◆设备、控制与安全生产◆

# 膜过滤系统中膜棒损坏的原因分析及对策

姚文金，徐振玲，赵　彤

（云南云天化股份有限公司研究院，云南 昆明　650100）

［摘　要］针对在磷肥生产原料处理过程中，碳化硅陶瓷膜过滤系统频繁出现膜棒损坏的问题，系统分析膜棒损坏的主要形式及成因。研究发现，膜棒损坏主要表现为横向断裂、纵向裂开和边缘损坏3种形式，其成因涉及反吹气压过高（＞0.6 MPa）、原料杂质超标、横向撞击、系统振动、安装不当等多重因素。通过实施原料预处理（控制颗粒＜1 mm）、进膜压力联锁控制（＜0.4 MPa）、反吹压力优化（＜0.45 MPa）、振动监测、自动化程序控制及安装工艺改进等系列措施，有效降低了膜棒损坏率，保障了膜过滤系统的安全稳定运行。研究结果为陶瓷膜系统在湿法磷酸净化等工业场景的优化应用提供了重要参考。

［关键词］膜过滤系统；膜棒损坏；碳化硅陶瓷膜；原因分析；预防措施；错流过滤

［中图分类号］TQ051　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）06-0121-05

## Analysis and countermeasures of membrane rod damage in membrane filtration system

YAO Wenjin, XU Zhenling, ZHAO Tong

(*Research Institute of Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming* 650100, *China*)

**Abstract**: In response to the frequent occurrence of membrane rod damage in the silicon carbide ceramic membrane filtration system during the raw material processing of phosphate fertilizer production, the main forms and causes of membrane rod damage are systematically analyzed. Research has found that membrane rod damage is mainly manifested in three forms: Transverse fracture, longitudinal cracking and edge damage. The causes involve multiple factors such as high blowback pressure ( >0.6 MPa), excessive impurities in raw materials, transverse impact, system vibration, and improper installation. By implementing a series of measures such as raw material pretreatment (controlling particles < 1 mm), interlocking control of membrane inlet pressure ( < 0.4 MPa), optimization of blowback pressure ( < 0.45 MPa), vibration monitoring, automation program control, and installation process improvement, the membrane rod damage rate has been effectively reduced, ensuring the safe and stable operation of the membrane filtration system. The research results provide important references for the optimization application of ceramic membrane systems in industrial scenarios such as wet process phosphoric acid purification.

**Key words**: membrane filtration system; damaged membrane rod; silicon carbide ceramic film; cause analysis; preventive measures; cross flow filtration

膜过滤技术是利用具有选择性分离功能的高精度膜材料，通过滤芯与物料体系的精确匹配实现料液中不同组分的分离和浓缩。它与传统的过滤技术区别在于可以在分子范围内进行选择性地分离。按分离膜孔径或切割分子量的大小可分为微滤膜（50 nm以上）、超滤膜（50～1 000 nm）、纳滤膜（150～1 000 Da）、反渗透膜（100～150 Da）；按膜材料可分为有机膜和无机膜；按膜的结构形式分为管式膜、卷式膜、中空纤维膜、平板膜。

膜过滤技术在工业化生产中具有如下优势：（1）膜分离是纯物理过程，不发生化学反应，不会引入新的杂质；（2）过滤速率快，便于做无菌处理；（3）系统在低温下运行，无相变、质变，不破坏有效成分，能耗低，特别适用于热敏性强的物料浓缩；（4）超滤分离设备精度高，可以缩短生产周期，提高过滤效率，并能达到很好的澄清效果，且工艺稳定可靠；（5）纳滤浓缩生物发酵液的同时，

［收稿日期］2024-07-08；　［修回日期］2024-12-23

［作者简介］姚文金（1983-），男，云南嵩明人，工程师，主要从事石油化工、精细化工、新能源、磷复肥等领域生产工艺、装备技术开发、设备设计与制造、安全生产技术开发研究、新工艺技术开发研究、设备运维技术研究、项目管理和生产管理。

［通信作者］徐振玲（1983-），男，云南盐津人，工程师，主要从事石油化工、精细化工、农药医药、新能源、磷复肥等领域装备技术开发、设备设计与制造、新设备技术开发研究、设备运维技术研究。

