湿法磷酸装置提高氟收率技术改造

段思勤[1]，蔡　杰[1]，姜　威[2,3]，龚　丽[2,3]，杨文娟[2,3]，涂忠兵[2,3]，何宾宾[2,3]，牛司江[2,3]

（1. 云南天安化工有限公司，云南 昆明　650300；2. 云南磷化集团有限公司，云南 昆明　650600；
3. 云南省磷化工节能与新材料重点实验室，云南 昆明　650600）

［摘　要］为了提高湿法磷酸生产中氟资源回收率，对萃取尾气、过滤尾气洗涤工序，以及浓缩系统进行改造，并分析了改造后取得的经济效益。通过在反应槽和第一洗涤塔之间增加一个洗涤塔，渣场回水氟质量浓度从3 788 mg/L降至2 440 mg/L，吨P_2O_5氟硅酸产量提高9.8 kg，尾气氟质量浓度＜9 mg/m^3；在磷石膏过滤系统增加一套尾气回收洗涤装置，吨P_2O_5氟硅酸产量增加1.6 kg，同时解决现场尾气无组织排放问题，改善操作环境；在磷酸二段浓缩阶段添加脱氟剂4.98 kg/t，吨P_2O_5氟硅酸产量增加4.6 kg，渣酸比例降低6.49%，每吨P_2O_5收益提高24.51元。经过技术改造后，吨P_2O_5氟硅酸产量从2010年的45 kg提高到2023年的62 kg。

［关键词］湿法磷酸；氟回收；氟硅酸；脱氟剂
［中图分类号］TQ126.3+5　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2025）03-0073-05

Technical transformation of wet-process phosphoric acid plant to increase fluorine yield

DUAN Siqin[1], CAI Jie[1], JIANG Wei[2,3], GONG Li[2,3], YANG Wenjuan[2,3], TU Zhongbing[2,3], HE Binbin[2,3], NIU Sijiang[2,3]

(1. *Yunnan Tian'an Chemical Co., Ltd., Kunming* 650300, *China*; 2. *Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming* 650600, *China*; 3. *Key Laboratory of Energy Conservation and New Materials in Phosphorus Chemical Industry in Yunnan Province, Kunming* 650600, *China*)

Abstract: In order to improve the recovery rate of fluorine resources in wet-process phosphoric acid production, the extraction and filtration tail gas washing processes, as well as the concentration system are modified, and the economic benefits obtained after the modification are analyzed. By adding a washing tower between the reaction tank and the first washing tower, the fluorine content in the return water of the phosphogypsum slag yard is decreased from 3 788 mg/L to 2 440 mg/L, the yield of fluorosilicic acid is increased by 9.8 kg for per ton P_2O_5, and the fluorine content in the tail gas is less than 9 mg/m^3; Adding a tail gas recovery and washing device to the phosphogypsum filtration system, the yield of fluorosilicic acid is increased by 1.6 kg for per ton P_2O_5, and the problem of unorganized tail gas emissions on site is solved, improving the operating environment; Adding 4.98 kg defluorination agent for per ton P_2O_5 in the second stage of phosphoric acid concentration, the fluorosilicic acid yield is increased by 4.6 kg for per ton P_2O_5, the slag acid ratio is reduced by 6.49%, and the income for per ton P_2O_5 is increased by 24.51 RMB Yuan. After technological transformation, the yield of fluorosilicic acid for per ton P_2O_5 is increased from 45 kg in 2010 to 62 kg in 2023.

