◆磷及关联产业工艺创新◆

料浆法粉状磷酸一铵装置多规格柔性生产工艺与控制实践

梅亮贤，曹　卓，刘　锋，赵志鹏，聂海波

（湖北省黄麦岭磷化工有限责任公司，湖北 孝感　432800）

［摘　要］针对磷复肥市场差异化需求及料浆法粉状磷酸一铵装置产品单一问题，以湖北省黄麦岭磷化工有限责任公司10万t/a粉状磷酸一铵装置为研究对象，通过新增压滤工序、优化喷粉塔分布板、热风炉改蒸汽加热等方法及与工业磷酸一铵联产等技改，开发了多规格柔性生产工艺。系统研究11-44-0、11-47-0、11-49-0等常规型磷酸一铵及12-52-0、12-54-0、12-56-0等水溶性磷酸一铵的生产流程，明确了不同产品的过程控制参数：常规型磷酸一铵中和度控制在0.95～1.05，Ⅰ效浓缩料浆密度1 540～1 575 kg/m³；水溶性磷酸一铵中和度控制在1.00～1.02，Ⅰ效浓缩料浆密度1 445～1 465 kg/m³，熟化料浆密度优化为1 230～1 240 kg/m³。实践表明：该工艺可实现常规型与水溶性磷酸一铵生产灵活切换，装置年开车率达90%以上；成品6个月内无结块；通过副产物（渣酸、滤饼、母液）资源化利用，实现废水近零排放，粉尘排放质量浓度≤40 mg/m³。

［关键词］料浆法；粉状磷酸一铵；柔性生产；工艺控制

［中图分类号］TQ442.14　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）07-0033-08

Process and control practice for multi-specification flexible production in slurry-based powdered monoammonium phosphate plant

MEI Liangxian, CAO Zhuo, LIU Feng, ZHAO Zhipeng, NIE Haibo

(*Hubei Provincial Huangmailing Phosphate Chemical Co., Ltd., Xiaogan* 432800, *China*)

Abstract: In response to the differentiated demand in the phosphate compound fertilizer market and the problem of single-product in the slurry method powder monoammonium phosphate plant, a multi specification flexible production process has been developed for the 100 kt/a plant of Hubei Huangmailing Phosphorus Chemical Co., Ltd. through technological upgrades such as adding a pressure filtration process, optimizing the powder spraying tower distribution plate, replacing the hot blast furnace with steam heating, and co-producing with industrial monoammonium phosphate. The production processes of conventional monoammonium phosphate such as 11-44-0, 11-47-0, 11-49-0, and water-soluble monoammonium phosphate such as 12-52-0, 12-54-0, and 12-56-0 are systematically studied, and the process control parameters for different products are clarified: The neutralization degree of conventional monoammonium phosphate is controlled at 0.95 - 1.05, and the density of the first effect concentration slurry is 1 540 -1 575 kg/m³; The neutralization degree of water-soluble monoammonium phosphate is 1.00 - 1.02, the density of the first effect concentration slurry is 1 445 - 1 465 kg/m³, and the optimized density of the matured slurry is 1 230 - 1 240 kg/m³. Practice has shown that this process can achieve flexible switching between conventional and water-soluble monoammonium phosphate, with an annual operating rate of over 90% for the device; The finished product has no lumps within 6 months; Through the resource utilization of by-products (slag acid, filter cake, mother liquor), nearly zero discharge of wastewater and dust emission concentration ≤ 40 mg/m³ are achieved.

Key words: slurry method; powdered monoammonium phosphate; flexible production; process control

收稿日期:2026-05-05

作者简介:梅亮贤(1985—　),男,河南信阳人,工程师,湖北省黄麦岭磷化工有限责任公司总经理,主要从事湿法磷酸生产及加工。

通信作者:曹　卓(1989—　),男,湖北随州人,工程师,主要从事磷铵及AZF复合肥生产工作。

我国磷复肥产业通过技术引进与自主研发相结合，实现了湿法磷酸、高浓度磷复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[1]。其中，磷酸一铵（MAP）在磷复肥产业中，既可作为高浓度产品直接用于农业生产，也为高塔、转鼓等生产装置提供主要原料，在优化磷复肥产品结构、提升肥料利用效率、助力农业绿色高质高效发展中发挥着不可替代的支撑作用。

20世纪80年代，国内自主开发了料浆浓缩法磷铵生产新工艺[2]，经过多年发展该工艺在产能提升和产品性能上均取得重大发展，成了国内农用级磷酸一铵主流生产工艺。近年来，肥料市场整体呈现饱和态势，但水溶肥产品市场规模却保持持续增长态势，水溶肥的增长带动了上游原料水溶性磷酸一铵的需求增长。水溶性磷酸一铵因其具有高养分、高水溶性磷、溶解性好等优点，作为水溶肥原料具备良好的性价比和广泛的应用性。

