

预选抛尾技术在钨选矿中应用的研究进展

张婷^{1,2}, 邱廷省¹, 李平², 李振飞², 严华山¹

(1. 江西理工大学, 江西 赣州 341000; 2. 赣州有色冶金研究所有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要: 随着钨矿资源的深入开采, 矿石贫化率逐年增高, 原矿 WO_3 品位降低, 嵌布粒度变细, 易选矿石日趋匮乏, 钨资源呈贫、细、杂难处理化。由于矿石性质的变化, 原有人工手选丢废率逐年下降, 致使碎磨压力增大和选矿成本增加; 同时矿山存在招工难、影响生产等问题。矿石预选是矿产资源领域节能减排、提高“三率”指标的重要手段之一, 可应用于钨矿预选, 提高入选 WO_3 品位, 以解决制约矿山企业减员、扩产降本增效的瓶颈问题, 满足矿山大型工厂化对选矿技术的要求。本文着重介绍了辐射法拣选和重介质选矿两种矿石预选方法及其在钨矿石中的应用进展, 最后指出必须依靠科技进步, 通过开发利用高效智能的矿石预选技术、设备和工艺, 才能大力提高钨资源开发、加工和利用的效率; 并指出辐射法拣选+重介质选矿的联合工艺是矿石预选工艺发展的必然趋势, 二者结合可实现钨矿石的全粒级预选。

关键词: 钨矿; 预选; 辐射法拣选; 重介质选矿

doi:10.12476/kczhly.202303230159

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 05-0086-09

引用格式: 张婷, 邱廷省, 李平, 等. 预选抛尾技术在钨选矿中应用的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 86-94.

ZHANG Ting, QIU Tingsheng, LI Ping, et al. Research progress on the application of preconcentration tailings discarding technology in tungsten beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 86-94.

钨资源是国民经济发展和国防建设的重要物质基础, 是保证社会稳定和国家安全的重要支撑。据统计^[1], 截至 2021 年底, 全球探明钨资源储量 370 万吨, 钨矿资源分布极度不均, 其中我国钨资源以 190 万吨的储量居第一, 占全球比重的 51%; 其次是俄罗斯、越南, 分别占全球比重的 11% 和 3%, 其余分散在其他国家。我国钨矿资源分布遍及全国 20 多个省份, 但储量主要集中于赣(江西)、湘(湖南)、豫(河南)、闽(福建)、甘(甘肃)、新(新疆)等省, 且全国的三分之二的钨储量集中在赣、湘两省^[1]。尽管已发现的钨矿种类较多, 有属黑钨矿族的钨锰矿、黑

钨矿、钨铁矿等, 属白钨矿族的白钨矿、钼白钨矿、铜白钨矿等, 属钨华类矿物的钨华、水钨华、铜钨华等, 还有如钨铅矿、钨锌矿、铋钨烧绿石等不常见的钨矿物, 但其中只有黑钨矿和白钨矿具有工业开采经济价值。

我国钨矿经过近百年的开发利用, 在几代矿业从业者们的努力下, 开采利用从钨单一矿床到共(伴)生多金属矿床, 选别工艺从最初简单的重选到如今的离心加强重选、高梯度磁选、浮选乃至选冶等多种工艺联合, 矿物回收从单一钨矿物回收多种共(伴)生有用矿物综合回收, 选矿装备更新换代逐步智能化, 极致地展示了钨选

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904504)

作者简介: 张婷(1989-), 女, 高级工程师, 博士研究生, 从事有色金属选矿方面的研究工作。

通信作者: 邱廷省(1962-), 男, 教授, 博导, 研究方向为有色金属选矿。

矿技术的迅猛发展^[2]。但随着国民经济的迅猛发展,对钨矿资源的需求日渐增多。浅部资源、优质资源经过长期的高强度开采,钨资源储量大幅缩减,相对高品位、易选的矿石资源急剧减少,并日渐枯竭,钨资源趋于贫、细、杂难处理化。因此,运用高效智能的矿石预选技术、设备和工艺,从前端着手减轻碎磨压力、提高入选品位,对钨资源利用率的提高、矿山服务年限的延长具有重要意义。

1 钨矿预选的重要性

矿石预选通常是指矿石入磨选前的选别工序,它是利用矿石颗粒密度、磁性、光学性质、放射性等某种特性的差异,预先抛除一部分脉石矿物和混入的围岩、夹石等,提前抛尾以提高矿石的入选品位,降低矿石的入磨量,进而降低生产成本和能耗^[3-5]。其作用主要有^[6-7]:

(1) 提高资源利用率,延长矿山服务年限。随着矿产资源的不断消耗,处理贫矿和极贫矿资源已成为必然;在过去因市场经济不济、专业技术落后等原因还不能开采的贫矿或极贫矿,因为先进预选技术的应用,提高了矿石中 useful 矿物的入选品位,成了能被开采利用的资源,进而延长矿山的 service 年限。

