

钨矿预选抛废技术研究进展

李思佑¹, 李丽匣¹, 张宏亮^{1,2}, 晏丽鑫¹, 张晨³

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 赣州好朋友科技有限公司, 江西 赣州 341000;
3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149

中图分类号: TD954; TD921.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0089-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.010

摘要 我国钨矿资源具有优质资源消耗快、低品位矿石占比多的特点。近几年,随着优质钨矿资源储量的日益减少,低品位和复杂难选矿石的经济开发和高效利用愈发迫切。如何合理选择和利用预选抛废技术是实现钨矿绿色开发、高效分选的关键。分析了钨矿预选抛废的必要性,详细阐述了人工拣选、重选法预选、磁选法预选以及智能光电预选的技术原理和特点,总结了钨矿预选抛废的研究与应用进展。分析认为,矿石性质、粒度分布等条件是选择适宜预选方法的关键;工艺及设备的优化和改进是今后传统预选方法的重要研究方向;智能光电预选会成为未来钨矿预选的热门选择。最后对钨矿预选未来的发展进行了总结和展望,以期对未来钨矿预选抛废技术的研究和应用提供参考。

关键词 钨矿; 预选抛废; 重选; 磁选; 智能光电预选

引言

钨是一种高熔点、高密度且在地壳中分布较为广泛的元素,在工业上常被用于金属加工、材料制造、矿山开采以及建筑等领域,在日常生活中也被用于制造电子产品、照明灯等,具有广泛的应用价值^[1]。我国钨矿资源储量丰富,钨的储量、产量和出口量均位居世界第一位,根据中华人民共和国自然资源部统计,2022年中国钨资源储量为299.56万t,其中江西省钨资源储量为169.36万t,占全国总量的56.5%,居第一位,其次为湖南省(59.50万t)、河南省(17.44万t)^[2]。

随着高品质钨矿资源的日益减少,钨矿的原矿品位越来越低加上开采过程中围岩的混入,大量的废石进入选别作业,带来了极大的运行负荷。因此,本着“能抛早抛”的原则对矿石进行预选,提前丢废,成为钨矿分选研究的重要方向。本文介绍了我国钨矿预选工艺技术的研究现状,以期对未来钨矿预选技术的研究和应用提供参考。

1 钨矿预选的必要性

预选作业是指利用有用矿物和脉石矿物的某种

性质差异,在细碎、磨选或精选作业之前丢弃部分低品位的废石,从而降低后续作业负荷的预先分选作业,也称预富集作业。

钨矿进行预选抛废的原因主要有三点:(1)石英脉型矿床占我国钨矿石总量的90%左右^[3]。石英脉矿床具有矿脉较薄、急倾斜的特点,因此开采过程中围岩的混入率高,矿石贫化率最高可达到90%^[3]。(2)由于钨矿长期开采强度大,资源越来越贫化,黑钨矿资源趋于枯竭,而大部分白钨矿 WO_3 品位在0.4%以下,导致选矿难度大,生产成本低^[4]。(3)中深孔爆破法逐渐在钨矿山得到推广,提升了采矿效率的同时也导致了矿石贫化率较高。当这些矿石进入到后续磨选作业时,会加大这些作业的处理量和能耗,降低经济效益。实践证明,预选效果的好坏、废石选出率的高低,不仅直接影响磨选作业的效益,而且也影响选矿厂的处理能力,对提高全厂技术经济指标起着重要作用^[5]。此外,预选抛废作业也减少了选厂耗水量和细粒尾矿量,从而降低了选矿废水及细粒级尾矿堆存产生的环境污染。因此对钨矿石进行预选有利于降低成本,减少污染,提质增效,是实现资源最大化利用的有效手段。目前,可以实现钨矿预富集的方法有人工拣选、

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2903802)

