doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.018

有色金属矿物筛分技术研究现状与展望

赵跃民[1,2,3,4],侯 旭[1,2,3,4],段晨龙[1,2,3,4],江海深[1,2,3,4],王维楠[1,2,3,4]
(1. 中国矿业大学 能源资源高效加工与洁净化利用教育部国际合作联合实验室,江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 江苏省碳资源清洁利用重点实验室,江苏 徐州 221116;
4. 中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:我国有色金属矿产资源开发利用逐步向低品位、复杂共伴生及难选矿方向转移,矿物细粒化、高含泥化及复杂化特征日益突出,对筛分技术的分级精度、处理能力和工况适应性提出了更高要求。筛分作为选矿过程中的关键分级环节,其运行效果直接影响碎磨和后续选别的作业效率以及最终的产品质量。笔者围绕有色金属矿物筛分技术的发展现状与未来趋势,系统分析了有色金属矿物筛分面临的细粒物料比例增加、黏湿物料筛分困难以及大处理能力条件下筛分装备性能受限等关键问题,并从筛分技术开发、装备创新及智能化发展等方面对相关技术进展进行了综述。研究表明,筛分技术正逐步向机理研究与数据驱动协同发展转变:新型筛分装备不断提升复杂工况下的分级能力,数值仿真技术为筛分机理揭示和装备优化提供了重要支撑,而智能感知、数据分析及数字化技术的发展则为筛分过程的精细化管理与智能控制创造了条件。未来,有色金属矿物筛分技术将更加注重复杂工况下的高效精准分级、绿色低碳运行以及与智能选矿系统的深度融合,不断提升筛分过程对低品位资源开发利用的适应能力,为有色金属选矿提质增效和绿色发展提供支撑。

关键词:有色金属矿物;筛分技术;筛分装备;智能化
中图分类号:TD921.3;TD952;TD452 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)08-0196-14

Development Stat Research Status and Prospects of Screening Technologies for Non-ferrous Metal Minerals

Zhao Yuemin[1,2,3,4], Hou Xu[1,2,3,4], Duan Chenlong[1,2,3,4],
Jiang Haishen[1,2,3,4], Wang Weinan[1,2,3,4]
(1. International Joint Laboratory of Minerals Efficient Processing and Utilization, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
2. Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
3. Jiangsu Key Laboratory for Clean Utilization of Carbon Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
4. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: With the continuous depletion of premium non-ferrous mineral resources in China, resource development has progressively shifted toward low-grade, complex co-associated, and refractory ores. Consequently, the prominent characteristics of fine particle size, high clay content, and increased mineralogical complexity have imposed more stringent requirements on the classification accuracy, processing capacity, and operational adaptability of screening technology. As a critical classification operation in non-ferrous mineral processing, the screening performance directly determines the efficiency of comminution and downstream separation, as well as the final

收稿日期:2026-07-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U25B6009,U25B20140);教育部基础学科和交叉学科突破计划项目(JYB2025XDXM308)
作者简介:赵跃民(1961—),男,河南漯河人,博士,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要研究方向为矿产资源分选加工。

product quality. Focusing on the state of the art and future trends of non-ferrous screening technology, this paper systematically analyzes key challenges under the background of run-of-mine ore impoverishment, including the rising proportion of fine materials, the screening bottlenecks of sticky and moist ores, and the performance limitations of equipment under large-scale production. Furthermore, recent technical advancements are comprehensively reviewed from three dimensions: innovations in screening equipment, numerical simulation studies, and intelligent development. Investigations demonstrate that screening technology is undergoing a paradigm shift from purely empirical and experimental optimization toward a synergy of mechanistic insight and data-driven approaches. Concurrently, novel screening equipment continuously enhances classification capabilities under complex operating conditions; numerical simulation methods provide a robust foundation for elucidating screening mechanisms and optimizing equipment structures; and advancements in intelligent sensing, data analytics, and digitalization technologies create favorable conditions for the refined management and autonomous control of screening processes. In the future, non-ferrous screening technology will place greater emphasis on efficient and precise classification under extreme operating conditions, green and low-carbon operations, and deep integration with intelligent mineral processing systems. These advancements will continuously enhance the operational adaptability of screening processes to low-grade resource exploitation, thereby providing critical support for quality enhancement, efficiency optimization, and sustainable development in non-ferrous mineral processing.

Key words: non-ferrous minerals; screening technology; screening equipment; intelligentization

0　引言

有色金属资源作为国民经济建设与战略性新兴产业发展的重要物质基础，广泛应用于现代能源、电力、交通运输、航空航天及电子信息等关键领域[1-3]。随着我国经济结构的转型升级与高端制造业的快速发展，对铜、铅、锌、镍等核心有色金属资源的需求总量持续增长，同时也对资源的开发利用效率提出了更高要求[4-5]。

选矿是实现有色金属资源开发利用的关键环节，而筛分作为选矿过程中的重要分级方法，承担着选矿过程中的准备筛分、检查筛分、脱泥筛分、脱水筛分、脱介筛分、尾矿干排等功能[6-8]。筛分效果不仅影响产品的粒度组成与后续作业条件，还直接关系到整个选矿厂的处理能力、能耗水平和最终的资源回收率[9-10]。

近年来，有色金属资源开发逐步向低品位、复杂共伴生及难选矿方向转移，选矿生产对筛分装备性能和工艺水平提出了更高要求[11]。同时，高效选矿、绿色矿山建设及智能化发展的需求不断增强，推动筛分技术向高效化、精细化、智能化和绿色化方向持续发展[12-13]。在此背景下，笔者围绕有色金属矿物筛分面临的主要挑战、技术进展及未来趋势进行了综述，为相关研究与工程实践提供参考。

1　有色金属矿物筛分面临的挑战

在有色金属选矿流程中，筛分作业的实质是按物料粒度大小将其分成两种或多种不同粒级产品的分级过程[14]。由于有色金属矿物普遍具有有用矿物嵌布粒度细、共伴生关系复杂、脉石矿物易泥化等特征，有色金属矿物的筛分面临着多重的技术制约(图 1)。当前，随着我国可采的有色金属优质矿产资源日益减少，入选矿物性质持续恶化，筛分环节面临的挑战进一步加剧。

1.1　原矿贫化与细粒物料比例上升

随着入选原矿品位持续下降，脉石矿物的含量显著增加，使矿物嵌布粒度逐渐趋于细化[15]。为实现有用矿物的充分单体解离，在碎磨过程往往需要将矿物粉碎至更细的产品粒度，与此同时，由于现代大规模机械化开采技术的广泛应用，在采掘、爆破和粗碎阶段不可避免地引入大量原生及次生细颗粒，导致入选原矿中细粒级物料含量持续增加，分级粒度下限随之降低，给传统的筛分作业带来了巨大的技术阻力[16]。

从筛分过程中料层的运动行为来看，高比例的细粒级物料显著改变了粒群在筛面上的分层行为[17]。在常规振动条件下，料层迅速松散，细颗粒通过粗颗粒间的孔隙向下迁移实现有效分层。而当细粒级物料含量过高时，大量微细颗粒易填充在孔隙之间，导致料层整体流动性变差、松散度不足，由此形成的致密料层严重阻碍了细颗粒向筛面方向的沉降与接触[18]；从颗粒的微观物理特性来看，细粒物料单颗粒的质量和重力极小，在筛分过程中受重力主导的惯性作用相对减弱，同时，由于颗粒比表面积大、表面能高，使得范德华力、静电力等表面作用力相对增强，

