

微细粒煤泥浮选分离强化方法及技术研究进展

王学霞¹, 于梅¹, 王焯敏¹, 马超¹, 卜祥宁^{2,3}

(1.山西工程技术学院 矿业工程系, 山西 阳泉 045000; 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 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:微细粒煤泥的高效浮选分离对于提高煤炭利用率、减少环境污染、实现资源节约有重要意义。然而,微细粒煤泥质量小,缺乏足够的动能克服与气泡附着的能垒,导致颗粒与气泡矿化效率低,是制约微细粒煤泥高效浮选回收的瓶颈。此外,黏土矿物夹杂污染、浮选泡沫性质和捕收剂性能等因素对微细粒煤泥浮选选择性影响也很重要。为解微细粒煤泥浮选强化方法及技术研究进展,从增大表观粒径、减小气泡尺寸、强化流场调节、捕收剂优化、浮选设备改进、浮选工艺创新和矿浆预处理等7方面进行综述,并深入探讨不同浮选分离强化方法及技术的优劣势。其中,絮凝浮选、超声驻波团聚、纳米气泡浮选、湍流强度调控及捕收剂分子设计优化等均在实验室研究阶段,向工业化应用发展的过程中还需开展大量基础理论研究及半工业化研究,而寻求成本效益卓越的新型药剂、浮选设备升级赋能、浮选工艺智慧创新及浮选矿浆预处理精细强化或将是现有选煤厂强化微细煤泥浮选分离效果较妥当且切实可行的方案。

关键词:微细粒煤泥;浮选强化;流场强化;捕收剂优化;设备及工艺改进

中图分类号:TD923 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)08-0185-17

Research progress on methods and technologies for enhancing flotation separation of fine coal slime

WANG Xuexia¹, YU Mei¹, WANG Yemin¹, MA Chao¹, BU Xiangning^{2,3}

(1. Department of Mining Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China; 2. Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization (Ministry of Education), China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The efficient flotation separation of fine coal slime is of great significance for improving coal utilization, reducing environmental pollution, and achieving resource conservation. However, fine coal slime is small in mass and lack of sufficient kinetic energy to overcome the energy barrier attached to bubbles, resulting in low mineralization efficiency of particles and bubbles, which is a bottleneck that restricts the efficient flotation recovery of fine coal slime. In addition, the factors such as clay mineral entrainment pollution, foam properties and collector performance are also important in influencing the flotation selectivity of fine coal slime. To understand the latest research progress on methods and technologies for enhancing flotation separation of fine coal slime, seven aspects including increasing apparent particle size, reducing bubble size, strengthening flow field regulation, optimizing collector performance, improving flotation equipment, innovating flotation processes, and pretreating slurry were reviewed comprehensively. The advantages and disadvantages of different enhancing methods and technologies of flotation separation were also deeply explored. Among them, flocculation flotation, ultrasonic standing-wave agglomeration, nanobubble flotation, turbulence intensity regulation, and collector molecular design optimization are all in the laboratory research stage. A large amount of basic theoretical research and semi-industrial research are needed to develop towards industrial application. At present, it is more appropriate and feasible for coal preparation plants to enhance the flotation separation performance of

收稿日期:2024-05-31; **责任编辑:**戴春雷 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.24053101

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52204296),山西省基础研究计划(自由探索类)青年资助项目(202303021212311),山西省高等学校大学生创新创业训练计划资助项目(202314527004)

作者简介:王学霞(1988—),女,山西怀仁市人,讲师,博士.E-mail: wxuexia1989@163.com

通讯作者:卜祥宁(1990—),男,江苏省徐州市人,博士.E-mail: xiangning.bu@foxmail.com

引用格式:王学霞,于梅,王焯敏,等.微细粒煤泥浮选分离强化方法及技术研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(8):185-201.

WANG Xuexia, YU Mei, WANG Yemin, et al. Research progress on methods and technologies for enhancing flotation separation of fine coal slime[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 185-201.



移动阅读

fine coal slime by seeking new cost-effective reagents, upgrading flotation equipment, innovating flotation process, and finely strengthening flotation slurry pretreatment.

