

螺旋溜槽流场特性与分离性能研究进展

高淑玲¹, 孟令国¹, 魏德洲¹, 宋振国^{2,3}, 袁俊¹

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;
3. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160

中图分类号: TD922 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)01-0166-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.12.001

摘要 随着优质矿产资源匮乏程度的加剧以及生产环保要求的不断提高, 加强对离心力和重力复合力场分选过程的精细化调控不失为一种可行的重要途径。经过几十年的发展, 螺旋溜槽在现场被广泛采用, 理论研究成果也很丰硕。结合作者前期工作和国内外相关研究动态, 针对螺旋溜槽流场、颗粒运动行为、相关测试手段、螺旋溜槽结构与操作参数的影响等方面进行梳理和评述, 在此基础上提出了对螺旋溜槽研究的重点和发展方向。

关键词 螺旋溜槽; 流场特性; 断面形状; 计算模型; 分离性能

前言

作为利用离心力与重力复合力场的典型重选设备, 螺旋溜槽凭借独特的结构和优良的分选性能^[1]在生产现场得到了广泛应用^[2-4]。随着优质矿产资源匮乏程度的加剧以及生产环保要求的不断提高, 加强对物料重选的过程调控从而促进生产质效提升, 不失为一种可行的重要途径。

自1941年问世以来, 研究及工程技术人员围绕螺旋溜槽分选理论、工艺与设备等方面开展了大量卓有成效的研究与实践, 理论脉络逐渐清晰, 研究视角及试验手段日趋多元, 为进一步发挥复合力场分选的独特优势创造了条件。

1 螺旋溜槽流场特性研究进展

从动力学角度, 分选物料处于螺旋溜槽所创造的回转流场中, 依据运动差异实现分离。当颗粒组成一定时, 重选分离效果从根本上取决于颗粒所处的流体力场特性。因此深层次研究螺旋溜槽流场特性是十分必要的。采用计算流体力学方法(computational fluid dynamics, 简称CFD)对分选流场进行模拟计算是当前流场研究的一个重要手段^[5-9]。

印度的Kapur和美国的Meloy^[10]对螺旋溜槽的几何参数进行了详细描述, 研究了用于各种水文流态的幂次定律对螺旋溜槽流场模拟的适应性, 旨在开发可用于模拟和工业型螺旋溜槽设计的有效模型。研究结果表明, 在所检验的四个幂次定律中, 采用过渡流和混合流的幂次定律来模拟螺旋溜槽流场最为适宜, 水面线轮廓、流速、水深和流量等流场特征参数都获得了比较准确的描述。

Jain^[11]对螺旋槽内的流体质点进行受力分析, 尝试解释不同作用力对二次环流产生的原因, 他认为在流场截断面内存在一条径向方向上受力为零的线, 高于此线时离心力作用较强, 流体易向外缘流动, 反之则重力作用较强, 流体易向内缘流动。该研究对于加深理解二次环流的产生及其流动形式具有参考价值。

澳大利亚新南威尔士大学的Mathews等人^[12]利用RNGk- ϵ 湍流模型和VOF方法模拟螺旋溜槽流场, 可以获得水流横向剖面轮廓、主流速度分布、水深分布、不同径向位置的雷诺数变化曲线、不同水深处的速度等数值特征。研究表明, 当给矿量为6 m³/h时, 螺旋溜槽上的自由表面充分发展, 通过模拟获得的在不同径向距离处的水深值与试验值非常接近, 除了在溜槽外端出现的5.5 mm、7.8 mm和10.3 mm, 比

对应的测试值 6.5 mm、9.0 mm 和 14.0 mm 低以外,其它位置的模拟结果都是非常令人满意的;水深随径向距离的变化曲线也与认识一致,即水流深度沿径向从内向外逐渐增加,边壁对水流的影响越来越小,因此流速从内向外也不断增大,流态由层流逐渐发展为过渡流和紊流;数值模拟所获得的二次环流特征也与试验现象基本一致。

