

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2024.03.002

预选抛废技术发展现状

冯梦菲¹ 谢海云^{1,2,3} 宋紫欣¹ 郭图悦¹ 李建娟^{1,3} 晋艳玲¹ 刘殿文^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093;

3. 西南联合研究生院, 昆明 650500)

摘 要: 随着我国矿产资源的不断开发与利用, 天然高品位矿石资源逐步减少, 低品位矿石成为目前我国矿产资源的主要来源, 因此, 预选抛废成为一个必要的选矿环节。重点阐述了人工拣选抛废、光电选抛废、磁选抛废、重选抛废以及浮选抛废五种抛废技术, 并介绍了不同技术在预选抛废时使用的设备和工作原理, 指出了各种预选抛废技术的优缺点, 为预选抛废技术能进一步工业应用提供了一定借鉴意义。

关键词: 预选抛废; 重选; 粗颗粒浮选; 光电选; 磁选

中图分类号: TD921 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2024)03-0329-10

Development status of preconcentration discarding technology

FENG Mengfei¹ XIE Haiyun^{1,2,3} SONG Zixin¹ GUO Tuyue¹ LI Jianjuan^{1,3}

JIN Yanling¹ LIU Dianwen^{1,2,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Metal Mineral Resources,

Kunming 650093, China;

3. Southwest United Graduate School, Kunming 650500, China)

Abstract: With the continuous development and utilisation of mineral resources in China, the amount of natural high-grade ore resources has gradually decreased, making low-grade ore the main source of mineral resources in China. Consequently, preconcentration and discarding technology have become a necessary step in mineral processing. This paper focuses on five kinds of waste-disposing technologies: manual picking, photoelectric selection, magnetic separation, gravity beneficiation, and flotation. It introduces the equipment and working principle of different technologies used in preconcentration and discarding, highlighting their advantages and disadvantages. Overall, this study provides a reference for the further industrial application of preconcentration and waste disposal technology.

Key words: preconcentration and discarding; gravity beneficiation; coarse particle flotation; photoelectric selection; magnetic separation

矿产资源是推动社会发展、加速经济增长的重要物质基础, 矿业更是国民经济的根本产业, 是我

们当前社会发展的先决条件^[1]。随着矿产资源的不断开采使用, 我国矿产资源显现出“贫、细、杂”的特点。由于矿石品位不断降低, 低品位矿石和复杂难选矿石日益成为我国可利用矿产资源的主要来源, 低品位矿石中存在的大量岩石致使后续破碎、磨矿和分选作业的能耗和材料耗损进一步增大, 生产成本逐步增加^[2,3]。为了减少能耗, 提高产率,

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AG050015); 国家自然科学基金资助项目(52064027)

第一作者: 冯梦菲, 硕士研究生, 研究方向为矿物资源加工。
E-mail: 1625813638@qq.com

通信作者: 谢海云, 博士, 教授; E-mail: xiehaiyun@kust.edu.cn

矿石预选抛废技术开始被广泛应用。

预选抛废技术能根据矿石中矿物颗粒的颜色、放射性、密度、磁性及可浮性等的不同,运用人工拣选、光电选、重选、磁选和浮选等方法,优先丢弃大部分废石,富集低品位矿石,减少后续作业压力,提高资源利用率,降低企业成本,实现矿产资源的绿色高效利用^[4]。目前,预选抛废技术在低品位铅锌矿、磁铁矿、辉钼矿、铜矿、钨矿、锡矿、锂辉石、金矿、煤等许多矿种上得到广泛应用。本文按照预选抛废粒级从大到小的分布,对几种主要的预选抛废技术的设备、工作原理及适用范围进行阐述,并进行相应对比,进一步为预选抛废技术的工业应用提供一定的借鉴意义。

1 预选抛废技术及应用特点

预选抛废技术是指在破碎、磨矿、浮选等作业前预先剔除大部分废石,实现原矿预富集的一种矿物分选技术,有减少后续作业处理量、提高入选品位、降低企业成本等优势,此外,它还可以降低矿石的开采品位,提高矿石开采量,比较适合原矿含有大量容易单体解离的围岩和废石的矿石,或者是废石和有用矿物的物理性质有明显差别的矿石,经过预选抛废技术预选后的废石可以作为建筑材料、路基材料等,实现综合利用,延长尾矿库使用年限。根据所选矿石性质的不同,可以选择不同的预选抛废方法。常用的预选抛废工艺方法见表1。

表1 预选抛废常用工艺方法

Table 1 Common process methods for pre-selection and discarding

预选方法	基本原理	抛废粒级/mm	常用抛废设备	适用矿种
人工拣选	根据矿石之间存在的颜色差异,手选去除废石的方法。	$-200+10$ ^[5]	运输皮带	煤、锂辉石、钨矿、金矿、锡矿
光电选	利用被分离物料光电性质的差异,在不同电选机中实现分选。	$-150+10$ ^[5]	XRT智能选矿机、色选机、X射线辐射拣选机	铅锌矿、钨矿、磁铁矿、铜矿、辉钼矿、锂辉石、锑矿
磁选	被分离物料组分磁性不同的差异实现分选。	$-75+0.5$ ^[6]	磁滑轮、湿式永磁滚筒磁选机、强磁选机	磁铁矿、赤铁矿
重选	利用不同矿物间的密度、粒度和形状差异实现分选。	$-50+3$ ^[2]	重介质旋流器、跳汰	低品位铅锌矿、白钨矿、锡铜矿、锂辉石、煤
粗颗粒浮选	利用矿物表面存在的物理化学性质的差异实现分选。	$-1.4+0.15$ ^[8-10]	水力浮选机、泡沫中分选机、闪速浮选机	辉钼矿、铅锌矿、斑铜矿、方解石、磷灰石

