

◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

喷浆硫基复合肥装置尾气超标原因分析及改进措施

张广忠, 严东宁, 闫涛, 李先亮, 孙亮, 王州, 李文玉, 乐栋, 陈建福

(松滋史丹利宜化新材料科技有限公司, 湖北荆州 434200)

[摘要] 为解决松滋史丹利宜化新材料科技有限公司喷浆硫基复合肥生产尾气氨排放浓度超出环保B级绩效标准的问题, 系统分析尾气氨主要来源, 并实施综合性改进措施。在工艺操作上, 严格控制管式反应器出口料浆中和度(由 >1.8 优化至 ≤ 1.6), 将成品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 由 $<1.0\%$ 提高至 $1.0\% \sim 2.0\%$ 以降低造粒温度, 并适当降低生产负荷; 在尾气处理系统上, 将尾洗一段洗涤由水洗改为酸洗并将洗涤液外送以维持系统水平衡, 同时将洗涤喷头由花篮式更换为雾化效果更好的涡流喷头, 并对管道布局进行外置化改造以提升洗涤效率和便于维护。改造后, 尾气 $\rho(\text{NH}_3)$ 显著下降, 日均值可稳定控制在 10 mg/m^3 左右, 远低于 40 mg/m^3 的管控要求。通过源头控制(优化工艺参数)与末端治理(升级洗涤系统)相结合的策略, 能有效解决喷浆硫基复合肥生产中尾气氨超标问题, 为实现环保B级绩效目标提供了切实可行的技术方案。

[关键词] 喷浆硫基复合肥; 尾气处理; 氨排放; 工艺优化; 环保绩效

[中图分类号] TQ444.2 [文献标志码] B [文章编号] 2097-4566 (2026) 03-0071-05

Analysis of reasons for excessive exhaust gas in spraying sulfur-based compound fertilizer and improvement measures

ZHANG Guangzhong, YAN Dongning, YAN Tao, LI Xianliang, SUN Liang, WANG Zhou,
LI Wenyu, LE Dong, CHEN Jianfu

(Songzi Stanley Yihua New Material Technology Co., Ltd., Jingzhou 434200, China)

Abstract: To address the issue of excessive ammonia emissions in the exhaust gas from the production of sulfur-based compound fertilizers at Songzhi Stanley Yihua New Material Technology Co., Ltd., which exceeds the environmental performance standard of Grade B, a comprehensive improvement strategy is implemented through systematic analysis of ammonia sources in the exhaust gas. Strictly control the neutralization degree of the slurry at the tubular reactor outlet (which is optimized from >1.8 to ≤ 1.6), increase the finished product moisture content from $<1.0\%$ to $1.0\% - 2.0\%$ to reduce granulation temperature, appropriately reduce the production load. In exhaust gas treatment system, the first-stage scrubbing is changed from water washing to acid washing, and the scrubbing liquid is redirected to maintain system water balance, the basket-type spray nozzles are replaced with swirl nozzles for better atomization, the pipeline layout is modified to an externalized design to enhance scrubbing efficiency and facilitate maintenance. After the modifications, the ammonia emission concentration in the exhaust gas significantly decreases, the daily average value stabilizes at around 10 mg/m^3 , far below the control requirement of 40 mg/m^3 . Combining source control (optimizing process parameters) with end-of-pipe treatment (upgrading the scrubbing system) effectively resolves the issue of ammonia emissions exceeding standards in sulfur-based compound fertilizer production, providing a practical technical solution to achieve Grade B environmental performance goals.

Key words: spraying sulfur-based compound fertilizer; exhaust gas treatment; ammonia emissions; process optimization; environmental performance

2024年我国复合肥总销量约6 100万t^[1], 史丹利农业集团股份有限公司复合肥销量334万t, 同比增长12.68%, 硫基复合肥为核心产品之一。但由于环保相关要求趋严^[2], 对于化工生产企业排放

要求较高。松滋史丹利宜化新材料科技有限公司(简称公司)硫基复合肥装置为新装置, 因荆州市环保政策原因, 经常性要求停止生产, 导致系统开停车频繁, 系统指标波动大, 并且无法预测生产周

收稿日期: 2025-11-02

作者简介: 张广忠(1976—), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 主要从事生产技术管理工作。