Key words: wet-process phosphoric acid; fluorine recovery; fluorosilicic acid; defluorination agent

2023年全球磷矿石基础储量为670亿t。磷矿中伴生大量氟资源[1]，主要赋存矿物为氟磷灰石（$Ca_5(PO_4)_3F$）和氟硅酸钙（$CaSiF_6$），按照w(F) 3%计算，磷矿中伴生的氟资源量为0.96亿t，占自然界中氟资源总量的87.3%[2]。因此，合理开发利用磷矿中伴生氟资源具有重要意义。磷矿加工分为湿法和热法，湿法加工占比为80%～90%。磷矿湿法加工过程中氟未得到有效回收，损失量较大。提高磷矿湿法加工过程中氟收率具有显著资源及经济效益。

云南天安化工有限公司（简称天安化工）磷铵装置建设规模为120万t/a，配套建设182万t/a硫

［收稿日期］2024-07-23
［作者简介］段思勤(1974-)，男，云南泸西人，化工工艺工程师，主要从事二水湿法磷酸、磷肥生产技术管理工作。
［通信作者］姜　威(1985-)，男，湖北鄂州人，高级工程师，主要从事磷化工质量监督和技术研发工作。
［基金项目］云南省磷化工节能与新材料重点实验室（202205AG070067）

酸、67.5 万 t/a 磷酸及 50 万 t/a 合成氨装置，随着工艺进步与管理措施提升，2023 年天安化工湿法磷酸产量提升至 94.27 万 t，已达历史最好水平。近年来云天化集团有限责任公司布局新能源赛道，延长产业链，要求集团下属企业提高磷矿伴生氟资源回收率，天安化工联合国家磷资源开发利用工程技术研究中心开展了针对湿法磷酸生产过程中氟资源回收的技术攻关。目前天安化工采用二水法工艺生产磷酸，生产工艺流程见图 1。

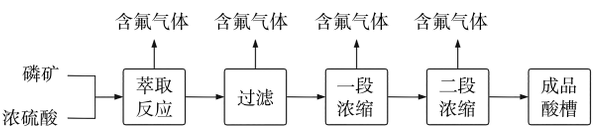

图 1　二水法湿法磷酸生产工艺流程

Fig. 1　Production process of wet-process phosphoric acid by dihydrate method

从图 1 可知，氟回收率受萃取、过滤、浓缩等环节影响，通过对上述技术环节进行改造可提高氟的收率、改善操作环境。

氟回收原理：在湿法磷酸生产时萃取、浓缩过程中，溶于磷酸中的氟硅酸分解成四氟化硅（SiF_4）和氟化氢（HF），与水蒸气一起逸出[3-5]。这些含氟蒸气通常在冷凝器前的氟吸收装置中予以吸收，制成氟硅酸溶液而加以利用。

1　萃取尾气氟回收技术改造

在萃取尾气氟回收装置改造前，萃取尾气经过风机负压抽至 2 个洗涤塔，在洗涤塔内经过循环洗涤达到排放标准后排放，洗涤水送至磷石膏过滤装置用于冲渣及调浆，最终全部进入磷石膏渣场。此含氟水带入磷石膏渣场的氟量为 344 kg/h，具体计算过程如下。萃取尾气一级洗涤塔洗涤液流量 200 m^3/h，一级洗涤塔洗涤液 w（F）0.21%，一级洗涤塔补水 w（F）0.081%，每小时产生氟量：

200 ×（0.210%−0.081%）kg = 258 kg。

一级洗涤塔洗涤率按 75% 计算，则萃取尾气中氟总量为：

（258 / 0.75）kg/h = 344 kg/h。

可见，磷酸生产过程中萃取反应槽逸出尾气含有大量氟，没有得到回收利用，而是进入磷石膏渣场。磷石膏渣场回水氟含量统计数据见表 1。

表 1　技术改造前磷石膏渣场回水氟含量

Table 1　Fluorine content in the return water of phosphogypsum slag yard before technical transformation

时间	ρ（F）/（mg·L^{-1}）		
	最大值	最小值	平均值
2020 年以前	4 098	3 414	3 788

为回收萃取反应槽逸出尾气中氟，对萃取尾气氟回收系统进行技术改造。来自萃取反应槽的尾气在风机抽吸作用下切线进入新增的 1# 洗涤塔内，1# 洗涤塔匹配循环泵，并设置 3 组喷头，经逆流喷淋洗涤，1# 洗涤塔内提浓的氟硅酸溢流至氟硅酸中间槽，通过氟硅酸输送泵送至下游工序使用；经 1# 洗涤塔洗涤的尾气进入 2# 洗涤塔（原第一洗涤塔）和 3# 洗涤塔（原第二洗涤塔）洗涤后排空，1# 洗涤塔的补水来自热水槽，流量为 5 ~ 10 m^3/h。

