

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2022.05.022

螺旋选矿设备的应用现状及展望

刘惠中^{1,2}, 吴华冬¹

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西省矿冶机电工程技术研究中心, 江西 赣州 341000)

摘 要:螺旋选矿设备是一种流膜重力选矿设备, 由于具有能耗低、无污染、占地面积小、容易配置等优点, 在金属及非金属矿的重力选矿工业生产中获广泛应用。通过对国内外螺旋选矿设备的发展历史、螺旋选矿技术及设备研究的进展及螺旋选矿设备在金属矿及非金属选矿工业生产中的应用情况进行了阐述, 最后对螺旋选矿技术及设备发展当前存在的问题进行了总结, 对螺旋选矿设备未来的发展方向进行了展望。

关键词:螺旋选矿设备; 流膜选矿; 重力选矿; 螺旋溜槽

中图分类号:TD455+.3

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2022)05-0151-08

Application and Prospect of Spiral Concentrator

LIU Huizhong^{1,2}, WU Huadong¹

(1. Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Jiangxi Province Engineering Research Center for Mechanical and Electrical of Mining and Metallurgy, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Spiral concentrator is a kind of film gravity concentration equipment. Because of its advantages of low energy consumption, no pollution, small footprint, easy configuration, and so on, it is widely used in the metal and non-metallic mineral processing plants. The development history of spiral concentrator, the progress of spiral concentration technology and equipment research and the application of spiral concentrator in the mineral processing plants have been described. Finally, the existing problems in the development of spiral concentration technology and equipment are summarized, and the development direction of spiral concentrator is prospected.

Key words: spiral concentrator; film concentration; gravity concentration; spiral chute

重力选矿(简称重选)是一种利用不同矿物间的密度差异并借助重力等外力将有用矿物分离提取出来的古老的物理选矿方法。我国唐代文学家刘禹锡的《浪淘沙》诗句:“日照澄洲江雾开,淘金女伴满江隈。美人首饰侯王印,尽是沙中海底来。”描写的就是一幅淘金的重力选矿作业场景。在 20 世纪 80 年代以前,重力选矿一直是我国矿物提取最主要的选矿方法之一。近些年来,随着浮选、强磁选等选矿技术的发展和应用的增加,重力选矿的重要性有所下降。但是,重力选矿以其清洁、低耗的优点,仍然是我国矿物分离提取的一种重要选矿方法^[1]。流膜重力选矿是矿物在很薄(数毫米)的矿浆流层内完成分

选的一种重力选矿方法,是细粒级矿物重选的主要方法。螺旋选矿设备(螺旋溜槽、螺旋选矿机、螺旋分选机)是一种应用广泛的流膜重力选矿设备,也是一种斜面流选矿设备,是赤铁矿、钛铁矿、铬铁矿、镜铁矿、钽铌矿、海滨砂矿及煤等选矿的关键设备,在工业中获得大量应用。据粗略估算,目前我国工业生产中应用的大小螺旋选矿设备数量可达十多万台套。

1 螺旋选矿设备的发展历史

螺旋选矿设备(Spiral concentrator)是螺旋选矿机、螺旋溜槽、螺旋分选机的统称。习惯性地将在国外的以椭圆为截面的螺旋选矿设备称为螺旋选矿机,

收稿日期:2021-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52164019);江西省“双千计划”引进高层次人才项目(jxsq2018101046)

作者简介:刘惠中(1969-),男,江西信丰人,博士,教授,博士生导师,主要从事重力选矿技术及装备、选矿过程控制技术的研究及教学工作。

而将我国开发的以立方抛物线为截面的螺旋选矿设备称为螺旋溜槽,在洗煤领域则将螺旋选矿设备称为螺旋分选机。

第一台螺旋选矿机于20世纪40年代初在美国由汉弗莱(Humphrey)研制成功,又称为汉弗莱螺旋选矿机,其结构如图1所示,采用单头配置,螺旋槽直径为609.6 mm,螺距为342.9 mm,每头配置5~7圈,采用铸铁衬橡胶制作而成,结构简单,诞生后在弱磁性铁矿和钛铁矿的选矿中获得了较多应用^[2]。自汉弗莱螺旋选矿机问世以后,国内外陆续对螺旋选矿机展开了大量的研究,并取得了众多研究成果。20世纪50年代,澳大利亚国家矿物公司参考汉弗莱螺旋选矿机研制出了截面为半圆形,直径为609.6 mm,螺距为393.7 mm的螺旋选矿机,螺旋槽采用了玻璃钢材质,所以较汉弗莱螺旋选矿机重量更轻,并采用了双头的配置,在砂矿的分选中应用较多^[3]。20世纪70年代,英国的GEC公司研制出了断面为椭圆形、直径为609.6 mm、螺距为444.5 mm的GEC-Elliott型双头螺旋选矿机,该型号由于增大了螺距,提高了螺旋选矿机的处理能力,用于细粒级铁矿石的分选取得较好效果^[2]。此外,国外还有瑞典萨拉公司开发的双头玻璃钢螺旋选矿机^[2]、芬兰OUTOTEC公司开发的CARPCO CS2000螺旋选矿机(最大直径940 mm)^[4],澳大利亚Roche公司的LD系列螺旋选矿机和南非MULTOTEC公司的SX、SC系列螺旋选矿机^[5]等都获得工业应用。

