doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.017

高端选矿装备发展现状及展望

沈政昌[1],何建成[2],杨义红[3],陈 帮[1],王青芬[2],王 旭[1],
史烨弘[1],张 明[2],余 刚[1],成 磊[2],魏红港[2]
(1. 矿冶科技集团有限公司,北京 100160;
2. 北矿机电科技有限责任公司,北京 100160;
3. 北矿科技股份有限公司,北京 100160)

摘 要: 我国矿产资源具有“贫、细、杂、散”的禀赋特征,在矿山规模化、智能化转型进程中,高端选矿装备已成为矿业高质量发展的核心支撑。然而,高端成套装备长期依赖进口,核心技术受制于人,严重制约我国矿山建设高质量发展。为了系统厘清国内选矿装备技术现状与差距,明确产业升级路径,本文依据对外依存度与核心性能指标,将国产选矿装备划分为四个层级:具有国际领先水平的自主装备;国内外技术并行同步发展的装备;已开发但性能与国外尚有一定差距的装备;发展水平相对落后的装备。结合国家发展战略,提出高效化、大型化、低碳绿色化、智能化、专属化及强化颠覆性技术创新等发展方向。

关键词: 高端选矿装备;国产化;技术现状;未来展望
中图分类号: TD928.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0189-07

Development Status and Future Outlook of High-end Mineral Processing Equipment

Shen Zhengchang[1], He Jiancheng[2], Yang Yihong[3], Chen Bang[1], Wang Qingfen[2], Wang Xu[1],
Shi Yehong[1], Zhang Ming[2], Yu Gang[1], Cheng Lei[2], Wei Honggang[2]
(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China;
3. BGRIMM Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: China's mineral resources are characterized by low grade, fine dissemination, complex association and scattered distribution. During the large-scale and intelligent transformation of mines, high-end mineral processing equipment serves as the core support for the high-quality development of the mining industry. However, China has long relied on imports for complete sets of high-end equipment and been restricted in core technologies, which seriously restricts the construction of green and intelligent mines in China. To systematically clarify the technical status and gaps of domestic mineral processing equipment and identify the path for industrial upgrading, this paper classifies domestic mineral processing equipment into four grades in accordance with import dependence and core performance indicators: equipment with relatively backward development level, equipment that can be independently developed but has generational gaps in performance, equipment with technical levels equivalent to international counterparts developed in parallel, and independently developed equipment reaching the world-leading level. Combined with national development strategies, development orientations including high efficiency, large scale, low-carbon and green development, intelligent automation, customization for specific minerals, as well as strengthen disruptive technological innovation are proposed.

Key words: high-end mineral processing equipment; localization; technical status; future outlook

收稿日期: 2026-06-28
基金项目: 中国工程院战略咨询项目(2026-XZ-086)
作者简介: 沈政昌(1960—),男,江苏常熟人,博士,中国工程院院士,正高级工程师,博士生导师,主要从事选矿技术研究及设备研制。
通信作者: 何建成(1986—),男,山东莱芜人,博士,正高级工程师,主要从事细磨超细磨技术研究及设备研制。

0 引言

选矿装备是矿物加工全流程设备总称，分为主体工艺装备与辅助配套装备两大类。主体装备包含破碎、磨矿、分级、分选、浓密脱水、在线检测仪表等设备。根据矿石嵌布特征与精矿产品指标要求，主流分选工艺分为浮选、重选、磁选、电选四大体系；针对黄金、锂、钛、稀土等特殊矿产，衍生出浸出槽、氧化槽、复合力场预选机、智能拣选设备等专用装备[1-3]。

国内矿产普遍具有低品位、细粒嵌布、多金属共生、矿体分散等特征，传统中小型选矿装备存在能耗高、细粒矿物回收率低、固废处置能力不足等问题，部分大型高端成套装备长期依赖海外厂商，制约绿色智能矿山建设[4]。当前国内矿业加速向千万吨级集约化选厂、深部开采、全流程无人化方向转型，矿石处理规模持续扩大、分选难度同步提升，对超大处理量、低能耗、自适应智能选矿装备的需求持续激增[5]。本文系统对标国际龙头装备发展情况，按照技术梯队分层梳理国内装备性能差距，剖析各品类装备现存短板成因，讨论中长期技术突破目标，明确产业升级核心方向，可为国内选矿装备自主化研发与矿山智能化改造提供理论参考与工程依据。

