

◆磷及关联产业工艺创新◆

利用中品位磷矿生产磷酸基脲硫酸复合肥技术研究

杜建波, 李贵聪, 薛河南, 周凌翔, 徐振玲, 周 山, 龙文恒, 何 勇, 张楷祥, 张和麒

(云南云天化股份有限公司, 云南 昆明 650228)

[摘 要] 针对传统的氮磷二元肥和单一磷肥产品同质化严重、以高品位磷矿为原料、过程中产生大量磷石膏等问题, 对云南某公司400 kt/a重过磷酸钙装置进行技术改造, 生产磷酸基脲硫酸复合肥。以公司现有磷酸渣酸、液氨、磷矿浆, 外购尿素、硫酸钾等为原料, 采用磷矿浆法脲硫酸料浆制备工艺路线, 验证了生产磷酸基脲硫酸复合肥的技术可行性; 并对生产过程中存在的问题、过程控制指标波动影响进行系统分析。试生产当期成本为2 116元/t, 利润约600元/t; 产品含硫、硅、钙等多种中微量元素, 养分平衡性较好, 产品性能优势突出; 按每吨产品消耗 P_2O_5 32.71 kg计, 则每吨产品可以减排干基磷石膏约173.07 kg。

[关键词] 磷酸基脲硫酸复合肥; 中品位磷矿; 生产技术

[中图分类号] TQ444 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 11-0033-07

Study on production technology of phosphoric acid based urea sulfate compound fertilizer using middle grade phosphate ore

DU Jianbo, LI Guicong, XUE Henan, ZHOU Lingxiang, XU Zhenling, ZHOU Shan,
LONG Wenheng, HE Yong, ZHANG Kaixiang, ZHANG Heqi

(Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China)

Abstract: In response to the problems such as serious homogenization of traditional nitrogen phosphorus binary fertilizers and single phosphate fertilizer products, as well as the use of high grade phosphate ore as raw material, a large amount of phosphogypsum generated during the process, technically transformation of a 400 kt/a triple superphosphate plant in a Yunnan company is carried out to produce phosphoric acid based urea sulfate compound fertilizer. The feasibility of producing phosphoric acid based urea sulfuric acid compound fertilizer is verified by using the existing phosphoric acid slag acid, liquid ammonia, phosphate slurry, purchased urea, potassium sulfate and other raw materials as production materials, and adopting the process route of preparing urea sulfuric acid slurry by phosphate slurry method; And a systematic analysis is conducted on the problems that exist in the production process and the impact of fluctuations in process control indicators. The current cost of trial production is 2 116 RMB Yuan for per ton product, and the per ton profit is about 600 RMB Yuan; The product contains various medium and trace elements such as sulfur, silicon and calcium, with good nutrient balance and outstanding performance advantages; Based on a consumption of 32.71 kg P_2O_5 for per ton of product, approximately 173.07 kg of dry phosphogypsum can be reduced in emissions per ton of product.

Key words: phosphoric acid based urea sulfate compound fertilizer; middle grade phosphate ore; production technology

0 引言

当前, 传统的氮磷二元肥和单一磷肥^[1]产品无独有特征, 无价格优势, 缺乏市场竞争力, 并且必须以高品位磷矿为原料, 经过磷酸生产的中间环节, 过程中又产生大量磷石膏, 磷石膏带走部分养分磷, 降低了磷资源的利用效率, 同时磷石膏堆存对环境造成较大的负面影响。基于以上原因, 亟须

耦合一种适合我国磷铵、重过磷酸钙生产装置经局

[收稿日期] 2025-06-17

[作者简介] 杜建波(1983-), 男, 云南姚安人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事新材料、磷复肥及新产品技术开发。

[通信作者] 李贵聪(1982-), 男, 云南巧家人, 高级工程师, 工程硕士, 主要从事湿法磷酸、磷复肥工程技术开发与应用。

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2022YFD1901503)

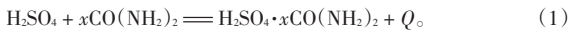
部改造可以生产新型磷酸基脲硫酸复合肥^[2]的生产工艺。采用脲硫酸(尿素硫酸溶液)分解中品位磷矿,结合氨酸工艺^[1],一步法连续生产复合(混)肥料,生产过程中不排磷石膏,以中品位磷矿为原料不经选矿直接生产含氮、磷、钾、钙、镁、硫、硅、铁等多种营养元素的功能性复合肥料,可从根本上解决目前传统酸解磷矿工艺存在的磷石膏堆积污染和再利用问题^[3];节约资源,保护环境,对磷铵、重过磷酸钙装置产品的转型升级具有较好推动作用。