在此背景下，湖北省黄麦岭磷化工有限公司（以下简称公司）10万t/a粉状磷酸一铵装置，通过新增压滤工序、优化喷粉塔分布板[3]、热风炉改蒸汽加热、与工业级磷酸一铵联产改造等系列技改，进行产品升级，既能生产常规型磷酸一铵，也能生产水溶性磷酸一铵，探索出料浆法粉状磷酸一铵装置多规格柔性生产工艺。该柔性生产工艺，较采用结晶法生产水溶性磷酸一铵装置具有投资小、易改造、生产消耗低等优点；较改造之前的磷酸一铵装置，产品结构丰富，能够满足不同客户差异化需求，同时将母液、渣酸、滤饼等用于磷酸一铵生产，实现对副产物资源化利用。

1 粉状磷酸一铵产品概述

公司粉状磷酸一铵产品主要有两类，一类是符合GB 10205—2009《磷酸一铵、磷酸二铵》要求常规型磷酸一铵，一类是符合HG/T 5048—2016《水溶性磷酸一铵》要求的水溶性磷酸一铵。表1为公司磷酸一铵产品主要参数。

常规型磷酸一铵主要以湿法磷酸装置产出的澄清稀磷酸为原料，在氨化反应器内与液氨快速反应生成料浆，随后直接经浓缩、喷粉、干燥工艺制得。常规型磷酸一铵总养分上限受稀磷酸组分制约，其中固含量对产品总养分的影响最大，SO_3的影响次之[4-5]。表2为公司稀磷酸成品分析结果，在实际生产过程中$w(SO_3)$可通过脱硫降至2.5%以下，w（固）通过延长澄清时间降低至1.5%以下，制得的磷酸一铵成品w（总养分）最高可达62%。因稀磷酸固含量和$w(SO_3)$难以实现超低控制，因此w（总养分）62%的磷酸一铵不稳定，w（总养分）最高选择为60%。常规型磷酸一铵为保障产品白度和水溶性磷占有效磷比例两项指标，选择最低w（总养分）为55%。

有研究表明，市场需求较为旺盛的水溶性磷酸一铵w（总养分）是64%和66%，其中w（总养分）64%的水溶性磷酸一铵适合采用典型稀磷酸进行生产，而w（总养分）66%的水溶性磷酸一铵适合采用典型浓磷酸进行生产，w（总养分）超过68%的水溶性磷酸一铵需要以精制磷酸为原料或者以结晶法生产[6-7]。公司建有稀磷酸脱硫和脱氟装置，生产w（总养分）64%的水溶性磷酸一铵主要以稀磷酸为原料，生产w（总养分）66%的水溶性磷酸一铵以稀

表1 各种规格粉状磷酸一铵产品指标

Table 1 Indicators of various type of powdered MAP product %

规格	类型	$w(N_{总})$	$w(P_2O_5)$	w（水溶磷）/w（有效磷）	w（水不溶物）	$w(H_2O)$
11-44-0	常规型	10.0 ~ 11.0	44.5 ~ 46.0	80.5 ~ 82.5	3.00 ~ 5.00	0.2 ~ 0.5
11-47-0	常规型	10.0 ~ 11.5	46.5 ~ 48.5	82.5 ~ 86.5	1.50 ~ 2.50	0.3 ~ 1.0
11-49-0	常规型	10.5 ~ 11.8	48.5 ~ 50.0	89.0 ~ 92.0	0.80 ~ 2.00	0.3 ~ 1.0
12-52-0	水溶性	12.0 ~ 13.0	51.0 ~ 52.5	98.5 ~ 99.2	0.01 ~ 0.05	0.2 ~ 0.8
12-54-0	水溶性	11.5 ~ 12.5	53.5 ~ 54.5	98.8 ~ 99.2	0.01 ~ 0.05	0.2 ~ 0.8
12-56-0	水溶性	12.0 ~ 12.5	55.5 ~ 57.0	99.0 ~ 99.5	0.05 ~ 0.10	0.2 ~ 0.8

表2 磷酸分析结果

Table 2 Analysis results of phosphoric acid %

项目	$w(P_2O_5)$	$w(SO_3)$	w(F)	w(MgO)	$w(Fe_2O_3)$	$w(Al_2O_3)$	w(CaO)	w（固）
稀磷酸	24.08	2.67	1.88	0.78	0.27	0.43	0.13	1.13
浓磷酸	46.38	4.74	1.02	1.59	0.60	1.23	0.25	1.68
脱硫脱氟磷酸	25.29	0.58	0.83	0.84	0.32	0.61	0.25	2.32

磷酸和浓磷酸混配为原料，生产w(总养分) 68%的水溶性磷酸一铵主要以脱硫脱氟稀磷酸为原料。生产w(总养分) < 62%的水溶性磷酸一铵须控制$w(SO_3)$在5%以上，在配酸过程中因硫酸添加量大酸槽易腐蚀，存在较大风险，因此未选择该规格产品。

2　粉状磷酸一铵生产工艺流程

公司料浆法粉状磷酸一铵装置于2016年4月投产，原始设计以生产w(总养分) 60%的常规型磷酸一铵为主。后期又分别实施了新增压滤装置技术改造、喷粉塔分布板及塔内衬优化升级、浓缩系统Ⅰ效和Ⅱ效加热器整体更换、高压泵流量稳定控制技术改造、与工业级磷酸一铵联动生产改造、干燥热风由燃煤加热改蒸汽加热等改造项目。目前能够稳定生产w(总养分) 为55%～60%的常规型磷酸一铵和w(总养分) 为64%～66%的水溶性磷酸一铵，现对不同规格产品生产工艺流程简要介绍如下。

