◆提质增效产品创制技术◆

水溶性磷酸一铵结块的影响因素和控制措施

窦德军，杜方圆，胡伟华，陈　鸿

（湖北三宁化工股份有限公司，湖北 枝江　443200）

［摘　要］水溶性磷酸一铵（MAP）在储存中易结块，严重影响其应用价值。通过系统研究产品水含量（$w(H_2O)$ 0.2%～1.0%）、包装温度（10～50 ℃）、杂质离子（Fe^{3+}、Al^{3+}、Mg^{2+}）、堆码层数（1～3层）、粒径（＞0.10 mm、0.05～0.10 mm、＜0.05 mm）及粉尘含量（w(粉尘) 2%～10%）等因素对水溶性磷酸一铵结块的影响，提出优化控制措施。通过流化床分段控温（温度100 ℃，停留时间10 min）、冷风机降温（风量5 500 m^3/h）、中和工段pH调控（4.0～4.3）以及加装旋风除尘器，可有效缓解水溶性磷酸一铵结块现象，延长存储时间。

［关键词］水溶性磷酸一铵；结块；影响因素；控制措施

［中图分类号］TQ442.14　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）06-0054-06

Influencing factors and control measures of the caking of water-soluble MAP

DOU Dejun, DU Fangyuan, HU Weihua, CHEN Hong

(*Hubei Sanning Chemical Industry Co., Ltd., Zhijiang* 443200, *China*)

Abstract: Water-soluble MAP is prone to caking in the storage period, which seriously affects its application value. The factors affecting the caking of water-soluble MAP such as water content (0.2% - 1.0%), packing temperature (10 - 50 ℃), impurity ions (Fe^{3+}, Al^{3+}, Mg^{2+}), number of stacking layers (1 - 3), particle size(>0.10 mm, 0.05 - 0.10 mm, < 0.05 mm) and dust content (2% - 10%) are systematically studied, and the optimization control measures are proposed. The caking phenomenon of water-soluble MAP can be effectively alleviated to prolong the storage time by fluidized bed segmented temperature control (100 ℃ for 10 min), chiller cooling (5 500 m^3/h), pH regulation in the neutralization section (4.0 - 4.3), and the addition of cyclone dust collector.

Key words: water-soluble monoammonium phosphate(MAP); caking; influencing factors; control measures

0　引言

水溶性磷酸一铵（MAP）作为一种高效的水溶性磷氮复合肥料，因其养分含量高（w(总养分) ≥72.5%，w(总N) ≥11.0%，w(水溶性P_2O_5) ≥60.0%）、溶解速度快、pH值4～5、物理性质稳定等特点，已成为滴灌施肥、叶面喷施和水肥一体化技术的核心原料[1]，同时也广泛用作木材、纸张、织物的阻燃添加剂，纤维加工和染料工业的分散剂，搪瓷添加剂，防火涂料的配合剂，干粉灭火剂等。但水溶性MAP产品在长期储存中易因结块导致流动性下降，甚至形成硬块，增加粉碎成本和用户使用难度，还导致施肥设备堵塞、养分释放不均等问题，影响农业生产的效率。结块问题已成为制约水溶性MAP产品质量的关键因素[2]。

湖北三宁化工股份有限公司（以下简称公司）水溶性磷酸一铵装置始建于2010年，产品结块问题一直存在，随着客户对产品质量要求越来越高，关于产品结块问题的投诉也逐渐增多。为体现公司“客户为尊，信誉第一”的经营理念，针对产品结块机制展开深入研究，旨在优化生产工艺参数，降低产品结块率，提高产品质量。

1　水溶性磷酸一铵生产工艺及结块性能测定方法

1.1　水溶性磷酸一铵生产工艺流程

水溶性磷酸一铵生产工艺流程起始于稀磷酸与气氨两种原料的输入，两者在中和反应器中发生中和反应，控制中和度在1.00～1.08生成磷酸一铵料浆；随后该料浆进入沉降槽，通过重力作用初步分离出上层料浆和下层含固体颗粒较多的渣浆。下层渣浆排放至渣浆混合槽，上层料浆则进一步通过板框压滤机进行固液分离。压滤过程中产生的滤渣被输送至渣浆混合槽，而分离出的滤液通过蒸发浓缩

