

螺旋溜槽分选技术发展现状和展望

曹孟兵, 曾剑武, 吁伟俊, 陈禄政

昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD922 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)03-0127-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.03.014

摘要 螺旋溜槽分选是利用流膜重力和斜面流分选的重选方法, 具有处理量大、能耗低、无污染、分选效率高、分选范围广等优点, 在矿物加工领域应用广泛。本文深入阐述了螺旋溜槽在其发展历程中所解决的关键技术问题、不同型号螺旋溜槽的特点及其存在的主要问题。同时, 还系统梳理了关于螺旋溜槽流膜运动状态、颗粒运动轨迹及槽面优化设计的最新研究动态。最后, 对当前螺旋溜槽分选技术的应用状况进行了全面总结, 并对该技术的发展趋势进行了展望。本文内容可为螺旋溜槽分选技术的发展提供参考。

关键词 重选设备; 螺旋溜槽; 分选原理; 流膜选矿

引言

重力选矿是利用不同矿物密度差异来进行分选的一种技术, 具有绿色环保、低成本的优点^[1-2]。螺旋溜槽分选是一种利用流膜重力和斜面流原理分选的重选方法, 它可以实现在很薄的矿浆流层内完成分选, 对粗粒和细粒重矿物的分选精度较高^[3]。与其他重力分选技术相比, 螺旋溜槽分选具有处理量大、能耗低、无污染、分选效率高、分选范围广等优点, 在重矿物预选抛尾和精选领域应用广泛。由于螺旋溜槽在分选粗粒和细粒重矿物领域的技术优势, 相关理论与设备开发一直是国内外选矿科技工作者的一个重要研究和技术攻关方向, 并相继研发了多种螺旋溜槽。

螺旋溜槽的雏形最早出现在 19 世纪中叶, 早期包括圆形机械传动和带式机械传动两种模式, 主要用于分选细粒有色金属矿物。但是, 由于机械振动的原因, 该设备容易出现裂缝、发生疲劳破坏和设备损坏失灵等问题, 因此在实际应用过程中极不稳定^[3]。上世纪中叶, 为了提高这类设备在实际生产中的稳定性, 美国汉弗莱使用铸铁和玻璃纤维制造了世界上第一台螺旋溜槽(汉弗莱螺旋选矿机), 用于分选煤炭和海滨砂矿^[4]。分选过程中, 重矿物向螺旋溜槽内缘流动, 轻矿物则向螺旋溜槽外缘流动, 从而实现重矿物和轻矿物的分离; 与此同时, 重矿物表面附着的轻矿物则

需采用大量洗涤水冲洗, 并使其从溜槽尾部的分割器上排出。但是, 汉弗莱螺旋溜槽的内缘容易沉积矿砂, 在无大量洗涤水冲洗的情况下很容易恶化分选指标, 并且对细粒和微细粒矿物的分选效果较差^[5-6]。为了分选 0.03~0.3 mm 的细粒和微细粒矿物, 澳大利亚在上世纪 50 年代研制了一种尖缩螺旋溜槽, 并得到了广泛应用^[7]; 与汉弗莱螺旋溜槽相比较, 尖缩溜槽具有结构简单、无运动部件、选矿用水少、处理能力大等优点^[8]。

国内为了提升鞍钢细粒赤铁矿的重选指标, 1974 年北京矿冶研究总院研制了抛物线型槽截面、螺旋槽外径为 1 200 mm 的螺旋溜槽, 开启了螺旋溜槽现代化发展的道路^[9-10]。该设备是国内最典型的螺旋溜槽, 在国内金属矿山行业应用广泛; 目前, 国内应用的大多数螺旋溜槽都是在该设备的基础上优化改造而成。例如, 为了提高铁回收率, 鞍钢矿山研究所在上述 $\Phi 1\ 200\ \text{mm}$ 螺旋溜槽的基础上, 开发了来复条螺旋溜槽^[11], 并在齐大山选矿厂的工业应用中取得了优异分选指标。为了提高螺旋溜槽的单机处理能力, 北京矿冶研究总院对螺旋溜槽进行了大型化研究, 研制了世界上最大的 $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$ 螺旋溜槽; 该螺旋溜槽采用“椭圆+立方抛物线”的复合截面曲线, 单机处理能力为 15~40 t/h, 在锡矿预选抛尾领域取得了优异的分选效果。此外, 为了提高螺旋溜槽对细粒重矿物的回

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(52104255); 云南省基础研究计划项目(202201AU070139); 云南省高层次人才引进计划项目(CCC2132005A)

作者简介: 曹孟兵(2000—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为磁性螺旋溜槽分选与工艺研究, E-mail: 18130581082@163.com。

通信作者: 曾剑武(1990—), 男, 江西赣州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高梯度磁选理论与技术研究, E-mail: jianwuzeng@163.com。

收效果,北京矿冶研究总院的刘学海等开发了多段螺旋溜槽^[12-14]。

但是,传统的螺旋溜槽普遍存在精矿产率低、细粒重矿物损失大和分选精度低等问题,这极大限制了其大规模应用^[15-17]。目前,为了提高螺旋溜槽的分选效果,应用复合力场分选模式,或者根据物料性质而在溜槽表面进行精细化刻槽,已经成为改进螺旋的重要研究方向^[18-19]。此外,采用模拟仿真的方法来指导螺旋溜槽的研发也获得众多研究人员的关注^[20-21]。