期，造成硫基复合肥生产异常被动。荆州市对所有的企业按照一定要求进行分级，环保A级绩效企业减排压力最小，在满足环境保障要求时，基本可维持正常生产；环保B级绩效企业在环保红色预警I级响应时，须适当地降低系统负荷，减少装置的排放量；环保C级绩效企业是环保重点管控对象，红色预警I级响应时须全面停产。为避免后期因环保原因导致复合肥装置全面停产，至少需要达到环保B级绩效标准。环保B级绩效标准氨排放限值为40 mg/m³，公司复合肥造粒氨排放数据高于这一标准，因而解决此问题已是迫在眉睫。

1 喷浆硫基复合肥装置工艺流程

1.1 转化

公司喷浆硫基复合肥生产采用低温转化技术^[3]，氯化钾通过计量皮带送至转化槽（2格方槽，内部进行防腐设计）内，转化槽内通过蒸汽换热，保证反应温度控制在115℃，与送至槽内的硫酸进行反应，生成硫酸氢钾与氯化氢^[4]。转化反应方程式如下：



氯化氢气体经过风机送入尾气处理系统^[5]，经过3级降膜及3级吸收塔进行处理，盐酸溶液经过输送泵送至盐酸罐区；料浆经过溢流进入收集槽，通过输送泵送至混酸槽^[6]，与磷酸槽送来的磷酸按照一定的比例混合（按照成品的养分情况，调整料浆比例情况），得到中和需要的酸性物料。转化工艺流程见图1。

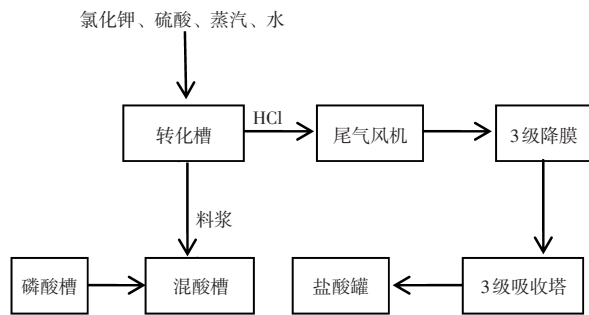
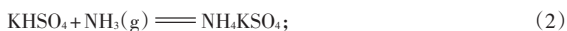


图1 转化工艺流程
Fig. 1 Process flow of conversion

1.2 中和造粒（湿线）

混酸槽的混酸通过输送泵送至管式反应器^[7-8]，与氨站送过来的气氨进行反应，将物料中和度控制在1.3左右，反应生成磷酸一铵、磷酸二铵、硫酸铵^[9]等物料，反应方程式如下：



充分反应的物料溢流至闪蒸槽，反应产生的气体通过管道进入尾气处理系统^[10]。料浆通过溜管溢流至喷浆地下槽，通过喷浆泵送至造粒机进行造粒^[11]，物料在造粒机中与热风炉送过来的热风进行换热，得到大小不一的颗粒物料。中和造粒系统工艺流程见图2。

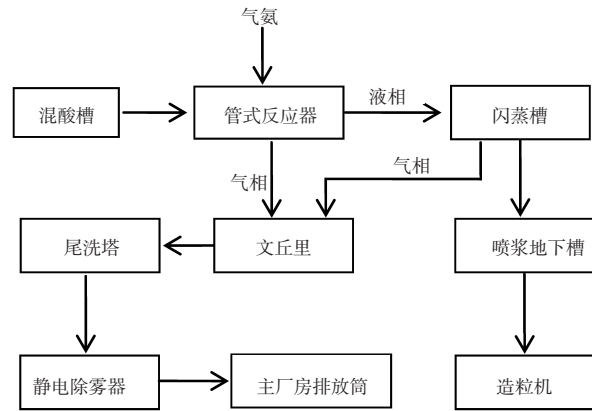


图2 中和造粒系统工艺流程

Fig. 2 Process flow of neutralization granulation system

1.3 成品筛分（干线）

出造粒机的颗粒物料通过斗提机送至滚筒粗筛、滚筒细筛，筛分出的大颗粒送至破碎机破碎，破碎的粉末与小颗粒一起返回造粒机，筛分后合格的颗粒送至滚筒流化床造粒冷却机，喷涂添加一定比例黏结剂的尿素溶液，然后经精筛进料斗提机送入滚筒精筛进一步筛分，合格颗粒进入板式冷却器冷却，冷却后的半成品，通过半成品计量秤送入包膜机包膜，成品由成品皮带机送去包装。筛分、破碎、冷却所产生的废气，通过布袋除尘器过滤后，进入排放筒排放。筛分工艺流程见图3。