［收稿日期］2025-03-19

［作者简介］窦德军(1980-)，男，湖北襄阳人，化工工艺工程师，从事磷酸及磷酸盐生产技术研究。

提高其相对密度到1.330～1.380后，被送入夹套水冷式结晶槽，在特定温度条件下析出晶体。后经离心机分离为湿态磷酸一铵晶体和残留母液，母液收集至渣浆混合槽与前面工段的渣浆、滤渣混合均匀后作为55%农业级磷酸一铵的原料。离心得到的湿态磷酸一铵晶体进入烘干设备，通过流化床干燥去除水分，干燥的成品进入包装工序。水溶性磷酸一铵生产工艺流程见图1。

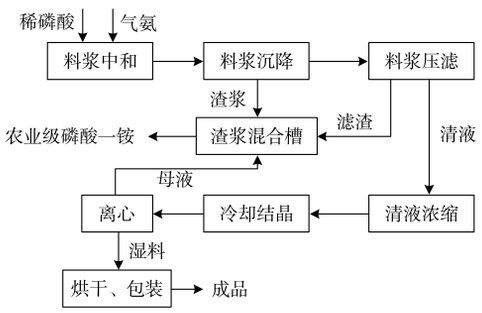

图1　水溶性磷酸一铵生产工艺流程

Fig. 1　Process flow of water-soluble monoammonium phosphate

1.2　产品结块性能测定方法

将待测产品定量填充至标准圆柱形容器（直径×高 = 50 mm × 50 mm），经表面刮平处理后，再将圆筒放置在环境参数与堆压载荷均严格模拟实际仓储条件的环境中。持续一定时间后，取出样品，采用质构分析仪测定圆柱体结块的轴向破碎强度。以探针垂直贯穿结块试样时仪器显示的最大峰值力作为破碎力（单位N），为避免实验误差，每组实验重复3次，取其平均值作为实际数据。根据破碎力来判断产品结块的程度，破碎力越小说明结块程度越轻，反之则越严重。

2　水溶性磷酸一铵结块的影响因素

2.1　产品水含量对结块的影响

产品结块的形成机制主要与物料水含量和环境湿度之间的动态平衡密切相关。当物料内部游离水含量高于大气环境平衡水含量时，会引发显著的水分相变循环：超量游离水在密闭空间内形成持续的汽化–冷凝循环，这一过程促使物料颗粒的棱角部位经历反复的溶解–重结晶作用，最终导致晶体桥联，形成致密块状物[4]。

根据产品结块机制设置实验内容，控制产品$w(H_2O)$在0.2%～1.0%进行产品结块性能测定，结果如表1所示。由表1可知，控制产品中的游离水含量可大幅度减轻水溶性磷酸一铵的结块程度，游离水含量最好小于产品大气条件下的平衡水含量，产品$w(H_2O)$控制在0.6%以内时结块情况都可以接受。

表1　产品游离水含量对产品结块的影响

Table 1　Effect of free water on product caking

编号	产品$w(H_2O)$/%	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
1	0.2	2.11	± 0.12	能
2	0.4	3.79	± 0.21	能
3	0.6	6.64	± 0.35	能
4	0.8	10.83	± 0.68	不能
5	1.0	14.71	± 0.92	不能

2.2　产品包装温度对结块的影响

模拟生产条件，将产品（$w(H_2O)$为0.5%）在不同的温度条件下进行包装贮存，然后进行产品结块性能测定，结果见表2。由表2可知，当产品包装时温度越高，结块的风险就越大。较高的包装温度可能增加产品分解和晶型转变的概率；同时，它还会加速水分的蒸发与冷凝，降低产品的抗压强度，使其更容易发生变形。这些因素共同加剧了产品结块的速度和程度[5]。

表2　产品包装温度对结块的影响

Table 2　Effect of packaging temperature on product caking

编号	包装温度/℃	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
1	10	2.71	± 0.15	能
2	20	4.56	± 0.24	能
3	30	7.67	± 0.41	能
4	40	11.45	± 0.73	不能
5	50	16.32	± 1.05	不能