此技改方案只在萃取反应槽和第一洗涤塔之间增加一个洗涤塔，不改变原有尾气洗涤流程。技改后流程见图 2。经过技术改造后，渣场回水 ρ（F）从 3 788 mg/L 降至 2 440 mg/L，吨 P_2O_5 氟硅酸产量提高 9.8 kg，尾气中 ρ（F）< 9 mg/m^3。

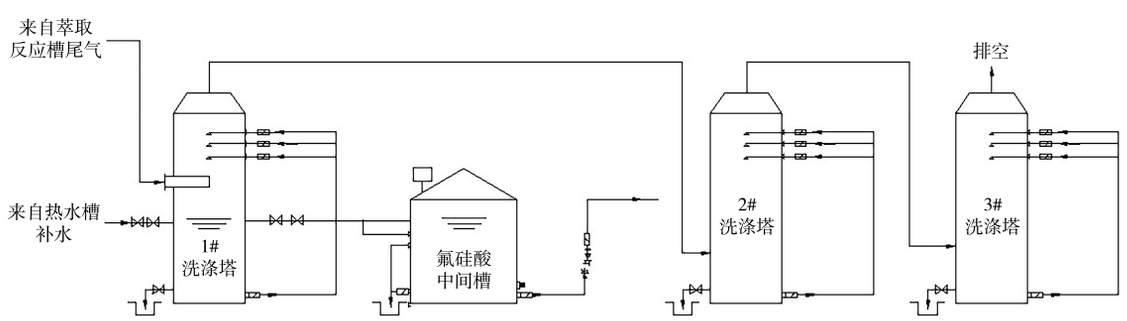

图 2　改造后萃取尾气氟回收工艺流程

Fig. 2　Process flow of fluorine recovery from extracting tail gas after transformation

2　磷石膏过滤系统含氟尾气回收技术改造

技术改造前，磷石膏过滤产生尾气经过收集后直接排放，存在含氟气体无组织排放问题，现场气味难闻，操作环境差。为解决此难题并提高氟回收率，在磷石膏过滤系统增加一套尾气回收洗涤装置，将过滤尾气通过负压引入 2# 洗涤塔，尾气经

过洗涤后引入萃取尾气回收系统，回收的低浓度氟硅酸溶液用作浓缩系统氟回收补水。经过改造后，吨P_2O_5氟硅酸产量提高1.6 kg，同时解决现场尾气无组织排放问题，改善操作环境。

3　浓缩系统氟回收技术改造

湿法磷酸浓缩过程中，稀磷酸从贮槽中经计量后进入石墨列管换热器，与加热后的循环酸混合，随后进入蒸发室进行水分蒸发。浓缩后的磷酸从蒸发室溢流口流出，经浓磷酸泵送至浓磷酸贮槽。浓缩系统控制的关键工艺指标包括磷酸浓度和温度、蒸发室真空度、低压蒸汽压力和温度。磷酸$w(P_2O_5)$需达到44%～49%、温度控制在75～85 ℃，蒸发室真空度为65～70 kPa，低压蒸汽压力为0.13～0.20 MPa、温度为135~140 ℃[6-9]。蒸汽压力通过压力调节阀进行精确控制，过高或过低都会对石墨列管造成损害。磷酸浓度则通过调节稀磷酸加入量和进加热器蒸汽流量来实现。磷酸浓度过低或过高都会对生产造成影响，因此需严格控制。湿法磷酸中的氟主要以可挥发性的HF、H_2SiF_6及与金属离子形成的不可挥发的含氟化合物形式存在[10]。可挥发性的氟化物可以通过向浓磷酸中加入活性二氧化硅并加热，反应生成SiF_4，通过空气带走[11-12]。主要反应如下：

$$H_2SiF_6 \longrightarrow SiF_4\uparrow + 2HF; \quad (1)$$

$$SiO_2 + 4HF \longrightarrow SiF_4\uparrow + 2H_2O。 \quad (2)$$

SiF_4的沸点为−86 ℃，HF的沸点为19 ℃，在湿法磷酸体系下，SiF_4相较HF更易逸出，为提高湿法磷酸氟硅酸产率，可在系统内补加SiO_2，将HF转化为逸出速率更快的SiF_4，从而提高氟回收效率。