2.1　11-44-0常规型磷酸一铵

11-44-0常规型磷酸一铵生产流程（见图1）为：经计量的硫酸铵溶液与磷酸一铵滤饼在再生槽进行充分混合，与经计量的稀磷酸和渣酸共同进入配酸槽，混合均匀后送至氨化反应器与液氨快速反应，得到的料浆由过料管线送至Ⅱ效加热器，经二次蒸汽加热后进入Ⅰ效加热器，再经一次蒸汽加热后由高压泵送至喷粉塔顶部进行喷粉，逆流干燥后由底部流化床进入成品降温和输送装置至成品仓。

国内部分磷化工企业以低品位胶磷矿为原料生产$w(P_2O_5)$19%～22%的稀磷酸，采用中和料浆浓缩法即可得到w(总养分) 55%的粉状磷酸一铵[8]。随着湿法磷酸制备工业级磷酸一铵技术的普及，料浆法粉状磷酸一铵装置常用来接收工业级磷酸一铵的渣浆、滤渣，配合使用高浓度磷酸或工业级磷酸一铵母液生产w(总养分) 为55%的粉状磷酸一铵[9]。随着低品位粉状磷酸一铵大量使用低端磷矿或工业级磷酸一铵副产物为原料，其市场价格毫无优势。厂家为确保工业级磷酸一铵装置的开车率，连续消化渣浆、滤渣，才联动生产低品位粉状磷酸一铵。

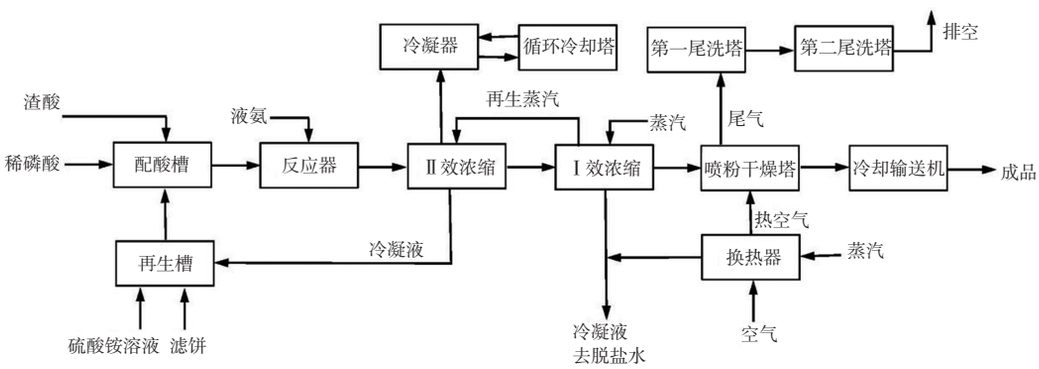

图1　11-44-0常规型磷酸一铵工艺流程

Fig. 1　Process flow of conventional 11-44-0 MAP

2.2　11-47-0常规型磷酸一铵

11-47-0常规型磷酸一铵生产流程为原始设计流程，来自磷酸装置的稀磷酸和渣酸在配酸槽按一定比例混合，后续流程与11-44-0常规型磷酸一铵生产流程相同。渣酸主要有4个来源：一是来自稀磷酸储槽底於，二是来自磷酸浓缩过程排於，三是来自浓磷酸储槽底於，四是脱硫脱氟磷酸储槽底於。不同来源渣酸因其组成不同在与稀磷酸混合时添加比例不同，另外同种来源的渣酸因排於操作不统一，造成渣酸密度不同，与稀磷酸按既定比例混合时，总养分波动区间较大。表3为不同来源渣酸的分析结果。

表3　不同来源渣酸分析结果

Table 3　Analysis results of different sources residue acid

渣酸来源	密度/(kg·m^{-3})	$w(P_2O_5)$/%
稀磷酸储槽底於	1 432	16.35
磷酸浓缩过程排於	1 582	32.52
浓磷酸储槽底於	1 623	36.23
脱硫脱氟磷酸储槽底於	1 326	19.36

2.3　11-49-0常规型磷酸一铵

11-49-0常规型磷酸一铵生产占所有粉状磷酸一铵的比例为60%，为公司磷酸一铵主打产品。其生产流程也为原始设计，即稀磷酸直接氨化，经浓缩、喷雾干燥后制得。近年来，磷矿石价格

持续高位运行，公司自有磷矿由露天开采转地下开采正处于建设期，磷矿石来源主要是对外采购。随着外采磷矿石品位逐渐降低，公司通过自磨自选、矿浆脱水、矿粉调浆等措施保障稀磷酸生产矿浆指标满足要求，生产得到稀磷酸$w(P_2O_5)$为24%～25%，可直接用于生产11-49-0常规型磷酸一铵。

2.4　12-52-0水溶性磷酸一铵

12-52-0水溶性磷酸一铵生产流程（见图2）：稀磷酸由配酸槽输送泵送至反应器与液氨快速反应，得到的料浆由过料管线送至熟化槽，再经压滤机压滤后，滤液经滤液槽送入Ⅱ效加热器，经二次蒸汽加热后进入Ⅰ效加热器，再经一次蒸汽加热后由高压泵送至喷粉塔顶部进行喷粉，并经热风逆流干燥后经底部流化床进入成品降温和输送装置至成品仓，压滤得到的滤饼则存入滤饼库进行再利用。

