

# 新工科背景下矿物加工研究方法实验设计

## ——以磷矿正反浮选实验为例

罗惠华, 李洪强, 杨丙桥, 梁欢, 阮耀阳

武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年5月5日; 录用日期: 2023年6月2日; 发布日期: 2023年6月8日

### 摘要

在新工科背景下, 为了探索工程实践教育改革的新路径, 加强实践课程的教学, 矿物加工研究方法实践课程展开了磷矿正反浮选一系列综合性实验, 该实验设计了一次一因素法研究磨矿细度与浮选指标的试验, 利用三因素两水平全面析因法考查了正浮选药剂制度对选矿指标的影响, 利用登山实验法优化药剂制度, 采用单因素法进行反浮选条件实验, 进行了开路与闭路流程实验。该综合设计实验能够训练学生的科研动手能力, 培养学生新工科背景下学习、锻炼了学生自主设计实验, 科研创新和工程实践能力, 能够运用正确的思维方法, 综合所学专业知识, 更为系统地分析与解决所遇到的问题。

### 关键词

矿物加工研究方法, 实验教学, 试验方法设计

# Experimental Design of Mineral Processing Research Methods under the Background of New Engineering

## —Taking the Direct and Reverse Flotation Experiment of Phosphate Rock as an Example

Huihua Luo, Hongqiang Li, Bingqiao Yang, Huan Liang, Yaoyang Ruan

School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: May 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Jun. 8<sup>th</sup>, 2023

### Abstract

Under the background of new engineering, in order to explore a new path for the reform of engi-

neering practical education and the practical course of mineral processing research methods, a series of comprehensive experiments on direct and reverse flotation of phosphate rock have been designed. The experiments have been designed to study the grinding fineness and flotation indicators using a one time one factor method. The three factor two level comprehensive factorial method has been used to examine the impact of the positive flotation reagent system on the beneficiation indicators, and the mountaineering experiment has been conducted to optimize the reagent system. Reverse flotation experiments were conducted using a single factor method, and open circuit and closed circuit flow experiments were conducted. This comprehensive design experiment can train students' scientific research hands-on ability, cultivate students' ability to independently design experiments, scientific research innovation, and engineering practice under the new engineering background, and be able to use correct thinking methods and integrate professional knowledge learned to more systematically analyze and solve problems encountered.

## Keywords

Research Methods for Mineral Processing, Experimental Teaching, Design of Test Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

“新工科”理念源于在原有工科基础上，渗透进新的技术、理念、内涵，即在建设理念、培养要求和创新途径三个层面上对传统工科提出了新的要求[1]。新工科作为新时代背景下工程实践教育改革新路径，是我国未来培养创新人才的新方向，其中创新性是“新工科”建设的特征之一[2]。因此，倡导一种新工科背景下教学与科研、实践相融合的培养形式，将导师的科研思想、方法和成果等有关内容融入到教学过程中，加强大学生创新与实践能力的培养，对于提高创新人才培养质量具有重要作用[3]-[10]。我校矿物加工工程专业是以化工与矿业工程湖北省“双一流”学科为依托，是全国唯一培养化学矿加工与利用创新人才的专业，国家第一批“卓越工程师教育培养计划”试点专业。主要培养能在化学矿特别是磷矿加工领域从事工程设计、生产施工、生产管理、科学研究与科技创新工作的高级专门人才。磷矿加工专题实验是将教师多年科研成果与矿物加工工程专业课有机结合形成的一门实践课程，主要针对低品位难选胶磷矿选矿中所面临的问题，系统讲授在磷矿加工工程领域的基本原理、设计计算方法、工艺技术和现场应用实例、新技术及发展方向，同时与实践相结合，设计了一系列的研究方法应用于磷矿选矿专题实验中，本实验旨在帮助学生掌握磷矿选矿的工艺与方法、拓宽专业视野，培养学生创新意识和实践能力，引导学生进行科研探索。主要对学生进行科研能力的基本训练，培养学生对磷矿矿石进行可选性研究的科研能力，也就是使学生能够针对不同的磷矿矿石性质及研究条件拟定合理的实验研究方案；其次是对学生实践动手能力的培养，根据拟定的实验方案，在实验室动手完成整个实际矿石实验研究过程，并能够利用专业的基础知识以及理论对实验过程出现的现象及实验结果进行分析；最后是对学生综合解决问题能力的培养，能够运用正确的思维方法综合所学专业知知识，系统地分析与解决所遇到的专业问题。总的来说本门实验课程的教学目标是培养学生独立研究问题和解决问题的能力，培养出有创造性的矿物加工人才。

