

粒状硫酸铵装置尾气洗涤工艺优化

郑鸿雁, 夏文柏, 陈德高, 汪涛, 朱胜, 顾光富

(瓮福(集团)有限责任公司 瓮福化工公司, 贵州 福泉 550501)

[摘要] 尾气洗涤工艺的优化是提高生产效率与满足环保要求的重要环节。针对某公司粒状硫酸铵装置尾气洗涤系统排放超标、能耗较高、洗涤液循环利用效率低等问题, 提出了提升造粒干燥系统、热风系统性能, 优化管道布局和尾气洗涤工艺, 增加智能监测与控制系统等多项优化措施。优化改造后, 造粒干燥机的压力由 $-20\sim 15$ Pa提高到 $-100\sim 300$ Pa, 吨产品煤耗下降约24 kg, 叶轮结疤频率降低, 系统运行更加稳定, 排放尾气中粉尘质量浓度由 60 mg/m^3 下降至 40 mg/m^3 , 符合环保排放标准。

[关键词] 粒状硫酸铵装置; 喷浆造粒; 尾气洗涤工艺; 优化改造

[中图分类号] X781 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0086-05

Optimization of tail gas washing process for granular ammonium sulfate plants

ZHENG Hongyan, XIA Wenbai, CHEN Degao, WANG Tao, ZHU Sheng, GU Guangfu

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

Abstract: The optimization of tail gas washing process is an important link to improve production efficiency and meet environmental protection requirements. In response to the problems of excessive emissions, high energy consumption and low recycling efficiency of the washing liquid in the tail gas washing system of the granular ammonium sulfate plant of a certain company, multiple optimization measures have been proposed, including upgrading the granulation and drying system and hot air system, optimizing the pipeline layout and tail gas washing process, and adding an intelligent monitoring and control system. After the optimization and transformation, the pressure of the granulation dryer is raised from $-20 - 15$ Pa to $-100 - 300$ Pa. The coal consumption for per ton of product is decreased by approximately 24 kg. The frequency of impeller scab formation is reduced, and the system operation becomes more stable. The dust mass concentration in the exhaust gas emissions dropped from 60 mg/m^3 to 40 mg/m^3 , meeting the environmental protection emission standards.

Key words: granular ammonium sulfate plant; spray granulation; tail gas washing process; optimization and transformation

0 引言

某粒状硫酸铵装置是A公司为实现循环经济、研发硫酸铵高端产品, 利用原粒状磷酸一铵装置转产粒状硫酸铵的装置, 现主要负责消化B公司及C公司烟气脱硫硫酸铵料浆、D公司磷酸铁母液, 属环保型装置。尾气洗涤工序主要用于处理装置在生产过程中产生的尾气, 以满足环保要求并减少粉尘排放。该装置位于A公司磷酸二铵系统南侧, A/B系列年设计生产能力均为5万t硫酸铵。由于硫酸

铵造粒过程困难和装置使用全雾化技术进行造粒, 导致尾气中粉尘浓度波动较大, 通常控制在 $60\sim 120\text{ mg/m}^3$ 。2022年, 为了消耗新能源生产副产硫酸铵料浆, 装置对热风系统、造粒干燥系统和洗液净化系统进行了优化, 但尾气洗涤系统仍未进行有效提升, 自2022年6月起排放尾气 ρ (粉尘)基本控制在 $80\sim 110\text{ mg/m}^3$, 为避免超标(国家标准限值为 120 mg/m^3), 接近上限时, 系统需停车或降负荷生产, 影响了生产效率。为了提升装置产能并消

