

料浆法粉状磷酸一铵装置喷粉塔分布板优化

王敬东¹, 潘刚², 刘东伟¹, 熊亮军²

(1. 湖北省黄麦岭控股集团有限公司, 湖北 孝感 432305;
2. 湖北省黄麦岭生物科技有限责任公司, 湖北 孝感 432305)

[摘要] 聚焦湖北省黄麦岭控股集团有限公司10万t/a料浆法粉状磷酸一铵装置喷粉塔的运行难题, 深入剖析现存问题, 包括出料温度偏高、出料水分偏大、产能与上游工段不匹配等。通过理论计算, 优化分布板布设, 涵盖风帽组合方式、数量、孔径等关键要素, 显著改善喷粉塔运行效能, 有效降低清理频率, 清理周期由7~10 d延长至15~20 d, 产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 控制在0.5%~0.8%合格范围, 产品整体质量水平显著提升, 单位生产成本有效下降, 为同行业喷粉塔优化提供了极具价值的参考范例。

[关键词] 磷酸一铵; 喷粉塔; 分布板; 问题; 优化

[中图分类号] TQ440.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 09-0037-06

Optimization of distribution plate in spray tower of slurry-based powdered monoammonium phosphate plant

WANG Jingdong¹, PAN Gang², LIU Dongwei¹, XIONG Liangjun²

(1. Hubei Huangmailing Holding Group Co., Ltd., Xiaogan 432305, China;
2. Hubei Huangmailing Biotechnology Co., Ltd., Xiaogan 432305, China)

Abstract: Focusing on the operational difficulties in the 100 kt/a slurry-based powdered monoammonium phosphate spray tower in Hubei Huangmailing Holding Group Co., Ltd., the existing problems are deeply analyzed, including too high discharge temperature and water content, the production capacity does not match the upstream section. Through theoretical calculations, the layout of distribution plates are optimized, covering key elements such as wind cap combination, quantity, and aperture. After transformation, the operational efficiency of the spray tower is significantly improved, cleaning frequency is reduced, the cleaning cycle has been extended from 7-10 days to 15-20 days, and the moisture content of the product is precisely controlled within the qualified range of 0.5% - 0.8%, and the overall quality level have been significantly improved, the unite production cost is reduced effectively. The research results provide valuable reference examples for optimizing spray towers in the same industry.

Key words: monoammonium phosphate; spray tower; distribution plate; problems; optimization

0 引言

在现代农业与工业领域, 磷酸一铵 (MAP) 作为高浓度复合肥料及精细化工原料, 其生产工艺的高效性直接影响农业生产效益与资源利用效率。喷雾干燥技术因具有干燥效率高、产品粒度可控等优势, 成为料浆法粉状磷酸一铵生产的关键工艺, 而喷粉塔作为该技术的核心设备, 其内部流场分布、物料传递效率直接决定着产品品质与装置运行稳定性^[1]。随着全球农业对高浓度肥料需求增长及化工行业绿色生产标准提升, 喷粉塔的精细化设计与高效运行成为突破产能瓶颈、降低能耗的重要方向。

湖北黄麦岭控股集团有限公司 (以下简称公司) 2016年4月投产的10万t/a料浆法粉状磷酸一铵装置, 采用高塔喷雾干燥制粉技术^[2]。该工艺将中和反应生成的料浆浓缩后, 泵送至塔顶雾化喷出, 雾化料浆在塔内沉降过程中与塔底进入并上升的洁净热空气逆流接触, 水分被蒸发除去, 最终在塔底形成粉状磷酸一铵产品。该工艺具有流程紧

