doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2026. 08. 012

基于设备技术进步的浮选流程革新与应用实践

史帅星[1],李仕亮[1],宋振国[1],韩登峰[1],杨佳伟[2],高希宇[1],
李恒欠[1],樊学赛[1]

(1. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628;
2. 矿冶过程智能优化制造全国重点实验室,北京 100160)

摘　要: 浮选设备流程配置技术是选矿流程工程学的重要组成部分,也是实现资源高效分选的关键支撑。近年来,浮选机大型化技术、粗粒浮选设备、闪速浮选机、微细粒浮选设备、高浓度浮选设备以及浮选流程智能化技术发展迅速。在孙传尧先生“和谐选矿”与“基因选矿”理念的引领下,将上述技术与入选物料的禀赋特性深度结合,推动了浮选短流程、源头减量浮选流程、粒级动力学协同浮选流程、干湿结合浮选流程及智能浮选流程等创新及应用实践,为低品位复杂矿产资源的高效利用以及矿业行业绿色智能化发展提供了核心技术支撑。

关键词: 浮选流程配置;选矿流程工程学;和谐选矿;智能化;技术进展

中图分类号: TD456;TD923　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-9492(2026)08-0127-16

Innovation and Application Practice of Flotation Processes Based on Equipment Technological Advanced

Shi Shuaixing[1], Li Shiliang[1], Song Zhenguo[1], Han Dengfeng[1], Yang Jiawei[2],
Gao Xiyu[1], Li Hengqian[1], Fan Xuesai[1]

(1. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;
2. National Key Laboratory of Process Intelligent and Optimal Manufacturing in Mining & Metallurgy, Beijing 100160, China)

Abstract: Flotation equipment and process configuration technology constitutes an important component of mineral processing process engineering, and serves as the key support for efficient separation of mineral resources. In recent years, remarkable progress has been achieved in technologies including large-scale flotation machines, coarse-particle flotation equipment, flash flotation machines, fine-particle flotation devices, high-density flotation equipment, and intelligent flotation process technologies. Guided by Academician Sun Chuanyao′s concepts of "Harmonious Mineral Processing" and "Genetic Mineral Processing", these technologies have been deeply integrated with the inherent characteristics of feeding materials. Consequently, a series of process schemes have been put into practical application, such as shortened flotation flowsheets, source reduction flotation processes, size-fraction kinetic synergistic flotation flowsheets, dry-wet combined flotation processes and intelligent flotation systems. This transformation drives flotation technology away from the conventional trial-and-error empirical mode toward a modern data-driven and system-optimized paradigm. It delivers core technical support for the high-efficiency utilization of low-grade complex mineral resources, as well as the green and intelligent development of the mining industry.

Key words: flotation process configuration;mineral processing engineering;harmonious mineral processing;intelligence;technological advancements

收稿日期: 2026-07-03
基金项目: 矿冶科技集团有限公司重点科研基金项目(02-2203);深地国家科技重大专项项目(2024ZD1002000)
作者简介: 史帅星(1977—),男,河南平顶山人,博士,教授,主要从事浮选装备大型化、高效化、专属化与智能化的研发与工程转化研究工作。

0 引言

浮选作为矿物加工领域应用最广泛的物理化学分选技术,承担全球90%以上有色金属的富集任务,其工艺流程方案直接决定有价组分的回收率、能耗水平与环境友好性能[1-3]。选矿流程工程学是以选矿流程为研究对象,开展整体性和集成性研究的学科[4]。浮选设备流程配置技术是将多台单体设备集成为整体系统、实现系统化功能的技术方法,是选矿流程工程学的重要组成部分,也是实现资源高效分选的关键支撑。

全球矿产资源禀赋呈现显著的“贫、细、杂”演化趋势,叠加“双碳”目标下绿色矿山建设与智能化转型的迫切需求,孙传尧[5-6]提出的“和谐选矿”与“基因选矿”思想的引领性愈发凸显。其“尊重与顺从矿产资源的基因特性,开发与矿物资源可选性相和谐的精细选矿技术至关重要”的理念,现实意义也更为清晰。

传统浮选流程“经验驱动、设备分散、高耗低效”的固有弊端日益凸显。因此,推进浮选流程配置技术革新,已成为推动矿物加工行业高质量发展的核心突破口。近些年,浮选装备及其智能化技术发展迅速,推动浮选流程配置技术实现高质量发展,主要表现为浮选设备大型化推动短流程技术迭代;浮选抛废技术与闪速浮选技术深度融合;基于粗粒、常规粒级、细粒矿物的浮选特性差异,“常规粒级优先浮选、粗细粒分流浮选技术”工程实践加速推进;适配缺水矿区资源开发的高浓度分选技术成为研究热点;以智能化为首要设计原则的浮选流程设计得到初步应用。

本文系统总结近年浮选流程配置的技术进展,研究成果不仅可为复杂难选矿石的高效分选流程设计提供技术借鉴,也可为选矿流程工程学的学科发展提供理论参考与实践案例。

1 浮选短流程技术进展

1.1 大型浮选设备技术

浮选机按功能主要分为充气机械搅拌式浮选机、充气自吸浆浮选机和自吸气机械搅拌式浮选机。充气机械搅拌式浮选机大型化速度最快。2014年,基于底置叶轮的浮选机架构,美卓(Metso)与艾法斯密斯(FLSmidth)相继完成了容积600 m^3及以上浮选机的开发[7]。2018年,基于运输区调控理论[8]和中置叶轮架构技术[9],矿冶科技集团有限公司(BGRIMM,原北京矿冶研究总院)完成680 m^3浮选机的研制[10-15]。2025年,融合运输区调控理论和循环区设计方法[8],矿冶科技集团有限公司与中国铜业有限公司合作完成容积800 m^3浮选机的开发[7]。从应用实践来看,大型充气机械搅拌式浮选机应用最为广泛,约占各类浮选机应用的三分之二[9]。

1.2 浮选短流程技术的应用

大规格浮选机发展为短流程设计提供了支撑。江西铜业德兴铜矿泗洲选矿厂粗扫选作业由两次粗选和两次扫选组成,开展了采用一台HIF-680(容积680 m^3)开展替代扫Ⅰ+扫Ⅱ的的工业试验,粗选段铜回收率提高了1.31个百分点[16-17]。这为一台超大容积浮选机替代多台小容积浮选机,缩短主干流程提供了较好的实证。

2024年,矿冶科技集团有限公司设计的吉林大黑山钼业3.2万t/d升级改造工程钼的粗扫选作业采用5台HIF-680浮选机,而平行生产的10 000 t/d钼粗扫选作业采用了14台KYF-100浮选机,如图1、2所示。在选矿技术指标更优的情况下,前者处理吨矿石搅拌功耗可节省约10%[18]。



图1 5台HIF-680浮选机应用场景

Fig. 1 Application scenario of five HIF-680 flotation machines



图2 14台KYF-100浮选机应用场景

Fig. 2 Application scenario of fourteen KYF-100 flotation machines

2025年,德兴铜矿泗洲选矿厂二期20 000 t/d进行升级改造,采用2台HIF-500+1台HIF-680替代8台KYF-130浮选机组成的系统,如图3、4所示。前



图 3　8 台 KYF-130 浮选机系统

Fig. 3　Eight KYF-130 flotation machine systems



图 4　2 台 HIF-500+1 台 HIF-680 浮选机系统

Fig. 4　Two HIF-500+one HIF-680 flotation machine systems

者与后者相比，设备数量由 8 台减少为 3 台，处理吨矿石搅拌功耗可节省约 20.7%，设备占地面积节省 13.7%[19]。

浮选设备大型化通过“单槽容积跃升→设备台数锐减→流程段数压缩”的核心逻辑，推动传统多段流程向“短流程、少设备、高效率”的集约化模式转型。浮选机单槽容积从 20 m^3 到 800 m^3 的突破，不仅是设备技术的重大进步，更为浮选流程配置的变革提供了支撑。

2　预收与抛废浮选流程技术进展

2.1　流化床超粗粒浮选装备

流态化浮选技术发展较快，可浮粒径最大达到 1.5 mm。代表性的设备有 NovaCell 浮选柱[20]、HydroFloat 水力分选机[21]、逆流浮选柱(RFC)[22]、CFS 粗颗粒流态化分选机[23]、CPF 三段式粗颗粒浮选柱[24-25]、CLTF 可控流态化浮选柱[26] CoarseAIR 流化床浮选设备[27]等。HydroFloat 和 CLTF 可控流态化浮选柱的处理能力达到 550 t/h。CoarseAIR 流化床浮选设备作为一种新型流化床浮选设备，其结构设计有别于其他设备，该设备整体由上下两部分主体结构组成：下部为流化床分选区，上部则由一系列倾斜通道构成其给料位置设置于倾斜通道下方，精矿溢流槽布置于倾斜通道顶部，用于收集上浮产物，而未回收颗粒则随底流在缓冲水作用下逐步排出[28-29]，如图 5(e) 所示。