1 磷酸基脲硫酸复合肥生产原理

1.1 脲硫酸溶液制备原理

脲硫酸溶液^[4]是由尿素、硫酸和水形成的复合物,溶液的性能主要取决于尿素在溶液中的比例,根据工艺和产品要求可以对脲硫酸溶液的组成进行调整。

尿素和硫酸化学反应方程式如下:



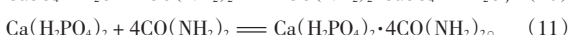
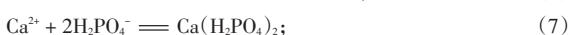
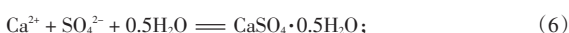
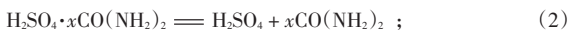
式(1)中 x 为1、2、4,即脲硫酸溶液中存在的加合物为 $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 和 $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 4\text{CO}(\text{NH}_2)_2$,与硫酸的水合物类似,可以认为尿素分子置换了硫酸水合物中的水分子。

尿素与硫酸反应过程中会放出大量反应热,如果反应体系的温度超过某一定值,系统会在很短时间内急剧反应,生成大量氨基磺酸硫酸铵^[5]白色泡沫状固体物。所以在脲硫酸溶液的制备过程中,需要控制尿素的加料速率使反应体系的温度小于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

脲硫酸溶液中水的存在可以降低溶液的结晶温度使溶液更加稳定;脲硫酸溶液的黏度^[5]受溶液中水的比例影响很大,随着溶液中水的比例增加,溶液的黏度逐渐减小。

1.2 脲硫酸溶液酸解磷矿浆的生产原理

脲硫酸溶液酸解磷矿浆反应如下:



脲硫酸分解磷矿所经历的主要反应及工序为: $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot x\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 的解离, H^+ 和磷矿粉的反应,

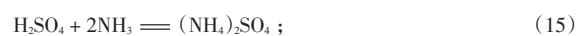
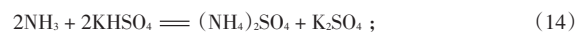
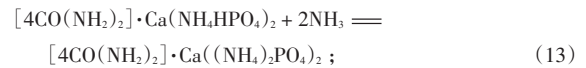
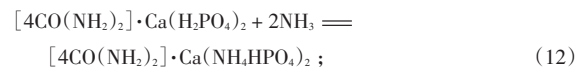
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 晶体的生成, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 转变为 $\text{CaSO}_4 \cdot 4\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 晶体。

首先,脲硫酸由液相主体扩散转移入液固界面,并解离成硫酸与尿素;然后硫酸与 $\text{Ca}_3\text{F}(\text{PO}_4)_3$ 反应生成磷酸与 $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$,磷酸与 $\text{Ca}_3\text{F}(\text{PO}_4)_3$ 溶于液相的 Ca^{2+} 反应生成磷酸钙盐; $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 在反应微区中析出结晶,半水物结晶处于介稳状态而转变成较稳定的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;过程中尿素的复合溶液取代 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 中的 H_2O 生成脲硫酸钙复盐^[6]。

硫酸钙、磷酸二氢钙与尿素反应生成脲硫酸钙、脲磷酸二氢钙复盐^[6]。

1.3 氨酸中和反应原理

脲硫酸酸解液经喷浆转鼓造粒与通入的氨酸发生中和反应。反应式如下:



2 400 kt/a料浆法重过磷酸钙装置技术改造

2.1 原有装置工艺流程简述

磷矿石经干燥、磨碎、计量后进入1#反应器,与浓磷酸进行反应,1#反应器的料浆依次溢流至2#、3#、4#、5#反应器后通过料浆泵打至造粒机(原装置造粒洗涤系统已改造可以生产磷铵产品),在造粒机内料浆喷洒到返料粒子上造粒,湿粒子从造粒机进入干燥机,与沸腾炉来的热空气顺流接触进行干燥。干燥后物料进入筛分系统筛分,大颗粒物料送至破碎机破碎后进入返料系统,小颗粒物料直接进入返料系统。合格物料进入成品筛再次进行筛分,筛下小颗粒物料直接进入返料系统,合格产品进入包裹筒用外包装剂进行包裹后送到散存库堆放。原工艺流程见图1。

