

硫酸铵喷浆造粒工艺优化

夏文柏, 张洪绪, 朱 胜

(瓮福(集团)有限责任公司 瓮福化工公司, 贵州 福泉 550501)

[摘要] 喷浆造粒工艺生产粒状硫酸铵市场竞争日趋激烈, 为提升造粒效率、降低生产能耗、提高产品市场竞争力, 对喷浆造粒工艺进行优化探索, 并对工艺优化的效益进行评估。针对硫酸铵喷浆造粒工艺生产过程中存在的问题, 通过对料浆制备及输送系统技改、料浆分布优化、料幕及热风分布优化、造粒干燥半成品筛分优化、完善造粒母料不足应急调整设施, 产品包裹油消耗及能耗显著下降, 年节省人力成本10万元, 装置产品合格率稳步提升, 粒状硫酸铵全年产品一次合格率达到99.53%, 同时比提升0.23%。提出了潜在的优化方向, 包括自动化控制系统的引入、新型造粒助剂的开发与应用、热风系统的再优化、筛分系统的智能化改造; 并对粒状硫酸铵生产的发展方向进行展望, 将向绿色化、智能化和高效节能方向发展。

[关键词] 粒状硫酸铵; 喷浆造粒工艺; 优化措施; 发展方向

[中图分类号] TQ441.11 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 04-0062-05

Optimization of ammonium sulfate spray granulation process

XIA Wenbai, ZHANG Hongxu, ZHU Sheng

(Wengfu Chemical Company, Wengfu (Group) Co., Ltd., Fuquan 550501, China)

Abstract: The market competition of granular ammonium sulfate with spray granulation technology is becoming increasingly fierce. In order to improve granulation efficiency, reduce energy consumption, and enhance market competitiveness, the spray granulation process is optimized, and the benefits of process optimization is evaluated. In response to the problems in ammonium sulfate spray granulation process, technical improvements are made, such as technology transformation of slurry preparation and transportation system, slurry distribution optimization, material curtain and hot air distribution optimization, screening optimization, and improvement of emergency adjustment facilities for insufficient granulation mother materials. As a result, the consumption of wrapped oil and energy are significantly decreased, saving labor costs of 100 000 RMB Yuan per year. The product qualification rate of this device is steadily increased, and the first pass qualification rate of granular ammonium sulfate products for the whole year is 99.53%, with an increase of 0.23% year-on-year. And potential optimization directions are proposed, including the introduction of automation control systems, the development and application of new granulation additives, the reoptimization of hot air systems, and the intelligent transformation of screening systems; The development directions are proposed that the production of granular ammonium sulfate will develop towards green, intelligent and efficient energy conservation.

Key words: granular ammonium sulfate; spray granulation process; optimization measure; development direction

硫酸铵是一种重要的化肥和工业原料, 作为氮源可提供植物所需的氮, 促进作物生长; 作为硫源, 有助于蛋白质和酶的形成; 作为工业原料, 可作为制造阻燃材料、水处理沉淀剂(去除水中的杂质^[1])的原料。硫酸铵易溶于水, 便于植物吸收, 同时提供氮和硫, 满足植物多种需求; 化学性质稳定, 便于储存和运输; 价格相对较低, 适合大规模使用。

颗粒状硫酸铵便于机械施肥, 有利于提高施肥

效率, 施肥时肥料分布均匀, 可以避免局部肥料浓度过高。随着全球农业需求增加, 特别是东南亚和南美地区, 助推了我国粒状硫酸铵出口量增长。2020年受新冠疫情的影响, 全球供应链受到冲击, 但我国凭借强大的生产能力和稳定的供应链, 硫酸铵国际市场份额继续增长。中国海关统计数据

[收稿日期] 2024-03-07; **[修回日期]** 2025-02-25

[作者简介] 夏文柏(1987-), 男, 云南昭通人, 工程师, 从事磷化工生产管理和技术研究工作。

显示, 2024年我国累计出口硫酸铵1 712.37万t, 同比增长24.35%, 再创历史新高。我国粒状硫酸铵在全球市场中占据主导地位, 市场份额逐步增长。我国粒状硫酸铵的全球市场份额从2018年的50%增长到2023年的60%, 年均增长率约为2%, 预计未来我国粒状硫酸铵的全球市场份额将保持在60%~62%。