可脱除大量无机盐，纯化产品；（6）错流运行工艺，彻底解决污染堵塞难题；（7）自动化程度高且安全可靠，有效降低劳动强度，膜过滤过程在密闭的容器中进行，能很好地实现清洁生产；（8）膜元件填充面积大，系统占地面积小，便于老厂技术改造、扩建或新建项目，可有效地降低生产成本和投资。

由于膜过滤技术有以上诸多优点，常被用于大分子物质脱盐和浓缩，以及大分子物质溶剂系统的交换平衡、大分子物质的分级分离、生化制剂或其他制剂的去热原处理等。膜过滤技术已成为制药工业、食品工业、电子工业以及环境保护诸领域中不可缺少的有力工具[1-3]。随着膜分离技术应用范围不断扩大，该技术在湿法磷酸净化领域逐渐得到关注，黄姗等[4]采用陶瓷膜脱除湿法磷酸中的硫酸钙杂质，在优化条件下，渗透液通量大于400 L/(m²·h)，渗透液浊度小于0.3 NTU。季家友等[5]以湿法磷酸为原料，将二级膜过滤系统与预处理工艺进行结合，成功制得了食品级磷酸。牛司江等[6]采用超滤系统与叶片式过滤系统联用，对脱重金属磷酸中的含氟络合物进行脱除，有效提高了装置负荷。郑秀军等[7]将超滤与纳滤技术应用于湿法磷酸净化，磷酸中阳离子去除率超过90%，该系统同时具有脱色的作用。陈相等[8]采用扩散渗析膜组脱除湿法磷酸中的金属阳离子杂质，在优化条件下，铁、铝、镁截留率可达为80%～90%，对应的磷回收率为50%～60%。符义忠等[9]采用超滤技术对净化磷酸进行处理，所得清酸固含量、氟含量、MER值均降低，可满足磷酸钙盐生产指标要求。

云南云天化股份有限公司研发中心（简称研发中心）在磷肥生产原料湿法磷酸、脱重金属磷酸预处理中使用膜过滤系统，采用碳化硅陶瓷膜错流过滤技术，运行过程中膜棒出现过多次不同程度的损坏。研发中心对膜棒损坏的原因进行研究和分析，并针对性地提出了系列改进和预防措施。

## 1　错流过滤技术基本原理

膜设备运行时，物料通过循环泵加压，料液以一定流速沿着滤膜表面流过，大于膜截留分子量的物质分子无法透过膜流回循环槽，小于膜截留分子量的物质或分子透过膜，形成滤液。

水、低分子溶剂、小分子有机物、溶于液体中的离子则垂直膜层经过滤层、支撑层推向膜的另一侧，固体悬浮物、细菌和病毒、大分子有机物保持悬浮状态存在于膜层侧，在高速流动状态下不断从膜表面移除（见图1）[3, 10]。

