

## 铁尾矿中磷灰石旋转摩擦静电分选提纯

张龙宇<sup>1</sup>, 吴中贤<sup>1,2</sup>, 申有悦<sup>1</sup>, 陶东平<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 中国矿业大学 化学工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。我国许多铁尾矿中含有磷灰石等宝贵磷矿资源, 但目前缺乏经济有效的分选技术将它分离出来利用。旋转摩擦静电分选技术具有无需水和药剂, 环境污染小、能耗低等优点。本文重点考查了紫铜、不锈钢、铝和 PVC 四种不同摩擦材料对铁尾矿中磷灰石、石英、长石和钛铁矿等主要组成矿物荷电特性的影响。研究了沈家铁尾矿中磷灰石分选富集性能随旋转摩擦静电分选技术主要参数的变化规律并确定了较佳条件。结果表明, PVC 摩擦后的磷灰石与其他矿物的荷电差异较大。在实际铁尾矿分选实验中, 当摩擦起电器转速为 5000 r/min, 给料速度为 50 g/min, 协风风速为 0.5 m/s, 进风风速为 0.6 m/s 时, 获得了磷精矿  $P_2O_5$  品位 27.6%、回收率 49.3% 的良好指标, 实现了铁尾矿中磷灰石的有效分选提纯。

**关键词:** 矿物加工工程; 摩擦荷电; 磷灰石; 静电分选; 铁矿尾矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.026

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0157-08

**引用格式:** 张龙宇, 吴中贤, 申有悦, 等. 铁尾矿中磷灰石旋转摩擦静电分选提纯[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 157-164.

ZHANG Longyu, WU Zhongxian, SHEN Youyue, et al. Apatite enrichment from iron ore tailings by rotary triboelectrostatic separator[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 157-164.

磷矿是我国重要的矿产资源, 同时也是制备磷肥的主要原料。磷矿可持续发展对国内粮食作物生产安全及精细磷化工生产发展有着十分重要的意义。但我国磷矿资源具有中低品位矿产多, 富矿少的特点<sup>[1-2]</sup>。常见的磷铁矿石中  $P_2O_5$  含量低, 脉石以石英为主。于慧梅等<sup>[3]</sup> 经过四次精选的闭路选矿将  $P_2O_5$  品位由原矿的 2.57% 提高到 30.85%, 精矿回收率为 70.7%。磷灰石的浮选选矿流程与药剂的使用方面研究已非常广泛。但传统浮选方法存在加工成本高、水资源消耗多以及环境污染严重等问题,

摩擦静电分选技术具有能耗低, 操作及维护简便等优势, 更重要的是电选在分选过程中不需要用水即可实现矿物之间的有效分离<sup>[4]</sup>。传统静电

分选装置常用滑槽、流化床、旋流器等作为荷电装置<sup>[5]</sup>, 缺点是需要严格控制给矿粒度及给矿速度, 且实际适用的矿物较少。本研究采用新型旋转摩擦静电分选 (RTS) 技术, 其主要原理为: 利用矿物颗粒与摩擦材料之间介电常数差异, 通过摩擦腔内旋转摩擦起电器高速旋转使颗粒与起电器及摩擦腔内壁发生碰撞实现颗粒与起电器间电荷转移。矿物颗粒经过摩擦荷电后进入分选室, 不同矿物荷电性质不同, 在分选室中电场力的作用下产生不同的运动路径, 从而实现目标矿物与脉石矿物分离<sup>[6]</sup>。旋转摩擦静电分选技术对介电常数相近的难选矿物也有一定分选效果, 该技术已获得中国、美国、加拿大等多个国家的专利。

陶有俊等<sup>[7]</sup> 使用旋转摩擦电选机进行了粉煤

收稿日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51804188)

作者简介: 张龙宇 (1999-), 男, 硕士, 主要从事细颗粒摩擦静电分选研究。

通信作者: 陶东平 (1962-), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为矿物加工工程。

灰脱碳分选实验，发现较佳分选条件为：进风风速 3.7 m/s，摩擦轮转速 5150 r/min，矫正风速 1.8 m/s，极板电压 40 kV。Tao 等<sup>[8]</sup>提出将旋转起电器外加高压电源来强化颗粒荷电，在佛罗里达磷矿分选中对旋转摩擦起电器施加负电压实现了磷灰石与石英等脉石矿物的高效分离。此外 Tao 等<sup>[9]</sup>对国外煤炭的洁净分选研究实验中发现，常规条件下无法实现煤与灰分离。对起电器施加负高压后，煤携带较高正电荷而灰携带负电荷，此时可实现煤与灰分有效分离。他们还指出粒子的电荷密度和极性可以通过改变施加电压大小控制。探究摩擦静电分选技术对磷灰石及其他矿物的分选效果并拓宽其应用十分重要。