1 螺旋溜槽的发展现状

早期,国内应用较多的螺旋溜槽主要有尖缩溜槽、多头螺旋溜槽、玻璃钢螺旋溜槽、LL 系列螺旋溜槽等^[22]。其中,尖缩溜槽和多头螺旋溜槽具有制造成本低、无污染、操作简单等优点,但存在槽面易磨损、分选精度不高和处理能力低等缺点,实际应用效果差。而玻璃钢螺旋溜槽与 LL 系列螺旋溜槽则具有耐腐蚀、重量轻、处理量大等优点,因此应用较广泛。但是,上述传统螺旋溜槽均存在细粒矿物回收差、分选精度和回收率低等问题。

为了提高螺旋溜槽的分选效果,国内外科技工作者通过设备结构优化和增加分选力场等方式,研发了多种新型螺旋溜槽,包括 BL 系列螺旋溜槽、超极限 h/D 螺旋溜槽及复合力场溜槽等^[23]。

1.1 BL 螺旋溜槽

1989 年,北京矿冶研究院采用玻璃钢研制出了槽面为抛物线型的玻璃钢螺旋溜槽^[24]。1999 年,刘惠中等^[10]在该螺旋溜槽的基础上进行溜槽截面优化改造,并研制出直线型、双曲型、椭圆型、抛物线型以及复合曲线型等槽面的 BL 系列螺旋溜槽。其中复合曲线型槽面的 BL1500 螺旋溜槽应用广泛,这一产品在分选过程中取得了良好的效果,显著提升了单机处理能力。BL1500 螺旋溜槽的槽面采用复合曲线型,使其在分选过程中会产生多变液流,进而显著提升其对细粒重矿物的回收效果^[9-10,25]。目前,BL 螺旋溜槽被广泛应用于锡矿、钨矿和铁矿等的分选。例如,云南昌宁锡矿选矿厂利用 BL1500 螺旋溜槽回收锡尾矿,并在“一粗一扫一精”的分选流程下,可获得 Sn 品位为 41.32%、Sn 回收率为 52.27% 的合格锡精矿^[26]。

但是,BL 系列螺旋溜槽的单机处理能力仍然较小,需要多个并联使用才能满足生产需求,这极大增加了生产和维护成本。此外,该螺旋溜槽对微细粒矿物的回收能力较差。

1.2 超极限 h/D 螺旋溜槽

普通螺旋溜槽在分选细粒且含泥量大的矿物时,存在选别富集比小和脱泥困难等问题。为了提升螺

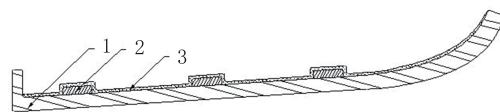
旋溜槽对这类矿物的分选效果,刘惠中等^[27]在普通溜槽的基础上研制出超极限 h/D 螺旋溜槽,显著提高了螺旋溜槽对细粒级矿物的回收率及脱泥效率。超极限 h/D 螺旋溜槽是通过优化螺旋溜槽路径比 h/D ,来提高其对细粒矿物的回收效果。这是因为在螺旋溜槽分选中,矿物的分选效果受 h/D 的影响,即 h/D 小的螺旋溜槽对细粒矿物的分选效果较好,而 h/D 大的螺旋溜槽对粗粒矿物的分选效果较好。普通螺旋溜槽的 h/D 仅为 0.45~0.7,而超极限 h/D 螺旋溜槽的 h/D 值可减小至 0.30;因此,超极限 h/D 螺旋溜槽对细粒矿物的回收或脱泥效果明显高于普通螺旋溜槽。例如:在某硫酸渣的选铁应用中,采用超极限 h/D 螺旋溜槽的“一粗二精一扫”分选流程,可获得精矿产率 59.63%、Fe 品位 61.50% 的分选指标,明显高于普通螺旋溜槽的分选指标。

但是,在超极限 h/D 螺旋溜槽的长时间分选中,细粒矿物容易在螺旋溜槽内侧积聚,影响分选效果;因此,在该设备的长期运行中,需要定期进行清洗维护。另一方面,超极限 h/D 螺旋溜槽对物料性质的变化较敏感,当给料粒度等发生变化时,需要及时调节 h/D 路径比值,生产管理成本较高。

1.3 复合力场螺旋溜槽

复合力场螺旋溜槽通过在普通溜槽的基础上添加力场,以达到复合力场分选效果,显著提高螺旋溜槽对矿物的回收率和富集比^[28]。目前,常用的复合力场螺旋溜槽主要有磁性螺旋溜槽和离心螺旋溜槽。

针对钛铁矿和褐铁矿等磁性矿物,通常会采用“螺—磁”联合工艺,即首先采用螺旋溜槽进行预先富集抛尾,然后再采用磁选作业进行分选。但采用普通螺旋溜槽预选富集磁性矿物时,普遍存在细粒磁性矿物容易流失的问题。为了提高细粒磁性矿物的回收率,研究人员开发了适用于磁性矿物分选的磁性螺旋溜槽^[29-31]。例如,美国的马丁通过在普通螺旋溜槽的槽内表面刷上磁性涂料,开发了高效分选磁性矿物的磁性螺旋溜槽(如图 1)^[32]。通过对比该磁性螺旋溜槽和普通螺旋溜槽分选磁性矿物的指标发现,该磁性螺旋溜槽能显著提高磁性矿物的回收率。国内的陈晓鸣等^[33]通过对比磁性螺旋溜槽和普通螺旋溜槽分选-0.045 mm 粒级钛铁矿的试验,也发现磁性螺旋溜槽能提高钛铁矿回收率,降低尾矿中钛铁矿的损失。