2.3　产品中杂质对结块的影响

原料磷酸会带入Fe^{3+}、Al^{3+}、Mg^{2+}等杂质[6]，杂质在中和反应过程中形成复合盐类，会改变产品的临界相对湿度、吸湿性与溶解度，使其结构稳定性下降。Fe^{3+}可能嵌入磷酸一铵晶体中，导致晶格缺陷，使晶体表面粗糙，颗粒间接触面积增大，更容易形成物理黏结；Al^{3+}可能作为异相成核剂，促使晶体以非均匀方式生长，形成松散、多孔的颗粒结构，加剧吸湿和结块；Mg^{2+}与磷酸根生成难溶盐，这些盐在颗粒表面形成微孔结构，通过毛细作用吸附水分，加剧结块[7]。

在其他条件一致的情况下，控制产品中不同杂质离子的浓度进行产品结块性能测定，结果见表3。由表3可知，Fe^{3+}和Al^{3+}对结块的促进作用强于Mg^{2+}，且浓度越高，破碎力越大。杂质质量分数超过0.3%时，结块情况不可接受，需严格控制产品中杂质含量。

表3　产品杂质浓度对结块的影响

Table 3　Effect of impurity concentration on product caking

杂质	w/%	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
Fe^{3+}	0.1	5.23	± 0.31	能
	0.3	8.76	± 0.52	不能
	0.5	12.45	± 0.89	不能
Al^{3+}	0.1	6.11	± 0.35	能
	0.3	9.84	± 0.63	不能
	0.5	14.02	± 1.02	不能
Mg^{2+}	0.1	4.89	± 0.28	能
	0.3	7.95	± 0.47	不能
	0.5	11.33	± 0.75	不能

2.4　产品堆码层数对结块的影响

产品包装形式主要有吨袋包装、25 kg包装、50 kg包装，为充分利用仓库储存空间，通常都采用堆码形式。同时为方便产品后续运输，吨袋包装、25 kg包装、50 kg包装在托盘上的层高都规定为1 m。理论上堆码层数越多，底层的颗粒承受的静压力越大，导致颗粒轻微变形，接触面积增大，促进颗粒间物理黏附。高压下颗粒间的紧密接触会加速表面溶解–重结晶过程，形成更牢固的“晶桥”，尤其在湿度波动时情况更严重。码垛过高还可能导致堆垛内部通风不良，底部肥料因吸湿或冷凝而湿度升高，形成局部高湿区域，促进吸湿性结块，同时阻碍空气流动，堆垛中心区域湿度和热量难以散出，形成“闷热”环境，加速颗粒表面潮解和化学键合。这都会加剧产品结块的速度和程度。

2.5　产品粒径对结块的影响

粒径效应对产品结块倾向具有显著影响。当颗粒粒径减小时，比表面积呈指数级增长，导致表面原子配位缺陷（即悬空键密度）急剧增加[8]。这种亚稳态的表面结构使颗粒表面自由能显著升高，形成强烈的热力学驱动力。该能量驱动过程通过两种途径加剧结块：一方面，高表面能态促使颗粒通过表面重组降低系统总能量，导致范德华力主导的颗粒间吸附作用增强；另一方面，微观尺度的表面粗糙度增大，使颗粒间实际接触面积增大，从而形成更稳固的机械互锁结构[9]。这种由粒径缩减引发的能量–结构双重组机制，最终导致产品结块概率增大。

在保证其他条件一致的情况下，通过筛分法将产品分为3组（>0.10 mm、0.05~0.10 mm、<0.05 mm），进行产品结块性能测定，结果见表4。由表4发现，晶体粒径与破碎力成负相关，粒径<0.05 mm时结块率显著升高。控制晶体粒径>0.05 mm可有效降低结块风险。

表4　产品粒径对结块的影响

Table 4　Effect of particle size on product caking

粒径范围/mm	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
> 0.10	3.12	± 0.18	能
0.05 ~ 0.10	7.45	± 0.42	能
< 0.05	14.76	± 1.05	不能