目前，国内生产水溶性磷酸一铵主要有两条技术路线：一是，依托料浆法粉状磷酸一铵装置，进行技术改造，增加压滤系统，采用“氨化—压滤—浓缩—喷雾干燥”生产流程制得；二是，效仿工业级磷酸一铵结晶法工艺，采用“氨化—压滤—浓缩—结晶—离心干燥”生产流程制得。前者主要产品为w（总养分）64%的水溶性磷酸一铵，具有投资小、易改造、生产消耗低等优点。后者主要产品为w（总养分）72%的水溶性磷酸一铵。在两条路线中，压滤均是保障生产负荷和产品质量的关键工序之一。压滤采用板式压滤机居多，可根据料浆性质选择前处理方式和压榨程度。在料浆沉降较慢的情况下，可在压滤前增设多级沉降槽，直接对上层液进行压滤，沉降的渣浆和滤布截留的滤渣可用于生产低养分磷酸一铵。也有企业采用多级压滤的方式，确保料浆中不溶性杂质脱除。公司因料浆沉降速度较快，故未使用沉降装置，而改用熟化槽，料浆经一定时间停留后进行压滤，在压滤机料浆管线压力达到最大值，且无流量时，停止供料，并进行压榨，整个过程无渣浆和滤渣产生，但有滤饼产生，滤饼水含量和水溶性P_2O_5含量均远低于渣浆和滤渣。

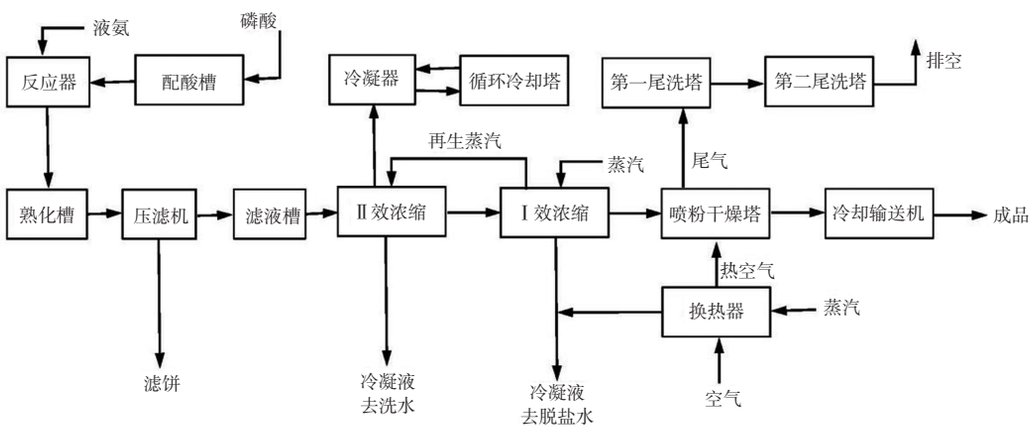

图2　12–52–0和12–54–0水溶性磷酸一铵工艺流程

Fig. 2　Process flow of 12–52–0 and 12–54–0 water-soluble MAP

2.5　12-54-0水溶性磷酸一铵

采用料浆法粉状磷酸一铵装置生产12-54-0水溶性磷酸一铵工艺流程如图2所示，与12-52-0水溶性磷酸一铵不同之处在于磷酸浓度的不同，12-54-0水溶性磷酸一铵需使用$w(P_2O_5)$为46%～47%的浓磷酸。为提高水溶性磷酸一铵总养分，公司曾采用低透气量参数（20～25 L/(m²·s)）的滤布，但效果不佳，易导致滤饼带液量增大和滤液供应不畅等危害。

2.6　12-56-0水溶性磷酸一铵

公司工业级磷酸一铵装置投运后，为确保产品品质，母液外送比例按50%上限进行控制，外送部分全部用以生产12-56-0水溶性磷酸一铵，实现了工业级磷酸一铵与水溶性磷酸一铵联动生产。其中，水溶性磷酸一铵料浆来自工业磷酸一铵氨化反应器，主要采用脱硫脱氟磷酸与液氨反应制得。料浆经熟化后再经压滤装置压滤，滤液与工业级磷酸一铵母液混合进入浓缩系统，后续工序与12-52-0水溶性磷酸一铵相同。

3　粉状磷酸一铵生产控制

常规型磷酸一铵和水溶性磷酸一铵在生产负荷控制、过程指标控制、产品质量控制、废水排放控制、粉尘排放控制方面存在一定差异，下面将从这5个方面对控制实践进行总结。

3.1　生产负荷控制

公司粉状磷酸一铵装置原设计生产能力为10万t/a，通过借鉴其他企业做法，增加浓缩加热器换热面积，并提升Ⅱ效浓缩真空度[10-11]，生产常规型磷酸一铵能够超出设计产能。但生产水溶性磷酸一铵受制于压滤和产品水含量控制影响，实际生产能力为5万t/a。因高压泵电机配有变频控制，可实现一定流量范围内的加减调节，从而实现生产负荷的控制。该泵在一定变频范围内，泵运行工况稳定，但低于或高于该工况会出现电流异常波动，柱塞故障等问题。在生产常规型磷酸一铵时，高压泵流量在16 m^3/h左右，频率控制在32 Hz左右，高压泵电流在120 A。而在生产水溶性磷酸一铵时，高压泵流量要求在7.5 m^3/h左右，频率控制在20 Hz左右，电流常常超过160 A。针对此问题，对高压泵增设稳流器，最终实现在低流量状态下稳定运行，电机电流恢复至120 A。