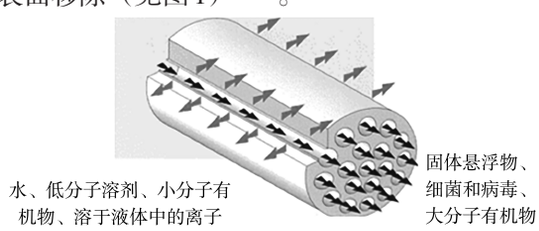


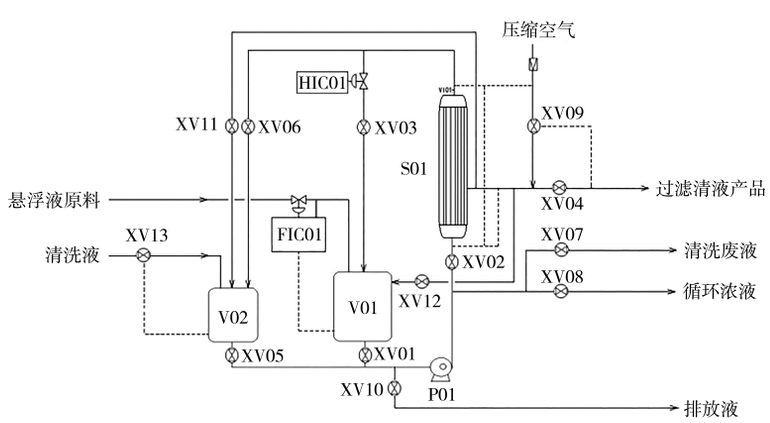

图1　错流过滤技术原理

Fig. 1　Principle of cross flow filtration technology

## 2　膜分离基本工艺流程

膜分离基本工艺流程如图2所示[1]，工艺包含膜过滤、膜反吹、膜清洗和排浓4个阶段。

膜过滤：经沉降、旋转分离器、板框过滤等方法预处理除去大颗粒杂质的悬浮液原料由流量控制阀FIC01控制送入原料循环槽V01，当原料循环槽




V01–原料循环槽；V02–清洗液储槽；S01–膜过滤器；P01–循环泵；XV01–循环液进口阀；XV02–循环泵出料阀；XV03–循环阀；XV04–过滤清液出液阀；XV05–清洗液进口阀；XV06–清洗液循环阀；XV07–清洗废液排放阀；XV08–循环浓液排放阀；XV09–反吹控制阀；XV10–残留废液排放阀；XV11–清洗清液循环阀；XV12–清液回料阀；XV13–清洗液进料阀；HIC01–循环压力控制器；FIC01–原料进料控制器

图2　膜分离控制流程图

Fig. 2　Flow diagram of membrane separation control system

V01液位到达50%以上后，通过循环泵P01将悬浮液送入膜过滤器S01，从而从膜侧获得高纯度过滤清液产品，膜中心循环液回到原料循环槽V01循环过滤。

膜反吹：随着膜过滤过程不断进行，为防止膜孔堵塞，在膜外侧设有定时反吹装置。反吹时间到时，系统会自动启动反吹系统，打开压缩空气阀门XV09对膜过滤系统进行一次反吹。

膜清洗：随着膜通量下降，还需对膜进行清洗，故设置有清洗流程，通过将循环液切换为清洗液对膜进行彻底清洗。

排浓：当浓缩倍数达到预定浓缩倍数10倍后[2]，需对循环浓液进行排浓处理。排浓处理后，重新进新鲜循环液。浓缩倍数计算公式如下：

$$浓缩倍数=\frac{进料流量累计}{进料流量累计-清液流量累积}。\tag{1}$$

## 3　膜棒损坏原因分析

通过对膜棒损坏的情况进行总结分析发现，膜棒出现损坏的形式主要有横向断裂、纵向裂开、边缘损坏这3种情况。

横向断裂主要表现为膜棒沿横截面断裂为两节或多节，断裂面为不规则锯齿面或曲面，表面较平滑，仅有少量碎屑产生。纵向裂开主要表现为膜棒沿纵向切面分为两瓣或数瓣，通常伴随横向断裂并从主体分离。边缘损坏主要表现为膜棒边缘存在缺口或裂缝，膜材通常以碎屑的形式损失。

### 3.1　横向断裂

膜棒出现横向断裂是由于棒身承受了较高的横向力或较大的应力所致。查阅膜厂家碳化硅陶瓷膜工作参数得知，该膜棒所能承受的最大压力为0.6 MPa，若系统产生了超过0.6 MPa的压力或应力，即会出现膜棒横向断裂的风险。

对生产过程中可能产生横向推力和较大应力情形进行总结、分析后发现，膜棒出现横向断裂的原因主要有反吹气压力过高、原料大颗粒杂质含量过高、横向撞击、膜棒震荡4个方面。

#### 3.1.1　反吹气压力过高

在膜系统进行反吹时，如反吹气压力超过0.6 MPa，就会在膜壁与中心孔之间形成一个超过0.6 MPa压差，从而导致膜棒出现断裂。

#### 3.1.2　原料中杂质含量过高或存在大颗粒杂质

研发中心所使用碳化硅陶瓷膜膜棒的直径为40 mm，长度1.2 m，循环液通道为4 mm，过滤精度为40 nm，原料中杂质含量过高或存在大颗粒杂质，就会在膜通道里形成架桥，造成膜孔堵塞。

当膜通道出现大面积堵塞后，在膜系统执行反吹程序时，就会出现膜棒内各点受力不同的情况，这些力量差相互叠加在一起，会形成一股巨大的剪切力，当剪切力超过膜棒能够承受的最大应力（0.6 MPa）时，膜棒就会在承受最大剪切力的红线位置折断。