(2) 弥补采矿的不足。使得更多的深部资源、残矿资源(或难采矿体、低品位矿体)具有开采价值,新的采矿工艺与先进的采掘运设备得以应用。

(3) 实现节能减排。传统矿山用于矿石粉碎的能耗统计显示,矿石在开采、碎矿、磨矿过程中的能耗分别占 3%~5%、5%~7% 和 85%~90%,其中磨矿能耗占比巨大。矿石预选,极大地减少了矿石入磨量,降低磨矿消耗实现节能;提前抛废废石更容易被综合利用,可就地作充填材料或建筑材料,实现减排。

我国黑钨矿出窿原矿品位低、采矿贫化率高,加之黑钨矿性脆,在破碎、磨矿过程中易泥化,不利于分选。因此,遵循“能丢早丢”原则,采用预选抛废工艺处理黑钨矿是必然的。矿石预选最初发展时,由于科技水平落后,只能依靠人工手选。手选是人工根据矿石和废石之间形状、颜色、光泽等外观特性进行鉴别和分选。出窿原

矿首先采用 90~150 mm 的斜格筛预先筛分,筛上矿物“扒栏”后人工砸碎与筛下产物一起分级手选。据统计^[8],手选废石抛废率约 50%,原矿 WO_3 品位提高 1 倍左右,作业回收率在 95% 以上;但手选所需劳动力多,全厂操作工的 1/3~1/2 是手选工,且劳动强度大,对于 -20 mm 粒级的矿石无选别能力。为避免泥矿黏附损失于废石中,分级手选前必须增加洗矿作业。随着钨矿山的深度开采,钨矿石性质越来越复杂,如有用矿物与脉石矿物之间的外观特性差异人眼难辨,矿石品位明显下降,以人工为主导的拣选效果差有限,资源浪费现象严重,并随着社会的发展逐步出现招工难、手选成本增加等问题,由此,经过选矿者的不断探索与研究,辐射法拣选和重介质选矿等机械预选法应运而生。随着科技的发展,预选工艺已从最初的人工手选,逐步发展成为了手选、辐射法拣选、重介质选矿等多种方法相联合的预选工艺;可选矿石种类也不仅限于易于肉眼识别的石英脉型黑钨矿。

2 辐射法拣选

辐射法拣选是利用矿石和废石受可见光、红外线、紫外线、x 射线、 γ 射线或无线电波等电磁波谱范围内的各种射线照射后,二者吸收、反射或激发出荧光等的反应不同而被分选的方法^[6]。现在普遍称之为智能机选。

早在 20 世纪初,奥地利科研工作者开始利用物料外观特性即表面颜色差异研制出了光选机,初始主要用于豆类、种子的优胜劣汰,直至 60 年代才开始逐步推广应用于选矿^[4,9]。基于半导体材料、电子技术、人工智能前沿科技的高速发展,国外在智能拣选技术和设备上的研究取得实质性进展,研发了不同机械结构和检测技术的智能拣选机,并逐步尝试打开中国市场。中国从 20 世纪 60 年代开始研究光电分选技术,至 80 年代初期已研制出多种类型的拣选机,并部分取代了人工手选,人工劳动强度得到了减轻,应用矿山也取得了不同程度的经济效益。比如江西有色冶金研究所(赣州有色冶金研究所有限公司前身)等单位研制出照射源分别为白炽灯和氦氖激光的 GS-II、GS-III 的光电选矿机,江西冶金学院(江西理工大

学前身)利用磁、光两种探头研制出 CGX- I 型磁光分选机。早期我国钨矿山使用的各类光选机分选指标见表 1^[4,10]。漂塘钨矿、小龙钨矿和瑶岗仙钨矿对应用光选机前后的经济效益进行了统计,光选机+人工复选工艺处理同一粒级矿石,处理一吨矿石所产生的费用仅是全人工手选的 70%~90%,光选机的应用不仅减轻了人工劳动力和劳动

强度,同时提高了选别效率和经济效益^[10]。但受制于传感器色差分辨率差、数据处理慢、维修成本高、分选效率低下等原因,致使设备的研究和应用处于停滞状态^[11]。直到近几年我国智能光电选矿技术才慢慢复苏,各大高校、研究院、矿山企业等均在致力研制开发高效智能选矿分选机,将国内矿石预选技术推动向前发展。

表 1 早期我国钨矿山使用的各类光选机分选指标					
Table 1 Various kinds of optical sorters used in tungsten mines in our country in the early period					
类型	型号	钨矿山	分选粒级/mm	脉石选出率/%	废石丢弃率/%
机械打板	GS- I A	白石山	-40+20	66.7	87.3
		大平	-30+20	66.7	83.7
		大龙山	-38+18	59.4	67.7
	GS- I B	小龙	-50+30	83.0	93.4
			-30+16	85.2	86.5
V型皮带	CGX- I	大平	-30+20	80.0	81.7
		樟东坑	-30+20	78.9	85.9
	GS- II	大龙山	-36+18	86.1	87.7
平皮带	B-650- I	大吉山	-40+30	81.3	79.4
	GS- II	小龙	-30+16	89.9	86.5
	YG-40	瑶岗仙	-40+20	87.7	90.4