1—螺旋槽; 2—磁性涂料; 3—聚氨酯

图 1 磁性螺旋溜槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic spiral concebrator

但是,在长时间使用中,磁性螺旋溜槽表层涂料的磁性极容易下降,这会恶化分选效果。另一方面,磁性螺旋溜槽仅对目的矿物和脉石矿物存在明显磁性差异的物料,才能表现出良好的分选效果。

陈庭中等^[34]根据螺旋溜槽的流膜运动理论,研制出了离心螺旋溜槽。该螺旋溜槽可根据不同矿物性质,调控旋转流场的强弱,使矿物颗粒所受的离心力发生改变,从而提升分选效果和处理能力。例如,李彩等^[35]为了处理云南昆钢大红山矿山的难选、细粒赤铁矿,采用离心螺旋溜槽与磁选联合的分选工艺,最终获得Fe品位为58.71%的合格铁精矿。

但是,目前已有的离心螺旋溜槽,在分离粒度接近和比重相近的矿物时,效果较差。另一方面,离心螺旋溜槽需要通过机械传动装置来调控离心力的强弱,普遍存在能耗高、噪音大、维修成本高等缺点。

2 研究进展

除了上述新型螺旋溜槽的开发外,当前螺旋溜槽分选技术的研究主要集中在螺旋溜槽表面流膜运动特征、矿物颗粒运动动力学和溜槽结构参数优化设计方面^[36]。并且,随着计算机技术发展,当前针对螺旋溜槽分选技术的研究大多都借助CFD等模拟仿真软件。

2.1 螺旋溜槽表面流膜运动特征

流膜选矿理论最早由国外学者Gaudin提出,他认为矿粒在流膜中主要受到重力、摩擦力、流体力的作用^[37]。螺旋溜槽分选是一种利用流膜重力和斜面流原理分选的技术,因此探究槽体表面流体的流膜运动特征是开发螺旋溜槽新技术的基础。目前,国内外相关专家学者通过CFD模拟仿真等手段,对螺旋溜槽分选中流膜厚度、流场分布特性以及流膜运动规律和分离效率的关系等开展了较系统的研究。

例如,BOISVER等^[38]建立螺旋溜槽分选模型,研究给矿速度与流膜运动的关系;研究表明,溜槽的给矿速度越大,流膜外圈流速越快而内圈流速变化不明显,并基于此对螺旋溜槽的给矿参数进行了优化。Dixit^[39]建立了螺旋溜槽流膜运动预测模型,并据此模型研究了流膜厚度与螺旋溜槽的分选效率的关系;研究表明,流膜厚度越大,流膜的运动状态越不稳定,从而降低螺旋溜槽的分选效率。最后,基于该研究成果优化了螺旋溜槽的操作工艺参数,显著提高分选效率。ANKIREDDY等^[40]对不同重力场下螺旋溜槽的流膜运动状态展开研究,研究表明高重力场的流膜运动更加稳定,而且能更好地分离矿物与脉石。高淑玲等人^[41-43]借助CFD模拟技术,研究了螺旋溜槽的工作参数、断面曲线函数及入口流量对流场特性的影响,并取得满意的研究成果。其结果表明,螺旋溜槽的倾角是影响螺旋溜槽的二次环流强度的关键因素,即二次

环流的作用强度随着横向倾角的增大而增强。此外,矿浆在螺旋溜槽槽面的流场铺展状态与螺旋溜槽的断面曲线函数紧密相关,即螺旋溜槽外缘的液膜厚度随着断面指数的减小而降低;尤其是,当断面指数减小至2时,流场中部会出现凸起,严重恶化流场分布的流动性和稳定性。该研究还表明,矿浆流膜运动状态的异常波动情况,随着入口流量的增大而变得愈发明显。

然而,目前螺旋溜槽的流膜运动状态对矿物分选的影响还处于模拟仿真阶段,缺乏可靠的检测和观察手段对实际流膜运动状态进行研究。另一方面,关于螺旋溜槽槽面形状与流膜运动状态的关联性及其相互影响机制还不清楚。

2.2 螺旋溜槽矿粒运动

在螺旋溜槽分选过程中,矿粒的运动状态和二次环流现象难以用实验手段进行观察。而采用模拟仿真手段可以较好地分析矿粒在螺旋溜槽中的运动状态,以及矿粒的二次环流现象,这对优化螺旋溜槽的结构参数有积极意义^[44]。图2为颗粒运动轨迹的模拟结果,结果表明当颗粒运动到第溜槽的第三圈后,螺旋槽的内圈和外圈出现了明显的空白区,矿物颗粒有朝中间聚集的趋势,出现明显的分层现象^[45]。