3.2　过程指标控制

3.2.1　中和度

中和度指标不仅反映成品组分情况，还对料浆黏度大小、沉降速率、干燥速率等性质有直接影响。料浆黏度随中和度变化规律早有研究，在不同中和度范围呈现不同规律，而料浆黏度与雾化后液滴粒径、雾化区域面积均构成函数关系，进而间接影响雾化效果，控制不好会造成喷粉塔塔壁挂料、塔底流化床积料等异常工况发生。在不同中和度下，料浆中固含量和悬浮物颗粒大小有所不同，其沉降快慢有着明显区别，进而会对压滤造成影响，料浆沉降速率慢容易发生滤饼带液量急剧升高、除滤饼劳动强度增大、滤液跑浑、滤液量偏少等异常现象。料浆组分变化导致其水分结合力、内部传质阻力发生变化，进而影响雾化后的料浆在喷粉塔内干燥速率，造成成品水含量偏高，加大成品结块风险。在生产实践中，中和度需根据磷酸组分，开展氨化实验，比较不同中和度下料浆黏度、沉降速率、干燥速率，确定最佳中和度指标值。

对于生产常规型磷酸一铵，总养分含量越高，中和度指标越需精准控制，如表4所示，生产w(总养分）为55%的粉状磷酸一铵时中和度指标可放宽至0.95～1.05，而生产w(总养分）为60%的粉状磷酸一铵时中和度指标要求在0.98～1.02。对于生产水溶性磷酸一铵，中和度统一按照1.00～1.02控制。因大部分金属盐类杂质进入滤饼中脱除，其pH在5～6，压滤过后滤液的pH会较氨化料浆的pH有所下降。

表4　各规格粉状磷酸一铵产品中和度控制和成品pH

Table 4　Neutralization degree control and finished pH of various specifications of powdered MAP

产品	氨化料浆中和度	成品pH
11-44-0常规型磷酸一铵	0.95～1.05	4.00～4.50
11-47-0常规型磷酸一铵	0.97～1.03	4.00～4.50
11-49-0常规型磷酸一铵	0.98～1.02	4.00～4.50
12-52-0水溶性磷酸一铵	1.00～1.02	3.80～4.20
12-54-0水溶性磷酸一铵	1.00～1.02	3.80～4.20
12-56-0水溶性磷酸一铵	1.00～1.02	3.80～4.20

3.2.2　熟化料浆密度

在生产水溶性磷酸一铵时，熟化料浆密度控制不当会造成蒸汽消耗增长或滤饼水溶性P_2O_5增高。如图3所示，滤液密度随熟化料浆密度增大而增大，进入浓缩系统携带的水量随料浆密度的增大而减小，更利于浓缩。又如图4所示，滤饼水含量也随熟化料浆密度增大而增大，滤饼水含量越大则水溶性P_2O_5损耗越大，产品原料消耗成本上升。在实际生产过程中，熟化料浆密度控制在1 230～1 240 kg/m^3范围，可兼顾蒸汽消耗和水溶性P_2O_5损耗，使生产最为经济。

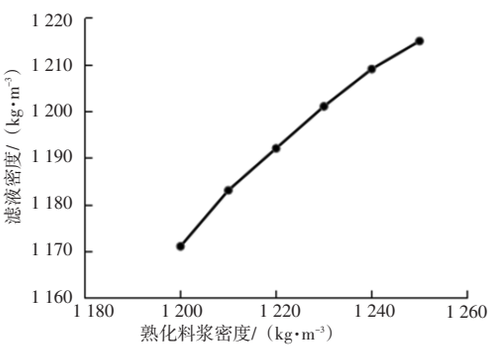

图3　滤液密度与熟化料浆密度关系

Fig. 3　Correlation of filtrate density and ripened slurry density

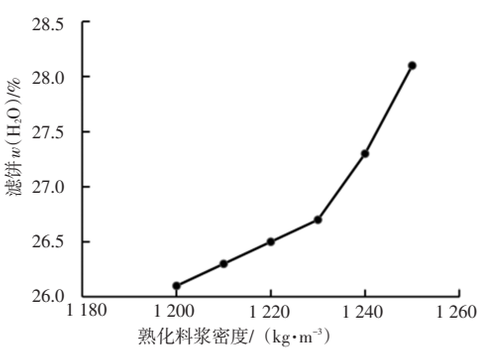

图4　滤饼水含量与熟化料浆密度关系

Fig. 4　Correlation of filter cake moisture content and ripened slurry density

3.2.3 Ⅰ效浓缩料浆密度

Ⅰ效浓缩料浆水含量随其密度增大而减小，在喷粉塔干燥能力一定的情况下，Ⅰ效浓缩料浆 $w(H_2O)$ 一般要求控制在25%以内。使用对应规格产品在某一温度条件下测得添加不同水量溶解的密度值，作图拟合得到线性关系式，再利用该关系式模拟计算某一水含量条件下对应的密度值，用来作为Ⅰ效浓缩料浆密度控制的参考值。Ⅰ效浓缩料浆密度过高对高压泵运行存在较大的危害，料浆会在高压泵内部析晶，造成憋压、磨损、堵塞等，导致密封圈泄漏、柱塞连杆断裂、泵体及进出料管线堵塞。