在国内,作者^[13-14]采用流场测试与 CFD 数值模拟相结合的研究方法,对螺旋溜槽流场进行了系统的试验研究,发现 $\varphi 300$ mm 螺旋溜槽中的流场特征为:水流主要在外缘汇聚,水流厚度由内向外呈现先逐渐增大、后急剧增大、在近边壁处又降低的特征;水流速度由槽底向水层表面逐渐增加,在水层表面达到最大值,且在某一水深处逐渐趋于平稳,该水深值因所处径向位置而异,数值模拟结果与实测数据趋势一致;水流湍动能由槽底向水层表面逐渐降低,在槽底各径向位置的湍动能差别相对较小,而越靠近水层表面这种差别越大;在螺旋溜槽中存在明显的横向二次环流,径向流速的分界点亦因径向位置不同而异。

江西理工大学李华梁、刘惠中等^[15]采用 RNGk - ϵ 湍流模型对 $\varphi 600$ mm 螺旋选矿机中的水流进行数值模拟,清晰显示了流膜沿径向的铺展状态、流速和环流强度的差异:在靠近内缘的精矿区和部分中矿区,水流速度很慢,流场为层流,环流作用很微弱;在靠近外缘的尾矿区,水流速度很快,流场为紊流,松散矿层的作用很明显,环流作用也更强烈。

相似研究还包括,王春光^[16]采用 k - ϵ 湍流模型对圆管中的螺旋流场进行模拟计算,研究发现在流场中存在二次流动现象,同时圆管螺旋流轴向速度的数模结果与 PIV 实测结果吻合较好,进一步证实了计算模型的准确性;张志雁等人^[17]采用 RSM 模型对矩形截面螺旋管道紊流中的二次流进行数值模拟,在矩形螺旋管道的不同管轴半径连接面上发现一对明显的二次涡,它们处于中心略微偏向向外边壁的位置,但随着雷诺数的增大,二次涡的位置变化不大。

2 螺旋溜槽流场中颗粒运动研究进展

对于颗粒流的数值模拟,主要包括多相流方法和离散元法。根据流体力学理论,多相流方法包括欧拉 - 欧拉法和欧拉 - 拉格朗日法 2 大类^[18]。两种方法的区别在于,前者将固体颗粒视为流体,而后者则将其视为分散相,从这一点来讲,采用拉格朗日法模拟颗粒运动行为更符合其物理性质,而且它能够捕捉每一个颗粒的运动轨迹,然而它仅适于固相体积分数较低的稀疏颗粒流。与拉格朗日法相比,欧拉法则可以

处理固相体积分数较高的流场,但它不适于模拟运动行为复杂的颗粒流,难以捕捉到颗粒的运动轨迹。离散元法是一种处理非连续体受力问题的数值模拟方法,由于考虑了颗粒间的相互作用,因此从某种角度讲,通过它可以更准确地获得颗粒的受力、空间位置、速度、能量变化等信息。

埃及的 Doheim 等人^[19]基于欧拉法和湍流模型,对螺旋溜槽中的颗粒流进行数值模拟,重点研究了颗粒的运动速度、分布和浓度等特征,并将颗粒流特性的预测结果与试验结果进行对比,结果显示两种试验研究结果具有良好的一致性,其中以采用 RNG k - ϵ 湍流模型 - 欧拉法所获得的预测结果最为准确,而且此湍流模型的运行时间也最为适度。因此应用该数值方法模拟螺旋溜槽中的颗粒流是可靠的,可将之作为解决工业上类似问题的参考。

韩国的 Kwon^[20]等人利用基于欧拉 - 拉格朗日的光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称 SPH) 成功地模拟了椭圆槽面螺旋溜槽中的液固两相流,通过数值模拟得出实现最大分离效率所需要的溜槽高度、下倾角和剖面曲率。他们利用其他文献中的试验数据以及作者进行的微型 HSC 试验结果,对模拟结果进行了验证,研究表明模拟结果与试验结果一致。这些研究可望在未来的螺旋溜槽结构设计和操作条件优化中发挥作用。