1 高端选矿装备发展现状

国内各种选矿装备发展水平不一，根据对外依存度及关键指标情况可以分为四类：一是具有国际领先水平的自主装备；二是国内外技术并行同步发展的装备；三是已开发但性能与国外尚有一定差距的装备；四是发展水平相对落后的装备[2,6]。

1.1 具备国际领先水平的自主装备

该类设备国内技术全面领跑，形成专利壁垒与成套出口优势，代表性设备主要有：

1)大型浮选机

浮选机是有色金属领域应用最为广泛的选矿装备，容积是浮选机技术水平重要表征参数。用于处理常规粒级低品位矿石的大型和超大型浮选机，国内外都发展到容积600 m^3及其以上的规格。其中，矿冶科技集团有限公司自主开发的最大规格浮选机容积达到800 m^3，整体技术处于国际领先水平[7-8]。

2)高梯度磁选机

中国研制的高梯度磁选机走在世界前列，以国内自主开发的SLon立环脉动高梯度磁选机最具代表性，其最大直径达到8 000 mm，处理能力达到2 500 t/h，可满足各大、中型矿山不同处理量需求[9-10]。

3)旋流器

国内水力分级设备研发应用成效突出，相关知名企业与科研机构持续针对筒体结构、给水布水系统开展优化改良，多款产品分级精度、处理量等核心指标已达到较高水准，除传统选矿领域外，装备逐步拓展至各类新兴行业；但对标国际高端产品，国内水力分级设备在超细粒分选稳定性、耐磨件寿命、连续作业的分级精度一致性等细分维度仍存在一定短板[11]。

1.2 国内外技术并行同步发展的装备

该类装备国内已实现大型化、智能化对标，核心指标与海外持平，部分应用场景具备成本优势，代表性设备主要有：

1)自磨/半自磨机

自磨/半自磨机的设备规格是评判其发展水平的重要指标之一。目前，国际知名半自磨机厂商的产品最大规格达到Φ12.8 m，装机功率28 MW。国外对半自磨工艺流程持续优化，经过长期工程实践总结出SABC(半自磨＋球磨＋顽石破碎)、SAB(半自磨＋球磨)等多种成熟工艺，可根据矿石性质与磨矿指标灵活调整，有效提升磨矿效率与选矿产品质量。与此同时，国外设备普遍配套智能化、自动化控制系统，提升了设备操作便利性与整机运行效率。国内相关技术起步相对较晚，目前已具备大规格半自磨机制造能力，国内企业研制的Φ13.4 m×8.8 m半自磨机，单机装机功率为32 MW；设备结构持续优化，筒体耐磨性能、整机可靠性与运行稳定性大幅提升，在主驱动系统、电控系统、稀油润滑系统等关键部件上实现技术突破。工艺应用层面，国内结合矿山实际工况，形成了本土化的SABC工艺流程，有效化解顽石难磨物料积聚问题，磨矿效率得到明显提升[2]。

2)球磨机

球磨机是矿山磨矿工段的核心通用设备。近些年围绕节能降耗的目标，球磨机在传动形式、衬板结构、磨矿介质材质、筒体结构等方面均取得长足进步。当前国际主流大型球磨机规格为Φ8.50 m×13.4 m，装机功率22 MW；国内已在研的大型溢流型球磨机规格达到Φ8.84 m×14.5 m，装机功率25 MW。

3)永磁类磁选装备

国内永磁磁选装备可以适配各类矿物的分选工况：大型永磁磁滚筒规格Φ1 500 mm×3 500 mm，筒表磁场强度最高6 000 Gs，最大入选粒度达到400 mm，多用于磁铁矿等强磁性矿石的预选抛尾；大型筒式干选机规格Φ1 200 mm×4 000 mm，分选粒度0～30 mm，磁场强度6 000 Gs；强磁筒式干选机规格

Φ600 mm×3 000 mm，磁场强度可以达到10 000 Gs以上，适用于0～10 mm弱磁性矿物的干式分选；大型湿式筒式磁选机规格1 800 mm×6 000 mm，筒表磁场6 000 Gs，多用于阶段磨矿—阶段选别、铁尾矿磁性铁回收以及重介质工艺中磁性介质回收，适宜处理0～10 mm矿浆。