注:脉石选出率指选出的脉石量与给矿量之比,废石丢弃率指选出的废石量(含人工复选)与给矿量之比。

赣州好朋友科技有限公司于 2015 年和 2017 年分别研制出了高清智能图像选矿机和基于 XRT(透射技术)的 X 射线智能选矿机,并成功代替人工手选应用于钨矿山。该公司研制的 HPY-XRT1400 智能选矿机已经在国内得到广泛应用^[12]。章源钨业淘锡坑矿采用该设备处理原矿 WO₃ 品位 0.31%、入选粒级 -50+10 mm 的钨矿石,获得了精矿 WO₃ 品位 0.95%、回收率 96.20%,作业抛废率 68.70%、抛废 WO₃ 品位 0.02% 的选别指标。中钨高新香炉山钨业应用该设备处理原矿 WO₃ 品位 0.58%、入选粒级 -50+10 mm 的白钨矿石,获得了精矿 WO₃ 品位 0.80%、回收率 94.63%,作业抛废率 31.70%、抛废 WO₃ 品位 0.1% 的选别指标。中钨高新衡阳远景钨业应用该设备处理原矿 WO₃ 品位 0.28%、入选粒级 -60+15 mm 的白钨矿石,获得了精矿 WO₃ 品位 0.89%、回收率 89.70%,作业抛废率 72.60%、抛废 WO₃ 品位 0.04% 的选别指标。

赣州有色冶金研究所有限公司^[13]通过对某钨矿山企业采用其自主研发的智能射线选矿机的持续优化改进与追踪,平均抛废率 89.78%,抛废

WO₃ 品位 0.013%。与人工手选工艺相比,使用 1 台该智能射线矿石分选机,该钨矿企业的废石选出率提高了 4.17 个百分点,废石 WO₃ 品位下降了 0.005 个百分点,WO₃ 回收率也相应有所提高。设备节省人工费用、磨重选别段费用分别为 255 万元/年和 11.53 万元/年,创除设备耗电 27.61 万元/年和设备折旧费及维修费 30.23 万元/年,产生的直接经济效益达 208.69 万元/年。

江西某石英脉型黑钨矿,黑钨矿赋存于白色或乳白色的石英脉中,主要以半自形晶的板状、柱状结晶或团块状集合体产出;围岩主要为黑色、灰黑色的变质岩、千枚岩等;二者黑白分明,易于识别。刘高强等^[14]利用这一外观特性,对该石英脉型黑钨矿山进行预选工艺改造,采用智能图像选矿机代替人工手选,获得了脉石合格率不低于 85%,废石合格率不低于 94%,废石选出率提高了约 5 个百分点的生产指标,验证了智能图像选矿机对于存在颜色、光泽或形状等外观差异的矿石间的分选是有效的。

陈俊等^[15]采用北京霍里斯特的 XNDT-104 智能分选机对某石英脉型白钨矿 -90+15 mm 粒级原

矿进行了小型预选实验研究。结果表明,随着抛废率的增大,钨精矿品位逐渐增大而回收率降低,通过控制抛废率可以实现该钨矿石的有效预选。当预选抛废率约为50%时,可获得预选精矿 WO_3 含量约为0.65%、回收率约93%,抛废 WO_3 含量约0.06%;当预选抛废率约为30%时,预选精矿中 WO_3 含量约为0.48%、回收率约97%,抛废 WO_3 含量约0.03%。

为提高湖南某白钨矿入选品位、降本增效,贾妮^[16]采用XRT射线智能选矿机对-60+15 mm粒级原矿进行了实验室、半工业预选抛废实验,并实现应用。应用结果显示:预选精矿 WO_3 品位从0.213%提高至0.495%,作业回收率为80.30%;抛废率65.37%,抛废 WO_3 含量为0.064%,低于选厂排尾尾矿 WO_3 含量0.08%。经核算选矿成本从109元/吨降低至70.95元/t,降幅达34.91%;选厂处理能力由原来的1 500 t/d提高至2 300 t/d,增幅达53.33%。

某白钨矿呈细脉状分布于石英脉中,并与石榴石、透辉石等矿物穿插呈浸染状分布。范阿永^[17]采用X射线透射识别技术进行半工业实验,结果显示,在给矿粒度-60+15 mm时废石选出率相对较高,为32%~60%;当给矿粒度大于60 mm或小于15 mm时,分选指标下降。针对给矿 WO_3 品位0.30%的钨矿石,可抛除33.30%的废石,精矿 WO_3 回收率96.02%,废石 WO_3 品位降至0.036%,低于磨选段排尾品位。