在国内,作者在对 $\varphi 300$ mm 螺旋溜槽进行流场模拟的基础上,通过基于拉格朗日法的离散相模型 (Discrete Phase Model, 简称 DPM),对颗粒在螺旋溜槽中的运动行为进行模拟^[13],探讨了颗粒密度、螺距、给矿量对颗粒运动行为的影响。结果表明,在相同的流场条件下,颗粒运动速度极值与其密度大小呈负相关;增大螺距可使颗粒的运动速度明显增加,其对高密度颗粒的影响更大,有利于加速颗粒分带;给矿量增大后,颗粒运动的随机性增大,尤其对低密度颗粒的影响更为明显,分带延迟,不利于分选过程进行。

江西理工大学刘祚时、赵南琪等人^[21]则是在 $\varphi 600$ mm 螺旋选矿机流场模拟的基础上,利用离散相模型建立了螺旋溜槽颗粒分选模型,分析了分选效果与矿物颗粒比重及粒度的关系,查明了矿物颗粒的运动规律。研究表明数值模拟结果与理论研究相吻合,验证了螺旋溜槽重选分离原理,更加证明了数值模拟的可靠性。

印度的 Mishra 和 Tripathy^[22]采用离散元法模拟螺旋溜槽中的颗粒流 (颗粒半径为 5 mm 和 2.5 mm),可以计算得出当分离器置于不同位置时颗粒的分离效率。研究发现,当其径向距离为 0.15 m、螺旋高度在

螺旋排料口以上 0.25 m 时,分离效率达到最大值 38.72%,即最大分离效率在螺旋溜槽的第四圈末实现。同时将在 0.15 m 径向位置所得到的试验精矿品位与数值模拟结果进行对比,两种方法所得精矿品位的平均值分别为 56.67% 和 50.90%,数值模拟指标偏低,数值试验精度需要进一步提高。

总的来看,对于螺旋溜槽中颗粒行为的模拟计算,以采用基于欧拉-拉格朗日法的多相流模型为主流,借助于此类模型计算得出的颗粒行为与实测及理论分析也更为接近。离散元法则更多地用于毫米级物料的运动模拟,例如:东南大学的耿凡、袁竹林等人采用离散元方法,对球磨机内部颗粒(直径为 3、4、5 mm)的混合运动过程进行数值模拟,跟踪球磨机内的每一个颗粒,结合重力、摩擦力和碰撞力,建立了三维数学模型^[23];中国矿业大学赵啦啦基于软球干接触模型对振动筛面上颗粒流(粒径范围 2~15 mm)的筛分过程进行了三维离散元法模拟研究,分析了煤料颗粒流在筛分过程中的运动状态和筛分效率的动态变化规律以及入料颗粒的粒度分布对筛分效率的影响^[24]。

将计算流体力学与离散元法相结合也是研究流体中颗粒运动的一个常用方法,如张强强用此方法研究颗粒(粒径范围 15~25 mm)在水中的沉降^[25],分析了单个颗粒在水流中沉降过程的抛石落距,结果表明大部分颗粒模型的抛石落距与试验结果比较接近,并且标定颗粒模型的运动趋势与试验结果是一致的,虽然仿真值与试验值有一定的误差,但颗粒沉降过程中抛石落距的变化趋势相同。Basavarajappa 和 Miskovic 则是用此方法模拟浮选机中的液固两相流^[26],重点考查了颗粒尺寸(1 mm 和 0.5 mm)和固体质量浓度对流动特性的影响,发现了叶轮尺寸及离底间隙对颗粒悬浮特性的显著作用,研究结果非常有助于对分选动力学过程的理解与调控,同时表明此数值方法能很好地适应分选物料尺度。

3 相关测试技术应用及研究进展

数值模拟属于虚拟现实的范畴,因此对数值试验结果的验证是一个不容忽视的问题。随着检测技术的发展,借助于先进的流场测试手段以及实际物料分离试验结果,对模拟所得的流场及分离指标进行验证,无疑是适宜的。当前最常用的流场测试方法主要是粒子图像测速法和激光多普勒测速法。

粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry,简称 PIV),是通过测量示踪粒子在已知很短时间间隔内的位移来间接地测量流场的瞬态速度分布。PIV 技术的主要优点是突破了激光多普勒测速仪等空间单点测