作者简介: 李思佑(2000—),男,硕士研究生,研究方向为矿石预选技术, E-mail: dragonsy@sohu.com。

通信作者: 李丽匣(1980—),女,博士,教授,研究方向为金属矿石碎磨及预选技术, Email: Lilixia@mail.neu.edu.cn。

重选法预选、磁选法预选以及智能光电预选。

2 钨矿预选技术研究进展

2.1 人工拣选

人工拣选是一种根据矿石颜色、纹理等表面特征差异,由现场操作工人进行分拣的简单选矿方法,可分为正手选和反手选两种分拣方式,对粒度范围在 18~200 mm 的矿石有较好的预选效果^[6]。由于石英脉型黑钨矿与废石颜色差异明显,因此人工拣选的方法在黑钨矿选矿厂得到了广泛的应用,如大吉山选矿厂。大吉山钨矿选矿厂原矿经粗碎之后, +80 mm 矿石进行人工正反手选, -80+16 mm 使用 XRT(X 射线透射分选机)预选机进行预选,经考察 2021 年全年平均废石选出率为 52.87%,矿石合格率为 92.77%。王玉彤等^[7]对江西某钨矿进行工艺研究时,在预选工艺部分将原矿筛分成 +50 mm、-50+27 mm、-27+16 mm、-16+12 mm、-12 mm 五个粒级,对前四个粒级进行手选。试验表明,原矿经分级手选可获得产率为 50.45% 的合格矿, WO_3 品位为 2.04%、回收率为 94.56%。抛废率达到 45.89%, WO_3 的损失率仅 0.80%,有效抛除废石降低了后续作业的负担。古吉汉等^[8]对某钨矿进行了工艺流程改造,其中手选原作业为将出窿原矿破碎筛分为 -120+50 mm、-50+2 mm 两个粒级进行反手选,但由于粒度范围过宽从而影响了工人的手选效果。经过工艺改造后,改为对 -120+50 mm、-50+27 mm、-27+16 mm 三个粒级进行反手选丢废,同时在手选时把块钨提早选出,防止在破碎中损失及泥化,最终预选 WO_3 回收率达到 94.55%,废石选出率达 53.56%,为后续作业创造了良好的条件。

人工拣选对于大块钨矿抛废效果较好,丢废率可以达到 40%~60%,且选矿成本低,成本主要来自选矿工人的劳动报酬。因此人工拣选是选厂增加钨及伴生金属回收率、提高原矿品位和选厂经济效益的有效手段。但人工拣选具有分选效率低、人工成本高、工人劳动强度大等局限性,在未来逐渐会被智能光电预选技术替代。

2.2 重选法预选

重选是利用矿石之间密度差异进行分选的一种选矿方法,常用于矿石细碎之后或进入磨选作业之前。目前最具有工业价值的钨矿为黑钨矿和白钨矿。其中黑钨矿纯矿物密度为 7.2~7.5 g/cm³、 WO_3 含量 76%,白钨矿纯矿物密度为 5.8~6.2 g/cm³、 WO_3 含量 80.6%,具有密度显著高于围岩及脉石密度的特点,故使用重选法对粗粒钨矿进行预选是可行的^[9]。目前可以应用于钨矿预选的重选方法有重介质预选、动筛跳汰预选、螺旋选矿机和螺旋溜槽预选以及离心选矿机预选。

2.2.1 重介质预选

重介质选矿是根据矿物密度的不同在重介质中实现分离的选矿方法。目前其主流的应用设备是重介质旋流器,具有抛废率高、分选速度快、处理能力大等特点,在钨矿抛废领域得到广泛关注。近几年有许多学者对钨矿重介质预选进行了研究。周峰等人^[10]对哈萨克斯坦某钨矿进行了试验研究,采用 LPPC3-50 光电分选机、XRT 射线选矿机、重介质筒式分选机、重介质旋流器四种设备进行抛废对比。结果表明,重介质筒式分选机在重介分选密度为 2.7 g/cm³、分选粒度为 -70+6 mm 时效果最佳,抛废率可达到 62.9%、 WO_3 损失率仅为 8.5%,取得了很好的预选指标。曾海涛等^[11]对某白钨矿进行了重介质旋流器预选抛废可行性研究,对破碎后的 -15+0.5 mm 粒级矿石进行了重介质旋流器抛尾,获得了抛废率 43.56%、 WO_3 金属损失率 5% 的良好指标,表明了使用重介质旋流器对该白钨矿预先抛尾在工艺上的可行性。刘书杰等^[12]对 WO_3 品位为 0.31% 的某湖南高碳酸钙型白钨矿进行了重介质旋流器抛尾研究,其中 CaCO_3 品位为 39.36%。针对该矿样首先筛除了 -0.5 mm 的细泥,结果表明, -15+0.5 mm 全粒级和分粒级重介质预抛试验指标差异较小,在相同的粒度条件下,预抛试验指标主要取决于介质密度,宜选择 -15+0.5 mm 粒级、采用介质密度 2.37 g/cm³ 进行重介质预抛,抛废率达到 46.24%, WO_3 损失率为 5.15%。袁代军等^[13]针对湖南某钨矿样品进行了预先抛废研究,以 -15+0.5 mm 作为给矿粒级、2.37 g/cm³ 作为分选介质密度,得到抛尾精矿 WO_3 品位 0.34%、回收率 96.62%、抛废率 31.37% 的指标。经过对比,预抛给矿粒度为 -15+0.5 mm 时可获得与给矿粒度为 -5+0.5 mm 条件下相似的重介质旋流器产品指标,未来开采的中部矿石可以 -15+0.5 mm 粒级作为预抛给矿。

重介质预选抛废方法原理简单,可选择设备种类多,能直接从低品位钨矿中抛出大量废石,针对 -15+0.5 mm 粒级的矿石均可取得较好的预选指标。同时重介质预选也有着较多的缺点:(1)旋流器类设备需要保持恒压给矿,动能消耗巨大;(2)由于预选时物料粒度较粗且矿浆在旋流器内高速运动,旋流器特别是沉砂口的磨损十分严重;(3)由于产品是同重悬浮液一起排出的,因此必须配套重悬浮液的回收和净化系统,增加了工艺的复杂度。