装置洗涤工艺流程见图2。

来自反应器和造粒机的气体经过洗涤后排放。来自干燥机的含尘气体经干燥机旋风分离器除尘后再进行洗涤后排放。所有物料转接点的含尘气体经除尘旋风分离器除尘后再进行洗涤后排放。每台洗涤器出来的清洁空气都经过共用的烟囱排入大气,各收尘点收集的粉尘进入返料系统,洗涤液进入反应器回用。

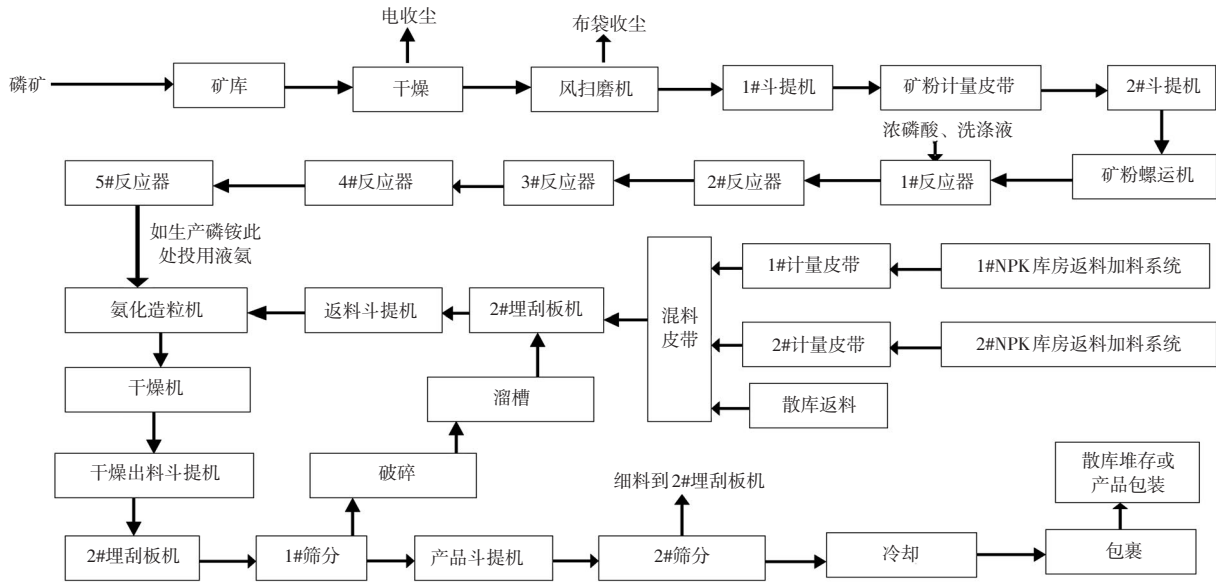


图1 原工艺流程

Fig. 1 Original process flow

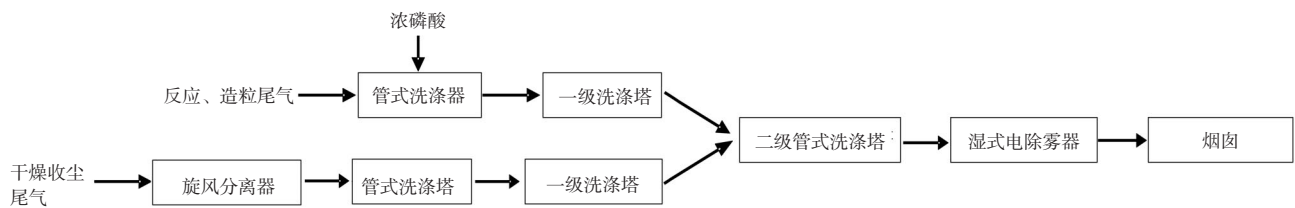


图2 装置洗涤工艺流程

Fig. 2 Washing process flow of the device

2.2 技术改造

原有装置流程生产矿粉，流程长、生产成本低。针对公司已有的矿浆和400 kt/a重过磷酸钙装置现场固体尿素添加到反应器较为困难的实际，在调查分析目前脲硫酸生产工艺技术的基础上，结合400 kt/a重过磷酸钙装置工艺设备状况和公司外界能提供的生产条件，用硫酸与尿素反应制备脲硫酸，用制得的脲硫酸与磷矿浆反应生成料浆，脲硫酸料浆喷入转鼓造粒机，磷酸淤酸与液氨经管式反应器反应后喷入转鼓造粒机^[7]，再经氨化造粒，同时向干线系统加入氯化钾（或硫酸钾），再经筛分、破碎、包裹等工序生产磷酸基脲硫酸复合肥^[8]。装置局部改造后的工艺流程见图3。