量技术的局限性,能获得平面流场的整体结构和瞬态图像,可在同一时刻记录下整个流场的有关信息,并且可分别给出平均速度、脉动速度及应变率等。PIV 与激光测速仪同样是一种非接触式的测量方法,不足是其测量精度比不上单点测量技术。无论何种形式的 PIV,其速度测量都依赖于散布在流场中的示踪粒子。若示踪粒子有足够高的流动跟随性,其运动就能够真实地反映流场的运动状态,因此选择高质量的示踪粒子对于 PIV 测得准确数据至关重要。

PIV 应用非常广泛,如黄亚飞^[27]采用 PIV 技术探讨了在流量为 0.93 m³/h 的上升水流作用下、沙砾厚度为 20 mm 中的颗粒充分流态化时的运动状态;王勤辉等^[28]则利用 PIV 技术测量了一个截面为 200 mm × 200 mm、高为 4 m 的冷态循环流化床内的高浓度粒子的运动速度;阮晓东等^[29]同样采用 PIV 对气固两相流工况进行测试,并考查了不同粒径的固体颗粒、不同气体流量以及不同入口位置对流场的影响;作者研究团队也利用 PIV 对 φ50 mm 水力旋流器内水流速度分布进行测定^[30],捕捉到了精确的涡流区域,为水力旋流器流场模拟提供了可靠判据。

激光多普勒测速仪(Laser Doppler Anemometry/Velocimetry,简称 LDA 或 LDV)作为非接触测量的代表,由于采用激光测量,对于流场没有干扰,测速范围宽,而且由于多普勒频率与速度是线性关系,和该点的温度和压力也没有关系,因此是目前世界上速度测量精度最高的仪器,成为研究流场特性的主要方法。它已在航空、航天、机械、化工、医学等领域得到了广泛的应用,如用于螺旋桨尾流场的雾场特性研究、因温度过高不适合接触测量的火焰速度分布研究、激光多普勒测速仪车载组合导航系统、水下潜器的深海导航等^[31-36]。

综合国内外研究动态,LDA(或 LDV)测试数据的用途主要体现在两方面,一是对数值模拟结果进行验证,再就是为模拟计算提供准确的边界条件。该测试技术使得从更微观的角度研究物料分离过程成为可能,为流体动力学研究及分选过程调控提供了非常有效的途径。

4 螺旋溜槽结构与操作参数研究动态

螺旋溜槽的主要结构参数包括直径、螺距、断面形状、圈数和长度等^[37-45]。

螺旋溜槽的直径是设备的规格标志,直接影响其处理能力和粒度回收下限,同时也是决定其它结构参数的基础。研究与生产结果表明,大直径的螺旋溜槽(φ1000 mm 或 φ1200 mm 以上)对粗粒级物料的处理

最为有效;而处理细粒物料时则宜采用较小的螺旋直径。

螺距是决定螺旋溜槽纵向倾角大小的结构参数,它直接影响矿浆在螺旋溜槽内的纵向流速和流层厚度,因此螺距必须选取适当。选矿生产中使用的溜槽的距径比(螺距与螺旋直径之比)以0.4~0.8居多,但也有超出此参数范围的结构设计及相应工业试验对比,比较典型的代表是张一敏等研制的超极限距径比螺旋溜槽,即将距径比降低到0.4以下,使溜槽坡度变缓,显著提高了小密度差分选物料的分选效率。他们将距径比为0.36的螺旋溜槽用于钒页岩的预富集处理和细粒级磷灰石的重选作业中,取得了良好的经济技术指标。

在生产中,螺旋溜槽的断面形状与处理物料的粒度密切相关,尤其是螺旋溜槽横截面的横向倾角具有更重要的作用,因为它在很大程度上影响了矿流在槽面上的分布特性。研究与生产实践表明,选别粒度不同的物料必须选取与之相应的横截面。选别粒度小于2 mm的物料,须选取有较大横向倾角的横截面,例如长轴、短轴之比为2:1~4:1的椭圆形截面;对于粒度小于0.3 mm的细粒矿物或矿泥的选别,则应该选取较小横向倾角的横截面,如立方抛物线和直线截面,这样的槽底形状比较平缓,分选分带较宽,有利于细粒级物料的分选。