2.2　闪速浮选技术与装备

近年来，闪速浮选装备的技术进展主要体现在三个方面。首先是大型化方面，目前美卓公司开发的 Skim Air 闪速浮选机最大规格容积为 80 m^3，处理能力达到 1 800 m^3/h[30]。俄罗斯的 TEM Partner 公司也研发了闪速浮选设备，其搅拌系统及槽体结构主要借鉴美卓的相关技术，单台有效容积最大达到 85 m^3[31]。矿冶科技集团有限公司研发了单台容积最大 50 m^3 的闪速浮选装备，并应用于俄罗斯某铜镍矿项目[32]。其次是专属化和高效化方面，矿冶科技集团有限公司在 YX 系列机型基础上，研制出方形槽体、配置强制刮泡系统的闪速浮选机，适用于晶质石墨这类泡沫流动性差、精矿产率高的矿物分选。72 个小时的半工业连续选别试验结果表明，相较于常规浮选流程，增设该闪速浮选工艺后，精矿的石墨鳞片率提升 1.99 个百分点[32]。YX 型、Skim Air 型闪速浮选机结构简图如图 6 所示。

2.3　基于流态化浮选设备抛废与尾矿回收浮选流程

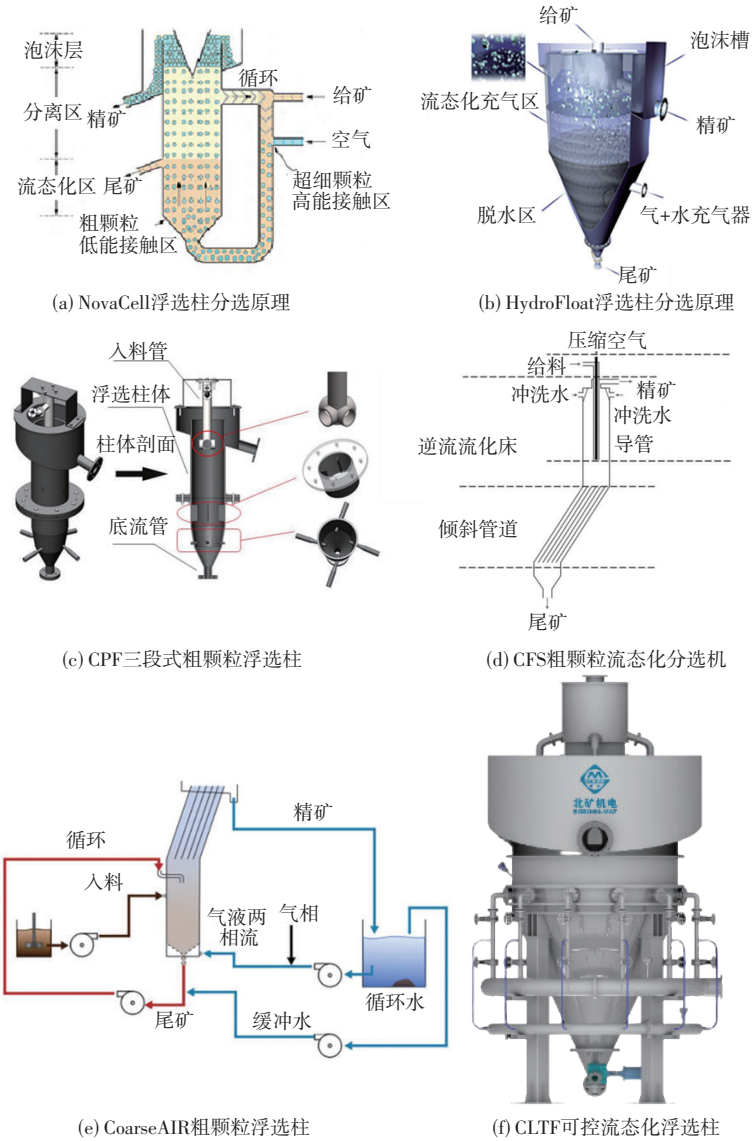
流态化浮选柱可以用在高压辊磨机筛下物抛废、排土场围岩振动筛筛下物粉料、磨矿分级旋流器沉砂抛废等流程，如图 7、8 所示。

2.4　基于闪速浮选机的旋流器沉砂分选流程

闪速浮选(Flash flotation)，可有效回收旋流器沉砂中已解离单体或富连生体矿物颗粒，防止其进入后续磨矿回路造成过磨损失[33]，流程如图 9 所示。闪速浮选已在智利 Collahuasi 铜矿投入应用，该矿山原矿铜品位 0.8%，磨机排矿里 +0.5 mm 粗粒铜矿物占比 30%，铜品位 1.5%。在球磨机出口增设美卓 Flash Cell(直径 2 m) 闪速浮选机组，可回收粗粒铜矿物，所得精矿品位 18%，抛除尾矿品位 0.3%。改造完成后，后续浮选入料处理量降低 25%，铜总回收率提高 4.5%，有效提升了流程效率与矿物回收指标[34]。

2.5　流态化床粗粒浮选与闪速浮选融合流程

澳大利亚 Cadia 铜矿将流态化床粗粒浮选和闪速浮选技术融合，推动流程技术的进步。该厂装设 HydroFloat 浮选流程，处理选矿厂 1 号浮选系统第 3 浮选车间(T3) 全部的浮选尾矿(约 900 万 t/a)，如图 10 所示。其主要目标是从粗颗粒(+150 μm) 中回收以往随 T3 尾矿流失的金和铜[35]。



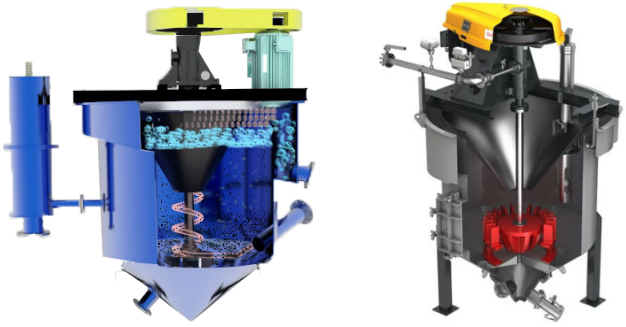
(a) NovaCell浮选柱分选原理　(b) HydroFloat浮选柱分选原理

(c) CPF三段式粗颗粒浮选柱　(d) CFS粗颗粒流态化分选机

(e) CoarseAIR粗颗粒浮选柱　(f) CLTF可控流态化浮选柱

图5　六种流态化浮选柱结构示意图

Fig. 5　Schematic diagrams of six fluidized flotation column structures



(a) YX型闪速浮选机结构简图　(b) Skim Air型闪速浮选机结构简图

图6　闪速浮选机简图

Fig. 6　Diagrams of flash flotation machine

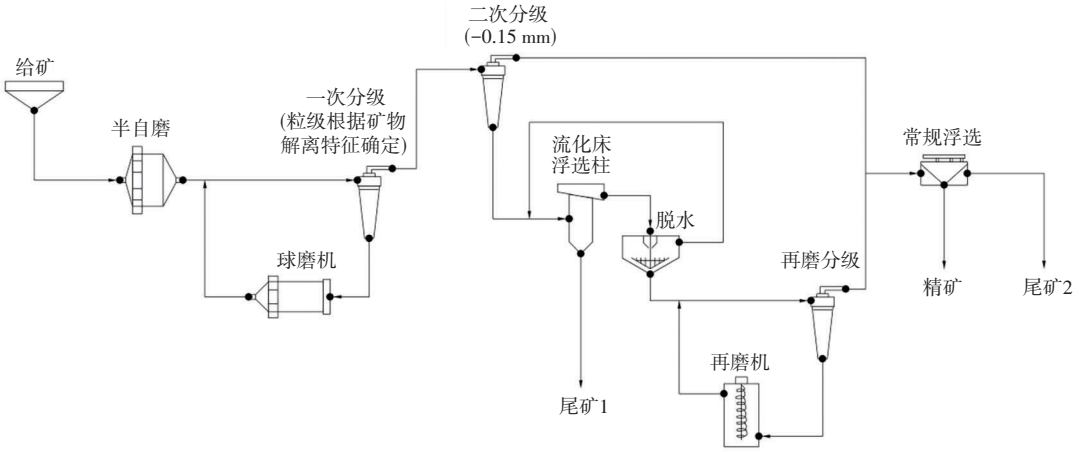


图 7　流态化浮选设备用于旋流器沉砂抛废

Fig. 7　Fluidized flotation equipment for gangue rejection of hydrocyclone underflow