本文对铁矿干选后尾矿进行富集磷灰石实验，研究并讨论给矿速度、摩擦起电器转速、进风风速、协风风速等过程参数对磷灰石富集效果

的影响规律和可能机理，研究结果可用于指导未来工业化实验和技术可行性评估，也可供其他矿物的静电分选研究作借鉴。

## 1 实验原料及分选方法

### 1.1 矿物原料

实验中使用的矿物样品来自辽宁沈家铁矿干选后尾矿。矿物物相分析采用 Mineral Liberation Analyzer (MLA650) 完成，主要用于分析样品的矿物组成、粒度分布以及解离度。

#### 1.1.1 矿物组成

表 1 为样品中矿物组成分析结果，磷灰石为分选的目标矿物，其含量为 20.44%。脉石矿物主要为石英、长石、钛铁矿，其含量分别为 18.25%，15.74%，14.42%。

表 1 样品主要矿物组成/%  
Table 1 Main mineral composition of the samples

磷灰石	石英	长石	钛铁矿	黑云母	辉石	铁角闪石	黄铁矿	榍石	磁铁矿	金红石	方解石	其他	总计
20.44	18.25	15.74	14.42	5.83	5.16	3.67	3.16	2.00	1.67	0.79	0.73	1.64	100.00

表 2 为样品中化合物分析结果，其中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 8.64%，脉石以 SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主，其含量分别为 46.69%、13.01% 和 11.09%。

表 2 样品化合物分析结果/%  
Table 2 Compound analysis results of samples

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
8.64	46.69	13.01	11.09	9.61	6.18	5.7	2.37	1.97

#### 1.1.2 矿物粒度与解离度

磷灰石及脉石矿物粒度组成见图 1。磷灰石粒度组成为 0.3~150 μm，其中 D50 为 9.0 μm，44 μm 91.4%。石英、长石及钛铁矿 D50 分别为 8.1、9.9 μm 及 7.9，44 μm 累积含量分别为 98.38%、89.11% 及 91.72%。

样品中磷灰石的连生情况见表 3。由表 3 可知，磷灰石的单体解离度为 97.66%，解离较充分。矿物解离度直接影响分选指标，若磷灰石与其他脉石矿物连生，在摩擦荷电过程中会出现电中和情况<sup>[10]</sup>，充分解离可以减少摩擦过程中的电中和情况，有利于提高摩擦静电分选效果。

### 1.2 纯矿物

基于铁尾矿的矿物组成，确定磷灰石、石

英、长石和钛铁矿为主要研究对象。

纯矿物样品均来自于辽宁某矿，纯矿物样品首先进行拣选和人工破碎，利用盘式磨机将样品研磨后筛分分离出 74 ~ 150 μm 级的样品用于荷电实验。纯矿物的多元素分析结果见表 4，各纯矿物样品的纯度均大于 95%，可作为纯矿物样品进行实验。

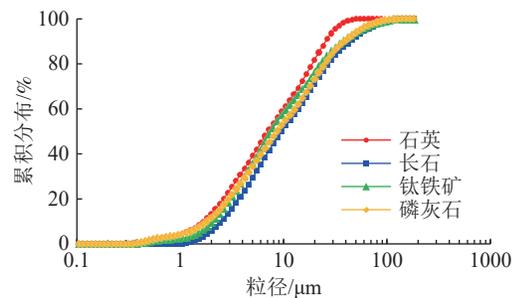


图 1 样品中主要矿物粒度组成

Fig.1 Particle size composition of major minerals in the samples

表 3 磷灰石的连体情况统计  
Table 3 Statistics of apatite hyphenation

嵌布类型	自由表面	与黑云母	与长石	与石英	与钛铁矿	与辉石	与其他	总计
分布率/%	97.66	0.30	0.58	0.20	0.25	0.37	0.65	100.00

表 4 纯矿物的多元素分析结果  
Table 4 Results of multielement analysis of pure minerals

磷灰石	名称	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
	含量/%	38.71	55.63	0.20	2.10	1.38	1.98
石英	名称	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	含量/%	99.46	0.39	0.09	0.03	0.01	0.02
长石	名称	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	其他
	含量/%	65.51	17.53	2.07	1.02	11.82	2.05
钛铁矿	名称	TiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	其他
	含量/%	51.06	38.76	4.80	2.07	1.58	1.73

### 1.3 纯矿物荷电设备及方法

纯矿物荷电实验使用的装置及荷质比测量系统由旋转摩擦静电分选机 (RTS) 改装后构成, Shen 等<sup>[11]</sup> 已对该系统进行了详细描述。在荷质比测量实验中, 将 2 g 矿物给入振动给料器使矿物均匀地给入摩擦腔, 在摩擦腔内荷电之后进入法拉第筒, 记录电荷仪所示最大数值后对法拉第桶内矿物称重后计算矿物荷质比, 每组实验重复 3 次, 每次测量前使用高压气枪吹扫摩擦腔以清除内部积矿并放电。