螺旋溜槽的长度和圈数对物料运行距离的影响显著。经验表明,使用不同长度的螺旋溜槽对处理不同粒度的煤颗粒是有益的。圈数则应据物料性质而异,例如,处理易选矿石时仅需3~4圈即可,然而对难选矿石或微细粒级物料而言,圈数则需增加到5~6圈甚至更多。

为了适应物料性质、提高设备的处理能力和分选精度,螺旋溜槽不断涌现出新的结构和形式^[46-54],如复合曲线溜槽、旋转溜槽、刻槽溜槽、格条溜槽、多段螺旋溜槽、磁力螺旋溜槽等,这些有针对性的结构改进使螺旋溜槽的分离性能显著提高,为进一步研究结构参数与分离性能的相关性提供了非常有价值的参考。研究者们也尝试分析了结构变化对分选槽中流体流动特性以及颗粒分选行为的影响,但由于检测手段的限制和流场特性定量描述的缺乏,使得机理层面的分析有待于进一步深入。

对于螺旋溜槽操作参数的研究,包括给矿浓度、给矿流量和给料性质三个方面^[38,55-58]。在物料分选过程中,三者密切相关。

研究与生产情况表明,处理粒度为2~0.2 mm的物料时,适宜的给矿浓度范围为10%~35%(固体质

量分数,下同);处理-0.2 mm粒级的物料时,粗选作业的适宜给矿浓度为30%~40%,精选作业的适宜给矿浓度为40%~60%。当给矿浓度适宜时,给矿流量在较宽的范围内波动对选别指标影响不大。

此外,针对不同密度的入选物料,适宜的给矿浓度范围具有一定差异。对于钨矿选别,由于入选浓度太大,紊动扩散作用减弱,不利于矿泥分散,而当入选浓度太低时又扩散急剧,阻碍细粒重矿物沉降使其进入螺旋外缘,降低回收率,故入选浓度的适宜范围为20%~35%;对于锡矿,给矿质量浓度在20%~35%范围内变化对选别指标影响不大,相似的还有铁尾矿,其适宜的给矿浓度为10%~20%,在此浓度范围内分选指标也较为稳定。

作者曾围绕给矿浓度和给矿流量对螺旋溜槽分离性能的影响开展系统的试验研究^[14],考查了赤铁矿和石英颗粒的分离指标,发现给矿浓度和给矿流量对不同性质颗粒具有明显的交互作用,但内在的调控机制现阶段还不明确,需要借助于有效途径进一步深化研究工作。

5 研究展望

通过以上文献追踪与分析,基于螺旋溜槽流场及其分离性能取得了大量成果,然而由于受多种因素的影响,截至目前所开展的研究工作及形成的认识还远未达到指导分选过程调控的水平,今后需要在以下几个方面加强研究工作:

(1)在众多影响螺旋溜槽分离性能的结构和操作参数中,断面几何对螺旋溜槽流场特性具有决定作用,但相关研究还基本停留在“黑箱”模式,亟需深入到流体介质行为层面,建立螺旋溜槽断面形状与其分离性能的相关性,为螺旋溜槽分离过程调控提供可靠依据。

(2)鉴于分选过程数值模拟的优越性—受干扰小、过程参量全面,今后应进一步融合数值试验与实际试验方法,基于明渠流动原理,确立高精度的螺旋溜槽流场与分离过程数值计算模型,为揭示结构和操作参数的作用规律奠定基础。

(3)在查明螺旋溜槽中流层铺展及流态分布状态的基础上,需进一步廓清内缘薄膜流、二次环流等特征流的分选作用,并据此设计针对特定给料与分离目标的螺旋溜槽结构参数,进而验证流场特性与颗粒分离结果的相关性。

参考文献:

- [1] 彭会清,李广,胡海洋,等.螺旋溜槽的研究现状及展望[J].江西有色金属,2009,23(3):26-29,37.