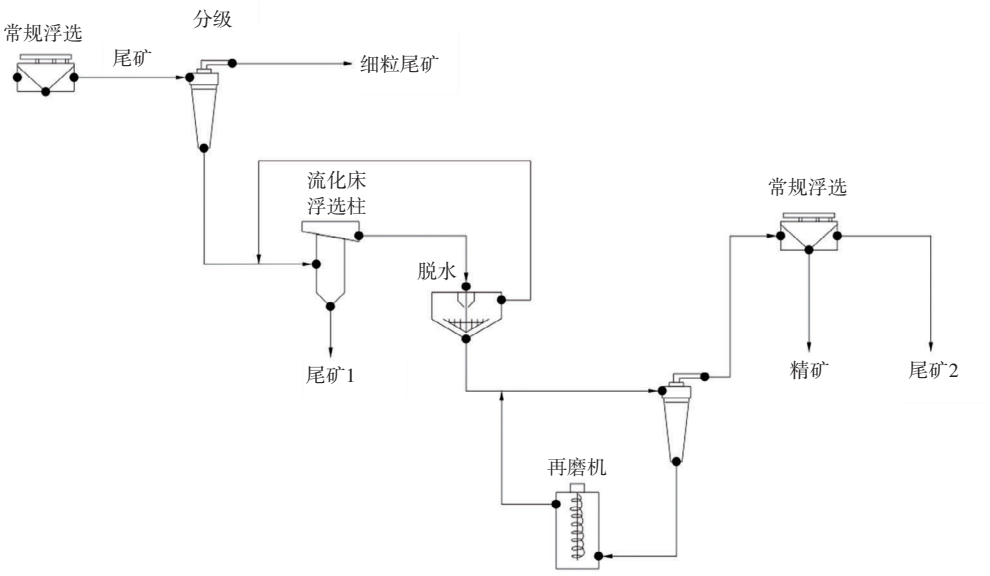
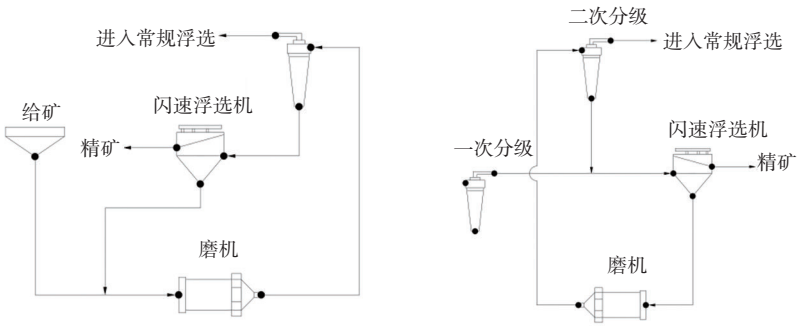


图 8　流态化浮选设备用于尾矿回收流程

Fig. 8　Fluidized flotation equipment applied in the tailings recovery flowsheet



(a)一段磨矿回路闪速浮选设备联系图　　(b)二段磨矿回路闪速浮选设备联系图

图 9　闪速浮选回收流程

Fig. 9　Flash flotation recovery flowsheets

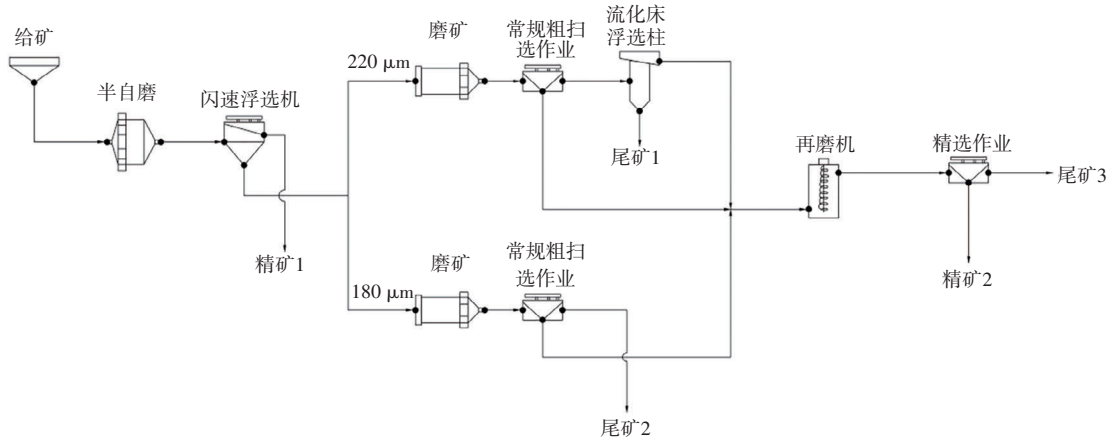


图 10 流态化床粗粒浮选和闪速浮选技术流程

Fig. 10 Flowsheet of fluidized-bed coarse particle flotation combined with flash flotation technology

3 粗、细粒矿物分流分选流程进展

3.1 粗粒机械搅拌式浮选装备

CLF 浮选机对一般金属矿物的入选粒度上限可达 0.4 mm[36-37]。CLF 宽粒级浮选机[38-39]在浮选槽内增设稳流栅板，形成三相沸腾层，有效控制槽内湍流程度。加装稳流栅板后，颗粒悬浮形成沸腾层，相当于减小了有效槽体高度，缩短矿化气泡的上升路径；同时沸腾层能够减弱槽内紊流，构建稳定的分离区和泡沫层，为粗颗粒浮选提供低紊流的分选环境，如图 11 所示。该浮选机共 6 种规格，2005 年研发出单槽容积 40 m^3 的机型，目前最大容积达到 70 m^3。该类型浮选机可用于钛铁矿分选、白钨矿分选、冶炼炉渣分选、石英砂提纯、锂云母分选、钾盐矿分选等各类粗颗粒矿物回收的选别工况。CGF 机械搅拌式粗颗粒浮选机，除搅拌机构采用自吸气浮选机的结构形式外，其余技术特征与 CLF 型浮选机相近，现阶段最大容积为 40 m^3。2014 年，两台 CGF-40 浮选机应用于德兴铜矿尾矿粗粒铜矿物的预先浮选作业，铜富集比达到 3.018 倍，铜回收率达到 21.13%；粗铜精矿中 +0.125、+0.074 mm 粒级的回收率分别为 21.75%、32.00%[40]。

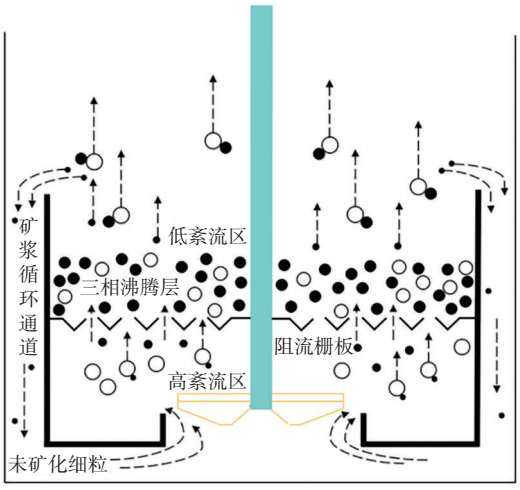


图 11 CLF 型宽粒级浮选机分选原理

Fig. 11 Separation principle of CLF wide-size-range flotation machine

HIF 型浮选机采用过程强化技术，分选回收粒度上限为 0.25 mm。该机型是矿冶科技集团有限公司 2009 年针对大型浮选机粗颗粒矿物回收效果不佳的问题，研发的新型充气机械搅拌式浮选机。HIF 系列浮选机重构槽内动力学分区，创新增设循环区，形成循环区、叶轮搅拌区、运输区、分离区、泡沫区共五个动力学区域，由下至上依次分布。循环区设于槽体底部，对上部四个动力学分区形成托举作用，有效解决了浮选机超大型化过程中颗粒上浮路径过长的难题，如图 12 所示。HIF 型充气浮选机最大容积达到 800 m^3[41-42]。

3.2 微细粒浮选装备

微细粒浮选装备在机械搅拌式浮选机和柱式浮选柱方面都取得了成功应用。

3.2.1 机械搅拌式微细粒浮选机

加拿大 Woodgrove 公司的阶段浮选反应器(SFR，Staged flotation reactor[43-44])使矿物颗粒在强搅拌区混合，完成上述过程后引入分离区实现“静态分离”(图 13)。因搅拌区空间较小，搅拌强度大，实现了局部湍流强化。分离区与搅拌区物理隔离，不受叶轮和定子搅拌的影响，湍流扰动强度达到最小化。直接浮选反应器(DFR，Direct flotation reactor)的气泡在纯气相或液相的条件下从捕集区收集，而矿化气泡在设

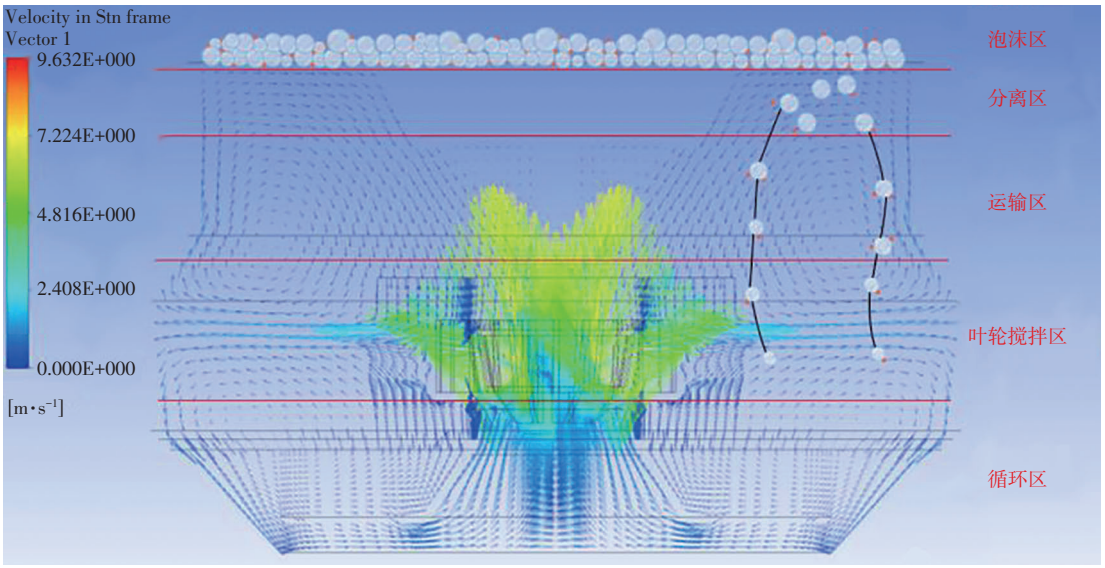


图 12　HIF 型浮选机动力学分区架构

Fig. 12　Dynamic partition structure of HIF type flotation machine



图 13　Woodgrove 公司直接浮选反应器

Fig. 13　Direct flotation reactor of Woodgrove Company

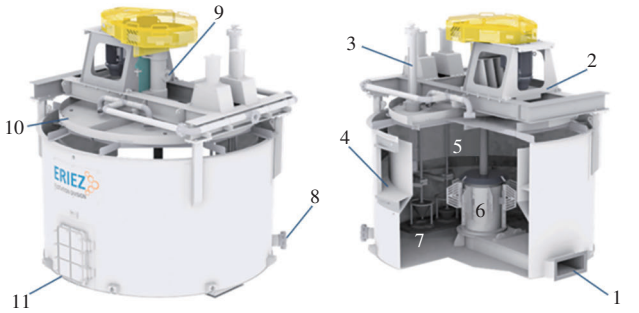
备上部回收。整个单元设备是一个密封的压力系统。由于没有泡沫相，DFR 占地很小，设备和设备之间无需高差。