湖南某钨钼矿含 WO_3 0.17%、Mo 0.12%,钨主要为白钨矿和黑钨矿,二者比约为1:1,钼主要会辉钼矿,脉石矿物主要为石英。原矿经破碎筛分分级为-40+20、-20+10和-10 mm三个粒级,其中前两个粒级采用LPPCX射线辐射拣选机预选抛废后与-10 mm粒级一起进入合格矿。半工业实验获得合格矿含 WO_3 0.26%、Mo 0.16%,回收率分别为94.22%、89.33%,抛废率为39%的选别指标^[18]。徐凤平等^[19]针对新田岭钨矿-60+10 mm粒级钨矿石,采用X射线分选技术预选抛废可提高浮选粗精矿品位。经流程考查,对中碎-60+10 mm粒级产品应用X射线预选后可抛废30% (作业抛废率),从而提高破碎作业处理量、中碎系统运转率由原来的29.36%提高至38.33%,满足生产需求。

袁明才等^[20]针对石英脉型黑钨矿原矿品位

低、选矿成本高等问题,研究采用SIXS-1400型智能矿石分选机对原矿按不同的粒级进行预选抛废,从小型分选实验、半工业连选实验到工业应用,均获得了良好指标。其中工业应用中,-80+60 mm、-60+40 mm、-40+32 mm、-32+16 mm粒级的抛废率分别为88.57%、79.37%、89.67%、92.27%,尾矿中 WO_3 含量分别为0.014%、0.017%、0.013%、0.016%,精矿 WO_3 回收率分别为84.48%、86.22%、86.90%、77.17%。研究结果表明,SIXS-1400型智能矿石分选机能代替人工手选实现钨矿物的有效预富集,使低品位钨矿山资源利用率得到了提高。

张建强等^[21]采用X射线光电选矿技术对 WO_3 含量0.20%左右的某低品位白钨矿进行预选,进行了分选粒度、处理量、分选机工作模式及喷吹方式等条件,确定了适宜的操作参数。入选粒度为-60+15 mm时,保证处理量45 t/h,当入选品位为0.20%左右时,可以抛除50%左右的废石,精矿富集比为1.5~2.5, WO_3 回收率达到92%。

辐射法拣选具有自动化程度高、分选指标优、绿色环保等优点,不仅可以取代人工手选处理石英脉型黑钨矿矿石,同时也能较好地处理呈细脉浸染状的黑、白钨及其共生多金属矿石。选别粒级主要集中在-90+15 mm粒级,全部或部分粒级取代人工手选,具体依据有用矿物黑白钨矿石的嵌布特性和预选段筛分分级情况而定。不仅提高了自动化生产效率,同时大大减少了磨选的矿量和生产成本。细脉浸染型钨多金属矿有价矿物种类繁多、嵌布特征复杂,现有机选抛废装备与技术存在有价金属共富集难、金属损失大、抛废效率低、处理能力低等问题,这是辐射法拣选发展需要攻克的难点。

3 重介质选矿

重介质选矿法是当前有效的一种重力选矿法之一,它遵循阿基米德原理—小于重介质密度的颗粒上浮,大于重介质密度的颗粒下沉^[22]。重介质分为重液和重悬浮液。重液大多有毒、价格贵和不易回收等特点,基本上只在实验室中用于浮沉实验,如三溴甲烷、杜列液、氯化锌溶液等;重悬浮液是由高密度固体微粒组成的加重质与水

构成的悬浮体，工业上加重质主要有磁铁矿、硅铁、（砷）黄铁矿等^[23-24]。早在 20 世纪 60 年代初，国外如美国、德国、澳大利亚等国就对重介质选矿技术进行了大量的研究，研制出了多种形式的分选设备，在不断改进设备的稳定性和介质的回收系统等后得到广泛应用。实践证明，重介质选矿技术具有高分选精度、宽选别粒度、智能自动化、绿色环保等特点，从最初应用在煤矿行业逐步应用到有色金属矿和非金属矿的选矿中^[25-26]。在选矿工艺中用于重介质选矿预选的设备主要为重介质旋流器，其结构原理类似水力旋流器，矿物和重悬浮液以一定的压力给入旋流器内，在惯性离心力、向心浮力以及流体介质阻力等机械力作用下，矿物颗粒根据自身密度差异分布在悬浮液相对应的密度层。悬浮液内层密度小，在向上流动经溢流管排出轻矿物；悬浮液外层密度大向下回转经沉砂口排出重矿物^[27]。

重介质选矿于 20 世纪 70 年代初开始应用于我国黑钨矿山。广东红岭钨矿^[28]采用重介质涡流分选器，以黄铁矿为加重质，对-30+5 mm 粒级矿石进行预选，在原矿 WO₃ 含量 0.21%~0.54% 时，获得抛废率 50.00%~59.43%，抛尾 WO₃ 含量 0.022%~0.033%，精矿 WO₃ 回收率 93.77%~96.93%