[收稿日期] 2025-05-26

[作者简介] 王敬东 (1966-), 男, 湖北大悟人, 高级工程师, 湖北省黄麦岭控股集团有限公司总工程师, 长期从事磷化工生产技术研究及管理工作。

凑、产品纯度高的特点。

然而，在长期运行过程中，喷粉塔分布板暴露出一系列问题：其一，出料温度偏高、出料水含量偏大，且塔内出现局部沟流和死床现象；其二，喷粉塔整体的干燥能力设计未能与上游浓缩工段的最佳产出工况形成精准匹配，严重威胁生产的连续性、稳定性与安全性，成为制约装置产能释放、能耗降低及经济效益提升的关键瓶颈。鉴于此，公司结合生产数据，对分布板结构参数进行了系统性优化，于2023年2月主导并完成了喷粉塔分布板的技术改造工作。自技改完成以来，喷粉塔运行效果良好，各项生产指标得到显著改善。

1 喷粉塔参数及存在问题分析

1.1 喷粉塔基本参数

公司 MAP 装置的核心干燥设备喷粉塔采用立式结构设计，其上部直段筒体直径为 8 400 mm，下部锥段采用变径过渡结构（上口 $\phi 8\ 400\ \text{mm}$ ，下口 $\phi 4\ 040\ \text{mm}$ ），流化床段筒体直径为 4 040 mm，塔体总高度达 35 m，属于大型化肥干燥装备。

1.2 高压风机工艺参数及问题

喷粉塔高压风机的额定风压为 5.7 kPa。然而，热风流经分布板与床层后压降显著，导致富余压头不足，较大粒径物料难以实现有效沸腾流态化，进而在分布板表面持续堆积沉降^[3]，致使风孔堵塞，具体工艺参数见表 1。

表 1 高压风机工艺参数

Table 1 Process parameters of the high-pressure blower

风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	风压/ Pa	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	操作温 度/ $^{\circ}\text{C}$	电压/ V	电机功 率/kW
100 000	5 677	960	150	6 000	220

1.3 分布板风帽布局问题

技改前，分布板尺寸为 $\phi 4\ 040\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$ ，配置 $\phi 43\ \text{mm}$ 风帽 2 043 个，呈圆周状排列，中心间距 80 mm（具体开孔数量及所在圆半径分布见表 2）。分布板开孔率偏低，导致气孔速度系数过高，布气均匀性差，影响流化质量^[4]。

相较于正三角形布孔设计，圆周分布模式易导致气流分布不均，并形成死角。死角区域内物料持续积聚将引发床层压实现象，不仅缩短喷粉塔运行周期，还增加清塔频率。经过近 7 年运行，清塔周期维持在 7 ~ 10 d，平均每月需停产 3 ~ 4 次进行清塔作业。虽属行业中等水平，但频繁清塔导致有效生产时间减少 18%，且清理作业需停止喷粉并属于受限空间作业，存在安全风险。

表 2 分布板每圈开孔个数

Table 2 Number of holes in per circle of the distribution plate

所在 圈数	对应开 孔数	孔所在圆 半径/mm	所在 圈数	对应开 孔数	孔所在圆 半径/mm
1	6	80	16	101	1 280
2	12	160	17	107	1 360
3	19	240	18	113	1 440
4	25	320	19	120	1 520
5	31	400	20	126	1 600
6	38	480	21	132	1 680
7	44	560	22	137	1 760
8	50	640	23	145	1 840
9	57	720	24	151	1 920
10	63	800	25	157	2 000
11	69	880	26	163	2 080
12	75	960	27	169	2 160
13	82	1 040	28	176	2 240
14	88	1 120	29	182	2 320
15	94	1 200	30	188	2 400

此外，喷粉塔频繁停机导致一效、二效闪蒸室等非停机工段的工艺指标失稳，致使喷粉初期的质量指标难以保证、调节时间过长，加之非停机设备的持续运行消耗导致单位产品成本增加。与行业头部企业每月 1 次的清塔频率相比，该装置喷粉塔在运行连续性、能耗及产能利用率等关键指标上存在显著差距，此问题严重制约设计产能释放。