2 预选抛废工艺方法及设备

2.1 人工拣选抛废

人工拣选抛废是最早使用的预选抛废方法,曾广泛应用于我国煤矿、金矿、锡矿等矿种预选抛废(表1)。该方法操作简单,工作原理为工人们通过观察缓慢运动皮带上的矿石,根据矿石的外观颜色、形状大小的差异,手选去除部分废石。一般,人工拣选适合分选粒级在 $-200+10$ mm的矿石。目前,人工拣选预选抛废的方法仍然在我国许多矿种上使用。如宋雪娟^[11]针对四川省某锂辉石矿,采用粗碎后再手选的工艺流程,并与不预选的工艺浮选指标进行了比较,结果表明手选可将部分废石选出,不但提高了入选矿石的品位,也提高了锂的浮选指标;江西铁山垅钨业有限公司上坪选矿厂,采用手选—智能图像联合预选工艺,使得粗选回收率提高约1个百分点^[12]。随着预选设备的发展和进步,人工拣选正在逐步退出历史舞台,被智能光

电选矿技术所替代。

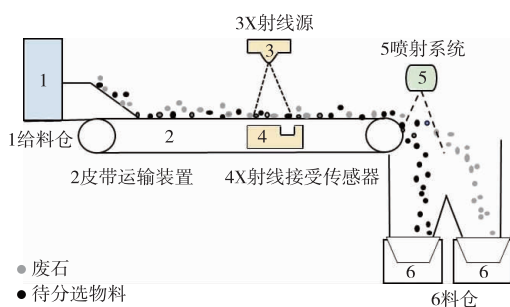
2.2 光电选抛废技术

光电选在预选抛废方面应用广泛,适用于铅锌矿、钨矿、磁铁矿、铜矿、钼矿、锂辉石、锑矿、煤等多种矿石预选抛废。常采用的光电选抛废技术为X射线透射(XRT)技术、图像色选技术和X射线辐射(XRF)技术。

2.2.1 XRT射线透射技术

XRT智能选矿机是XRT射线透射技术最常用的设备。如图1所示,XRT智能选矿机由给料仓、皮带传输装置、XRT射线源、图像成像传感器、喷射系统组成。其工作原理为通过外部给料仓给料到皮带上,当矿石通过X射线传感区域时,利用X射线透射技术和传感器识别成像技术去识别不同密度的矿石后,由传感器发送指令给喷阀,把相对应的矿石喷射出去,从而达到有用矿物与废石的分离^[13]。

XRT智能选矿机适用于分选块状、含泥量少、嵌布粒度较粗的矿石,一般其给矿粒度范围为

图1 XRT智能选矿机分选原理图^[13]Fig. 1 Separation principle diagram of XRT intelligent concentrator^[13]

—250+25 mm。JIN等^[14]针对美国某低品位硫化铜矿，使用XRT智能分选机对A样品进行预选抛废，结果表明与未预选抛废的B样品相比，经过预选抛废流程的铜精矿铜回收率达到90%，铜的品位为0.08%，抛废率达到31%，高于B样品的。张磊等^[15]采用光电智能选矿对甘肃某白钨矿进行预选抛废，取得了抛废率30%、钨金属回收率94%的良好分选效果。何从行等^[16]针对康家湾铅锌金银矿，用X射线矿石智能分选机进行了小型预选抛废试验，并建成预选抛废生产线，平均抛废率达到12.38%，废石平均含锌0.18%、铅0.16%、硫0.98%、银6.06 g/t、金0.28 g/t，有价金属损失小。

2.2.2 图像色选技术预选抛废

色选机工作原理如图2所示，主要利用不同颜色物料反射光波的频率或者波长的不同，使有用矿物与废石分离的一种设备^[17]，被广泛应用于磷矿、锰矿、钨矿、高岭土等选别上。如徐昌彦^[17]采用色选机对广西某珊瑚钨锡矿进行分选，使得矿石丢废率提高了近14%，合格矿品位相应提高了16%。矿山直接经济效益减少人工成本约180万元/a，间接经济效益减少选矿处理成本229.8万元/a。王帅等^[18]针对苏州某高岭土，采用色选机从5 000 t尾矿中回收了1 000 t高岭土，实现了废物资源再利用。

2.2.3 XRF射线辐射技术

X射线辐射拣选(XRF)的技术原理是利用矿石受到X射线照射后，每一种元素被激发跃迁时释放出不同的能量来分选矿石的方法，通过对元素特征谱线波长和强度进行定性及定量分析，确定相应的元素及含量，从而将有用矿物与废石矿物分离^[19]。X射线辐射拣选技术适宜入选的矿石粒度范围为—150+10 mm^[5]，主要设备是X射

线辐射拣选机^[19]。X射线辐射拣选机工作原理如图3所示。

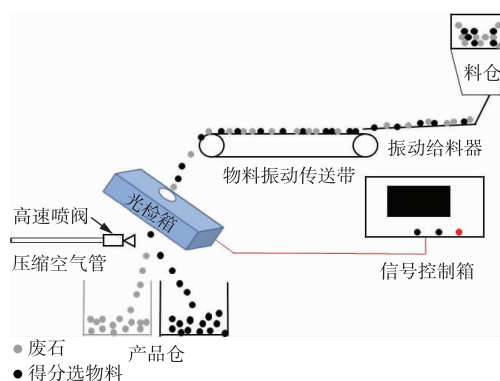


图2 色选机工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of color sorter

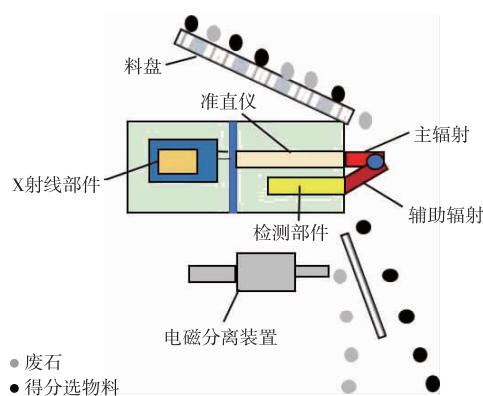


图3 X射线辐射拣选机工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of X-ray radiation picking machine