4）在线品位分析仪

金矿低品位金元素的矿浆在线品位分析技术，此前国内长期存在短板。国外厂商的在线矿浆品位分析仪，金元素最低检出限达到0.2 g/t，但国内黄金矿山此前鲜有规模化应用。矿冶科技集团有限公司针对超低品位矿浆在线检测难题，研发了矿浆深度前处理、对数螺线曲面分光、宽能X射线探测成套技术；自研的矿浆研磨-循环一体化前处理装置，可将矿浆颗粒研磨至化验室标准细度并形成均匀待测矿浆，消除了颗粒沉降、粒度偏粗造成的检测误差。对数螺线曲面分光晶体属于波长色散X荧光的固定通道单色分光结构，光路优化后分光效率显著提升，可解决金元素Lα谱峰荧光产额低、信号弱的难题，该技术已应用于有色金属常规金属元素在线检测，分析精度可满足100×10^{-6} g/t以上元素的测定要求。宽能X射线探测技术能够同步采集金元素Kα、Lα特征峰、基体元素特征谱峰以及水体散射信号，是适配金矿在线测金的新型技术路径。

5）工艺矿物学分析仪器

随着扫描电镜（SEM）、能谱仪（EDS）以及计算机算法的迭代完善，矿物自动定量分析技术快速发展，自动矿物学体系逐步成型。该类设备能够全自动测定矿物种类、含量、粒度、解离度、嵌布特征与元素赋存状态，检测结果的准确度和重复性大幅提高。国外代表性设备为澳大利亚CSIRO研发的QEMSCAN，以及昆士兰大学JKMRC开发的MLA系统。

我国工艺矿物学自动分析技术研发起步较晚，矿冶科技集团有限公司研制出国内首款拥有完全自主知识产权的工艺矿物学自动分析仪BPMA。

6）实验室自动分析仪

矿石样品自动化制备设备可自动完成样品缩分、破碎、研磨工序，搭配机器人流水线，直接制备出可供仪器检测的粉末试样。

国际主流厂商为ESSA。国内力鸿智信依托LIMS实验室管理系统，结合破碎缩分成套设备，实现了煤炭行业样品化验全流程自动化；上海美诺福将钢铁、水泥领域的自动化制样技术拓展至有色金属行业，可提供破碎、研磨、压片，以及和X射线荧光仪联动检测的整套方案。矿冶科技集团有限公司开展了矿浆在线智能取样分析设备的研发，可搭建选矿在线智能化验室，依靠自动化装置完成矿浆品位的精准实时测定。

1.3　性能与国外尚有差距的装备

该类设备国内具备制造能力，但单位能耗、处理量、稳定性、智能化程度不及国际先进水平，该类代表性设备主要有：

1）立式螺旋搅拌磨机

立式螺旋搅拌磨机最初由日本Kubota塔磨机公司研发制造，后续广泛应用于金属矿业、冶炼、化工等行业。日本Nippon-Eirich公司生产的立式螺旋搅拌磨机命名为TowerMill，研磨产品细度介于45～150 μm，相较于卧式球磨机，单位能耗可降低30%～40%。为抢占大型立式螺旋搅拌磨机市场，Eirich与ThyssenKrupp合并后研发推出Velix®磨机，代表性规格装机功率达到4 476 kW（6 000 HP）。Metso公司旗下VERTIMILL立式磨机，主流机型装机功率可达到5 222 kW（7 000 HP）[12]。

国内立式螺旋搅拌磨机技术与装备研发近年发展迅速，早期主要生产单位为长沙矿冶研究院，目前矿冶科技集团有限公司、中信重工等企业持续推进相关技术研发与产品推广，3 000 kW及以下装机功率的设备已实现成熟生产与工业应用[2,13]。

2）大型高效搅拌装备

国外12 m以上大型铁精矿储槽设备市场基本被Lightnin公司垄断；Ekato公司的搅拌装备在氧化铝行业种分槽、结晶槽领域应用优势显著；Hayward Gordon公司可提供最大直径20 m的矿浆储槽设备，主要应用于铁矿尾矿输送场景。国内可研发制造大型矿浆搅拌储槽的企业数量较少，其中，矿冶科技集团有限公司搅拌团队自主研发了直径12、13、14、16 m系列大型精矿、尾矿储槽。金矿生产所用的氰化浸出（CIP/CIL）槽，国外最大设备容积超过5 000 m^3，国内自主研制的最大氰化浸出槽容积为1 800 m^3。