2.6　产品粉尘含量对结块的影响

从胶体化学与粉体工程学角度解析，产品粉尘对结块过程的催化作用主要体现在3个维度：首先，粉尘作为粒径通常在亚微米级的超细颗粒，其比表面积可达主颗粒的2~3个数量级，表面自由能的显著升高使粉尘更易与环境水分子发生界面吸附作用；其次，粉尘颗粒在包装体系内的布朗运动特性使其成为理想的结晶核，通过奥斯特瓦尔德熟化机制加速溶解–重结晶进程；第三，粉尘在颗粒间隙的填充效应会显著降低体系孔隙率，当相对湿度超过临界值时，毛细管力的指数级增长将导致颗粒间液桥快速形成。值得注意的是，粉尘特有的动态迁移性使其在包装振动过程中产生静电富集现象，这种局域化的高粉尘浓度区域往往成为结块起始点。因此，粉尘对结块的影响不仅体现在热力学驱动层面，而且通过改变体系动力学路径加速了结块进程。

根据粉尘影响产品结块的机制，在其他条件一致的情况下，改变粉尘含量进行产品结块性能测试，结果见表5。由表5可知，粉尘含量越高，破碎力越大，即结块程度越大。

表5　粉尘含量对产品结块的影响

Table 5　Effect of dust content on product caking

编号	w(粉尘)①/%	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
1	2	3.41	± 0.18	能
2	4	4.66	± 0.26	能
3	6	8.68	± 0.53	不能
4	8	13.15	± 0.82	不能
5	10	15.69	± 1.10	不能

注：①过0.150 mm筛（100目筛）的为粉尘。

3　水溶性磷酸一铵结块的控制措施

3.1　控制产品水含量

目前装置控制产品水含量主要依靠烘干工段的流化床设备，其具有气固接触面积大、干燥速率快、能耗较低、流态化使颗粒混合充分、水分分布均匀、可分段控温、适应不同干燥阶段需求等特点。如表6所示，在产品停留时间一致（10 min）

情况下温度越高其水含量越少，但温度过高也会导致产品焦化、分解，造成产品养分流失。在温度一致（100 ℃）的情况下控制产品在流化床内的停留时间，发现停留时间越长其水分越少（见表7），但停留时间过长也会造成流化床风孔堵塞影响其工作效率。综合考虑控制流化床温度在100 ℃、产品停留时间在10 min为最优条件，成品水分对结块影响较小的同时，还能保证不影响生产。

表6　流化床温度对成品水含量的影响

Table 6　Effect of fluidized bed temperature on water content of finished products

编号	流化床温度/℃	成品$w(H_2O)$/%	标准差(σ)
1	90	1.03	± 0.13
2	95	0.77	± 0.08
3	100	0.55	± 0.10
4	105	0.29	± 0.05
5	110	0.08	± 0.02

表7　产品在流化床内停留时间对成品水含量的影响

Table 7　Effect of residence time in fluidized bed on water content of finished products

编号	停留时间/min	成品$w(H_2O)$/%	标准差(σ)
1	5	0.72	± 0.09
2	10	0.57	± 0.08
3	15	0.36	± 0.10
4	20	0.19	± 0.05
5	25	0.03	± 0.01

3.2　控制产品包装温度

产品经流化床热风机干燥后出料温度一般在50～60 ℃，此时温度较高，直接包装会造成产品结块严重。为改善这一情况，在流化床风室末端增加一台冷风机对产品进行降温，冷风机风量与出口产品温度见表8。由表8可知，风量每增加1 000 m^3/h，包装温度可降低10 ℃左右，包装温度在30 ℃以内结块程度都可接受，因此将冷风机风量控制在5 500 m^3/h左右可完全满足包装温度要求。同时安排相关岗位人员做好产品包装温度监测，实时调整冷风机风量，确保产品包装温度不超限。

表8　冷风机风量对产品包装温度的影响

Table 8　Effect of chiller airflow on product packaging temperature

编号	风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	产品温度/℃	标准差(σ)
1	3 000	52.31	± 1.16
2	4 000	39.65	± 1.25
3	4 800	31.26	± 0.36
4	5 500	23.82	± 0.25