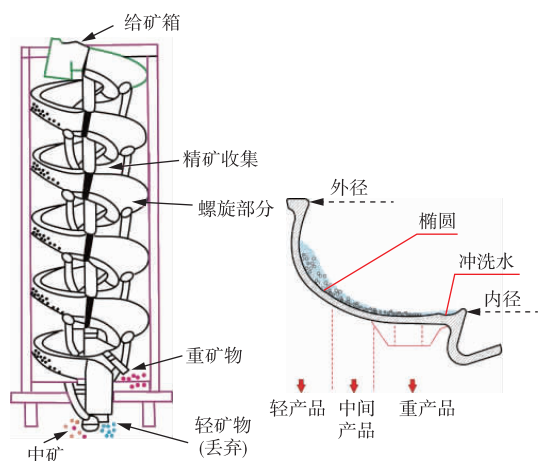


图1 汉弗莱(Humphrey)螺旋选矿机

Fig.1 Humphrey spiral concentrator

我国从1955年开始研究螺旋选矿机,广西冶金局研究所先后研制了水泥、铸铁、陶瓷等螺旋选矿机,并进行了试验研究,取得了一定效果^[6]。北京矿冶研究总院(矿冶科技集团有限公司)是我国螺旋选

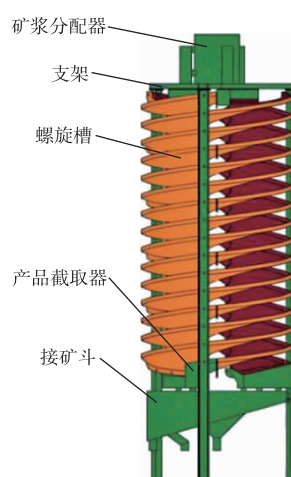


图2 BL1500系列螺旋溜槽

Fig.2 BL1500 spiral concentrator

矿设备研究开发的主体单位,先后开发了LL系列螺旋溜槽(最大直径 $\Phi 1\ 200\text{ mm}$)、DL2000螺旋溜槽(直径 $\Phi 2\ 000\text{ mm}$)、BL1500系列螺旋溜槽(直径 $\Phi 1\ 500\text{ mm}$),并获得工业大规模推广应用。1974年北京矿冶研究总院的范象波等^[7-8]针对鞍钢细粒赤铁矿的重选,研制出了螺旋槽截面形状曲线为立方抛物线的LL1200(直径 $\Phi 1\ 200\text{ mm}$)螺旋选矿机,并取得了满意的效果,为区别于国外椭圆截面的螺旋选矿机,特将此种螺旋选矿机称为螺旋溜槽,自此,螺旋溜槽在我国选矿工业中开始获得推广应用。1989年北矿院的李开公^[9]为提高螺旋溜槽单机处理能力,进行了大型化研究,开发了直径 $\Phi 2\ 000\text{ mm}$ 的DL2000螺旋溜槽(目前世界最大),采用了“椭圆+立方抛物线”的复合截面曲线,在锡矿用于粗颗粒的预选取得了良好的效果。1999年本文作者为提高螺旋溜槽大型化后对细粒级矿物的回收效果,提出了针对性的设计思路,开发了直径 $\Phi 1\ 500\text{ mm}$ 的BL1500系列螺旋溜槽^[10],如图2。由于采用了针对性设计方法,解决了螺旋溜槽大型化后对细粒级矿物的回收问题,并在工业中获得大量推广应用。此外,1982年鞍钢矿山研究所在北矿院LL1200螺旋溜槽的基础上,开发了来复条螺旋溜槽^[11],在鞍钢齐大山选矿厂获得一定的工业应用,并取得一定效果。1986年新疆有色金属研究所开发了旋转螺旋溜槽,在宜春钽铌矿获得应用^[12-13];1992年广州有色金属研究院开发了GL系列螺旋选矿机,在钛铁矿获得工业应用^[14]。1993年北矿院的刘学海等^[15-16]开发了多段螺旋溜槽。除此之外,中国矿业大学开发的ZK-LX1100螺旋分选机^[17]在洗煤厂获得了应用(如图3所示)。