喷浆造粒工艺生产的粒状硫酸铵产品颗粒均匀统一, 强度高, 圆润度高, 流动性极佳^[2], 适于大面积机械化施肥, 在澳大利亚、新西兰等目标市场, 受到客户高度认可。近年, 石油化工、煤化工、冶金、新能源领域副产挤压粒状硫酸铵产能不断释放, 粒状硫酸铵产品市场竞争日趋激烈。因此, 亟须通过探索优化硫酸铵喷浆造粒工艺, 提升造粒效率, 从而降低生产能耗, 提高产品市场竞争力^[3]。

1 硫酸铵喷浆造粒典型工艺简介

以某2×50 kt/a硫酸铵装置为例, 其采用硫酸铵料浆混配造粒助剂喷浆造粒工艺, 其成粒形式有喷浆涂布、黏结及自成粒, 其中涂布为主要成粒形式。原料硫酸铵料浆($w(\text{硫酸铵})$ 40%~50%)、造粒助剂经计量后按配比添加进入料浆制备系统, 充分混合后用泵输送至造粒干燥机内, 经喷枪分散后与造粒返料、热风(500~550℃)顺流进行造粒、干燥, 造粒干燥半成品通过斗提机输送至筛分机筛分, 上层筛出的大粒子经破碎机破碎后与下层筛出的细粒子经返料皮带返回造粒干燥机作为母料循环涂布造粒, 中层粒径合格粒子(粒径为2~4 mm, 温度90~100℃)进入成品冷却器, 冷却至50~

60℃后进入包裹筒, 与防结块剂混合包裹后输送至包装线包装。

喷浆造粒工艺硫酸铵生产工艺流程如图1所示。

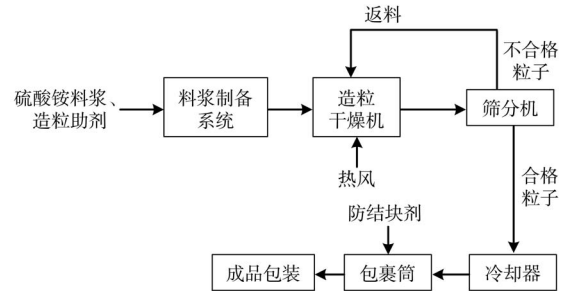


图1 喷浆造粒工艺硫酸铵生产工艺流程

Fig. 1 Production process of ammonium sulfate by spray granulation process

2 硫酸铵喷浆造粒工艺过程存在的问题

2.1 原料硫酸铵料浆成分不稳定

案例装置硫酸铵喷浆造粒工艺原料来源广泛, 主要包括热电脱硫所得硫酸铵料浆、硫黄制硫酸脱硫所得硫酸铵料浆、新能源材料生产副产物硫酸铵料浆等。不同类型原料的主要成分(原料成分见表1)及造粒特性不尽相同, 因此缓存设施及计量设施非常重要, 必须完备。若原料硫酸铵料浆组成控制不稳定容易导致造粒料浆涂布、黏结差异, 并最终影响造粒系统稳定。

此外, 系统清理粉状物料中容易掺杂塑料、棉线等杂物, 此部分物料无有效隔离设施, 当其进入生产系统后, 极易造成管路、泵阀、喷枪堵塞, 进而造成造粒干燥机内部热风热量与工况不匹配, 导致料床硫酸铵颗粒急速升温, 进而导致颗粒脆化、粉化甚至液化。