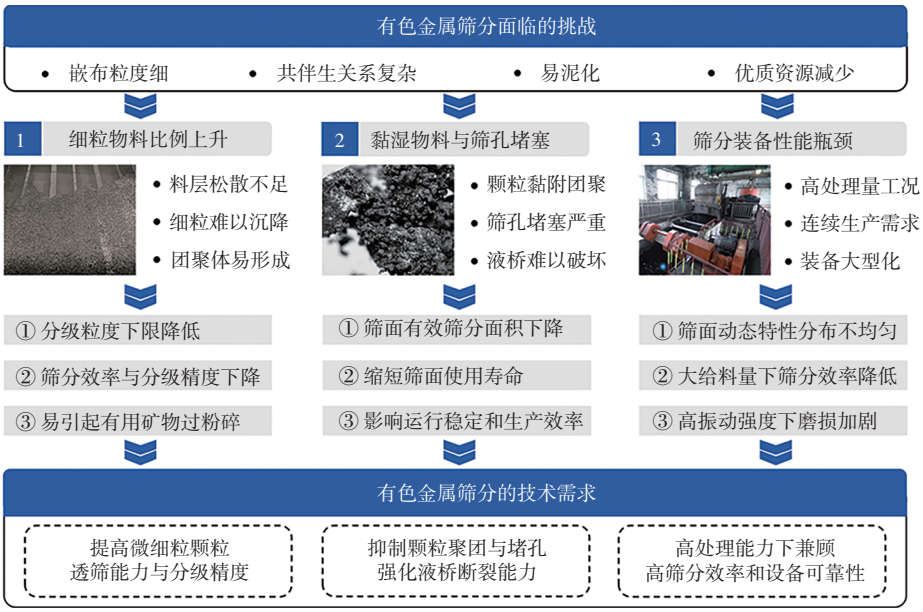


图 1 有色金属矿物筛分面临的挑战

Fig. 1 Challenges in the screening of non-ferrous minerals

极易互相吸附与团聚，形成表观粒度远大于原始粒径的团聚体[19]。基于以上原因，部分已达到分级粒度要求的颗粒难以穿过筛孔，而是以团聚体形式或附着于粗颗粒表面的状态进入筛上产品，使得筛分效率与分级精度显著下降[20]。与此同时，大量细粒级物料被返回破碎或磨矿回路参与循环处理，不仅增加了碎磨系统的循环负荷，提高了单位矿物处理过程中的能量消耗，而且易导致方铅矿、黄铜矿等高脆性有用矿物的过粉碎，在选矿末端产生大量难以回收的次生细泥，造成有价金属的不必要损失[21]。因此，如何应对原矿细粒化趋势所带来的筛分过程粒群透筛难题，已成为当前有色金属矿山优化分选流程效率、实现提质降本的核心挑战。

1.2 黏湿物料与筛孔堵塞现象

以我国的南方及西南地区为例，许多有色金属矿区存在高湿气候条件。同时，矿物中常含有较多黏土矿物和结晶水，使得原矿在进入筛分环节时通常具有较高含水率和较强的黏附性。在筛分过程中，颗粒间以及颗粒与筛面之间在水分介导下会形成液桥结构，受毛细力、范德华力及表面黏附力的共同影响，液桥的黏附强度随着颗粒比表面积和亲水性的增加而增强，甚至可达到或超过颗粒自身的重力[22]。在此条件下，常规低至中频振动筛提供的激振力难以有效实现液桥结构的断裂，导致黏湿颗粒在筛面上滞留并不断积聚，形成持续性的筛孔堵塞。

在工业生产中，这种堵孔现象会导致筛面有效面积下降，从而降低筛分环节的处理能力和筛分效率[23]。同时，在长期运行下，筛面堵孔还会增加筛分装备的振动负荷和能耗，缩短筛面使用寿命，进而影响筛分装备的稳定运行和生产效率[24]。

筛面的堵孔程度受到多种因素的影响，除粒度分布、含水率等物料自身特性、还包括筛分参数(筛孔尺寸、筛面倾角、振动频率、振幅等)以及环境条件(空气湿度和温度)[25]。揭示黏湿颗粒在筛分过程中的液桥形成机理及堵孔演化过程，分析各因素对堵孔行为的影响规律，对于提高有色金属矿物的筛分效率、优化筛分装备设计以及保障生产连续性具有重要理论意义和工程价值。

1.3 大型选矿厂筛分装备性能瓶颈

近年来，随着有色金属资源开发逐步向低品位、大规模矿床转移，选矿厂的设计处理能力持续提升，单系列生产线规模不断扩大[26]。筛分作为选矿过程的关键分级环节，随着处理规模的扩大，传统筛分装备在单位面积处理能力以及筛分效率上面临明显制约[27]。

在高处理量工况下，大量物料短时间内集中进入筛面，导致料层厚度显著增加，颗粒与筛面的接触机会减少，从而降低了透筛概率[28]。与此同时，为满足大型选矿厂的连续生产需求，筛分装备普遍向大型化、高负荷方向发展。然而，随着筛机尺寸增大，筛面各区域的振幅、频率等动态特性表现出明显的不均匀性，易出现筛面局部区域的应力畸变、物料堆积或透筛不均等现象，严重影响最终的筛分效果[29]。

此外，传统振动筛在提高处理能力时，往往面临

效率下降、能耗增加与运行可靠性降低之间的矛盾。单纯增加给料量会导致筛面利用率下降，而提高振动强度则可能加剧装备的疲劳损伤和筛面磨损[30]。因此，如何在保证高处理能力的同时维持较高筛分效率和设备可靠性，同样是大型选矿厂筛分系统设计与优化要面临的重要挑战。

2　有色金属矿物筛分技术发展与创新

2.1　新型筛分技术

目前，针对有色金属矿物细粒化、高含泥量等特点，以及选矿厂大规模处理的工艺需求，传统振动筛在复杂工况下的适应性逐渐不足，难以同时满足处理能力与分级效率的要求，推动了筛分装备向高效化、大型化与专用化方向发展。总体而言，新型筛分技术的发展主要围绕高频激振强化、筛面结构与材料优化以及复合振动模式创新等途径展开(图 2)，通过改善颗粒分层行为、增强细粒透筛能力并抑制筛孔堵塞，从而提升筛分过程的产品质量与处理效率。

2.1.1　高频振动筛分技术

高频振动筛通过引入高频率、低振幅的振动模式，使筛面在单位时间内的振动次数显著增加，从而强化颗粒在筛面上的高频碰撞行为[31]。在该作用机制下，料层整体厚度明显减小，粒群由原先分层滑移状态逐渐转变为松散状态，显著增强了颗粒在筛面垂向方向上的迁移能力，提高了细粒物料与筛孔接触和透筛的概率[32]。

基于以上优势，高频振动筛对于细粒物料的筛分具有较好的适应性。目前，高频振动筛已广泛应用于有色金属矿物的细粒分级及再磨闭路流程中，尤其在铜、铅锌及金等矿物的细粒分级作业中表现出良好的应用效果，有效缓解了传统筛分装备在处理微细粒物料时筛分效率低下的问题[33]。作为高频振动筛工业化应用的典型代表，美国Derrick Corporation公司美较早实现了高频细筛装备的系列化和工程化应用，推动了高频筛分技术由试验研究向大规模工业应用发展。芬兰Metso公司推出的UltraFine系列高频细筛，将高频激振与模块化筛面设计相结合，进一步推动了高频振动筛向大型化、模块化方向发展。国内企业也持续开展高频筛分装备研发，自主研发的高频叠层振动细筛采用多层筛面垂直叠加结构，在有限设备占地面积内大幅增加了有效筛分面积，实现了细粒湿法筛分处理能力和筛分效率的同步提升。

然而，高频振动筛的能耗相对较高，同时筛面及关键结构件易产生疲劳损伤，对设备材料性能及维护水平提出了更高要求。此外，在高含泥量或黏湿物料条件下，高频振动筛的筛上物料仍可能发生黏附与团聚现象，在一定程度上限制了其在复杂工况下的进一步应用效果。

2.1.2　弹性筛分技术

针对传统刚性筛面在处理难筛分细粒矿物时存在的效率低下与筛孔堵塞的技术瓶颈，笔者提出了弹性筛分理论，建立了弹性筛面的动力学模型，阐明了筛机振动过程的弹性筛面变形规律，指出弹性筛面透筛力大于刚性筛面透筛力，揭示了筛面弹性变形可改