1) 配置磷矿浆管线

100 kt/a湿法磷酸装置磷矿浆管线配接引管至400 kt/a重过磷酸钙装置2#反应器、3#反应器顶部，管道DN60；2#反应器顶部配置气动调节阀、电磁流量计；同时检查修复1#至5#反应器罐体内部衬砖及防腐。

2) 配置硫酸管线

完成400 kt/a重过磷酸钙装置硫酸储槽至1#反应器、2#反应器顶部DN50碳钢管道的配置；重新购置硫酸变频泵及电磁流量计调节系统并完成配管安装。

3) 改造加料仓

1#矿粉斗提机底部临时加料仓；靠地面用格栅及盖板覆盖，计量及控制系统沿用原有矿粉计量设施并完成调试。

4) 修复调试加料系统

对NPK库房1#、2#返料加料系统及计量皮带进行修复，并对计量系统校核调试，满足加料使用状态。

5) 氨化造粒机内部改造

因400 kt/a重过磷酸钙装置2012年已完成生产DAP和MAP的技术改造，只需恢复原重过磷酸钙装置造粒机内部的料浆管线及料浆喷头；5#反应器至造粒机的喷浆管线联通使用提供脲硫酸料浆；罐区磷酸中间槽至管反管线在2#反应器顶至造粒机

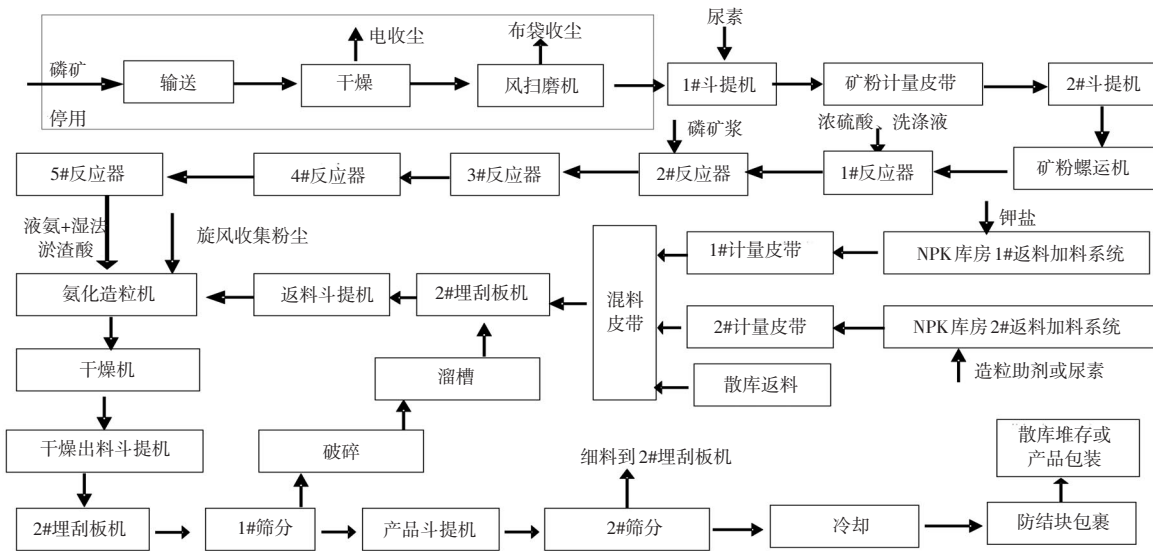


图3 装置局部改造后的工艺流程^[11]

