

# 磷矿中伴生氟资源的赋存特征及资源化利用策略

李丰, 耿一硕, 单冰

(中蓝连海设计研究院有限公司, 江苏 连云港 222004)

**[摘要]** 磷矿是我国重要战略资源, 其伴生的氟资源是氟化工产业关键原料, 目前却因对其开发潜力重视不足导致资源浪费。简要介绍我国磷矿种类和分布特点, 分析磷矿伴生氟资源开发利用过程中存在的问题, 阐述伴生氟资源在磷矿选矿工艺(物理选别、化学选别)及选矿回水中的迁移分布规律。提出鼓励企业提升氟资源综合利用率、加大技术创新与攻关力度、强化产业链协同与集群化发展等建议, 为保障国家氟资源安全和推动相关产业发展提供有力保障。

**[关键词]** 磷矿石; 氟资源; 资源化利用

**[中图分类号]** TD985 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 07-0006-05

## Occurrence characteristics and resource utilization strategies of associated fluorine resources in phosphate rock

LI Feng, GENG Yishuo, SHAN Bing

(China Bluestar Lehigh Engineering Institute Co., Ltd., Lianyungang 222004, China)

**Abstract:** Phosphate rock is an important strategic resource in China. The fluorine resources associated with it are key raw materials for the fluorine chemical industry. However, at present, due to insufficient attention to the development potential, resources are wasted. The types and distribution characteristics of phosphate rock in China are briefly introduced, the problems existing in the development and utilization of associated fluorine resources in phosphate rock are analyzed, and the migration and distribution laws of associated fluorine resources in the phosphate rock beneficiation process (physical separation, chemical separation) and beneficiation return water are expounded. It is proposed to encourage enterprises to enhance the comprehensive utilization rate of fluorine resources, intensify technological innovation and research efforts, and strengthen industrial chain coordination and cluster development, etc., providing a strong guarantee for ensuring national fluorine resource security and promoting the development of related industries.

**Key words:** phosphate rock; fluorine resources; resource utilization

## 0 引言

在全球能源消费转型浪潮与“双碳”目标的双重驱动下, 我国磷氟产业迎来向绿色、低碳发展模式转变的关键时期。磷矿作为我国战略性矿产资源, 其伴生氟资源对国防安全、经济发展和社会发展具有战略影响<sup>[1]</sup>。液态氟作为火箭燃料的氧化剂, 直接关系到航空航天领域的技术突破和军事实力提升; 含氟密封材料广泛应用于国防军工设备, 氟化铀用于铀浓缩和提纯, 高纯氢氟酸是集成电路和超大规模集成电路芯片清洗和腐蚀的重要基础材料, 氟化物玻璃在光导纤维技术中发挥着关键作用; 六氟磷酸锂作为锂电池电解液的关键成分, 是新能源汽车电池的核心材料。此外, 含氟化合物在

家电、汽车、建筑等领域也有广泛应用。目前我国氟资源主要从萤石矿中提取, 随着新能源行业的快速发展, 对氟的需求量不断增加, 萤石资源已面临紧缺, 2016年我国将萤石列入战略性矿产名录<sup>[2-3]</sup>。磷矿伴生氟资源量是萤石中氟资源量的20余倍, 围绕磷矿伴生氟资源生产无水氟化氢, 并继续向下游布局氟深加工产品, 成为磷化工行业发展趋势<sup>[4-7]</sup>。