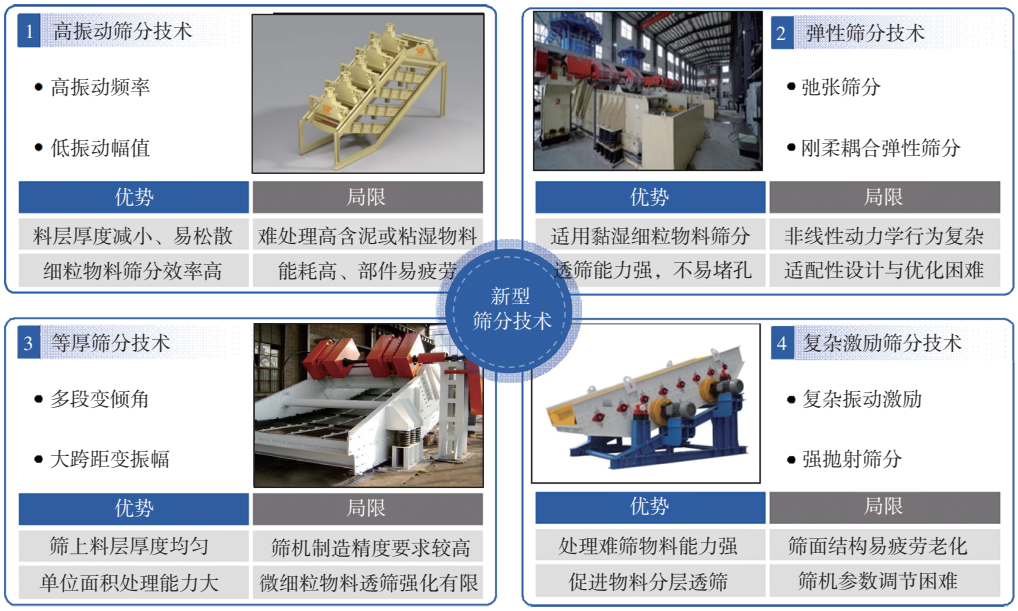


图 2　新型筛分技术

Fig. 2　Novel screening technologies

变筛孔孔径、有效克服颗粒堵孔的作用机理[34-35]。利用弹性结构筛面增强筛面振动强度与能量传递效率，改善筛上物料的松散分层状况，提升物料透筛概率，并减轻筛孔堵塞现象。弹性筛分技术在黏湿细粒物料分级及复杂粒群调控方面具有独特优势[36-37]。在工程实践与装备研发中，弹性筛分技术主要采用聚氨酯等高弹性材料作为整张筛面，使其在激振作用下产生大幅度弹性变形，从而给予物料极高的局部瞬态加速度[38]。

弛张筛采用高加速度振动与柔性筛面相结合的方式，通过主、副筛框在激振作用下的同频相对运动，驱动柔性筛面进行交替的张紧与松弛运动，使黏附颗粒在惯性作用下脱离筛面，促进团聚体破碎和颗粒重新分布。同时，筛孔随筛面运动产生一定程度的变形，有效避免了近筛孔尺寸的颗粒卡堵筛面以及黏附层的形成。根据实现弛张运动的方式不同，弛张筛可分为振动式弛张筛和曲柄连杆式弛张筛[39]。振动式弛张筛通过固定筛框的基本振动带动浮动筛框产生附加振动，使两个筛框做异向振动，从而带动筛面做周期性的张弛运动；曲柄连杆式弛张筛通过驱动电机带动曲柄-连杆机构进行往复运动，浮动筛框相对于固定筛框做周期性运动，从而使筛面产生交替的张紧与松弛。

中国矿业大学研究团队与江苏亿亿和华筛分设备有限公司合作研制了刚柔耦合弹性筛面。通过在弹性筛面中嵌入刚性骨架，从而提高筛孔尺寸稳定性与筛面承载能力，在保持弹性材料高局部振动强度的同时，提升重载工况下的分级精度与结构可靠性，在烟台中嘉黄金有限公司应用，进行进行金矿尾矿的高效分级脱水，产品用作建筑砂、干混砂浆原料等，为矿山尾矿的大规模资源化利用提供了新路径[40]。在刚柔耦合弹性筛面的底部加装击打球，通过击打球对弹性筛面的周期性撞击引发大幅度弹性形变，使得筛面在垂直方向的加速度幅值比筛箱整体高出约150%，能够有效打破黏湿颗粒间的液桥力与表面张力，实现筛面的自清理[41]。针对激振参数对刚柔耦合弹性筛面运动特性及筛分性能的影响开展研究，系统分析了激振频率、振幅等参数对筛面局部加速度、位移及筛分效率的影响规律，为刚柔耦合弹性筛面的参数优化与工程应用提供了理论依据[42-43]。在此基础上，提出变振动强度弹性筛面，利用弹性筛面与下方刚性加强筋的差异化布置，使筛面给料端的振动强度显著高于排料端，从而实现了筛上料层的均匀分布，在保证高分级效率的基础上增加了筛面的有效利用率[44]。

尽管弹性筛分技术在有色金属矿物的深度筛分中展现了优异的工艺性能，但弹性筛面的非线性动力学行为较为复杂，其疲劳寿命预测与控制难度较大。同时，弹性筛分效果对筛面材料性能、结构形式及激振参数具有较强敏感性，不同物料特性和工况条件下尚缺乏统一的设计方法与参数优化准则。因此，弹性筛分技术仍需在筛面材料的抗疲劳性能与失效机制、不同物料特性与工况条件下的系统适配方法等方面开展深入研究，以建立更为完善的理论基础与技术规范。

2.1.3 等厚筛分技术

高处理量筛分工况下，筛上料层厚度增加使物料分层与透筛过程受限，进而降低了物料透筛概率，传统单倾角振动筛难以同时满足处理能力与筛分效率的协同优化要求。等厚筛多采用分段变倾角筛面结构设计，给料端倾角较大，到排料端倾角逐渐减小[45]。在给料端，大倾角使物料获得较高初速度，料层快速铺展变薄，使细粒物料迅速穿过粗颗粒间隙到达筛面；随着筛分进行，筛上物料量减少，筛面倾角相应减小，使物料流速适当降低，从而延长剩余细粒透筛机会，有效解决了传统振动筛筛面前段过载，后段利用率不足的问题[46]。香蕉筛作为工业上应用较为成熟的等厚筛分装备，在铜、铅锌等大型现代化选矿厂的高处理量作业中已表现出良好的工程适用性[47]。中国矿业大学研究团队针对等厚筛开展了运动学特性及筛分过程协同优化研究，通过分析不同倾角区段对颗粒运动速度以及料群分布行为的影响，揭示了筛面倾角变化与物料分层和透筛过程之间的关系。鞍山鞍重矿山机器股份有限公司研发了大跨距变振幅等厚筛，通过优化筛面振动参数分布与结构跨距设计，提高了筛面不同区段的物料运移与分层协调性，在高处理量条件下进一步提升了筛分稳定性与适应性[48]。

目前，等厚筛在实际应用中的局限性除自身对设备制造精度与参数优化的要求较高以外，还主要集中在对微细粒物料的透筛强化能力不及弹性筛分设备，在深度筛分场景中筛分效率会显著下降。

2.1.4 复杂激励筛分方法

传统振动筛多采用单一方向或单一频率的振动形式，颗粒运动轨迹相对固定，在处理细粒物料、近筛孔尺寸颗粒或复杂粒度组成物料时，常存在分层不充分、透筛困难等问题。针对这一问题，复杂激励筛分通过叠加不同方向、不同频率或不同振动形式的激振作用，使颗粒在筛面上产生更加复杂的运动轨迹，除沿筛面输送方向运动外，还附加横向、垂向或变速运

动，从而增强料层内部颗粒间的相对运动。与传统单一振动模式相比，该方法能够有效促进颗粒松散与重新分布，从而改善料层分层状态并提高透筛概率[49]。近年来，随着振动理论、动力学分析及智能控制技术的发展，多频耦合、多维振动等复合振动筛分技术逐渐成为筛分装备研究的重要方向。

国内自主研制的高强抛射筛通过提出筛面振幅扩增方法实现了物料筛分过程中的高强度抛射，增强了颗粒垂向迁移能力，改善复杂颗粒体系下的分层与透筛行为，并在铁法煤业大平煤矿选煤厂等现场得到了应用验证[50]。

然而，复合激励筛分技术采用多自由度振动形式和复杂连接方式，其筛面或其他柔性部件在长期高频交变载荷作用下易产生磨损、疲劳及性能衰减，影响设备运行稳定性与使用寿命。同时，复合激励筛分的激振参数、筛面结构及物料特性之间存在复杂耦合关系，不同工况下难以实现参数的快速匹配与协同调节，其在大型化连续生产条件下的工程适应性仍有提升空间。

2.2　数值仿真在筛分技术中的应用

筛分过程涉及粒群运动、筛机结构响应及多因素耦合作用等复杂行为。传统筛分研究以实体筛分试验为主，虽然能够获得筛分效率、处理能力等宏观指标，但难以直接观测料层内部颗粒运动状态与筛机结构的瞬时应力分布，并且存在开发周期长、成本较高等局限因素。近年来，随着计算机算力与数值仿真技术的快速发展，离散元法(DEM)、有限元法(FEM)以及多体动力学(MBD)等方法被广泛引入筛分研究领域，已成为筛机性能评估、结构设计优化以及筛分机理研究的重要技术手段(图3)。

2.2.1　颗粒动力学行为与筛分机理研究

DEM是当前筛分过程研究中应用最广泛的数值模拟方法之一。该方法将散体物料离散为大量独立颗粒，通过建立颗粒间以及颗粒与筛面之间的接触模型，求解颗粒群在外部激振作用下的运动与碰撞过程，从而实现对筛分过程中颗粒动力学行为的精细化表征。