表1 不同来源硫酸铵料浆成分

Table 1 Composition of ammonium sulfate slurry from different sources

硫酸铵料浆来源	$w(\text{硫酸铵})/\%$	密度/ ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	$w(\text{水不溶物})/\%$	pH	$w(\text{总磷})/\%$	$w(\text{铁})/\%$	$w(\text{钙})/\%$	$w(\text{铝})/\%$	$w(\text{镁})/\%$	$w(\text{钠})/\%$	$w(\text{F})/\%$
新能源材料副产	42.525	1.271	0.885	2.933	0.89	0.046	0.035	0.003	0.294	0.003	0.036
热电脱硫所得	48.611	1.259	0	4.094	0	0	0	0	0	0	0
硫黄制硫酸脱硫所得	33.512	1.175	0	6.010	0	0	0	0	0	0	0

2.2 造粒干燥喷浆分布问题

案例硫酸铵装置造粒喷浆采用双喷枪, 喷枪有直喷、雾化喷两种类型, 根据系统粒度分布情况由管理人员现场研判后采取直喷+雾化、双直喷、双雾化喷枪组合方式, 并结合喷枪固定点、伸入长度进行调节, 以达到调整料浆分布、成粒形式, 最终调节系统产品粒径分布的目的。由于组合调整方式受雾化程度、喷枪位置、伸入长度等人为操作变量

的交叉影响, 料浆分布调控存在较大的人为操作差异, 不利于系统造粒工况的稳定控制。

2.3 造粒干燥机造粒段料幕分布和热风分布问题

装置造粒干燥机由造粒段、干燥段组成, 两段由中部挡圈相对隔离两段物料, 造粒段返料经抄板旋转抬升至顶部后下落形成料幕, 并与干燥热风和硫酸铵料浆完成换热、传质^[4], 原中部挡圈均布800 mm×300 mm圆弧形物料通道, 造粒段前端料

层稀疏,料幕存在部分缺失区,料浆分散后无法有效涂布,部分料浆直接黏结至抄板,加速了抄板结疤^[5];因风管空间布置限制,原热风通道为密封罩两侧双通道供风,热风于两侧集中进入造粒机,由于风道过于集中,风速较大,导致造粒段部分区域物料温度过高,从而造成部分物料熔化,影响造粒效果^[6]。

2.4 造粒干燥半成品筛分问题

案例硫酸铵装置A、B系列半成品筛分空间布局略有差异,筛分机性能亦有差别。A系列采用原装进口德瑞克高频振动筛,进料方向为逆流,半成品颗粒进入筛面后形成缓冲,物料流动较平缓,进料溜管走向为筛分机侧面斜向布置,筛面物料分布均匀性略差,高负荷筛分时易出现筛分不彻底情况。B系列筛分机,机身为国产不锈钢总成件,振动电机为德瑞克高频条形电机,机身总质量较A系列大,因安装空间走向原因,进料方向为顺流,物料进入筛面无缓冲过程,流速较快,导致筛分不彻底,约有5%的合格粒子进入破碎机,20%的细粒子进入成品溜管。因此,前期为保证产品质量,在半成品筛装置下方设有二次筛,对含细粒子的半成品进行再筛分,不仅增加了能耗,而且使B系列造粒控制影响因素较A系列更为复杂。

2.5 造粒母料不足时应急调整设施不完善

案例硫酸铵装置双系列均存在因产品取出量大造成造粒母料量不足的情况。采取的应急调整措施仅有喷枪种类更换、喷枪位置改变,调整准确性和反馈准确度有限,容易出现系统造粒母料拉空的情况,造成紧急停车。

3 粒状硫酸铵装置造粒工艺改进措施探索

3.1 料浆制备及输送系统技改

3.1.1 实现料浆制备精确配料,稳定料浆中造粒助剂含量

案例硫酸铵装置料浆制备系统存在原料计量不完善情况,硫黄制硫酸脱硫料浆及尾气洗涤除尘污水计量缺失。

增加流量计后,实现了原料精确计量全覆盖,并结合各原料分析数据,从源头管控,稳定料浆原料配比,确保料浆物性稳定。技改后造粒助剂添加比例逐渐趋于稳定,技改前后料浆中造粒助剂质量分数标准偏差由1.5%降至0.5%。