如表5所示，无论是常规型磷酸一铵还是水溶性磷酸一铵，Ⅰ效浓缩料浆密度均随总养分增大而下降。

表5 粉状磷酸一铵Ⅰ效浓缩料浆密度

Table 5 I-effect concentration slurry density of powdered MAP

产品	Ⅰ效浓缩料浆密度平均值/(kg·m^{-3})
11-44-0常规型磷酸一铵	1 573
11-47-0常规型磷酸一铵	1 558
11-49-0常规型磷酸一铵	1 543
12–52–0水溶性磷酸一铵	1 462
12–54–0水溶性磷酸一铵	1 455
12–56–0水溶性磷酸一铵	1 447

3.3 产品质量控制

3.3.1 产品白度

常规型磷酸一铵会添加渣酸来调节养分，渣酸使用量过多会使成品白度下降，影响下游复合肥企业产品颜色。除了渣酸外，产品白度还受磷矿中有机物含量和铁离子含量影响。对有机物含量较高的磷矿，通过在磷酸反应槽内适当添加专用吸附剂能够有效降低成品稀磷酸中的有机杂质含量，提升磷酸一铵产品白度。在使用铁含量较高的磷矿时，常规型磷酸一铵产品颜色呈现淡黄色。水溶性磷酸一铵在上游原料渣含量大、有机物未脱除、铁离子含量高时，通过压滤后，有色杂质进入滤饼中，成品颜色不受影响。

3.3.2 产品浊度

常规型磷酸一铵产品浊度暂无相关指标要求，而水溶性磷酸一铵浊度常常用来作为评价产品水溶性好坏的指标。对于水溶性磷酸一铵而言，其水不溶物质量分数检测值均在0.2%以内，但按照1∶20质量比溶于水后，有的呈现浑浊状，有的则呈现清液状。压滤是影响产品浊度的关键工序，在压滤过程中常常容易出现滤布破损、滤板裂开等现象，造成浑浊的料浆进入滤液中，影响产品浊度。针对此种情况，需及时更换滤布或滤板，保证滤液清亮。在生产总养分为68%水溶性磷酸一铵时，因将工业级磷酸一铵母液直接加入水溶性磷酸一铵滤液槽，母液中富集的杂质会对水溶性磷酸一铵浊度产生影响。

3.3.3 产品结块

有研究表明，磷酸一铵结块受成品水含量、成品包装温度、成品杂质含量、成品码垛层数、成品颗粒粒径等多种因素影响[12-14]。在生产实践中，成品水含量和包装温度对磷酸一铵结块影响最为显著，且二者影响具有叠加效应。将产品结块情况分为不结块、假性结块、严重板结，通过记录成品水含量和包装温度，并跟踪成品6个月内结块情况，对记录数据进行处理后可得到磷酸一铵结块水分–温度分布图，如图5所示，该图可用于预判新生产的成品结块情况。通过对热风系统进行技改、增设成品降温设施等措施，能够有效降低成品水含量和包装温度，使成品参数处于防结区，进而降低产品结块风险。

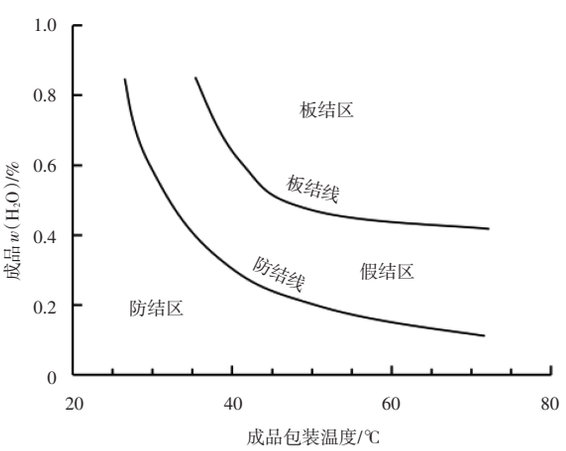

图5 磷酸一铵水含量与包装温度对其结块的影响

Fig. 5 Influence of water content and packing temperature of MAP on its caking

3.3.4 产品养分

在实际生产中，可根据配酸槽中混酸分析结果来计算磷酸一铵养分。在总养分偏高时，针对常规型磷酸一铵，一般向配酸槽少量多次添加渣酸、硫酸铵溶液降低成品养分；针对水溶性磷酸一铵，一般在滤液槽添加硫酸铵溶液降低成品总养分。在总养分偏低时，常规型磷酸一铵常向配酸槽添加浓磷酸来提升成品总养分，水溶性磷酸一铵则直接使用