我国对螺旋选矿设备的开发及应用研究开展了

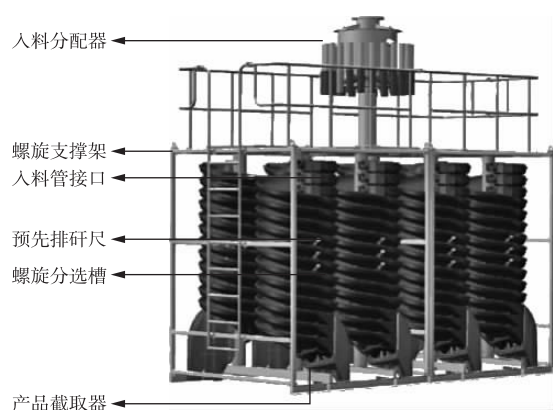


图3 ZK-LX1100 螺旋分选机

Fig. 3 ZK-LX1100 spiral concentrator

大量的工作并取得了丰硕的成果,开发了众多型号及规格的螺旋溜槽,在国内金属矿山生产中应用的螺旋溜槽绝大多数都是我国自主开发并制造的,每年还有大量螺旋溜槽出口到国外,我国的螺旋溜槽开发及应用技术水平目前处于国际前列。

2 国内外螺旋选矿技术及设备研究的进展

近几年来,国内外对螺旋选矿设备的研究主要集中在运行参数的优化、分选流态的数值模拟、矿物颗粒的运动轨迹追踪检测等方面。

DIXIT 等^[18]采用响应曲面设计方法(RSM)建立了螺旋选矿机的分选预测模型,并借此对螺旋选矿机的运行工艺参数进行了优化。RESA 等^[19]、DEHAINE 等^[20]、SADEGHI 等^[21]以及BAZIN 等^[22]通过采用正交试验法,对给矿浓度、给矿粒度、给矿流量、冲洗水流量等运行工艺参数进行了优化。TRIPATHY 等^[23]采用最小二乘法建立了给矿条件与回收率之间的关系模型,借此可以实现对回收率的预测。

MISHRA 等^[24]使用 DEM 离散单元法建立了螺旋选矿机的 CFD 分选模型,并以最大化分选效率为目的,对精矿截取器的位置分布进行了优化。DOHEIM 等^[25]使用欧拉法和湍流模型,分别采用 Standard $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 、Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对分选过程中矿物颗粒的运动速度以及在流层内的分布进行了模拟,并发现 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型用于螺旋选矿机分选过程的模拟更为准确。MATTHEWS 等^[26]、DOHEIM 等^[27]运用了 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型和 VOF 方法建立了螺旋选矿机的分选模型,对螺旋槽流体中矿物颗粒的运动速度及分布状况进行了模拟,借助模拟结果对工艺参数进行了优化。东北大

学袁俊等^[28]采用欧拉法和拉格朗日法建立了螺旋溜槽的分选流场及矿物颗粒运动轨迹的模型,对螺旋溜槽分选流体的流速、流量等工艺参数与分选行为之间的关系进行了模拟,并取得满意研究结果。李华梁^[29]借助 CFD 模拟技术,采用 VOF 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、“欧拉-拉格朗日”方法和 DPM 离散相模型,对 BL600 螺旋溜槽的矿物颗粒运动轨迹进行了模拟,模拟结果如图 4、5 所示。并借助建立的仿真模型对螺旋溜槽的刻槽结构进行了优化。

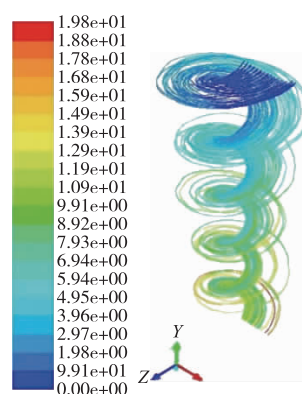


图4 BL600 螺旋溜槽内矿物颗粒群运动轨迹模拟结果

Fig. 4 Simulation of the trajectory of mineral particles in the BL600 spiral separation flow

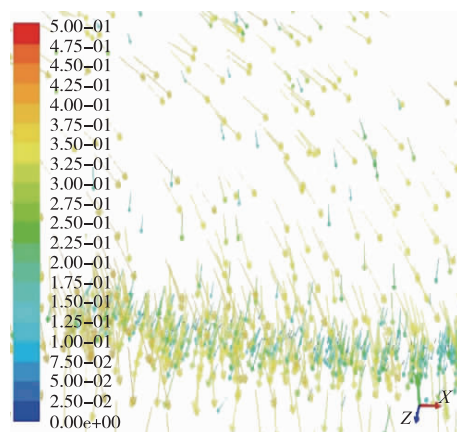


图5 刻槽处矿物颗粒运动速度分布

Fig. 5 Velocity distribution of mineral particles at the notch

BOUCHER 等^[30-31]为了准确获取矿物颗粒在螺旋槽流体中的运动轨迹,采用 PEPT(正电子发射型颗粒追踪)技术,通过往矿样中添加示踪剂,借助安装在螺旋选矿机周围的检测模块装置(图 6),追踪到了螺旋选矿机分选流内粒子的实际轨迹和速度,并证明了二次环流的存在。此外还分别对大(1.44 mm)、小(0.058 mm)颗粒的赤铁矿和石英矿进行了轨迹追踪,探究出了不同矿物颗粒之间的相