的分选指标。极大地减轻了人工的劳动强度、提高了选厂的处理能力和劳动生产率。广东洋塘钨矿^[29]属高温热液黑钨石英脉矿床，出窿原矿 WO₃ 含量 0.23% 左右，于 1971 年建成重介质选矿系统并投产，对-12+3 mm 粒级矿石进行预选，年平均抛废 WO₃ 品位 0.031%，低于淘洗尾砂品位 0.040%；作业回收率 96%~97%，比淘洗高 4%~5%；抛废率 50%~60%。既提高了产量又降低了成本。盘古山钨矿^[30]采用重介质涡流旋流器进行半工业实验，入选 WO₃ 品位为 0.2%、粒度为 -35+6 mm，获得精矿 WO₃ 品位 0.39%、回收率 94.92%，抛废率 51.88%，抛废 WO₃ 品位 0.019% 的良好指标。20 世纪 70、80 年代赣州有色冶金研究所有限公司与有关单位合作研制了多种型号规格的重介质选矿机，并在我国黑钨矿选厂试用，分选指标见表 2^[8]。据统计，黑钨矿山应用重介质预选后，废石选出率提高了 4%~13%、劳动力节省了 20%~40%、工作效率提高了 1.61 倍，选矿总成本降低了 5%~11%。但当时重介质选矿设备都存在零件材料耐磨性差、设备磨损严重、使用寿命短、自动控制差等共性问题，同时受科技、经济、市场等多因素影响，致使重介质选矿技术发展受限。

表 2 早期我国钨矿山使用的重介质选矿机分选指标
Table 2 Separation indexes of heavy media beneficiators used in tungsten mines in the early period

规格型号/mm	围岩类型	粒级/mm	加重剂	品位/%			抛尾产率/%	回收率/%
				给矿	精矿	尾矿		
Φ1 200×1 200鼓型	花岗岩	-40+6	刚玉	0.142	0.270	0.016	50.54	94.29
Φ1 200×1 200锥型	花岗岩	-40+6	刚玉	0.169	0.374	0.028	59.14	90.22
400×500×500振动槽	花岗岩	-50+30	毒砂	0.259	0.720	0.030	50.00	92.26
Φ300涡流型旋流器	花岗岩	-20+4	黄铁矿	0.129	0.272	0.021	57.00	90.70
Φ200涡流型旋流器	变质岩	-20+3	黄铁矿	0.124	0.200	0.020	48.11	92.23
Φ300重介质旋流器	花岗岩	-10+1.7	黄铁矿	0.297	0.448	0.028	37.00	95.00

随着钨资源储量的不断减少，矿石贫化现象严重，以及选厂自动化设备的需求，重介质选矿在沉寂一段时间后又逐渐被重视，近年来发展迅猛。针对含有 WO₃、Cu、Mo、Bi 等多种有价金属的某矽卡岩接触交代钨矿床，周峰等^[31]采用哈萨克斯坦重介质筒式分选机对-70+6 mm 粒级矿石进行预选抛尾，可抛尾 62.90%，尾矿中含 WO₃ 0.032%，WO₃ 损失 8.50%；采用加拿大的 SEPRO 重介旋流器对-10+2 mm 粒级进行预选抛尾，获得

了精矿 WO₃ 回收率 96.30%，抛尾产率 43%、含 WO₃0.03% 的分选指标。同时降低了预选精矿产品中方解石的含量，有利于后续钨的浮选。

白钨矿石与萤石、碳酸钙等含钙矿物具有相近的可浮性，浮选分离存在一定的困难。若在浮选工艺前能够抛除部分含钙脉石矿物，不仅能够提高白钨矿的入选品位，而且有利于后续白钨矿与含钙脉石矿物的浮选分离。针对湖南某高碳酸钙型低品位白钨矿，刘书杰等^[32]采用重介质旋流

器对-15+0.5 mm粒级矿石进行了预选实验。在 2.37 g/cm^3 介质密度条件下,获得了抛尾产率为46.24%,尾矿中 WO_3 、 CaF_2 、 CaCO_3 金属占有率分别为5.15%、27.17%、74.72%的选别指标。其同时考查了重介质预选抛尾前后对白钨常温浮选的影响,结果表明,重介质预选抛尾后,常温浮选获得的钨精矿 WO_3 品位、回收率较之前分别提高了3.77%和2.61%。充分说明了重介质选矿预选技术在处理低品位钨矿石的价值。

之前我国钨矿尤其是黑钨矿选矿,一般是将出窿原矿经120 mm粒级扒拦后分级手选,将所得各粒级手选精矿和-16 mm粒级矿物一起破碎至-12 mm粒级作为合格矿进入磨重选别,致使磨重作业生产压力大和生产成本高。对此,李振飞等^[33]发明了一种钨矿的分选方法,利用重介质旋流器直接对0.5~12.0 mm粒级钨矿进行预选抛除大量尾矿,减少入磨量,填补了传统钨矿选别粗选工艺中对0.5~16.0 mm粒级矿物无有效选别方法的技术空白。实施例的实验结果显示,采用其提供的方法对 WO_3 含量为0.11%~0.23%的钨出窿原矿进行分选,可以抛除77%~82%的废石,获得 WO_3 含量为0.56%~0.99%、回收率为90.39%~94.42%的合格矿。