Fig. 3 The process flow of the device after local modification

管反供酸管线进行短接，同时罐区至4#反应器磷酸管线仍然保留使用，其余液氨管线及二次氨化管线沿用原有设施即可满足磷基脲硫酸复合肥的生产。改造后造粒机示意图4。

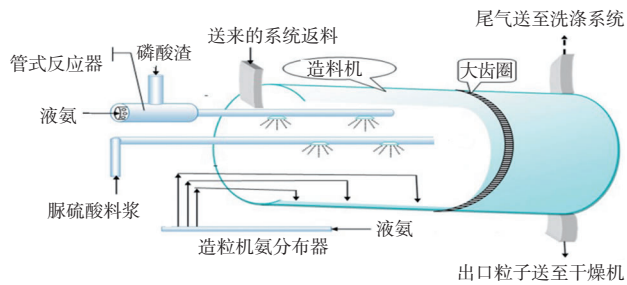


图4 改造后的造粒机示意

Fig. 4 A diagram of the reformed pelletizing machine

6) 自控模块组态优化改造

矿粉投加系统改为尿素投加系统；硫酸进料控制模块与尿素控制模块组态控制；新增矿浆进料控制模块及自控功能；新增钾盐计量调节控制和造粒助剂及干线尿素自动调节控制且实现DCS自动控制，保留原有造粒氨控制及氨化控制模块且实现自动串级控制功能。新增模块及部分改造实施后均实现DCS自动控制，且新增尿素与硫酸系统配置脲

硫酸溶液超温^[6]强制停止进料连锁。

3 磷酸基脲硫酸复合肥的生产控制

3.1 产品质量要求

根据市场订单要求生产15-15-15-S复合肥产品2000t。公司400kt/a重过磷酸钙装置经技术改造后生产表1规格的产品。

表1 产品指标

Table 1 Product indicator					%
$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{N})$	$w(\text{总养分})$	$w(\text{H}_2\text{O})$	粒度 1~4mm 占比
≥15.0	≥15.0	≥15.0	≥45	≤3.0	≥90

3.2 生产原料及要求

改产15-15-15-S产品，主要生产原料采用湿法磷酸渣酸、液氨、磷矿浆、尿素、钾盐、55%粉状MAP、98%浓硫酸及制备返料时的过磷酸钙。原料湿法磷酸渣酸及磷矿浆指标分别见表2、表3。

表2 原料湿法磷酸渣酸指标

Table 2 Indexes of wet-process phosphoric acid residue acid		
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$w(\text{固})/\%$
37.00~39.00	1.68~1.71	25.00~27.00

表3 磷矿浆指标

Table 3 Indicators of phosphate slurry

$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{固})/\%$	粒径<0.150mm 占比/%	粒径<0.380mm 占比/%	MER	$m(\text{CaO})/$ $m(\text{P}_2\text{O}_5)$	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
27.9	20.5	39.5	0.85	1.1	1.65	60.7	82.7	99.5	0.129	1.38	1.70

其他原料：浓硫酸， $w(\text{H}_2\text{SO}_4) \geq 98\%$ ；液氨 $w(\text{NH}_3) \geq 99.6\%$ ， $w(\text{H}_2\text{O}) \leq 0.4\%$ ，温度为室温；尿素， $w(\text{N}) \geq 46\%$ ，粒度为0.85~2.80 mm；55% MAP， $w(\text{P}_2\text{O}_5) \geq 46\%$ ， $w(\text{N}) \geq 9\%$ ；硫酸钾， $w(\text{K}_2\text{O}) \geq 50\%$ ， $w(\text{S}) \geq 16.0\%$ 。

3.3 生产工艺过程关键指标控制

脲硫酸分解液的制备：需要严格控制尿素、浓硫酸、水的添加量，严格监控温度。根据实验室及试生产经验： $n(\text{尿素}) : n(\text{硫酸}) : n(\text{水}) = 2.0 : (1.8 \sim 2.1) : (3.5 \sim 3.8)$ ，脲硫酸温度 $\leq 90^\circ\text{C}$ ；相对密度控制在1.375~1.390。

脲硫酸分解磷矿浆控制要点：实验模拟及实际生产中脲硫酸对磷矿浆中磷元素分解率一般为69.5%， $n(\text{硫酸}) : n(\text{磷矿浆})$ （以 P_2O_5 计）为1.00 : (0.65~0.70)，相对密度一般控制在1.49~1.52，酸解温度一般控制在75~85 $^\circ\text{C}$ ，反应时间2 h左右。

造粒机内管式反应器氨酸比（氮磷摩尔比）一般控制在1.4~1.6，管式反应器温度一般控制在120~130 $^\circ\text{C}$ ，反应生成物料介于磷酸一铵和磷酸二铵之间。