3.3　控制中和料浆pH

控制料浆pH可在中和反应过程中除去大部分杂质离子，磷酸中的Fe^{3+}、Al^{3+}在通氨中和过程中，pH＞2.3后会最先形成沉淀析出，在pH＞4.0时Fe^{3+}、Al^{3+}的净化率均可达98%以上。中和料浆pH对压滤液杂质含量的影响见表9。通过表9数据可以看出，磷酸中的Fe^{3+}在中和过程已被完全脱除，滤液中的Al^{3+}含量也比较低，而磷酸中的Mg^{2+}在中和过程中pH＞4.0时净化率一般只有70%～85%，比Fe^{3+}、Al^{3+}要低得多。而中和料浆pH的提高又有限度，pH控制过高，料浆黏度增大比较快，料浆沉降速率显著降低，进而造成板框压滤机负荷增加，影响装置稳定运行。所以一般采取降低磷精矿中Mg^{2+}的方式减少Mg^{2+}含量。磷精矿中$w(Mg^{2+})$一般要求控制在1.1%以下。

表9　中和料浆pH对压滤液杂质含量的影响

Table 9　Effect of neutralization slurry pH on impurity content in filtration liquid

磷酸中杂质w/%			中和料浆pH	压滤液中杂质				
Mg^{2+}	Al^{3+}	Fe^{3+}		$w(Mg^{2+})$/%	标准差(σ)	$w(Al^{3+})$/%	标准差(σ)	$w(Fe^{3+})$/%
1.42	0.67	0.25	3.9	0.43	± 0.09	0.03	± 0.01	未检出
1.26	0.75	0.21	4.0	0.24	± 0.08	0.04	± 0.02	未检出
1.63	0.83	0.28	4.1	0.38	± 0.06	0.02	± 0.01	未检出
1.37	0.70	0.26	4.2	0.29	± 0.05	0.03	± 0.01	未检出
1.05	0.72	0.20	4.3	0.16	± 0.01	0.02	± 0.01	未检出

3.4　控制产品码垛层数

码垛高度通过增强静压力，恶化局部温度、湿度环境加剧产品的结块。产品堆码高度对结块程度的影响见表10。由表10可知，吨袋包装结块情况受堆码层数影响较小，但25 kg包装、50 kg包装有不同情况的结块，在堆码层数不超过两层（2 m）的情况下产品结块程度都可以接受，考虑吨袋码垛过高会有倾倒风险及安全隐患，因此规定所有码垛层数都不超过两层（2 m），针对底层比高层更容易结块的情况，采取更换镂空托盘和控制码垛之间间距大于50 cm来加强空气流动，同时在仓库加装湿度计对仓库湿度进行监测，发现湿度异常及时处理。

表 10 产品堆码层数对结块程度的影响

Table 10 Effect of stacking height on the degree of product caking

包装形式	堆码层数	破碎力/N	标准差(σ)	结块情况能否接受
吨袋包装	1	1.29	± 0.11	能
	2	4.01	± 0.27	能
	3	6.73	± 0.86	能
25 kg 包装	1	3.53	± 0.05	能
	2	6.83	± 0.41	能
	3	8.92	± 0.39	不能
50 kg 包装	1	2.07	± 0.22	能
	2	5.72	± 0.68	能
	3	9.41	± 1.10	不能

3.5 控制产品比表面积

产品比表面积主要受晶体粒径影响，而晶体粒径又容易被浓缩出料密度、降温停留时间及搅拌强度等因素影响。在其他因素相同的情况下对浓缩密度进行单因素实验发现（见图 2），浓缩出料密度越低，其冷却结晶的晶体粒径大于 0.05 mm 的占比越大，但其产量也显著下降。因此选择 1.34 g/mL 作为正交实验分析中心。这种现象主要源于以下两方面作用机制：首先，浓缩过程导致料浆黏度增大，同时杂质浓度的累积对晶体生长产生抑制作用；其次，过饱和体系在快速冷却过程中产生爆发性成核，易形成大量微晶。

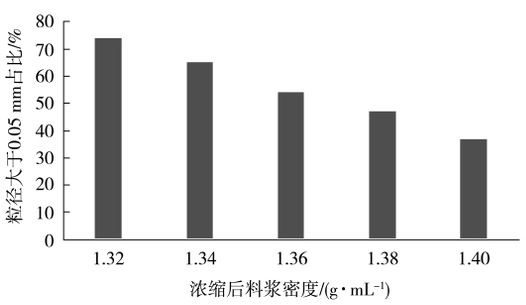

图 2 浓缩后料浆密度对晶体粒径的影响

Fig. 2 Effect of slurry density after concentration on crystal size

装置现有结晶槽 18 个，目前正常生产时空置 8 个结晶槽用于清洗周转，有效使用的结晶槽为 10 个。在结晶槽清洗周转正常运行的情况下，可以减少空置结晶槽数量来延长降温停留时间。对降温停留时间进行单因素实验发现（结果见图 3），降温停留时间在 5.0 ~ 6.0 h 时晶体粒径大于 0.05 mm 的占比波动较小，降温停留时间在 4 ~ 5 h 晶体粒径大于 0.05 mm 的占比显著上升。但降温停留时间过长对其产量也会有一定影响。因此选择 5.0 h 作为正交实验分析中心。