磷氟资源是磷、氟化工发展的原料来源, 随着我国磷氟化工产业进一步发展, 未来对磷、氟原料

**[收稿日期]** 2025-07-02

**[作者简介]** 李丰(1985-), 女, 河北唐山人, 正高级工程师, 研究方向: 化学矿产资源开发及综合利用。

的需求会进一步提高。可以预测,磷氟协同发展是未来磷、氟化工产业可持续发展的新型资源保障。

### 1 我国磷矿种类和分布特点

我国磷矿矿床与世界磷矿矿床类型大体相同,从我国磷矿体的基本成矿作用及成因、资源储量规模及工业意义等特点综合考虑,磷矿床主要有四大类,分别是沉积岩型磷岩块、沉积变质岩型磷灰岩、岩浆岩型磷灰石和鸟粪堆积型磷矿。我国磷矿资源分布广泛,已探明资源覆盖27个省(自治区、直辖市),形成了八大主产区,集中于云南滇池、贵州开阳与福泉、四川绵竹与马边,以及湖北宜昌、荆襄、保康等地。云南、湖北、贵州、四川、湖南为磷矿富集区,合计查明资源储量135亿t。其中,西南地区(云南、贵州、四川)储量占比58.9%;华中及华南地区(河南、湖南、湖北、广西、广东、海南)储量占32.3%;华东地区(江苏、安徽、浙江、江西、福建、山东)占2.85%;西北地区(陕西、青海、宁夏、甘肃、新疆)占2.79%;东北与华北地区(河北、山西、内蒙古等6省(自治区))占3.16%。

根据《2024年中国矿产资源报告》的数据,2024年我国磷矿石储量约34.4亿t,产量为11353万t,同比增长7.56%。2024年全球磷矿石产量中,中国约占46%,位居全球第一。我国前十大磷矿石生产企业贡献全国近50%的产量。我国现有磷矿石大型企业包括贵州磷化(集团)有限责任公司、云南云天化股份有限公司、湖北兴发化工集团股份有限公司、贵州川恒化工股份有限公司、湖北三宁化工股份有限公司、新洋丰农业科技股份有限公司、成都云图控股股份有限公司、江苏澄星磷化工股份有限公司、四川发展龙蟒股份有限公司、湖北宜化集团有限责任公司等,2024年磷矿产能合计约4700万t。下游用途方面,磷肥仍为主要市场,占比达到79%,主要产品为磷酸一铵、磷酸二铵及重过磷酸钙;动物饲料占8%,新能源领域占6%,农药占2%,其余5%用于精细磷酸盐和其他制品。近3年来,磷矿下游产品需求持续增长,尤其是磷酸一铵和磷酸铁锂增长最快。下游产品2024年总产量比2022年增长19.3%,2025年前4个月除磷酸二铵产量呈现小幅度调整外,其余产品均有6%以上增长。

展望2025—2028年,全国磷矿新增产能预计达到2640万t/a,产能利用率预计维持在65%左右。新增产能和下游需求增量基本平衡,但高品位

磷矿供应相对紧张,或将成为未来行业关注点。

### 2 磷矿伴生氟资源开发利用过程中存在的问题

磷矿是我国重要的战略资源,其伴生氟资源也是氟化工产业的关键原料。当前氟化工行业主要依赖从萤石矿中提取氟,由于氟原子独特的化学性质,其用途无法替代,对国家安全、国民经济和社会发展有重要影响,是可用尽且不可再生的宝贵资源,世界各国都将萤石列入战略物资加以保护,现已限制开采和出口。而磷矿中伴生的氟资源量约为萤石矿的20倍,目前却因对其开发潜力重视不足导致资源浪费。目前,我国磷矿伴生氟资源开发利用过程中存在磷化工与氟化工产业协同性不足、产业链条相对割裂、磷化工生产过程中氟资源未被有效回收的问题<sup>[8-11]</sup>。主要表现在以下3个方面。

一是我国磷矿伴生氟资源开发潜力被低估。目前在氟化工行业中,超过90%的氟来源于萤石。美国地质调查局(USGS)数据显示,2024年全球萤石储量为3.2亿t,我国萤石储量8600万t,占比27%。全球萤石产量约950万t,我国萤石产量占全球总产量的62%。全球萤石资源储采比平均值为32,我国仅为12左右,储采比偏低,资源消耗速度快。随着对氟化工产品需求的增加,我国氟资源供给面临萤石资源枯竭风险,磷矿伴生氟资源开发可缓解此现象。根据USGS数据,2024年全球磷矿石储量为740亿t,磷矿石中伴生氟总量约为23.68亿t。全球可利用的氟资源中,萤石的比例为5.58%,而磷矿石中氟的比例高达94.42%,远远超过萤石,其开发利用潜力被低估。

