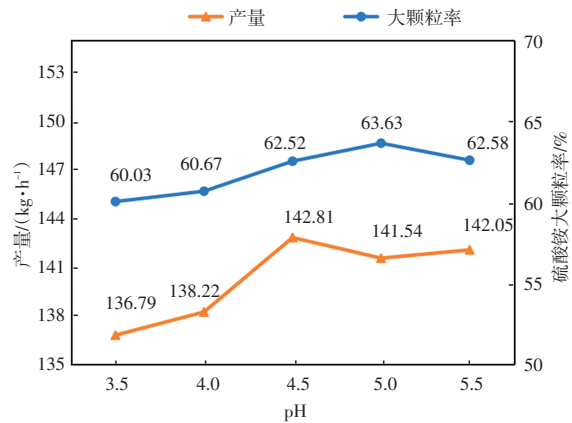


图 6 不同 pH 下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 6 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different pH

### 2.6 结晶时间对硫酸铵结晶的影响

在结晶蒸发速率 400 L/h（对应过饱和度 1.33%）、结晶循环频率 200 Hz、结晶温度 65 ℃、 $w(\text{模板剂})$  0.5%、pH 4.5 的反应条件下，改变结晶体系结晶时间进行实验，结果见图 7。

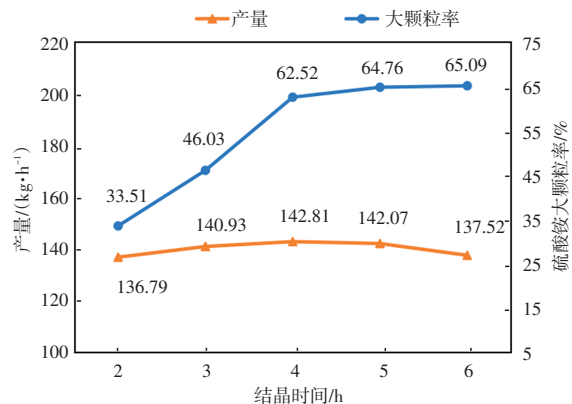


图 7 不同结晶时间下硫酸铵结晶大颗粒率及产量

Fig. 7 The large particle rate and yield of ammonium sulfate under different crystallization times

从图 7 可以看出，当结晶体系结晶时间为 4 h 时，硫酸铵晶体大颗粒率与产量综合最高。结晶（养晶）时间是结晶体系的关键参数之一。当结晶时间从 2 h 提升到 4 h 时，硫酸铵晶体大颗粒率增加 86.57%，这可能是由于随着时间的增长，溶质原子、分子或离子有规律地、持续地添加到晶核的表面上，使晶体尺寸不断增大。当结晶时间从 4 h 增加至 6 h 时，硫酸铵大颗粒率增加 4.11%，这可能是由于硫酸铵晶体粒子需要克服能量势垒与体系提供的驱动相对平衡，制约了晶体的生长。涉及工业生产实际，缩短结晶时间可相对增加单位时间产量，综合结晶时间为 4 h 为较优工艺指标。

### 3 小结

在本次实验过程中,对硫酸铵结晶影响较大的实验指标主要有结晶循环频率、结晶蒸发速率、结晶温度、模板剂等<sup>[5-10]</sup>,具体各指标影响及调控范围见表3。

#### 3.1 产品指标分析

当工艺参数为结晶循环频率200 Hz、蒸发速率400 L/h(对应过饱和度1.33%)、结晶温度65℃、 $w$ (模板剂)0.5%、pH 4.5、结晶时间4 h时,课题组成功得到符合GB/T 535—2020 I型产品质量要求的大颗粒硫酸铵产品,其形貌见图8,产品指标见表4。

所制备的大颗粒硫酸铵产品质量均符合GB/T 535—2020要求,平均大颗粒率为62.42%。

本实验中发现:(1)结晶循环频率过高会导致

表3 铵法磷酸铁工艺副产硫酸铵溶液制备大颗粒硫酸铵工艺指标<sup>[11-17]</sup>

Table 3 Process indicators of preparing large particle ammonium sulfate from by-product ammonium sulfate solution of phosphate iron production by ammonium method

| 因素     | 作用                           | 调控范围          |
|--------|------------------------------|---------------|
| 结晶循环频率 | 影响 OSLO 结晶工艺中颗粒悬浮分级程度、结晶成核速率 | 150 ~ 300 Hz  |
| 结晶蒸发速率 | 影响提供的过饱和度大小                  | 200 ~ 600 L/h |
| 结晶温度   | 影响结晶过程中硫酸铵晶体的形貌、控制溶液杂质溶解度    | 55 ~ 65 ℃     |
| 模板剂    | 影响硫酸铵晶体的大小、形貌、晶体生产速率         | 0.3% ~ 0.5%   |
| 结晶时间   | 影响硫酸铵晶体大颗粒率、产量               | 4 ~ 5 h       |
| pH     | 影响硫酸铵母液黏度、硫酸铵晶体晶型            | 3 ~ 5         |