2.2.2 动筛跳汰预选

动筛跳汰机是一种依靠在介质中运动的筛板带动筛面上矿石运动,从而使矿石形成周期性松散,最终实现按密度分选的重选设备。我国第一台动筛跳汰机是由瑶岭钨矿在 1975 年研制的,主要用于光电

选矿尾矿的复选,相较于重介质分选,其分选工艺系统更简单。雷大士等^[14]针对陕西某白钨矿样品进行了分级跳汰试验,将原矿筛分为-12+6 mm、-6+4 mm、-4+2 mm、-2+1 mm和-1 mm等5个粒级,并将前4个粒级分别进入跳汰作业进行预先抛废。其中,-12+6 mm粒级抛尾量高达98.84%,相对原矿的 WO_3 损失率仅为2.43%。其余粒级的抛尾量均达到50%以上,且回收率达到90%以上,取得了较好的分选指标。陈晓玲等^[15]针对斑岩型钨钼矿石进行了磨矿分级返砂试验研究,对返砂的-2+0.246 mm筛分产品进行跳汰预选抛废试验,抛废率达到49.13%,废石 WO_3 品位为0.024%、 WO_3 损失率仅为5.31%。表明动筛跳汰机可有效实现-2+0.246 mm粒级矿石的预选抛废,减少返砂量,提高返砂的 WO_3 含量;返砂中-0.246 mm粒级产品可以直接进入浮选作业。

动筛跳汰机与重介质分选,均可以实现较细钨矿石的预选,减少后续作业的负荷。动筛跳汰机具有操作简单、设备性能稳定、单位面积处理能力大等优点,并且克服了重介质分选的某些缺点,如无需压力给矿、减少设备磨损等,可以实现钨矿物的低成本回收。动筛跳汰机的缺点在于:(1)动筛跳汰机的入料性质和给料速度均会影响跳汰床层的稳定性,因此需要保证入料的均质化和均匀的给料速度;(2)相较于重介质旋流器,动筛跳汰机占地面积较大,单位矿石的耗水量较高。

2.2.3 螺旋选矿机和螺旋溜槽预选

螺旋选矿机是一种简单高效的重力分选设备。矿浆给入溜槽之后,固体颗粒受到流体运动的影响,在自身重力、惯性离心力和摩擦力的共同作用下,实现分离成为精矿、中矿和尾矿。螺旋溜槽的工作原理与螺旋选矿机类似,但是其横向倾角更小,内缘无冲洗水管。二者由于结构简单、处理量大、无运动部件等优点,近年来在钨矿预选抛废领域得到了广泛关注^[16]。毕克俊等^[17]对云南某白钨矿进行了螺旋选矿机抛废试验。通过在选厂原工艺直线振动筛后添加一台螺旋选矿机进行抛尾,抛废率达到31.90%,废石 WO_3 品位为0.096%,减少了后续作业的处理量,降低了磨矿成本。陈慧杰等^[18]采用重选—强磁联合分选工艺对新疆某钨矿进行了试验,通过螺旋溜槽抛尾—摇床工艺全流程试验,螺旋溜槽预选抛尾率36%,最终重选钨精矿 WO_3 品位52.50%、回收率78.01%。此外,螺旋溜槽用水量相对其他重选方法较少,这对于类似新疆等干旱地区具有重要意义。周新军^[19]针对江西某黑白钨混合矿进行了预选抛尾研究,采用螺旋选矿机重选抛尾,重选给矿粒度在0.85 mm以下,螺旋选矿机作业所得尾矿采用0.074 mm格筛筛分,筛下作为细泥中矿,筛上为抛弃尾砂,试验可得尾砂产率37.28%、

WO_3 回收率6.12%,抛尾效果十分理想。

螺旋选矿机和螺旋溜槽作为高效的重力选矿设备,可以实现对粗、中粒级矿物有效预选抛废,并且可降低分选能耗、简化分选设备。但二者也存在缺点:分选效率低,机身高度大,给矿和循环的中矿需要砂泵进行输送。目前,这类设备在钨矿山应用较少^[16],因此进一步研究和推广螺旋选矿机和螺旋溜槽在钨矿预选领域的应用具有重要意义。