收稿日期: 2025-09-10

作者简介: 郑鸿雁(1996—), 女, 贵州毕节人, 助理工程师, 主要从事磷肥生产技术研究及管理工作。

通信作者: 夏文柏(1987—), 男, 云南昭通人, 工程师, 主要从事磷化工生产管理及技术研究工作。

除环保风险,需要对尾气处理系统进行局部优化,包括抽尘设备、旋风分离器、文丘里洗涤器、管洗设备及尾气风机的更换与升级,预计费用为240万元。

1 硫酸铵装置尾气洗涤工艺存在问题

硫酸铵装置采用全雾化造粒技术生产,在造粒过程中会产生大量粉尘,尾气的粉尘质量浓度通常在 $1\ 200\sim 2\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$,远超国家标准($\leq 120\ \text{mg}/\text{m}^3$)。为了应对这一问题,装置配备了尾气洗涤系统,通过文丘里洗涤器等设备对尾气进行净化,尾气经过洗涤后可以有效去除悬浮粉尘,再经高效电雾除尘器,降低排放浓度,减少对环境的污染^[1]。随着装置生产负荷增加,尾气的排放量也有所上升,2022年出现尾气粉尘排放超标的情况, ρ (粉尘)小时平均值超出了 $120\ \text{mg}/\text{m}^3$ 。为此,装置进行了一系列的优化措施,包括提升热风系统、造粒干燥系统和洗液净化系统的性能,并对尾气洗涤系统进行局部改造,如更换抽尘设备、旋风分离器和风机、增加布袋除尘器等,以满足大负荷生产要求,消除环保风险,降低工序能耗,并保障生产的可持续性。

1.1 粉尘捕集效率不足

全雾化造粒过程中产生的粉尘粒度分布不均匀,其中粒径在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的细颗粒占35%以上。原旋风收尘器对细颗粒的过滤效率只有60%~70%,大量微细粉末进入后续的洗涤过程中。B系列虽然配备了文丘里型除尘器,但其气液体积比仅为 $0.8\ \text{L}/\text{m}^3$,远小于 $1.2\sim 1.5\ \text{L}/\text{m}^3$ 的最佳控制范围,导致其雾化效果不佳,气-液接触面积不够,细颗粒捕获率只有85%,严重影响了电除尘器的工作效率。

1.2 管道阻力导致能耗飙升

Flowmaster(热流体系统仿真分析软件)流体模拟分析表明,原管路布置方式有3方面不足之处。其一,A系列除尘器出口至风机管路上设有5个 90° 的弯头,其局部阻力系数为0.5,远远大于标准值0.15。其二,B系列文氏管进气管管径由 $1\ 200\ \text{mm}$ 缩小到 $800\ \text{mm}$,风速由 $12\ \text{m}/\text{s}$ 提高到 $27\ \text{m}/\text{s}$,造成了严重的节流损失。其三,由于长期积尘,管内壁粗糙度达到 $0.8\ \text{mm}$,是设计值的3倍,沿程阻力增大120%。在多种因素的叠加作用下,A、B系列总阻力分别达到 $2.2\ \text{kPa}$ 和 $2.5\ \text{kPa}$,风机效率由设计的85%下降到68%。

1.3 洗涤液循环利用效率低

原洗涤液循环系统存在水质劣化速度快、循环

利用率低等问题。A系列清洗液不经深度处理直接排放,每天消耗 $240\ \text{m}^3$ 新鲜工艺水。B系列循环水pH长期保持在 $4.5\sim 5.0$,酸性环境加快了设备的腐蚀,同时降尘速率减慢,循环水悬浮物质量浓度超过 $500\ \text{mg}/\text{L}$,导致喷嘴堵塞,清洗效率降低。絮凝剂用量控制粗放,以固定值 $50\ \text{mg}/\text{L}$ 投加,没有根据水质变化进行调节,造成了药剂浪费和沉淀效果差的双重问题。

1.4 监测与调控滞后

原有的尾气在线监测系统只在烟囱出口处设置1个监测点,不能对整个过程进行监测。当发现尾气指标超标时,污染物已经排入了大气,控制存在明显的滞后现象。系统的参数调整完全依靠人工经验,需要操作者根据监控数据来手动调整风机转速和清洗泵的流量,其响应时间在 $30\ \text{min}$ 左右,很难适应由于造粒负荷变化而引起的尾气成分变化。