3）粒度分析仪

粒度是矿产选矿生产中的核心工艺指标，直接影响浮选工艺参数设定与最终选矿产品质量。Outokumpu公司研发的PSI500载流粒度分析仪，基于激光衍射原理检测矿浆，可实现矿浆全粒度分布的精准在线分析。澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）开发的超声波粒度分析仪，无需稀释矿浆，可直接对高浓度、高流速矿浆开展检测，粒度测量范围为0.1～1 000 μm。

1.4 发展水平相对落后的装备

该类装备的核心结构、耐磨材料、智能调控算法均被海外企业专利封锁，国内大型金属矿山、千万吨级新建选厂仍需批量进口采购[14-19]，该类设备主要有：

1)旋回破碎机

旋回破碎机多用于粗碎工序，适合破碎中等硬度及以上的矿石与岩石。该设备具备入料粒度大、处理能力高、破碎比大、排料粒度均匀、检修周期长、运行成本低等优势，能够有效降低采选成本，便于大规模采矿选矿工艺推广。国外旋回破碎机主流厂商包括美卓(Metso)、福乐伟(FLSmidth)、山特维克(Sandvik)、蒂森克虏伯(ThyssenKrupp)等，依托成熟技术与工程经验长期占据全球主要市场。FULLER旋回破碎机依托液压系统、智能控制系统及优化破碎腔型设计，提升了整机破碎效率与运行稳定性；Metso的Superior MK Ⅲ旋回破碎机在矿山及石料行业应用广泛，60～110改良机型装机功率1 500 kW，处理能力达到17 000 t/h；Sandvik CG系列液压旋回破碎机中的CG850i机型，装机功率950 kW，处理能力为3 800～8 250 t/h；ThyssenKrupp的KB63×114型旋回破碎机，处理能力达到10 000 t/h。国内矿山装备企业研制的PXZ1623旋回破碎机最大装机功率620 kW，处理能力3 050～3 350 t/h；PXZ-152/287型旋回破碎机装机功率1 200 kW，处理能力最高8 000 t/h。对比国外产品，国内旋回破碎机在单机处理能力、关键易损件使用寿命方面仍存在提升空间。

2)圆锥破碎机

圆锥破碎机适用于中碎、细碎作业，是矿石破碎工序应用十分普遍的设备。Sandvik CH895i单缸圆锥破碎机，装机功率750 kW，最大给矿粒度127 mm，最高处理量1 077 t/h[10]；Metso Superior MK Ⅲ 10000型圆锥破碎机，装机功率2 240 kW，处理量3 000～3 200 t/h。近些年，国内圆锥破碎机厂家不断开展技术自研与创新，消化吸收国外先进技术并结合国内工况改良，设备整体技术水平提升明显。国内头部企业已掌握圆锥破碎机的核心结构设计与全套制造工艺，可产出性能稳定、质量可靠的破碎设备。

3)颚式破碎机

国外颚破知名厂商包含Sandvik、Cedarapids、神钢(Kobelco)等，手握大量核心技术专利，产品动力性能、破碎效率、环保指标表现优异；产品采用标准化制造工艺，配套数字化、自动化控制系统，可通过远程监测与数据分析实现设备优化运行、提前故障预警。国内颚式破碎机品类较多，涵盖负支撑、零悬挂、负悬挂、回转式、双腔、双动颚等结构形式，现场应用最多的依旧是复摆颚式破碎机，综合性能与国外产品差距较为明显。

4)超细磨机

超细磨机分为立式、卧式两大类。海外HIG立式盘磨机最大装机功率达到6 500 kW，VXP立式盘磨机最高装机功率5 000 kW；卧式超细磨机中，Glencore Technology的ISA mill单机最大容积50 000 L，装机功率8 000 kW[20]；国内自主研制的同类型设备最大容积20 000 L，装机功率5 000 kW。

5)大直径高效浓密机和深锥膏体浓密机

浓密机的技术迭代大致分为传统浓密机、高效浓密机、深锥膏体浓密机三个阶段。FLSmidth、Metso、WesTech等国外企业在浓密机领域技术积淀深厚：FLSmidth高效浓密机最大直径达到220 m，FLSmidth与Metso开发的深锥膏体浓密机最大直径为45 m[10,15]。除此之外，Metso的SUPAFLO膏体浓密机、WesTech AltaFlo膏体浓密机，以及美国McLanahan、AMSTAR ENVIRO-CLEAR的膏体浓密机均在国际市场大范围使用。FLSmidth的E-VoluteTM涡旋入料井、Metso的Vane FeedwellTM与ReactorwellTM进料井、WesTech EvenfloTM布水井等专有结构，在行业内具备很高的认可度。