二是磷化工与氟化工产业协同不足。一边是磷化工生产过程中大量氟资源未能回收利用和妥善处置,造成氟资源严重浪费并加剧了环境风险;一边是氟化工原料短缺,与磷矿伴生氟资源的开发、利用脱节。磷化工企业主要集中在磷矿资源丰富的地区,而氟化工企业则集中在下游的氟精细化学品生产地。这种地理分布差异使得两者在原料供应和产品销售上缺乏有效的协同。此外,磷化工与氟化工在终端消费市场上的差异也进一步导致磷化工与氟化工产业链协同开发不足,未能形成完整的资源循环利用体系<sup>[12]</sup>。

三是磷矿伴生氟资源开发受现有生产工艺制约。我国大部分磷肥和磷复肥由湿法磷酸生产,不仅产生大量的固体废物磷石膏,而且伴生的氟资源也未得到有效利用。初步估算,2023年我国磷化工产业回收的氟资源约为35.6万t(折CaF<sub>2</sub>73.1万t),

仅占消耗的磷矿中伴生氟资源总量的11.3%左右。在磷肥和湿法磷酸生产过程中,有65%~70%的氟进入磷酸,25%~30%的氟进入二水石膏,5%~10%的氟以气体形式逸出;在磷酸浓缩过程中,进入气相中的氟占总氟量的38%~45%,这些氟资源通常以氟化氢(HF)和四氟化硅(SiF<sub>4</sub>)的形式排放,未能充分回收利用。

### 3 伴生氟资源在磷矿选矿工艺中的迁移分布规律

磷矿石是我国的优势矿物,也是具有较高利用价值的含氟资源。在磷矿加工时,通过采用先进的科学技术和生产工艺提高开采回采率、选矿回收率和综合利用率,在经济条件允许的情况下尽可能综合开发共伴生难利用的资源,是有效回收和利用氟资源的一种思路。虽然磷氟共生情况下很难将它们用简单的物理方法进行分离,但通过提高磷精矿品质的方式能在一定程度上实现氟的富集。

#### 3.1 物理选别工艺过程中的氟迁移分布规律

我国磷矿石资源丰富,但存在品位较低、杂质含量高等问题,给矿物分离带来较大困难。目前常用的物理选别工艺主要有重选和光电选等。表1反映了国内不同产区磷矿石中氟含量的特点。以湖北宜昌地区磷矿石为例,表2展示了磷矿石不同物理选别工艺过程中氟含量的变化情况。

表1 不同产区磷矿石中的氟含量

Table 1 Fluorine content in phosphate rock from different production areas %

地区	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{F})$
云南晋宁	25.45	4.24	12.65	42.07	2.35
贵州织金	22.15	7.24	4.09	44.08	2.54
湖北宜昌	25.12	1.51	18.85	36.80	2.32
四川马边	20.94	6.52	12.86	40.71	2.11
河北承德	3.37	2.32	64.62	5.09	0.31
湖南石门	14.90	11.16	11.82	35.41	1.33
湖北黄麦岭	11.17	3.98	37.40	20.81	0.85
江西朝阳	15.52	6.20	29.22	29.58	1.51
江苏锦屏	11.50	11.13	9.84	38.82	0.98

由表1可以得出,我国最主要的磷矿床类型为海相沉积型磷块岩。该类型矿床分布广泛、矿体厚实且稳定,一般呈层状或透镜状产出,常夹于页岩、硅质白云岩及白云质大理岩中, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 多在12%~30%。其主要矿物组成为碳氟磷灰石、方解石、白云石、石英、玉髓和黄铁矿等。国内典型代表矿山位于湖北宜昌、云南昆阳、贵州福泉以及四川马边等。该类型磷块岩中氟的质量分数基本保持在2.0%~2.5%。岩浆型磷灰石矿是我国北方地区

的重要磷矿类型,通常与磁铁矿共生,且常伴有钴、钒、钛、稀土等多种有用组分。此类磷矿石品位较低, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 一般不足10%,但矿石嵌布及结晶颗粒较粗,浮选性能较好,主要分布于河北承德等地。这类原矿中 $m(\text{F})/m(\text{P}_2\text{O}_5)$ 约为0.095,且二者成正相关关系。