工业级磷酸一铵滤液来提升成品养分。

3.4 废水排放控制

生产过程中除设备冷却水可实现循环使用，尾洗塔置换的洗涤液可回收至系统，需外排的水主要是Ⅰ效和Ⅱ效浓缩冷凝液。其中，Ⅰ效浓缩冷凝液是由低压蒸汽冷凝而来，杂质含量低，可用于锅炉补水。而Ⅱ效浓缩冷凝液含较高的氨氮，回收利用受限。如表6所示，Ⅱ效浓缩冷凝液氨氮随氨化料浆中和度升高而增大。在生产水溶性磷酸一铵和w（总养分）55%的常规型磷酸一铵时，Ⅱ效冷凝液刚好能够满足冷却塔、洗涤塔、反应器、熟化槽、再浆槽等设备补水；而在生产w（总养分）58%和60%的常规型磷酸一铵时，Ⅱ效浓缩冷凝液除供应冷却塔、洗涤塔、反应器、熟化槽等设备补水外，仍需外排2～3 m^3/h，外排部分一般作为洗水供硫酸或磷酸装置使用。

表6　不同中和度下的Ⅱ效浓缩冷凝液氨氮含量

Table 6　Ammonia nitrogen content of Ⅱ-effect concentration condensate under varying neutralization degrees

中和度	ρ(N-NH_3)/(mg·L^{-1})	中和度	ρ(N-NH_3)/(mg·L^{-1})
0.95	68.23	1.03	144.32
0.97	74.22	1.05	193.23
0.99	86.33	1.07	263.59
1.01	101.71		

3.5 尾气粉尘排放控制

受环保政策影响，在常规天气下，装置尾气颗粒物质量浓度要求在120 mg/m^3以内。正常工况下，常规型磷酸一铵尾气粉尘质量浓度在30～60 mg/m^3，水溶性磷酸一铵尾气粉尘质量浓度在20～40 mg/m^3。早期，有企业通过改用文丘里洗涤器、增设除沫器等措施有效降低了尾气排放指标，颗粒物质量浓度控制在40 mg/m^3以内[15]。在生产过程中，可调整喷粉塔风量，加强尾洗塔洗涤液置换，降低尾气颗粒物浓度，但降低幅度有限。

4 结论与展望

公司依托原有10万t/a料浆法粉状磷酸一铵装置，通过技改可实现10万t/a常规型磷酸一铵或5万t/a水溶性磷酸一铵产品柔性切换生产，装置年开车率达90%以上。常规型磷酸一铵中和度控制在0.95～1.05，Ⅰ效浓缩料浆密度控制在1 540～1 575 kg/m^3，可实现连续稳定生产；水溶性磷酸一铵中和度控制在1.00～1.02，Ⅰ效浓缩料浆密度控制在1 445～1 465 kg/m^3，可实现连续稳定生产。出塔成品水含量和温度控制在防结线以内，产品可实现6月内不结块。

后期生产过程中，公司还将针对因装置容量小带来的指标控制稳定性不足问题，搭建料浆pH、料浆密度、成品水含量在线监测及控制系统，实现自动调控、异常预警，降低人工干预，提升装置稳定性。采用“湿法磷酸—氨化—浓缩—喷雾干燥”工艺生产粉状磷酸一铵的企业可结合稀磷酸质量情况，依托原有装置增设压滤设备，进行多规格磷酸一铵灵活切换生产，从而丰富产品种类，提高产品附加值，实现副产物资源化利用，提升装置开车率，进而助力企业产品升级和可持续发展。

［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 Xiuxing.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］ 王志强.我国磷铵工业的发展概况[J].南化科技,1994,15(4):55-56.

［3］ 王敬东,潘刚,刘东伟,等.料浆法粉状磷酸一铵装置喷粉塔分布板优化[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(9):37-42.
Wang Jingdong, Pan Gang, Liu Dongwei, et al. Optimization of distribution plate in spray tower of slurry-based powdered monoammonium phosphate plant [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2025,40(9):37-42.

［4］ 段付岗.影响磷酸一铵产品总养分的因素及对策[J].硫磷设计与粉体工程,2011(5):29-32.

［5］ 王兴,王权顶,张洪绪,等.粉状磷酸一铵生产过程中养分控制方法[J].磷肥与复肥,2017,32(2):18-20.
Wang Xing, Wang Quanding, Zhang Hongxu, et al. Control method of nutrient in powdery monoammonium phosphate production[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(2): 18-20.

［6］ 周晶晶,苏小林,徐志强,等.水溶性磷酸一铵制备工艺研究[J].磷肥与复肥,2022,37(11):14-16.
Zhou Jingjing, Su Xiaolin, Xu Zhiqiang, et al.Study on preparation of water-soluble monoammonium phosphate [J].Phosphate & Compound Fertilizer,2022,37(11):14-16.

［7］ 薛河南,舒仕涛.浓磷酸生产水溶性磷酸一铵技术研究及应用[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(5):41-46.
Xue Henan, Shu Shitao.Research and application of technology for producing water-soluble monoammonium phosphate from concentrated phosphoric acid [J].Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2025,40(5):41-46.

［8］ 李飞阔,张才华,田文航,等.粉状磷酸一铵装置氨化及浓缩工艺的选择[J].硫磷设计与粉体工程,2020(6):31-34.