3.1.2 完善输送系统过滤设施,稳定料浆输送

完善各级输送泵及加料口杂物过滤设施,在输送泵进口处增设过滤器,在加料口处增设过滤网,

定期清理杂物。

喷浆管线及喷枪堵塞次数较技改实施前减少160次/a,降幅达67.79%,因喷枪堵塞引起的造粒大幅度波动情况基本杜绝,料浆制备及输送稳定性明显改善。

3.2 料浆分布优化

针对原采取直喷枪与雾化喷枪组合模式进行喷浆,喷枪伸入长度、喷枪位置须频繁手动调整的情况,取消人为干预调整,采取双直喷枪,并固定喷枪位置、伸入长度,避免多因素变化对造粒带来的负面影响。

3.3 料幕及热风分布优化

针对造粒段前端料层偏薄,母料料幕分布不均情况,将原设计4个均布800 mm × 300 mm弧形物料通道尺寸改为800 mm × 150 mm,将造粒段料层厚度提升30%,强化前端料幕空间分布,消除母料料幕分布盲区^[7];针对热风通道过于集中问题,将两侧集中式进风通道改为组合均匀分布式条形进风通道。

3.4 造粒干燥半成品筛分优化

针对A系列筛分机进料溜管斜向进料,导致筛面物料分布不均问题,增加分料挡板,强化筛面物料分布;针对B系列筛分机机身偏重及顺流进料流速快问题,对筛分机机身进行减重改造,增大振幅,在进料溜槽下方增加进料挡板进行缓冲,同时将原上层5.0 mm方格筛网改为5.5 mm方格筛网,下层3.5 mm方格筛网改为3.8 mm方格筛网,提升筛分能力,取消二次半成品筛,简化造粒控制影响因素^[8-9]。

3.5 完善造粒母料不足时应急调整设施

针对造粒母料不足时应急调整设施不完善情况,在筛分机成品溜管上增设应急母料溜管至返料皮带,使系统具备造粒母料紧急补料功能。同时在造粒机出料密封罩增设自动破疤装置,实现造粒机出料疤块自破碎功能,不仅节省人力,同时在线破碎可提供额外母料补充。

4 案例装置喷浆造粒工艺改进取得的效益评估

4.1 产品包裹油消耗及能耗显著下降

4.1.1 产品包裹油消耗下降

通过该装置各工序针对性技改调整,喷浆造粒合格粒子量与产品取出量趋于平衡稳定,产品圆润度改善,吨产品包裹油消耗量显著下降(如表2所示),包裹油消耗降低0.515 kg/t,折合降低成本4.2元/t,年节约包裹油成本42万元。

表2 技改前后产品包裹油消耗

Table 2 Oil consumption of product packaging before and after technological transformation

项目	年份	累计包裹油消耗量/(kg·t ⁻¹)
技改前	2021	5.66
	2022	5.57
技改后	2023	5.10

4.1.2 产品能耗下降

技改后系统造粒放细料调整母料量情况减少,母料拉空情况得到有效遏制,系统运行更趋于平稳,吨产品煤耗、水耗及电耗均有所下降,如表3所示。2023年,工序吨产品年平均能耗(折标准煤)较2021—2022年均值降低11.94 kg,折合降低成本16.72元/t,按照装置10万t/a产能规模计算,每年可节约能源支出167万元。取消B系列二次筛分机,节省了二次筛分电耗及维修费用,共计6万元/a。

表3 技改前后产品能耗

Table 3 Energy consumption of products before and after technological transformation

项目	年份	累计工序能耗 ^① /(kg·t ⁻¹)
技改前	2021	192.88
	2022	195.27
技改后	2023	182.14

注:①以标准煤计。

4.2 其他效益

通过增加造粒机出料疤块破疤器,节省人力2人,年可降本10万元。得益于系统性梳理技改,该装置产品合格率稳步提升,粒状硫酸铵全年产品一次合格率达到99.53%,同比提升0.23%;系统计量及精准控制措施完善也为装置开发新型硫酸基肥奠定了基础。