袁代军等^[34]对湖南某钨矿进行了重介质预选抛尾性能研究及其对后续白钨常温浮选的影响研究。针对 WO_3 含量0.23%的-15+0.5 mm粒级矿石,在一定的重介质密度条件下,可抛除31.37%的尾矿,预选精矿 WO_3 品位提高至0.34%、回收率达96.62%。且重介质预选抛尾后有利于后续对白钨常温浮选,全流程可获得 WO_3 品位5.50%、回收率84.15%的钨精矿,相较于原矿未经重介质预抛而直接进入磨浮流程,获得的钨精矿 WO_3 品位、回收率较之前分别提高了0.94%和2.34%。重介质预选抛尾不仅有利于尾矿的综合利用,同时有助于钨精矿产品质量的提高。

重介质选矿技术已渐渐成为钨矿产资源生产过程中非常重要的组成部分,其与矿山企业的资源利用、能耗节约以及生产效益密不可分。黑、白钨矿的密度分别为 $7.2\sim 7.5\text{ g/cm}^3$ 、 $5.9\sim 6.1\text{ g/cm}^3$,是高密度矿物,其与石英(2.65 g/cm^3)、萤石(3.18 g/cm^3)、方解石(2.75 g/cm^3)、长石($2.6\sim 2.7\text{ g/cm}^3$)等脉石矿物密度差值大,明显

大于重介质选矿技术分选有用矿物与脉石矿物的最小密度差 0.3 g/cm^3 ^[35],可以有效被重介质选矿技术分选。重介质选矿分选粒度范围宽,大至60~70 mm,小至0.5 mm粒级,一般为-15+0.5 mm粒级;在工业生产中,重介质选矿系统通常将-0.5 mm粒级优先筛除进入下一选别作业,并不是因为重介质选矿不能处理或分选效率低,主要是因为处理该粒级会造成昂贵的加重质损耗严重,得不偿失。而介耗是影响重介质选矿技术经济指标的一个重要因素。目前关于重介质选矿在钨矿预选方面的研究主要集中在物料粒度组成、分选密度对选别效果的影响,对于加重质种类、旋流器筒体长径比、悬浮液入口压力等关键参数的影响鲜有报道。

4 结 论

(1) 随着国民经济的迅猛发展,对钨矿资源的需求日益增多。浅部资源、优质资源经过长期的高强度开采,钨资源储量大幅缩减,相对高品位、易选的矿石资源急剧减少,并日渐枯竭。因此,必须依靠科技进步,通过开发利用高效智能的矿石预选技术、设备和工艺,大力提高钨资源开发、加工和利用的效率,解决制约矿山企业减员、扩产降本增效的瓶颈问题,并满足矿山大型工厂化对选矿技术的要求。

(2) 不管是辐射法拣选还是重介质选矿,其在钨矿预选方面的研究主要集中在工艺实验方面,对于不同的设备处理不同钨矿石种类的内在关联性并不明确。基于有用矿物与废石射线吸收特性及密度等性质差异,建立预抛废效率预测模型;考察物料粒度、形状、厚度等特性对辐射法拣选智能识别精确度的影响程度;揭示设备精尾挡板坐标、喷阀位置等参数对抛废效率的影响规律;通过研究物料粒度组成、旋流器筒体长径比、悬浮液入口压力等关键参数对矿物颗粒在两段重介质旋流器分配效率的影响,来揭示两段重介质旋流器分选密度的平衡机制;研发悬浮液密度高精度原位数据采集技术,构建悬浮液密度与抛废效率的关系数据库;利用高比重钨废渣研发新型加重质;改善重介质悬浮液流体性能;构建介耗模型等都是钨矿预选抛废技术的发展方向。

(3) 辐射法拣选可完全代替人工手选进行矿

石预选, 但和手选一样存在分选粒度下限的问题, 不适用于-15 mm 粒级矿石的分选; 重介质选矿的加入恰好弥补这一缺陷, 对-15+0.5 mm 粒级矿石具有很好的分选效果。因此, 辐射法拣选+重介质选矿的联合工艺是矿石预选工艺发展的必然趋势, 二者结合可实现钨矿石的全粒级预选。

参考文献:

- [1] 张鑫. 2021 年全球及中国钨产业市场现状分析, 国内钨储量及矿山钨产量世界第一[EB/OL]. <https://www.huaon.com/channel/trend/805652.html>, 2022-05-18.
- ZHANG X. Analysis of global and Chinese tungsten industry market status in 2021 shows that domestic tungsten reserves and mine tungsten output rank first in the world [EB/OL]. <https://www.huaon.com/channel/trend/805652.html>, 2022-05-18.
- [2] 高玉德. 我国钨矿资源特点及选矿工艺研究进展[J]. 中国钨业, 2016, 31(5):35-39.
- GAO Y D. Tungsten resource characteristics of china and research advances of tungsten processing technologies[J]. China Tungsten Industry, 2016, 31(5):35-39.
- [3] 王团锋. 基于 X 射线荧光技术的金矿石在线拣选方法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
- WANG T F. Study on online sorting method of gold ore based on X-ray fluorescence technique [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [4] 罗仙平, 宁湘菡, 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.
- [5] 刘进, 张红英. 新型环保钨捕收剂的工业化应用研究[J]. 矿产综合利用, 2022(6):138-141.
- LIU J, ZHANG H Y. Industrial application of new environmentally friendly tungsten collector[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6):138-141.
- [6] 王淑慧. 矿石预选的进展[J]. 国外金属矿选矿, 2003(3):4-8.
- WANG S H. Progress of preconcentration of ore[J]. Metal Ore Dressing Abroad, 2003(3):4-8.
- [7] 韩跃新, 王泽红, 陈晓龙, 等. X 射线辐射分选技术及设备的发展与应用[J]. 矿产综合利用, 2013(6):11-15.
- HAN Y X, WANG Z H, CHEN X L, et al. Development and application of X-ray radiation sorting technology and equipment[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013(6):11-15.
- [8] 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):6-12.
- LIN H Z. Progress in preconcentration and enrichment of wolframite ore in China[J]. Nonferrous Metals (Processing Section), 1991(4):6-12.
- [9] 郑飞. 国外光电分选机的进展[J]. 有色金属:选矿部分, 1980(2):38-43.
- ZHENG F. Progress of photoelectric separators abroad[J]. Nonferrous Metals: Mineral Processing Part, 1980(2):38-43.
- [10] 徐家骥. 光电选矿在黑钨选矿厂中的使用和发展[J]. 江西冶金, 1984(4):9-14.
- XU J J. Application and development of photoelectric beneficiation in wolfrite Separation plant[J]. Jiangxi Metallurgy, 1984(4):9-14.
- [11] 吴志虎. 矿石预选抛废技术与智能光电选矿设备选型要点[J]. 世界有色金属, 2020(16):202-205.
- WU Z H. Ore preconcentration and discarding waste technology and selection of intelligent photoelectric beneficiation equipment[J]. World Nonferrous Metals, 2020(16):202-205.
- [12] 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 Section), 2021(1):117-121.
- [13] 欧阳健强, 吴富姬, 吴鸿辉, 等. 智能射线矿石分选机在钨矿预处理中的研究与应用[J]. 中国钨业, 2022, 37(1):67-72.
- OUYANG J Q, WU F J, WU H H, et al. Research and application of intelligent ray ore separator in tungsten ore pretreatment[J]. China Tungsten Industry, 2022, 37(1):67-72.
- [14] 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. Preconcentration process reform of a wolframite in Jiangxi Province[J]. China Metal Bulletin, 2018(8):15-17.
- [15] 陈俊, 邹尚. X 射线透射智能分选机预选某低品位钨矿石的实验研究[J]. 湖南有色金属, 2019, 35(6):15-16, 36.
- CHEN J, ZOU S. Experimental study on preconcentration of a low-grade tungsten ore by an intelligent X-ray separator[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2019, 35(6):15-16, 36.
- [16] 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.

[17] 范阿永. X射线分选机在某钨矿选矿厂的分选实验[J]. [有色矿冶](#), 2021, 37(3):23-26.

FAN A Y. Separation test of X ray separator in a tungsten concentrator[J]. [Nonferrous Mining and Metallurgy](#), 2021, 37(3):23-26.

[18] 骆任. X射线辐射拣选机分选湖南某钨钼矿的半工业实验研究[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.

[19] 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 Metallurgy Engineering](#), 2021, 41(4):64-67.

[20] 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 pre-separation and waste disposal of quartz vein wolframite[J]. [China Tungsten Industry](#), 2022, 37(2):41-46.

[21] 张建强, 赵德志. 云南某钨矿光电预选抛废选矿工业实验研究[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.

[22] 胡岳华, 冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京: 科学出版社, 2006:81-84.

HU Y H, FENG Q M. Mineral resources processing technology and equipment [M]. Beijing: Science Press, 2006:81-84.

[23] 李健行, 马旭山, 周坤, 等. 重介质预选技术在选矿中的研究及应用现状[J]. [有色矿冶](#), 2022, 38(2):21-23.

LI J X, MA X S, ZHOU K, et al. Research and application status of heavy medium preconcentration technology in mineral processing[J]. [Nonferrous Mining and Metallurgy](#), 2022, 38(2):21-23.