2.2.4 离心选矿机预选

离心选矿是利用矿物在离心力场中受力不同来实现分选的重选技术。由于离心选矿机分选粒度下限低,在钨细泥回收联合工艺中,常用于钨矿的预富集^[20]。目前,离心选矿机在钨矿细泥回收的预选工艺中有着广泛的研究和应用。周晓文等^[21]针对江西某选厂所属难选钨细泥进行了“预先浮选脱硫—离心选矿机预选”试验,最终离心选矿机预选精矿 WO_3 品位0.76%,回收率达到82.28%,取得了较好的预选效果。常学勇等^[22]针对某硫化钨尾矿采用Falcon离心机进行了重选法预选试验,经试验证明,采用Falcon离心机可提前抛出51.77%的尾矿, WO_3 作业回收率为78.14%,大幅降低后续作业的入选矿量。张小冬^[23]针对铁山垅钨矿钨细泥采用“脱硫—离心选矿”工艺进行了预富集试验,离心机得到离心尾矿 WO_3 品位为0.058%,低于选厂尾矿 WO_3 品位0.09%,预选精矿 WO_3 品位达到9.65%。

相较于其他预选方式,离心选矿机对微细粒矿物的预选分选有着良好的效果,常用于钨细泥回收工艺中的预选抛废作业。离心选矿机的不足在于:(1)离心选矿机用水量和耗电量较大,且设备磨损较为严重;(2)其生产适应性较低,结构参数仍有待改进。

2.3 磁选法预选

磁选是以矿物的磁性差异实现分选的选矿方法。黑钨矿具有弱磁性,可以利用强磁选法将其从非磁性矿物中分离出来。而白钨矿常常伴生其他金属矿物,当这些金属矿物也具有磁性时,磁选法也可以用于白钨矿的预选抛尾。

李军等人^[24]针对阿根廷某黑钨矿进行了试验研究。试验先使用弱磁选抛除矿石中的磁铁矿,再使用强磁预选得到强磁钨精矿。经弱磁选—强磁选预选,抛废率可达86.48%,预选精矿中 WO_3 回收率为93.97%, WO_3 品位4.27%,取得了较好的预选指标。刘进等人^[25]使用高梯度磁选法对某钨钼矿进行了抛废试验研究,该原矿中弱磁性脉石矿物含量高达67%, WO_3 品位为0.21%、Mo品位为0.12%。通过高梯度磁选工艺全流程试验,试验抛尾率53.41%,非磁性产品 WO_3 品位提高到0.41%。李光英等^[26]对某矽卡岩型多金属硫化矿

进行了回收白钨矿试验研究,通过磁选抛尾试验,试验抛废率 48.10%,精矿 WO_3 品位 0.35%、 WO_3 回收率 87.75%,显著提高了浮钨入选品位,同时还起到了强化硫脱除的效果。万宏民等^[27]对某难选高硫含铜白钨矿进行了选矿试验研究,通过磁选和铜硫混合浮选—铜硫分离工艺,对铜和硫进行充分回收的同时使白钨矿达到初步富集,最后通过白钨矿常温浮选得到 WO_3 品位为 63.93%、回收率为 89.60% 的白钨精矿,有效地实现了铜硫的分离和白钨矿的回收。

磁选法预选工艺流程简单,环境污染小,在含磁性矿物的钨矿预选抛尾中有着独特的优势。但磁选法预选的应用范围较为有限,由于其是根据矿物磁性差异实现分离的,因此只适用于处理矿物成分磁性差异较大的钨矿石。当矿石中矿物磁性差异较小或伴生矿物较多难以实现单体解离时,应选用其他预选方法。

2.5 智能光电预选

随着计算机、人工智能等前沿科技的发展,智能光电预选技术也得到了长足的发展。智能光电预选是利用各种光信号对散装物料进行线扫描,并使用传感器或不同传感器的组合对散状物料进行逐粒检测,根据传感器检测结果和数据处理结果,机械剔除部分在成分上不符合要求颗粒的分选技术。智能光电预选技术已在钨矿预选领域得到了广泛的研究和应用,主要包括图像色选技术和 XRT 预选技术^[28]。

2.5.1 图像色选技术

图像色选技术是利用高清相机对矿石进行线扫描,探测矿石表面颜色、纹理、光泽等,根据矿石与废石的表面特征差异进行预选抛尾。黑钨矿矿石表面特征明显,其颜色和纹理与脉石围岩往往具有较大差异,使用图像色选对黑钨原矿进行预选具有较好的效果。冯伯翰等^[29]针对韶关地区石英脉型钨矿使用图像色选机进行了色选试验研究,原矿 WO_3 品位约为 0.28%、 SiO_2 含量 72.36%,石英脉表面呈白色,与以花岗岩为主要成分的黑色废石有显著颜色区别。针对 -22+15 mm 粒级的原矿进行图像色选试验,处理量达到 2 500 kg/h 以上,抛废率达到 84% 以上,可以实现分选精度超过 99% 的分选效果。刘高强等^[30]对江西某黑钨矿山 -55+25 mm 原矿进行图像色选机的人工模拟生产给矿试验和工业试验,分别取得了废石合格率 95% 以上和废石合格率 97% 以上的良好指标,并将其应用于工艺流程的改造。结果表明,图像色选机可以利用矿石与废石之间的颜色、光泽或形状差异,实现有效分选。罗仙平等^[31]针对原矿 WO_3 含量为 0.28% 的中钨高新下属某黑钨矿,色选机预选可以实现抛废率达 72%,精矿 WO_3 品位达 0.89%、回收率达 89.70%;针对章源钨业下属某黑钨矿原矿 WO_3 品位为 0.35%,