造粒机内氨化反应根据洗液中和度和造粒机出料物料浓度进行控制，一般控制在1.75~1.85，生产中根据造粒工况进行动态调控。

3.4 实际生产前返料的制备

以20 t/h左右的恒定速率向造粒系统加入硫酸钾，以11 t/h左右的恒定速率向造粒系统加入55%粉状MAP，以8 t/h左右的恒定速率向造粒系统加入尿素。向造粒系统加料过程中，同时向造粒机物料床层内通入蒸汽进行造粒，当系统返料达到250 t/h时停止制备返料，实际生产中会有一定出入。实际返料制备配比参数见表4。

表4 实际返料制备配比参数

Table 4 Actual return material preparation matching parameters

项目	$m(\text{给料})/\text{t}$	养分质量/t		
		N	P_2O_5	K_2O
硫酸钾	31.5			15.75
磷酸一铵	31.0	2.79	14.26	
尿素	28.0	12.88		
过磷酸钙	12.5		1.50	
合计	103.0	15.67	15.67	15.75

4 磷酸基脲硫酸复合肥的生产实践

根据公司400 kt/a 重过磷酸钙装置改产实际，

公司于2016年7月完成了实际生产，并完成了客户要求2 000 t 15-15-15-S 订单产品的生产，过程中实际生产3 422 t。

4.1 过程指标的控制

脲硫酸制备及脲硫酸料浆制备各项工艺控制参数较为稳定，脲硫酸制备过程中反应温度不宜超过90 $^\circ\text{C}$ ；管式反应器内中和度控制偏向磷酸二铵较为适宜，相对密度范围为1.50~1.62。生产实际过程指标控制见表5。

表5 生产实际过程指标控制

Table 5 Control of actual process indicators of production

类别	控制指标类别	实际生产控制平均值
脲硫酸分解液	$w(\text{尿态氮})/\%$	22.63
	$w(\text{游离酸})/\%$	27.12
	相对密度	1.389
	温度/ $^\circ\text{C}$	88.0
脲硫酸料浆(1#)	$w(\text{尿态氮})/\%$	12.60
	$w(\text{有效磷})/\%$	5.32
	$w(\text{水溶磷})/\%$	4.12
	$w(\text{游离酸})/\%$	2.35
	相对密度	1.52
	温度/ $^\circ\text{C}$	80.0
脲硫酸料浆(2#)	$w(\text{尿态氮})/\%$	13.23
	$w(\text{有效磷})/\%$	5.78
	$w(\text{水溶磷})/\%$	4.57
	$w(\text{游离酸})/\%$	1.85
	相对密度	1.497
洗涤液	温度/ $^\circ\text{C}$	83.0
	相对密度	1.106
造粒机出口物料	中和度	1.470
	中和度	1.87
管式反应器	相对密度	1.60
	中和度	1.50
	温度/ $^\circ\text{C}$	120.0

4.2 产品质量控制、生产实际消耗及吨产品消耗

试生产于7月4日—7月6日进行脲硫酸料浆制备；6日开始喷浆造粒，但因脲硫酸制备反应器暴沸^[8]、造粒成粒效果较差、成品不能通过全流程放出等原因进行工艺调整；7月6日—7月11日放出的产品虽然质量基本稳定，但细粒子较多、强度较差，该时段放出的产品均作为返料；7月12日—7月16日生产开始转放正常，产品质量稳定。包装产品为取样器连续取得综合样，产品质量均合格稳定，满足产品质量要求。

从产品检验分析结果看，产品各项质量指标均达到质量标准要求；同时，产品中含有较高的中量元素硫、硅、钙和镁，保证了产品质量特征在行业

中的唯一性，是该类型产品质量最大的亮点。实际试生产产品质量见表6。

本次试生产目标为生产2 000 t合格脲硫酸产品。因装置系统较大而订单产量又较小，实际生产出2 008 t合格产品，系统调整产生1 414 t不合格产品，停车后系统卸出物料60 t。根据生产产品情况，本次试生产达到预期目标。本次试生产正常时段系统平均负荷为43.65 t/h，实际试生产中原料消耗见表7。

实际试生产中加入系统的硫酸钾和尿素量与实际购入量相符。本次试生产过程中根据实际状况对主要操作控制指标进行了调整验证，主要变化为39.16%的尿素从湿线加入、60.4%从干线加入（与试生产初期要求相比有较大调整，见表7）。调整的主要原因为脲硫酸制备反应温度较高，从生产安全方面考虑进行调整，调整后指标能满足工艺要求；其他消耗控制在管控范围内。实际试生产中原料原耗及能源消耗见表8。