1.4 不良工况分析

在实际运行中，风量、风温、分布板阻力、引风机负荷等关联因素调节困难，难以达到平衡状态，直接导致出料温度高（最高达 85 $^{\circ}\text{C}$ ）、出料水含量偏高（ $w(\text{H}_2\text{O})$ 最高达 2.1%）、塔内出现沟流等不良工况^[5]。这些问题不仅影响产品质量，还增加了生产成本。

2 喷粉塔设计分析

2.1 流化干燥理论计算基础

2.1.1 流化床层高度的计算

流化床层高度由式 (1) 计算^[6]：

$$H = H_0(1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon) \tag{1}$$

式中 H —— 流化床层高度，m；

H_0 —— 固定床层高度，m；

ε_0 —— 固定床层孔隙率；

ε —— 流化床层孔隙率。

固定床层高度由式 (2) 计算：

$$H_0 = G\tau / (60\rho_b A) \tag{2}$$

式中 G —— 颗粒物料质量流量，kg/h；

τ —— 颗粒物料在流化床中停留时间，min；

ρ_b —— 颗粒物料堆积密度， kg/m^3 ；

A —— 流化床层底面积, m^2 。

固定床层孔隙率由式 (3) 计算:

$$\varepsilon_0 = 1 - \rho_b / \rho_s \quad (3)$$

式中 ε_0 —— 固定床层孔隙率;

ρ_b —— 颗粒物料堆积密度, kg/m^3 ;

ρ_s —— 颗粒密度, kg/m^3 。

流化床层孔隙率由式 (4) 计算:

$$\varepsilon = ((18Re + 0.36Re^2)/Ar)^{0.21}; \quad (4)$$

$$Re = \rho_g u d / \mu; \quad (5)$$

$$Ar = d^3(\rho_s - \rho_g)g \times \rho_g / \mu^2. \quad (6)$$

式中 Re —— 雷诺数;

ρ_g —— 气体密度, kg/m^3 ;

u —— 喷粉塔气体速率, m/s ;

d —— 颗粒直径, m ;

μ —— 气体黏度, $Pa \cdot s$;

Ar —— 阿基米德数;

g —— $9.81 m/s^2$ 。

2.1.2 流化床层压降的计算

流化床层压降由式 (7) 计算:

$$\Delta p_b = H_0(1 - \varepsilon_0)(\rho_s - \rho_g)g. \quad (7)$$

2.1.3 流化床分布板压降的计算

流化床分布板压降由式 (8) 计算:

$$\Delta p_d = \xi \rho_g u_w^2 / 2. \quad (8)$$

式中 Δp_d —— 流化床分布板压降, Pa ;

ξ —— 阻力系数, 范围 1.5 ~ 2.5, 一般取 2.0;

u_w —— 分布板风帽孔气速, m/s 。

2.1.4 颗粒物料临界速度和沉降速度的计算

颗粒物料临界速率和沉降速率由普拉诺夫斯基修正式 (9) (10) (11) 计算^[7]:

$$u = \mu Re / (d \rho_g); \quad (9)$$

$$Re = ((367 + k Ar \varepsilon^{4.75})^{0.5} - 19.15) / (0.588k); \quad (10)$$

$$Ar = d^3(\rho_s - \rho_g)g \times \rho_g / \mu^2. \quad (11)$$

式中 u —— 颗粒物料临界速率或沉降速率, m/s ;

Re —— 临界或沉降雷诺数;

Ar —— 阿基米德数;

ε —— 固定床层或流化床层孔隙率;

k —— 粒子形状修正系数, 球形颗粒取 1.0, 正方形颗粒取 0.806, 圆柱形颗粒取 0.833 ~ 0.868, 不规则形状颗粒取 0.9。

2.2 改造前后流化干燥相关参数的计算与核算

2.2.1 计算条件

热空气参数: 体积流量 100 000 m^3/h , 进气温度 120 $^{\circ}C$, 排气温度 55 $^{\circ}C$, 黏度 0.022 7 $mPa \cdot s$, 密度 0.887 1 kg/m^3 。