- [2] 陆朝波,孙翊洲,王万忠.广西某锡选厂提高高粘浮床回收率的试验研究[J].矿产保护与利用,2013(4):25-28.
- [3] 莫峰,刘庆祥,张军,等.螺旋溜槽在云南某锌锡矿的应用研究[J].有色金属(选矿部分),2013(1):77-80.
- [4] 陈中航,于克旭.某贫赤铁矿选厂合理工艺流程的试验研究[J].中国矿业,2013,22(2):81-85.
- [5] Murphy S, Delfos R, Pourquié M J B M, et al. Prediction of strongly swirling flow within an axial hydrocyclone using two commercial CFD codes[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(6): 1619-1635.
- [6] Sutalo I D, Paterson D A, Rudman M. Flow visualization and computational prediction in thickener rake models [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(2): 93-102.
- [7] 刘峰,钱爱军,郭秀,等. DSM 重介质旋流器流场的数值模拟[J].煤炭学报,2006,31(5):627-630.
- [8] Dong K J, Kuang S B, Vince A, et al. Numerical simulation of the in-line pressure jig unit in coal preparation [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(4): 301-312.
- [9] Xia J L, Rinne A, Gronstrand S. Effect of turbulence models on prediction of fluid flow in an Outotec flotation cell [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(11): 880-885.
- [10] Kapur P C, Meloy T P. Industrial modeling of spirals for optimal configuration and design: spiral geometry, fluid flow and forces on particles[J]. Powder Technology, 1999, 102(3): 244-252.
- [11] Jain P K, Rayasam V. An analytical approach to explain the generation of secondary circulation in spiral concentrators[J]. Powder Technology, 2017, 308: 165-177.
- [12] Matthews B W, Fletcher C A J, Partridge A C. Computational simulation of fluid and dilute particulate flows on spiral concentrators[J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22(12): 965-979.
- [13] 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,2014,32(11):121-126.
- [14] 黄秀挺.螺旋溜槽流场特征及其颗粒分选行为研究[D].沈阳:东北大学,2015.
- [15] 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.
- [16] 王春光.圆管中螺旋流数值模拟及二维PIV试验研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
- [17] 张志雁,牧振伟.基于RSM模型的螺旋管道内二次流特性分析[J].新疆农业大学学报,2011,34(3):259-262.
- [18] 崔宝玉.水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究[D].沈阳:东北大学,2013.
- [19] 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.
- [20] Kwon J, Kim H, Lee S, et al. Simulation of particle-laden flow in a Humphrey spiral concentrator using dust-liquid smoothed particle hydrodynamics [J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(10): 2694-2705.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 耿凡,袁竹林,孟德才,等.球磨机中颗粒混合运动的数值模拟[J].热能动力工程,2009,24(5):623-629,682.
- [24] 赵啦啦,刘初升,闫俊霞,等.振动筛面颗粒流三维离散元法模拟[J].中国矿业大学学报,2010,39(3):414-419.
- [25] 张强强.基于DEM-CFD耦合的颗粒在水中沉降过程仿真分析[D].长春:吉林大学,2014.
- [26] Basavarajappa M, Miskovic S. CFD-DEM simulations and electrical resistance tomography (ERT) studies of solid-liquid flows in flotation cell[C]. IMPC2014 (27th, SANTIAGO, CHILE), 2014.
- [27] 黄亚飞.应用PIV技术对上升流水力分选机流场的试验研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2009.
- [28] 王勤辉,赵晓东,石惠娟,等.循环流化床内颗粒运动的PIV测试[J].热能动力工程,2003,18(4):378-381,433-434.
- [29] 阮晓东,赵文峰.水平渐扩管后气固两相流动特性的试验研究[J].热力发电,2006,(9):15-17,32.
- [30] Cui B Y, Wei D Z, Gao S L, et al. Numerical and experimental studies of flow field in hydrocyclone with air core[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2014, 24(8): 2642-2649.
- [31] 李广年,张军,陆林章,等. PIV, LDV 在螺旋桨尾流测试中的比对应应用[J].航空动力学报,2010,25(9):2083-2090.
- [32] 龚迎莉,衡思江,祁海鹰.采用3D-LDA测量旋转射流速度的方法研究[J].试验技术与管理,2014,31(7):53-57.
- [33] 刘帆,金世龙.激光多普勒测速仪中的频谱分析技术[J].红外与激光工程,2012,41(6):1462-1470.
- [34] 尹晔东,王运东,费维扬.激光多普勒测速仪在化学工程中的应用[J].现代化工,2000,(2):17-20.
- [35] 李秀明,黄战华,李翔宇,等.二维点列式激光多普勒法测量物体速度[J].光学精密工程,2014(10):2627-2632.
- [36] 周健,魏国,龙兴武.激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J].红外与激光工程,2012,41(3):632-638.
- [37] 范象波,郑洪君.螺旋溜槽的结构参数[J].金属矿山,1984(9):36-41,51.
- [38] 魏德洲.固体物料分选学(第2版)[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [39] Atasoy Y, Spottiswood D J. A study of particle separation in a spiral concentrator[J]. Minerals Engineering, 1996, 37(10): 1197-1208.
- [40] 孙玉波.重力选矿(修订版)[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [41] 张一敏.固体物料分选理论与工艺[M].北京:冶金工业出版社,2007.
- [42] 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.
- [43] Liu X, Zhang Y M, Liu T, et al. Pre-concentration of vanadium from stone coal by gravity using fine mineral spiral[J]. Minerals, 2016, 6(3): 82-92.
- [44] Liu X, Zhang Y M, Liu T, et al. Beneficiation of a sedimentary phosphate ore by a combination of spiral gravity and direct-reverse flotation[J]. Minerals, 2016, 6(2): 38-48.
- [45] 刘鑫,张一敏,刘涛,等.微细粒螺旋溜槽在含钎石煤选矿中的分选特性研究[J].有色金属(选矿部分),2017(3):70-77.
- [46] 刘惠中.一种新型螺旋溜槽的研制及其工业应用实践[C]//第四届全国选矿设备学术会议,2001.
- [47] 封国富.旋转螺旋溜槽选矿试验与实践[J].有色矿山,2002(4):27-30,37.
- [48] 杨才顺.试论旋转螺旋溜槽的选别机理[J].中国矿山工程,1990(2):37-39,30.
- [49] 金仁国,陆庆秋,于克旭,等.1200 mm × 720 mm 楔形槽螺旋溜