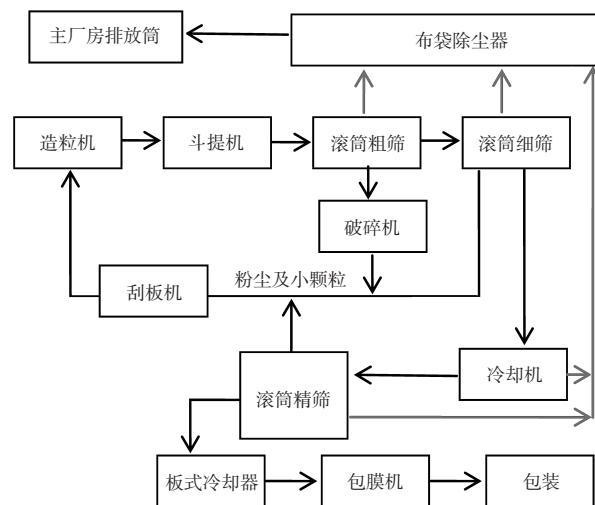


图3 筛分工艺流程

Fig.3 Process flow of screening

2 复合肥装置尾气氨的来源

技改前复合肥装置尾气 $\rho(\text{NH}_3)$ 如表1所示。

表1 技改前复合肥装置尾气 $\rho(\text{NH}_3)$

Table 1 NH_3 content in tail gas of compound fertilizer plant before technical transformation

日期	产品类型	$\rho(\text{NH}_3) / (\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$		备注
		最高值	平均值	
2月1日	硫基复合肥	134.42	49.84	尾洗一段
2月2日		89.22	50.13	采用水洗
2月3日		40.82	18.08	
2月4日		28.42	6.45	
8月28日	硫基复合肥	99.17	26.31	尾洗一段
8月29日		52.72	33.85	采用酸洗
8月30日		49.65	25.74	
8月31日		44.05	32.68	
9月1日		56.8	23.37	
9月16日	颗粒二元肥	41.87	22.50	尾洗一段
9月17日		35.72	25.01	采用酸洗
9月18日		37.14	26.79	
9月19日		58.2	34.82	
9月20日		45.38	30.05	

从表1可以看出,将尾洗一段由水洗改酸洗并将酸洗液外送的情况下,尾气带氨的情况有所改善;在同样酸洗的条件下,颗粒二元肥的尾气氨含量状况,略优于15-15-15的硫基复合肥。

2.1 未反应氨的逃逸

氨与磷酸反应过程中,由于管式反应器反应时间过短以及指标波动,在有些情况下,未及时调整,导致终点料浆中和度达到1.8以上,料浆中和度高会导致部分氨未与磷酸反应^[12],从而在料浆中逸出进入水蒸气中^[13],从而导致尾气处理氨的负荷过大。

2.2 磷酸二铵分解

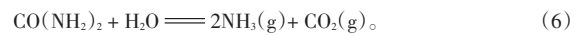
采用工业磷铵渣浆与复合肥系统联产颗粒二元肥时^[14-15],尾气氨含量明显低于硫基复合肥。这是因为为确保造粒系统的正常运行^[16],硫基复合肥终点中和度远高于磷酸一铵,在此过程中会产生大量的磷酸二铵,磷酸二铵的热稳定性要低于磷酸一铵^[17],在高于155℃(造粒机机头温度400℃左右)可能出现分解的情况^[18],并且在分解的过程中会释放氨气。磷酸二铵分解反应方程式如下:



2.3 尿素分解

系统生产喷浆硫基三元复合肥时,为提高成品氮含量,需要往喷浆地下槽添加尿素进行提氮^[19]