相较于传统筛分试验方法，DEM能够获得颗粒速度、加速度、接触力及运动轨迹等难以直接测量的微观信息，因此成为揭示筛分机理的重要研究工具，广泛应用于料层松散、颗粒分层及透筛行为的分析。对于物料在振动作用下由密实堆积向松散料层的动态演化过程，借助DEM模拟，能够对不同振动参数、筛面结构及物料特性条件下颗粒的分层速率和料层结构演化规律进行定量分析，从而揭示影响筛分效率的关键因素[52]。赵啦啦[53]采用软球接触模型，对直线振动筛分过程进行了DEM模拟，揭示了筛分效率沿筛面长度方向的分布规律，并系统分析了难筛粒与阻碍粒含量对稳态筛分效率的影响；Zhang等[54]采用DEM实时捕捉筛分过程中粒群的复杂运动学信息，直观验证了筛面开孔率逐缩对细粒透筛的加速作用，为新型高效筛面设计提供了理论参考。

随着有色金属矿物细粒化趋势的加剧，DEM在复杂颗粒体系筛分研究中的应用也不断拓展。针对细粒物料易团聚、难透筛等问题，利用DEM粒径组成、颗粒形貌及振动条件对料层流动性的影响及其与透筛行为的关系进行分析。对于黏湿矿物的筛分过程模拟，通过引入黏附接触模型或液桥模型，研

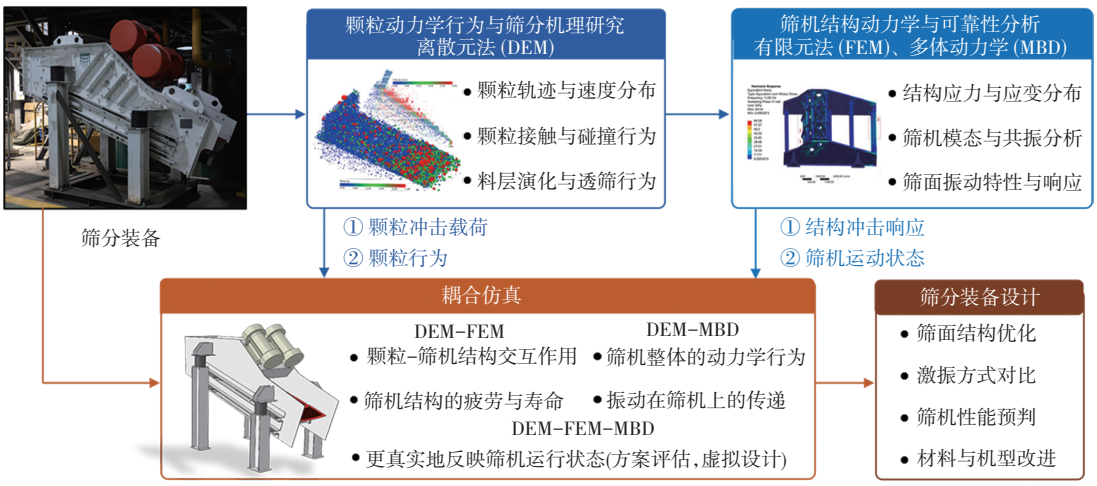


图3　数值仿真在筛分技术中的应用[51]

Fig. 3　Applications of numerical simulation in screening technology[51]

究颗粒团聚、筛孔堵塞及物料黏附等现象的形成机制。相关研究为揭示高含泥量、高含水矿物的筛分行为,以及筛孔结构特征和筛机参数的优化提供了重要支撑[55]。乔金鹏[56]基于DEM方法揭示了复杂非球形颗粒的振动离析行为,探究了振幅梯度、频率梯度协同作用对筛上料群分布与透筛行为的影响规律;He等[57]基于Hertz接触理论建立弹塑性碰撞模型,采用DEM分析了圆振动条缝筛核心参数对筛分效率的作用机制,为散体物料基于力学特性的DEM接触参数准确标定提供了典型范式。

总体而言,DEM仿真已成为连接颗粒微观运动与筛分宏观性能的重要桥梁,极大地推动了有色金属矿的筛分机理研究与筛分装备设计优化。

2.2.2 筛机结构动力学与可靠性分析

随着有色金属矿山处理规模的不断扩大,筛分装备逐渐向高频化、大型化和高负荷方向发展。在筛机连续运行作业中,筛机长期承受周期性交变载荷作用,筛体结构易出现横梁断裂、侧板开裂等结构失效问题。因此,筛机结构动力学分析与可靠性评估逐渐成为筛分装备研发的重要研究方向。由于有限元法(FEM)和多体动力学(MBD)能够描述机械设备结构响应及动力学行为,因此已成为筛机结构设计和寿命预测的主要数值分析手段。

FEM主要用于筛机结构强度与动态特性的研究,通过建立筛体结构的有限元模型,能够获得筛箱、侧板、横梁等关键部件在工作状态下的应力分布和变形特征,识别潜在的应力集中区域,为筛机结构的优化设计奠定基础。同时,通过模态分析可获得筛机各阶固有频率及振型特征,并与设备实际工作频率进行对比,从而避免共振现象的发生,提高设备运行稳定性[57]。此外,结合材料疲劳特性和动态载荷条件,FEM还可对筛机关键结构件进行疲劳寿命预测,为设备检修周期制定和可靠性设计提供理论支撑[58]。Zhang等[59]采用Mooney-Rivlin超弹性本构模型建立了弛张筛面的FEM模型,系统分析了筛面硬度、振幅、频率和倾角对筛面张力与振动强度的耦合影响规律,为弛张筛面的材料选择与结构设计提供了数据依据。

在结构强度与模态分析的基础上,MBD进一步用于研究筛机整体振动系统的动力学行为。通过建立激振系统、筛体结构及弹性支持之间的运动学与动力学关系,能够模拟筛机整体在运行过程中的振动轨迹和动态载荷传递规律,揭示关键部件的受力特征及系统运动状态。在高频振动筛、弛张筛等复杂振动设备中,MBD仿真可进一步揭示激振参数、结构刚度及支撑条件对设备运动稳定性的影响,为振动系统参数优化和设备性能提升提供参考[60]。江海深等[61]采用仿真方法建立了弹性筛面单元模块的运动学模型,分析了弹性筛面在简谐振动作用下对激振参数的响应特征,实现了弹性筛面挠曲响应曲面及弧形筛孔空间形态的重构。

2.2.3 耦合仿真与筛分装备设计技术

随着筛分研究的不断深入,单一数值仿真方法在复杂工况下的适用性逐渐受限。实际筛分过程本质上是颗粒运动、结构响应与振动传递等相互耦合的复杂系统。颗粒在筛面上的碰撞与冲击会产生动态载荷并作用于筛体结构,而筛机结构的振动状态又会反过来影响颗粒分层和透筛行为。因此,建立能够同时考虑颗粒与筛体结构间相互作用的耦合仿真模型,已成为当前筛分数值仿真的主要发展方向。

近年来,DEM-MBD、DEM-FEM等双向耦合方法在筛分研究中的应用逐渐增多。通过耦合颗粒动力学与结构动力学模型,不仅能获得粒群运动状态和透筛行为,还能同步分析粒群冲击载荷对筛机结构响应的影响,从而更真实地反映设备在实际工况下的运行特征。在筛分装备的设计与优化中,采用耦合仿真可用于评估筛机不同结构参数配置对筛分效率、运行稳定性及载荷分布均匀性的影响,为筛面结构优化与激振系统参数匹配提供依据。同时,在多工况模拟条件下,还可对筛机在不同处理量与物料特性变化下的适应性进行综合分析,从而提升筛分装备在复杂工业环境中的设计可靠性与工程适用性。石巍等[62]构建了钛铁矿筛分过程DEM-FEM仿真模型,以筛面冲击应力与物料透筛效果为评价指标,确定了钛铁矿3 mm筛分的最佳筛面材料参数组合。

因此,耦合仿真方法可以在设计阶段对筛机整体运行性能进行预判,从而缩短研发周期并降低物理样机试制成本。随着高性能计算和多物理场耦合技术的发展,筛分过程耦合仿真还将逐步实现由离线分析向在线预测的转变,为筛分装备数字化设计与智能优化提供更加可靠的技术支撑。