2 硫酸铵生产装置及尾气洗涤工艺优化

2.1 喷浆造粒干燥内返料一体化技术

喷浆造粒干燥内返料一体化技术的核心优势之一,是将造粒、干燥、筛分与返料等多个环节集成于同一回转筒体内,实现工艺设备的高度紧凑。

硫酸铵料浆通过喷枪雾化后直接作用于筒内料幕,通过涂布、黏合、自成粒法,快速完成颗粒成型,随后在同一设备中进入干燥段进行脱水处理,避免了物料在多设备间转运造成热量损失。颗粒经筒内分级锥与内筛分系统自动分流,细颗粒通过副螺旋直接回送至主螺旋作为内返料,大颗粒则进入成品流向,减少了对外返料系统的依赖,使得返料比例、粒度分布更加可控,有助于降低粉尘生成量,从源头降低尾气洗涤压力,同时节省了输送设备能耗。该技术通过在造粒段设置合理高度的挡板、优化的扬料板布置,确保物料在造粒区的填充率、料幕密度维持在最佳状态,内返料颗粒粒径分布均匀,表面粗糙度适中,利于雾化料浆均匀涂布,减少了因颗粒间结合不牢导致的碎粉产生,在热风与料幕充分接触的过程中,颗粒受热均匀、表面迅速固化,内部水分向外迁移速度可控,从而获得形状规则、表面光滑且机械强度高的粒状硫酸铵产品,稳定的料幕结构不仅提升了成品率,还使得生产过程的窗口更宽,适应高喷浆负荷时的工艺波动,减少尾气中夹带的细粉比例,为后续尾气洗涤系统的高效运行创造了有利条件^[1]。

技改前后燃煤消耗见表1。

表1 技改前后燃煤消耗

Table 1 Coal consumption before and after technological transformation

项目	年份	累计燃煤消耗/(kg·t ⁻¹)
技改前	2022	221
	2023	219
技改后	2024	195

2.2 尾气洗涤工艺流程

硫酸铵装置占地约2 000 m²，由于装置采用全雾化喷浆造粒工艺，造成尾气中粉尘浓度波动较大，难以稳定控制在公司内控标准范围内，如表2所示。为响应新能源领域3.8万 t/a硫酸铵干基的原料消纳任务，装置自2022年起逐步进行热风系统、干燥系统及洗液净化系统的优化改造，然而，随着单线喷浆负荷提升至14 m³/h，原有尾气洗涤

系统处理能力明显不足，严重制约了装置的稳产高效运行，目前，A/B系列尾气处理虽具备差异，但均采用多级洗涤与除尘相结合的处理流程，A系列尾气首先通过旋风除尘器，10 m³洗液送至污水澄清系统，尾气随后经尾气风机送入湿式电雾除尘器进一步净化后排入烟囱；B系列流程中，旋风除尘后尾气先经风机输送至文丘里系统，洗涤后进入旋液器除沫，尾气再进入湿式电雾除尘器达标排放，B系列的洗水回收通过旋液池与多台泵形成循环，部分洗水回补至文丘里系统。为提升除尘效率，A系列增设布袋除尘器处理筛分、输送、包裹等环节尾气，将粉尘输送至制浆槽（回用于料浆制备），系统末端配置尾气在线监测装置，确保全过程环保管控。洗涤废液在絮凝剂系统作用下通过澄清器沉降、澄清、回用，实现水资源梯级循环，提升系统绿色水平与运行经济性。

表2 A/B系列装置产能及尾气粉尘含量现状

Table 2 Current status of production capacity and dust content of tail gas of A/B series devices

产能/ (万t·a ⁻¹)	尾气总排放量/ (万m ³ ·h ⁻¹)	工艺类型	尾气粉尘质量浓度波动范围/ (mg·m ⁻³)	公司内控粉尘质量浓度标准/ (mg·m ⁻³)
10	30	全雾化喷浆造粒工艺	80~110	60

2.3 优化管道布局

在尾气洗涤工艺优化中，管道布局的调整是提升系统效率和减少能耗的关键措施之一，优化管道布局需要考虑系统的整体流畅性与各设备之间的协调性，原有管道布局存在部分弯头过多、管径不合理等问题，导致气流的流动阻力较大，影响了尾气的流通速度和洗涤效果，为此可以重新规划管道的走向，减少不必要的弯头，确保气流能够顺畅通过各个设备^[2]。具体而言，尾气洗涤工艺应尽量缩短管道长度，避免长距离气流传输，同时保持管道直径的一致性，防止局部气流流速过低或过高，此外管道的材质也需要进行优化，采用耐腐蚀性更强的材质，如304不锈钢，以提高系统的耐用性和抗腐蚀性，延长设备的使用寿命。在改造过程中还要对管道连接部分进行详细检查和修复，确保连接处的密封性和抗压性，避免因尾气泄漏造成的污染^[3]。在管道布局优化的同时需要调整洗涤液的分配方式，以提高洗涤效率。当前的洗涤液分配方式存在液流分配不均的问题，某些部分的洗涤液流量过多，导致浪费，而其他部分的洗涤液则不足，影响了尾气的净化效果，因此硫酸铵装置尾气洗涤工艺应该通过