5 进一步优化方向

尽管通过上述优化措施,硫酸铵喷浆造粒工艺的效率得到了显著提升,但仍有一些潜在的优化方向值得进一步探索。

5.1 自动化控制系统的引入

目前,硫酸铵喷浆造粒工艺的许多操作仍依赖于人工干预,尤其是在喷枪调整、料浆分布控制等方面。引入自动化控制系统,如PLC(可编程逻辑控制器)和DCS(分布式控制系统),可以实现对工艺参数的实时监控和自动调整,减少人为操作误差,进一步提高系统的稳定性和效率。

5.2 新型造粒助剂的开发与应用

造粒助剂在硫酸铵喷浆造粒过程中起到了关键作用,现有的造粒助剂虽然能够满足基本需求,但在提高颗粒强度、减少粉尘产生等方面仍有改进的空间。通过开发新型造粒助剂,可以进一步提升产品的质量和市场竞争力。

5.3 热风系统的再优化

热风系统是硫酸铵喷浆造粒工艺中的重要组成部分,热风的温度、流速和分布对造粒效果有着直接影响。通过优化热风系统的设计,如改进热风分布装置、引入热风循环利用技术等,可以进一步提高热能的利用效率,降低能耗。

5.4 筛分系统的智能化改造

筛分系统是确保产品粒度分布均匀的关键环节。通过引入智能化筛分设备,如基于机器视觉的筛分机,可以实现对筛分过程的实时监控和自动调整,进而提高筛分效率,减少不合格产品的产生量,提升一次产品合格率。

6 对粒状硫酸铵生产的展望

1) 减排技术升级

推行绿色生产工艺,着力开发低能耗、低排放生产工艺技术,有效减少二氧化碳、二氧化硫等温室气体及污染物的排放。

2) 资源循环利用

强化废水与废气回收处理系统,通过分级净化、闭环循环等技术手段,实现资源的高效循环利用。

3) 智能化生产体系

引入自动化控制系统,提升生产流程的精确性与稳定性;结合大数据分析 with 人工智能算法,动态优化工艺参数,实现生产过程的精准控制与质量追溯。

4) 节能技术应用

设备升级:采用高效节能反应器、低耗干燥设备及智能冷却系统,降低综合能耗^[10]。

余热深度利用:通过梯级回收工艺余热,实现发电、供热等多场景能源转化,提升能源综合利用率。

5) 新型原料路线探索

替代原料开发:探索使用更环保、更经济的原料,如工业副产品或废弃物,降低生产成本及环境负荷。

生物基原料研究:开展生物基原料(如秸秆发酵产物)制备硫酸铵的可行性研究,减少对化石资源的依赖。

6) 产品多元化创新

开发含微量元素的定制化硫酸铵复合肥,满足不同作物的需求。研究缓释技术,延长肥效,降低施肥频率与农业面源污染风险。

7 结语

硫酸铵喷浆造粒工艺各工序控制均对系统造粒有影响,笔者通过探索完善料浆制备系统计量设施、输送加料及过滤设施,优化造粒机料浆及热风分布,强化造粒段母料料幕,优化筛分布料及筛网尺寸,完善母料应急补充系统,产品造粒改善明显,并为进一步优化提升提供了系统性的参考。

未来粒状硫酸铵生产工艺的发展方向是绿色化、智能化和高效节能。通过技术创新、政策支持和国际合作,可以实现生产效率提升、成本降低和环境保护。同时,开发多样化的产品和满足市场需求也是未来发展的重要方向。

[参考文献]