Key words: fine coal slime; flotation enhancement; strengthen flow field; collector optimization; equipment and process improvement

0 引言

随着煤炭开采深度和机械化程度提高,微细粒级煤泥资源比例明显攀升,其精准高效回收关乎煤炭这种一次能源资源利用率,且与环境保护和可持续发展有关。因此如何实现微细粒煤泥清洁高效回收成为企业管理者和专业学者关注热点,深入探讨和研究强化微细粒煤泥浮选对于提高煤炭加工效率、减少环境污染、实现资源节约有重要意义。

浮选是当前微细粒煤泥提质降灰的最有效方法,在选煤厂已实现广泛工业化应用^[1]。随着煤矿开采深度不断加深,细粒(-0.5 mm)和微细粒(-0.074 mm)煤泥在原煤中比例呈持续增大趋势,导致选煤厂入浮煤泥量增多、粒度越来越细、灰分越来越高^[2]。随之而来的就是入浮煤泥整体可浮性变差和分离难度变大,浮选完善指标降低,严重制约着选煤厂精煤质量改善和经济效益的提高。

而微细煤泥可浮性差、分离难度大的原因主要有微细粒煤自身颗粒特性(如质量小、比表面积大等)、不同矿物表面电性整体调控难、黏土矿物污染、浮选泡沫黏度大和捕收剂分散性能差等。近年来,国内外学者主要从增大颗粒表观粒径、减小气泡尺寸、强化浮选的流体流动和提高捕收剂性能等开展了强化微细粒煤泥浮选效果研究。为全面了解微细煤泥浮选分离强化方法及技术的最新研究进展,笔者从7方面系统综述了相关文献,对比不同强化方法优劣势,展望了未来研究方向,为微细粒煤泥浮选分离强化与新技术的研发提供借鉴。

1 微细粒煤泥浮选分离难的原因

对于细泥含量高煤泥,常规浮选工艺处理普遍存在分选精度低、精煤灰分偏高问题^[3]。就理论而言,含杂少、灰分低的煤机械强度小,在分选中易碎成细粒或微细粒,换言之,由微细粒级分选所得浮选精煤灰分理应由细粒级分选所得浮选精煤灰分低。然而,实际生产结果却恰恰相反,原因是煤泥浮选受微细脉石矿物污染影响,使浮选精煤指标降低,导致微细粒煤泥的浮选效果不理想。

研究表明,微细粒煤泥浮选分离难的原因主要有以下7方面:

1)微细粒煤质量小。微细粒煤质量小、动量

低,使其与气泡的碰撞概率、黏附概率小,导致其浮选速率低,由此引起细粒煤和脉石矿物的混杂,降低浮选精煤品质^[4]。

2)微细粒煤比表面积大。微细粒煤尺寸越小,其比表面积越大,表面能则越高,这样易对浮选药剂发生非选择性吸附,导致药剂耗量高,且造成高灰脉石矿物与低灰微细粒煤之间非选择性团聚严重,使浮选选择性降低,恶化浮选效果。

3)微细粒煤表面难免离子溶解度大。由于微细粒煤表面难免离子溶解增大,使矿浆中离子组分及浓度增大,在脉石矿物表面发生化学反应,导致表面性质发生转化,干扰浮选^[5]。

4)表面电性影响。不同矿物颗粒间静电力的相互作用能使带电的微细粒矿物在带相反电荷的粗粒上附着,使不同矿物颗粒间发生互凝,产生细泥罩盖现象^[5]。

5)黏土矿物影响。煤泥中黏土矿物在水中极易泥化成微米级矿物,微细黏土矿物颗粒进入泡沫层后会对精煤造成污染,导致浮选精煤灰分高,使煤泥的浮选效果变差^[6]。此外,微细脉石矿物颗粒可通过机械夹带、水流夹带、细泥罩盖和连生体颗粒非选择性上浮等形式污染浮选精煤^[7]。

6)泡沫黏度大。由于大量脉石矿物非选择性地附着在气泡表面,使泡沫的黏度增大,稳定性提高,弱化了泡沫层的二次富集作用,导致微细粒煤泥浮选选择性变差、精煤灰分升高,给后续产品脱水带来困难^[8]。

7)捕收剂分散性能差。煤泥捕收剂通常用煤油、柴油等非极性烃类油,其在水中分散性差,难形成细小的分散相,不利于捕收剂在煤粒表面高效铺展^[9]。

微细粒煤泥浮选分离难的原因可归类为微细粒煤本身性质、微细粒煤泥中泥质成灰矿物、浮选药剂等,因此微细粒煤泥的分选一直是选煤领域研究热点和难点。为有效分选微细粒煤泥,应全面考虑各因素,选择合适的浮选方法和对策,最大化地清洁回收和利用煤泥资源。