Eriez 公司开发的 Stackcell 细粒浮选机已经成功实现工业化应用[45-46]。该设备具备多层叶轮定子强烈搅拌功能，且其反应室与分离室采用了隔离设计，如图 14 所示。在叶片表面及叶槽尾流区，湍动能耗散率的最大值为 150 W/kg，是传统浮选机转子-定子区域的 5 倍。

矿冶科技集团有限公司针对 −10、−20、−39 μm 不同粒级的物料特性成体系地开发了 WXF Ⅰ、WXF Ⅱ和 IEF 型微细粒浮选机[47]。WXF Ⅰ型浮选机采用三层多重剪切结构的叶轮和环形包裹体结构，实现微细粒物料高效分选[48]，如图 15 所示，最大容积达到 70 m^3[49-50]，可满足 10 000 t/d 微细粒物料选矿厂的使用需求。

3.2.2　无传动微细粒浮选设备

主要包括 FCSMC 旋流微泡浮选柱[51]、KYZE 型浮选柱[52]、Jameson cell[53]、Imhoflot GCell[54]、ConCorde Cell[55]等。FCSMC 旋流微泡型浮选柱的柱体底部有一个较大的锥形结构，泵送来的高流速矿浆沿切向射入旋流区，粗颗粒在离心力作用下向锥底运动并排出。细粒级向上运动，进入捕集区并与气泡发生碰撞、黏附。在管流矿化、逆流矿化和旋流力场的多重作用下，细粒矿物得以高效回收[51]。KYZE 型浮选柱利用泵将空气和矿浆混合后注入柱体，矿浆与空气的混合流体通过充气器时产生压力变化，压力释放过程中，原有压力下溶解的部分空气优先在疏水矿物颗粒表面析出，形成微小气泡团包裹矿物颗粒，进一步提高矿物颗粒的疏水性；其余空气被高速液流剪切成小气泡，再与包覆微气泡的矿物颗粒以及新给入的矿物颗粒相互碰撞，形成矿化气泡[52]。Imhoflot



1—Feed inlet; 2—Motor drive and support; 3—Level control; 4—Froth discharge;
5—Separation chamber; 6—Contacting chamber; 7—Tailings discharge;
8—Drain port; 9—Air inlet; 10—Froth wash drip pan; 11—Service hatch.

图 14 StackCell 结构示意图

Fig. 14 Schematic structures of StackCell

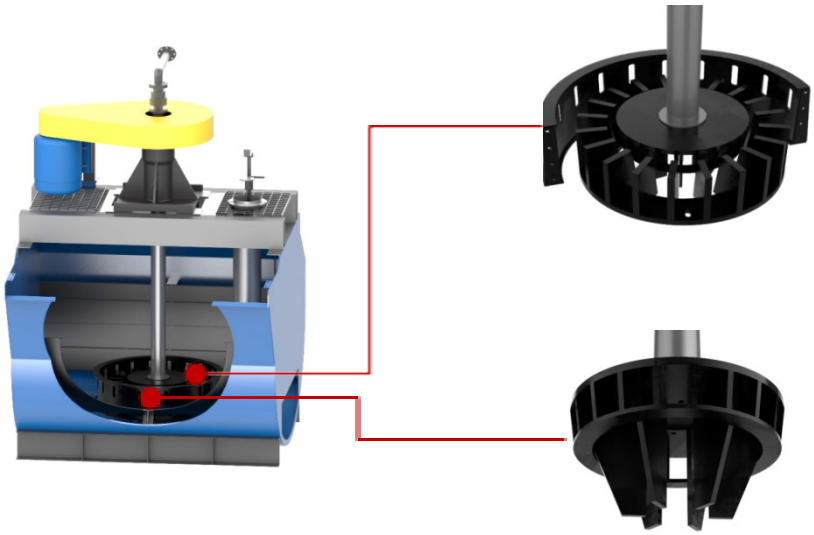


图 15 WXFI 微细粒浮选机结构示意图

Fig. 15 Schematic diagrams of WXFI fine particle flotation machine

GCell[54]由德国克劳斯塔工业大学研发，为细粒煤泥浮选设备，核心部件曝气器采用文丘里管结构。空气吸入曝气器，在强剪切作用下形成气泡，气泡与矿物颗粒在曝气器内碰撞；矿浆以 6～10 m/s 的切向速度给入浮选槽内。三级 G-cell 装置在欧洲镍矿选矿生产中的应用结果表明，该设备可从尾矿中额外回收 30% 的镍，回收的镍矿物主要为＜11 μm 粒级。ConCorde Cell[55]可依靠高剪切力产生微细气泡，提高 20 μm 以下颗粒的回收率。ConCorde Cell 适宜处理 10～45 μm 的颗粒，该设备配备尾矿再循环系统，循环比为 1∶2，充气速率为 0.5～1.5 $m^3/(m^2 \cdot min)$。

3.3 粗粒/微细粒分选流程

CN121244407A[56]公开了一种粗粒/微细粒浮选生产线专利，粗选采用普通 Tankcell 浮选机，扫选和中矿再选的末段设备均采用 ConCorde Cell 浮选柱回收细粒级矿物，如图 16 所示。文献[57]指出，将成熟的 TankCell 技术与 Concorde Cell 技术相结合，是矿物加工流程中低风险、高收益的工艺方式。CN116273487A[58]公开了一种全粒级浮选流程，对粗选作业尾矿进行分流，细粒级占比较高的矿浆进入微细粒分选系统，粗粒占比较高的矿浆进入中置叶轮分选系统，强化粗颗粒矿物的回收，如图 17 所示。

4 干式浮选、少水浮选与湿式浮选相结合的流程

浮选过程具有高耗水的特点(传统湿式浮选每吨矿石耗水量为 5～10 m^3)，这已经成为干旱矿区矿产开发以及资源综合利用的制约瓶颈。同时，湿式浮选在细粒矿物分选、精矿品位控制方面具备不可替代的优势。因此，以空气为介质的干式浮选、低用水量的少水浮选与传统水介质湿式浮选相结合协同使用，已经成为研究前沿；依靠“分质用水、梯级处理”的思路，可以实现缺水地区能够应用、富水地区提升效率、各类应用场景低碳运行的目标。

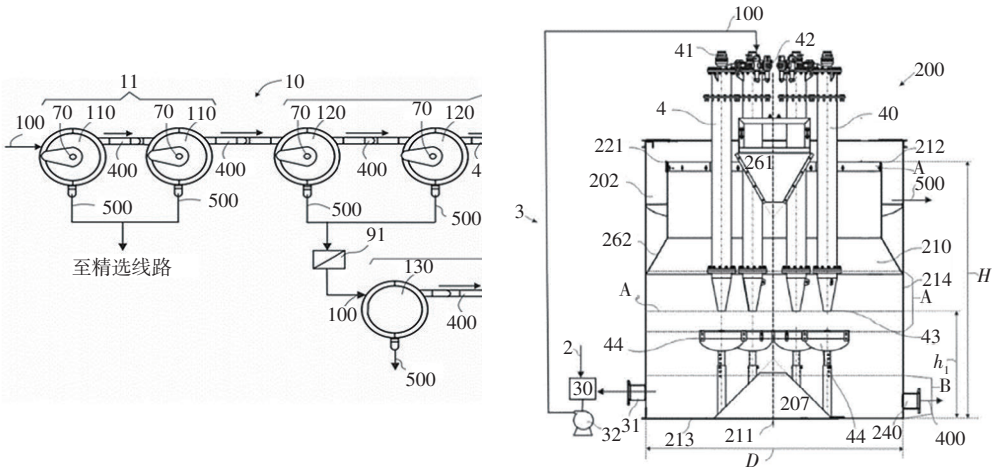


图 16　浮选系统、浮选生产线及其用途[56]

Fig. 16　Flotation system, flotation production line and its application[56]