- [1] 胡玲,黄解平,邵雪红,等.硫酸铵在净水工艺中的应用[J].供水技术,2013,7(5):48-50.
HU L, HUANG J P, SHAO X H, et al. Application of ammonium sulfate in water treatment process[J]. Water Technology, 2013, 7(5):48-50.
- [2] 刘召波,付云枫,陈宋璇,等.中国硫酸铵市场调研分析[J].绿色矿冶,2024,40(4):96-100.
LIU Z B, FU Y F, CHEN S X, et al. Market research and analysis of ammonium sulfate in China [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(4):96-100.
- [3] 张军,刘宏.喷浆造粒成粒率的影响因素及作用机制[J].磷肥与复肥,2016,31(8):22-23,27.
ZHANG J, LIU H. Effect factors of granulating rate of spraying granulation and its impact mechanism[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016,31(8): 22-23,27.
- [4] 丁德承,刘项.喷浆造粒干燥机在磷复肥生产装置上的发展应用及其工艺设计要素[J].化肥工业,2015,42(4):7-12.
DING D C, LIU X. Development and Application of Spheroidizing Dryer for Phosphate and Compound Fertilizer Production Plant and its Process Design Factors [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2015,42(4):7-12.
- [5] 刘玉良,陈文梅,雷明光.磷复肥喷浆造粒内返料技术研究与应用[J].化肥工业,2002,29(6):15-16.
LIU Y L, CHEN W M, LEI M G. Technological Study of Internal Recycle in Spheroidizers for Phosphatic and Compound Fertilizers and Application [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2002, 29(6): 15-16.
- [6] 靳同义,魏会林,刘俭平,等.影响磷铵料浆喷浆造粒质量的因素分析[J].磷肥与复肥,1998,13(3):45-47.
- [7] 吕彦龙,苏景利.硫基复合肥喷浆造粒工艺的技改点滴[J].磷肥与复肥,2006,21(1):63.
- [8] 方暄.φ4.75 m×18.5 m带内返料装置喷浆造粒干燥机的工艺设计[J].磷肥与复肥,2000,15(1):28-31,36.
FANG X. Process design of φ4.75 m× 18.5 m AP sphereodizer with internal recycling facilities [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2000,15(1):28-31,36.
- [9] 赵环帅.我国振动筛理论研究及技术应用进展[J].化工矿物与加工,2011,11:16-22,36.
ZHAO H S. Progress in theoretical research and technical application of vibrating screen in China [J]. Industrial Minerals & Processing, 2011, 11: 16-22, 36.
- [10] 绳新安.喷浆造粒干燥机的发展和应用概论[J].化工设计通讯,2005,31(1):32-34.
SHENG X A. Development and Application of Spray Granulation Drier [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2005, 31(1):32-34.
- [21] 覃晓捷,文静波,孙文仙,等.水热法合成 $Fe_3(PO_4)_2$ 中间体制备 $LiFePO_4/C$ 的研究[C]//中国硅酸盐学会固态离子学分会.第16届全国固态离子学学术会议暨下一代能源材料与技术国际研讨会论文集.成都:中国硅酸盐学会固态离子学分会,2012:21.
Acta Physico-Chimica Sinica, 2014,30(5): 866-872.
- [22] QIN X Z, YANG G, CAI F, et al. Recovery and reuse of spent $LiFePO_4$ batteries [J]. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 2019,22(3): 119-124.
- [23] 赵红伟,施志聪.废旧磷酸铁锂电池正极材料回收技术进展[J].电池工业,2021,25(5):271-278,282.
ZHAO H W, SHI Z C. Research on Recycling Technique of Cathode Materials of Spent Lithium Ion Phosphate Batteries [J]. Chinese Battery Industry, 2021,25(5):271-278,282.
- [24] 陈永珍,黎华玲,宋文吉,等.废旧磷酸铁锂电池回收技术研究进展[J].储能科学与技术,2019,8(2):237-247.
CHEN Y Z, LI H L, SONG W J, et al. A review on recycling technology of spent lithium iron phosphate battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019,8(2):237-247.
- [25] 董敏,胡启阳,李新海,等.废旧磷酸铁锂电池高值回收制备磷酸铁锂材料[J].中国有色金属学报,2023,33(5):1601-1610.
DONG M, HU Q Y, LI X H, et al. High value recovery of waste lithium iron phosphate batteries to prepare lithium iron phosphate materials [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(5): 1601-1610.

(上接49页)