磷酸一铵颗粒物料参数: 颗粒物料质量流量 15 000 kg/h , 颗粒密度 1 800 kg/m^3 , 颗粒堆积密度 900 kg/m^3 , 颗粒平均直径 0.146 mm , 颗粒最小直径 0.104 mm , 颗粒最大直径 0.297 mm , 粒子形状修正系数取 0.9。

喷粉塔条件: 磷酸一铵颗粒物料在流化床中停留时间 10 ~ 15 min , 喷粉塔流化床层直径 4 040 mm , 喷粉塔扩大段直径 8 400 mm 。

2.2.2 相关通用数据的计算

基于上述计算条件及公式, 颗粒物料的临界速率、沉降速率及相关关键参数计算结果见表 3 与表 4。

表 3 磷酸一铵颗粒临界速率与沉降速率

Table 3 Critical and settling velocities of monoammonium phosphate particles

产品粒度	Ar	流化 Re	沉降 Re	临界速率/ $(m \cdot s^{-1})$	沉降速率/ $(m \cdot s^{-1})$
平均粒径	94.16	0.17	3.98	0.030	0.698
最小粒径	34.03	0.07	1.49	0.017	0.368
最大粒径	792.63	1.30	25.92	0.112	2.238

表 4 喷粉塔关键设计参数与运行数据

Table 4 Key design parameters and operational data for spray tower

喷粉塔内流速/ $(m \cdot s^{-1})$		固定床层高度/ mm	固定床层孔隙率	流化床层高度/ mm	流化床层孔隙率	流化床层压降/ Pa	平均停留时间/ min
流化床	平均操作						
2.17	0.46	220.00	0.50	873.73	0.87	1 941.42	10.15

2.2.3 改造前流化干燥相关参数的计算与核算

改造前风帽的数量为 2 043 个, 风帽规格为 $\phi 43 mm$, 风帽孔数量为 8 个, 孔径为 6.5 mm , 基于上述计算条件及公式, 分布板压降等关键运行参数的计算结果见表 5。

表 5 改造前流化干燥相关参数

Table 5 Parameters of fluidized bed drying before transformation

风帽数量/个	风帽孔气速/ $(m \cdot s^{-1})$	分布板实际开孔率/%	分布板压降/ Pa
2 043	51.24	4.23	2 329.54

2.2.4 改造后流化干燥相关参数的计算与核算

风机性能一定条件下,由颗粒沉降速度决定分布板面积;风帽规格一定条件下,风帽间距参考前设计取一参考值,根据分布板截面积算出风帽个数,由此计算出分布板开孔率、风帽孔气速、分布板压力降、风帽空阻力系数,进行校核,保证各参数在合理范围之内即满足设计要求。改造后风帽的数量应为2 620个,风帽规格为 $\phi 33$ mm,风帽孔数量为8个,孔径为6.8 mm,基于上述计算条件及公式,分布板压降等关键运行参数计算结果见表6。

表6 改造后流化干燥相关参数

Table 6 Parameters of fluidized bed drying after transformation

风帽数量/ 个	风帽孔气速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	分布板实际 开孔率/%	分布板压降/ Pa
2 620	36.51	5.94	1 182.56

2.2.5 计算结论

影响流化质量的关键因素包括雾化系统、气流速率、颗粒特性、床层结构、分布板设计及内构件等。由于因素复杂且交互性强,需基于干燥推动力进行定性分析。在物料流量、雾化条件与停留时间一定的条件下,干燥效果的提升主要取决于进风温度、风量等条件。

当床层高度与进气温度确定时,为满足出料水含量要求,所需热量由风机提供。在风机特性参数选定条件下,优化分布板开孔率及结构是保障流化质量最有效的途径。

改造前后计算数据的对比表明,改造前喷雾干燥系统存在以下主要问题:

(1) 风机压头设计不足。分布板阻力降与风机全压失配,净压头裕量低于装置稳定运行阈值。

(2) 分布板结构缺陷。阻力降偏高,风帽孔气速过高,布气不均。

具体表现为:风机全压设计值为5.7 kPa(入口-1.0 kPa,出口+4.7 kPa),但改造前系统总阻力达4.27 kPa(床层压降1.94 kPa+分布板压降2.33 kPa),导致净压头裕量仅为0.43 kPa,占风机出口风压的9.15%,富余压头不足。同行业磷酸一铵喷粉塔风机全压普遍设计为7~8 kPa(裕量 $\geq 20\%$),运行稳定性显著优于本系统。

改造后,风帽采用正三角排列,分布板开孔率由4.23%提高至5.94%(增幅40.42%),气体分布均匀性得以改善;开孔率提升使单孔通量降低,风帽孔气速从51.24 m/s降至36.51 m/s(下降28.7%),

有效消除局部沟流与死区。分布板压降从2.33 kPa降至1.18 kPa(下降49.4%),净压头裕量从0.43 kPa增至1.58 kPa(增加267%),占风机出口风压比例从9.15%提升至33.62%。在恒定风量与停留时间下,充足的裕量保证了系统稳定运行。

3 技改措施

3.1 风帽组合方式优化

风帽排列方式主要有同心圆排列法、正方形排列法和正三角形排列法。同心圆排列法外围风帽间距不均,易导致边缘气流紊乱,非圆形场域适用性差,加工精度要求高。正方形排列法对角线方向间距过大($\sqrt{2}$ 倍边长),覆盖均匀性差,易形成局部涡流死角。正三角形排列法空间覆盖率最高(90.7%),间距均匀无死角;六向对称气流抑制湍流干扰,抗压均衡性最优。

基于设备紧凑性、管板强度及制造安装维护便利性的综合考量,将分布板风帽组合方式由同心圆排列调整为等边三角形布置。因排列层数超过6层,需在管板边缘的六边形与圆形边界间的弓形区域补设风帽,故于外圈增设环形分布风帽^[8]。该等边三角形布局显著提升了塔内气流均匀性,有效消除气流死角,避免物料局部堆积导致的压床现象^[9]。增设的双圈环形风帽进一步强化边缘气流,弥补传统设计的气流衰减缺陷,减少壁面积料,使喷粉塔内气流场更趋于稳定合理,为物料高效干燥创造有利条件。

3.2 风帽数量与尺寸确定

重新设计分布板,其规格为 $\phi 4\ 080$ mm $\times 20$ mm。通过详细的计算分析,确定风帽的数量为2 620个,风帽规格为 $\phi 33$ mm,风帽孔数量设计为8个,孔径设计为6.8 mm。在布局上,采用正三角形布置的风帽有2 290个,其中中心间距设定为74 mm。此外,在外圈增设环形风帽,其中一圈风帽孔所在圆半径为1 906 mm,数量为162个;另一圈风帽孔所在圆半径为1 980 mm,数量为168个。

该优化方案将开孔率由4.23%提升至5.94%,显著降低了风帽孔气速和分布板压降,一方面能够保证喷粉塔获得充足的通风量,满足干燥工艺对风量的需求^[10];另一方面,通过合理的风帽布局,确保了气流在塔内能够均匀分布。稳定且均匀的气流环境,为喷粉塔的稳定运行提供了有力保障,避免因风量不足或气流不均导致的物料干燥不充分、塔内局部物料堆积等问题^[11],从而有效提升喷粉塔的运行效率和产品质量。

4 运行效果

4.1 带料冷塔试验

风帽布局技改实施后, 专项开展带料冷态模拟试验, 通过该试验验证气流分布优化效果, 并为系统阻力特性分析与运行参数优化提供关键数据支撑。试验设定关键参数: 料层高度 ≈ 260 mm, 物