2.3 筛分过程的智能化探索

随着工业物联网、机器视觉、人工智能及数字孪生等技术的快速发展,智能矿山与智能选矿厂建设不断推进,现代选矿工艺正逐步向数字化、网络化和智能化方向发展。筛分过程作为连接破碎、磨矿及后续选别环节的关键节点,其运行状态直接影响着全流程的生产效率和最终的产品质量。然而,在实际生产过程中,入料性质频繁波动、筛机振动状态复杂,筛分环

节长期存在状态感知不足、参数调节滞后及故障预警能力有限等问题。如何有效整合筛机设备运行状态、物料特性及筛分效果等多源监测数据，构建高精度的筛分预测与状态评估模型，进而实现筛机的自适应调控，推动筛分过程由经验驱动向数据驱动和智能决策方向的转变，正成为当前矿山装备智能化研发的核心方向。

2.3.1　筛分过程状态感知与在线监测

状态感知是实现筛分过程智能化的基础。传统筛分作业主要依靠现场巡检和定期维护获取设备运行信息，难以及时掌握筛机运行状态及物料变化情况[63]。近年来，各类智能传感器和在线检测技术逐渐应用于筛分系统，为筛分过程的实时监测提供了技术支撑。澳大利亚Curtin University、CSIRO等研究机构针对筛机运行状态监测开展研究，提出了基于多维振动信息的筛机运动状态分析方法，通过采集筛机运行过程中的加速度信号，对筛体运动轨迹、振幅及振动方向等关键参数进行分析，从而对筛机动态行为进行量化评价。

针对矿物粒度组成波动较大的特点，在线粒度分析仪、含水率检测装置及给料量监测系统等设备逐渐应用于筛分生产现场，实现对物料性质变化的动态感知。此外，基于工业相机和机器视觉技术的在线检测方法也得到广泛应用，通过图像识别与特征提取算法，可对料层厚度、物料流动状态情况进行实时监测分析[64]。

为提高复杂工况下状态感知的准确性，近年来筛分过程监测逐渐由单一传感器向多源信息融合发展，通过融合振动、温度、机器视觉等多维信息，实现设备运行状态与筛分过程的综合感知，提高了复杂工况下状态识别的可靠性，为后续数据驱动预测和智能调控提供了更加全面的数据支撑。中国矿业大学研究团队针对筛机运动信号、轴承温度、激振电机运行状态及关键结构部件受力情况等进行多源感知，开发了筛分过程多维信号精准感知和协同提取智能监测算法，构建了筛分状态智能判识与故障预警系统(图4)，实现了由单一状态监测向综合状态评价的拓展[65]。

2.3.2　数据驱动的筛分性能预测

在实现筛分过程实时监测的基础上，如何利用监测数据对筛分性能进行快速预测，是当前筛分智能化研究的重要方向。传统的筛分性能分析主要依赖经验公式或筛分试验，不仅关键参数获取极为困难，而且难以适应复杂工况下筛分条件的动态演化。基于机器学习和数据挖掘技术，目前的筛分智能化研究中通过整合现场长期积累的历史运行数据，建立筛分参数与性能指标之间的映射关系，并利用人工神经网络、支持向量机、随机森林或极限梯度提升算法等机器学习手段构建数据驱动模型。相较于传统经验模型，数据驱动方法能够进一步探究给料粒度组成、含水率、振动参数及设备运行状态等多维数据之间的非线性关系，有效提高复杂工况下的预测精度，从而实现筛分效率、处理能力和设备能耗等指标的快速预测[66]。徐峰[67]基于交叉筛筛分试验与离散元模拟数据建立了筛分效率、透筛率、颗粒平均速度和细粒错配物含量四项评价指标的多种机器学习预测模型，采用粒子群算法和遗传算法对超参数进行组合优化，优化后的模型在筛分效率预测中拟合决定系数R^2达到0.989 1。

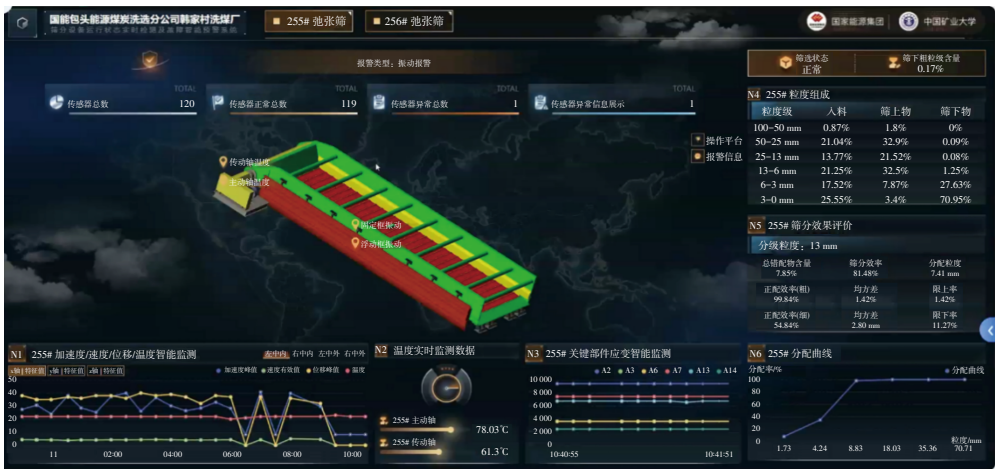


图4　中国矿业大学开发筛机运行状态智能监测与效果评价系统[2]

Fig. 4　Intelligent monitoring and performance evaluation system for screening machines developed by China University of Mining and Technology[2]

目前,数据驱动的筛分性能预测研究已逐步从实验室阶段向工业应用场景拓展。通过结合振动信号分析与机器学习算法,可进一步将数据驱动方法引入到筛机状态评估过程,建立运行参数与设备健康状态之间的映射关系,提高了复杂工况下筛机异常状态识别能力;针对激振器、轴承等关键部件的故障演化规律,通过分析筛机振动响应与结构损伤之间的关联关系,建立故障特征数据库和预测模型,可实现对筛机潜在故障的提前识别,为预测性维护提供决策依据可实现筛分过程关键指标的在线评估与趋势预测,为运行参数优化和故障预警提供依据[68]。

从筛分效率预测到设备健康状态评估,数据驱动方法正在逐步贯通筛分过程的全技术链条。尽管当前研究仍面临训练样本有限、模型泛化能力不足等制约,但随着现场数据的持续积累与算法迭代优化,数据驱动的筛分性能预测有望在更广泛的工业场景中实现工程化应用,为筛分过程的智能调控提供决策基础。

2.3.3 数字孪生与智能决策

数字孪生技术最初广泛应用于航空航天、智能制造等领域,近年来逐渐向矿山装备与选矿过程拓展,其核心是利用实时监测数据驱动虚拟模型持续更新,从而实现物理系统运行状态的动态映射与预测分析。对于工况复杂且运行连续的筛分系统而言,数字孪生为设备状态评估、运行优化及智能调控提供了新的技术路径[69]。

目前,数字孪生技术在筛分领域的应用仍处于探索之中。部分大型现代化选矿厂已开始利用工业物联网平台构建设备运行监测系统,实现振动参数、轴承温度及设备状态等信息的实时采集与可视化管理[70]。然而,能够同时融合颗粒动力学机理模型、筛机结构模型及生产运行数据,并实现自主调控的数字孪生系统仍处于实验室理论探索与半工业试验阶段,其工业化应用尚处于研究与验证阶段。

当前筛分过程的数字孪生研究面临的主要挑战是现场工况具有较强的不确定性和非稳态特征。虽然机器学习模型能够建立筛分参数与性能指标之间的映射关系,实现筛分效率和设备状态的快速预测,但当运行工况超出训练数据覆盖范围时,模型预测精度仍可能出现明显下降,从而影响数字孪生系统的稳定性与可靠性。同时,工业振动筛通常具有较大的结构质量和振动惯量,其振幅和频率等关键参数难以实现高频率、连续性的动态调节。过于频繁的参数变化不仅可能增加驱动系统负荷,还可能对设备结构稳定性产生不利影响。因此,筛分过程的智能调控需要兼顾控制效果与设备安全运行要求,在调控策略设计中需要充分考虑筛机的动力学响应特征。此外,筛分现场普遍处于高粉尘、高湿度及强振动等复杂环境,对传感器、机器视觉系统及在线监测装置的长期稳定运行提出了较高要求。感知数据的准确性和完整性直接影响数字孪生模型的运行效果,因此,提高复杂工况下监测系统的可靠性与抗干扰能力,也是推动智能调控技术工程化应用的重要前提。