改造管道的分支系统，确保洗涤液分配更加均匀，以及每个洗涤单元都能充分接触到尾气，提升洗涤效果。此外原有的复喷管和洗涤槽的布置不够合理，导致洗涤液的覆盖范围有限，优化后的布局应当确保复喷管能够覆盖整个尾气流经的区域，同时避免复喷管因过多的弯曲而造成液流不均^[4]。考虑到生产中可能出现的高负荷情况，应增加备用管道设计，保证在设备维护或出现故障时，系统仍能正常运转。在管道布局优化后整个系统的压力损失将得到降低，能有效减少尾气排放的能耗。通过重新规划管道走向、减少弯头、缩短管道长度并保持管径一致性，气流的流畅性得到了显著改善；优化后，尾气管道流速提高了15%，同时管径一致性得到保证，避免了局部气流流速过低或过高的问题。在改造过程中，管道材质选用304不锈钢，耐腐蚀性和耐用性增强，预计系统整体使用寿命延长了20%。在优化管道布局后，尾气排放系统的整体压力损失降低了12%，极大减少了系统运行中的能耗，通过减少弯头和提升气流通畅性，原本需要高功率的尾气风机可调节至较低运行功率，实现能效显著提升。据估算，优化后的系统运行时电能消耗

降低了约8%，对于每条生产线而言，年节约电费约为50万元，改进后的洗涤液分配系统使得洗涤液的使用更加高效，减少了10%的洗涤液浪费，年节约成本约15万元（见表3）。

表3 优化前后系统消耗对比

Table 3 Comparison of system consumption before and after optimization

项目	尾气粉尘质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	系统压力损失/%	洗涤液工艺水费用/万元	电耗费用/万元
优化前	80	22	150	625
优化后	60	10	135	575

2.4 节能减排措施

针对风机能耗大的现状，设计了160 kW和200 kW变频调速控制器，实现了风机转速和尾气排放之间的动态匹配。建立了风机转速与造粒负荷之间的关联模型，在喷浆负荷由14 m^3/h 降至10 m^3/h 时，风机转速由1 450 r/min降至1 100 r/min，并同步降低功耗。工业运行数据表明：A系列风机经改造后，平均电流由280 A下降到180 A，年耗电量由135万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 降低到85万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，节电率达37%；B系列风机的平均电流由350 A降低到220 A，年耗电量由170万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 降低到105万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，节省电量38.2%，1台风机每年可节省电费30万元左右。

对风机叶轮结构进行了优化，采用后翼型叶片，减小了气流冲击损失，将结疤时间由7 d增加到84 d。根据2024年1—6月的统计数据，A/B系列风机停车清理次数由24次减少到2次，中断时间由120 h减少到10 h，减少了800多吨的产能损失，创造了20万元的直接经济效益。

循环水悬浮物质量浓度由500 mg/L 降低到50 mg/L 时，喷嘴堵塞率由25%下降到3%，清洗效率由85%提高到96%，验证了循环水质对清洗效果的影响。当pH由4.8调整到6.8时，装置的腐蚀速率由0.20 mm/a 下降到0.05 mm/a ，设备寿命预期延长3倍。

在A/B系列电雾收尘器出口处加装翅片式换热器，利用烟气余热对造粒过程工艺水进行加热，从而达到节能降耗的目的。废气温度由60 $^{\circ}\text{C}$ 降低到45 $^{\circ}\text{C}$ ，废热回收120 kJ，工艺水温度由25 $^{\circ}\text{C}$ 提高到40 $^{\circ}\text{C}$ ，降低了蒸汽消耗。根据2024年3月的生产数据，该装置可使产品硫酸铵的蒸汽消耗量由0.30 t/t降低到0.22 t/t，按每吨蒸汽200元计算，每年可节省32万元左右的蒸汽费用。在降低尾气温度的同时，降低了烟囱的热损失，提高