现阶段国内研制的高效浓密机最大直径100 m，深锥膏体浓密机最大直径28 m，设备规格与综合性能相较于国外产品存在明显差距。

2 未来展望

我国矿产资源呈现出“贫、细、杂、散”的禀赋特性，随着矿山开采规模持续扩大，生产效率要求不断提升。想要实现行业发展目标，应当紧扣高效化、大型化、低碳绿色化、自动化智能化、专属化的发展方向，同时强化分选基础机理研究与颠覆性装备技术攻关，以此达成行业中长期发展目标[21-26]。

1)高效化

提升选矿装备，特别是碎磨装备的工作效率，是提高选矿整体效益的关键。依托基础理论创新、设备结构优化、新型耐磨材料应用等方式持续提升装备效能，高效的选矿设备可以有效削减能耗、压缩生产成本，同时提升精矿产品的产量与品质。

2)大型化

矿山开采规模扩大、开采深度增加，矿石硬度普

遍升高，对选矿设备的单机处理能力提出了更高标准。大型选矿装备可承担更大的矿石处理量，提升产能，降低单位矿石的处理成本；并且能够减少设备台套数量，缩减厂区占地面积，节约项目投资与后期运营开支。

3）选矿过程低碳化、绿色化

面对全球碳中和要求以及日趋严格的环保管控，低碳绿色是选矿装备的核心发展方向。借助节能技术改造、设备结构优化、提升能量利用率等方式，有效削减选矿全流程的碳排放。

4）选矿过程自动化与智能化

智能化是选矿装备的重要发展趋势。搭载高精度传感器、成套控制系统与大数据分析技术，可实现选矿全流程在线监测与最优调控。智能装备能够自主采集工况数据、运算分析并自主决策，大幅提升分选效率与矿产资源回收率；同时减少人工操作带来的偏差，降低作业人员劳动强度，提升现场生产安全水平。

5）专属化

不同矿种、不同矿石理化性质差异显著，选矿装备逐步走向定制专属化。开发适配矿石特性的专用设备，例如低品位矿石预选抛废设备、微细粒矿物高效分级设备等，能够有效改善分选指标、提高资源利用率。该专业化发展方向，可以匹配各类矿山的个性化工况需求，提升矿山整体经济效益。

6）加强基础研究与颠覆性技术创新

分选机理的基础研究，是选矿装备技术创新的理论基础。系统研究矿物物料特性、分选作用机理以及装备运行规律，能够为设备结构改良、工艺流程优化提供理论依据；基于机理研究成果，可完成装备性能优化、选矿工艺流程重构等工程层面的创新。与此同时，颠覆性新技术是选矿装备产业升级的核心动力，运用全新原理、工艺和装备重构传统分选体系，能够打破现有技术局限。例如目前处于研发阶段的逆序浮选技术，一旦实现工业化应用，将会大幅提升矿物的浮选回收率。

综上所述，我国选矿装备的发展具备多元化、综合性的特点，行业需要持续夯实基础研究、坚持技术创新、推进产业升级，应对矿产资源禀赋变差、开采难度逐年升高的挑战，推动选矿装备行业朝着高效、智能、低碳环保的方向持续发展。

3　结论

国内选矿装备现已形成多层次差异化的发展格局：大型浮选机、高梯度磁选机、水力旋流器等装备达到国际领先水平；半自磨机、球磨机、永磁磁选设备、矿浆在线分析仪器与国外技术同步发展；而大型破碎机、大功率超细磨机、大直径深锥膏体浓密机以及高端在线检测仪表尚且存在显著的技术短板，核心装备对外进口依存度较高。

面向未来发展需求，国内选矿装备产业应当分层分类开展技术攻关：集中优势资源突破破碎、超细磨矿、浓密脱水类装备的技术瓶颈，实现选矿全流程装备国产化；持续缩减立式搅拌磨机、大型搅拌储槽、在线检测仪表同国外产品的性能差距；巩固浮选设备、高梯度磁选机、水力旋流器现有的全球领先优势，并对其开展智能化升级改造；不断加大矿物加工基础分选机理、颠覆性装备技术的科研投入，全面推动选矿装备朝着高效化、大型化、低碳绿色化、智能化、专属化迭代升级，为保障我国矿产资源安全、助力矿业绿色高质量发展，提供国产化高端装备支撑。

参考文献

[1] 中国矿业联合会. 中国矿业发展报告2025[R]. 北京：中国矿业出版社，2025.
China National Mining Confederation. China mining development report 2025[R]. Beijing: China Mining Press, 2025.