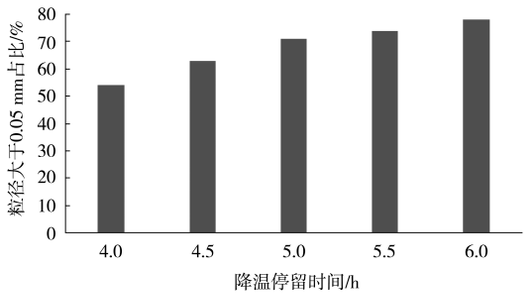

图 3 降温停留时间对晶体粒径的影响

Fig. 3 Effect of cooling residence time on crystal size

搅拌转速影响溶液中溶质的传质效率，进而调控成核与晶体生长的竞争过程。高速搅拌促进均匀成核，增加晶核数量，会导致更多小晶体；低速搅拌则可能使局部过饱和，晶体生长占优，形成较大颗粒。高速搅拌产生的剪切力还可能导致晶体破碎或二次成核，进一步减小粒径；而低速搅拌下晶体完整性更好。搅拌转速对晶体粒径的影响见图 4。当搅拌转速在 40 r/min 时晶体粒径大于 0.05 mm 的占比最高。因此选择 40 r/min 作为正交实验分析中心。

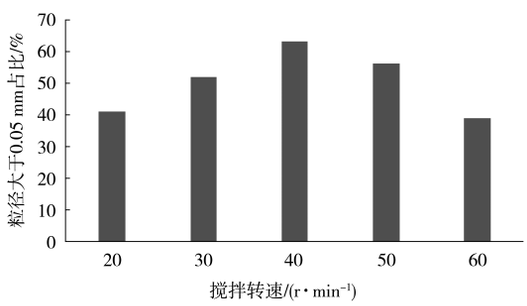

图 4 搅拌转速对晶体粒径的影响

Fig. 4 Effect of stirring rate on crystal size

正交实验因素表见表 11，实验设计及结果见表 12。由表 12 可知，在浓缩后料浆密度在 1.32 g/mL、降温停留时间在 5.5 h、搅拌转速在 30 r/min 的条件下粒径大于 0.05 mm 的占比最高，同时得出粒径大于 0.05 mm 占比影响最大的因素为降温停留时间。因此在生产过程中重点把握结晶工段降温停留时间来控制产品的晶体粒径，进而控制产品比表面积来降低产品结块情况。

表 11 正交实验因素表

Table 11 Factor table for orthogonal experiments

实验方案	*A*(浓缩后料浆密度/(g·mL⁻¹))	*B*(降温停留时间/h)	*C*(搅拌转速/(r·min⁻¹))
1	1.32	4.5	30
2	1.34	5.0	40
3	1.36	5.5	50

表12　正交实验设计及结果

Table 12　Design and results of orthogonal experiment

编号	*A*	*B*	*C*	粒径大于0.05 mm占比/%	标准差(σ)
1	1.32	4.5	30	77.13	± 1.11
2	1.32	5.0	50	81.67	± 127
3	1.32	5.5	40	83.92	± 1.06
4	1.34	4.5	50	76.11	± 0.95
5	1.34	5.0	40	73.63	± 0.85
6	1.34	5.5	30	88.24	± 1.39
7	1.36	4.5	40	78.39	± 1.22
8	1.36	5.0	30	79.61	± 0.68
9	1.36	5.5	50	73.35	± 1.10
*K*1/3	80.90	77.21	81.51		
*K*2/3	79.33	78.30	78.65		
*K*3/3	77.12	81.84	77.04		
R	3.78	4.63	4.47		
最优方案	*A*1	*B*3	*C*1		