(生产12-18-15的品种可不添加,其他品种吨成品添加70kg左右),成品需要的氮含量越高,则需要添加的量越大^[20]。系统生产掺混肥时,因为可从后端添加大颗粒尿素^[21],因此进入造粒系统的尿素量会有所减少(吨成品30kg左右)。由于尿素的热稳定性差^[22],在130~140℃开始缓慢分解^[23],160℃以上快速分解(造粒机机头温度400℃左右)。尿素分解反应方程式:



2.4 小结

复合肥尾气氨的来源可能为未反应完全的氨、磷酸二铵分解、尿素分解,为解决尾气氨含量超标问题,需要适当控制氨的产生量,并且需要考虑后续系统的处理量。

3 尾气超标原因分析

3.1 成品水含量控制过低

成品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 控制在1%以下,甚至低于0.5%以下,导致造粒机机头及机尾温度不得不上限控制,物料表面水分快速蒸干^[24],从而导致物料与高温气体长时接触,造成磷酸二铵及尿素分解的情况加剧,导致造粒系统的尾气氨含量超标。

3.2 尾气处理系统设计不合理

尾洗系统原始设计时,采用水洗的方式降低尾气氨排放量,尾气物料温度过高,导致溶解的氨及形成的氨水以气氨的形式逸出^[25],从而尾气氨含量难以下降。后期虽然尾选一段采用稀酸进行洗涤^[26],但为避免打破整个系统水平衡,加入量不宜过大,否则会导致尾洗物料pH过高,造成整个尾洗管道堵塞^[27]。

尾洗系统采用花篮式喷头,尾洗液经过喷头后,雾化效果不理想,导致洗涤液难以覆盖整个料幕,洗涤效果未满足设计要求,从而导致氨含量超过标准。

中和及造粒工段为湿线,湿线的尾气经过多级洗涤,而筛分、冷却、包膜工段为干线^[28],部分含氨尾气串入筛分系统,干线经过布袋除尘器除尘后,直接进排放筒,最终导致排放尾气氨超标(后期在布袋除尘器处取样,经检测 $\rho(\text{NH}_3)$ 为130 mg/m^3)。

4 改造措施及效果

4.1 控制措施

1) 加强管式反应器出口中和度控制 分析频次由1h一次改为30min一次,确保管式反应器出口中和度指标不超过1.6,提升氨的转化率。

2) 降低复合肥开机负荷 双系列装置产量由800 t/d调整到650 t/d, 产能降低, 需要的热量下降, 可降低造粒机进风温度, 避免物料高温分解。

3) 适当提高成品水含量 成品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 由控制1.0%以下改为1.0%~2.0%, 机头及机尾温度适当降低, 减少高温气体与物料接触的概率, 减少物料因高温分解产生氨气, 同时降低了物料分解速率。

4) 对尾洗处理系统进行改造 为保障洗涤液的雾化效果, 将尾洗系统的喷头由吊篮式喷头改为涡流喷头, 喷头形式如图4所示。



图4 喷头的形式

Fig. 4 Types of sprayer nozzles

一段洗涤由水洗改为酸洗, 同时将复合肥尾液通过输送管道送至粉状磷铵系统, 以此保证复合肥尾洗系统的进酸量, 同时不影响系统的水平衡。并且将尾洗系统的内置管道, 改为外置管道, 便于后期喷头堵塞时清理。

在布袋除尘器后新增一套洗涤设施, 用于降低干线尾气氨含量 (需要长时间停车改造, 目前尚未完成)。

通过对尾洗处理系统进行改造, 增加尾洗系统的洗涤效果, 提升尾洗系统的洗涤率, 减少系统氨的逃逸情况, 尾气氨含量合格。

4.2 改造效果

系统改造后硫基复合肥尾气 $\rho(\text{NH}_3)$ 见表2。

表2 技改后硫基复合肥生产尾气 $\rho(\text{NH}_3)$

Table 2 NH_3 content in tail gas during the production of sulfur-based compound fertilizer after technical transformation

日期	$\rho(\text{NH}_3) / (\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$		日期	$\rho(\text{NH}_3) / (\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	
	最高值	平均值		最高值	平均值
10月3日	21.81	6.98	10月6日	28.37	10.52
10月4日	29.74	10.19	10月7日	24.82	10.75
10月5日	19.97	8.73	10月8日	15.63	7.76