表2 宜昌磷矿不同物理选别工艺中氟的变化

Table 2 Changes of fluorine in different physical beneficiation processes of phosphate rock in Yichang %

工艺	产品	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{F})$
重选	精矿	31.06	2.12	6.20	2.89
	尾矿	6.09	9.98	36.1	0.68
	原矿	22.41	4.47	15.68	2.25
光电选	精矿	26.80	3.68	16.65	2.31
	尾矿	6.48	4.78	43.58	0.65
	原矿	19.94	4.29	24.39	2.01

以表2中的重选和光电选工艺为例,磷矿石经过选矿处理后,在磷元素富集的同时,氟元素也会相应富集,导致精矿中 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和氟的含量同步增加。这一现象主要源于氟元素在矿石中主要赋存于磷灰石,特别是以碳氟磷灰石的形式存在。在白云石、硅酸盐等脉石矿物中,氟含量极低。物理选矿方法(如重选、光电选)主要基于矿物的密度、粒度及表面物理化学性质的差异,实现不同矿物的分离,这些工艺不会破坏矿物晶体结构。因此,在提纯磷块岩获得高品位磷精矿的过程中,氟元素通常随磷灰石一起富集,利用重选和光电选等物理方法难以实现氟与 $\text{P}_2\text{O}_5$ 的有效分离。

#### 3.2 化学选别工艺过程中的氟迁移分布规律

磷矿石的化学选别工艺主要包括浮选法、化学浸取和焙烧-消化等。目前,浮选法仍是磷矿分选中应用最为广泛且效果最好的方法,70%以上的磷矿都采用浮选法进行处理。特别是在品位较低、处理量较大的磷矿分选中,浮选法优势明显,能够高效提高磷精矿的品位。在实际生产与研究中,浮选常用的工艺流程包括正浮选、反浮选、正反浮选和双反浮选等。表3展示了以浮选法为代表的不同工艺流程中,磷矿石中氟含量的变化情况。

我国磷矿石资源以沉积岩型磷块岩为主,但该类型矿石选别难度较大,大多数需经过浮选工艺处理后方能满足工业使用标准。由表3可见,无论采用正浮选、反浮选、正反浮选还是双反浮选,只要工艺得当,所得磷精矿的 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 均可达到30%以上。原矿中的 $m(\text{F})/m(\text{P}_2\text{O}_5)$ 通常在0.095左右,

表3 浮选法中不同工艺中氟的变化

Table 3 Changes of fluorine in different flotation

		processes				%
工艺	产品	w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(MgO)	w(SiO <sub>2</sub> )	w(F)	
正浮选	精矿	35.50	0.36	0.41	2.98	
	尾矿	0.20	5.51	62.14	0.05	
	原矿	3.37	2.32	64.62	0.32	
反浮选	精矿	32.18	0.51	14.41	3.01	
	尾矿	4.56	18.55	3.15	0.49	
	原矿	21.56	7.38	8.88	2.03	
正反浮选	精矿	30.26	0.60	18.07	2.92	
	尾矿1	10.55	0.58	62.21	1.01	
	尾矿2	4.66	16.78	7.32	0.44	
	原矿	22.65	2.53	27.23	2.11	
双反浮选	精矿	30.89	0.35	13.62	3.04	
	尾矿1	5.56	13.65	8.51	0.43	
	尾矿2	11.62	0.72	44.99	1.04	
	原矿	22.40	4.11	15.55	2.17	

浮选后的磷精矿和尾矿中  $m(F)/m(P_2O_5)$  也基本保持一致, 显示 F 与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 具有显著的正相关关系。这

表明, 在浮选过程中, 氟元素会随磷的提浓一同迁移至精矿产品。浮选的本质是利用不同矿物表面物理化学性质的差异, 通过添加合适的浮选药剂, 实现矿物间的分选。虽然浮选处理中会引起矿物表面极少量离子的溶解, 但不会破坏矿物的晶体结构, 氟依然主要存在于碳氟磷灰石中。因此, 采用浮选工艺难以实现 F 与 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的有效分离。