3.1　实验室脱氟实验

在市场上采购了3种脱氟剂样品，其化学成分分析与比表面积见表2。

表2　白炭黑样品分析结果

Table 2　Analysis results of white carbon black samples

项目	$w(SiO_2)$/%	w(灼失量)/%	比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)
1#	85.65	10.94	165.25
2#	84.72	7.60	132.49
3#	88.05	7.20	168.85

由表2可知，3种脱氟剂的比表面积为3# > 1# > 2#，灼失量为1# > 2# > 3#。

实验过程：称取500 g一段酸（$w(P_2O_5)$ 39.82%），加入2.35 g（每吨P_2O_5 10 kg）不同型号白炭黑，在三颈烧瓶中恒温10 min，采用负压浓缩至$w(P_2O_5)$ 47% ～ 48%，取样分析，之后补加水分维持磷酸浓度不变，连续4 h取样分析，分析结果见表3。

表3　浓缩过程脱氟实验结果

Table 3　Defluorination test results of concentration process

时间/h	w(F)/%				$m(P_2O_5)/m$(F)			
	空白	1#	2#	3#	空白	1#	2#	3#
1	1.03	0.48	0.44	0.38	46.84	102.21	105.73	121.68
2	1.02	0.52	0.36	0.49	47.63	93.06	133.00	94.59
3	0.94	0.53	0.47	0.55	50.70	92.40	114.11	83.27
4	1.02	0.54	0.47	0.36	46.65	91.22	104.08	130.5

从表3可知，加入脱氟剂有助于浓缩脱氟，相较于未加脱氟剂，加入脱氟剂后磷酸中w(F)由1.0%降至0.5%。由于工业浓缩过程时间为4 h，选择4 h数据，以$m(P_2O_5)/m$(F)为指标，3种型号脱氟剂脱氟实验效果为3# > 2# > 1#。

在实验室完成脱氟剂选型后，应用3#白炭黑脱氟剂开展30万t/a湿法磷酸工业试验，验证脱氟效果与经济效益。

3.2　脱氟剂工业试验

改造后工业试验工艺流程见图3，利用稀磷酸配制脱氟剂，控制w(固) 8%～11%。稀磷酸加入脱氟剂流程：通过脱氟剂输送泵将脱氟剂溶液沿虚线加入P0407F泵前，稀磷酸与脱氟剂通过泵混合后在管道进一步混合输送至一级浓缩系统进行浓缩。一段酸加入脱氟剂流程：通过脱氟剂输送泵将脱氟剂溶液沿实线加入P0407泵前，一级浓缩酸与脱氟剂通过泵混合后在管道进一步混合输送至二级浓缩系统进行浓缩。

稀磷酸添加脱氟剂，工业试验数据见表4。从表4可知，稀磷酸加入脱氟剂后，一段浓缩磷酸中w(F)从1.86%降至1.62%，吨P_2O_5氟硅酸产量从28.38 kg提升至29.44 kg，脱氟效果不明显，且脱氟剂在一段酸陈化过程中进入渣酸，造成脱氟剂消耗量增加。