注: 技改并将酸性水送至粉状磷铵系统。

从表2可以看出, 虽然目前干线洗涤未建, 但经过进行一系列调整后, 尾气指标满足环保B级绩效标准。

5 结论

通过严格控制终点中和度, 产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 控制在1.0%~2.0%, 将机尾温度由95℃降低到90℃, 降低了物料的分解速率, 并且调整系统负荷, 进而增加物料在闪蒸槽的停留时间, 增加反应时间, 提高氨的转化率, 进而减少尾气氨含量。对尾洗喷头进行了更换, 强化了洗涤液的雾化效果, 进而增强洗涤效果, 从而使尾气 $\rho(\text{NH}_3)$ 由100 mg/m^3 降低到30 mg/m^3 以下。虽然尾气情况得到改善, 但尾气氨指标不稳定, 初步判断为过程控制不稳定, 以及尾气进酸不连续导致, 后期需要进一步跟踪。目前减少了部分产量, 随着后期尾洗系统进一步完善, 以及干线洗涤改造后, 这一现象会有所改观。

[参考文献]

[1] 冯尚善. 国家政策驱动下我国复合肥行业发展现状、问题与未来趋势研究[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(9): 1-6.
FENG S S. Development status, problems and future trends of China's compound fertilizer industry driven by national policies [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(9): 1-6.

[2] 王刚, 王东滨, 邓建国, 等. 减污降碳背景下固定污染源监测的需求及挑战[J]. 环境工程, 2025, 43(9): 209-218.
WANG G, WANG D B, DENG J G, et al. Demands and challenges of stationary sources monitoring in the background of pollution and carbon emissions reduction [J]. Environmental Engineering, 2025, 43(9): 209-218.

[3] 邹云霞. 低温转化氯化钾生产硫基氮磷钾复合肥[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(6): 47-51, 79.
ZOU Y X. The Technology to Produce Sulfate-based NPK Complex Fertilizer from Potassium Chloride at Low Temperature [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 1999, 14(6): 47-51, 79.

[4] 唐浩, 汪朝强, 唐辉. 两种工艺条件下工业硫酸分解氯化钾制备硫酸氢钾的研究[J]. 无机盐工业, 2017, 49(8): 41-43, 90.
TANG H, WANG C Q, TANG H. Experimental study on preparation of potassium bisulfate by decomposition of potassium chloride with industrial sulfuric acid under two kinds of conditions [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017, 49(8): 41-43, 90.

[5] 张文丽. 低温转化喷浆造粒硫基复合肥(15-15-15)装置工艺设计[J]. 当代化工研究, 2016(9): 102-103.
ZHANG W L. Craft Design of Low-temperature Conversion of Spraying Granulation S-based Compound Fertilizer (15-15-15) Device [J]. Modern Chemical Research, 2016(9): 102-103.

[6] 杨培营, 孙维波, 陈德清. 氨化造粒生产硫基复合肥[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(5): 38-40.
YANG P Y, SUN W B, CHEN D Q. Production of S-based