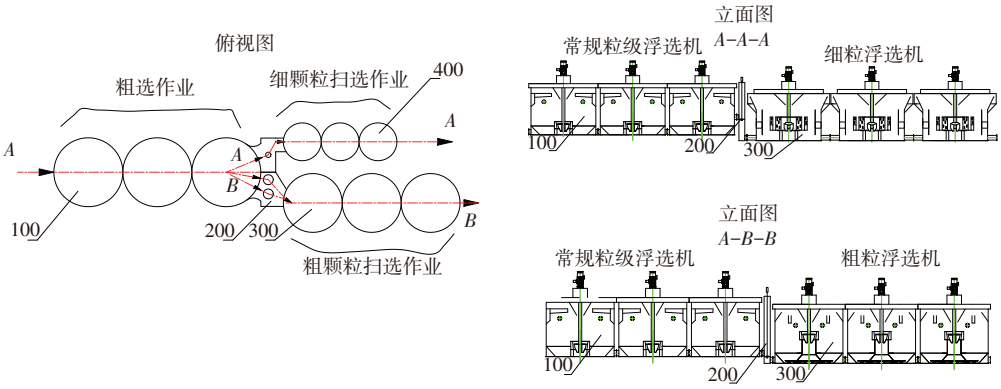


图 17　全粒级矿浆的浮选方法及实施该方法的浮选机[58]

Fig. 17　Full-size fraction pulp flotation method and the flotation machine for implementing the method[58]

4.1　干式与少水浮选技术

4.1.1　逆序浮选：“干磨”与“湿选”的结合流程

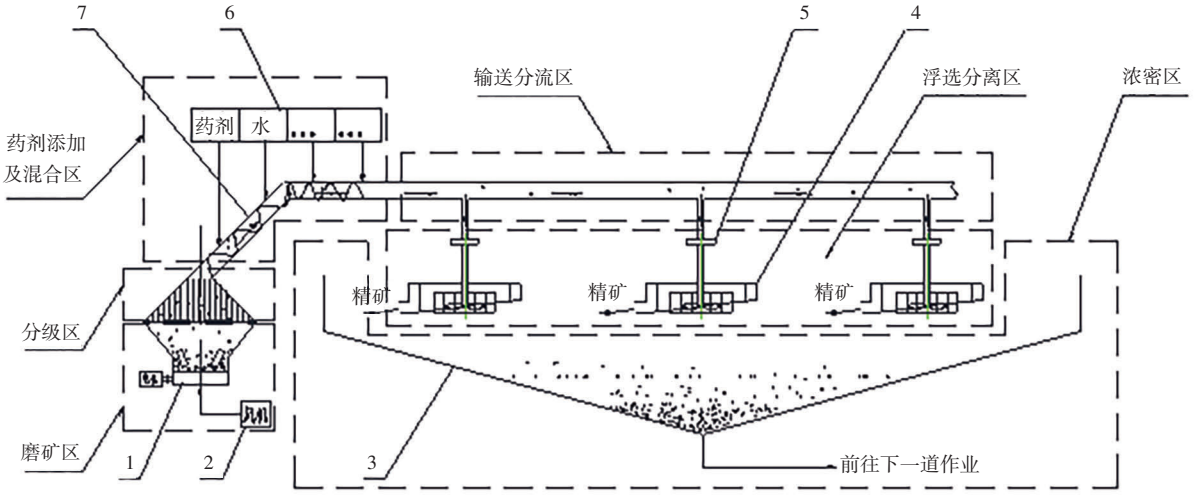
2017 年沈政昌等[59]提出了基于颗粒在气泡内壁实现碰撞黏附的逆序浮选新方法。该方法可以绕开水化膜在颗粒与气泡间碰撞的限制，实现能量输入的降低，如图 18 所示。Han 等[60]从理论上分析并验证了逆序浮选方法的可行性。基于该方法，形成了干式磨矿→风力分级与输送→湿式浮选的选矿流程配置特征。

4.1.2　高浓度浮选：低耗水下的“浓浆分选”

闪速浮选机的入料为旋流器沉砂，分选浓度可达 70%[61]。TIF 机械搅拌式浮选机应用于攀西地区钛铁矿分选，粗选作业浓度可达 60% 以上[62-63]。专利 CN109225657A 公开了一种高浓度浮选机成套装置[64]，包含依次相接的一台给矿浮选机、多台中选浮选机、一台尾选浮选机；矿浆给矿管沿切向从给矿浮选机槽体送入内部叶轮侧上方，给矿浮选机的底流以切线方式作为中矿送入中选浮选机，前一台中选浮选机的底流从底部切向送入后一台中选浮选机，最后一台中选浮选机的底流从底部切向送入尾选浮选机；多台中选浮选机采用交错切向给矿的布设形式，给矿浮选机叶轮顺时针转动，与之相连的第一台中选浮选机逆时针转动，后续浮选机顺、逆时针依次交错排布，矿料流动方向与叶轮的旋转方向保持一致，底流出料管沿着槽体径向布设。该装置可以在高浓度给矿工况下，在单台浮选机内部实现气泡有效分散、矿物颗粒悬浮、矿浆均匀分布、颗粒与气泡相互碰撞以及矿浆浓缩，完成高浓度分选，最终起到节约用水、降低药耗、简化工艺流程、减少能耗的作用，如图 19 所示。

4.2　融合流程配置典型架构

干式/少水浮选承担“预处理(抛废/粗选)”与“粗粒回收”工作，湿式浮选专注“细粒精选”作业，形成“干式预抛废→少水粗选→湿式精选→尾矿干排”的四级融合流程。干式浮选、少水浮选与湿式浮选的融合，突破了传统浮选“高耗水、单场景”的局限，通过“分质用水、梯级分选”实现“干旱地区可用、富水地



1—磨机；2—鼓风机；3—浓密装置；4—泡沫收集槽；5—搅拌分散装置；6—加药装置；7—混合输送管道。

图18 逆序工艺设备配置示意图[59]

Fig. 18 Schematic layout of equipment for the reverse-sequence process[59]

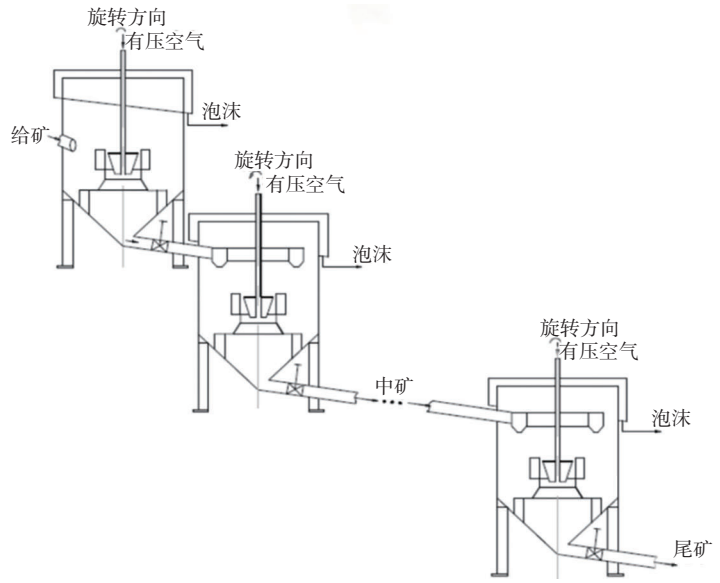


图19 一种高浓度浮选装置联系图[64]

Fig. 19 Connection diagram of a high-concentration flotation device[64]

区高效、全场景低碳”的应用效果。未来，随着智能控制、材料创新与多能互补技术的突破，“干-少-湿结合流程”将成为全球矿山绿色转型的核心配置，推动浮选技术向“近零耗水、近零排放”方向演进。

5 智能化发展对浮选流程配置的影响

5.1 智能化作为浮选流程“首要考虑”的逻辑必然性

浮选过程的复杂性(多矿物共生、多参数耦合、非线性动力学)决定了传统“经验驱动”的流程控制难以适应现代矿山“高效、低碳、自适应”需求。智能化通过将“数据感知—智能决策—精准执行—动态优化”闭环嵌入流程全周期，成为提升分选效率、降低运营成本、增强环境适应性的关键技术路径，其“首要性”体现在三方面。破解复杂矿分选难题：针对“贫、细、杂”矿石(如－10 μm微细粒占比＞30%)，智能化通过实时调整参数(充气量、药剂、磨矿细度)应对矿物嵌布特性波动；响应“双碳”目标：智能优化能耗与药剂消耗，实现“减污降碳协同增效”；提升流程韧性：通过数字孪生预判故障(如浮选机叶轮磨损)，减少非计划停机(据部分矿山实践统计，传统流程停机损失占比15%～20%，智能化可降至5%以下)。据《全球矿业智能化白皮书(2024)》[65-66]，采用智能化浮选流程的矿山平均回收率提升5%～8%，吨矿成本降低

12%～18%，已成为新建矿山的“标准配置”与老矿山改造的“必选项”。

5.2　智能化浮选流程的核心技术架构

智能化流程以“数据驱动决策、模型指导操作、闭环动态优化”为原则，构建“三层架构”，实现从“被动响应”到“主动预测”的突破[67]。

5.2.1　感知层：全要素实时数据采集

感知层的核心目标是突破传统“人工采样＋离线检测”滞后性(检测周期30～60 min)，实现“秒级—分钟级”多参数同步感知。不同检测内容和方式见表1。

5.2.2　决策层：AI模型与知识库的协同推理

决策层的核心目标是将海量数据转化为可操作的工艺指令，解决“多变量耦合优化”难题。一是建立预测模型实现从“事后分析”到“事前预判”。模型主要包括基于LSTM与状态监测数据融合的品位预测模型[69]；CNN泡沫图像识别模型与机理-数据混合模型[70]。二是建立优化模型实现多目标动态寻优[71]。包括强化学习(RL)加药模型、多目标遗传算法(MOGA)流程优化以及存储“矿石类型—嵌布特性—工艺参数”映射关系的知识库系统。