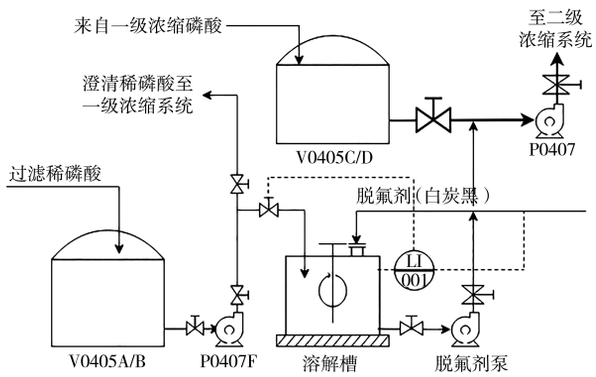

图3　改造后工业试验浓缩工序脱氟工艺流程

Fig. 3　The process flow of defluorination in the concentration process of industrial experiments after transformation

表4　稀磷酸加入脱氟剂工业试验数据

Table 4　Industrial test data of adding defluorination agent to dilute phosphoric acid

项目	$m(P_2O_5)/m(F)$	$w(F)$/%	吨P_2O_5氟硅酸产量/kg
未添加脱氟剂	22.3	1.86	28.38
添加脱氟剂	25.9	1.62	29.44

一段磷酸添加脱氟剂，工业试验数据见表5。从表5可知，按照吨P_2O_5脱氟剂添加量4.98 kg，吨P_2O_5氟硅酸产量提高4.6 kg，渣酸量减少6.49%。

表5　一段磷酸加入脱氟剂工业试验数据

Table 5　Industrial test data of adding defluorination agent to a segment of phosphoric acid

项目	吨P_2O_5脱氟剂添加量/kg	吨P_2O_5氟硅酸产量/kg	渣酸减少/%
未添加脱氟剂	0	16.62	
添加脱氟剂	4.98	21.22	6.49

经济效益计算：生产投入见表6，利润效益见表7。

表6　物料成本

Table 6　Material cost

序号	物料名称	消耗/($t\cdot t^{-1}$)	单价/(元·t^{-1})	生产成本/(元·t^{-1})
1	白炭黑	0.004 98	5 850	29.133
2	工艺水	0.034	1.5	0.051
3	蒸汽	0.036	160	5.760
4	动力电	0.05①	0.5②	0.025
5	人工及其他			1.500
合计				36.470

注：①单位为kW·h/t；②单位为元/(kW·h)。

利润计算过程：吨P_2O_5氟硅酸产量提高4.6 kg，回收的氟硅酸加工为氟硅酸钠产品利润为2 000元/t，效益为（2 000 × 4.6 ÷ 1 000）元/t=9.2 元/t；

表7　利润效益

Table 7　Profit benefits

项目	产品名称	产量/($kg\cdot t^{-1}$)	产品利润/(元·t^{-1})	利润/(元·t^{-1})
1	氟硅酸钠	4.60	2 000	9.20
2	64%DAP	148.75	300	44.63
3	55%MAP	−47.69	−150	7.15
合计				60.98

每生产1 t P_2O_5多回收清酸148.75 kg，生产64%DAP效益为300元/t，效益为（300×148.75÷1 000）元/t=44.625 元/t；每生产1 t P_2O_5减少渣酸47.69 kg，渣酸生产55%MAP效益为−150 元/t，效益为（150×47.69÷1 000）元/t=7.153 5元/t；合计效益为（9.2+44.625+7.153 5）元/t=60.98元/t。

经济效益合计：（60.98−36.47）元/t=24.51元/t。

天安化工按月产8万t P_2O_5计，全月创造经济效益为196.08万元。

4　结论

针对湿法磷酸生产过程中氟形成方式，进行技术改造，提高氟回收率。

（1）针对萃取尾气氟回收进行技术改造，采用热水对尾气进行洗涤，回收萃取尾气中氟，减少磷石膏渣场回水中氟含量，提高氟硅酸产率。

（2）在过滤系统增加尾气洗涤装置，并将低浓度氟硅酸用作浓缩系统洗涤液，改善现场操作环境，提高氟硅酸产率。

（3）在浓缩阶段通过添加脱氟剂提高氟硅酸产率，脱氟剂选型主要是参考二氧化硅纯度及比表面积，纯度越高，比表面积越大，脱氟效率越好；在一段浓缩阶段添加脱氟剂，由于稀磷酸中含有一定的二氧化硅，添加脱氟剂后脱氟效果未有明显改善，且脱氟剂消耗量增加；在二段浓缩阶段添加脱氟剂4.98 kg/t，氟硅酸产量增加4.6 kg/t，渣酸比例降低6.49%，每吨P_2O_5收益为24.51元。同时经过技术改造后氟硅酸产率逐年上升，从2010年的45 kg/t提高到2023年的62 kg/t。