## 2. 实验目的

(1) 掌握矿物加工研究实验设计的方法。(2) 理解磷矿正反浮选工艺的设计原则。(3) 了解影响磷矿正反浮选效果的因素。(4) 学会在磷矿正反浮选中, 药剂制度的制定, 工艺参数的调节以及各种药剂的作用以及作用机理。

## 3. 实验设计、方法与步骤

磷矿正反浮选实验的主要内容包括: 根据磷矿工艺矿物学特性, 确定该磷矿选别的方案, 通过实验现象以及实验数据分析影响浮选的因素, 查明各因素在浮选中的主次关系和相互影响的程度, 确定正反浮选工艺条件; 提出最终浮选指标和必要的其他技术指标。由于磷矿浮选过程中, 各种组成矿物的选择性分离是基于矿物可浮性的差异, 因此, 通过浮选药剂调整各种矿物表面的物理化学性质是浮选实验的关键。

### (一) 实验设计

实验之前, 需要完成文献综述以及制定实验的方案, 进行实验设计选择的实验方法较多, 例如单因素实验、以及多因素实验等[11] [12]。磷矿正反实验中采用单因素实验法进行磨矿细度实验, 为了使学学生较好掌握多因素实验法, 在磷矿正浮选实验中, 采用三因素两水平全面析因实验法探索药剂对浮选的影响以及药剂之间的交互作用, 同时采用最陡坡法优化正浮选的药剂制度, 反浮选过程中采用单因素实验法考查反浮选硫酸、磷酸药剂对指标的影响。

### (二) 实验方法

实践是工科学生提高能力的重要环节, 能使学生受到系统的基本训练。此方法以磷矿石为对象开展一套磷矿正反浮选实验研究, 包括: 矿石的采取与制备, 磨矿筛析与磨矿细度实验、正浮选药剂制度优先实验, 反浮选硫酸、磷酸用量等条件实验, 同时进行开路流程和闭路流程实验等。采用实验室的小型棒磨机进行磨矿, 将磨到一定细度, 使矿物单体解离, 获得适宜浮选的矿浆, 利用湿式分样机进行分样, 分好的矿样添加到浮选机的浮选槽中, 进行碱性介质中的正浮选, 在碱性介质中, 采用脂肪酸(皂)类阴离子型捕收剂浮选富集磷矿物, 利用抑制剂抑制硅酸盐矿物, 将其留在浮选槽内作为尾矿排除, 降低矿石中  $\text{SiO}_2$  的含量, 将上述正浮选获得的泡沫产品, 在弱酸条件下进行反浮选, 抑制磷矿物, 浮出矿石中含镁钙的碳酸盐矿物, 降低矿石中  $\text{MgO}$  的含量, 以提高矿石中  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量, 根据矿石中磷矿物、硅酸盐矿物以及碳酸盐矿物表现出的不同可浮性, 采用不同的浮选工艺及不同的药剂制度, 充分发挥各自在不同介质中的可浮性, 从而实现磷矿物、硅酸盐矿物以及碳酸盐矿物的高效分选。

### (三) 实验步骤

(1) 学习实验室安全制度与操作规程, 熟悉磨矿机、分样机、浮选机等设备结构, 了解它们操作要点。(2) 进行磨矿细度实验, 磨矿时要确定适宜的磨矿介质种类和配比、装球量、球磨机转速和磨矿浓度, 在实验中, 采用一次一因素法, 即改变了磨矿时间, 不改变磨矿的其他的条件, 如磨机转速、填充率、钢球配比、磨矿浓度等, 同时进行筛析实验, 测定磨矿细度。(3) 浮选实验, 根据浮选的给矿, 计算出不同药剂的用量, 在浮选机搅拌过程中, 按照顺序加入不同的浮选药剂, 加药完成后, 打开充气阀, 向矿浆中充气浮选, 随着浮选的进行, 浮选槽中的液位会逐渐降低, 随时补加清水, 同时冲洗粘附在搅拌轴、槽壁上的颗粒, 清水补加量保证矿浆面稳定, 待无泡沫或泡沫基本为水泡后, 浮选完成, 获得磷精矿与尾矿。(4) 将分选所得的磷精矿与尾矿分别进行过滤脱水, 烘干至恒重, 冷却至室温后称重, 并制样、分析化验, 及时记录实验数据。(5) 清理实验设备、整理实验场所。在实验操作过程中的工艺参数如浮选时间、矿浆浓度、相关药剂用量、充气量等实验条件可根据需要由指导教师确定。