料负载 3 t, 出料口高度 800 mm。操作过程中, 以高压风机额定电流为硬性约束条件, 通过变频器阶梯调节风机转速 (15 ~ 38 Hz), 系统采集不同工况下塔内气压梯度、物料流态化状态及能耗数据, 具体数据见表7。

由表7数据可知, 随着高压风机与主供风机风

表7 带料冷塔试验数据

Table 7 Test data of the material-loaded cooling tower

序号	设备名称	变频/Hz	电流/A	风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	风室表压/kPa		
					底部	中部	顶部
1	高压风机	15	4.25 ~ 7.25	60 230	0.8	-1.8	-1.5
	尾气引风机	25	60				
	主供风机	25	126.3				
2	高压风机	25	6.28 ~ 10.37	33 000 ~ 70 000	2.2	-1.4	-1.2
	尾气引风机	25	60				
	主供风机	25	127.5				
3	高压风机	25	11 ~ 15	68 000 ~ 100 000	2.1	-0.9	-0.9
	尾气引风机	25	72				
	主供风机	30	153.6				
4	高压风机	30	20.15 ~ 23.45	70 000 ~ 100 000	2.9	-0.5	-0.5
	尾气引风机	25	75				
	主供风机	30	155.6				
5	高压风机	35	23.87 ~ 27.66	80 000 ~ 103 500	3.7	-0.3	-0.4
	尾气引风机	35	97.78				
	主供风机	35	182.6				
6	高压风机	38	23.44 ~ 30.15	84 000 ~ 110 000	4.0	-0.4	-0.4
	尾气引风机	38	116.7				
	主供风机	38	199.8				
7	高压风机	35	20.15 ~ 25.68	90 000 ~ 100 000	3.4	-0.4	-0.4
	尾气引风机	35	118				
	主供风机	35	184				
8	高压风机	35	19.05 ~ 25.74	110 000	3.3	-0.4	-0.4

注: 序号7为物料挡板高度为600 mm时各项数据; 序号8为物料挡板高度小于400 mm时各项数据。

量递增, 进入喷雾干燥系统的总风量呈递增趋势。在排料口压力动态监测中发现: 带料试验第1~4阶段, 当风量处于低级数区间时, 排料口呈现较高负压状态, 物料输送受阻导致无物料排出; 试验进行至第5阶段, 随着风量级数提升, 排料口压力由负转正, 开始出现物料排出现象; 至第6阶段, 排料口正压状态持续强化, 排料量显著增加。此时, 流化床呈现出良好的流化效果, 经现场实测, 能明显感受到向上的气动力。表明在该工况下, 物料与气流接触较为充分, 流化状态达到了预期的试验目标^[12]。

4.2 清理周期延长

喷粉塔分布板技术改造后, 其运行稳定性显著

提升, 清理周期由原7~10 d延长至15~20 d, 接近行业先进水平; 清理频率的降低有效减少了受限空间作业次数及伴随的安全风险, 同时降低了对关联非停机工段工艺稳定性的扰动, 为生产系统的长周期、稳定运行提供了有力保障。

4.3 产品质量提升

技改优化了塔内物料流态与热风分布, 使出料温度得到有效控制, 并稳定在55~60 °C的理想区间, 同时产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 被精准控制在0.5%~0.8%的合格范围^[13]; 关键质量参数的稳定控制显著减少了因温度波动或水分超标导致的产品不合格情况^[14], 产品在粒度、流动性、溶解性等关键指标上表现更优, 整体质量水平及市场竞争力得到明显

提升。

4.4 生产成本降低

清理周期的延长显著减少了停机次数及非停机设备的无效能耗（如风机、热风炉等空载运行消耗），直接降低了单位产品的运行成本；同时，产品质量的稳定提升大幅度减少了因不合格品返工、回溶或降级处理所产生的额外质量损失成本；两者共同作用，使得磷酸一铵的生产成本有效下降，切实提高了生产线的经济效益。