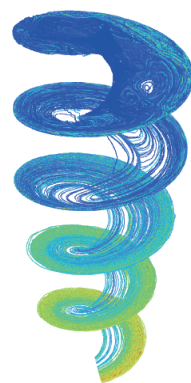


图2 螺旋溜槽仿真模拟结果

Fig. 2 Simulation results of the spiral concentrator simulation

例如,刘祚时等^[46]以BL600螺旋溜槽为模型,应用Flunet软件模拟研究了螺旋溜槽分选效果与矿物粒度的关系,以及矿物颗粒运动规律。该研究表明,螺旋溜槽具有亲粗疏细的特性,即粒度越大的矿粒越容易流向螺旋溜槽内圈,这为螺旋溜槽结构的改进提供了参考。高淑玲等^[47]针对螺旋溜槽流场中颗粒运动状态进行离散相模拟仿真研究,并运用多相流模型与k-ε湍流模型分析气液两相交换过程。基于该研究获得的矿粒运动轨迹,可用于指导螺旋溜槽实际分选过程中的调控以及新设备开发。

但目前有关螺旋溜槽中颗粒运动的模拟仿真研究,都是采用有限元模拟分析方法,通过以VOF多相流模型及DPM离散相模型来研究单矿物、球形矿粒、粒径相同下的矿粒运动轨迹,这与实际过程相差较大^[48]。

2.3 螺旋溜槽面结构优化

螺旋溜槽面是影响螺旋溜槽选别能力的重要因素之一。为了提高螺旋溜槽的分选效率,国内外学者通过研究螺旋溜槽的断面曲线形状、曲线刻槽、凸起条、横向倾角、下斜角等槽面结构参数来优化螺旋溜槽分选。

例如,杨钟秀^[49]采用正交试验法,研究给矿粒度与溜槽槽面之间的关系,并根据试验结果优化了螺旋溜槽分选工艺;结果表明,分选粗粒矿物,应采用较大横向倾角的槽面,而分选细粒矿物和矿泥,则应采用较小横向倾角的槽面。MISHRA等^[6]利用CFD建立螺旋溜槽模型,并根据仿真结果对螺旋溜槽槽面的截矿器进行优化,以此来提高分选效率。韩彬等^[50]为了选别微细粒锡矿,将刻槽、紊流挡条等结构引入螺旋溜槽的槽面。改造后的螺旋溜槽容易在凹槽处形成紊流,从而强化二次环流,因此对微细粒锡矿的分选效果较好。王光庆等^[51]采用模拟仿真的方法,研究了槽面格条对矿浆流场分布的影响;研究结果表明,格条的铺设能促使矿浆流体由外缘向内缘铺展,并显著

降低矿浆流膜厚度,进而提升矿粒的分层和分离效果。高淑玲等^[52-53]结合CFD模拟仿真和试验论证的方法,研究了壁面粗糙度对矿浆流动及颗粒分离行为的影响。其模拟研究结果表明,随着粗糙度增大,螺旋溜槽内缘及中部的流场深度降低,层流分布范围扩大,但分选流场空间逐渐减小;而试验论证结果则表明,随着粗糙度的增加,粗粒赤铁矿和粗粒石英矿的分离效果无明显变化,而细粒赤铁矿和细粒石英矿的分离效果则降低。高淑玲等^[54]还研究了槽面下斜角对螺旋溜槽流场运动的影响,发现下斜角的增大会使得螺旋溜槽截面倾斜度增加,同时增大二次环流的铺展范围,进而降低二次环流强度。

目前,关于螺旋槽面结构对矿浆流膜运动,以及对矿粒分选行为的影响机制还不清楚。另一方面,关于螺旋溜槽槽面结构与矿粒二次环流状态的关联性的研究还几乎没有。

3 螺旋溜槽的应用

螺旋溜槽主要应用于粗、细重矿物的预先富集及提前抛尾,以达到提前获得精矿产品、减轻后续生产流程的压力、降低选矿厂生产成本的目的^[55]。当前,螺旋溜槽在赤铁矿、镜铁矿、磁铁矿、钛铁矿、黑钨矿、磷矿和煤矿等分选领域应用广泛^[56],并取得了优良的分选效果,具体情况见表1。

表 1 选厂螺旋溜槽工艺应用
Table 1 Application of spiral concentrator process

种类	主要分选工艺	选厂应用
赤铁矿	磁—螺工艺	鞍钢赤铁矿选厂、司家营铁矿厂
镜铁矿	螺—浮工艺	霍邱镜铁矿选矿厂
钛铁矿磁铁矿	螺—浮、磁—螺—磁工艺	新疆哈密大马庄钛铁矿选厂、攀枝花铁钛矿密地选矿厂弓长岭选矿厂、研山选矿厂
黑钨矿	螺—磁—浮工艺	西华山钨矿选矿厂、大吉山钨矿选矿厂
磷矿	浮—螺工艺	锦屏磷矿选矿厂、海口磷业浮选厂
煤矿	浮—螺工艺	刘河选煤厂、余吾矿选煤厂

针对赤铁矿的回收,司家营选矿厂采用螺旋溜槽“一粗一精”分选流程,最终可得Fe品位66.4%、回收率为77.9%的重选产品^[57]。为了提高镜铁矿的品位,霍邱选矿厂采用BL螺旋溜槽对磁性粗精矿进行精选,获得Fe品位65.5%、回收率为32.24%的合格产品^[58]。针对钛铁矿的回收,张汉平等^[59]采用“磁—螺”联合工艺矿,最终得到产率为15.56%、TiO₂品位为43.23%的钛精矿。梁焘茂等^[60]采用“磁—螺”联合工艺回收攀西某选矿厂尾矿中的钛铁矿,获得产率为36.71%、TiO₂品位为27.87%的钛精矿。为了优化研山磁铁矿的分选工艺,李月旺等^[61]对选厂工艺流程进行改造,并采用“螺—磁”联合的工艺分选尾矿,最终得到Fe品位为64%的精矿产品。为了提高钨精矿品位与