### (四) 注意事项

(1) 实验中设备数量、种类较多,实验之前要充掌握每种设备的操作方法。(2) 在磷矿试样制备过程中,按照要求进行筛分、破碎、混匀、缩分,保证试样的代表性。(3) 注意实验中各设备的启停顺序,以及药剂配置与添加的顺序。(4) 在浮选闭路实验中,随着中矿的返回,捕收剂的用量要相应地减少,中矿会带进大量的水,可以将脱出的中矿水用作冲洗水或补加水,应预先详细地作好计划,规定操作程序,制定出整个试验流程,标注每个产品,避免出现矿样混杂,导致实验失败。(5) 注意用水、电以及人身安全。

#### 4. 数据处理与分析

##### (一) 磨矿细度实验数据处理

随着磨矿时间的不同,矿石的细度会发生改变,此时,要求学生进行四次不同磨矿时间的实验,通过筛析实验,测定四次不同磨矿时间下矿样的细度,同时采用一次一因素法进行正浮选实验,四次浮选实验的药剂制度以及浮选机设定的参数相同,此时,获得了不同磨矿细度下的浮选精矿,根据浮选产品化学分析结果(精矿、尾矿品位),分别计算各点浮选精矿回收率 $\varepsilon$ 和产率 $\gamma$ ,由此得出选矿效率 $E(E = \varepsilon - \gamma)$ ,实验数据记录表可设计如表1所示,同时绘制磨矿细度与磨矿时间以及选矿指标与磨矿细度的两条曲线。因此,通过实验曲线,学生可以比较直观地了解磨矿时间-磨矿细度-浮选指标的关系,进而确定下一步实验的磨矿细度。

**Table 1.** Experiment data processing record of grinding fineness

**表 1.** 磨矿细度实验数据处理记录

磨矿时间/min	磨矿细度/(-0.07 mm%)	产率/%	品位/%	回收率/%	选矿效率/%

##### (二) 正浮选实验数据处理

**Table 2.** Table of experimental factor levels

**表 2.** 实验因素水平数表

因素水平	A: 碳酸钠/(kg/t)	B: 水玻璃/(kg/t)	C: 捕收剂/(kg/t)
1			
2			

**Table 3.** Record table for data processing of three factor two level orthogonal experiment

**表 3.** 三因素两水平正交实验数据处理记录表

实验次数	因素水平数	1	2	3	4	5	6	7	选矿效率 E%
		A	B	AB	C	AC	BC	ABC	
1		1	1	1	1	1	1	1	
2		2	1	2	1	2	1	2	
3		1	2	2	1	1	2	2	
4		2	2	1	1	2	2	1	
5		1	1	1	2	2	2	2	
6		2	1	2	2	1	2	1	
7		1	2	2	2	2	1	1	
8		2	2	1	2	1	1	2	

## Continued

$$\begin{aligned}
 &EI \\
 &EII \\
 &\overline{EI} \\
 &\overline{EII} \\
 &R = EII - EI \\
 &r = \overline{EII} - \overline{EI} \\
 &T \text{ 值} \\
 &F \text{ 值}
 \end{aligned}$$

影响磷矿正浮选实验的因素较多,采用碳酸钠最为碱性调整剂,将矿浆的 pH 值调整至弱碱性条件,水玻璃作为脉石硅酸盐矿物的抑制剂,利用脂肪酸(皂)类的阴离子表面活性剂作为捕收剂,仅安排了浮选药剂碳酸钠、水玻璃以及捕收剂三个因素分别在两个不同用量下的浮选实验,根据正交试验的性质,可以采用  $L_8(2^7)$  正交表安排此三因素两水平的实验[11] [12],设计了实验的因素以及水平见表 2,进行 8 次实验,实验数据记录表可设计如表 3 所示,利用选矿效率来分析查明各药剂在浮选过程中的主次因素和相互影响的程度。