目前，X射线辐射拣选(XRF)技术在国内已被广泛用于金矿、铅锌矿、钨钼矿的预选抛废上。如骆任^[20]针对湖南某低品位钨钼矿开展了X射线预选抛废工业试验，结果表明在原矿含Mo（质量分数）0.17%、WO₃ 0.12%，处理量为1 t/h的条件下，综合抛废率可以达到39%，Mo和WO₃的综合损失率分别仅为10.67%和5.78%；灵宝金源矿业股份有限公司对某石英脉型金矿采用X射线分选机预选得到预选抛废率32.55%，抛尾金品位0.14 g/t，金损失率1.95%，预选精矿和筛下物合并后金品位达到3.40 g/t，金品位提高了1.06 g/t^[21]。

2.3 重选抛废技术

重选法适用于分选粒度、密度有较大差异的矿石。重介预选抛废技术和跳汰预选抛废技术是重选预选抛废技术应用最多的方法，其优点是生产成本低、物料处理量大、对环境污染小。重选预选抛废技术起初被应用于煤矿、金矿，随着可开采利用的有

色金属矿石中所含的废技术石越来越多,重选预抛废也开始被应用于其他矿种上。

2.3.1 重介质预选

重介质选矿通常使用在粗粒嵌布或集合体嵌布的矿石预抛废,以及破碎过程易单体解离的矿石预抛废上。目前,重介质预抛废技术已广泛应用于低品位铅锌矿、磷矿、白钨矿、锡矿、锂辉石等矿石上。工业上常见的重介质预抛废设备为重介质旋流器,其分选原理如图4所示,主要是利用旋流场产生的离心力和阻力差异,实现物料分离。

一般来说,当待分选物料存在大于0.1的分选比重差时,可使用重介质旋流器预选抛废技术。金属矿在利用重介旋流器预抛废时,通常选择的粒度范围为 $-50+3\text{ mm}$ 。在重介质预选抛废时,要特别注意重介质的选择和回收,常用的重介质为重液和重悬浮液,但重液由于价格昂贵,在工业上很少使用,重悬浮液因为价廉无毒等特点,在工业应用上较为常见。目前,重悬浮液中常用的加重质如表2所示。

表2 重悬浮液常用加重质^[1]

Table 2 Commonly used heavy substances in heavy suspension^[1]

名称	磁铁矿	方铅矿	硅铁	黄铁矿	重晶石
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	5.0	7.5	6.8	4.9~5.1	4.3~4.7
悬浮液密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.5	3.5	3.2~3.5	2.5	2.0
介质回收方法	磁选	浮选	磁选	浮选	浮选

重介旋流器预选抛废法在许多矿种上得到应用,且都有较好效果。如张维佳等^[22]针对内蒙古某低品位铅锌矿,通过介质法进行预选抛废,结果表明抛废后原矿(铅+锌)品位由1.22%提高到2.24%,而抛废矿石经浮选回收后,铅总回收率达到86.23%,锌总回收率达到82.31%;曾海涛等^[23]利用重介质旋流器抛废工艺对湖南某低品位白钨矿进行预选抛废,取得了抛废率43.56%的良好指标。

重介质旋流器抛废具有耗能少、效率高、处理量大等优点,但该方法存在占地面积大、基建投资大等缺点。针对此问题,刘福峰等^[24]提出的集成式重介质选矿机组工艺很好地解决了以上问题,并能够处理30 mm以下的矿种,尤其适合低品位矿石大范围抛废。

2.3.2 跳汰预选

跳汰选矿是处理粗、中矿石的有效方法,其工作原理为垂直交变介质中物料按密度差异进行分离。分层过程主要包括分层前颗粒堆积形成床层、上升

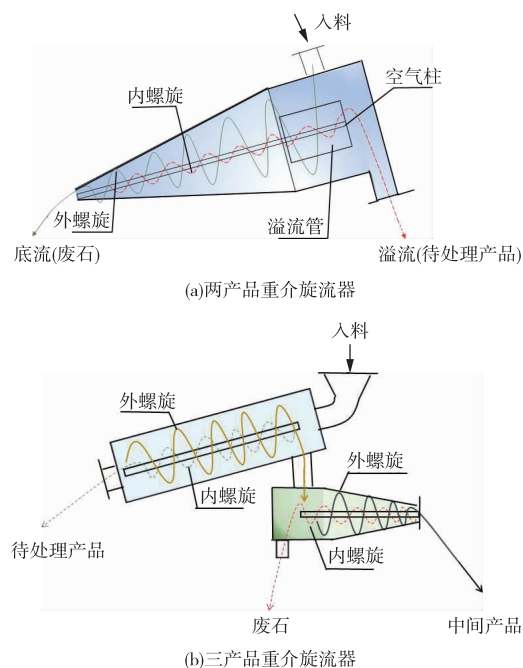


图4 重介旋流器的工作原理

Fig. 4 Heavy medium cyclone working principle diagram

水流使床层松散、颗粒沉降分层、水流下降床层聚集四个步骤,最终实现物料按小密度大颗粒、小密度小颗粒、大密度大颗粒、大密度小颗粒分层,实现轻重颗粒分离^[1]。目前,跳汰机预选抛废法被广泛应用在煤矿、锡铜矿、钨矿等矿物预处理上。