2 微细粒煤泥浮选分离强化研究进展

矿物浮选的关键是气泡有效捕获疏水颗粒,由颗粒与气泡的碰撞、颗粒与气泡的黏附和颗粒与气

泡的脱附3步来完成^[10],因此增大疏水颗粒与气泡间碰撞概率和黏附概率是提高微细粒煤浮选效率的有效途径^[8,11]。

WEBER等^[12-13]使用分析和数值方法得出颗粒与气泡的碰撞概率 P_c 的表达式:

$$P_c = \frac{3}{2} \left[1 + \frac{\left(\frac{3}{16} Re^{0.72} \right)}{1 + 0.249 Re^{0.56}} \right] \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2, \quad (1)$$

式中, Re 为雷诺数; D_p 为颗粒粒径; D_b 为气泡直径。

YOON等^[14]使用无量纲流函数,推导出 P_c 的表达式:

$$P_c = \left[\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right] \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2. \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知 P_c 与 D_p/D_b 相关,当 D_p 不变时, P_c 随 D_b 减少呈平方次增大;当 D_b 不变时, P_c 随 D_p 增大呈平方次增大;且 P_c 还与 Re 相关。

因此根据微细粒煤泥浮选分离难的原因及影响 P_c 的因素,国内外学者主要从增大颗粒表观粒径、减小气泡尺寸、强化浮选过程的流体流动和提高捕收剂性能等开展强化微细粒煤泥浮选效果研究。

2.1 增大颗粒表观粒径

絮凝或团聚是增加颗粒表观粒径的常用方法,将其用于微细煤泥浮选可实现增大煤或脉石颗粒粒径的目的,提高煤颗粒与气泡的碰撞概率或减少微细脉石矿物对浮选精煤夹带污染,因此基于絮凝或团聚的浮选技术得到广大学者的关注。

2.1.1 絮凝浮选

在矿浆充分分散的前提下,向矿浆中加入表面活性剂或絮凝剂等实现目标矿物的絮凝,使目标矿物的颗粒表观粒径增大,再通过浮选分离的方法将有用矿物和脉石矿物分开,如絮凝浮选、选择性絮凝浮选、剪切絮凝浮选、疏水絮凝浮选等^[4]。

絮凝浮选在细粒级矿物分选领域有广泛应用^[15-17]。王辉^[18]探索了适合絮凝浮选的煤泥粒度范围,当加入絮凝剂后,-0.045 mm煤泥的表观粒径明显改变,使精煤产率提高4.16%,并在工业浮选柱试验中得到有效论证。

选择性絮凝浮选是分离细粒矿物的有效方法,药剂是选择性絮凝的关键。相较常规浮选,微细煤泥选择性絮凝浮选的浮选速率大,且分选选择性好。选择性絮凝的目标矿物可以是煤颗粒,也可以是脉石矿物。

使用阴离子聚丙烯酰胺(PAM A401)对微细煤泥中煤颗粒的选择性絮凝时,其使煤颗粒的表面润

湿性降低,但由于煤颗粒的表观粒径增大,显著提高浮选速率,缩短浮选时间,减少高灰细泥的夹带,促进微细粒煤泥分选^[19]。为促进絮凝剂在煤表面选择性吸附,ZOU等^[20]将有疏水性烃链的十六烷基二甲基烯丙基氯化铵(C_{16} DMAAC)引入聚丙烯酰胺(PAM)中,然后合成了疏水改性的聚丙烯酰胺(P(AM-NaAA- C_{16} DMAAC))。当P(AM-NaAA- C_{16} DMAAC)和煤油的用量分别为5和900 g/t时,选择性絮凝浮选的可燃物回收率80.87%,比不加絮凝剂浮选高2.56个百分点,且使用P(AM-NaAA- C_{16} DMAAC)能减少捕收剂用量。LIANG等^[21]研究发目前六偏磷酸钠的存在下,聚环氧乙烷(PEO)能有效提高细煤泥的可燃体回收率。当PEO用量少时,PEO选择性地絮凝了煤颗粒,增大了其表观粒径,提高煤颗粒与气泡之间碰撞概率,使浮选精煤灰分低。