互作用关系及在螺旋槽上的位置分布。



图6 PEPT法探测螺旋选矿机矿物颗粒运动轨迹

Fig. 6 PEPT method for detecting the trajectory of mineral particles in spiral concentrator

3 螺旋选矿设备在我国选矿工业中的应用情况

我国对螺旋选矿设备的开发及应用研究起步较早。1974年北矿院针对鞍钢的细粒赤铁矿重选,开发成功了截面为立方抛物线的LL系列螺旋溜槽(最大规格 $\Phi 1\ 200\text{ mm}$)并取得满意效果,并在工业中获得推广应用^[8-9]。随后北矿院又开发成功了直径为 $\Phi 2\ 000\text{ mm}$ 的DL2000螺旋溜槽(世界最大规格)及直径为 $\Phi 1\ 500\text{ mm}$ 的BL1500螺旋溜槽。在钽铌、赤铁、钛铁、铬铁、镜铁、钨、锡、稀土、煤等的选矿中获得了大量应用。

在赤铁矿选矿中,一般将螺旋溜槽配制成一粗、一精的重选流程,通过两段选别,可直接获得部分合格铁精矿。如鞍钢齐大山选矿厂采用了288台BL1500螺旋溜槽选别赤铁矿(图7),可直接获得TFe品位67%以上的赤铁矿精矿^[32]。在司家营铁



图7 BL1500螺旋溜槽应用于鞍钢赤铁矿选矿

Fig. 7 Application of BL1500 spiral in the concentration of hematite in Anshan

矿,采用螺旋溜槽选别赤铁矿,可直接获得精矿TFe品位66.4%、回收率为79.75%的赤铁矿精矿,大大减轻了后续浮选作业的负荷^[33]。

在镜铁矿的选矿中,一般在浮选作业前将螺旋溜槽配置成一粗、一精的重选流程,直接获得一部分合格的镜铁矿精矿,尾矿进入后续再磨再选流程,避免了有用矿的过磨。如在安徽霍邱某大型铁矿使用BL1500螺旋溜槽可以从一段强磁选的粗精矿中获得铁品位65.5%、铁回收率为32.24%的合格铁精矿,有效减少了后续的二段磨矿和分选作业量,避免了有用矿物过磨和金属流失^[34],如图8所示。



图8 BL1500螺旋溜槽在安徽霍邱某镜铁矿选矿的应用

Fig. 8 Application of BL1500 spiral in the concentration of specularite in Huoqiu, Anhui

在钛铁矿的选矿中应用也比较广泛,一般将螺旋溜槽配置成一粗一扫的两段重选流程,以起到预先富集和提前抛尾的作用。如攀西某钒钛磁铁矿采用螺旋溜槽配置成一粗一扫的重选流程处理磁选尾矿,可以获得产率为36.71%、 TiO_2 品位27.48%的钛粗精矿^[35]。

螺旋溜槽在铬铁矿、红土镍矿的选矿工业生产中也获得大量应用,如在津巴布韦,采用BL1500螺旋溜槽分选 Cr_2O_3 品位为15%左右的红土镍矿原矿,可获得 Cr_2O_3 品位为48%以上的铬铁矿精矿, Cr_2O_3 回收率达到85%以上^[36]。

在钽铌矿的选矿中,螺旋溜槽也扮演了重要角色。一般将螺旋溜槽配置成一粗一扫的两段重选富集流程,螺旋溜槽的精矿进入摇床选矿获得最终精矿。如在宜春钽铌矿粗选采用螺旋溜槽,精选采用摇床,最终可以得到 $(\text{TaNb})_2\text{O}_5$ 品位为46%~50%的钽铌精矿, $(\text{TaNb})_2\text{O}_5$ 回收率为46%~48%^[37]。

在锡矿的选矿中,一般将螺旋溜槽用于粗选及预先抛尾,经螺旋溜槽富集后的粗精矿进入摇床精

选,这样可以减少锡矿选矿中摇床的配置数量。如1989年在广西大厂矿务局(现华锡集团)车河选厂采用DL2000螺旋溜槽有效取代了摇床用于锡矿的粗颗粒预选,取得了良好的效果,并一直应用到现在^[10]。