采用跳汰预选抛废法时,给矿粒度范围为 $-50+0.5\text{ mm}$ 。近年来,跳汰预选抛废在我国也开始应用,如潘东明等^[25]用SKT-1.2跳汰机对某锡铜矿进行预选抛废,结果表明经过预选抛废,精矿富集明显,尾矿品位远低于原矿品位,并达到了抛废标准,当抛废率为56.23%时,精矿中铜品位为0.611%,回收率为85.82%,锡品位为0.529%,回收率为83.54%,硫品位为13.203%,回收率为92.90%。SRIVASTAVA等^[26]针对某低品位黑钨矿,使用跳汰预选抛除部分废石后,再通过浮选获得 WO_3 含量64%、 SiO_2 含量0.8%、S含量0.4%的浮选精矿。针对某低品位白钨矿(WO_3 含量为0.75%),BAEK等^[27]进行了跳汰预选富集处理,获得了质量分数为22.0%、 WO_3 品位为3.1%、 WO_3 回

收率为 90.0% 的精矿，与不进行预浓缩的分离相比，其品位、经济可行性和分离效率都得到了提高。

2.4 磁选

磁选预抛废技术常用于处理磁铁矿、赤铁矿等铁矿石。常见的磁选预抛废工艺有两种，即粗粒干式磁选预抛废和磨前湿式预选抛废。磁选预抛废最早是利用永磁(电磁)磁力滚筒对粗粒强磁性铁矿进行预选抛废，之后，针对细碎后解离度更高的矿石，则使用专用筒式磁选机，而在解决弱磁粗颗粒的预选抛废方面，则出现了永磁筒式强磁选机。此外，为适应干旱缺水地区，还相继出现了不同的干选机^[6]。

2.4.1 粗粒干式磁选

粗粒干式磁选抛废主要采用的设备为永磁磁滚筒。永磁磁滚筒又称磁滑轮，一般用于低品位磁铁矿粗碎、中碎后的大块矿石干选抛废，以及回收大块废石中的磁性铁^[6]。其入选粒度上限可达到 450 mm，下限为 12 mm。永磁磁滚筒预选抛废法工作原理如图 5 所示。

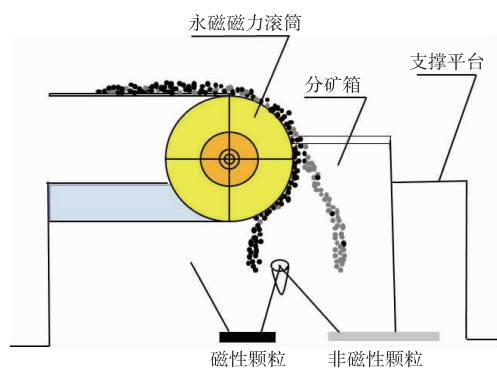


图 5 永磁磁力滚筒分选原理图

Fig. 5 Separation principle diagram of permanent magnet magnetic drum

针对陕西某铁矿石，郭月琴等^[28]采用原矿磁滑轮预先抛废—阶段磨矿阶段磁选流程回收，结果表明预抛废抛弃产率为 22.69% 的废石，且磁选所得铁精矿 TFe 品位和回收率分别达到 62.95%、72.09%，MFe 回收率达到 94.26%。詹忠杰等^[29]针对玉溪大红山露天熔岩矿，选矿厂在保留原流程的基础上增加了干式磁选抛废工艺，并进行了工业试验，结果表明预选抛废可使入选原矿和精矿 TFe 品位增加，尾矿 TFe 品位降低，且精矿回收率较未改造时升高了 10 个百分点，选矿比降低 0.5 个百分点。

2.4.2 湿式预选

磨前湿式预选工艺是指在磨矿作业前增加粗颗

粒预选作业，提前抛出部分废石。湿式分选更适用于细碎或细粒含量多、解离度高的物料。湿式分选入选粒度上限一般小于 12 mm。磨前湿式预选工艺所用设备有湿式强磁选机、湿式永磁滚筒磁选机等。如 XU 等^[30]采用湿式强磁选机对中国朝阳某低品位钒钛磁铁矿进行了预选抛废试验，结果表明经过预选抛废，抛废率达到了 73.52%，并获得了 V₂O₅ 含量为 1.14%、TiO₂ 含量为 22.22%、Fe 含量为 42.51% 的钒钛磁铁矿精矿和 TiO₂ 含量为 16.05%、Fe 含量为 20.77% 的钛铁矿粗精矿。YAN 等^[31]针对云南某大型氧化钨磁铁矿，采用湿式弱磁选回收铁—强磁选富集钨的选矿工艺，最终得到产率为 45.38%、品位 81.37 g/t 和回收率为 70.31% 钨精矿。YANG 等^[32]针对云南某含铁尾矿，采用湿式弱磁—强磁提前抛废、粗精矿再磨、弱磁振动筛分选工艺，在原矿铁品位 17.11% 的情况下，得到了铁总品位为 58.65%、总回收率为 39.35% 的铁精矿，最终尾矿铁品位仅为 6.84%，铁尾矿得到有效回收。

2.5 浮选抛废技术

传统泡沫浮选粒度上限低，一般为 0.15~0.25 mm，传统的浮选方法预选抛废一般应用在金红石上，在其他矿种上比较少见。通常，浮选抛废在粗粒条件下才能实现更好的经济效益，针对此问题，常用的方法包括流态化浮选技术、闪速浮选、(SIF)泡沫中分选三种。传统泡沫浮选和粗颗粒浮选技术的比较如表 3 所示。