在煤泥浮选中加入聚合氯化铝(PAC)后,由于微细脉石对浮选精煤污染得到改善,浮选精煤可燃体回收率和灰分均降低,精煤质量提高^[22]。聚乙烯吡咯烷酮(PVP)不同悬浮液系统表现出好的分散或絮凝能力。WANG等^[23]研究PVP对微细煤泥浮选的作用效果,结果表明,少量PVP对黏土矿物如石英和高岭土有絮凝作用,而对煤颗粒几乎没有絮凝作用,因此在浮选中加入少量PVP可显著降低精煤灰分,并提高煤泥的浮选选择性,但会导致可燃体回收率略降低。XIA等^[24]研究发现目前煤泥浮选中加入阴离子型聚丙烯酰胺可有效减少高岭石在泡沫精矿中夹带和其在浮选精煤表面罩盖。杨自立^[7]通过阳离子-阴离子二元复配絮凝剂设计思路开发了低分子量聚二甲基二烯丙基氯化铵/阴离子聚丙烯酰胺的复配絮凝剂,表现出较好选择性絮凝能力,能较好实现黏土矿物的选择性絮凝。经“一粗一精”浮选流程分选,细泥絮凝强化高灰细粒煤浮选指标较好。与常规浮选相比,精煤灰分降低0.72个百分点,可燃体回收率提高4.32个百分点。为提高选择性絮凝/凝聚的方法对煤泥浮选的改善效果,梁龙等^[25]提出一种基于流场剪切速率调控强化煤泥浮选中石英选择性絮凝的方法。不同剪切速率下对煤和石英的混合矿物进行调浆浮选试验,研究表明,在高剪切速率下,煤泥的浮选效果改善,原因是高剪切速率可抑制由石英的水流夹带导致的精煤污染。由此也说明调控剪切速率可强化煤泥中石英的选择性絮凝并抑制其水流夹带。

用水热合成法制备杂化聚合物二氧化硅-聚乙烯吡咯烷酮(SiO_2 -PVP),将其用于微细低阶煤泥浮

选,试验结果表明, SiO_2 -PVP 利于提高微细低阶煤泥的选择性,既增大了精煤可燃体回收率,又降低精煤灰分。分析原因:一方面是由于煤表面含氧官能团减少,煤泥的疏水性改善;另一方面是矿浆中存在的 SiO_2 -PVP 影响颗粒的絮凝,使煤颗粒的平均尺寸增大,脉石矿物颗粒的尺寸增大^[26]。

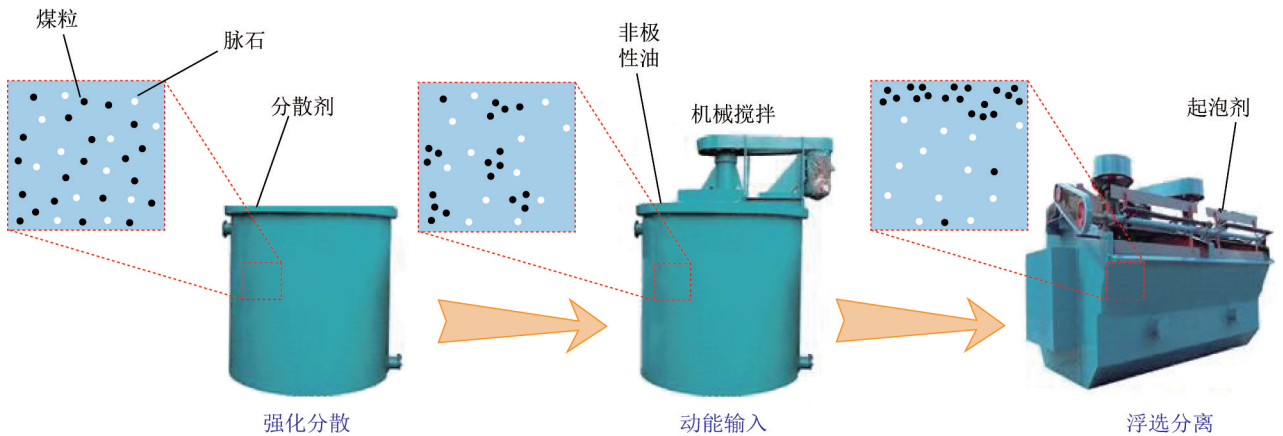


图1 疏水团聚浮选的示意^[27]