### 3.3 选矿回水中氟的回收路径

浮选工艺是磷矿石选别中应用最为广泛的方法。然而, 浮选过程中需大量消耗水资源, 同时会产生大量选矿废水。废水的水量和成分会因矿石性质及所用浮选药剂的不同而有所差异。磷矿石复杂的矿物组成导致浮选体系中存在多种离子, 这些离子会在矿物表面发生吸附、沉淀、络合等作用。以某地区中低品位磷块岩的中试正反浮选工艺水为例, 试验精尾矿水为磷酸、硫酸为抑制剂稳定运转期间的精矿水、尾矿水。磷矿精矿水、尾矿水分析结果见表4。

表4 精矿水、尾矿水分析结果

Table 4 Analysis results of flotation concentrate water and tailings water

抑制剂	样品	$\rho(\text{悬浮物})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	矿化度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总硬度 $\rho(\text{碳酸钙})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	总碱度 $\rho(\text{碳酸钙})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{K}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{PO}_4^{3-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{F}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH
磷酸	精矿水	22	3 394	1 344	187.2	11.70	86.0	180.13	217.40	91.43	618.20	223.8	3.40	114.21	16.0	5.02	5.16
	尾矿水	13	3 598	1 197	180.8	9.60	60.8	178.76	182.73	79.63	418.20	1 808.0	4.73	110.27	46.3	10.09	5.24
硫酸	精矿水	37	6 194	4 523	106.5	9.80	97.0	217.51	967.67	106.18	4 490.0	297.3	12.28	64.98	24.1	7.10	5.20
	尾矿水	21	5 088	4 332	251.8	8.40	84.0	225.10	916.63	94.38	44.3	270.4	15.30	153.59	80.2	22.98	6.13

在实际工业生产中, 选矿回水中的氟离子质量浓度通常为几十至几百毫克每升, 超出直接排放标准, 需要进行适当处理。这些氟离子主要来源于生产过程中酸性条件下磷矿石的溶解。如果不经处理直接排放, 可能对环境 and 人类健康造成较大危害。目前, 针对磷矿选矿废水的处理, 国内外常用的技术包括化学沉淀法、絮凝沉淀法、吸附法以及生物处理法等。需要注意的是, 目前关于磷矿石浮选及调浆过程中氟的溶出特性, 以及氟在矿物表面的迁移与转化、对矿物表面性质的影响等相关理论研究仍较为有限, 是未来值得关注和深入探索的方向。

## 4 磷矿中伴生氟资源的利用策略

提升磷矿中伴生氟资源综合利用率、加大技术创新攻关、强化产业链协同和集群化发展, 是促进伴生氟资源高效利用、缓解萤石资源短缺、推动我国磷氟资源战略性新兴产业高质量发展的核心举措。具体策略建议如下:

(1) 鼓励企业提升氟资源综合利用率。建议出台针对磷矿伴生氟资源开发利用的专项政策, 明确资源回收、再利用、环境保护等要求。制定行业标准和技术规范, 推动资源综合利用的规范化与高效化。对利用磷矿伴生氟资源生产氟化氢及下游氟化工产品的企业, 给予税收优惠、财政补贴、绿色信贷等政策支持, 降低企业技术研发和产业化成本, 激励企业加大投入。将高效利用磷矿伴生氟资源纳入绿色矿山建设和循环经济发展规划, 鼓励企业采用清洁生产技术, 减少资源浪费和环境污染, 促进磷化工与氟化工产业绿色转型。借助行业协会和科研机构等平台, 广泛宣传伴生氟资源综合利用的经济效益和环保价值, 推广先进技术和典型案例, 提升企业参与热情。

(2) 加大技术创新与攻关力度。鼓励科研院所、高校与企业协同攻关, 重点研发高效、经济的氟提取工艺, 攻克二水石膏和氟硅酸中氟资源的提

取技术瓶颈,提高氟回收率、降低资源流失。推动高效提氟技术产业化,加快从氟硅酸中制备氟化氢等关键环节的技术发展,提升资源利用效率,降低生产成本。鼓励企业建设氟资源回收利用示范工程,形成可复制、可推广的技术模式。建议设立专项研发基金,重点支持高效回收、清洁生产和资源循环利用等技术的研发和成果转化。