［参考文献］

［1］　李志祥，明大增，钟英.磷矿伴生氟资源的综合利用[J].磷肥与复肥，2008，23(1)：64-66.
LI Z X，MING D Z，ZHONG Y.Comprehensive Utilization of Fluorine Resources Associated with Phosphate Ore[J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2008，23(1)：64-66.

［2］　何宾宾.对我国磷氟协同发展的思考与建议[J].云南化工，2024，51(S1)：20-24.
HE B B. Thoughts and Suggestions on the Coordinated Development of Phosphorus and Fluorine in China[J]. Yunnan

Chemical Technology,2024,51(S1):20-24.
[3] 杨培发,陈军民,陈志华.我国湿法磷酸生产技术对比[J].磷肥与复肥,2020,35(1):24-26.
YANG P F, CHEN J M, CHEN Z H.Comparison of WPA production technology in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2020,35 (1):24-26.
[4] 杨雄俊,李建闻.食品级硅藻土脱除湿法磷酸中氟的实验研究[J].磷肥与复肥,2017,32(11):6-8.
YANG X J,LI J W. Study on fluoride removal from wet-process phosphoric acid with food grade diatomise [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2017,32 (11):6-8.
[5] 哀鹏鹏,彭朝凯,刘成龙,等.湿法磷酸脱氟工艺的研究现状与发展方向[J].湿法冶金,2024,43(1):9-14.
AI P P, PENG C K, LIU C L, et al.Research status and development direction of defluorination technology of wet-process phosphoric acid [J]. Hydrometallurgy of China, 2024, 43 (1): 9-14.
[6] 田文航,郝易潇,赵军,等.湿法磷酸净化中的深度脱氟技术[J].磷肥与复肥,2016,31(3):31-32,48.
TIAN W H, HAO Y X, ZHAO J, et al.Technology of deep defluorination in wet-process phosphoric acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2016,31 (3):31-32,48.
[7] 黄平,李军,尤彩霞.真空汽提法脱氟净化湿法磷酸的研究[J].磷肥与复肥,2009,24(3):17-18,36.
HUANG P,LI J,YOU C X. Study on defluorination for purifying phosphoric acid by vacuum steam stripping [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2009,24 (3):17-18,36.
[8] 何宾宾,周琼波,张晖,等.湿法磷酸汽提法脱氟技术研究[J].无机盐工业,2016,48(9):49-50.
HE B B, ZHOU Q B, ZHANG H, et al.Study on defluorination for purifying wet-process phosphoric acid by steam stripping [J]. Inorganic Chemicals Industry,2016,48 (9):49-50.
[9] 张海燕,杨劲,明大增,等.湿法磷酸深度脱氟技术研究进展[J].化学工程师,2014,28(4):42-45,75.
ZHANG H Y, YANG J, MING D Z, et al. Development in research on de-fluorination technology of wet phosphoric acid [J]. Chemical Engineer,2014,28 (4):42-45,75.
[10] 张海燕,明大增,吉晓玲,等.浅析湿法磷酸脱氟反应原理[J].无机盐工业,2015,47(1):9-12.
ZHANG H Y, MING D Z, JI X L, et al.Analysis on de-fluorination reaction principle of wet process phosphoric acid [J]. Inorganic Chemicals Industry,2015,47 (1):9-12.
[11] 陈亮,李军,钟本和.浓缩湿法磷酸脱氟研究[J].磷肥与复肥,2005,20(4):18-19.
CHEN L, LI J, ZHONG B H.Study on defluorination of concentrated wet-process phosphoric acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2005,20(4):18-19.
[12] 方竹堃,何宾宾.湿法磷酸深度脱氟生产技术优化[J].磷肥与复肥,2023,38(9):22-24.
FANG Z K, HE B B.Optimization on of deep defluorination of wet-process phosphoric acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2023,38 (9):22-24.