- compound fertilizer by ammoniation-granulation process [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2003, 18(5): 38-40.
- [7] 孙旺胜. 硫基复合肥工艺的发展及应用[J]. 化肥工业, 2004, 31(3): 25-27.
SUN W S. Development and Use of Sulfur-Based Compound Fertilizer Process [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2004, 31(3): 25-27.
- [8] 丁荣伟. 氨酸管式反应器喷浆造粒技术生产高氮尿基复合肥[J]. 磷肥与复肥, 2008, 23(6): 59-61.
DING R W. Technology for production of high nitrogen urea-based compound fertilizer by acid & ammonia pipe reactor—slurry spray granulation (spheroidizing) process [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, 23(6): 59-61.
- [9] 严长松, 王开朗. 100 kt/a 硫基复合肥生产线的设计与运行[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(6): 47-49.
YAN C S, WANG K L. Design of 100 kt/a sulfur-based compound fertilizer production line and its operation [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2005, 20(6): 47-49.
- [10] 胡春林, 桂坤, 王成, 等. 硫基复合肥造粒尾气处理工艺改造[J]. 磷肥与复肥, 2017, 32(5): 39-40.
HU C L, GUI K, WANG C, et al. Transformation of treatment process of prilling tail gas in S-based compound fertilizer production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017, 32(5): 39-40.
- [11] 夏文柏, 张洪绪, 朱胜. 硫酸铵喷浆造粒工艺优化[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(4): 62-66.
XIA W B, ZHANG H X, ZHU S. Optimization of ammonium sulfate spray granulation process [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(4): 62-66.
- [12] 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.
LI F K, ZHANG C H, TIAN W H, et al. Selectin of Ammoniation and Concentration Process for Powder Monoammonium Phosphate Plant [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2020(6): 31-34.
- [13] 郝绍鹏. 多效循环氨浸工艺初探[J]. 中国钼业, 2020, 44(3): 38-41.
HAO S P. Multiple-effect circulation ammonia leaching process [J]. China Molybdenum Industry, 2020, 44(3): 38-41.
- [14] 李文玉, 张广忠, 李先亮, 等. 工业级磷酸一铵生产工艺及硫酸根对其生产过程的影响[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(9): 32-36.
LI W Y, ZHANG G Z, LI X L, et al. Production process of industrial grade monoammonium phosphate and influence of sulfate ions on its production process [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(9): 32-36.
- [15] 李先亮, 张广忠, 严东宁, 等. 磷铵浓缩装置与喷浆复合肥装置联产颗粒氮磷二元肥[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(10): 88-92.
LI X L, ZHANG G Z, YAN D N, et al. Production of granular NP binary fertilizer with ammonium phosphate concentration unit and spray granulation compound fertilizer unit [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(10): 88-92.
- [16] 杨雄. 影响粒状磷酸一铵产品质量因素分析[J]. 云南化工, 2018, 45(11): 25-26, 42.
YANG X. Analysis of Factors Affecting the Quality of Granular Monoammonium Phosphate [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(11): 25-26, 42.
- [17] 罗康碧, 李沪萍. 磷酸二铵水溶液及其混合料浆稳定性研究[J]. 云南工业大学学报, 1996, 12(1): 13-16.
LUO K B, LI H P. Study on the Stability of the Solution of Ammonium Hydrogen-phosphate [J]. Journal of Yunnan Polytechnic University, 1996, 12(1): 13-16.
- [18] 董留涛. 磷酸二铵解吸生产浓氨水工艺优化[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(2): 62-64.
DONG L T. Optimization of Deammonia Phosphate Production Process for Concentrated Ammonia [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(2): 62-64.
- [19] 曹广峰, 周自波, 王恒涛. 各种农作物专用硫基复合肥生产技术[C]//中国化工学会. 全国第九届新型肥料开发与应用技术交流会议论文集. 绥化: 出版者不详, 2004: 67-69.
- [20] 张广忠, 何守学, 朱玉臣, 等. 采用加权平均数法估算复混肥料成品养分质量分数[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(3): 46-47.
ZHANG G Z, HE S X, ZHU Y C, et al. Estimation of nutrient content in compound fertilizer product with weighted average method [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(3): 46-47.
- [21] 孙钊. 大颗粒尿素在农业生产中的推广应用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11829-11831.
SUN Z. The Application of Large Granule Urea in Agriculture [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(24): 11829-11831.
- [22] 郑海胜. 尿素放空总管尾气氨含量超标原因分析及治理[J]. 中氮肥, 2024(1): 34-38.
- [23] 张玉娇, 黄豪中, 张丽娜, 等. 选择性催化还原系统尿素分解研究进展[J]. 车用发动机, 2024(3): 10-17.
ZHANG Y J, HUANG H Z, ZHANG L N, et al. Research Progress on Urea Decomposition in Selective Catalytic Reduction System [J]. Vehicle Engine, 2024(3): 10-17.
- [24] 许洪兴. 复合肥干燥工艺在确保水分达标的前提下如何适应多品种生产[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(2): 48-50.
XU H X. How to make drying technology of compound fertilizer fit multi-variety production on the premise of ensuring water content up to standard [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2005, 20(2): 48-50.
- [25] 沈卫凯, 徐明海. Gibbs和Helmholtz函数法计算氨水热力性质对比[J]. 化工进展, 2011, 30(S1): 618-621.
- [26] 崔萍, 刘期崇, 王建华. 磷酸氨化的宏观动力学研究[J]. 磷肥与复肥, 1998, 13(1): 15-20.
- [27] 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.
- [28] 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.