［9］ 舒艺周,马航,张恒,等.工业磷酸一铵滤渣综合利用技术研究现状与建议[J].磷肥与复肥,2023,38(11):34-37.
Shu Yizhou, Ma Hang, Zhang Heng, et al. Research status and

suggestions for comprehensive utilization technology of industrial MAP filter residue[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2023,38(11):34-37.
[10] 何茂方,柯俊.粉状磷酸一铵扩产技术改造[J].磷肥与复肥,2012,27(1):35,47.
[11] 魏煜,张明明.提高粉状磷酸一铵装置生产负荷的技改措施[J].磷肥与复肥,2013,28(4):43-44.
Wei Yu, Zhang Mingming. Technical modification measures for improvement of powder MAP plant load [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2013,28(4):43-44.
[12] 资学民,杨先,李艳华.粉状磷酸一铵结块原因及抗结块试验研究[J].磷肥与复肥,2001,16(2):29-31.
Zi Xuemin, Yang Xian, Li Yanhua. Cause for caking of powdery MAP and its anti-caking experiment[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2001,16(2):29-31.
[13] 陈红琼,马航.水溶性磷酸一铵防结块剂的研究与应用[J].无机盐工业,2022,54(2):78-80.
Chen Hongqiong, Ma Hang. Research and application of anti-caking agent for water soluble monoammonium phosphate [J]. Inorganic Chemicals Industry,2022,54(2):78-80.
[14] 窦德军,杜方圆,胡伟华,等.水溶性磷酸一铵结块的影响因素和控制措施[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(6):54-59,67.
Dou Dejun, Du Fangyuan, Hu Weihua, et al. Influencing factors and control measures of the caking of water-soluble MAP[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(6):54-59,67.
[15] 胡正荣.料浆法粉状磷酸一铵装置干燥尾气处理系统的改进[J].磷肥与复肥,2011,26(4):31-33.
Hu Zhengrong. Transformation of dry tail gas treatment system of powder MAP plant by slurry concentrated process[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2011,26(4):31-33.

（上接第15页）

指标确定：≤5 000 Da为阈值，确保90%以上组分处于植物高效吸收区间（500～2 000 Da）。

3.4 工业化生产验证

青岛海大生物集团股份有限公司试产数据如表3所示。由表3可知，生物酶解法成品分子量1 520 Da，w(有机质）42.3%，证明工艺参数可大规模复制，同时3批次w(水不溶物）均＜0.5%，说明固液分离标准可有效落地。

表3 青岛海大生物集团股份有限公司按本标准参数试生产结果

Table 3 Results of trial production of Qingdao Haida Biotechnology Group Co., Ltd. according to the parameters of this standard

生产工艺	分子量/Da	w(有机质)/%	w(水不溶物)/%
生物酶解法	1 520±85	42.3±1.2	0.32±0.05
酸水解法	1 780±95	35.1±1.5	0.41±0.07
碱水解法	1 830±100	33.8±1.3	0.38±0.06

4 结语

T/CPFIA 0018—2025《肥料用海藻提取物生产技术规范》的发布实施，填补了行业生产技术标准空白，构建了“原料-工艺-质量-环保”全链条技术体系。标准既立足行业现状，具有较强的实用性与可操作性；又兼顾技术先进性，引入分子量控制、绿色工艺等创新指标，为行业高质量发展提供了有力支撑。该标准与《肥料用海藻提取物产品》团体标准相辅相成，形成了覆盖生产与产品的完整标准体系，为肥料用助剂行业标准建设提供了示范。

此外，在标准制定过程中，针对《肥料用海藻提取物产品》标准中糖醛酸测定方法的争议，经专题研讨达成了科学解决方案。这一实践也体现了本标准制定过程中对技术争议的严谨处理态度。

中国磷复肥工业协会肥料助剂专业委员会将以此为契机，在后续工作中强化肥料用海藻提取物团体标准的宣传推广，开展企业技术培训并进行案例示范，推动全行业主动对标达标。同时，继续推动更多高质量助剂团标的编制、推广与应用，通过标准引领、技术创新以及跨领域协作，推动肥料用助剂产业实现规模化、规范化、绿色化发展，为农业现代化与生态文明建设贡献力量。

[参考文献]

[1] 宋海妹,李振松,张超一,等.不同生物刺激素在叶菜类蔬菜上的应用效果[J].精细与专用化学品,2025,33(2):22-25.
Song Haimei, Li Zhensong, Zhang Chaoyi, et al. Application effect of different biostimulants on leafy vegetables [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2025,33(2):22-25.
[2] 张靖,张超一,宋海妹.海藻提取物作为拌种增效剂对小麦种子生长发育的影响[J].肥料与健康,2023,50(2):44-47.
Zhang Jing, Zhang Chaoyi, Song Haimei.Effects of Seaweed Extract as Seed Dressing Synergist on the Growth and Development of Wheat Seeds[J].Fertilizer & Health,2023,50(2):44-47.
[3] 李秀珍,宋海妹,单俊伟,等.浒苔海藻肥在白菜上的增产效果研究[J].现代农业科技,2011(20):292,295.
Li Xiuzhen, Song Haimei, Shan Junwei, et al. Study on Yield-increasing Effect of Enteromorpha prolifera Seaweed Fertilizer on Cabbage [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2011(20):292,295.