[2] 夏晓鸥，沈政昌，史帅星，等. 选矿装备[M]. 北京：冶金工业出版社，2019.
Xia Xiao′ou, Shen Zhengchang, Shi Shuaixing, et al. Mineral processing equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.

[3] 谭明，沈政昌，杨义红. 国内外矿物分选装备发展综述[J]. 矿冶，2024，33(1)：56-63.
Tan Ming, Shen Zhengchang, Yang Yihong. Review on development of mineral separation equipment at home and abroad[J]. Mining & Metallurgy, 2024, 33(1): 56-63.

[4] 汪荣瑞，程永彪，付君浩，等. 高泥锂云母全粒级磁-浮联合选矿工艺[J]. 工程科学学报，2025，47(4)：642-653.
Wang Rongrui, Cheng Yongbiao, Fu Junhao, et al. Full-grain magnetic-flotation combined beneficiation process for high-mud lepidolite[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(4): 642-653.

[5] 阮竹恩，吴爱祥，焦华喆，等. 我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J]. 中国有色金属学报，2022，32(1)：286-301.
Ruan Zhu′en, Wu Aixiang, Jiao Huazhe, et al. Research progress and development trend of full tailings slurry thickening in China[J]. The Chinese Journal of

Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 286-301.

[6] 中信重工机械股份有限公司. 特大型磨矿装备技术发展与应用[J]. 矿山机械, 2023, 51(12): 1-8.
CITIC Heavy Industries Co., Ltd. Technical development and application of extra-large grinding equipment[J]. Mining Machinery, 2023, 51(12): 1-8.

[7] 沈政昌, 史帅星, 杨义红, 等. 大型浮选机技术进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(2): 1-7.
Shen Zhengchang, Shi Shuaixing, Yang Yihong, et al. Technical progress of large flotation machines[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(2): 1-7.

[8] 韩登峰, 沈政昌, 余玮, 等. 680 m^3超大型浮选机流体动力学性能测试[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(4): 88-94.
Han Dengfeng, Shen Zhengchang, Yu Wei, et al. Hydrodynamic performance test of 680 cubic meter super-large flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(4): 88-94.

[9] Hu Zhaocheng, Lu Defeng, Zheng Xiaoying, et al. Development of a high-gradient magnetic separator for enhancing selective separation: a review[J]. Powder Technology, 2023, 421: 118435. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118435.

[10] Fan Yang, Chen Lizhu, Zeng Jingwei, et al. Separation characteristics of dry high-intensity drum magnetic separator[J]. Minerals Engineering, 2022, 189: 107861. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107861.

[11] Ma Baocong, Guo Dongjin. Effect of conical section geometry on the classification performance of cylindrical-conical hydrocyclones[J]. International Journal of Sediment Research, 2025, 40(1): 36-48.

[12] Metso Corporation. Superior MK Ⅲ gyratory crusher technical specification[EB/OL]. https://www.metso.com, 2026.

[13] 何建成, 苏浩然. 立式搅拌磨机介质运动特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(10): 45-51.
He Jiancheng, Su Haoran. Study on medium motion characteristics of vertical stirring mill[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(10): 45-51.

[14] 龚姚腾, 张文明, 罗小燕, 等. 基于破碎性能和衬板磨损特性分析的旋回破碎腔型优化设计[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(11): 1321-1326.
Gong Yaoteng, Zhang Wenming, Luo Xiaoyan, et al. Optimal design of gyratory crusher cavity based on crushing performance and liner wear characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(11): 1321-1326.

[15] 张金彪, 张亮. 国内某大型钼矿PG6089旋回破碎机衬板优化研究与应用[J]. 中国矿业, 2024, 33(增刊2): 235-238.
Zhang Jinbiao, Zhang Liang. Research and application of liner optimization for PG6089 gyratory crusher in a large molybdenum mine in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 235-238.