在矿物荷电实验中, 将实验室内湿度控制在 30%~35%。矿物颗粒获得的最大饱和电荷随湿度上升而降低<sup>[12]</sup>, 因此保持空气湿度在恒定且较低的范围内可以提高矿物荷电能力。

### 1.4 摩擦静电分选设备及实验方法

旋转摩擦静电分选 (RTS) 系统主要包括振动给料装置、旋转摩擦带电室、分选室、产品收集器、真空源及气流矫正装置。旋转摩擦带电室由旋转摩擦起电器、摩擦腔及绝缘外壳组成; 高压电场分选室由绝缘外壳和铜电极板组成, 在分选室上端左右对称分布气流矫正装置。

矿样通过气流输送进入摩擦腔与旋转摩擦起电器接触荷电, 磷灰石与其他脉石矿物因介电常数不同, 经起电器摩擦后磷灰石与脉石矿物产生极性相反的电荷差异<sup>[13]</sup>, 荷电后的颗粒从进料口进入分选室。在分选室内在高压电场作用下带有相反电荷的磷灰石和其他脉石矿物产生不同的运动轨迹, 粒子在分选室内受力和运动状态见图 2。在分选室内颗粒横向受力包括气体横向拖曳力和电场力, 电场力的大小决定了矿物在分选室内横向运动的距离。颗粒纵向受力除重力外还有气流推动力, 颗粒在分选室内停留的时间也受到气流

推力的控制<sup>[14]</sup>。

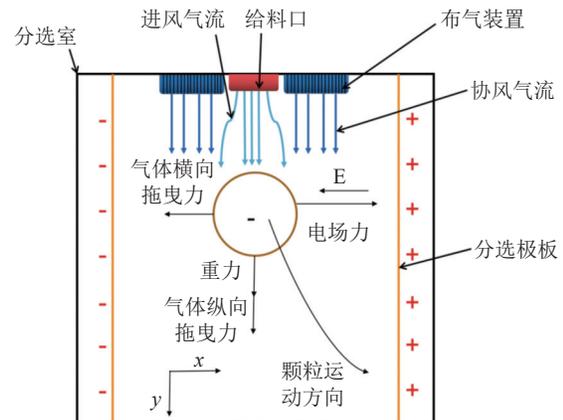


图 2 粒子在分选室内受力和运动状态

Fig.2 Force and motion of particles in the separation chamber

对铁尾矿样品进行粗选单因素条件探索实验基准条件为: 旋转摩擦起电器转速 4000 r/min、给矿速度 50 g/min、协风风速 0.5 m/s、进风风速 0.5 m/s, 分选室电压 25 kV。若不另外说明则实验条件与上述相同。实验室温度保持在 25~30 °C, 湿度保持在 30%~35%。分选结束后对精矿、中矿及尾矿产品分别称重并化验 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位, 每组重复三次。分别计算累积品位及累积回收率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同摩擦材料对物料荷质比的影响

以铜做摩擦材料时矿物荷电情况见图 3a, 当转速为 4000 r/min 时石英和磷灰石荷质比分别达到极大值为 -122.8 nc/g 和 10 nc/g。与传统滑槽实验测得的石英荷质比 -6 nC/g 相比<sup>[15]</sup>, 旋转摩擦起电方法将石英荷质比提高了 20 倍。