色选机抛废率达 85%。

图像色选技术与人工拣选分选原理类似,均依据了矿石表面颜色、纹理等特点。已有现场利用图像色选机代替部分人工拣选,以提高对大块矿石的拣选效率,降低工人劳动强度,节省人力成本。但图像色选技术必须配置洗矿系统,增加了流程的复杂度,并且其只对矿石、废石表面特征差异明显的矿石具有较好的效果,具有一定的局限性。当矿石组分结构复杂、连生体较多、表面特征差异较小时,则需要使用 XRT 预选技术。

2.5.2 XRT 预选技术

XRT 预选技术是使用射线源发射 X 射线对合适粒级的矿石进行透视成像,利用人工智能技术对含有不同矿石成分差异信息的图像进行识别,最终通过分离系统进行分选的技术。由于 X 射线穿透能力强,数据是通过检测穿透物体时产生的能量信号生成的,因此 XRT 预选技术可以探测到矿石密度、组成元素等差异,从而克服了表面粉尘或连生体较多造成的误判问题^[32]。目前,XRT 预选技术是钨矿预选的热门研究方向。

袁明才等^[33]使用 SIXS-1 400 型智能矿石分选机,对石英脉型黑钨矿样品进行了小型分选试验、半工业连选试验以及工业化试验。在小型试验中,对 -32+16 mm、-40+32 mm、-60+40 mm、-80+60 mm 等 4 个矿样粒级进行了预选试验,抛废率分别为 87.43%、90.60%、86.24%、81.88%;在半工业连选试验中,-32+16 mm、-60+40 mm、-80+60 mm 粒级矿样的抛废率分别为 90.15%、83.76%、82.00%;在工业试验中,-32+16 mm、-40+32 mm、-60+40 mm、-80+60 mm 等 4 个矿样粒级的抛废率分别达到了 92.27%、89.67%、79.37%、88.57%,尾矿 WO_3 平均品位分别为 0.016%、0.013%、0.017%、0.014%,精矿 WO_3 回收率分别为 77.17%、86.90%、86.22%、84.48%。冯伯翰等^[34]使用 XRT 预选技术对崇义县某黑钨矿进行了分粒级选别试验研究,试验结果表明,对于不同粒级的钨原矿 WO_3 回收率达到 85% 以上,实际生产抛废率达到 75% 以上,可以大幅度提高选矿量,降低企业的选矿成本。

徐凤平等^[35]对湖南新田岭钨矿中碎产品 -30+10 mm 和 -60+30 mm 粒级分别进行了 XRT 预选抛废试验,表明白钨矿在预抛精矿中富集,根据现场可行性分析,若中碎产品的作业抛废率达到 30%,选厂破碎作业处理量提升了 30.5%,中碎作业运转率提升了 8.97 百分点。张建强等^[36]对于 WO_3 品位 0.2% 的低品位白钨矿进行了 XRT 预抛试验,当入选粒级控制在 -60+15 mm 时,抛废率可达到 50%,金属回收率达到 92%,精矿 WO_3 品位可以达到 0.30%~0.50%。范阿永^[37]对于某钨矿选矿厂的 WO_3 品位 0.301% 的矿样进行了

半工业试验,抛废率达到了33.3%,废石 WO_3 品位仅为0.036%。

XRT预选技术可以快速、准确地分析钨矿石内部矿物结晶的分布情况,实现很好的抛废效果,具有分选速度快、效率高、误差率低的特点。但其需要严格控制入选粒度所带来的影响,防止因粒度过大而导致矿石难以抛出和粒度过低而导致设备处理量下降等问题,这也是所有智能光电预选技术所需要克服的难题之一。

智能光电预选技术在矿石的预选领域逐渐获得了应用,会随着AI算法的发展而进步。在未来,如何提高设备处理能力、成像精度、分离精度以及环境适应性,将是智能光电预选的主要研究方向。

3 总结与展望

(1)对钨矿废石或低品位钨矿进行预选抛废,可提高入选原矿品位、降低后续磨选作业负荷、提高选厂经济效益,是处理薄矿脉、低品位矿石的有效分选手段,更是节能减排、建立环境友好型矿山的重要方法。选取适宜的预选方法可以提前抛出30%以上的废石。目前钨矿的预选抛废方法有人工拣选、重选法预选、磁选法预选以及智能光电预选。根据矿石性质、粒度分布等条件,选取适宜的预选方法,是实现有效预选抛废的首要任务。