5.2.3　执行层：智能装备与数字孪生的协同控制

执行层的核心目标是将决策指令转化为精准操作，实现“设备-流程-系统”协同。

一是开发智能执行器，例如变频充气系统、智能配药和加药系统与自动刮泡机等。二是建立数字孪生平台[72]。构建浮选流程虚拟镜像，实现“物理-虚拟”实时映射与推演。包括实时预测、故障推演与工艺优化推演等。

5.3　适应于智能化的典型流程配置模式

根据矿山规模与矿石特性，智能化流程可分为“集中式智能控制”与“分布式智能自治”两种模式[73]。集中式智能控制与分布式智能自治两种模型的特点见表2。

5.4　小结

智能化技术的发展深刻影响着浮选流程配置技术的改变，在实际的工程应用中仍面临以下挑战。1)数据质量瓶颈：部分传感器(如XRF)在高矿浆浓度下精度下降，需开发“抗干扰传感器”；2)模型泛化能力不足：矿石性质突变(如氧化率从5%升至20%)时，AI模型预测误差增大(需融合迁移学习技术)；3)跨系统协同困难：浮选与磨矿、脱水等工序协同控制数据未完全打通，难以实现“全流程智能优化”。

但是随着技术的发展，智能化赋能方法呈现多样性。1)大模型赋能：基于矿山领域大模型实现“自然语言指令-工艺参数”自动转换(如“提高精矿品位”自动调整磨矿细度与加药量)；2)边缘-云协同计算：复杂模型(如数字孪生)在云端运行，实时控制指令在边缘节点(浮选机本地)执行，兼顾算力与响应速度；3)人机协同决策：开发“智能助手”系统，为操作员提供“建议操作＋风险提示”，保留人工经验价值；4)低碳智能融合：结合碳足迹模型，智能优化“能耗-回收率”平衡点(如低谷电价时段提高磨矿功率，高峰时段降低浮选机转速)。

综上，智能化作为浮选流程“首要考虑因素”，通过“感知-决策-执行-优化”闭环重构了传统分选逻辑，实现从“经验试错”到“数据驱动”、从“被动调整”

表1　浮选关键参数不同检测方法

Table 1　Different detection methods for key flotation parameters

监测对象	传感器类型	关键参数	应用场景
泡沫层状态	工业相机＋AI图像处理模块[68]	泡沫尺寸分布、颜色(RGB值)、层厚度、稳定性	判断矿物可浮性、药剂过量/不足
	激光/超声波/雷达液位计 EIT泡沫测量仪	浮选槽液位高度 泡沫负载情况	稳定矿浆液面
矿浆性质	X射线荧光分析仪(XRF)/LIBS分析仪	金属品位(Cu、Pb、Zn等)、杂质含量	实时调整捕收剂/抑制剂用量
	粒度仪/浓度计?	粒度分布(−0.074 mm占比、d_{50})	优化磨矿细度
	在线pH/ORP计	pH值、氧化还原电位	调控矿浆酸碱度(如硫化矿浮选)
设备状态	振动传感器＋电流变送器	浮选机叶轮振动幅值、电机电流	预判叶轮磨损、轴承故障

表2　集中式智能控制与分布式智能自治两种模型的特点

Table 2　Characteristics of centralized intelligent control and distributed intelligent autonomy models

模式	集中式智能控制	分布式智能自治
适用场景	大型矿山(日处理＞1万t)、多系列浮选流程	中小型矿山(日处理＜1万t)、单一系列流程
架构特点	中央控制室统一调度，AI模型集中运算	各浮选机/系列独立配置边缘计算节点，局部自治
核心设备	高性能服务器(算力＞100TOPS)、5G基站	嵌入式AI芯片(如NVIDIA Jetson)、工业交换机
优势	全局优化能力强，数据整合度高	响应速度快(延迟＜100 ms)，单点故障影响小
案例	智利Escondida铜矿(日处理12万t，中央AI平台)[74]	日处理3 000 t铅锌矿，系列边缘控制[75]

到“主动预测”的跨越。是未来矿山“高效、绿色、安全”发展的核心引擎。随着大模型、边缘计算、数字孪生等技术的深度融合,流程智能化控制将向“全流程自主决策、全生命周期优化”演进,最终迈向“无人浮选车间”愿景。

6 结论

浮选流程配置技术是矿物加工领域的核心命题之一,其演进始终围绕“高效分选、降本增效、绿色低碳”目标展开。本文系统梳理了浮选流程配置技术的进展,本质是对“矿物-流体-设备-环境”多要素关系的深度认知与系统重构。从设备大型化到源头减量,从粒级分级到干湿协同,再到智能化闭环,共同构成了现代浮选流程的“技术矩阵”。这些突破不仅解决了“贫、细、杂”矿石的分选难题,更推动行业向“高效、绿色、智能”转型。

参考文献

[1] 孙传尧. 选矿工程师手册:第4册[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
Sun Chuanyao. Handbook for mineral processing engineers:(Volume 4)[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2015.

[2] 沈政昌. 浮选机理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018.
Shen Zhengchang. Theory and technology of flotation machines[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2018.

[3] Rios L A, Barraza M J, Quezada G Q. Chalcopyrite flotation, molecular design and smart industry: a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(8): 3613. DOI: 10.3390/ijms26083613.

[4] 殷瑞钰. 冶金流程学[M]. 北京:冶金工业出版社,2023.
Yin Ruiyu. Theory of metallurgical manufacturing process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023.

[5] 孙传尧. 中国大百科全书[M]. 3版. 北京:中国大百科全书出版社,2022.
Sun Chuanyao. Encyclopedia of China[M]. 3rd ed. Beijing:Encyclopedia of China Publishing House,2022.

[6] 我国基因矿物加工工程研究取得新进展[N]. 中国有色金属报,2021-08-27(1).
New progress on genetic mineral processing engineering in China[N]. China Nonferrous Metals News,2021-08-27(1).

[7] 史帅星,樊学赛,刘承欢,等. 机械搅拌式浮选机巨型化发展探究[J]. 有色金属(中英文),2026,16(6):195-198.
Shi Shuaixing, Fan Xuesai, Liu Chenghuan, et al. Research on the giant-scale development of mechanically agitated flotation machines[J]. Nonferrous Metals, 2026, 16(6): 195-198.

[8] 韩登峰. 超大型浮选机下部循环区的构建及其流体动力学特性[D]. 北京:北京科技大学,2025.
Han Dengfeng. Construction and hydrodynamic characteristics of the lower circulation zone of super-large flotation cells[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2025.

[9] 史帅星. 粗颗粒矿物浮选运动特性及大型浮选机结构参数优化[D]. 北京:北京科技大学,2020.
Shi Shuaixing. Flotation motion characteristics of coarse mineral particles and structural parameter optimization of large flotation machines[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

[10] 沈政昌,樊学赛,杨丽君,等. 单槽容积600 m³充气机械搅拌式浮选机流场研究[J]. 有色金属(选矿部分),2013(增刊1):195-198.
Shen Zhengchang, Fan Xuesai, Yang Lijun, et al. Flow field research of 600 m³ aerated mechanically stirred flotation cell[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(S1): 195-198.

[11] 沈政昌,杨义红,韩登峰,等. 680 m³充气式机械搅拌浮选机关键技术特点及其工业应用[J]. 有色金属(选矿部分),2020(1):105-112.
Shen Zhengchang, Yang Yihong, Han Dengfeng, et al. Key technical characteristics and industrial application of 680 m³ mechanically agitated flotation cell[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1): 105-112.

[12] 张建辉,韩登峰,沈政昌,等. 680 m³浮选机工业试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2020(2):84-88.
Zhang Jianhui, Han Dengfeng, Shen Zhengchang, et al. Industrial test research of 680 cubic meters flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(2): 84-88.

[13] 韩登峰,沈政昌,余玮,等. 680 m³浮选机工业化应用过程中的动力学性能测试与分析[J]. 有色金属(选矿部分),2020(4):88-94.
Han Dengfeng, Shen Zhengchang, Yu Wei, et al. Dynamic performance test and analysis during the industrial application of 680 m³ flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(4): 88-94.

[14] 袁琳阳,卢世杰,朱圣林,等. 浮选机内矿浆停留时间分布研究[J]. 有色金属(选矿部分),2020(4):100-104.
Yuan Linyang, Lu Shijie, Zhu Shenglin, et al. Study on pulp residence time distribution inside the flotation cell[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(4): 100-104.

[15] 何建成,沈政昌,韩登峰,等. 680 m³浮选机关键结构仿真分析[J]. 有色金属(选矿部分),2020(5):91-97.

He Jiancheng, Shen Zhengchang, Han Dengfeng, et al. Simulation analysis on the key structure of 680 cubic meters flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5): 91-97.

[16] 余玮，叶岳华，王立刚. 某低品位铜矿短流程优化工艺技术及工业试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(6): 197-204.
Yu Wei, Ye Yuehua, Wang Ligang. Optimized short-process technology and industrial test for a low-grade copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(6): 197-204.

[17] 朱圣林，叶岳华. 江西某低品位难磨铜矿流程优化工艺及工业应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(8): 73-79.
Zhu Shenglin, Ye Yuehua. Process optimization and industrial application of a low-grade refractory copper ore in Jiangxi[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(8): 73-79.