同样在起电器转速 4000 r/min 条件下, 摩擦材料更换为不锈钢和铝材料时磷灰石与长石的荷电量大于紫铜摩擦材料, 但石英的荷电量均小于紫

铜摩擦材料。PVC 作为摩擦材料时磷灰石的荷质比远高于其他金属摩擦材料，当起电器转速为

4000 r/min 时磷灰石荷质比达到极大为 118.2 nC/g。

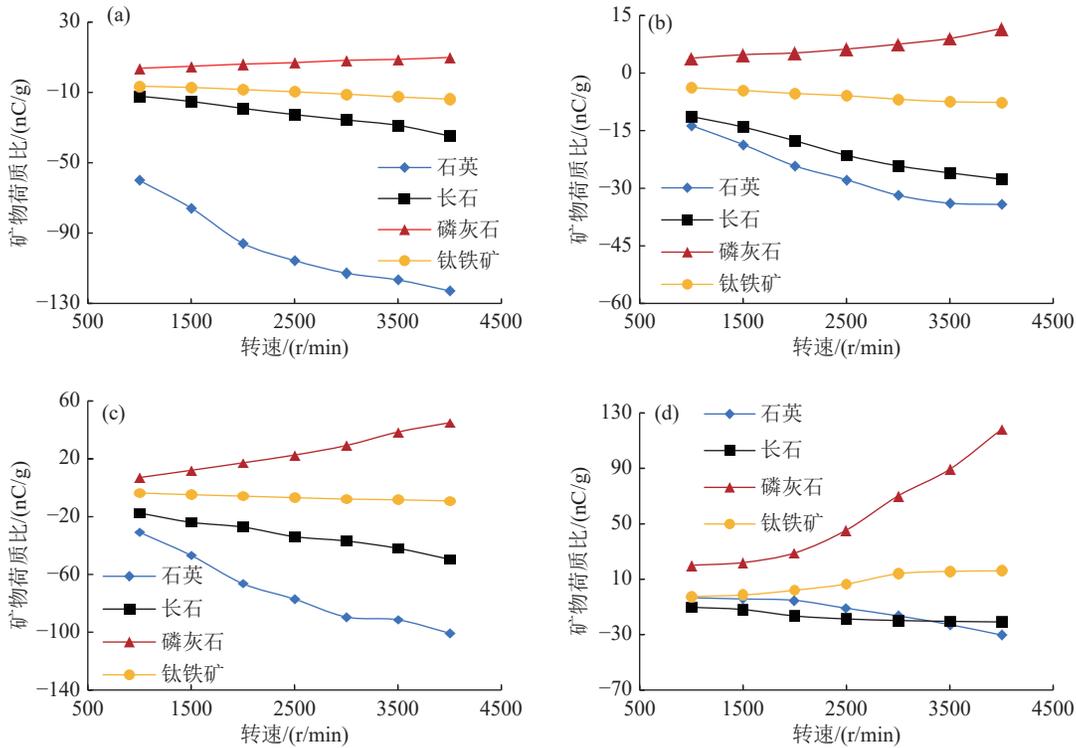


图3 紫铜 (a)、不锈钢 (b)、铝 (c)、PVC(d) 在不同起电器转速下对矿物摩擦荷电大小及极性的影响  
Fig.3 Effect of copper (a), stainless steel (b), aluminum (c), and PVC (d) on mineral friction charge magnitude and polarity at different rotary speeds

图 4 为不同摩擦材料在不同起电器转速下对磷灰石与钛铁矿、长石以及石英荷质比差异的影响。此处颗粒荷质比差异定义为：经过摩擦荷电后磷灰石所荷电荷量 (nC/g) 与脉石矿物所荷电荷量 (nC/g) 之差。接下来的分析中将颗粒荷质比差异简称荷电差异。PVC 为摩擦材料时，磷灰石与钛铁矿及长石的荷电差异均大于其他摩擦材料，且随摩擦起电器转速提高，PVC 材料对提高矿物荷电差异效果最为明显。

以 PVC 做摩擦材料时磷灰石与脉石矿物荷电差异均大于金属摩擦材料摩擦材料对磷灰石与石英 (c) 荷电差异影响由大到小分别为 PVC、铝、紫铜、不锈钢，荷质比差异分别为：148.5、145.7、132.8、45.8 nC/g。相较于金属摩擦材料，PVC 作为摩擦材料时磷灰石与脉石矿物荷电差异更大。在实际矿物分选中颗粒荷电差异越大则越容易将目标矿物与脉石矿物分离。结合上述实验结果，分选实际高磷铁尾矿时使用 PVC 作为摩擦材料较佳。

### 2.2 摩擦起电器转速对铁尾矿中磷灰石富集效果的影响

旋转摩擦起电器转速一方面会改变起电器与颗粒之间的相对运动速度，另一方面会影响摩擦腔内气流的稳定程度。旋转摩擦起电器转速对磷灰石富集效果的影响见图 5。

图 5a 为摩擦起电器转速在 1000~5000 r/min 范围内变化时对磷灰石富集效果的影响。在 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 累积回收率相同条件下，随起电器转速提高，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 累积品位逐渐提高，当转速为 5000 r/min 时效果较佳。当起电器转速从 1000 r/min 增加到 5000 r/min，精矿 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位由 22% 提高到 27%，精矿回收率由 27% 提高到 48%，见图 5b。分选效果随起电器转速提高而增强。

提高旋转摩擦起电器转速也会提高起电器与颗粒相对运动速度，提高颗粒与起电器，颗粒与颗粒及颗粒与摩擦腔的碰撞程度<sup>[16]</sup>。Zhang 等<sup>[17]</sup>也模拟了旋转起电器在高速旋转时摩擦腔内气流的流动情况以及颗粒在摩擦腔内的运动轨迹，指

出提高旋转摩擦起电器转速可稳定摩擦腔内气流，颗粒在摩擦腔内碰撞次数增加，荷电更加充分。颗粒充分荷电后在分选室内收到电场的吸引力更强，目的矿物在分选室内偏转角度大，通过提高矿物回收率以达到对目的矿物的富集效果。