近年来,在钨矿的选矿中也逐渐引入了螺旋溜槽,一般将螺旋溜槽用于钨矿的粗选和扫选,这样可以减少摇床配置数量,节省厂房面积,降低运行和管理成本。如在福建某钨矿,采用螺旋溜槽替代摇床用于钨矿的粗选和扫选,取代了原生产中运行的大部分摇床,简化了设备的配置和厂房的配置,并提升了生产和管理效率。此外,螺旋溜槽也可用于钨细泥的选矿,如在江西某钨矿,采用螺旋溜槽处理原离心选矿机处理的钨细泥,原矿 WO_3 品位为0.44%的钨细泥,经BL1500螺旋溜槽一段选别,可以获得 WO_3 品位为3.36%的粗精矿, WO_3 回收率为67.3%^[38]。在某铜矿采用螺旋溜槽从浮选尾矿中回收白钨,可以得到 WO_3 回收率高于25%的钨精矿^[39]。

在非金属矿的选矿中螺旋溜槽也得到了大量应用。在新疆某红柱石矿,采用BL1500螺旋溜槽分选红柱石,不仅可以预先进行重选富集,而且可以有效脱除大部分矿泥,有效改善了后续红柱石浮选工艺指标^[11]。此外在石榴子石的选矿富集、石英砂除杂除铁等工业生产应用中螺旋溜槽都发挥了重要的作用。

在金属矿尾矿再选中,由于螺旋溜槽具有运行成本低、易于实现规模生产、配置简便的优点,所以是尾矿再选的首选设备。如在吉林吉恩镍业公司,采用BL1500螺旋溜槽对原镍矿选矿尾矿进行再选,可以将选矿厂综合回收率提高1.73个百分点以上^[40]。

在工业固废的综合利用中,螺旋溜槽也发挥了重要作用。湖北某化工厂采用螺旋溜槽对硫酸渣进行重选,可以从含铁56.8%(TF_e)的硫酸渣中获得TF_e品位63.0%以上的铁精矿,产率达55%以上^[41-42]。

螺旋溜槽在铁精矿的再选中也取得了很好的效果,承德某铁矿使用螺旋溜槽分选磁选后的铁精矿,可以将铁精矿品位提高2~3个百分点,回收率达到98%^[43]。

螺旋溜槽用于洗煤厂选别煤泥也获得了大量应用,在煤炭行业螺旋溜槽被习惯性地称为螺旋分选机。如余吾矿选煤厂采用螺旋分选机(螺旋溜槽)用于处理0.10~1.0 mm粒级粗煤泥,入料灰分为16.97%,精煤产品灰分为10.98%,矸石灰分为45.38%^[44]。

4 结论

螺旋选矿设备(螺旋溜槽、螺旋选矿机、螺旋分选机)以其运行成本低、配置容易、操作维护简便、易实现大规模生产、无污染等的优点在工业生产中获得大量应用。虽然随着近年来浮选技术及装备的发展,重选的地位有所下降,但螺旋溜槽以其绿色、节能、环保的优势仍然在选矿生产中扮演着重要的角色。近年来将螺旋选矿设备用于“重一磁一浮”的联合流程以降低生产成本提高回收率是当前的一种应用趋势,如:在磁选、浮选流程前采用螺旋溜槽预先富集获得部分精矿以减少后续选矿作业量、减少有用矿的过磨。

目前我国螺旋溜槽技术的发展和存在的问题及发展趋势如下:

1)我国螺旋选矿设备的开发应用走在世界前列,但后劲不足。我国1989年就开发出了世界最大的DL2000螺旋溜槽,1999年并提出了针对性设计理念以提高大型螺旋溜槽对细粒级的适应性并开发了BL1500系列螺旋溜槽。但近年来没有更新型的大型螺旋溜槽诞生,大型螺旋溜槽的发展出现了技术瓶颈,需要突破传统的开发思路,进一步提升大型螺旋溜槽的分选效率。

2)螺旋溜槽在我国的应用数量庞大,但制造质量参差不齐。目前在我国工业中应用的大部分螺旋溜槽是由北京矿冶研究总院开发的,但在国内生产厂家却有数百家之多,产品质量参差不齐,对螺旋溜槽技术的发展和造成了一定的影响,需要在提升螺旋溜槽的加工技术及质量控制方面进一步努力。