回收率,田树国等^[62]在选矿厂原工艺的基础上前添加螺旋溜槽粗精选流程,将原工艺改造成“螺—磁—浮”联合工艺,最终得到WO₃品位为63.66%、回收率为84.08%的钨精矿。针对低品位磷矿中的有用矿物的回收,黄俊玮等^[63]采用“浮—螺”联合工艺,对浮选精矿采用“一粗二精”的螺旋溜槽分选工艺,最终得到产率为14.60%、P₂O₅含量为31.87%的磷精矿。螺旋溜槽在非金属矿的选矿生产中也应用广泛,刘鑫等^[64]使用超极限h/D螺旋溜槽,在红柱石分选与脱泥中取得优异的指标;孙小乐等^[65]使用“螺—浮”联合的工艺,分离气化渣中的未燃炭与硅酸盐,最终得到固定炭含量为67.5%的精矿。

4 螺旋溜槽分选技术展望

螺旋溜槽分选在粗、细重矿物的回收领域应用广泛。但是,传统螺旋溜槽普遍存在细粒矿物回收效果差、分选精度低等问题。近年来,国内外专家学者通过采用模拟仿真等手段,对螺旋溜槽进行了一系列技术创新和设备改造,显著提升了螺旋溜槽分选效能。

结合当前螺旋溜槽分选技术存在的问题、研究动态以及矿山企业实际应用情况,螺旋溜槽分选技术呈现以下四个发展趋势:

(1)以节能、环保、高效、低耗作为前提,开发大型化、大处理量、结构简单、分选稳定、维护方便的螺旋溜槽设备。

(2)基于螺旋溜槽分选技术的短流程工艺开发。基于高效分选的螺旋溜槽分选新技术,开发“螺—磁—浮”的联合短流程,对减少分选成本,提高经济效益有重要意义。

(3)流膜运动和矿粒运动特征的模拟仿真。利用CFD、EDEM等模拟仿真软件,探究矿浆流体的运动变化规律和矿粒运动情况,对螺旋溜槽的改造和新技术开发具有重要指导意义。

(4)复合力场螺旋溜槽的开发。随着流体力学的进展,螺旋溜槽的分选已不再局限于利用重力和水流阻力,而是逐渐演变为综合运用离心力、磁力等因素。研发复合力场螺旋溜槽,能够显著改善有用矿物富集效果,实现细粒和微细粒的有效回收,从而提升螺旋溜槽的分选效率和有用矿物的回收率。

参考文献:

- [1] VEIGA M M, GUNSON A J. Gravity concentration in artisanal gold mining[J]. *Minerals*, 2020, 10(11): 1026.
- [2] 曾安,周源,余新阳,等.重力选矿的研究现状与思考[J]. *中国钨业*, 2015(4): 42-47.
ZENG A, ZHOU Y, YU X Y, et al. The ways out and development trends of gravity separation under current position[J]. *China Tungsten Industry*, 2015(4): 42-47.
- [3] SADEGHI M, BAZIN C, RENAUD M. Radial distribution of iron oxide and silica particles in the reject flow of a spiral concentrator[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 153: 51-59.
- [4] ROBBEN C, WOTRUBA H. Sensor based ore sorting technology in mining past, present and future[J]. *Minerals (Basel)*, 2019, 9(9): 523.
- [5] 台恒心,黄超群.国外多头螺旋选矿机的新设计[J]. *国外金属选矿*, 1984(4): 16-20.
TAI H X, HUANG C Q. New design of foreign multi head spiral concentrator[J]. *Foreign Metal Ore Mineral Processing*, 1984(4): 16-20.
- [6] MISHRA B K, TRIPATHY A. A preliminary study of particle separation in spiral concentrators using DEM[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(3/4): 192-195.
- [7] M M D, G R R. Improved gravity separation systems utilizing spiral separators incorporating new design parameters and features, 2003[C].
- [8] 杨杰.尖缩溜槽在含金尾矿资源回收中的应用[J]. *湖南有色金属*, 2023, 39(2): 22-24.
- [9] 刘惠中. BL1500-A型螺旋溜槽的研制及其在尾矿再选中的应用[J]. *矿冶*, 2001(4): 24-28.
LIU H Z. Development of BL1500-A spiral concentrator and its application in tailings retreatment[J]. *Mining & Metallurgy*, 2001(4): 24-28.
- [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 H Z. BL1500 Development and application of the spiral concentrator[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(3): 44-49+64.
WANG J M, HE R A. The development of the repeated spiral concentrator and the sorting mechanism[J]. *Metal Mine*, 1989(3): 44-49+64.
- [12] 侯柱山,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): 29-30.
HOU Z S, KUANG D G. Application of rotating spiral concentrator tantalum niobium mine in Yichun[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 1993(2): 29-30.
- [13] 刘仁梁.应用旋转螺旋溜槽改造宜春钽铌矿车间工艺流程的生产实践[J]. *新疆有色金属*, 1998(3): 17-22.
LIU R L. The production practice of transforming the process flow of Yichun tantalum niobium mine by applying rotating spiral concentrator[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 1998(3): 17-22.
- [14] Turner J. Gravity concentration, past, present and future[J]. *Minerals Engineering*, 1991(4): 213-223.
- [15] 侯玉茂,刘翔,王震,等.螺旋分选机+TBS干扰床分选机联合工艺在炼焦煤选煤厂的应用[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2023(3): 31-33.
HOU Y M, LIU X, ZWANG Z, et al. Application of spiral concentrator and TBS interferential bed separator combined process in coking coal preparation plant[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2023(3): 31-33.
- [16] 高淑玲,孟令国,魏德洲,等.下斜角对螺旋溜槽流场特征的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2020(1): 82-90.
GAO S L, MENG L G, WEI D Z, et al. Influence of downward bevel angle on the flow field characteristics of spirals[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2020(1): 82-90.
- [17] 王光庆.药剂及格条作用下煤泥螺旋溜槽分选规律研究[D].太原:太原理工大学, 2015.
WANG G Q. Study on separation law of the slurry spiral concentrator under the function of reagent and riffles[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [18] KATWIKI C N, KIME M, KALENGA P N M, et al. Application of knelson concentrator for beneficiation of copper-cobalt ore tailings[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019, 40(1): 35-45.
- [19] MAHARAJ L, LOVEDAY B K, POCKOCK J. Gravity separation of a UG-2 ore secondary sample for the reduction of chromite minerals[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 30: 99-101.
- [20] 刘惠中,吴华冬.螺旋选矿设备的应用现状及展望[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(5): 151-158.
LIU H Z, WU H D. Application and prospect of spiral concentrator[J].

- Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 151-158.
- [21] 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 H L. CFD technology is applied to the structure optimization of spiral concentrator[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [22] 时益青. 选煤厂中螺旋溜槽重选技术应用与改造[J]. 江西煤炭科技, 2023(1): 194-195+198.
- SHI P Q. Application and transformation of spiral concentrator for gravity separation in coal preparation plant[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2023(1): 194-195+198.
- [23] 李斌, 刘学海. 多段螺旋溜槽的研究[J]. 矿冶, 1995: 214-221.
- LI B, LIU X H. Study of a multisegment spiral concentrator[J]. Mining&Metallurgy, 1995: 214-221.
- [24] 王绍岩. 螺旋溜槽的设计计算与应用[J]. 机械管理开发, 2021, 36(8): 8-9.
- WANG S Y. Design calculation and application of a spiral concentrator[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(8): 8-9.
- [25] 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(1): 45-48.
- LIU H Z, LI H L, GE H C. Application of BL1500 spiral concentrator to iron ore concentrate reselecting in a Iron mine of chengde[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016(1): 45-48.
- [26] 王普蓉, 徐国印, 苏刚. 昌宁含铁低品位高泥锡石矿重磁选工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2022(1): 136-141.
- WANG P R, XU G Y, SU G. Study on gravity and magnetic separation process of an iron containing low grade and high slime tin ore in Changning[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(1): 136-141.
- [27] 张一敏, 刘惠中. 超极限 h/D 螺旋溜槽的研究及应用[J]. 矿产综合利用, 2000(5): 43-46.
- ZHANG Y M, LIU H Z. Development and application of out limited h/D helical concentrator[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2000(5): 43-46.
- [28] 李作敏, 冯安生, 张颖新, 等. 复合力场螺旋溜槽的流场特性及应用[J]. 矿产综合利用, 2021(6): 164-167+143.
- LI Z M, FENG A S, ZHANG Y X, et al. Flow field characteristics and application tests of spiral concentrator with compound force field[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(6): 164-167+143.
- [29] 秦亚国. 铁矿石选矿技术发展研究-评《磁电选矿》[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5): 177.
- QIN Y G. Development and research of iron ore beneficiation technology review of magneto electric beneficiation[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 177.
- [30] YAVUZ C T, PRAKASH A, MAYO J T, et al. Magnetic separations: From steel plants to biotechnology[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(10): 2510-2521.
- [31] 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 X Q, HUANG Z H. Magnetic spiral concentrator and its application in recovery of fine magnetic materials[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2007, 38(6): 1083-1087.
- [32] 马丁内斯 E, 斯皮勒 DE, 张光烈. 重力-磁力分选法-用重力分选法回收磁性和弱磁性矿物[J]. 国外金属矿山, 1991(12): 59-61.
- MARTINEZ E, SPILLER D E, ZHANG G L. Gravity magnetic separation recovery of magnetic and weak magnetic minerals by gravity separation[J]. Foreign metal mines, 1991(12): 59-61.
- [33] 陈晓鸣, 严鹏, 陈力行. 磁性螺旋溜槽回收细粒钛铁矿试验[J]. 金属矿山, 2014(3): 132-135.
- CHENG X M, YAN P, CHENG L X. Experiments on fine ilmenite recovery with magnetic spiral concentrator[J]. Metal Mine, 2014(3): 132-135.
- [34] 徐镜潜, 陈庭中, 彭建平, 等. 离心螺旋溜槽流膜特性的研究[J]. 有色金属, 1983(2): 37-47.
- XU J Q, CHEN T Z, PENG J P, et al. Study of the characteristics of centrifugal spiral groove flow membrane[J]. Nonferrous Metals Engineering, 1983(2): 37-47.
- [35] 李彩, 刘洋. 离心振动螺旋溜槽在昆钢大红山选矿厂应用[J]. 现代矿业, 2011, 27(4): 108-109.
- LI C, LIU Y. The centrifugal vibration spiral concentrator is applied in dahongshan dressing ator of Kunming steel[J]. Modern mining, 2011, 27(4): 108-109.
- [36] 张立. 耦合 GIS 与 CFD 应用潜力与面临挑战的探讨[J]. 科技视界, 2014(29): 162-279.
- ZHANG L. Discussion on the application potential and challenges of coupling GIS and CFD[J]. Science & Technology Vision, 2014(29): 162-279.
- [37] JEONG S W. The effect of grain size on the viscosity and yield stress of fine grained sediments[J]. Journal of mountain science, 2014, 11(1): 31-40.
- [38] BOISVERT L, SADEGHI M, BAZIN C. Investigation of residence time and fluid volume in spiral concentrators[J]. Minerals Engineering, 2023, 202: 108-272.
- [39] 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.
- [40] ANKIREDDY P R, PURUSHOTHAM S, NARASIMHA M. Fluid flow modeling and analysis of low and high gravity spiral concentrators: experimental and analytical approaches[J]. Chemical Engineering & Technology, 2023, 46(8): 1619-1629.
- [41] 孟令国, 高淑玲, 周孝洪, 等. 入口流量对螺旋溜槽首圈流场演变及矿物颗粒分布的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 856-862.
- MENG L G, GAO S L, ZHOU X H, et al. Influence of the inlet flow rate on flow field evolution and mineral particle distribution in the first turn of spiral concentrator[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(6): 856-862.
- [42] 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+43.
- YUAN J, GAO S L, MENG L G, et al. Research progress on secondary circulation distribution and separation in spiral concentrator[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(2): 29-35+43.
- [43] 王韬, 郭晨阳, 孟令国, 等. 断面曲线函数对 $\Phi 600$ 螺旋溜槽内水流场特性的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 174-180+188.
- WANG T, GUO C Y, MENG L G, et al. Influence of cross sectional curves function on the flow field characteristics in spirals with diameter of 600 mm[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(6): 174-180+188.
- [44] 吴华冬. 螺旋溜槽主要结构参数对分选流态及矿物分选行为的影响[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- WU H D. Effect of main structural parameters of spiral concentrator on sorting flow state and mineral sorting behavior[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.