[18] 北矿机电科技有限责任公司. 吉林大黑山钼业680立方米浮选机系统测试报告[R]. 北京：北矿机电科技有限责任公司, 2026.
BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd. Test report of 680 m^3 flotation system for Daheishan Molybdenum Industry in Jilin[R]. Beijing: BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd., 2026.

[19] 北矿机电科技有限责任公司. 德兴铜矿泗洲选厂短流程系统动力学测试报告[R]. 北京：北矿机电科技有限责任公司, 2025.
BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd. Dynamic test report of short flotation process for Sizhou Concentrator of Dexing Copper Mine[R]. Beijing: BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd., 2025.

[20] 何琦，尹青临，卫召，等. 粗粒辉钼矿工艺矿物学及流态化浮选抛废研究[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2729-2741.
He Qi, Yin Qinglin, Wei Zhao, et al. Process mineralogy and fluidized flotation waste rejection of coarse molybdenite[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(8): 2729-2741.

[21] Gahona L A, Cisternas L, Araya-Gómez N, et al. Bubble size characterization in the HydroFloat® fluidized-bed flotation cell using tap water and seawater[J]. Minerals, 2024, 14(8): 825. DOI: 10.3390/min14080825.

[22] Chen Jiarui, Chimonyo W, Peng Yongjun. Flotation behaviour in reflux flotation cell: a critical review[J]. Minerals Engineering, 2022, 181: 107519. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107519.

[23] 刘金成，何琦，尹青临，等. 粗颗粒流态化浮选Ⅰ：动力学分区及矿化气絮体稳定性分析[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(11): 3792-3801.
Liu Jincheng, He Qi, Yin Qinglin, et al. Coarse particle fluidized flotation Ⅰ: kinetic zoning and stability analysis of mineralized gas flocs[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(11): 3792-3801.

[24] 彭建. 流场调控的粗粒浮选柱分选理论与应用研究[D]. 长沙：中南大学, 2023.
Peng Jian. Separation theory and application of coarse particle flotation column regulated by flow field[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[25] 韩海生，彭建，孙伟，等. 一种湍流与稳流协同流化的粗颗粒浮选设备及方法：CN113499861A[P]. 2021-05-24.
Han Haisheng, Peng Jian, Sun Wei, et al. A coarse particle flotation device with synergistic turbulent and steady flow fluidization: CN113499861A[P]. 2021-05-24.

[26] 沈政昌，樊学赛，刘承帅，等. 浮选装备研究进展与发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(10): 1-12.
Shen Zhengchang, Fan Xuesai, Liu Chengshuai, et al. Research progress and development trend of flotation equipment[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(10): 1-12.

[27] Daniel M, Dirk M H, Stephen J N, et al. Characterisation of the multiphase fluid dynamics of the CoarseAIR™ fluidised bed flotation cell using positron emission particle tracking[J]. Minerals Engineering, 2024, 211: 108700. DOI: 10.1016/j.mineng.2024.108700.

[28] Luke J C, Mohammad T I, Kevin P G. Assessment of the partitioning of coarse hydrophobic particles in the concentrate of the CoarseAIR™ flotation system with a reference mechanical cell[J]. Minerals Engineering, 2023, 198: 108088. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108088.

[29] Luke J C, Mohammad T I, Kevin P G. Investigation of internal classification in coarse particle flotation of chalcopyrite using the CoarseAIR[J]. Minerals, 2022, 12(6): 783. DOI: 10.3390/min12060783.

[30] Alireza H, Mohsen S, Dinh H H, et al. Technological assessments on recent developments in fine and coarse particle flotation systems[J]. Minerals Engineering, 2022, 180: 107509. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107509.

[31] TEM Partner. Flotation equipment technical brochure[R]. St. Petersburg: TEM Partner, 2024.

[32] 张福亚，樊学赛，张跃军，等. 新型闪速浮选机回收分级沉砂中石墨矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 181-184.

Zhang Fuya, Fan Xuesai, Zhang Yuejun, et al. Experimental study on graphite recovery from classifier underflow by a new flash flotation machine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(4): 181-184.

[33] 赵泓铭,戴惠新. 闪速浮选技术及其应用[J]. 矿产综合利用, 2016, 37(6): 17-21.
Zhao Hongming, Dai Huixin. Application of flash flotation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016, 37(6): 17-21.

[34] Juan Y, Patricio V, Mario R. Industrial flash flotation application at Collahuasi copper concentrator for coarse copper sulfide recovery[J]. Minerals Engineering, 2017, 112: 98-105.

[35] Lars V, Bjorn A, Brent S, et al. Newcrest's industry first application of Eriez HydroFloat™ technology for copper recovery from tailings at Cadia Valley Operations[C]// Proceedings of the 58th Conference of Metallurgists Hosting the International Copper Conference 2019. Vancouver: CIM, 2019.

[36] 刘振春,沈政昌,刘惠林. CLF粗粒浮选机的研究[C]// 中国有色金属学会第二届学术会议. 北京, 1991: 15-22.
Liu Zhenchun, Shen Zhengchang, Liu Huilin. Research on CLF coarse particle flotation machine[C]//The 2nd Academic Conference of Nonferrous Metals Society of China. Beijing, 1991: 15-22.

[37] 沈政昌,刘振春. 粗粒浮选机叶轮设计[J]. 有色金属(选矿部分), 1997(1): 8-13.
Shen Zhengchang, Liu Zhenchun. Impeller design of coarse-grain flotation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1997(1): 8-13.

[38] 罗世瑶. 基于流态化技术的粗颗粒浮选装置研究[D]. 北京:北京矿冶研究总院, 2020.
Luo Shiyao. Study on coarse particle flotation device based on fluidization technology[D]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, 2020.

[39] 沈政昌,刘惠林,刘振春. 粗颗粒浮选机在白钨矿浮选中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 1995(3): 31-33, 38.
Shen Zhengchang, Liu Huilin, Liu Zhenchun. Application of coarse particle flotation machine in scheelite flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1995(3): 31-33, 38.

[40] 张辉,孟庆波,余利红,等. 某复杂低品位铍矿综合回收研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(6): 96-102.
Zhang Hui, Meng Qingbo, Yu Lihong, et al. Study on comprehensive recovery of a complex low-grade beryllium ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(6): 96-102.

[41] 陈飞飞,胡森伟,张明,等. 面向微细粒矿物高效回收的新型机械搅拌浮选机流场特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(11): 136-146.
Chen Feifei, Hu Senwei, Zhang Ming, et al. Study on flow field characteristics of a new type of mechanically agitated flotation machine for high efficiency recovery of fine minerals[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(11): 136-146.

[42] 中国矿业联合会. 800立方米浮选机在迪庆有色投入使用[EB/OL]. (2025-02-12)[2025-06-20]. http://chinamining.org.cn/index.php/news/9/8741.
China Mining Confederation. The 800 cubic meter flotation machine was put into use in Diqing Nonferrous Metals[EB/OL]. (2025-02-12)[2025-06-20]. http://chinamining.org.cn/index.php/news/9/8741.

[43] Kevin S, Mark S. Application of the Woodgrove staged flotation reactor (SFR) Technology at the New Afton Concentrator[C]//48th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. Ottawa: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016.

[44] Ricardo L. Enhancing fine iron ore flotation using the direct flotation reactor (DFR®): pilot results and full scale evaluation[C]//Flotation 2025 Conference. Cape Town, 2025.

[45] Michael J M, James N K, Lazaros C. Improving fine particle flotation using the StackCell™(raising the tail of the elephant curve)[J]. Minerals Engineering, 2018, 121: 83-89.

[46] Eric D, Hany F, Robert van W. Metallurgical testing and CFD simulation of StackCell® SC-50 high-intensity flotation machine[J]. Minerals Engineering, 2022, 181: 107532. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107517.

[47] 李恒欠,徐乾德,张明,等. 基于等能量输入的微细粒浮选机湍流强化策略及扩大试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(12): 126-134.
Li Hengqian, Xu Qiande, Zhang Ming, et al. Turbulence strengthening strategy and expanded test research of micro-fine flotation machine with equal energy input[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(12): 126-134.

[48] 陈飞飞,张明,何建成,等. 一种三层结构细粒浮选机叶轮: CN202510036905.2[P]. 2025-04-04.
Chen Feifei, Zhang Ming, He Jiancheng, et al. An impeller for fine particle flotation machine with three-layer structure: CN202510036905.2[P]. 2025-04-04.

[49] 矿冶科技集团有限公司. WXF微细粒浮选装备[EB/OL]. (2025-06-20). [2025-07-09]. http://www.bgrimm.com/cpyfw/yjkf/kyzb/WXFwxlfxzb/index.htm.
BGRIMM Technology Group. WXF micro-fine particle flotation equipment[EB/OL]. (2025-06-20). [2025-07-09]. http://www.bgrimm.com/cpyfw/yjkf/kyzb/WXFwxlfxzb/index.htm.

[50] 吴峰，史帅星，樊学赛，等. 微细粒浮选泡沫特性及排出系统设计[J]. 有色金属(选矿部分)，2026(2)：112-118.
Wu Feng，Shi Shuaixing，Fan Xuesai，et al. Design of foam characteristics and discharge system for micro-fine flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2026(2)：112-118.

[51] Zhang Huajie，Liu Jiongtian，Wang Yutong . Cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. Minerals Engineering，2013，45：1-3.