综上所述,数字孪生与智能调控为筛分过程优化提供了新的研究思路,但其大规模工业应用仍面临模型精度、数据质量、控制策略及装备适应性等方面的挑战。

3 有色金属矿物筛分技术展望

面对未来有色金属矿产资源开发向低品位、复杂共伴生矿及难选矿转移的趋势,未来筛分技术的发展将不再局限于提高单台设备的处理能力和筛分效率,而是更加注重对复杂矿物性质的适应能力以及与现代选矿工艺的深度融合。针对微细粒及黏湿物料等典型难筛分物料,筛分装备将持续向高精度分级、自适应调节和低碳运行方向发展,为低品位矿产资源的高效清洁利用提供助力。

随着智能矿山和智能选矿厂建设的不断推进,筛分环节在选矿流程中的作用将由传统的独立的分级环节逐步向全流程协同运行的重要环节转变。尽管当前筛分智能化仍面临模型泛化能力不足、执行机构响应滞后及极端工况下感知可靠性差等工程瓶颈,但随着信息传感技术与人工智能的发展,未来筛分环节获取的粒度组成、处理能力及运行状态等信息将得到更加充分的利用,并参与破碎、磨矿及后续选别工序的运行优化,从而实现不同生产环节之间的数据共享与信息协同。

在我国“双碳”目标和绿色矿山建设要求的推动下,绿色低碳也将成为筛分技术发展的重要方向。未来筛分装备设计将更加注重轻量化设计、能耗控制、资源节约与环境友好,通过优化激振系统、提高筛面使用寿命等措施减少能源消耗。同时,低粉尘、低噪声及节水型筛分工艺将得到进一步推广,特别是在缺水地区和生态环境敏感区域,干法筛分及其相关配套技术将获得更加广泛的应用,从而推动有色金属选矿过程向绿色化、低碳化方向发展。

总体而言,未来有色金属矿物筛分技术将在保障低品位矿产资源高效利用、提升选矿过程资源利用效率以及推动绿色矿山建设等方面发挥更加重要的作用。随着筛分装备、材料技术及信息技术的进一步成

熟，筛分将在低品位矿产资源高效清洁利用和智能矿山建设中发挥日益关键的核心支撑作用。

4　结论

笔者围绕有色金属选矿过程中筛分技术的发展现状与研究进展，系统分析了当前筛分作业面临的主要挑战，综述了新型筛分技术、数值仿真方法及智能化探索的发展情况，并对未来发展趋势进行了讨论。主要结论如下：

1）随着有色金属资源开发逐步向低品位、复杂共伴生及难选矿方向转移，原矿细粒化、高含泥量和高含水率等特征日益突出，对筛分过程提出了更高要求。细粒物料比例增加会减弱料层松散与分层效果，降低颗粒透筛概率；黏湿物料在水分介导下形成的液桥作用增强了颗粒间及颗粒与筛面的黏附作用，容易引发颗粒团聚和筛孔堵塞现象；大型化生产条件下，筛分装备还面临处理能力、筛分效率与运行可靠性之间的协调问题。

2）针对复杂矿物筛分需求，新型筛分装备技术不断发展。高频振动筛分通过强化颗粒运动提高细粒分级效率；弹性筛分利用柔性筛面的弹性变形与局部高加速度效应，有效改善难筛物料的透筛性能并缓解筛孔堵塞；等厚筛分通过优化料层分布提高筛面利用率和处理能力；复合激励筛分则通过多维振动强化颗粒分层与透筛过程。不同筛分技术针对不同工况展现出各自优势，为复杂条件下筛分效率提升提供了技术支撑。

3）数值仿真技术已成为筛分机理研究和装备优化的重要工具。DEM能够揭示颗粒运动、分层及透筛等微观过程，FEM和MBD可用于分析筛机结构响应、动力学特性及可靠性问题。与此同时，DEM-FEM、DEM-MBD等耦合方法进一步提高了筛分过程模拟的真实性，但计算成本较高。近年来，结合机器学习建立代理模型的方法为复杂筛分系统的快速预测和参数优化提供了新的解决思路。

4）随着工业物联网、机器视觉和人工智能技术的发展，筛分过程正逐步向数字化和智能化方向演进。在线监测技术实现了设备状态与物料特性的实时获取，数据驱动模型提高了筛分性能预测与运行评估能力，数字孪生技术则为筛分系统的动态分析和优化控制提供了新的研究框架。但目前相关技术在模型泛化能力、数据质量以及复杂工况适应性等方面仍面临一定挑战，其大规模工业应用仍有待进一步研究与验证。

5）未来有色金属矿物筛分技术的发展将由单一设备性能提升，逐步转向对复杂矿物适应能力与选矿流程协同优化的综合提升。在低品位、复杂共伴生及难选矿资源开发背景下，筛分装备将向高精度分级、自适应运行及低能耗方向持续发展。同时，随着信息感知与智能分析技术的发展，筛分过程状态信息将在破碎、磨矿及后续选别等环节的优化中发挥更重要作用，此外，在绿色矿山与“双碳”目标约束下，低能耗、低污染及干法筛分等绿色筛分技术将成为重要发展方向。

参考文献

[1] 沈政昌，王海北，王华，等. 我国镍钴锂钒产业链发展现状、问题与对策研究[J]. 中国工程科学，2025，27(6)：165-179.
Shen Zhengchang，Wang Haibei，Wang Hua，et al. A review of China′s nickel，cobalt，lithium，and vanadium industry chain：current status，challenges，and prospects[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(6)：165-179.

[2] 段晨龙，潘淼，黄涛，等. 黏湿细粒矿物高效智能筛分研究进展与展望[J]. 中国矿业大学学报，2025，54(6)：1310-1325.
Duan Chenlong，Pan Miao，Huang Tao，et al. Research advances and perspectives on efficient intelligent screening of viscous fine-grained minerals[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(6)：1310-1325.

[3] 邱显扬，高文远. 我国锡矿选矿技术现状与发展趋势[J]. 有色金属科学与工程，2020，11(2)：1-8.
QIU Xianyang，GAO Wenyuan. Current status and development trend of tin ore beneficiation technology in China[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2020，11(2)：1-8.

[4] 黄安平，黄华礼，唐志波，等. 提高铅锌选厂技术指标的研究及实践[J]. 有色金属(选矿部分)，2023(4)：100-106.
Huang Anping，Huang Huali，Tang Zhibo，et al. Research and practice on improving technical index of lead and zinc concentrator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2023(4)：100-106.

[5] Shanmugam B K，Vardhan H，Raj M G，et al. Experimental analysis of vibratory screener efficiency based on density variation for screening coal and iron ore[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization，2024，44(3)：327-341.

[6] 王维楠. 干法深度弛张筛分过程颗粒-筛面动态交互作用研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
Wang Weinan. Study on particle-screen dynamic interaction in dry deep flip-flow screening process[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2023.

[7] Hou Xu, Wang Weinan, Pan Jiahao, et al. Optimization of flip-flow screen plate based on DEM-FEM coupling model and screening performance of fine minerals[J]. Minerals Engineering, 2024, 211: 108694. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108694.

[8] 王新文,庞锟锋,于驰. 改革开放以来我国振动筛分设备的发展[J]. 选煤技术,2019(1):37-42.
Wang Xinwen, Pang Kunfeng, Yu Chi. Development of the domestic vibrating screening equipment since the inception of reform and opening up[J]. Coal Preparation Technology, 2019(1): 37-42.

[9] 于驰. 振动弛张筛动力学稳定性及弹性筛分机理的研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2022.
Yu Chi. Research on dynamic stability and elastic screening mechanism of vibrating flip-flow screen[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2022.

[10] Pan Miao, Duan Chenlong, Tang Ligang, et al. Kinematics of a novel screen surface and parameter optimization for steam coal classification[J]. Powder Technology, 2020, 364: 382-391.

[11] 肖仪武. 中国选矿工艺矿物学发展历程、研究现状与展望[J]. 有色金属(选矿部分),2019(5):6-8.
Xiao Yiwu. Development history, research status and outlook of process mineralogy in China[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 6-8.

[12] 赵武壮,柳新悦. 新质生产力与我国有色金属产业高质量发展的关系:以铅锌产业为例[J]. 中国矿业,2024,33(5):58-63.
Zhao Wuzhuang, Liu Xinyue. Analysis of the relationship between new quality productive forces and the high-quality development of China's nonferrous metals industry: taking the lead zinc industry as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 58-63.

[13] Frausto J J, Ballantyne G R, Runge K, et al. The effect of screen versus cyclone classification on the mineral liberation properties of a polymetallic ore[J]. Minerals Engineering, 2021, 169: 106930. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106930.