3.6　控制产品粉尘含量

本装置产品烘干工段采用流化床设备来干燥产品除去水分（见图5），受干燥温度和风速影响，产品颗粒表面快速失去水分，变得脆弱，容易破裂。再加上产品颗粒之间的碰撞摩擦加剧了产品颗粒破碎形成细粉的过程[10]。这些产品细粉会填充成品颗粒之间的颗粒间隙，增加接触面积，在储存堆放的压力下形成更加紧密的硬块[11]。本装置在烘干工段为防止产品细粉进入成品包装、增加了一台旋风除尘设备，并加装管道连接产品途经的各设备，对整个烘干流程中可能产生的细粉进行收集并溶解在地槽中作为返料进行回收利用，可有效控制产品中细粉质量分数在2%以内，从而减少产品结块的可能。

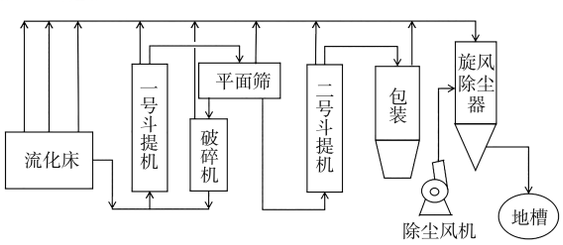

图5　烘干工段工艺流程

Fig. 5　Flow of drying section

4　结语

影响水溶性磷酸一铵成品结块的因素比较多，各因素之间有一定的干扰，生产过程中要结合各个可以降低成品结块的影响因素，综合调节以降低成品结块概率。通过大量生产数据得出，对于控制产品中游离水含量，主要采取在烘干流化床阶段控制流化床温度与产品停留时间；对于产品包装温度过高，采取在加装粉体流冷却设备可有效解决；对于降低杂质离子含量，主要采取在中和工段控制料浆pH，可有效去除大部分杂质离子；在仓库储存阶段主要采取控制码垛高度来防止结块；对于产品比表面积影响因素比较多，主要靠控制浓缩出料密度、结晶降温停留时间、搅拌转速有效降低产品比表面积；对于产品中粉尘对结块的影响，采取在加装旋风除尘设备后可有效控制。采取这些措施后不仅降低了结块概率，延长了储存时间，还增强了公司产品竞争力，赢得了客户信赖。

［参考文献］

［1］ 庞士花.工业磷酸一铵国内外研究现状[J].广东化工,2016,43(10):129.
PANG S H. Industry Research Status at Home and Abroad MAP [J]. Guangdong Chemical Industry,2016,43(10):129.

［2］ 杨建中.加压中和—喷雾自热法干燥粉状磷酸一铵抗结块方法的研究与应用[J].磷肥与复肥,2004,19(4):26-29.
YANG J Z. Study and application of anti-caking method for powdered MAP produced by pressure neutralizing-spraying autothermal process [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2004,19(4):26-29.

［3］ 杨林台,马克猛,娄方亮.沉降分离工艺在工业级磷酸一铵装置上的应用[J].磷肥与复肥,2021,36(5):30-31.
YANG L T, MA K M, LOU F L. Application of sedimentation separation process in industrial grade MAP plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2021,36(5):30-31.

［4］ 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 X M, YANG X, LI Y H. Cause for caking of powdery MAP and its anti-caking experiment [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2001,16(2):29-31.

［5］ 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 H Q, MA H. Research and application of anti-caking agent for water soluble monoammonium phosphate [J]. Inorganic Chemicals Industry,2022,54(2):78-80.

［6］ 李宜平,窦德军,吴建华,等.影响工业级磷酸一铵成品堆密度的因素和控制措施[J].磷肥与复肥,2021,36(6):20-22.
LI Y P, DOU D J, WU J H, et al. Factors affecting bulk density of industrial grade MAP products and control measures [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2021,36(6):20-22.

［7］ 余金涛,赵章雄,詹磊,等.降低工业磷酸一铵产品氟、硅含量的措施[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(3):46-50.
YU J T, ZHAO Z X, ZHAN L, et al. Measures to reduce the content of fluorine and silicon in industrial MAP [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering,2025,40(3):46-50.

［8］ 李青,武晓霞,姚美焕.浅析影响工业磷酸一铵晶型的因素[J].山东化工,2016,45(5):83-84.

（下转第67页）