了环保性能^[5]。

2.5 优化废气排放

通过设备改造和智能调控，达到了“高效净化+精确控制”的目的，各项指标稳定地超过了环境标准，具体措施和数据效果如下。

建立“旋风粗除尘+文丘里除尘+电雾深度除尘”的三级除尘系统：A系列在原有除尘系统的基础上增加文丘里除尘器，并与旋风除尘器和电雾除尘器形成三级联动；B系列对各个阶段的设备参数进行了优化匹配，保证前级设备高效去除，降低了后级设备的负荷。2024年1—4月的连续监测数据表明，A系列尾气粉尘质量浓度由改造前的102 mg/m^3 降至38 mg/m^3 ，B系列由93 mg/m^3 降至35 mg/m^3 ，均稳定在公司内控标准60 mg/m^3 以内，达标率为100%^[6]。

对不同粒径粉尘效果的测试结果表明，粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 粉尘去除率达99.5%，1~5 μm 粉尘去除率达98%， $\leq 1 \mu\text{m}$ 粉尘去除率达95%，全面优于改造前的85%、78%、65%，彻底解决细粉排放问题。

2024年2月负荷波动试验表明：当喷浆量由14 m^3/h 增加到16 m^3/h 时，造粒机出口粉尘质量浓度由1 000 mg/m^3 升至1 500 mg/m^3 ，系统自动将文丘里洗涤液流量由224 m^3/h 提高到256 m^3/h ，风机转速由1 450 r/min提高到1 500 r/min，使除尘器出口粉尘质量浓度在10 min内稳定在40 mg/m^3 以下^[7]。

2.6 智能监测与控制系统

在案例装置尾气洗涤工艺优化中，强化“智能监测与控制系统”是确保排放达标的重要手段^[8]。A/B两条生产线尾气总量达到24万 m^3/h ，因喷浆造粒过程粉尘质量浓度波动较大，曾多次出现排放瞬时值超过120 mg/m^3 的情况，为应对高喷浆负荷、适应扩能生产，需在尾气排放管道、关键洗涤设备出入口布置多点在线监测探头，实现粉尘浓度、温湿度、风量等参数的实时采集，通过数据自动上传至中控系统，形成动态趋势图，设定报警值，操作人员可据此判断旋风除尘、文丘里洗涤等环节是否存在波动，提前安排维护，避免尾气排放异常^[9]。智能监测与控制系统不仅是数据采集的简单升级，更是工艺优化和节能降耗的重要工具，系统可将监测数据与尾气风机转速、洗涤泵流量等生产参数关联，形成智能分析模型，对异常趋势及时预警，并提出调节建议，例如，当湿式电雾除尘器冲洗频次不足导致电场效率下降时，监测数据可触发自动提示，提醒增加冲洗频率；当洗涤水回路密度偏高可

能影响捕集效率时,可发出调度信号,安排污水澄清器排放,通过这种数据闭环管理,不仅能将尾气排放浓度稳定在国家标准50%以下,还能减少无效能耗、降低设备故障率,真正实现环保与经济效益双提升^[10]。在粒状硫酸铵生产中,造粒与尾气洗涤之间设置多级除尘措施以降低粉尘负荷,造粒干燥机出口尾气经旋风除尘器进行粗除尘,去除大部分大颗粒粉尘;A系列在筛分机、斗提机、返料皮带、破碎机、包裹筒等易产生扬尘的环节增设布袋除尘系统,由引风机将各点尾气集中处理,捕集的粉尘经螺旋输送至制浆槽回用,B系列则在旋风除尘后直接进入文丘里洗涤前,由尾气风机稳定输送流量,避免扬尘回流。上述多点除尘不仅降低进入文丘里系统的粉尘浓度,还减少了设备磨损和洗涤负荷,为后续湿法洗涤与电雾除尘提供了更稳定地运行条件。