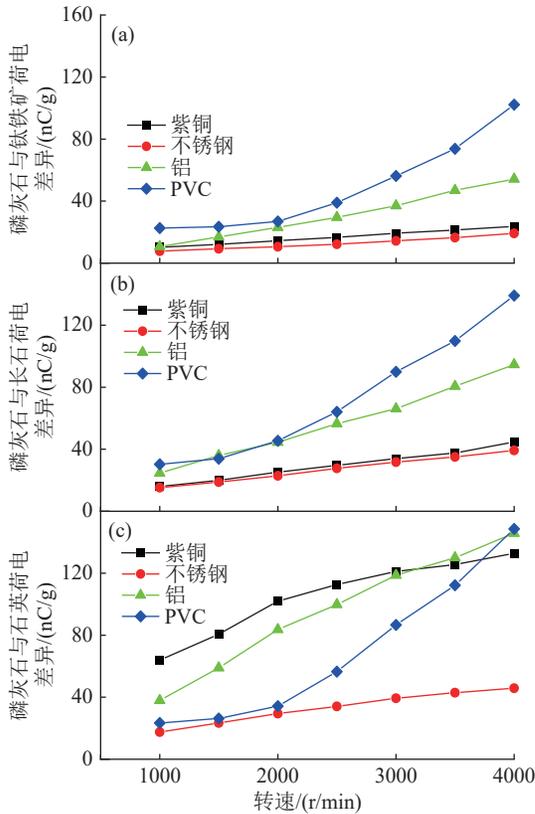


图4 磷灰石与钛铁矿 (a)、长石 (b) 及石英 (c) 在不同起电器转速下荷电差异

Fig.4 Charging differences between apatite and ilmenite (a), feldspar (b) and quartz (c) at different rotary speeds

### 2.3 给矿速度对铁尾矿中磷灰石富集效果的影响

不同样品的矿物粒度组成不同，较佳给矿速度也不同，探究不同给矿速度下矿物分选效果十分重要，给矿速度对磷灰石富集效果见图6。

图6a为给矿速度在30~110 g/min范围内变化时对磷灰石富集效果的影响。在相同累积回收率条件下，随着给矿速度增加， $P_2O_5$  累积品位先提高后降低，较佳给矿速度为50 g/min。当给矿速度从30 g/min提高到50 g/min时精矿品位提高了1.6%，回收率提高了9.6%，此时 $P_2O_5$  较佳品位为27.4%，较佳回收率为49.3%，见图6b。当给矿速度从50 g/min提高到110 g/min，精矿的品位及回收率都呈下降趋势，分选效果逐渐变差。

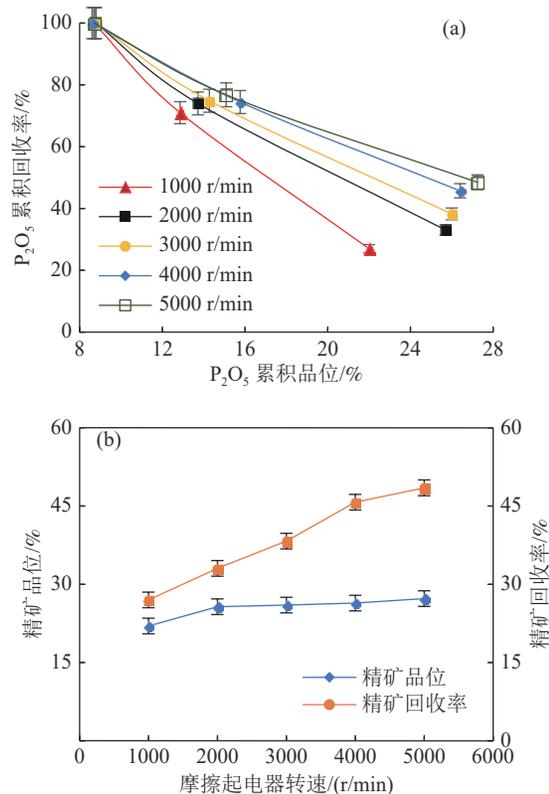


图5 摩擦起电器转速对磷灰石富集效果的影响  
Fig.5 Effect of rotational speed of friction charger on apatite enrichment

Ahmed等<sup>[18]</sup>在研究中发现，给矿速度过慢会造成摩擦腔内物料密度低，降低了摩擦腔内颗粒与颗粒摩擦荷电机理，提高转速可以进一步提高颗粒与颗粒碰撞荷电机理，进而提高分选性能。彭真等<sup>[15]</sup>也指出提高给矿速度会提高摩擦腔内颗粒与颗粒之间碰撞概率，增大颗粒间碰撞荷电强度，进而提高矿粒的荷电效果。因此当给矿速度从30 g/min提高到50 g/min后颗粒荷电更加充分，精矿品位及回收率都有所提高。给矿速度过快会造成摩擦腔内颗粒密度急剧增大，颗粒间相互干扰加剧，从而影响了颗粒在摩擦腔内的运动轨迹，部分没有充分荷电的颗粒在进风气流及重力作用下进入分选室<sup>[17]</sup>，在分选室内颗粒因荷电强度低，横向偏转距离小而进入中矿，导致了精矿品位及回收率降低。

### 2.4 协风风速对铁尾矿中磷灰石富集效果的影响

协风通过分选室上部的两组布气装置均匀进入分选室，对分选室内颗粒的纵向运动起到辅助作用的同时也避免细颗粒在分选室内运动时发生碰撞团聚，协风风速对磷灰石富集效果影响见图7。