[14] 于世杰. 强振动驱动粘湿矿物弹性细粒筛分机理与过程强化[D]. 徐州:中国矿业大学,2025.
Yu Shijie. Screening mechanism and process strengthening of elastic fine particles of sticky and wet minerals driven by strong vibration[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2025.

[15] 胡泽伟,童雄,马原琳,等. 老挝某高硫难选铜锌锡矿石的工艺矿物学研究[J]. 金属矿山,2025,54(4):95-102.
Hu Zewei, Tong Xiong, Ma Yuanlin, et al. Study on process mineralogy of a high-sulfur refractory copper-zinc-tin ore in Laos[J]. Metal Mine, 2025, 54(4): 95-102.

[16] 刘思亮,王峰,周鑫. 多金属难选锌锡矿选矿工艺技术研究[J]. 矿产勘查,2021,12(10):2161-2168.
Liu Siliang, Wang Feng, Zhou Xin. Study on mineral processing technology of polymetallic refractory zinc-tin ore[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(10): 2161-2168.

[17] 皮溅清,王明理,杨汝意,等. 颗粒湿法分级技术及氢氧化铝精准分级的研究进展[J]. 过程工程学报,2024,24(6):647-659.
Pi Jianqing, Wang Mingli, Yang Ruyi, et al. Advances in wet particle size-grading technologies and precise grading of aluminum hydroxide[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(6): 647-659.

[18] 沈丽娟,陈建中,胡言凤. 细粒矿物分级设备的研究现状及进展[J]. 选煤技术,2010(3):65-69.
Shen Lijuan, Chen Jianzhong, Hu Yanfeng. Current research situation and development of classification equipment for small sized mineral[J]. Coal Preparation Technology, 2010(3): 65-69.

[19] 曾小辉,罗祖俊,饶金山. 高频振动细筛在铜多金属矿中的应用[J]. 材料研究与应用,2022,16(1):149-155.
Zeng Xiaohui, Luo Zujun, Rao Jinshan. Application of high frequency fine screen in copper polymetallic ore[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(1): 149-155.

[20] 孙继亮,郑青,李邦宪,等. 废弃混凝土砂粉再利用分选技术初探[J]. 水泥工程,2022(3):83-85.
Sun Jiliang, Zheng Qing, Li Bangxian, et al. A preliminary study on the reuse and separation technology of waste concrete sand powder[J]. Cement Engineering, 2022(3): 83-85.

[21] Dong Kejun, Wang Bo, Yu Aibing. Modeling of particle flow and sieving behavior on a vibrating screen: from discrete particle simulation to process performance prediction[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(33): 11333-11343.

[22] 张慧,郭谨铭,韩远燕,等. 某细粒级易泥化铜矿选别试验研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):95-100.
Zhang Hui, Guo Jinming, Han Yuanyan, et al. Experimental study on flotation of a fine-grained and easily muddled copper mine[J]. China Mine Engineering, 2025, 54(6): 95-100.

[23] 唐建,熊晓燕. 潮湿细粒煤团聚物与柔性弛张筛筛板碰撞解聚特性研究[J]. 太原理工大学学报,2022,53(6):1168-1175.
Tang Jian, Xiong Xiaoyan. Research on collision depolymerization of moist fine coal agglomerate onto flexible flip-flow screen panel[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(6): 1168-1175.

[24] 焦杨，章新喜，孔凡成．湿煤聚团碰撞破碎模式及分离机制[J]．中国矿业大学学报，2015，44(1)：156-163.
Jiao Yang，Zhang Xinxi，Kong Fancheng. Impact failure patterns and separation mechanics of the wet coal agglomerates[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2015，44(1)：156-163.

[25] 赵跃民，陈惜明，朱红，等．潮湿细粒物料的粘附模型研究[J]．煤炭学报，2000，25(4)：430-433.
Zhao Yuemin，Chen Ximing，Zhu Hong，et al. Study on moist fine materials adhering model[J]. Journal of China Coal Society，2000，25(4)：430-433.

[26] 孙刚．大型潮湿细粒物料筛分机的研制和应用[J]．煤炭加工与综合利用，2004(1)：18-20.
Sun Gang. Research and application of good-sized screen for wet materials[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization，2004(1)：18-20.

[27] 李洪喜．曲轴连杆式弛张筛动力学及筛分特性研究[D]．徐州：中国矿业大学，2022.
Li Hongxi. Study on dynamics and screening characteristics of crank-link flip-flow screen[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2022.

[28] 张青召，马胜钢，刘兰荣．大型直线振动筛启动过程的仿真分析[J]．矿山机械，2012，40(5)：89-92.
Zhang Qingzhao，Ma Shenggang，Liu Lanrong. Simulation analysis on start-up process of large linear vibrating screen[J]. Mining & Processing Equipment，2012，40(5)：89-92.

[29] Peng Liping，Liu Chusheng，Song Baocheng，et al. Improvement for design of beam structures in large vibrating screen considering bending and random vibration[J]. Journal of Central South University，2015，22(9)：3380-3388.

[30] Peng Liping，Liu Chusheng，Li Jun，et al. Static-deformation based fault diagnosis for damping spring of large vibrating screen[J]. Journal of Central South University，2014，21(4)：1313-1321.

[31] 赵环帅．高频振动筛的发展现状及今后重点研究方向[J]．选煤技术，2019(2)：1-7，13.
Zhao Huanshuai. State-of-the-art of the development of high-frequency vibrating screen and the key research direction in the future[J]. Coal Preparation Technology，2019(2)：1-7，13.

[32] 张帆，沈楼燕，余浔，等．刚果(金)某铜矿碎磨分级工艺研究[J]．现代矿业，2025，41(11)：109-113.
Zhang Fan，Shen Louyan，Yu Xun，et al. Study on crushing and grinding classification process of a copper mine in Congo(DRC)[J]. Modern Mining，2025，41(11)：109-113.

[33] 王肖，刘于兵，林洪权，等．叠层高频细筛在麦地掌选煤厂技术改造中的应用[J]．煤炭加工与综合利用，2026(1)：47-49，53.
Wang Xiao，Liu Yubing，Lin Hongquan，et al. Application of laminated high frequency fine screen in technical transformation of Maidizhang Coal Preparation Plant[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization，2026(1)：47-49，53.

[34] 刘初升，赵跃民．潮湿细粒煤干法筛分理论和设备的发展[J]．矿山机械，1997，25(10)：35-37，63-64.
Liu Chusheng，Zhao Yuemin. Dry screening theory and screen development moist fine coal[J]. Mining & Processing Equipment，1997，25(10)：35-37，63-64.

[35] 赵跃民，刘初升．弹性筛面动力学及难筛分物料的透筛机理[J]．中国有色金属学报，1999，9(1)：129-132，138.
Zhao Yuemin，Liu Chusheng. Dynamics of elastic screen surface and penetrating mechanism of difficult screening material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，1999，9(1)：129-132，138.

[36] 赵跃民，刘初升．干法筛分理论及应用[M]．北京：科学出版社，1999.
Zhao Yuemin，Liu Chusheng. Theory and application of dry screening[M]. Beijing：Science Press，1999.

[37] Wang Weinan，Duan Chenlong，Jiang Haishen，et al. Mechanism of overcoming plugging and optimization of parameters for rigid-flexible coupled elastic screening of moist fine coal[J]. Powder Technology，2020，376：113-125.

[38] Hou Xu，Mao Pengfei，Zhang Songxue，et al. Study on impact mechanical characteristics and screening performance of fine coal during flip-flow screening process[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization，2024，44(12)：2060-2079.

[39] 赵光辉，施长玉，李志军，等．曲轴连杆式大型弛张筛关键部件动态特性[J]．洁净煤技术，2024，30(增刊1)：672-677.
Zhao Guanghui，Shi Changyu，Li Zhijun，et al. Vibration characteristics of key components of large crank connecting rod type flip-flow screen[J]. Clean Coal Technology，2024，30(S1)：672-677.

[40] 潘淼，段晨龙，石巍，等．刚柔耦合弹性筛分机理与动力煤3 mm分级试验[J]．洁净煤技术，2019，25(3)：43-48.
Pan Miao，Duan Chenlong，Shi Wei，et al. Mechanism of rigid-flexible coupling elastic screening and 3 mm classification test of steam coal[J]. Clean Coal Technology，2019，25(3)：43-48.

[41] 张宇龙．复杂激励弹性筛面运动特性与物料空间分布研究[D]．徐州：中国矿业大学，2023.
Zhang Yulong. Study on kinematic characteristics of elastic screen surface and spatial distribution of material

under complex excitation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[42] Jiang Haishen, Yu Shijie, Pan Miao, et al. Effect of excitation parameters on motion characteristics and classification performance of rigid-flexible coupled elastic screen surface for moist coal[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(3): 1196-1208.