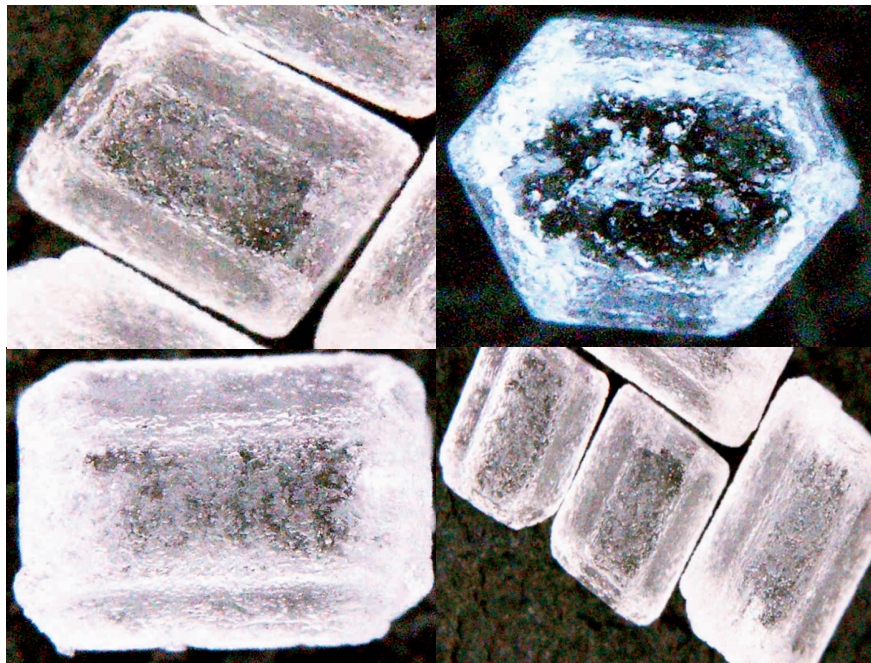


图8 大颗粒硫酸铵产品外观

Fig. 8 Appearance of large particle ammonium sulfate product

表4 大颗粒硫酸铵产品分析结果

Table 4 Analysis results of large particle ammonium sulfate product

| 项目  | $w(N)$      | $w(S)$      | $w(H_2O)$  | $w(H_2SO_4)$ | $w$ (水不溶物) | $w(Cl^-)$  | 大颗粒率/% |
|-----|-------------|-------------|------------|--------------|------------|------------|--------|
| 指标  | $\geq 20.5$ | $\geq 24.0$ | $\leq 2.0$ | $\leq 0.05$  | $\leq 0.5$ | $\leq 1.0$ |        |
| 批次1 | 21.11       | 24.13       | 0.09       | 0.03         |            |            | 62.32  |
| 批次2 | 24.13       | 24.11       | 0.06       | 0.02         |            |            | 62.77  |
| 批次3 | 21.01       | 24.02       | 0.07       | 0.02         |            |            | 62.52  |
| 批次4 | 21.04       | 24.05       | 0.13       | 0.02         |            |            | 61.30  |
| 批次5 | 20.98       | 24.01       | 0.31       | 0.02         |            |            | 62.31  |
| 批次6 | 20.53       | 24.02       | 0.55       | 0.01         |            |            | 63.30  |

硫酸铵溶液爆发成核,从而过度消耗硫酸铵溶液过饱和度,增加了结晶工序能耗且不利于大颗粒硫酸铵晶体的生长;(2)结晶温度过低则会导致硫酸铵溶液在结晶过程中出现原母液杂质的富集析出,晶体晶型偏细长、扁平甚至出现针状晶体,不利于大颗粒晶体生长;(3) pH 过低不仅导致设备腐蚀加剧,而且会使得硫酸铵晶体晶型成针尖状、扁平状;(4)模板剂的加入使得大颗粒硫酸铵晶体生长速率较未加入模板剂提升约21%,同时晶型更趋于规则的棱柱状;(5)蒸发速率过低则会导致低过

饱和度,使得已达标大颗粒晶体的加速消解<sup>[11-17]</sup>。

### 3.2 工艺分析

利用硫酸铵母液循环消结晶,通过OSLO闪冷结晶工艺连续制备大颗粒硫酸铵产品,为公司在在大颗粒硫酸铵结晶工艺研究开发方面奠定基础,弥补了技术空缺,重点突破大颗粒硫酸铵结晶工艺关键技术参数优化、设备适应性改造及过程控制策略开发,建立完整的工艺技术评价体系,为产业化装置设计提供核心数据支撑。系统性解决磷酸铁装置副产硫酸铵的高值化利用难题,推动磷化工产业链闭路循环。通过提升硫酸铵产品结晶粒度( $D_{40} \geq 2.0$  mm),显著增强产品市场竞争力和附加值。