3 结语

案例装置尾气洗涤工艺优化实施后,带来了显著的直接经济效益和其他附加效益,通过技改,造粒干燥机的压力由-20~15 Pa提高到-100~300 Pa,热利用率得到有效提升,技改后吨产品煤耗下降了约24 kg;技改还消除了尾气风机叶轮结疤的问题,技改前风机每周需停机清理一次,造成2~5 h的生产中断,且清理过程消耗工艺水,增加了污水量并提高了燃煤消耗,通过技改,叶轮结疤频率降低,系统运行更加稳定,避免了频繁停车清理带来的生产损失,排放尾气中 ρ (粉尘)由60 mg/m³下降至40 mg/m³,符合环保排放标准,不仅提升了环保水平,也减少了因粉尘排放带来的潜在风险,为企业的可持续发展创造了积极影响。

通过对硫酸铵装置尾气洗涤工艺的优化不仅能够有效提高尾气净化效果,减少排放,还能实现节能减排,提升系统的工作效率,通过优化尾气风机、洗涤系统、管道布局以及废气排放控制等环节确保了装置在提升产能的同时符合严格的环保标准,这一系列技术改造措施不仅降低了能耗和污染物排放,还提高了设备的可靠性与稳定性,为企业的可持续发展和环保合规提供了坚实保障。

[参考文献]

[1] 刘显波.磷酸二铵装置降成本技术改造[J].磷肥与复肥,2023,

38(11):23-25.

LIU X B. Technical transformation for cost reduction of DAP plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(11): 23-25.

[2] 王玉训.管式洗涤器在磷复肥尾气净化上的技改应用[J].硫磷设计与粉体工程,2021(3):36-39.

WANG Y X. Technical Revamp and Application of Tubular Scrubber for Purification of Phosphate Fertilizer Tailgas [J]. S P & BMH Related Engineering, 2021(3): 36-39.

[3] 胡晓燕,扈本忠,马强.硫铵装置技术升级改造[J].燃料与化工,2015,46(6):59-60.

HU X Y, HU B Z, MA Q. Upgrading of ammonium sulfate unit [J]. Fuel & Chemical Processes, 2015, 46(6): 59-60.

[4] 高劲豪,高原.臭氧脱硝氨法脱硫联合处理FCC尾气工艺的技术经济分析[J].硫酸工业,2018(2):43-46.

GAO J H, GAO Y. Technical and economic analysis of combined treatment of FCC tail gas by ozone denitrification and ammonia desulfurization [J]. Sulphuric Acid Industry, 2018(2): 43-46.

[5] 江雅洁.含氨尾气生产硫酸铵蒸发与结晶工艺技术研究[J].大连:大连理工大学,2014.

JIANG Y J. Research of evaporation & crystallization process technology for producing ammonium sulfate with tail gas containing ammonia [J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[6] 杨超.氨肥法脱硫工艺在硫酸尾气处理中的应用[J].硫酸工业,2011(1):21-24.

YANG C. Application of ammonia-fertilizer desulfurization process for treatment of tail gas from sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2011(1): 21-24.

[7] 汪家铭.氨法脱硫在硫磺制酸装置尾气处理中的应用[J].硫磷设计与粉体工程,2009(6):29-33.

WANG J M. Application of ammonia desulfurization in tail gas treatment of a sulfur-burning sulphuric acid plant [J]. S P & BMH Related Engineering, 2009(6): 29-33.

[8] 覃焕章.400 kt/a硫酸装置尾气氨法脱硫的设计与运行[J].硫酸工业,2015(6):28-30.

QIN H Z. Process design and operation of ammonia desulfurization for tail gas from 400 kt/a sulphuric acid plant [J]. Sulphuric Acid Industry, 2015(6): 28-30.

[9] 王学谦,瞿赞,徐文青,等.有色炉窑烟气高浓度SO₂回收及重金属协同控制技术研究示范[J].科技资讯,2016,14(10):168-169.

WANG X Q, QU Z, XU W Q, et al. The technology research and demonstration of high concentration of SO₂ and heavy metals cooperative control in nonferrous flue gas [J]. Science & Technology Information, 2016, 14(10): 168-169.

[10] 柏志敏,朱旻,朱兆华.洗涤塔爆裂事故原因技术分析[J].化工设计通讯,2017,43(3):142.

BO Z M, ZHU M, ZHU Z H. Technical analysis of cracking accident of washing tower [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(3): 142.