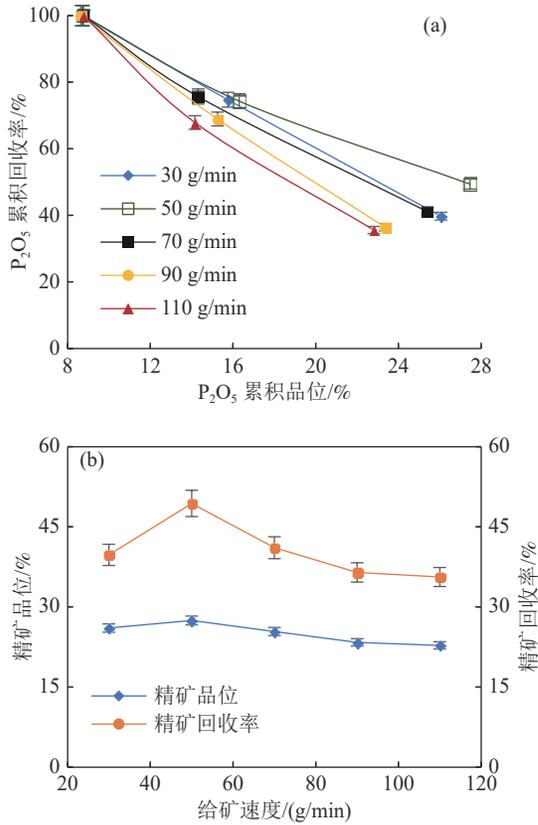


图6 给矿速度对磷灰石富集效果的影响  
Fig.6 Effect of feed rate on apatite enrichment

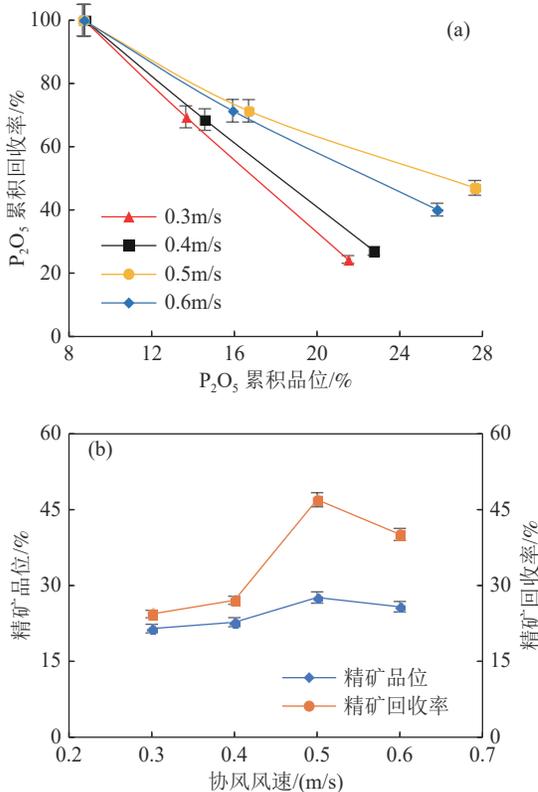


图7 协风风速对磷灰石富集效果的影响  
Fig.7 Effect of co-flow winds speed on apatite enrichment

图7a为协风风速在0.3~0.6 m/s范围内对磷灰石富集效果影响。从图中可以看出累积回收率相同时，累积品位随协风风速增加先提高后降低。协风风速对精矿品位及回收率分析见图7b，当协风风速从0.3 m/s增加到0.5 m/s的过程中精矿品位及回收率逐渐上升，在0.5 m/s处达到较佳分选效果，此时P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位为27.6%，回收率为47%。协风风速继续增大精矿的品位及回收率都下降，分选效果变差。

Zhang等<sup>[19]</sup>对分选室中协风对颗粒运动情况模拟发现，协风风速过小时，协风气体对颗粒纵向运动的辅助效果差，颗粒在电场力作用下产生过度的横向偏转，导致颗粒落在极板处而产生冲击反弹，目的矿物在极板反弹后进入中矿集矿口处导致精矿产率下降进而导致回收率下降。若协风风速过大则协风气体对颗粒纵向拖曳力过大导致颗粒在分选室内停留时间短<sup>[7,20]</sup>，横向偏转角度小。大量目的矿物进入中矿，精矿回收率降低导致富集效果变差。

### 2.5 进风风速对铁尾矿中磷灰石富集效果的影响

进风大小影响摩擦腔内颗粒运动轨迹进而影响颗粒滞留时间及荷电效果。另外进风可以携带颗粒在分选室内运动，促进矿物颗粒在集矿口处排出并收集。进风风速对磷灰石富集效果的影响见图8。