3)借助于CFD等模拟技术及试验技术以探明螺旋溜槽内流体的变化规律和矿物颗粒的运动规律是当前螺旋选矿技术研究的有效方法和趋势。

4)开发复合结构或复合力场的螺旋选矿设备是进一步提高螺旋选矿分选效率的有效方法,是未来螺旋选矿设备技术发展的趋势之一。

5)随着选矿厂生产智能化的急迫要求,螺旋选矿设备的自动化和智能化是未来发展趋势之一。

参考文献

- [1] 刘惠中. 重选设备在我国金属矿选矿中的应用进展及展望[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(增刊1):18-23.
LIU Huizhong. Application progresses and prospects of gravity concentrators in Chinese metal mine processing plants [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(S1):18-23.
- [2] 台恒心, 黄超群. 国外多头螺旋选矿机的新设计[J]. 国

- 外金属矿选矿,1984(4):16-20.
- TAI Hengxin, HUANG Chaoqun. New design of foreign multi-head spiral concentrator[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*,1984(4):16-20.
- [3] NIENABER E C, AURET L. Experimental modelling and plant simulation of spiral concentrators; Comparing response surface methodology and extended Holland-Batt models [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 141: 105833. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105833>.
- [4] ROBBEN C, CONDORI P, PINTO A, et al. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine[J]. *Minerals Engineering*,2020,145:105870.
- [5] 叶贵川,马力强,徐鹏,等.螺旋分选机应用现状研究[J].*煤炭工程*,2017,49(4):132-135.
- YE Guichuan, MA Liqiang, XU Peng, et al. Analysis on application status of spiral separator [J]. *Coal Engineering*,2017,49(4):132-135.
- [6] 音德额.高频振动螺旋选矿机的研究[J].*有色金属(选矿部分)*,1990(6):16,33-34.
- YIN De'e. Study on high frequency vibration spiral concentrator[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*,1990(6):16,33-34.
- [7] 范象波,李正骅.螺旋溜槽:微细级别矿石选别新设备[J].*有色金属(冶炼部分)*,1974(6):4-11.
- FAN Xiangbo, LI Zhenghua. Spiral chute: a new equipment for fine grade ore separation[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*,1974(6):4-11.
- [8] 范象波,王家明.螺旋溜槽在鞍山地区铁矿选矿中的应用[J].*金属矿山*,1988,17(2):50-55.
- FAN Xiangbo, WANG Jiaming. Application of spiral chute to ore dressing in Anshan area[J]. *Metal Mine*, 1988,17(2):50-55.
- [9] 李开公.DL-2000大型螺旋溜槽在大厂矿务局车河选厂中的应用[C]//第三届全国磁选重选设备及工艺学术研讨会论文集.呼和浩特,1992:75-86.
- LI Kaigong. Application of DL-2000 large spiral chute in Chehe Dressing Plant of Dachang Mining Bureau [C]//*Proceedings of the 3rd National Symposium on Magnetic Separation and Gravity Equipment and Technology*. Hohhot,1992:75-86.
- [10] 刘惠中.BL1500螺旋溜槽的研制及应用[J].*有色金属(选矿部分)*,2000(3):29-32.
- LIU Huizhong. Development and application of BL1500 spiral chute[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*,2000(3):29-32.
- [11] 王家明,赫荣安.来复条螺旋溜槽的研制及分选机理的探讨[J].*金属矿山*,1989,18(3):44-49,64.
- WANG Jiaming, HE Rongan. Development of spiral chute with multiple strips and discussion of separation mechanism[J]. *Metal Mine*,1989(3):44-49,64.
- [12] 侯桂山,邝代岗.旋转螺旋溜槽在宜春钽铌矿的应用[J].*有色金属(选矿部分)*,1993(2):29-32.
- HOU Guishan, KUANG Daigang. Application of rotary spiral chute in Yichun tantalum-niobium mine [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 1993(2):29-32.
- [13] 刘仁梁.应用旋转螺旋溜槽改造宜春钽铌矿泥矿车间工艺流程的生产实践[J].*新疆有色金属*,1998(3):17-22.
- LIU Renliang. Production practice of using rotating spiral chute to transform the process flow of Yichun tantalum and niobium sludge workshop [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*,1998(3):17-22.
- [14] 赵廉奇,靳玉荣,王国生. GL—2型螺旋选矿机研制与应用[J].*钛工业进展*,1994(2):21-22.
- ZHAO Lianqi, JIN Yurong, WANG Guosheng. Development and application of GL-2 spiral concentrator[J]. *Titanium Industry Progress*,1994(2):21-22.
- [15] 刘学海,李斌.多段螺旋溜槽的研究[J].*矿冶*,1995,4(1):31-36.
- LIU Xuehai, LI Bin. Study on multi-stage spiral chute[J]. *Mining and Metallurgy*,1995,4(1):31-36.
- [16] 李斌,刘学海.多段螺旋溜槽在选别硫酸厂烧渣中的应用[J].*化工矿山技术*,1994(5):26-27,50.
- LI Bin, LIU Xuehai. Application of multi-stage spiral chute in cinder of separation sulphuric acid plant[J]. *Industrial Minerals & Processing*,1994(5):26-27,50.
- [17] 沈丽娟,陈建中,祝学斌,等. ZK-LX1100螺旋分选机精选粗煤泥的研究[J].*选煤技术*,2009(6):16-20,6.
- SHEN Lijuan, CHEN Jianzhong, ZHU Xuebin, et al. Research on ZK-LX1100 spiral separator separating coarse coal slime [J]. *Coal Preparation Technology*, 2009(6):16-20,6.
- [18] DIXIT P, TIWARI R, MUKHERJEE A K, et al. Application of response surface methodology for modeling and optimization of spiral separator for processing of iron ore slime[J]. *Powder Technology*, 2015,275:105-112.
- [19] RESA A K, HASSAN S, SHEIDA A, et al. Preconcentration of rare earth elements from Iranian monazite ore by spiral separator using multi-response optimization method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*,2014,24(1):117-121.
- [20] DEHAINE Q, FILIPPOV L O. Modelling heavy and gangue mineral size recovery curves using the spiral concentration of heavy minerals from kaolin residues[J].