由于实验没有安排重复实验,为了估计实验的误差,可将极差绝对值小的作为误差,利用方差分析,进行数据处理,由于浮选药剂碳酸钠、水玻璃、捕收剂三个因素的用量相同及水平数相同,因此可以采用极差分析,分别计算除误差列之外每一列的 T 值以及 F 值,进行 T 检验或者 F 检验。通过数据的分析对比,说明碳酸钠、水玻璃、捕收剂三个因素对选别效率的影响程度,进而判断哪一种药剂为主要的影响因素,哪一种药剂为次要因素,药剂间有无交互作用,同时选出药剂浓度较优的组合。为了进一步优化药剂制度,可采用最陡坡法[11] [12]寻找最优条件,按找到的最陡坡方向,确定新步长,以上面八点最佳点作为起点,按新步长布置 3~4 个点进行登山试验,以找到最优条件为止,从而结束整个正浮选药剂制度选优试验。

## (三) 反浮选实验数据处理

磷矿反浮选是将上述正浮选获得精矿,在弱酸性介质下,抑制磷矿物,浮选出碳酸盐矿物,降低磷精矿中的 MgO。硫酸、磷酸是常用的调整剂,在磷矿反浮选中,常用无机酸作调整剂来调节所需的酸性条件,硫酸还具有酸洗作用,可消除正浮选药剂带入的不利影响,磷酸常作磷矿物的抑制剂。实验考察硫酸、磷酸不同用量对浮选指标的影响,此时,获得了硫酸、磷酸不同用量下的浮选精矿,分析精矿的  $P_2O_5$  品位,计算出选矿指标,绘制硫酸、磷酸不同用量与选矿指标的曲线图,实验过程之后,学生比较直观地了解硫酸、磷酸不同用量与浮选指标的关系。

## (四) 开路与闭路流程实验数据处理

开路实验是在上述条件实验的基础上进行的流程实验,其目的是为了获得合格的技术指标,确定所需的粗选,精选和扫选次数以及流程结构,同时对精、中、尾矿产品进行查定,为实验室闭路流程提供依据。

闭路流程实验是在开路实验的基础上进行了的模拟连续流程实验,用来考查中矿循环对实验结果影响而进行的批次流程实验,是在不连续的浮选机上模仿连续的生产过程。其目的是:找出中矿产品返回对浮选指标的影响;调整由于中矿循环引起药剂用量主要是捕收剂以及起泡剂用量的变化,考察中矿矿浆带来的矿泥、或其他有害固体、或可溶性物质是否累积并妨碍浮选;检查和校核所拟定的浮选工艺流程,确定可能达到的浮选指标等。闭路实验的作法是按照开路实验选定的流程和条件,接连而重复地做几个实验,但每次所得的中间产品(精选尾矿、扫选精矿)仿照现场连续生产流程一样,给到下一实验的相

应作业,直至实验产品达到平衡为止。将达到平衡后的最后 2~3 个实验的精矿合并作总精矿,尾矿合并作总尾矿,然后根据“总原矿 = 总精矿 + 总尾矿”的原则反推总原矿的指标,中矿则认为进出相等,单独计算,这与选厂设计时计算闭路流程物料平衡的方法相似[11]。最后根据实验结果绘制出闭路流程的数质量流程图。

## 5. 学生需要思考的问题

在该综合设计实验中需要学生思考及讨论的问题主要有:(1) 实验设计中正交试验的特点以及怎样选取正交表进行试验(2) 磷矿正反浮选对比其他选矿工艺体现了哪些分选优势,存在哪些缺点?(3) 浮选采用的药剂的作用以及机理是什么?(4) 选矿效率采用哪一种计算公式,其物理意义是什么?(5) 通过实验结果说明磷矿正反浮选应用前景如何?