[52] 余悦. KYZ浮选柱操作参数对铜浮选效率影响的研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2019(2)：76-79.
Yu Yue. Study on influence of KYZ flotation column operating parameters on copper flotation efficiency[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2019(2)：76-79.

[53] Graham J. The Jameson cell：a new concept in flotation[J]. Minerals Engineering，1994，7(3)：327-335.

[54] Alireza H，Shahram H，Nurettin A. Imhoflot™ flotation cell performance in mini-pilot and industrial scales on the Acacia copper ore[J]. Minerals，2024，14(6)：590. DOI：10.3390/min14060590.

[55] Alejandro Y，Nikolaus K，Baris T. Fine and ultrafine flotation with the Concorde Cell™：a journey[J]. Minerals Engineering，2024，199：108538. DOI：10.1016/j.mineng.2024.108538.

[56] 奥图泰(芬兰公司). 浮选系统、浮选生产线及其用途，CN121244407A[P]. 2026-01-02.
Outotec(Finland). Flotation system，flotation production line and application thereof：CN121244407A[P]. 2026-01-02.

[57] Metso Corporation. Unlocking value in flotation[EB/OL]. (2026-06-21)[2026-07-01]. https：//www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/unlocking-value-in-flotation/.

[58] 史帅星，樊学赛，罗世瑶，等. 一种全粒级回收的浮选装置及浮选方法，CN116273487A[P]. 2022-12-21.
Shi Shuaixing，Fan Xuesai，Luo Shiyao，et al. Flotation device and flotation method for full particle size recovery：CN116273487A[P]. 2022-12-21.

[59] 沈政昌，韩登峰，史帅星，等. 一种矿物浮选方法及浮选系统：CN108126827A[P]. 2017-12-11.
Shen Zhengchang，Han Dengfeng，Shi Shuaixing，et al. Mineral flotation method and flotation system：CN108126827A[P]. 2017-12-11.

[60] Han Dengfeng，Shi Shuaixing，Chen Shuhan，et al. An investigation of the impact of altering the contact sequence among gas，liquid，and solid phases on mineral floatability[J]. Minerals，2025，15：306. DOI：10.3390/min15030306.

[61] 罗亨通，封东霞，杨多，等. 粗颗粒浮选技术及其应用[J]. 矿产保护与利用，2022，42(1)：129-137.
Luo Hengtong，Feng Dongxia，Yang Duo，et al. Coarse particle flotation technology and its application[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2022，42(1)：129-137.

[62] 谭世国，樊学赛，蒋仁东，等. 攀西某选厂选钛浮选动力学特性研究[J]. 钢铁钒钛，2022，43(2)：23-28.
Tan Shiguo，Fan Xuesai，Jiang Rendong，et al. Study on flotation kinetic characteristics of titanium separation in a Panxi concentrator[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2022，43(2)：23-28.

[63] 樊学赛，陈俊，史帅星，等. 钒钛磁铁矿选钛浮选机动力学特性分析[J]. 钢铁钒钛，2019，40(2)：78-83.
Fan Xuesai，Chen Jun，Shi Shuaixing，et al. Kinetic characteristic analysis of flotation machine for titanium separation of vanadium-titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2019，40(2)：78-83.

[64] 张跃军，史帅星，陈东，等. 一种高浓度浮选机成套装置：CN109225657B[P]. 2018-09-25.
Zhang Yuejun，Shi Shuaixing，Chen Dong，et al. Complete set of high-concentration flotation machine：CN109225657B[P]. 2018-09-25.

[65] 中国矿业联合会. 2023年智能矿山建设白皮书[R]. 北京：中国矿业联合会，2023.
China Mining Confederation. White paper on intelligent mine construction 2023[R]. Beijing：China Mining Confederation，2023.

[66] Microsoft Corporation. AI transformation in mining：the next wave of digital innovation[R]. Redmond：Microsoft Corporation，2024.

[67] 王康，徐航，李晓理，等. 数据驱动的浮选过程建模、控制与优化研究进展[J]. 北京工业大学学报，2023，49(4)：485-506.
Wang Kang，Xu Hang，Li Xiaoli，et al. Research progress on modeling，control and optimization of data-driven flotation process[J]. Journal of Beijing University of Technology，2023，49(4)：485-506.

[68] 桂卫华，阳春华，徐德刚，等. 基于机器视觉的矿物浮选过程监控技术研究进展[J]. 自动化学报，2013，39(11)：1879-1892.
Gui Weihua，Yang Chunhua，Xu Degang，et al. Research progress on mineral flotation process monitoring technology based on machine vision[J]. Acta Automatica Sinica，2013，39(11)：1879-1892.

[69] 王春景，刘丹，邵平，等. 基于CNN-LSTM-Attention网络的浮选品位监测模型构建[J]. 化工矿物与加工，2024，53(12)：1-7.
Wang Chunjing，Liu Dan，Shao Ping，et al. Construction of flotation grade monitoring model based on CNN-

LSTM-Attention network[J]. Industrial Minerals and Processing, 2024, 53(12): 1-7.

[70] 邹奇奇, 廖寅飞, 苏海龙, 等. 基于LSTM的浮选钼精矿品位软测量模型[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(8): 789-795.
Zou Qiqi, Liao Yinfei, Su Hailong, et al. Soft measurement model of molybdenum concentrate grade in flotation based on LSTM[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(8): 789-795.

[71] 秦新凯, 王然风, 付翔, 等. 基于无模型深度强化学习的煤泥浮选智能控制研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(8): 1-8.
Qin Xinkai, Wang Ranfeng, Fu Xiang, et al. Research on intelligent control of slime flotation based on model-free deep reinforcement learning[J]. Industry and Mine Automation, 2025, 51(8): 1-8.

[72] 孙传尧, 周俊武. 流程工业选矿过程智能优化制造发展战略[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 1-5.
Sun Chuanyao, Zhou Junwu. Development strategy of intelligent optimal manufacturing for mineral processing in process industry[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 1-5.

[73] 辛战文, 于超. 基于"云-边-端"协同的选煤厂智能管控平台架构设计与实践[J]. 智能矿山, 2026, 7(4): 53-61.
Xin Zhanwen, Yu Chao. Architecture design and practice of intelligent management and control platform for coal preparation plant based on cloud-edge-end collaboration[J]. Intelligent Mine, 2026, 7(4): 53-61.

[74] 埃斯康迪达铜矿利用AI提高回收率[EB/OL]. (2023-06-09)[2026-06-09]. 全球地质矿产信息系统. https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/kcykf/kfjs/202306/t20230609_8533757.htm.
Escondida Copper Mine improves recovery rate with artificial intelligence[EB/OL]. (2023-06-09)[2026-06-09]. Global geological and mineral information system. https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/kcykf/kfjs/202306/t20230609_8533757.htm.

[75] 陈青. 铅锌矿冶企业数智化数实融合转型方向与规划[J]. 中国矿业, 2025, 34(增刊1): 178-184.
Chen Qing. Digital-real integration transformation direction and planning for lead-zinc mining and metallurgical enterprises[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(S1): 178-184.

(本文编辑 刘水红)

【缅怀寄语】

敬爱的孙老师, 不觉间, 您已离开我们一周年了。

夏夜梦中, 星星点点, 您的音容笑貌不时在脑海浮现, 回忆您的点点滴滴, 催人奋进。

您的生活是简朴的。2004年入职矿院, 周末的早上, 有时能在二里沟山西夫妇开的芝麻烧饼铺前碰到您在那里买烧饼。后来才知道, 这是您中午的午饭, 作为总院的院长, 生活的要求极低。2023年在成都参加低品位资源会议, 您提着一个超重的陈旧的笔记本电脑在现场办公, 我说回去给您换一个, 您总是不愿意! 行李箱也是用了十几年没有更换。那是怎样简朴呀!

您的举止是优雅的。记得刚入矿院在文化宫与您一起学习华尔兹, 您说这是与国外交往社交礼仪, 必须学会。停歇的间隙, 看您随节律起伏的高大身影, 那是极其优雅的。还记得和您一起参加的每次学术会议, 您总是坐到会场第一排听报告, 一直坚持到会议的最后, 不断地与年青人交流。您认真听报告的样子, 一定是学术交流会议现场最优雅的风景。

您对学术研究是严谨的。2007年我第一次申报院科研基金项目, 题目是弧面叶轮结构的开发。没想到答辩现场, 您也在场, 对我的申报内容不合理性提了大量的意见, 第一次在我心中种下了技术研究必须严谨的种子。2018年组织专家审阅我的博士论文初稿, 从早九点一直到晚九点, 一直没有停下, 让我一句话一句话的读出来, 不恰当地方马上指出进行改正。引经据典讲出不合理之处, 让我心服口服。您常说, 读博士三分之一为了单位, 三分之一为了个人, 三分之一为了家庭, 博士论文伴随你一辈子, 对自己负责, 对读者负责, 不能有任何错误! 错别字、标点符号都不行。那天讨论的录音一直留着, 时时听听, 鞭策着我的科研学术工作。您学术上认真和严谨的态度, 让我们终生难忘!

孙老师大学毕业后从东北大学到可可托海默默工作十年, 其后求学北京, 毕业后在北京矿冶研究总院工作大半辈子, 可谓一生戎马全为中国矿业的发展。

在您心中一直存着中国选矿科技世界第一的梦想。我想, 在您人格力量和奋斗精神的鼓励下, 我辈定会努力使其早日实现!

——史帅星