2.5.1 流态化浮选技术预选抛废

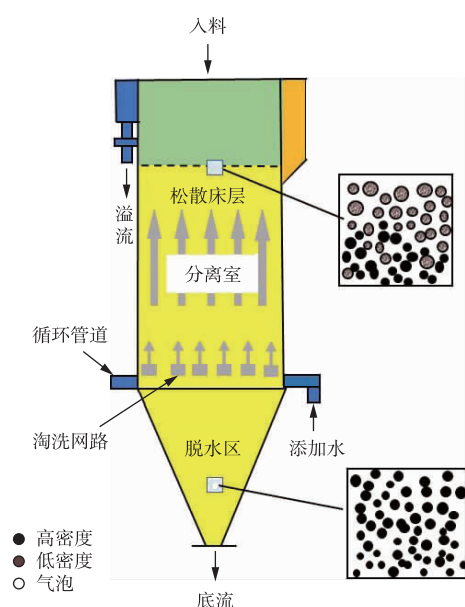
流态化浮选技术兼具了流态化技术和浮选技术各自的优点，去除了传统浮选机中叶轮的强力搅拌装置，改用水气装置，利用气体或液体使逆着上升流进入的矿物颗粒处于悬浮状态，并附着在汽泡上，按矿物颗粒亲疏水性实现分选^[8]。目前，在流态化浮选技术预选抛废上使用的设备为水力浮选机和 Novacell 浮选柱。

水力浮选机是以干扰床分选机为基础，通过文丘里管将水气混合物引入水力浮选机，而浮选机提供上升水流的同时将气体空化成泡。水力浮选过程是集重选和浮选特点于一体，通过气泡选择性吸附在疏水性矿物表面，扩大目的矿物与脉石矿物颗粒表观密度差异，并依靠上升水流使表观密度较小的气泡与目的矿物集合体上浮，实现粗颗粒浮选^[39-41]。水力浮选机工作原理如图 6 所示。

表 3 传统浮选及粗颗粒浮选比较表

Table 3 Comparison table of traditional flotation and coarse particle flotation

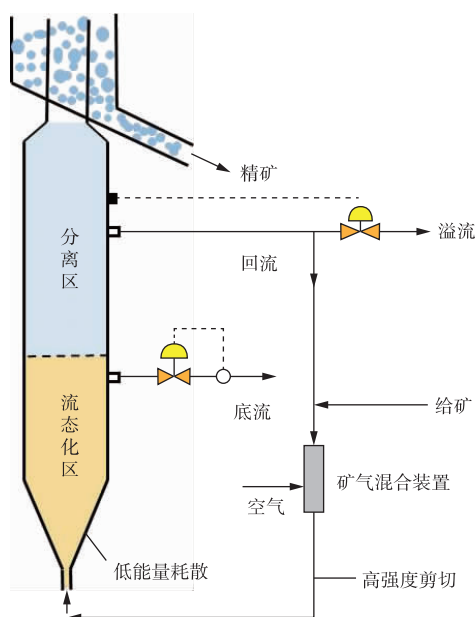
方法	入选原理	适宜粒度/mm	优点	缺点	适用矿种
传统泡沫浮选	利用泡沫把矿石中需要的有用矿物与脉石矿物分离，使有用矿物富集的过程。	$-0.15+0.074$	适合多种矿种，可以有效分离不同性质的矿石；发展历史悠久，有较为完善的浮选体系和机理。	分选粒度范围小，在预选抛废上应用较少；成本较高，绿色环保的浮选药剂仍要不断发展。	金红石、高碳酸盐、氧化铜矿
流态化浮选	基于流态化干涉沉降的原理，颗粒在干涉环境中，利用泡沫把矿物中的有用矿物与脉石矿物分离的技术 ^[33] 。	$-1.4+0.15^{[8]}$	浮选粒度上限提高，可有效分离粗颗粒；提高粗颗粒碰撞和回收概率；薄泡沫层降低矿化气泡穿过泡沫层时的脱落。	该技术在发展研究阶段，机理研究尚不深入；大型流态化设备仍在开发阶段 ^[34] 。	辉钼矿、铅锌矿、斑铜矿
闪速浮选法	在高矿浆浓度（65%~75%）的条件下浮选粗粒级矿物。	$-0.5+0.15^{[35]}$	预先选出较粗粒级矿物，减少了过粉碎现象，降低脱水脱泥成本提高了有用矿物的回收率；减轻了磨矿压力，减少浮选的矿量。	设备管道及阀门容易磨损 ^[36] ；分级机的沉砂量大时，需配置多台闪速浮选设备，投资较高 ^[37] 。	金矿、硫化铜矿
泡沫中分选法	将矿物颗粒直接给入液体介质表面上的泡沫层中，颗粒下沉时，实现矿物颗粒分选的方法。	$-3+0.1^{[38]}$	疏水矿粒与气泡直接接触，矿粒可在 3~5 s 内回收，浮选速度快。	对于矿物的疏水性要求很高，只适合处理特定的矿物；需要高效的起泡剂；细粒级矿物的选择性较差。	磷灰石、方解石、硅酸盐矿物

图 6 水力浮选机工作原理图^[41]Fig. 6 Working principle diagram of hydraulic flotation machine^[41]

水力浮选技术已在国外得到广泛工业应用，一般用于解离度较高的粗粒磷酸盐、钾盐、硫化铜等矿物分选^[41]。近年来，水力浮选机预抛废技术在

国内也开始广泛应用。如张博爱等^[42]利用新型直径 100 mm 的板式空化水力浮选机，对粒度上限达 1.0 mm 的粗粒的河南某辉钼矿开展了分选预抛废试验，结果表明在最佳条件下，抛废率达到 41.78%，且尾矿 Mo 品位降低至 0.006%，低于选厂浮选尾矿品位，而浮选精矿 Mo 回收率高达 96.48%。何琦等^[43]采用流态化浮选系统（其主选设备类似于水力浮选机）对河南某低品位辉钼矿进行选前预抛废，结果表明在最佳条件下流态化浮选尾矿品位降低至 0.011%~0.015%，抛废率达到 40%~55%，比传统机械浮选机的抛废效果好。