- Powder Technology, 2016, 292: 331-341.
- [21] SADEGHI M, BAZIN C, RENAUD M. Effect of wash water on the mineral size recovery curves in a spiral concentrator used for iron ore processing [J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 129: 22-26.
- [22] BAZIN C, SADEGHI M, RENAUD M. An operational model for a spiral classifier[J]. Minerals Engineering, 2015, 91: 74-85.
- [23] TRIPATHY S K, MURTHY Y R. Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite[J]. Powder Technology, 2012, 221: 387-394.
- [24] MISHRA B K, TRIPATHY A. A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 94: 192-195.
- [25] DOHEIM M A, GAWAD A F A, MAHRAN G M A, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators; Part I. low solids concentration (0.3% & 3% solids)[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(1/2): 198-215.
- [26] MATTHEWS B W, FLETCHER C A J, PARTRIDGE A C, et al. Computations of curved free surface water flow on spiral concentrators[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125: 1126-1139.
- [27] DOHEIM M A, GAWAD A F A, MAHRAN G M A, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37: 198-215.
- [28] 袁俊, 高淑玲, 孟令国, 等. 螺旋溜槽内二次环流分布特性及其分选作用研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 29-35.
- YUAN Jun, GAO Shuling, MENG Lingguo, et al. Research progress on secondary circulation distribution and separation in spiral chute[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(2): 29-35.
- [29] 李华梁. CFD 技术应用于螺旋选矿机结构优化的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- LI Hualiang. The application study of cfd technology on spiral concentrator structure optimization [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [30] BOUCHER D, DENG Z, LEADBEATER T W, et al. Speed analysis of quartz and hematite particles in a spiral concentrator by PEPT[J]. Minerals Engineering, 2016, 91: 86-91.
- [31] BOUCHER D, DENG Z T, LEADBEATER T, et al. Observation of iron ore beneficiation within a spiral concentrator by positron emission particle tracking of large($\Phi=1\ 440\ \mu\text{m}$) and small($\Phi=58\ \mu\text{m}$) hematite and quartz tracers[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 140: 217-232.
- [32] 《现代铁矿石选矿》编委会. 现代铁矿石选矿[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 2009.
- Editorial Board of Mineral Processing of Modern Iron Ore. Mineral processing of modern iron ore[M]. Hefei University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [33] 白晓鸣. 司家营贫赤铁矿选矿试验研究[J]. 矿业工程, 2004(6): 25-28.
- BAI Xiaoming. Dressing test of low grade hematite from Sijiaoying Iron Ore Mine [J]. Mining Engineering, 2004(6): 25-28.
- [34] 罗光明. 安徽某镜铁矿选厂用螺旋溜槽优化选矿工艺[J]. 现代矿业, 2020, 36(8): 157-159.
- LUO Guangming. Optimizing beneficiation process of specularite in Anhui province with spiral chute [J]. Modern Mining, 2020, 36(8): 157-159.
- [35] 王洪彬, 李金, 张国华. 攀西钒钛磁铁矿中钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 23-29.
- WANG Hongbin, LI Jin, ZHANG Guohua. Efficient recovery of ilmenite from vanadium bearing titanomagnetite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23-29.
- [36] 刘惠中. 采用重选法从红土镍矿中提取铬铁矿的研究及工业应用[J]. 矿冶, 2020, 29(增刊 2): 132-136.
- LIU Huizhong. Study on extraction of chromite from laterite nickel ore by gravity separation and its industrial application[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(S2): 132-136.
- [37] 姜文杰, 童雄, 谢贤, 等. 钽铌矿的选矿技术综述[J]. 金属矿山, 2019, 48(11): 120-124.
- JIANG Wenjie, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Summary on beneficiation technology of tantalum-niobium ores[J]. Metal Mine, 2019, 48(11): 120-124.
- [38] 谢信滨. 螺旋溜槽用于钨矿尾矿再选的试验研究[C]//第四届全国选矿设备学术会议. 昆明, 2001.
- XIE Xinbin. Experimental study on using spiral chute for tungsten tailings re-beneficiation [C]//The 4th National Mineral Processing Equipment Academic Conference. Kunming, 2001.
- [39] 李崇德. 从某铜矿尾矿中重选回收白钨矿的试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(2): 44-48.
- LI Chongde. Experimental study on recovery of scheelite from tailings of a copper mine by gravity concentration [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(2): 44-48.