图8a为进风风速在0.3~0.7 m/s范围内对磷灰石富集效果的影响，当P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>累积回收率相同时，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>累积品位随进风风速增加先提高后降低。进风风速0.6 m/s时分选效果较佳。进风风速对精矿品位及回收率分析见图8b。随进风风速增大精矿品位和回收率先逐渐增大，当进风风速为0.6 m/s时，精矿P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位较佳为26.8%，回收率较佳为31.8%，当进风风速继续增大时分选效果降低。

进风风速与摩擦轮转速共同影响摩擦腔内气流稳定性，较低的进风风速使摩擦腔内的气流更加稳定，提高颗粒与摩擦腔碰撞次数进而提高颗粒荷电效果，进风风速对碰撞次数有显著影响，较快的进风风速会导致摩擦腔内气流不稳定，减少矿物颗粒在摩擦腔内的碰撞次数而导致矿物荷电不充分，目的矿物富集效果变差<sup>[17,21]</sup>。

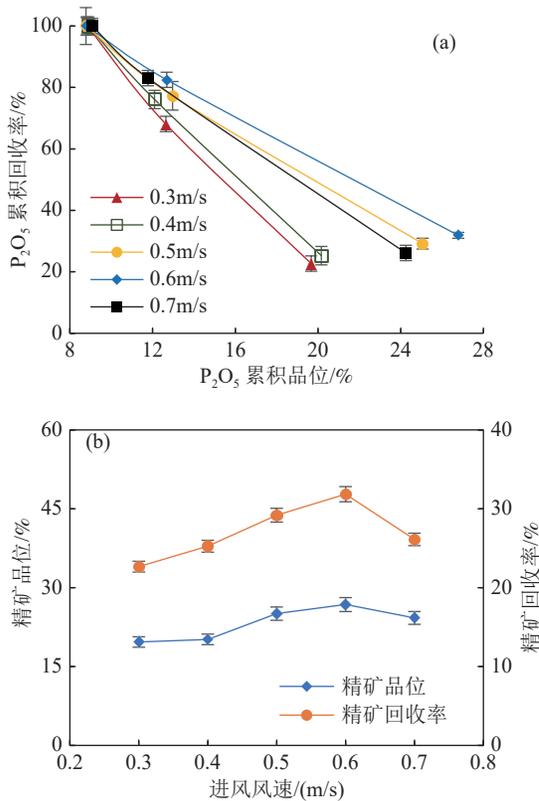


图 8 进风风速对磷灰石富集效果的影响  
Fig.8 Effect of feed flow air velocity on the apatite enrichment

### 3 结论

(1) 磷灰石与其他脉石矿物荷电量随旋转摩擦起电器转速提高而增大。相较于金属摩擦材料，PVC 作为摩擦材料时磷灰石与脉石矿物荷质比差异较大，磷灰石、石英、长石、钛铁矿荷质比分别为 118.2、-30、-20.8、16 nC/g。金属中铝为摩擦材料时磷灰石与石英和长石荷质比差异较大，磷灰石极大荷电量为 45 nC/g。

(2) 精矿磷灰石富集效果随旋转摩擦起电器转速增加持续改善，但随着给矿速度、协风风速、进风风速的增大先提高后降低。

(3) 实际铁尾矿分选实验较佳条件为：旋转摩擦起电器转速 5000 r/min，给矿速度 50 g/min，协风风速 0.5 m/s，进风风速 0.6 m/s。在这些条件下，可从铁尾矿中得到 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位 27.6% 的精矿，回收率达到 49.3%。

### 参考文献：

[1] 曾理, 姜小明. Gemini 表面活性剂体系下钙质磷矿中白云石的可浮性研究[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 83-88.

ZENG L, JIANG X M. Floatability study of dolomite in calcareous phosphorite under Gemini surfactant system [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1): 6.

[2] 韩继康, 梁冰, 李国峰, 等. 某含磷铁矿的可选择性实验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2): 49-54.

HAN J K, LIANG B, LI G F, et al. Experimental study on the selectivity of a phosphorus-bearing iron ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2): 6.

[3] 于慧梅, 何欢, 孟博. 辽宁某磷铁矿中回收磷灰石浮选实验研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):48-53.

YU H M, HE H, MENG B. Experimental study on flotation of recovered apatite in a Liaoning iron phosphate mine[J]. Journal of Guizhou University, 2021, 38(3):48-53.

[4] 于慧敏, 戴惠新, 陈晓鸣, 等. 国外摩擦电选的研究与发展[J]. 矿产保护与利用, 2015(4):67-72.

YU H M, DAI H X, CHEN X M, et al. Research and development of friction electrowinning abroad[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(4):67-72.

[5] 王乾帅, 陶东平, 赵通林, 等. 辉钼矿干法旋转摩擦电选预抛尾研究[J]. 矿产综合利用, 2021(6):179-184.

WANG Q S, TAO D P, ZHAO T L, et al. Study of dry rotary friction electrowinning pre-cast tailing of molybdenite ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(6):179-184.

[6] 叶世旺, 陶东平, 陶有俊, 等. 粒度对粉煤灰旋转摩擦电选效果的影响研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2):219-222.