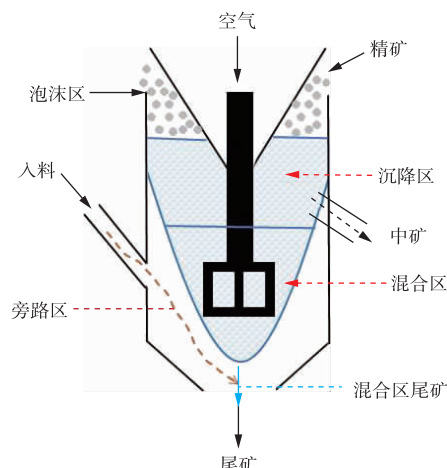
此外，由澳大利亚 Newcastle 大学的 JAMESON 教授^[9]提出的 Novacell 浮选柱也可应用在预选抛废上，该设备不仅初次实现了柱浮选的流化床矿化，指出气液固三相流化床矿化的指导思想，而且可增强粗粒矿物矿化几率。Novacell 现场使用流程主要为：给矿粒度半自磨到 0.4 mm 后通过流态化浮选柱选出部分尾矿，之后再行球磨和后续浮选作业。使用该设备可以使黄铜矿和方铅矿的最大可浮粒径上升至 1.4 mm，煤的可浮粒径上升为 5 mm。Novacell 浮选柱工作原理如图 7 所示。

图7 Novacell 浮选柱工作原理简图^[9]Fig. 7 Working principle of Novacell flotation column^[9]

针对低品位斑岩型铜矿，JAMESON 等^[9]发现，将四个 Novacell 浮选柱串联在一起，就能获得回收率 99% 以上的铜精矿，大约抛除 80% 的脉石颗粒，从而减少二级磨矿负荷，节省研磨能源和介质成本。

2.5.2 闪速浮选法预选抛废

闪速浮选法使用的设备为闪速浮选机，其分选原理如图 8 所示。闪速浮选机处理的物料为旋流器的底流或分级机的返砂。分选时间一般小于 3 s，其目的是为了去除已经单体解离的目的矿物和粗粒目的矿物连生体。在预选抛废时，可以用来提前选出粗精矿，防止过磨。

图8 闪速浮选槽分选过程^[36]Fig. 8 Separation process of flash flotation tank^[36]

刘群等^[44]针对粤北南岭某硫化铜矿浮选，在粗精矿再磨分级回路中增加了闪速浮选工艺，闪速浮选机可实现分梯度选矿，有效减轻了再磨机运行负荷，选铜回收率提高了 1.06 个百分点，技术改造效果显著。谭明等^[10]采用 YX II-4 闪速浮选机对某金矿开展了工业试验。经研究可知，在磨矿分级后增加闪速浮选机，浮选总回收率提高约 2%，精矿平均品位达到 77.28 g/t，平均回收率为 40.78%。与传统浮选工艺相比，闪速浮选大大提高了分选精矿的铜品位和铅回收率，同时，铜铅精矿中伴生银的含量也有所提高。

2.5.3 泡沫中分选法

在我国，泡沫中分选法在预选抛废上应用较少，泡沫中分选法使用的设备为泡沫分选机^[38]，其结构示意图如图 9 所示。

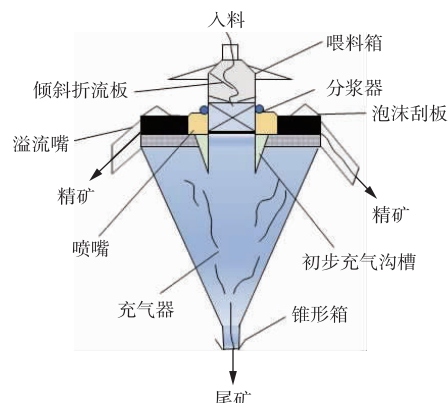


图9 泡沫分选机

Fig. 9 Foam separator

列皮伦等^[38]对方解石、磷灰石、金刚石、硅酸盐矿物进行了浮选实验，结果表明这些矿物在 3 mm 以下粒度时都可以用 SIF 法顺利浮选。分级回路中的粗粒级，试验结果表明，对特别是 0.1~0.5 mm 粒度用一段 SIF 作业就能获得回收率为 90% 以上的方解石精矿。粗粒磷灰石也可以得到很好回收。

3 结论与展望

3.1 结论

1) 预选抛废技术符合“能抛早抛、多碎少磨”的理念，有减少后续作业处理量、提高入选品位、降低企业成本等优势。随着我国矿产资源品位的不断降低，预选抛废将成为未来选矿中必不可少的环节。

2) 针对低品位矿石，常见的预选抛废技术主要

有人工拣选抛废、光电选抛废、重选抛废、磁选抛废、浮选抛废五种技术,且随着粗颗粒浮选技术的不断进步,多阶段联合抛废工艺已开始被广泛应用,光电-重-磁-浮联合抛废工艺可以实现厘米级、毫米级、微米级多粒级抛废,大大提高抛废率,降低企业能耗。

3)除了传统的抛废技术外,新型高压脉冲粉碎技术、磁化焙烧化学分选技术、DSFB等技术均可被用于预选抛废。

3.2 展望

相信随着选矿技术的进步以及选矿设备的发展,预选抛废处理的粒度范围会越来越广、矿物种类也愈来愈多,且逐步向着“绿水青山就是金山银山”的理念上发展,与国家绿色矿山的政策相呼应。