- [40] 刘惠中. 镍矿尾矿的重选法再选[J]. 有色金属(选矿部分), 2005(1):11-13, 20.
LIU Huizhong. The recycling from nickel tail by gravity concentration means [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2005(1):11-13, 20.
- [41] 刘惠中, 郑荣田. BL1500 螺旋溜槽选别硫酸渣的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2006(1):26-28.
LIU Huizhong, ZHENG Rongtian. The research of sulfate residue processing by BL1500 spiral chute[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2006(1):26-28.
- [42] 陈铁军, 张一敏. 全硫酸渣生产氧化球团试验研究及工业应用[J]. 钢铁研究, 2005(1):1-4.
CHEN Tiejun, ZHANG Yimin. Experiments of acid pellet using treated pyrite slag and its commercial application[J]. Research on Iron and Steel, 2005(1):1-4.
- [43] 刘惠中, 李华梁, 格海超. BL1500 螺旋溜槽在承德某铁矿铁精矿再选中的应用[J]. 有色金属工程, 2016, 6(1):45-48.
LIU Huizhong, LI Hualiang, GE Haichao. Application of BL1500 spiral concentrator to iron ore concentrate recleaning in an iron mine of Chengde[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(1):45-48.
- [44] 张嘉云, 杜军, 王亚健, 等. LXA1000 螺旋分选机在山西潞安余吾矿选煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2018(6):70-74.
ZHANG Jiayun, DU Jun, WANG Yajian, et al. Application of the LXA1000 spiral separator at Yuwu Coal Preparation Plant of Lu'an Group, Shanxi province[J]. Coal Preparation Technology, 2018(6):70-74.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 143 页)

- [11] BOUCHER D, DENG Z, LEADBEATER T W, et al. Speed analysis of quartz and hematite particles in a spiral concentrator by PEPT[J]. Minerals Engineering, 2016, 91:86-91.
- [12] 伍喜庆, 黄志华. 磁力螺旋溜槽及其对细粒磁性物料的回收[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(6):1083-1087.
WU Xiqing, HUANG Zhihua. Magnetic spiral chute and its application in recovery of fine magnetic materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38(6):1083-1087.
- [13] 杨才顺. 试论旋转螺旋溜槽的选别机理[J]. 有色矿山, 1990(2):37-39, 30.
YANG Caishun. Demonstration of the separation mechanism the rotate spirals [J]. Nonferrous Mine, 1990(2):37-39, 30.
- [14] DOHEIM M A, ABDEL GAWAD A F, MAHRAN G M A, et al. Numerical simulation of particulate-flow in spiral separators Part I: low solids concentration (0.3% & 3% solids) [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(1/2):198-215.
- [15] 黄秀挺. 螺旋溜槽流场特征及其颗粒的分选行为研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
HUANG Xiuting. Study on flow characteristics and particles separation behavior in spiral [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [16] TRIPATHY S K, MURTHY Y R. Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite [J]. Powder Technology, 2012, 221:387-394.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 150 页)

- HAN Wei. Numerical study on multiphase flow characteristics and flotation dynamic performance in flotation machine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [7] 王文. 确定摇床床条高度的理论分析[J]. 江西冶金, 1981, 1(2):29-32.
WANG Wen. Theoretical analysis of determining the height of shaker bar [J]. Jiangxi Metallurgical, 1981, 1(2):29-32.
- [8] 张锴, STEFANO B. 流化床内颗粒流体两相流的 CFD 模拟[J]. 化工学报, 2010, 61(9):2192-2207.
- ZHANG Kai, STEFANO B. CFD simulation of particle fluid two-phase flow in fluidized bed [J]. Journal of Chemical Industry, 2010, 61(9):2192-2207.
- [9] MENTER R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1598-1605.
- [10] LAUNDER E, SPALDING B. Lectures in mathematical models of turbulence [J]. Academic Press, 1972, 52(2):364-380.

(本文编辑 刘水红)