YE S W, TAO D P, TAO Y J, et al. Study on the effect of particle size on the effect of rotary friction electric separation of fly ash[J]. Coal Technology, 2022, 41(2):219-222.

[7] YOUJUN T, LING Z, DONGPING T, et al. Effects of key factors of rotary triboelectrostatic separator on efficiency of fly ash decarbonization[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(6).

[8] TAO D, AL-HWAITI M. Beneficiation study of Eshidiya phosphorites using a rotary triboelectrostatic separator[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(3):357-364.

[9] D. T, A. S, Q. L, et al. Dry Cleaning of pulverized coal using a novel rotary triboelectrostatic separator (RTS)[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011, 31(3-4).

[10] FANGYUAN M, YOUJUN T, YUSHUAI X, et al. Effects of pulverized coal modification on rotary triboelectric separation[J]. Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 2020.

[11] SHEN Y, TAO D, ZHANG L, et al. An experimental study of triboelectrostatic particle charging behavior and its

- associated fundamentals[J]. *Powder Technology*, 2023, 429:118880.
- [12] TOSHIYUKI N, TAKESHI S, HIROAKI M. The environment humidity effect on the tribo-charge of powder[J]. *Powder Technology*, 2003, 135.
- [13] 高孟华, 章新喜, 陈清如. 煤系伴生矿物介电常数和摩擦带电实验研究[J]. *中国矿业*, 2007(8):106-109.
- GAO M H, ZHANG X X, CHEN Q R. Experimental study of dielectric constant and frictional charging of coal associated minerals[J]. *China Mining Magazine*, 2007(8):106-109.
- [14] 申有悦, 邵怀志, 杨晓, 等. 摩擦静电分选技术研究与应用进展[J]. *矿冶工程*, 2022, 42(5):44-50.
- SHEN Y Y, SHAO H Z, YANG X, et al. Progress in friction electrostatic sorting technology research and application[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022, 42(5):44-50.
- [15] 彭真, 杨兴, 王海锋, 等. 钛铁矿摩擦静电分选研究[J]. *金属矿山*, 2018(2):80-84.
- PENG Z, YANG X, WANG H F, et al. Study on friction electrostatic separation of ilmenite[J]. *Metal Mine*, 2018(2):80-84.
- [16] D TAO ZHAO Y. Dry Cleaning of pulverized coal using a novel rotary triboelectrostatic separator (RTS)[J]. *Coal Preparation*, 2011, 31(3-4):187-202.
- [17] LING Z, YOUJUN T, LU Y. Research on flow field and kinematic characteristics of fly ash particles in rotary triboelectrostatic separator[J]. *Powder Technology*, 2018, 336.
- [18] AHMED S, DANIEL T. Innovative RTS Technology for dry beneficiation of phosphate[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 83.
- [19] ZHANG L, TAO Y J, TAO D P, et al. Experimental study and numerical simulation on fly ash separation with different plate voltages in rotary triboelectrostatic separator[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2018, 54(3):722-731.
- [20] TAO Y, DING Q, DENG M, et al. Electrical properties of fly ash and its decarbonization by electrostatic separation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(4):629-633.
- [21] ZHANG L, TAO Y, TAO D, et al. Experimental study and numerical simulation on fly ash separation with different plate voltages in rotary triboelectrostatic separator[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2018(3).

## Apatite Enrichment from Iron Ore Tailings by Rotary Triboelectrostatic Separator

ZHANG Longyu<sup>1</sup>, WU Zhongxian<sup>1,2</sup>, SHEN Youyue<sup>1</sup>, TAO Dongping<sup>1</sup>

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 2.School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** This is an article in the field of mineral processing engineering. Many iron ore tailings in China contain precious phosphorite resources, such as apatite, but there is a lack of economic and effective separation methods to separate and utilize them. The rotary triboelectric separation (RTS) technique has the advantages of low environmental pollution and energy consumption without the usage of water and reagents. This paper emphatically investigated the effect of different friction materials including copper, stainless steel, aluminum and PVC (polyvinyl chloride) on the charging characteristics of pure minerals of apatite, quartz, or thoclase and ilmenite which were the main components of iron ore tailings. The variation of apatite separation and enrichment performance in Shenjia iron tailings with the primary rotary triboelectrostatic separation parameters was studied and the optimum conditions were determined. It was concluded that apatite rubbed with PVC showed the greatest difference in the charge-mass ratio with other minerals. In the actual subsequent tests of apatite from iron ore tailings, a reasonably good separation performance with an apatite concentrate of 27.6%  $P_2O_5$  grade at 49.3%  $P_2O_5$  recovery was obtained under the conditions of rotary charger rotation speed 5000 r/min, feed rate 50 g/min, co-flow airvelocity 0.5 m/s, feed flow air velocity 0.6 m/s, accomplishing the effective separation and purification of apatite in iron tailings.

**Keywords:** Mineral processing engineering; Friction charging; Apatite; Electrostatic separation; Iron ore tailings