(3) 强化产业链协同与集群化发展。支持磷化工企业向下游延伸,布局氟化氢及新材料、新能源电池等高附加值含氟产品,实现磷氟化工一体化,提升产业链附加值与整体竞争力。促进磷化工与氟化工企业深度合作,推动副产物(如氟硅酸)就地转化生产氟化氢,降低对萤石的依赖,提升资源利用效率。在贵州、云南、湖北等磷矿资源丰富地区,规划建设磷氟化工产业集群,形成上下游协同、分工明确的完整产业链,降低物流成本,提升整体竞争力。完善基础设施与配套服务,为企业协作和发展提供有力保障。

#### [参考文献]

- [1] 何宾宾,杨文娟.磷矿湿法加工过程中氟回收技术研究及其利用进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(2):71-80.  
HE B B, YANG W J. Research of fluorine recovery and utilization technology in phosphate rock wet processing[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40(2): 71-80.
- [2] 湛景震,高志勇,范才兵,等.我国萤石资源利用现状和战略规划分析[J].矿业研究与开发,2024,44(5):251-259.  
ZHAN J Z, GAO Z Y, FAN C B, et al. Utilization Status and Strategic Planning of Fluorite Resources in China [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5): 251-259.
- [3] 王东霞,郑厚义.双碳背景下氟化工行业资源安全保障分析[J].中国非金属矿工业导刊,2025(1):83-85.  
WANG D X, ZHENG H Y. Analysis of Safety Assurance of Fluorine Chemical Resources under the Dual Carbon Background [J]. China Non-metallic Mineral Industry, 2025(1): 83-85.
- [4] 周云刚,何宾宾.我国磷石膏综合利用现状与建议[J].磷肥与复肥,2023,38(5):11-16.  
ZHOU Y G, HE B B. Current situation and suggestions of comprehensive utilization of phosphogypsum in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(5): 11-16.
- [5] 吴文盛,梁富.“双碳”背景下矿产资源战略安全研究[J].中国矿业,2022,31(3):15-19.  
WU W S, LIANG F. Research on Strategic Security of Mineral Resources under the Background of “Carbon Peak and Neutrality” [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 15-19.
- [6] 成金华,易佳慧,吴巧生.碳中和、战略性新兴产业发展与关键矿产资源管理[J].中国人口·资源与环境,2021,31(9):135-142.  
CHENG J H, YI J H, WU Q S. Carbon neutrality, strategic emerging industry development and critical mineral management [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 135-142.
- [7] 杨磊.关于磷化工企业布局氟化工业务的思考[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(12):1-5.  
YANG L. Considerations on the integration of fluorine chemical business within phosphorus chemical enterprises [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(12): 1-5.
- [8] 张永明.磷矿加工中副产氟硅酸制氢氟酸工艺技术及研究进展[J].河南化工,2023,40(9):12-15.  
ZHANG Y M. Process Technology and Research Progress of Hydrofluoric Acid Production from By-Product Fluosilicic Acid in Phosphate Rock Processing [J]. Henan Chemical Industry, 2023, 40(9): 12-15.
- [9] 刘海霞,杨华春,杨明霞.磷氟协同发展未来思考[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(6):49-52.  
LIU H X, YANG H C, YANG M X. Future considerations for the synergetic development of phosphorus and fluorine [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(6): 49-52.
- [10] 张楠,王永怀,陈铅,等.磷矿石伴生氟资源高效利用技术研究进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(8):52-55.  
ZHANG N, WANG Y H, CHEN Q, et al. Research progress on efficient utilization technology of fluorine resources associated with phosphate rock [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(8): 52-55.
- [11] 刘帅杰.磷、氟化工产业的协同发展研究[J].现代化工,2024,44(3):1-4.  
LIU S J. Synergistic development of phosphorus and fluorine chemical industry [J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(3): 1-4.
- [12] 何宾宾,傅英,张儒学,等.湿法磷酸中伴生氟的赋存形态与回收现状及展望[J].磷肥与复肥,2023,38(12):30-36.  
HE B B, FU Y, ZHANG R X, et al. Present situation and prospect of occurrence and recovery of associated fluorine in WPA [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(12): 30-36.