[43] Yu Shijie, Guo Peng, Li Shijun, et al. Effect of excitation parameters on screening performance of elastic screen surface with variable vibration intensity[J]. Powder Technology, 2023, 419: 118358. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118358.

[44] 江海深. 潮湿煤炭变振幅等厚弹性深度筛分机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
Jiang Haishen. Study on elastic depth screening mechanism of wet coal with variable amplitude and equal thickness[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[45] 黄龙. 多段变倾角等厚筛运动学特性及筛分过程协同优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
Huang Long. Kinematic characteristics of multi stage equal thickness screen with variable inclination and co-optimization of screening process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[46] 乔金鹏. 变振幅等厚筛6 mm筛分试验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(3): 251-253.
Qiao Jinpeng. Study on 6 mm screening of thickness screen with variable amplitude[J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 251-253.

[47] 张佳佳. 香蕉筛在某铁选厂的应用及优化[J]. 现代矿业, 2022, 38(11): 183-185, 188.
Zhang Jiajia. Application and optimization of banana sieve in an iron concentrator[J]. Modern Mining, 2022, 38(11): 183-185, 188.

[48] Yu Shijie, Guo Peng, Li Shijun, et al. Investigation on enhancing classification of moist material by variable vibration intensity elastic screening[J]. Advanced Powder Technology, 2024, 35(1): 104318. DOI: 10.1016/j.apt.2023.104318.

[49] 李占福. 平动与摆动复合振动筛分理论的研究与参数优化[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
Li Zhanfu. Study on screening theory of translation and swing combined vibration and parameter optimization[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.

[50] 孙刚, 阙松涛, 李英俊, 等. 大型抛射筛机械结构及运动特性[J]. 煤矿设计, 1999, 31(2): 24-26.
Sun Gang, Que Songtao, Li Yingjun, et al. Mechanical structure and motion characteristics of large-scale projectile screen[J]. Coal Engineering, 1999, 31(2): 24-26.

[51] 王振乾. 超静定网梁体特大型振动筛动力学及筛分特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
Wang Zhenqian. Study on dynamics and screening characteristics of oversize vibrating screen with statically indeterminate mesh beam structure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[52] Chen Xizhong, Wang Lige, Morrissey J P, et al. DEM simulations of agglomerates impact breakage using Timoshenko beam bond model[J]. Granular Matter, 2022, 24(3): 74. DOI: 10.1007/s10035-022-01231-9.

[53] 赵啦啦. 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.
Zhao Lala. Numerical simulation of particles flow on the vibrating screen plate using a 3D discrete element method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(3): 414-419.

[54] Zhang Songxue, Wang Weinan, Zhao Wenchen, et al. Kinetic screening process model under the gradual change of screen plate opening rate and its influence on the screening effect[J]. Chemical Engineering Science, 2026, 320: 122474. DOI: 10.1016/j.ces.2025.122474.

[55] 翟酉湘, 熊晓燕, 唐建. 湿煤颗粒聚团碰撞解聚的离散元模拟研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(12): 167-171.
Zhai Youxiang, Xiong Xiaoyan, Tang Jian. Impact disaggregation simulation of wet coal agglomerate using discrete element method[J]. Coal Engineering, 2019, 51(12): 167-171.

[56] 乔金鹏. 粒群振动离析动理学及变轨迹筛分过程研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
Qiao Jinpeng. Study on kinematics of particle group vibration segregation and variable trajectory screening process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[57] He Deyi, Liu Chusheng. Study on screening mechanism and numerical simulation for crashed concrete particles by using DEM[J]. Separations, 2022, 9(6): 153. DOI: 10.3390/separations9060153.

[58] Wang Wenyun, Cui Feng, Li Xiwen. FEM modal analysis of double-layer linear vibrating screen[J]. Machinery & Electronics, 2013, 31(6): 73-77.

[59] Zhang Zhihong, Tang Jian, Xiong Xiaoyan. Load characteristics of screen panels in vibrating flip-flow screens[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2024, 52(12): 10363-10388.

[60] 黄卓. 2DYS3075型圆振动筛动态特性分析及疲劳寿命预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Huang Zhuo. Dynamic characteristics analysis and fatigue life prediction of 2DYS3075 circular vibrating

screen[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[61] 江海深，杨然，刘润宇，等. 1 mm弹性筛分过程筛面挠曲形态与筛孔空间变形规律[J]. 煤炭学报，2024，49(12)：4955-4963.
Jiang Haishen, Yang Ran, Liu Runyu, et al. Deflection of screen surface and spatial deformation law of screen apertures during 1 mm elastic screening[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4955-4963.

[62] 石巍，侯旭，王维楠，等. 基于DEM-FEM的弹性筛面材料特性动态设计与应用[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(10)：12-21，27.
Shi Wei, Hou Xu, Wang Weinan, et al. Dynamic design and application of elastic screen plate material characteristics based on DEM-FEM[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(10): 12-21, 27.

[63] 王星宇，赵环帅. 振动筛智能制造技术的研究进展[J]. 智能制造，2024(5)：37-41.
Wang Xingyu, Zhao Huanshuai. Research progress of intelligent manufacturing technology of vibrating screen[J]. Intelligent Manufacturing, 2024(5): 37-41.

[64] 张泽琳. 基于机器视觉的煤质快速分析方法研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2014.
Zhang Zelin. Research on rapid analysis method of coal quality based on machine vision[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[65] 黄涛，于洋，徐文彬，等. 大型振动筛运行状态在线监测系统研究与应用[J]. 中国煤炭，2024，50(4)：91-96.
Huang Tao, Yu Yang, Xu Wenbin, et al. Research and application of running status online monitoring system for large-scale vibrating screen[J]. China Coal, 2024, 50(4): 91-96.

[66] 段晨龙，江海深，赵啦啦，等. 矿物筛分智能化技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报，2024，49(5)：2101-2120.
Duan Chenlong, Jiang Haishen, Zhao Lala, et al. Research progress and prospect on intelligent mineral screening technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2101-2120.

[67] 徐峰. 基于机器学习的交叉筛智能筛分过程预测模型研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2024.
Xu Feng. Research on prediction model of intelligent screening process of cross screen based on machine learning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

[68] 沈国浪，童昕，李占福. 应用GA-BP神经网络优化平摆复合振动筛的振动参数[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2018，39(4)：509-513.
Shen Guolang, Tong Xin, Li Zhanfu. Application of GA-BP to optimize vibration parameters of vibrating screen of translation-swing composite motion[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2018, 39(4): 509-513.

[69] 郭鲜平. 煤炭洗选系统智能化自动控制优化设计[J]. 能源与节能，2020(10)：110-111.
Guo Xianping. Intelligent automatic control optimization design of coal washing system[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(10): 110-111.

[70] 汪维. 交叉筛数字孪生模型及控制系统的设计与实现[D]. 徐州：中国矿业大学，2024.
Wang Wei. Design and implementation of digital twin model and control system for cross screen[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.

(本文编辑 刘水红)

【缅怀寄语】

倏忽之间，孙传尧院士离开我们已经一年。时间并未冲淡我们对孙先生的怀念，反而让我们愈发深切地感受到，他对我国矿物加工的影响早已融入了行业发展的脉络中。

孙先生是我国矿物加工领域的领军人物，始终以国家战略需求为导向，毕生深耕于矿产资源开发利用一线，在选矿基础理论研究、技术装备研发、创新工艺设计和工程实践等方面硕果累累。孙先生以深厚的学术造诣和长远的战略眼光，为提升我国矿产资源开发利用科技水平、保障矿产资源供应安全作出了卓越贡献。

孙先生长期担任煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室学术委员会主任，是中国矿业大学矿物加工学科的战略咨询专家，为我校学科布局、平台建设、科技攻关和人才培育悉心擘画，倾注了大量心血。孙先生对我的个人发展也是关怀备至，在我学术生涯的关键时刻，孙先生一次次给予悉心关怀和指导提携，甘为人梯、奖掖后学。

我们对孙先生的追思，不仅是缅怀一位杰出的科学家，更是在追寻勇于创新、科技报国的科学精神与大师风范。孙先生胸怀祖国、敢为人先、严谨治学、淡泊名利的老一辈科学家精神将永远激励我们奋进前行！

纸短情长，敬意难尽。向孙先生致以最崇高的敬意！孙先生精神永励后学！

——赵跃民