- [45] 高淑玲,魏德洲,崔宝玉,等.基于CFD的螺旋溜槽流场及颗粒运动行为数值模拟[J].金属矿山,2014(11):121-126.
GAO S L, WEI D Z, CUI B Y, et al. CFD based numerical simulation of flow field of and particles motion behavior in spiral[J]. Metal Mine, 2014(11): 121-126.
- [46] 刘祚时,赵南琪,刘惠中,等.螺旋溜槽分选流场中矿粒运动轨迹研究[J].中国钨业,2016,31(5):66-71.
LIU Z S, ZHAO N Q, LIU H Z, et al. Mineral particles trajectory of spiral concentrator separating flow field[J]. China Tungsten Industry, 2016, 31(5): 66-71.
- [47] 高淑玲,孟令国,周孝洪,等.给料参数对螺旋溜槽内流层铺展及颗粒分离行为的影响[J].有色金属(选矿部分),2022(5):137-143+158
GAO S L, MENG L G, ZHOU X H, et al. Effect of feed parameters on flow spreading and particle separation behavior in spirals[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 137-143+158.
- [48] 高淑玲,孟令国,魏德洲,等.螺旋溜槽流场特性与分离性能研究进展[J].矿产保护与利用,2020,40(1):166-171.
GAO S L, MENG L G, WEI D Z, et al. Research advance of flow characteristics in spirals and its separation performance[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 166-171.
- [49] 杨钟秀.螺旋溜槽的螺旋槽横截面特性[J].有色金属(冶炼部分),1977(8):33-35.
YANG Z X. Spiral groove cross section characteristics of the spiral concentrator[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 1977(8): 33-35.
- [50] 韩彬,张亮亮,贾素娥.新型螺旋溜槽选别微细粒锡矿试验初探[J].世界有色金属,2018(10):76-78.
HAN B, ZHANG L L, JIA S E. Study on new spiral concentrator selected for fine grained tin ore[J]. World Nonferrous Metals, 2018(10): 76-78.
- [51] 王光庆,樊民强.格条对螺旋溜槽分选效果影响试验研究[J].中国矿业,2016,25(3):162-166.
WANG G Q, FAN M Q. Experimental study on influence of riffles on the separation effect of spiral concentrator[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(3): 162-166.
- [52] 高淑玲,周孝洪,王乾,等.粗糙壁面螺旋溜槽中矿浆流场参数及颗粒分离行为演变特性[J].矿产保护与利用,2023,43(3):127-136.
GAO S L, ZHOU X H, WANG Q, et al. Evolution characteristic of slurry flow field parameters and particles separation behavior in spirals with rough wall[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 127-136.
- [53] 周孝洪,高淑玲,孟令国,等.壁面粗糙度对螺旋溜槽中矿浆流动及颗粒分离行为的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(12):1769-1777.
ZHOU X H, GAO S L, MENG L G, et al. Influence of Wall Roughness on slurry flow and particles separation behaviors in spirals[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2023, 44(12): 1769-1777.
- [54] 初福栋,季安坤,姜程阳.精矿冲洗水对螺旋溜槽提品效果影响试验研究[J].矿山机械,2024,52(1):49-52.
CHU F D, JI A K, JIANG C Y. Experimental study on effect of ore concentrate flushing water on grade improvement of spiral concentrator[J]. Mining & Processing Equipment, 2024, 52(1): 49-52.
- [55] 刘惠中,朱合钧,芮作为,等.流动阻力对螺旋溜槽分选流场的影响[J].有色金属(选矿部分),2024(3):107-114.
LIU H Z, ZHU H J, RUI Z W, et al. Effect of flow resistance on the flow field of spiral concentrator[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(3): 107-114.
- [56] 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(2):50-54.
FAN X B, WANG J M. Application of spiral concentrator in iron ore dressing in Anshan area[J]. Metal Mine, 1988(2): 50-54.
- [57] 何德庆,牛福生.滦县司家营赤铁矿选矿试验研究[J].金属矿山,2009(1):69-73.
HE D Q, NIU F S. Experimental study on mineral processing of Sijiaoping in Luanxian County[J]. METAL MINE, 2009(1): 69-73.
- [58] 罗光明.安徽某镜铁矿选矿厂用螺旋溜槽优化选矿工艺[J].现代矿业,2020,36(8):157-159.
LUO G M. The dressing process is optimized by spiral concentrator in a mirror iron ore dressing plant in Anhui Province[J]. Modern Mining, 2020, 36(8): 157-159.
- [59] 张汉平,刘玫华,陈献梅.云南某红土型风化钛砂矿选矿工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2013(4):30-34.
ZHANG H P, LIU M H, CHEN X M. Research on mineral processing process of a weathered titanium ore of Yunnan[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2013(4): 30-34.
- [60] 梁焘茂,王丰雨,张超达,等.攀西某钒钛磁铁矿尾矿选钛试验[J].钢铁钒钛,2021,42(2):103-108.
LIANG T M, WANG C D, ZHANG C D, et al. Experimental study on separating ilmenite from a tailing of vanadium bearing titanomagnetite ore in Panxi region[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2): 103-108.
- [61] 李月旺,王海霞,李树军,等.研山铁矿磁铁矿重选工艺可行性研究与实践[J].现代矿业,2020,36(10):240-241+248.
LI Y W, WANG H X, LI S J, et al. Feasibility study and practice of magnetic recombination process of magnetite in Yanshan iron ore[J]. Modern Mining, 2020, 36(10): 240-241+248.
- [62] 田树国,崔立凤.某低品位难选钨锡矿石选矿试验研究[J].中国钨业,2021,36(4):55-59+64.
TIAN S G, CUI L F. Experimental study on beneficiation of a low grade refractory tungsten tin ore[J]. China Tungsten Industry, 2021, 36(4): 55-59+64.
- [63] 黄俊玮,王守敬,李洪潮,等.新疆某低品位磷灰石型磷矿浮选试验研究[J].金属矿山,2022(3):137-142.
HUANG J W, WANG S G, LI H C, et al. Experimental study on flotation of phosphorite ore from a low grade apatite deposit in xinjiang[J]. Metal Mine, 2022(3): 137-142.
- [64] 刘鑫,张一敏,刘涛,等.湖北某云母型含钨石墨重选联合预抛尾试验[J].金属矿山,2017(5):93-98.
LIU X, ZHANG Y M, LIU T, et al. Joint pre throwing test of mica-containing coal in Hubei province[J]. Metal Mine, 2017(5): 93-98.
- [65] 孙小乐,南凯,睢月婷,等.螺旋溜槽摇床联选对气化渣提碳行为研究[J].中国矿业,2023,32(12):235-241.
SUN X L, NAN K, SUI Y T, et al. Study on carbon extraction from gasification slag by spiral concentrator and table concentrator combined separation[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(12): 235-241.