#### 3.1.3　横向撞击

膜棒横向撞击损坏膜棒的情形主要出现在膜系统内有膜棒断裂的情况下。在膜棒出现断裂时，如未及时发现或发现后未及时停车处理，断裂的膜棒就会在循环泵和膜反吹的冲击作用下自由摆动，对周围膜棒形成撞击，从而造成膜棒的大面积损坏。

分析原因，主要是因膜棒损坏或断裂的时候，操作人员未能及时发现或系统继续带病运行所致。

#### 3.1.4　膜棒震荡

在膜系统运行过程中，如果膜系统抖动较大，也会带来膜棒在振荡作用下损坏的风险。其中，最大的震荡力主要来源于膜系统的反吹过程。当膜系统执行反吹过程时，巨大的气流冲击力瞬间进入系统，引起膜系统剧烈振荡。并且，反吹气气源压力越高，反吹时对膜系统的冲击越大，膜棒的振荡也就越强烈。另外，膜过滤系统固定不牢靠，在反吹时也会产生较大振动。

### 3.2　纵向裂开

膜棒出现纵向裂开损坏的原因主要有进膜压力过高和膜棒存在质量问题。在膜系统运行过程中，如进膜压力过大，就会形成一个由膜中心孔向周围发散的应力；如膜棒烧结质量存在问题，就会存在膜棒从薄弱或缺陷部位纵向裂开的情况。

### 3.3　边缘损坏

膜棒出现边缘损坏的情形主要来自膜棒安装和端头压板安装过程。在安装膜棒时，因模棒的密封固定方式是密封圈、压环、密封圈。由于密封圈与密封腔体接触较为紧密，且密封腔体深度较深，为保证密封圈能安装到位，不得不使用锤子敲击套管的方式将密封圈退到密封槽底部。此时，如套管摆放位置不合适或对正不好，就很容易敲击到膜棒边缘，造成膜棒边缘损坏。

另外，如果在膜棒安装时端头平整度不够或者膜棒高出上压环顶面，在安装压板时也可能压到膜棒边缘，造成边缘被压坏。

## 4　预防措施

针对上述问题，研发中心认真进行总结和分

析，并提出了系列预防措施，大大降低了膜过滤系统膜棒损坏的风险。

### 4.1　原料预处理

通过沉降、板框过滤、过滤器过滤等手段，去除原料中的大颗粒杂质，将原料中的固体颗粒粒径控制在1 mm以下，以降低膜棒中心孔架桥堵塞风险。

### 4.2　控制进膜压力

通过调整循环泵P01频率，将进膜压力PI01控制在0.4 MPa以下，设置压力差高于0.4 MPa报警设备，并增设安全保护联锁，联锁逻辑见图3。当进膜压力PI01高于0.5 MPa，联锁将循环泵频率降至0 Hz，以确保膜系统的安全。

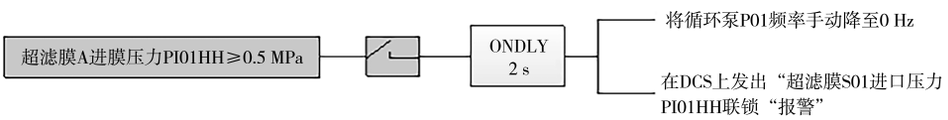



图3　进膜压力高安全保护联锁逻辑

Fig. 3　Safety protection interlocking logic for high inlet pressure of the membrane

### 4.3　控制反吹气压力

通过增设自力式调节阀和反吹气压力检测点，控制反吹气压在0.45 MPa以下，并增设安全保护联锁，联锁逻辑见图4。

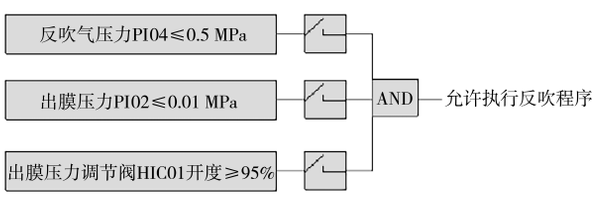



图4　膜系统反吹启动条件

Fig. 4　Back flushing launch conditions of the membrane system

当反吹气压力PI04低于0.5 MPa，出膜压力小于0.01 MPa和出膜压力调节阀HIC01开度大于95%这3个条件同时满足后，方可执行反吹程序。

### 4.4　及时发现和处理系统故障

在膜系统最容易产生振动的浓液出口管上增设振动监测仪，用于监测膜系统运行和反吹过程的振动情况，如出现振动增大，及时对膜系统的各固定部件进行紧固，以减少膜系统运行和反吹过程中的振动。加强膜过滤系统的现场巡检，及时发现和消除跑冒滴漏，防止酸液漏出对设备及各种紧固部件造成腐蚀。