参考文献

- [1] 王淀佐,邱冠周,胡岳华.资源加工学[M].北京:科学出版社,2005.
WANG D Z, QIU G Z, HU Y H. Resources processing[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] BERGERMAN M G, JOSÉ NETO D, MANO E S, et al. Impacts on energy consumption and wear in grinding circuits with a pre-concentration stage[C]// Proceedings of the XXIX International Mineral Processing Congress, Moscow, Russia. 2018: 15-21.
- [3] FRANKS G V, FORBES E, OSHITANI J, et al. Economic, water and energy evaluation of early rejection of gangue from copper ores using a dry sand fluidised bed separator[J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 137: 43-51.
- [4] 敖顺福,朱家锐,徐峰,等.预选抛尾技术应用进展[J].矿产保护与利用,2021,41(4):157-163.
AO S F, ZHU J R, XU F, et al. Application progress of pre-concentration and discarding technology [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(4): 157-163
- [5] 汪淑慧.分选矿石的X射线辐射分选法[J].国外金属矿选矿,2007(8):4-8.
WANG S H. X-ray radiation separation method for ore separation[J]. Foreign Metal Ore Processing, 2007(8): 4-8.
- [6] 王芝伟,刘号,尚红亮. BGRIMM 箱式干选机在贫磁铁矿预选中的工业应用 [J]. 矿冶, 2019, 28(4): 107-110.
- WANG Z W, LIU H, SHANG H L. Application of BGRIMM dry magnetic separator in lean magnetite preconcentration [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(4): 107-110.
- [7] 罗主平.我国重力粗粒预选抛废工艺技术研究与实践[J].现代矿业,2022,38(12):45-54.
LUO Z P. Study and practice on pre-selection discarding process of coarse grain using gravity in China[J]. Modern Mining, 2022, 38(12): 45-54.
- [8] 沈政昌,罗世瑶,杨义红,等.流态化浮选技术概述[J].有色金属(选矿部分),2019(5):20-26.
SHEN Z C, LUO S Y, YANG Y H, et al. An overview of fluidized flotation technology [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Part), 2019(5): 20-26.
- [9] JAMESON G J, EMER C. Coarse chalcopryrite recovery in a universal froth flotation machine[J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 118-133.
- [10] 谭明,冯天然,韩志彬,等. YX II-4 闪速浮选机在磨矿分级回路的工业试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2017(1):74-77,85.
TAN M, FENG T R, HAN Z B, et al. Industrial test and research of YX II-4 flash flotation machine in grinding and grading circuit[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(1): 74-77, 85.
- [11] 宋雪娟.手选作业在某锂辉石矿选别中的应用[J].新疆有色金属,2012,35(5):50-51.
SONG X J. The application of manual separation in a spodumene ore [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 2012, 35(5): 50-51.
- [12] 闵世珍.上坪选厂粗选工艺改造实践[J].世界有色金属,2019(14):138-139.
MIN S Z. Practice of coarse separation process reform in shangping concentrator[J]. World Nonferrous Metals, 2019(14): 138-139.
- [13] 贾妮.湖南某钨矿 XRT 射线智能选矿机预选抛废研究与应用[J].中国钨业,2019,34(6):20-24.
JIA N. Research and application of XRT intelligent concentrator for pre-selection and disposal in a tungsten mine of Hunan province[J]. China Tungsten Industry, 2019, 34(6): 20-24.
- [14] JIN J, LIN C L, MILLER J D, et al. X-ray Computed tomography evaluation of crushed copper sulfide ore for pre-concentration by ore sorting[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022: 1-9.
- [15] 张磊,孙朋.光电预先抛废技术及自动化破碎系统在白钨矿的应用研究[J].甘肃冶金,2022,44(2):12-14,22.

- ZHANG L, SUN P. Application of photoelectric pre-disposal technology and automatic crushing system in scheelite[J]. Gansu Metallurgy, 2022, 44(2): 12-14, 22.
- [16] 何从行, 欧也斐, 颜顺德. 康家湾铅锌金银矿预选抛废工艺研究及应用[J]. 矿冶工程, 2022, 42(3): 67-69, 75.
- HE C X, OU Y F, YAN S D. Pre-concentration process for waste rock discarding in beneficiation of lead-zinc-gold-silver ore in Kangjiawan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(3): 67-69, 75.
- [17] 徐昌彦. 光电色选机在某矿分选中应用实践及优化[J]. 世界有色金属, 2016(17): 31-32.
- XU C Y. The application of photoelectric color selector and the optimization in mineral separation process of some mine[J]. World Nonferrous Metals, 2016(17): 31-32.
- [18] 王帅, 冯杰, 李青, 等. 色选机在高岭土尾矿再选中的应用初步研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(4): 23-24, 27.
- WANG S, FENG J, LI Q, et al. Preliminary study on the application of color sorter in the reconcentration of kaolin tailings[J]. China Non-metallic Mineral Industry Guide, 2019(4): 23-24, 27.
- [19] 刘明宝, 印万忠, 高莹. X射线辐射预选技术[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(1): 177-180.
- LIU M B, YIN W Z, GAO Y. Ore sorting by X-ray separation technology [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Part), 2011(1): 177-180.
- [20] 骆任. X射线辐射拣选机分选湖南某钨钼矿的半工业试验研究[J]. 湖南有色金属, 2017, 33(5): 18-19, 44.
- LUO R. Semi-industrial experimental study of a tungsten-molybdenum ore from Hunan by X-ray radiation separation [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2017, 33(5): 18-19, 44.
- [21] 李建政, 肖健锋, 王军强, 等. X射线荧光分选机及其应用[J]. 黄金, 2022, 43(2): 81-84.
- LI J Z, XIAO J F, WANG J Q, et al. X-ray fluorescence separator and its application[J]. Gold, 2022, 43(2): 81-84.
- [22] 张维佳, 路红霞, 张陟婉, 等. 低品位铅锌矿重介质预选试验研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2017(22): 70-71, 87.
- ZHANG W J, LU H X, ZHANG Z W, et al. Experimental study on heavy medium preconcentration of low grade lead-zinc ore[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2017(22): 70-71, 87.
- [23] 曾海涛, 徐寒冰, 袁代军, 等. 某白钨矿重介质旋流器抛尾可行性试验研究[J]. 湖南有色金属, 2022, 38(1): 16-19, 56.
- ZENG H T, XU H B, YUAN D J, et al. Feasibility study on tailings discarding by heavy medium hydrocyclone of certain scheelite[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2022, 38(1): 16-19, 56.
- [24] 刘福峰, 李翔, 刘焯河. 集成模块式重介质选矿机组的研究及应用[J]. 煤矿机电, 2019, 40(3): 87-90.
- LIU F F, LI X, LIU Y H. Study on tailings discarding efficiency of integrated-type heavy medium concentrator and its application [J]. Coal Mine Electromechanical, 2019, 40(3): 87-90.
- [25] 潘东明, 高磊. SKT跳汰机用于锡铜矿预选抛尾的试验研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(2): 57-60.
- PAN D M, GAO L. Experimental study on SKT jig used for pre-concentration and tailing of tin-copper ore [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2023(2): 57-60.
- [26] SRIVASTAVA J P, PATHAK P N. Pre-concentration; a necessary step for upgrading tungsten ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 60(1): 1-8.
- [27] BAEK S, JEON H. Application of Jig separation for pre-concentration of low-grade scheelite ore [J]. Materials Transactions, 2018, 59(3): 494-498.
- [28] 郭月琴, 秦靖, 宁新霞, 等. 陕西某铁矿石预先抛尾选矿试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2010(5): 29-31.
- GUO Y Q, QIN J, NING X X, et al. Experimental research on pre-discarding tailings for an iron ore in Shaanxi province[J]. Protection and Utilization of Mineral Resources, 2010(5): 29-31.
- [29] 詹忠杰, 蔡正鹏, 温海滨, 等. 玉溪大红山矿业有限公司 380 万 t/a 熔岩铁选厂干式磁选抛尾技术应用研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(2): 173-175.
- ZHAN Z J, CAI Z P, WEN H B, et al. Experimental study on pre-disposal of open-air lava rock in Yuxi Dahongshan Mining Co. Ltd. [J]. China Mining Industry, 2018, 27(2): 173-175.
- [30] XU C, ZHANG Y, LIU T, et al. Characterization and pre-concentration of low-grade vanadium-titanium magnetite ore[J]. Minerals, 2017, 7(8): 137.
- [31] YAN P, ZHANG G, YANG Y, et al. Characterization and pre-concentration of scandium in low-grade magnetite ore [J]. JOM, 2019, 71:

- 4666-4673.
- [32] YANG L W, DAI X H, WANG J H. Research on the beneficiation experiment of iron of a tailing ore[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644-650: 5403-5406.
- [33] AWATEY B, SKINNER W, ZANIN M. Incorporating fluidised-bed flotation into a conventional flotation flowsheet: a focus on energy implications of coarse particle recovery [J]. Powder Technology, 2015, 275: 85-93.
- [34] 张怡晴, 何琦, 杨陈仪敏, 等. 粗颗粒浮选过程强化研究进展及展望 [J]. 金属矿山, 2023 (2): 67-76.
- ZHANG Y Q, HE Q, YANG C Y M, et al. Research progress and prospect of Strengthening coarse particle flotation process [J]. Metal Mine, 2023(2): 67-76.
- [35] VAN DER SPUIY R C M, ROSS V E. The recovery of coarse minerals by agglomeration and flotation[J]. Minerals Engineering, 1991, 4 (7/8/9/10/11): 1153-1166.
- [36] 罗亨通, 封东霞, 杨多, 等. 粗颗粒浮选技术及其应用[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(1): 129-137.
- LUO X T, FENG D X, YANG D, et al. Coarse particle flotation technology and its alitppcation[J]. Protection and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(1): 129-137
- [37] 王海瑞. 闪速浮选技术的研究与应用[J]. 甘肃有色金属, 1998(2): 1-5.
- WANG H R. Research and application of flash flotation technology[J]. Gansu Non-ferrous Metals, 1998(2): 1-5.
- [38] J·O·列皮伦, 刘万峰, 肖力子. 粗粒浮选的有效技术-泡沫中分选[J]. 国外金属矿选矿, 2004, (9): 9-14.
- LEEPILUN J O, LIU W F, XIAO L Z. Effective technology for coarse flotation: SIF [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2004 (9): 9-14.
- [39] KOHLMUENCH J N, MANKOSA M J, THANASEKARAN H, et al. Improving coarse particle flotation using the HydroFloat TM (raising the trunk of the elephant curve) [J]. Minerals Engineering, 2018, 121: 137-145.
- [40] KOHLMUENCH J N, MANKOSA M J, KENNEDY D G, et al. Implementation of the hydrofloat technology at the south fort meade mine[J]. Minerals & Metallurgical Pr-ocessing, 2007, 24(4): 264-270.
- [41] KOHLMUENCH J N, LUTTRELL G H. Coarse particle concentration using the Hydro Float Separator[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2001, 18(2): 61-67.
- [42] 张博爱, 陈湘根, 晁彦德, 等. 粗粒辉钼矿水力浮选预抛尾试验研究 [J]. 金属矿山, 2023 (1): 210-215.
- ZHANG B A, CHEN X G, CHAO Y D, et al. Study on pre-discarding tailings test for coarse molybdenite by hydroflotation [J]. Metal Mine, 2023(1): 210-215.
- [43] 何琦, 尹青临, 卫召, 等. 粗粒辉钼矿工艺矿物学及流态化浮选抛废研究 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2729-2741.
- HE Q, YIN Q L, WEI Z, et al. Process mineralogy and fluidized-bed flotation pre-discarding study on coarse molybdenum ore [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(8): 2729-2741.
- [44] 刘群, 钟国建, 胡文英, 等. 闪速浮选技术在粗精矿再磨作业中的应用 [J]. 矿山机械, 2023, 51(2): 36-42.
- LIU Q, ZHONG G J, HU W Y, et al. Application of flash flotation process in regrinding operation of middling concentrate [J]. Mining Machinery, 2023, 51(2): 36-42.