(2)重选法预选主要包括重介质预选、动筛跳汰预选以及螺旋选矿机和螺旋溜槽预选。其中重介质预选和动筛跳汰预选是目前研究最多、应用最广泛的重力预选方法。螺旋选矿机和螺旋溜槽近几年在白钨矿预选领域受到关注,进一步研究和推广螺旋选矿机和螺旋溜槽预选是重力预选抛废的重要方向。离心选矿机是实现钨细泥预选的有效方法,加强设备的优化和改进是未来离心选矿机的重要研究方向。

(3)磁选法预选主要应用于黑钨矿的强磁预选以及含多金属硫化矿的白钨矿预选抛尾。在未来,改进磁选设备以提高处理量、选择性及粒级适应性是磁选法预选的重要研究方向。

(4)智能光电预选是一种新型预选技术,其中,图像色选技术和XRT预选技术在许多钨矿山实现了较好的应用。分选效率高、准确度高的特点使其逐步取代人工拣选和其他方法成为未来预选抛废的热门选择,在低品位、复杂多金属钨矿预选领域将发挥更大作用。

参考文献:

- [1] WANG X, QIN W Q, JIAO F, et al. Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(7): 2318–2338.
- [2] 中华人民共和国自然资源部. 2022年全国矿产资源储量统计表

- [DB/OL]. (2023-6-16) [2023-8-3]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/kcztjyb/202306/t20230616_2791726.html.
Ministry of Natural Resources, PRC. Statistical table of national mineral resources reserves in 2022[DB/OL]. (2023-6-16)/[2023-8-3].
- [3] 林海清. 中国钨矿山及选矿工艺发展[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2019.
LIN H Q. China tungsten mines and mineral processing[M]. Changsha: Central South University Press, 2019.
- [4] 王明燕, 贾木欣, 肖仪武, 等. 中国钨矿资源现状及可持续发展对策[J]. *有色金属工程*, 2014, 4(2): 76–80.
WANG M Y, JIA M X, XIAO Y W, et al. Current situation and sustainable development strategy of tungsten mineral resources in China[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2014, 4(2): 76–80.
- [5] 林鸿珍. 我国黑钨矿预选富集工艺进展[J]. *有色金属(选矿部分)*, 1991(4): 6–11+34.
LIN H Z. Progress of preconcentration and enrichment technology of wolframite in China[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 1991(4): 6–11+34.
- [6] 邱显扬, 董天颂. 现代钨选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
QIU X Y, DONG T S. Modern processing of tungsten ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [7] 王玉彤, 何桂春, 余新阳, 等. 江西某黑钨矿石选矿工艺研究[J]. *有色金属工程*, 2015, 5(3): 59–62.
WANG Y T, HE G C, YU X Y, et al. Beneficiation process for a tungsten ore from Jiangxi[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2015, 5(3): 59–62.
- [8] 古吉汉, 李平, 李振飞, 等. 某钨矿石的选矿试验研究[J]. *中国钨业*, 2011, 26(5): 21–23.
GU J H, LI P, LI Z F, et al. Experimental study on beneficiation of a tungsten ore[J]. *China Tungsten Industry*, 2011, 26(5): 21–23.
- [9] 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.
- [10] 周峰, 余浔. 哈萨克斯坦某钨矿预选抛尾工艺设计研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(6): 43–49.
ZHOU F, YU X. Research on pre-discarding tailings process for a certain tungsten polymetallic ore in Kazakhstan[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2019(6): 43–49.
- [11] 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 test of waste disposal for a scheelite heavy medium cyclone[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2022, 38(1): 16–19+56.
- [12] 刘书杰, 王中明, 刘方, 等. 重介质预抛对湖南某高碳酸钨型低品位白钨矿浮选试验的影响研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(2): 69–76.
LIU S J, WANG Z M, LIU F, et al. Study on effect of heavy medium pre-throwing on the flotation test of a low-grade scheelite with high calcium carbonate in Hunan[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2021(2): 69–76.
- [13] 袁代军, 郭江旭, 曾志飞, 等. 湖南某钨矿中部采集样重介质预抛及白钨常温浮选试验研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1): 59–62.
YUAN D J, GUO J X, ZENG Z F, et al. Pre-discarding by heavy medium separation plus ambient temperature flotation for scheelite sample from middle-layer mining zone of a tungsten mine in Hunan Province[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(1): 59–62.
- [14] 雷大士, 王宇斌, 郭月琴, 等. 陕西某含铋白钨矿选矿试验研究[J]. *中国钨业*, 2017, 32(3): 31–35.
LEI D S, WANG Y B, GUO Y Q, et al. Beneficiation test of a