[16] Li Minghao, Fu Ruixuan, Wu Dongsheng, et al. Optimization of moving cone liner dynamics and health status prediction for cone crushers[J]. Sensors, 2026, 26(11): 3449. DOI: 10.3390/s26113449.

[17] 王奕仁, 吴爱祥, 阮竹恩, 等. 基于PSO-RF算法的深锥浓密机耙架扭矩预测[J]. 中国有色金属学报, 2026, 36(3): 1164-1177.
Wang Yiren, Wu Aixiang, Ruan Zhu'en, et al. Prediction of rake torque of deep cone thickener based on PSO-RF algorithm[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2026, 36(3): 1164-1177.

[18] Delbos G. Torque analysis of a gyratory crusher with the discrete element method[J]. Minerals, 2021, 11(7): 762. DOI: 10.3390/min11070762.

[19] FLSmidth Company. Deep cone paste thickener technology[J]. Mining Engineering, 2023, 75(8): 45-52.

[20] Glencore Technology. ISA Mill ultra-fine grinding technology[J]. Minerals Engineering, 2023, 198: 108123. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108123.

[21] 工业和信息化部. 有色金属行业智能矿山建设指南(试行)[R]. 北京: 工业和信息化部, 2022.
Ministry of Industry and Information Technology. Guidelines for the construction of intelligent mines in the nonferrous metals industry(Trial)[R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2022.

[22] 中国重型机械工业协会. 矿山选矿装备产业发展白皮书(2024)[R]. 北京: 中国重型机械工业协会, 2024.
China Heavy Machinery Industry Association. White paper on the development of mineral processing equipment industry(2024)[R]. Beijing: China Heavy Machinery Industry Association, 2024.

[23] 工业和信息化部, 人力资源社会保障部, 住房城乡建设部, 等. 机械工业数字化转型实施方案(2025—2030年)[R]. 北京: 工业和信息化部, 2025.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Human Resources and Social Security, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, et al. Implementation plan for digital transformation of machinery industry(2025—2030)[R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2025.

[24] 杨婉婷, 蓝卓越, 简胜, 等. 低品位高泥铜钼矿混合浮选

试验研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(3): 78-84.
Yang Wanting, Lan Zhuoyue, Jian Sheng, et al. Mixed flotation test of low-grade high-mud copper-molybdenum ore[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(3): 78-84.

[25] 卜云杰, 刘三军. 不同磨矿介质对方铅矿浮选电化学影响[J]. 有色金属工程, 2023, 13(2): 42-48.
Bu Yunjie, Liu Sanjun. Electrochemical effect of different grinding media on galena flotation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(2): 42-48.

[26] Shen Zhengchang, Wu Tao, Han Dengfeng, et al. Intelligent flotation equipment development path for complex mineral resources[J]. MetaResource, 2024, 1(1): 1-12.

（本文编辑 刘水红）

【缅怀寄语】

恩师孙传尧院士辞世已满一周年，学生每每思及先生，音容教诲依旧历历在目，心中感念与哀思从未消减。

先生是我国矿物加工领域一代宗师，深耕选矿事业六十余载，扎根可可托海矿区，攻坚多金属分选重大难题，开创“和谐选矿”“基因矿物加工”前沿理论，攻克柿竹园黑白钨高效分离等世界级技术瓶颈，立足理论创新推动工程落地，牢牢守护国家矿产资源安全。执掌矿冶总院之时，先生高瞻远瞩，打通科研、工程、产业化发展通道，为行业培育无数专业人才。

当年跟随先生攻读博士，先生治学严谨务实，针对浮选装备、流场动力学、分级分选等研究倾囊点拨。他反复叮嘱我，科研不能困于实验室，必须扎根工业现场，研发贴合产业刚需的实用技术。先生心怀家国，常勉励我辈立足资源战略需求，潜心钻研、实干报国，他提出的绿色智能选矿理念，始终指引我浮选设备研发与工艺优化全部研究工作。

一别经年，学界痛失巨匠，我辈永失良师。先生毕生深耕矿冶、矢志报国的初心，求真务实、敢为人先的治学风骨，甘为人梯、宽厚育才的师德，我将终身铭记、接续传承。

学生定承袭先生遗志，深耕浮选装备与选矿技术研发，潜心攻关、实干笃行，以实际成果告慰先生。清风寄哀思，风范永留存，愿恩师长眠安息。

——沈政昌