槽研制及试验研究[J]. 金属矿山, 2000(1):46-48,57.

- [50] 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.
- [51] 马龙秋,孙玉波. 高效新型螺旋溜槽的试验研究[J]. 金属矿山, 1997(7):46-47.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 李广,肖琴,李春鸥,等. 新型高效螺旋溜槽的设计及应用[J]. 矿山

机械, 2016, 44(5):63-66.

- [55] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2005.
- [56] 陆朝波,朱文涛. 原矿锡品位波动对车河选矿厂的影响及应对措施[J]. 有色金属(选矿部分), 2014(4):44-47.
- [57] 王全亮,周虎强. 某尾矿综合回收硫、铁资源试验研究[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(3):15-18.
- [58] Tripathy S K, Murthy Y R, Modeling and optimization of spiral concentrator for separation of ultrafine chromite [J]. Powder Technology, 2012, 221: 387-394.

Research Advance of Flow Characteristics in Spirals and Its Separation Performance

GAO Shuling¹, MENG Lingguo¹, WEI Dezhou¹, SONG Zhenguo^{2,3}, YUAN Jun¹

1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100160, China;
3. Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100160, China

Abstract: With the decrease of high quality ore resources as well as the continuous increase of environment demand for production, it becomes feasible and significant to enhance the precise regulation to the separation process using the compound force field of centrifugal force and gravity. Spirals have been found many varied applications in mineral processing over numerous years, as well as the theoretical research results are also very rich. Combining the previous work by the authors and the related research developments at home and abroad, the significant problems were discussed in details, including the flow characteristics in spirals, the particles motion behaviors, relevant measurement approach and the influence of structural and operational parameters on spirals performance. Finally, the emphases and directions of spirals research were brought forward.

Key words: spirals; flow characteristics; cross-section; computation models; separation performance

引用格式:高淑玲,孟令国,魏德洲,宋振国,袁俊. 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 SL, Meng LG, Wei DZ, Song ZG and Yuan J. Research advance of flow characteristics in spirals and its separation performance[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(1): 166-171.

官方网站:<http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail:kcbh@chinajournal.net.cn