[24] 汤优优, 喻连香, 陈雄. 重介质选矿技术在处理有色金属

矿和非金属矿的研究现状及展望[J]. [矿产综合利用](#), 2021, 42(4):118-124.

TANG Y Y, YU L X, CHEN X. Research status and prospects of dense medium beneficiation technology in treating non-ferrous and non-metallic ores[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2021, 42(4):118-124.

[25] 刘福峰, 李翔, 刘烨河. 集成式重介质选矿机组抛尾效果及其应用[J]. [矿业研究与开发](#), 2020, 40(2):114-117.

LIU F F, LI X, LIU Y H. Study on tailings discarding efficiency of integrated-type heavy medium concentrator and its application[J]. [Mining Research and Development](#), 2020, 40(2):114-117.

[26] 张成安, 高国元, 卫伟, 等. 同轴电磁场位置对重介质旋流器分选效果的影响[J]. [矿产综合利用](#), 2018(4):147-151.

ZHANG C A, GAO G Y, WEI W, et al. Influence of coaxial electromagnetic field position on separation effects of dense medium cyclone[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2018(4):147-151.

[27] 张琳, 方建军, 赵敏捷, 等. 无压三产品重介旋流器的应用与研究进展[J]. [矿产综合利用](#), 2016(5):10-13.

ZHANG L, FANG J J, ZHAO M J, et al. The application and state of art three-product heavy dense medium cyclone[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2016(5):10-13.

[28] 广东红岭钨矿. 重介质涡流分选器选别钨矿石生产实践[J]. [有色金属](#), 1973(10):24-28.

Guangdong Hongling Tungsten Mine. Production practice of tungsten ore separation by heavy medium Eddy current separator[J]. [Nonferrous Metals](#), 1973(10):24-28.

[29] 广东洋塘钨矿. 重介旋流器选矿的工业实践[J]. [有色金属](#), 1973(8):25-30.

Guangdong Yangtang Tungsten Mine. Industrial practice of heavy medium cyclone beneficiation[J]. [Nonferrous Metals](#), 1973(8):25-30.

[30] 盘古山钨矿. 重介质涡流分选器半工业实验[J]. [有色金属](#), 1976(10):14-17,51.

Pangushan Tungsten Mine. Semi-industrial test of heavy medium eddy current separator[J]. [Nonferrous Metals](#), 1976(10):14-17,51.

[31] 周锋, 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.

[32] 刘书杰, 王中明, 刘方, 等. 重介质预抛对湖南某高碳酸

钙型低品位白钨矿浮选实验的影响研究[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.

[33] 李振飞, 李平, 沈新春, 等. 一种钨矿的分选方法: 201910655037.0[P]. 2021-05-14.

LI Z F, LI P, SHEN X C, et al. The invention relates to a separation method for tungsten ore: 201910655037.0[P]. 2021-05-14.

[34] 袁代军, 郭江旭, 曾志飞, 等. 湖南某钨矿山中中部采集样

重介质预抛及白钨常温浮选实验研究[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.

[35] R·B·布哈普, 孔令炜, 张覃, 等. 重介质分选评述[J]. 国外金属矿选矿, 2005(5):12-17.

BUHAPU R B, KONG L W, ZHANG Q, et al. Review on separation of heavy media[J]. Metal Ore Dressing Abroad, 2005(5):12-17.

Research Progress on the Application of Preconcentration Tailings Discarding Technology in Tungsten Beneficiation

ZHANG Ting^{1,2}, QIU Tingsheng¹, LI Ping², LI Zhenfei², YAN Huashan¹

(1.Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2.Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: With the further exploitation of tungsten resources, the ore dilution rate increases year by year, the WO_3 grade of raw ore decreases, dissemination size becomes finer, the easy ore becomes increasingly scarce, and the tungsten resources are poor, fine and difficult to handle. Due to the change of ore properties, the waste rock rate of the original hand sorting decreased year by year, resulting in the increase of grinding pressure and mineral processing cost. At the same time, it is difficult to recruit workers and affect production. Ore preconcentration is one of the important means to save energy, reduce emission and improve the "three rate" index in the field of mineral resources. It can be applied to tungsten ore preconcentration to improve the selected WO_3 grade, so as to solve the bottleneck problem of restricting the reduction of workers in mining enterprises, expanding production, reducing cost and increasing efficiency, and to meet the requirements of large-scale industrial mines on mineral processing technology. In this paper, the preseparation methods of ores, such as radiation picking and heavy medium beneficiation, and their application progress in tungsten resources are emphatically introduced. Finally, it is pointed out that the development, processing and utilization efficiency of tungsten resources can be greatly improved only by developing and utilizing efficient and intelligent ore preseparation technology, equipment and process on the basis of scientific and technological progress. It is also pointed out that the combined process of radiation sorting and heavy medium beneficiation is an inevitable trend in the development of ore preseparation, and the combination of the two can realize the full size preseparation of tungsten ore.

Keywords: tungsten ore; preconcentration; radiation picking; heavy medium beneficiation