- bismuth-bearing scheelite in Shaanxi Province[J]. *China Tungsten Industry*, 2017, 32(3): 31–35.
- [15] 陈晓玲. 某钨矿磨矿分级系统返砂试验研究[J]. 冶金管理, 2019(381): 35–36.
CHEN X L. Experimental study on sand return in a tungsten ore grinding classification system[J]. *Metallurgical Management*, 2019(381): 35–36.
- [16] 沈新春, 古吉汉, 黄云松. 螺旋选矿设备在钨选矿中的应用研究现状[J]. *矿山机械*, 2017, 45(10): 44–49.
SHEN X C, GU J H, HUANG Y S. Research status on application of spiral dressing equipments in tungsten ore beneficiation[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2017, 45(10): 44–49.
- [17] 毕克俊, 张琳, 薛晨. 螺旋选矿机在钨选生产中的应用[J]. *价值工程*, 2016, 35(12): 124–126.
BI K J, ZHANG L, XUE C. Application of spiral concentrator in the production of tungsten[J]. *Value Engineering*, 2016, 35(12): 124–126.
- [18] 陈慧杰, 张莉. 重-磁联合工艺回收某白钨矿试验[J]. *矿产综合利用*, 2016(199): 10–12+18.
ZHEN H J, ZHANG L. Experiment on recovery of scheelite by combined gravity and magnetic process[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(199): 10–12+18.
- [19] 周新军. 江西某黑白钨混合矿选矿新工艺试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
ZHOU X J. Experimental study on new mineral processing of a mixed ore of scheelite and wolframite in Jiangxi[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [20] 刘观发, 曾祥荣, 黄彪林, 等. 离心选矿机在钨矿分选回收中的应用[J]. *中国钨业*, 2021, 36(6): 47–53.
LIU G F, ZENG X R, HUANG B L, et al. Application of centrifugal concentrator in tungsten ore sorting and recovery[J]. *China Tungsten Industry*, 2021, 36(6): 47–53.
- [21] 周晓文, 杨志兆, 张永兵, 等. 基于新型离心选矿机的联合流程回收钨细泥试验研究[J]. *中国钨业*, 2019, 34(3): 24–29.
ZHOU X W, YANG Z Z, ZHANG Y B, et al. Combined process recovery of tungsten sludge based on a new centrifugal concentrator experimental studies[J]. *China Tungsten Industry*, 2019, 34(3): 24–29.
- [22] 常学勇, 邵伟华, 郭珍旭, 等. 重选—浮选联合回收某硫化钨尾矿中氧化钨钨矿[J]. *矿产保护与利用*, 2017(4): 40–43.
CHANG X Y, SHAO W H, GUO Z X, et al. Recovery of tungsten and molybdenum oxides from a molybdenum sulfide tailings by gravity concentration and flotation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2017(4): 40–43.
- [23] 张小冬. 铁山垅钨矿细泥综合利用工艺研究[D]. 江西理工大学, 2013.
ZHANG X D. Study on comprehensive utilization technology of fine mud in Tieshanlong tungsten mine[D]. Jiangxi University of Science and Technology, 2013.
- [24] 李军, 王建磊, 安峰文, 等. 阿根廷某钨矿选矿试验研究[J]. *矿业工程*, 2020, 18(2): 26–29+37.
LI J, WANG J L, AN F W, et al. Experimental study on mineral processing of tungsten ore in Argentina[J]. *Mining Engineering*, 2020, 18(2): 26–29+37.
- [25] 刘进, 张发明, 张红英, 等. 某钨钼多金属矿高梯度磁选抛废新工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1): 21–25.
LIU J, ZHANG F M, ZHANG H Y, et al. Experimental study on a new technology of high gradient magnetic separation for a tungsten-molybdenum polymetallic ore[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2021(1): 21–25.
- [26] 李光英, 王铁墨. 某多金属硫化矿中回收白钨矿选矿工艺研究[J]. *中国钨业*, 2021, 36(2): 36–42.
LI G Y, WANG T M. Study on the beneficiation process of scheeliteite recovered from a polymetallic sulfide ore[J]. *China Tungsten Industry*, 2021, 36(2): 36–42.
- [27] 万宏民, 曹欢, 李小非. 某难选高硫含铜白钨矿选矿试验研究[J]. *中国钨业*, 2020, 35(1): 29–35.
WAN H M, CAO H, LI X F. Experimental study on mineral processing of a difficult high-sulfur copper-containing tungsten ore[J]. *China Tungsten Industry*, 2020, 35(1): 29–35.
- [28] 第旺平, 吴志虎. 智能光电选矿预选抛废技术研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1): 117–121.
DI W P, WU Z H. Preconcentration and discarding technology of intelligent photoelectric dressing equipment[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2021(1): 117–121.
- [29] 冯伯翰, 周泽湘, 武秀琪. 基于色选法的钨矿石分选技术[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(3): 138–140.
FENG B H, ZHOU Z X, WU X Q. Tungsten ore sorting technology based on color separation[J]. *M&E Engineering Technology*, 2023, 52(3): 138–140.
- [30] 刘高强, 刘建南. 江西某黑钨矿山预选工艺改造[J]. *中国金属通报*, 2018(8): 15–17.
LIU G Q, LIU J N. Transformation of preconcentration process of a wolframite mountain in Jiangxi Province[J]. *China Metal Bulletin*, 2018(8): 15–17.
- [31] 罗仙平, 宁湘茜, 王涛, 等. 智能分拣选矿技术的发展及其应用[J]. *金属矿山*, 2019(7): 113–117.
LUO X P, NING X H, WANG T, et al. Development and application of intelligent picking technology[J]. *Metal Mine*, 2019(7): 113–117.
- [32] VERAS M M, YOUNG A S, BORN C R, et al. Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements[J]. *Minerals engineering*, 2020, 147: 106151.
- [33] 袁明才, 钟能. SIXS-1400型智能矿石分选机在石英脉型黑钨矿预选抛废中的应用[J]. *中国钨业*, 2022, 37(2): 41–46.
YUAN M C, ZHONG N. Application of SIXS-1400 intelligent ore separator in quartz vein wolstenite pre-separation and waste disposal[J]. *China Tungsten Industry*, 2022, 37(2): 41–46.
- [34] 冯伯翰, 武秀琪, 张艳. X射线透射选矿技术在崇义县某钨矿的试验研究[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(2): 98–101.
FENG B H, WU X Q, ZHANG Y. Experimental study on X-ray transmission beneficiation technology in a tungsten mine in Chongyi County[J]. *M&E Engineering Technology*, 2023, 52(2): 98–101.
- [35] 徐凤平, 郭灵敏, 王晴红, 等. 新田岭钨矿X射线预选抛废研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(4): 64–67.
XU F P, GUO L M, WANG Q H, et al. Application of X-ray sorting technique in pre-concentration and gauge discarding of Xintianling tungsten ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(4): 64–67.
- [36] 张建强, 赵德志. 云南某钨矿光电预选抛废选矿工业试验研究[J]. *云南冶金*, 2022, 51(4): 60–66.
ZHANG J Q, ZHAO D Z. Industrial experiment study on photoelectric pre-dumping beneficiation of one 'tungsten deposit in Yunnan[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2022, 51(4): 60–66.
- [37] 范阿永. X射线分选机在某钨矿选矿厂的分选试验[J]. *有色矿冶*, 2021, 37(3): 23–26.
FAN A Y. Separation test of X-ray separator in a tungsten ore concentrator[J]. *Non-ferous Mining and Metallurgy*, 2021, 37(3): 23–26.