(上接第23页)

[2] 陈凯琳.瓮福磷矿可持续发展战略研究[J].商情,2013(42):84.
[3] 罗惠华,钟康年,魏以和,等.抑制剂W-98在瓮福磷矿反浮选中的选矿研究[J].武汉化工学院学报,2002,24(4):49-52.
LUO H H, ZHONG K N, WEI Y H, et al. A study on single reverse flotation of phosphate ore of Wengfu phosphate mine by means of depressor of W-98 [J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology,2002,24(4):49-52.
[4] 罗惠华,李成秀,陈慧,等.胶磷矿反浮选抑制剂PT-4与磷酸抑制性能对比研究[J].化工矿物与加工,2013,42(3):1-3.
LUO H H, LI C X, CHEN H, et al. Research of suppression capability of reverse flotation depressor PT-4 and phosphoric acid on collophanite[J]. Industrial Minerals & Processing,2013, 42(3):1-3.
[5] CHEW C B, MAT R. The Efficacy of calcium carbonate scale inhibition by commercial polymer scale inhibitors [J]. Chemical Engineering Transactions,2015,45:1471-1476.
[6] 陈旭东,刘文刚,彭祥玉,等.氨基三亚甲基膦酸抑制剂在菱镁矿和白云石浮选分离中的作用机理[J].矿产保护与利用,2022,42(2):91-99.
CHEN X D, LIU W G, PENG X Y, et al. Effect and mechanism of depressant amino trimethylene phosphonic acid on flotation separation of magnesite and dolomite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(2):91-99.
[7] 顾帼华.矿物加工研究方法[M].长沙:中南大学出版社,2019.
[8] 钟康年,韩英,谢恒星.磷灰石与白云石的浮选分离[J].有色金属,1994,46(2):31-38.
ZHONG K N, HAN Y, XIE H X. Separation of apatite and dolomite[J]. Nonferrous Metals,1994,46(2):31-38.
[9] WESTERBACK S, RAJAN K S, MARTELL A E. New multidentate ligands. III. Amino acids containing methylenephosphonate groups [J]. Journal of the American Chemical Society, 1965, 87(12): 2567-2572.
[10] CARTER R P, CRUTCHFIELD M M, IRANI R R. Nitrilotri (methylenephosphonic acid) N-oxide and nitrilotriacetic acid N-oxide: Acidity and complexing of calcium and magnesium ions [J]. Inorganic Chemistry,1967,6(5):943-946.
[11] MANN A W, DEUCHER R L. Solution geochemistry of lead and zinc in water containing carbonate, sulphate and chloride ions[J]. Chemical Geology,1980,29:293-311.
[12] POWELL K J, BROWN P L, BYRNE R H. Chemical speciation of environmentally significant metals with inorganic ligands. Part 3: The Pb^{2+}+ OH^-, Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, and PO_4^{3-} systems (IUPAC Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 2009,81(12):2425-2476.
[13] WANG X, SONG Q, XIE R Q, et al. Selective flotation separation of scheelite from apatite by application of ATMP as an efficient depressant[J]. Journal of Molecular Liquids,2023,378:121604.
[14] ZHU G L, WANG Y H, WANG X M, et al. States of coadsorption for oleate and dodecylamine at selected spodumene surfaces [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2018,558:313-321.
[15] 何桂旭,张覃.氨基三亚甲基膦酸对氟磷灰石和白云石选择性抑制机理研究[J].化工矿物与加工,2023,52(11):12-17.
HE G X, ZHANG Q. Study on mechanism of selective inhibition of fluorapatite and dolomite by amino trimethylene phosphonic acid[J]. Industrial Minerals & Processing,2023,52(11):12-17.