加强对过滤清液产品的监控，一旦清液出现浑浊，则可能膜棒已出现损坏，须立即停止系统反吹程序并对膜系统进行全面检查。

### 4.5　采用自动化控制

在膜分离过程中，膜棒容易受到物质污染，导致膜的阻塞或降低分离效果，需要定期进行清洗或更换。并且，由于膜系统过滤、反吹、排浓过程相对独立，连贯性和自动化程度不高，为保证系统的稳定运行，需浪费大量的人力、物力去做很多重复性的操作。

通过研究、总结膜过滤过程各阶段节点数据，开发膜分离过程自动化控制逻辑，把相对独立的几个膜过滤阶段连续起来，实现膜分离过程的自动化控制，以降低膜分离控制系统操作难度和劳动强度，提高膜分离系统的稳定性和生产效率，从而减少或者消除操作程序错误或者操作失误带来的膜棒断裂风险。

#### 4.5.1　膜过滤启动

设置膜过滤启动条件为原料循环槽V01液位LIC01≥60%，并且循环液进口阀XV01打开。当上述两个条件满足后，方可启动执行膜过滤过程。

#### 4.5.2　膜系统反吹

设置膜反吹判断条件为膜系统运行时间达到60 min。当到达设定反吹时间60 min，系统自动停运膜循环泵P01，关闭循环泵出料阀XV02和过滤清液出液阀XV04，全开循环压力控制阀HIC01后，打开反吹控制阀XV09执行反吹3～5 s。当膜反吹执行完成后重新恢复膜过滤过程。

#### 4.5.3　膜系统清洗

设置膜清洗判断条件为清液采出量FI03低于0.5 $m^3/h$或操作人员点击“超驰”按钮。程序自动开始进行膜清洗，将过滤介质切换为清洗剂，通过清洗剂循环实现对膜系统的清洗。

设定膜系统清洗完成条件为：循环流量FI02≥40 $m^3/h$和循环清液流量FI03≥8 $m^3/h$同时满足并运行10 min。当膜清洗执行完成后重新恢复膜过滤过程。

#### 4.5.4　排浓

设置膜清洗判断条件为浓缩倍数达到预定浓缩倍数（10倍）。当达到排浓条件后，系统关闭进料阀FIC01，通过开启循环浓液排放阀XV08将浓液

排出系统，剩余浓液通过残留废液排放阀XV10排出系统。当排浓完成，原料循环槽V01液位LIC01重新补液至≥60%后，恢复膜过滤过程。

### 4.6 保证安装质量

在安装膜棒时，使用粗细和大小合适的密封环，做到轻拿轻放，避免不小心碰撞造成损坏。在安装两端固定花板前，通过轻微调整，确保膜棒与端面平齐，避免出现在安装两端固定花板时压到膜棒边缘的情况。

## 5 结语

当前膜过滤系统的膜棒多为各种材料烧结而形成的多孔结构，且多为易碎的脆性材料，操作稍有不慎，很容易出现膜系统膜棒损坏的情况。因此，通过采取系列措施，降低膜棒损坏风险，对确保磷复肥生产原料预处理系统的安全、稳定、长周期运行具有重要意义。

## [参考文献]

[1] 代小元，沈凡，戴武斌，等.碳化硅陶瓷膜处理工业废水的工艺特性研究[J].武汉工程大学学报，2018，40(3)：284-287.
DAI X Y，SHEN F，DAI W B，et al. Process Characteristics of Industrial Wastewater Treatment with Silicon Carbide Ceramic Membrane[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2018，40(3)：284-287.

[2] 徐蕾蕾.超滤膜过滤在自来水厂工程中的应用分析[J].中华建设，2024(5)：175-177.

[3] 宁培勇，丁津华，徐文体，等.滤膜过滤技术应用研究进展[J].中国消毒学杂志，2006(1)：63-65.