Development Status and Prospect of Spiral Concentrator Separation Technology

CAO Mengbing, ZENG Jianwu, YU Weijun, CHEN Luzheng

Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: Spiral concentrator separation is a resorting method using flow membrane gravity and inclined flow sorting, which has the advantages of large processing capacity, low energy consumption, no pollution, high separation efficiency and wide separation range, and is widely used in the field of mineral processing. This paper deeply expounds the key technical problems of the spiral concentrator and the characteristics of different types of spiral concentrator. At the same time, this paper also systematically combs the motion state of the spiral concentrator flow membrane, the particle movement trajectory and the optimal design of the groove surface. Finally, the application of spiral concentrator separation technology is summarized and the development trend of this technology is discussed. The content of this article can provide reference for the development of spiral concentrator separation technology.

Keywords: gravity beneficiation equipment; spiral concentrator; separation principle; film concentration

引用格式: 曹孟兵, 曾剑武, 吁伟俊, 陈禄政. 螺旋溜槽分选技术发展现状和展望[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 127-134.

CAO Mengbing, ZENG Jianwu, YU Weijun, CHEN Luzheng. Development status and prospect of spiral concentrator separation technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 127-134.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

曾剑武, 博士, 昆明理工大学特聘副教授, “兴滇英才计划”青年人才, 硕士生导师。长期从事矿物加工工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为磁选理论与技术, 主持国家级、省部级、企业委托项目 6 项, 发表高水平论文 20 余篇, 获省部级奖 2 项。