表6 试生产产品质量
Table 6 Product quality of trial production

项目	w(总养分)/ %	w(总氮)/ %	w(K ₂ O)/ %	w(有效磷)/ %	w(水溶磷)/ %	w(水溶磷)/ w(有效磷)/ %	w(H ₂ O)/ %	w(CaO)/ %	w(MgO)/ %	w(S)/ %	w(SiO ₂)/ %	w(缩二脲)/ %	粒度1~4 mm 颗粒占比/%	粒子 强度/N
下线产品	45.74	14.27	16.43	15.04			1.42							
包装产品	45.72	14.34	14.26	14.70	13.90	81.17	1.42			8.48			94.40	
检验产品	45.68	14.66	14.88	16.14	13.19	80.99	1.28	4.52	0.71	8.30	2.00	0.0055	94.8	24.0

表7 试生产原料消耗
Table 7 Raw material consumption for taril production

干线			(NH ₂) ₂ CO投加量/t			湿线			造粒系统液氨投加量/t			造粒系统 V(脲硫酸 料浆)/m ³
m(过磷酸钙)/ t	m(MAP)/ t	m(K ₂ SO ₄)/ t	干线	湿线	累计	V(H ₂ SO ₄)/ m ³	V(磷矿浆)/ m ³	V(磷酸)/ m ³	一次 氨	二次 氨	累计	
10	38	1 047	310.55	199.88	510.43	174.72	347.03	729.9	145.48	101.24	246.73	1 021.3

表8 试生产吨产品消耗
Table 8 Consumption of one ton of product for trial production

项目	V(水)/ m ³	电/ (kW·h)	蒸汽质量/ t	压缩空气/ m ³	磷炉尾气/ m ³	磷酸m(P ₂ O ₅)/ kg	磷矿浆m(P ₂ O ₅)/ kg	m(液氨)/ kg	m(硫酸)/ kg	m(硫酸钾)/ kg	m(尿素)/ kg
累计	1 060.82	271 467.26	468.814	97 184.8	112 275.8	517 406	111 933.62	246 726.2	418 066	1 047 543	510 426
吨产品 消耗量	0.310	79.33	0.137	28.40	32.81	151.20	32.71	72.10	122.17	306.12	149.16

注：表中吨产品消耗计算时，将所有合格、不合格产品和系统腾出物料全部作为产量进行计算。

5 磷基脲硫酸复合肥试生产成果总结

5.1 试生产中出现的实际问题及实际处理

5.1.1 脲硫酸制备控温问题

由于脲硫酸分解液制备过程中有大量热量放出，会导致脲硫酸分解液暴沸，存在安全隐患。试生产过程中针对以上问题进行了生产性分析、总结，对脲硫酸分解液的制备配比进行了优化，尿素采用干湿线分散加入；对主要管控制指标进行了严格管控，使脲硫酸分解液的制备在安全、稳定中连续进行。

5.1.2 解决造粒成粒率低和粒子强度低问题

因试生产前期造粒成粒率较低（合格粒子占比

16.1%~27.6%），系统粒子强度较小（11.2~15.7 N），对生产造成了严重影响，经过适当降低管反喷浆量，提高料浆喷入量，优化调整二次氨化对应喷浆量进行对应通氨量，稳定粒径分布及造粒机内部液相量，产品成粒率提高到53.2%~62.8%，系统粒子强度提高到22.3~26.8 N，已能满足装置连续生产要求。

5.1.3 解决过程中系统物料吸湿问题

试生产期间系统物料吸湿严重，造成设备严重堵塞，严重制约了装置的连续生产。在造粒工况得到进一步改善、粒子强度提高、游离酸降低后，有效避免了装置运行过程中物料吸湿现象。

5.2 新产品生产经济效益

经试生产验证能稳定、经济、安全地进行磷酸基脲硫酸复合肥产品的生产；经生产验证本工艺技术先进、自动化程度高、环境效益好，并且产品特征明显。由于试生产验证时间短、产量相对较低等原因，试生产时段的生产成本偏高，若装置满负荷长周期生产，则生产成本有进一步下降的空间。

(1) 直接生产成本：试生产期间吨产品公用工程及生产原料消耗成本为2116元/t，单吨利润约600元。

(2) 间接经济效益：采用该工艺技术可生产各种规格的磷酸基脲硫酸复合肥产品，丰富公司产品种类、规格，促进产品结构的合理调整；产品性能好，特征明显。产品含硫、硅、钙等多种中微量元素，养分平衡性较好，产品性能优势突出，有巨大的潜在市场前景；同时，产品中含有氟硅酸脲^[9-11]，使产品具有杀虫功能，可减少农药的施用量，环境效益好；由于产品养分中的部分五氧化二磷（40%左右）来自磷矿浆，减少了生产过程中的磷酸用量（减少了生产磷酸产生的磷石膏量），提高了资源利用效率，并有较好的环境效益。