### 4 中试试验效果

中试试验项目由云南云天化股份有限公司研究院牵头,于云南云聚能新材料有限公司建设一套1 000 t/a农用大颗粒硫酸铵中试装置。项目于2022年9月6日完成立项,2024年9月19日化工投料试车。自2024年9月19日装置首次化工投料试车以来,装置长期连续运行,试验期间不断优化工艺参数,对存在的设备问题进行整改后,大颗粒硫酸铵产品质量、产量均达到设计要求,装置运行稳定,具备性能测试条件。为检验装置的生产能力、产品质量、原材料消耗、公用工程消耗及装置的设备性能,1 000 t/a大颗粒硫酸铵中试装置于2025年4月16日进行了料浆法硫酸铵“高温”结晶72 h性能测试,测试结果为装置达产达标。随后于2025年4月22日进行料浆法硫酸铵“低温”结晶72 h测试,测试结果同样为装置达产达标。

测试结果显示:在首次72 h测试中,装置生产能力达到设计值的124.5%,硫酸铵大颗粒率为61.30%,产品合格率达100%,电耗低于设计值。进一步开展工艺优化,通过取消系统消晶工序,第二次72 h测试同样实现达产达标。此时,装置生产能力达到设计值的159.50%,硫酸铵大颗粒率为63.30%,产品合格率依旧为100%,电耗仍低于设计值。两次72 h性能测试工作的顺利完成,为下一步10万t/a大颗粒硫酸铵产业化装置工艺包的优化提供了数据支撑。

### 5 结语

将磷酸铁副产硫酸铵溶液采用FC—OSLO消结晶耦合工艺生产大颗粒硫酸铵,其最优工艺参数为结晶循环频率200 Hz、过饱和度1.33%、结晶温度65℃、 $w$ (模板剂)0.5%、pH 4.5,结晶时间4 h,按照该条件生产的硫酸铵产品大颗粒率可达到62%

以上,且产品水分、水溶性、溶解速率等指标较好,产品指标满足GB/T 535—2020 I型产品的要求,可消耗大量磷酸铁副产硫酸铵溶液,解决了因粉状硫酸铵导致的硫酸铵产能限制的问题,为硫酸铵的综合利用提供了一条新的技术途径。

### [参考文献]

- [1] 刘宝树,种悦晖,孙华,等.均一化大颗粒硫酸铵结晶高效制备工艺研究[J].无机盐工业,2017,49(6):77-80.  
LIU B S, ZHONG Y H, SUN H, et al. High efficiency preparation of homogeneous large granular ammonium sulfate crystals[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017, 49(6): 77-80.
- [2] 徐欢欢,刘宝树,孙华,等.硫酸铵蒸发-冷却结晶工艺研究[J].无机盐工业,2012,44(6):14-16.  
XU H H, LIU B S, SUN H, et al. Study on evaporation-cooling coupled crystallization process of ammonium sulfate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2012, 44(6): 14-16.
- [3] 龙文恒,刘家琪,杜建波,等.大颗粒硫酸铵结晶技术及装备研究进展[J].云南化工,2025,52(6):74-78.  
LONG W H, LIU J Q, DU J B, et al. Research Progress on Crystallization Technology and Equipment of Large Particle Ammonium Sulfate[J]. Yunnan Chemical Technology, 2025, 52(6): 74-78.
- [4] 云南云天化股份有限公司.一种大颗粒硫酸铵生产装置:202322971510.0[P].2024-06-21.
- [5] 范嘉昊,张洋,范兵强,等.(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>混合溶液中(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>结晶动力学及铁/铝/锰/铬等离子对(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>结晶的影响规律[J].化工进展,2023,42(1):488-496.  
FAN J H, ZHANG Y, FAN B Q, et al. Crystallization kinetics of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in mixed solution of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and the influence of Fe/Al/Mn/Cr ions on crystallization [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 488-496.
- [6] 王小凤.氨法脱硫结晶的影响因素与对策[J].化工管理,2018,(29):68-69.
- [7] 李琼.硫酸铵多效蒸发结晶工艺的应用及设计特点[J].硫酸工业,2018(3):17-19,23.  
LI Q. Application and design character of ammonium sulfate multipletstage evaporative crystallization processes [J]. Sulphuric Acid Industry, 2018(3): 17-19, 23.
- [8] 魏浩.硫酸铵结晶过程的影响因素[J].化肥工业,2016,43(5):64-67.  
WEI H. Factors Influencing Ammonium Sulfate Crystallization Process [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2016, 43(5): 64-67.
- [9] 李亚仙,刘宝,葛娟,等.浅谈硫酸铵废水的蒸发结晶工艺[J].甘肃科技,2016,32(11):63-64.
- [10] 王荣荣,施云海,李伟,等.间歇冷却结晶中硫酸铵晶体粒度及形态调控[J].化学工程,2016,44(5):32-37.  
WANG R R, SHI Y H, LI W, et al. Regulation of size and morphology of ammonium sulfate crystals in batch-cooling crystallization [J]. Chemical Engineering (China), 2016, 44(5): 32-37.

(下转第61页)