5 结论

通过对磷酸一铵喷粉塔分布板的系统优化，成功解决了喷粉塔运行过程中存在的诸多问题，显著提高了喷粉塔的运行效率和产品质量，降低了生产成本。本次优化措施具有一定的创新性和实用性，为同行业类似装置的分布板优化提供了有益的借鉴和参考。实践应用证明，该方案有效提升了装置运行的稳定性与连续性，产品质量指标（如粒度、水分、出料温度）得到显著改善，同时降低了能耗与维护成本，经济效益可观。其成功经验对解决同类装置瓶颈问题、提升行业整体技术水平具有重要示范意义和推广价值。

[参考文献]

- [1] 刘杰华.66%粉状磷酸一铵生产改进[J].磷肥与复肥,2021,36(11):15-17.
LIU J H. Production improvement of 66% powdered MAP [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021,36(11):15-17.
- [2] 张海滨,覃新艳,陈际显,等.喷雾冷却流化床的原理及节能效果分析[J].盐科学与化工,2023,52(12):48-51.
ZHANG H B, QIN X Y, CHEN J X, et al. Principle of spray cooling fluidized bed and analysis of its energy-saving effect [J]. Journal of Salt Science & Chemical Industry, 2023, 52 (12) : 48-51.
- [3] 沈维云,汤明义,郑光明.粉状磷酸一铵喷粉塔技术改造[J].磷肥与复肥,2015,30(3):30.
SHEN W Y, TANG M Y, ZHENG G M. Technical modification of spray drying tower for powdered monoammonium phosphate [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2015,30(3):30.
- [4] 范晓波.浅谈流化床干燥器工作原理及常见故障的处理措施[J].中国井矿盐,2023,54(6):22-23.
FAN X B. Brief discussion on the working principle of fluidized bed dryer and the treatment measures of common faults [J]. China Well & Rock Salt, 2023, 54(6):22-23.
- [5] 李英翔,吴长莹,念吉红.工业级磷酸一铵生产干燥系统技术改造[J].磷肥与复肥,2018,33(7):12-13,27.
LI Y X, WU C Y, NIAN J H. Technical transformation of drying system for industrial grade MAP production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018,33(7):12-13,27.
- [6] 吴占松,马润田,汪展文.流态化技术基础及应用[M].北京:化学工业出版社,2006:48-53.
- [7] 丁德承.颗粒物料临界速度和沉降速度的工程计算[J].硫磷设计与粉体工程,2009,19(5):1-7.
DING D C. Engineering calculation of critical velocity and settling velocity of granular materials [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2009,19(5):1-7.
- [8] 史美中,王中铮.热交换器原理与设计[M].南京:东南大学出版社,2018.
- [9] 于春鹏.化工设备设计手册[M].北京:化学工业出版社,2005:706-708.
- [10] 徐益勇.流化床造粒的工艺优化分析[J].化纤与纺织技术,2021,50(1):89-90.
XU Y Y. Analysis of process optimization for fluidized bed granulation [J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50 (1):89-90.
- [11] 郑永琴.磷酸一铵喷雾干燥塔的工艺优化[J].磷肥与复肥,2020,35(2):18-19.
ZHENG Y Q. Process optimization of spray drying tower for monoammonium phosphate production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020,35(2):18-19.
- [12] 于才渊,王宝和,王喜忠.喷雾干燥技术[M].北京:化学工业出版社,2013:271-272.
- [13] 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 X, WANG Q D, ZHANG H X, et al. Control method of nutrient in powdery monoammonium phosphate production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(2):18-20.
- [14] 杨雄.一种控制粉状磷酸一铵产品水含量的方法[J].磷肥与复肥,2023,38(3):17-18.
YANG X. A method for controlling water content of powdered MAP product [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38 (3):17-18.