对专业实验,学生普遍认为实验过程就是为了完成实验数据的测试,没有关注实验现象本身及实验结果的准确性,没有详细地分析实验数据以及透过实验数据所表达的浮选机理,因此,在实验之前,学生需要提前预习及复习相关理论知识,根据实验的要求,让学生查找中英文资料,进行文献综述,并设计实验方案,写出相关开题报告,在实验过程中,指导学生分析讨论实验结果,思考解决遇到的难题,检验学生对实验的内容以及基础知识、原理掌握程度,将理论知识与专业实践相结合,融会贯通,拓展知识面,实验结束之后,开展实验交流,提交非单元实验报告,而是研究性的论文或报告。指导教师要求学生按科研报告的格式编写实验报告而不是传统的实验报告格式。在实验报告中,包括前言部分、实验的药剂、设备仪器部分、矿石的性质、实验结果分析、实验的结论以及实验中存在的问题提出建议等。报告第一部分为前言,主要介绍实验的目的、意义,实验的依据,以及实验的要求,第二部分主要介绍实验所用的药剂的性能、仪器设备的规格,第三部分综述矿石的物理、化学性以及矿石的构造,根据矿石的性质提供几种矿石可选性的流程工艺,制定合理的方案流程。第四部分实验结果的分析,在该部分内容编写上,简述各实验的过程,列出实验的数据,分析实验的数据,确定每一实验的最佳条件以及每一个实验的结论,采用数据列表、图示同时说明实验的结果,分析问题,结论部分,编写出矿石的可选性的结论以及推荐该类的矿石选矿工艺。通过实验和报告的编写,锻炼了学生的动手能力,和独立的科研能力,同时在编写报告时,既锻炼学生的编写科研报告的能力,又提高了学生的对实验数据处理的能力,较好达到综合与设计实验的目的。

## 6. 结语

在“新工科”建设的背景下,根据本校矿物加工专业的特色,将实验教学与科研相融合,开设了以磷矿正反浮选试验研究的矿物加工研究方法实验课,该磷矿正反浮选实验研究与设计是一种综合、大型、全面的矿物加工实验研究方法实验。学生是在完成矿物加工工程专业知识的基础上进行的实验与设计,可进一步巩固前期矿物加工工程的单元实验,加深学生对课程中基本知识和基本原理的理解,加强对磷矿浮选工艺的掌握。在此基础上,结合大学生创新实验,鼓励学生自主设计并完成实验、分析浮选影响因素、研究提高浮选指标的方法、理论联系实践,完善和探索浮选工艺在磷矿选矿中的应用。该系统实验目前已应用于课程教学和大学生创新实验实践,多年的教学表明,通过该实验,激发了学生的学习、研究的兴趣,锻炼了学生自主设计实验、分析和解决实验中问题的能力,提高了学生的科研创新和工程实践能力。本综合实验涉及矿物加工工程的碎矿、矿样的加工制备、磨矿分级、搅拌调浆、浮选工艺、浮选药剂、表面化学原理、过滤脱水等多方面的知识内容,充分利用和发挥先进工艺在实验教学中的作用,具有研究因素多,新颖性和实用性兼具的特点,对于增强学生实践动手能力和科研创新意识具有重要的意义,对学生充分理解实际的生产现实具有重要的教育意义。

## 参考文献

- [1] 顾佩华. 新工科与新范式: 概念、框架和实施路径[J]. 高等工程教育研究, 2017(6): 1-13.
- [2] 李培根. 工科何以而新[J]. 高等工程教育研究, 2017(4): 1-4+15.
- [3] 施林森, 刘贵松. 我国研究型大学教学科研融合的方式、问题及对策: 以清华大学等 6 所高校发布的本科教学质量报告为例[J]. 中国高教研究, 2015(3): 31-35.
- [4] 黄敏, 陈炎辉. 我国研究型大学拔尖创新人才培养模式研究: 基于“985 工程”大学《2010 年度本科教学质量报告》的文本分析[J]. 国家教育行政学院学报, 2012(10): 51-56.
- [5] 李井葵, 陈俐. 高校实验室教学科研相融合对创新型人才培养研究探索[J]. 高校实验室工作研究, 2013(3): 107-108.
- [6] 赫冀成. 教学科研融合构建创新型人才培养体系[J]. 中国高等教育, 2006(20): 13-14.
- [7] 张欣婷. 新工科背景下基于 OBE-CDIO 理念的实践教学改革探索[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(5): 126-127.
- [8] 程修文, 宋盈阳, 张新怡, 等. 新工科背景下环境工程专业学生实践创新能力培养与改革探索[J]. 中国现代教育装备, 2022(5): 88-90.
- [9] 张涛, 李婷, 张鸿波. 新工科背景下矿物加工人才培养模式改革探索[J]. 内蒙古教育, 2020(20): 59-61.
- [10] 余洪, 何东升, 张汉泉, 等. “新工科”背景下矿物加工专业人才培养的几点思考[J]. 大学教育, 2019(4): 146-148.
- [11] 许时. 矿石可选性研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [12] 刘炯天, 樊民强. 实验研究方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.