Development of Gangue Disposal and Preconcentration Technologies of Tungsten Ores

LI Siyou¹, LI Lixia¹, ZHANG Hongliang^{1,2}, YAN Lixin¹, ZHANG Chen³

1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;

2. Ganzhou Best Friend Technology Co., LTD., Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China

Abstract: Tungsten ore resources in China are characterized by the rapid consumption of high-quality resources and the high proportion of low-grade ores. In recent years, with the decrease in high-quality tungsten ore resources, it becomes more and more urgent to economically explore the low-grade and refractory ores. How to preconcentrate and discard waste is the key to realizing efficient beneficiation of tungsten ores. To this end, the necessity of preconcentration and waste disposal was first addressed, then the principles and characteristics of hand sorting, gravity preconcentration, magnetic separation, and sensor-based sorting were recognized. Also, the development of preconcentration and waste disposal of tungsten ores was summarized. Results indicated that ore properties and particle size distribution played crucial roles when selecting suitable preconcentration methods, an important trend was to optimize and improve the traditional technologies, and intelligent sensor-based sorting would be a promising option in the preconcentration of tungsten ores in the future. Finally, the development of tungsten preconcentration was summarized and outlooked, providing a reference for the research and application of the preconcentration technologies of tungsten ores.

Keywords: tungsten ore; preconcentration and waste disposal; gravity; magnetic separation; intelligent photoelectric preconcentration

引用格式: 李思佑, 李丽匣, 张宏亮, 晏丽鑫, 张晨. 钨矿预选抛废技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 89–95.

LI Siyou, LI Lixia, ZHANG Hongliang, YAN Lixin, ZHANG Chen. Development of gangue disposal and preconcentration technologies of tungsten ores[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 89–95.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

李思佑(2000—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生。现就读于东北大学矿物加工工程专业, 师从李丽匣教授, 主要从事矿石预选技术研究。获得全国矿物加工实践作品大赛二等奖 1 项、三等奖 1 项。



通信作者简介:

李丽匣(1980—), 女, 河北定州人, 东北大学矿物工程系教授、博士生导师, 加拿大 UBC 大学访问学者、冶金矿山行业专家委员会委员、国际矿物加工论坛专家委员会委员。主要研究方向为矿石碎磨理论与预选技术。主持国家自然科学基金项目 4 项、科技部高端外国专家项目 3 项、国家重点研发计划子课题 3 项、省部级项目 9 项、企业项目 25 项。获省部级科学技术奖 5 项, 授权发明专利 8 项, 第一/通信作者发表 SCI 检索论文、中文核心论文 51 篇, 编著/参编 6 部学术著作。