5.3 试生产取得的成果

根据磷酸基脲硫酸复合肥生产原理，在大量调研、分析总结的基础上，公司自主完成了“矿浆法脲硫基复合肥生产工艺”开发，并结合400 kt/a大型料浆法重过磷酸钙装置生产工艺，对装置进行了局部技术改造，使公司400 kt/a料浆法重过磷酸钙装置具备生产脲硫基复合肥的功能；同时完成了脲硫基复合肥操作控制系统开发工作。根据试生产过程和结果看：该工艺能较好地满足脲硫基复合肥的生产，该技术在大型磷复肥装置进行改产，具有较高的技术水平。

6 结论

(1) 以磷酸淤酸、液氨、磷矿浆、尿素、钾盐、硫酸为生产原料采用脲硫酸分解磷矿浆生产工艺在重过磷酸钙装置能够生产出满足订单要求的磷酸基脲硫酸复合肥。

(2) 装置技改后，满足矿浆法磷酸基脲硫酸复合肥生产工艺技术要求，为今后公司产品核心生产技术的形成奠定了良好基础。

(3) 按每吨产品消耗 P_2O_5 32.71 kg计，则每吨产品可以减排干基磷石膏约173.07 kg。

[参考文献]

- [1] 江善襄.磷酸、磷肥和复混肥料[M].北京:化学工业出版社,1999.
- [2] 化学工业部建设协调司,化工部硫酸和磷肥设计技术中心.磷酸 磷铵 重钙技术与设计手册[M].北京:化学工业出版社,1997.
- [3] 马保存,邹扬.硫基复合肥生产难点与解决措施[J].磷肥与复肥,2022,37(9):20-21.
MA B C, ZOU Y. Production difficulties and solutions of sulfur based compound fertilize [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022,37(9):20-21.
- [4] 吴勇,侯翠红,张保林,等.脲硫酸分解磷矿转化率影响因素的研究[J].化工矿物与加工,2010,39(6):9-12.
WU Y, HOU C H, ZHANG B L, et al. Influencing factors of urea-sulfuric acid on decomposing rate of phosphate ore [J]. Industrial Minerals & Processing, 2010,39(6):9-12.
- [5] 苗俊艳.脲硫酸分解氯化钾工艺过程研究[D].郑州:郑州大学,2014.
MIAO J Y. Study on the Process of Urea-sulfuric Acid Decomposing Potassium Chloride [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [6] 吴勇.脲硫酸复肥工艺优化及工业化的基础研究[D].郑州:郑州大学,2011.
WU Y. Study on the Process Optimization and Industrialization of Urea-sulfuric Acid Compound Fertilizer [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [7] 张儒全.硫基喷浆复合肥增氮工艺技术[J].磷肥与复肥,2017,32(2):16-17,20.
ZHANG R Q. Technology of increasing nitrogen content of S-based compound fertilizer by spraying granulation [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(2):16-17,20.
- [8] 刘裕,张玉轩,王玲,等.脲硫酸磷复合肥生产技术[J].磷肥与复肥,2017,32(3):18-19.
LIU Y, ZHANG Y X, WANG L, et al. Production technology of urea sulfuric acid phosphate compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(3):18-19.
- [9] 玄先路,王广辉,吕新春.脲硫酸功能性复肥及其肥效试验[J].磷肥与复肥,2013,28(3):79.
- [10] 李俊萍,张保林,侯翠红.磷矿物化参数对脲硫酸分解磷矿转化率的影响研究[J].化工矿物与加工,2014,43(3):12-14,22.
LI J P, ZHANG B L, HOU C H. Study on influence of physicochemical parameters of phosphate ores on conversion rate of urea-sulfuric acid decomposing phosphate ores [J]. Industrial Minerals & Processing, 2014, 43(3):12-14,22.
- [11] 潘晓明,李宜平.硫基复合肥生产优化与提质增效[J].磷肥与复肥,2024,39(5):20-21.
PAN X M, LI Y P. Production optimization, quality improvement and efficiency enhancement of sulfur based compound fertilizers [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2024,39(5):20-21.