[4] 黄姗，张峰，邢卫红.陶瓷膜脱除磷酸溶液中的硫酸钙[J].化学工程，2015，43(12)：62-66.
HUANG S，ZHANG F，XING W H. Microfiltration of calcium sulfate from phosphoric acid solution with ceramic membrane[J]. Chemical Engineering (China)，2015，43(12)：62-66.

[5] 季家友，张贺贺，马航，等.湿法磷酸深度净化工艺的研究[J].武汉工程大学学报，2022，44(5)：504-508.
JI J Y，ZHANG H H，MA H，et al. Advanced Purification Process of Wet-Process Phosphoric Acid[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2022，44(5)：504-508.

[6] 牛司江，周云刚，洪朝育.超滤膜过滤技术在饲料级磷酸净化中的应用[J].磷肥与复肥，2018，33(8)：28-29.
NIU S J，ZHOU Y G，HONG C Y. Application of ultrafiltration membrane filtration technology in feed grade phosphoric acid purification[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2018，33(8)：28-29.

[7] 郑秀军.膜分离技术在磷酸净化中的应用[J].磷肥与复肥，2020，35(3)：22-24.
ZHENG X J. Application of membrane separation technology in WPA purification[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(3)：22-24.

[8] 陈相，何兵兵，杨俊，等. 膜分离低成本净化湿法磷酸中试试验研究[J].磷肥与复肥，2022，37(9)：26-29.
CHEN X，HE B B，YANG J，et al. Pilot study on low cost purification of WPA by membrane separation[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2022，37(9)：26-29.

[9] 符义忠，许磊，姜威，等.采用超滤膜过滤净化磷酸试验探索[J].磷肥与复肥，2023，38(3)：23-24.
FU Y Z，XU L，JIANG W，et al. Exploration on filtration of purified phosphoric acid by ultrafiltration membrane [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38(3)：23-24.

[10] 刘鑫森，王湛.膜孔径大小对超滤膜过滤性能影响的研究[J].当代化工研究，2023(15)：23-25.
LIU X S，WANG Z. Effect of Membrane Pore Size on Ultrafiltration Membrane Filtration Performance [J]. Modern Chemical Research，2023(15)：23-25.

(上接107页)

Mineral Processing，2020，56(5)：975-983.

[25] 胡修权，张立，张晋，等.非煅烧磷石膏基胶凝材料的改性实验[J].无机盐工业，2022，54(4)：29-33.
HU X Q，ZHANG L，ZHANG J，et al. Modification experiment of non-calcined phosphogypsum based cementitious materials [J]. Inorganic Chemicals Industry，2022，54(4)：29-33.

[26] 郭泽，张鹏飞，杨帆，等.磷石膏焙烧法制备β-半水石膏[J].无机盐工业，2023，55(10)：106-113.
GUO Z，ZHANG P F，YANG F，et al. Preparation of β-hemihydrate gypsum by phosphogypsum roasting[J]. Inorganic Chemicals Industry，2023，55(10)：106-113.

[27] 吴磊，赵勇，杨俊.磷石膏净化处理方法探讨[J].广州化工，2023，51(8)：6-8.
WU L，ZHAO Y，YANG J. Discussion on Purification Treatment of Phosphogypsum[J]. Guangzhou Chemical Industry，2023，51(8)：6-8.

[28] 吴长江.磷石膏可溶磷水洗影响因素研究[J].化工设计通讯，2018，44(9)：147-148.
WU C J. Study on Influencing Factors of Phosphogypsum Soluble Phosphorus Washing[J]. Chemical Engineering Design Communications，2018，44(9)：147-148.

[29] 杨皓奇，武发德，朱干宇，等.天然陈化对磷石膏理化性质的影响及作用机理研究[J].新型建筑材料，2023，50(5)：99-105.
YANG H Q，WU F D，ZHU G Y，et al. The effect and mechanism of natural aging procedure on the physicochemical properties of phosphogypsum[J]. New Building Materials，2023，50(5)：99-105.

[30] 武发德，张羽飞，陈红霞，等.磷石膏在石膏板中的应用研究[J].磷肥与复肥，2018，33(10)：35-37，40.
WU F D，ZHANG Y F，CHEN H X，et al. Research on application of phosphogypsum in plasterboard production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2018，33(10)：35-37，40.

[31] AMBIKADEVI V R，LALITHAMBIKA M. Effect of organic acids on ferric iron removal from iron-stained kaolinite [J]. Applied Clay Science，2000，16(3-4)：133-145.