Fig.1 Schematic diagram of hydrophobic agglomeration flotation^[27]

为促进微细低阶煤疏水团聚,LIN 等^[28]在浮选中加入聚丙烯酰胺接枝聚乙烯吡咯烷酮(PVP-g-PAM)。相较添加或不添加 PVP,PVP-g-PAM 可提高精煤回收率,且能降低精煤灰分,原因是在 PVP 分子链和丙烯酰胺官能团的协同作用下,煤粒的粒径显著增大,煤泥的选择性和浮选效率得以提升。

通过实验室研究结果得知,与常规浮选相比,絮凝浮选对微细煤泥的回收有强化提升作用。但絮凝浮选中絮凝剂选择性差,使微细脉石矿物与低灰细煤絮团一起进入精煤泡沫层中,影响浮选精煤灰分;此外工业规模中煤泥性质随时变化,导致与实验室规模试验用样品存在较大差异,且工业生产中脉石矿物会对絮凝浮选造成干扰。此外,絮凝剂成本高,制约微细煤泥絮凝浮选的工业应用。为获得选择性好的絮凝剂且降低药剂成本,可通过模拟方法对絮凝剂进行分子定向筛选,研制出廉价、高效的絮凝剂开展实验室试验。在开展实验室基础理论研究的同时还需进行大量微细煤泥絮凝浮选半工业试验研究,逐步扩大向工业化应用迈进。

2.1.2 载体浮选

载体浮选亦通过增大煤粒的尺寸来改善微细煤泥的浮选效果,主要以矿物表面疏水而吸附在粗粒载体或聚合物载体粒子表面为基础。WANG 等^[29]研究粗粒煤对 2 种细粒煤浮选的作用效果,结果表明在细粒煤浮选中加入疏水性强的粗粒煤可显著改

疏水团聚是在机械搅拌作用下,表面疏水的微细粒矿物克服势能垒,形成大颗粒聚团。基于疏水团聚技术的浮选方法是有效分选微细粒煤泥的技术,其示意如图 1 所示^[27]。用疏水团聚浮选方法处理太西无烟煤,其可燃体回收率 81.25%,且可获得灰分为 0.82%的精煤^[27]。

善细粒煤浮选效果,原因是粗粒煤和细粒煤间存在相互吸引作用。ZHOU 等^[30]研究发现载体颗粒聚苯乙烯和水力空化产生的纳米气泡结合浮选技术对高灰细粒煤浮选效果有明显提升作用,其作用机理如图 2 所示。

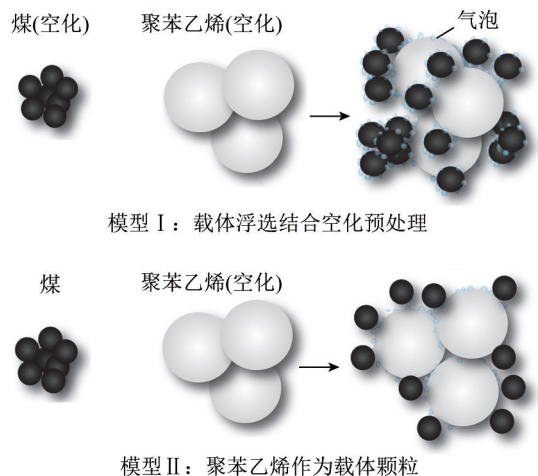


图2 空化过程中颗粒与纳米气泡之间相互作用机理^[30]
Fig.2 Two models of interaction between particles and nano-bubbles during cavitation^[30]

可知预先附着在聚苯乙烯颗粒和煤粒上纳米气泡可作为细粒煤(或聚集体)和载体颗粒之间桥梁。目前载体浮选在微细煤泥的应用仍在实验室研究阶段,用非煤类载体颗粒时,其制备与分离较困难,但该技术可提高微细煤泥回收率,且能减少浮选药剂用量,降低药剂成本,因此其也是有效回收微细煤泥

的方法。

2.1.3 超声驻波团聚

驻波型超声设备的传感器产生的超声波是平行传播的,若忽略超声波的衰减,则与传感器平行的任意位置的超声波振幅均相同。当细颗粒存在时,在超声驻波设备的特定操作条件,气泡聚集可能通过颗粒和气泡的聚集使颗粒粒径变大。为此,CHEN等^[31-35]开展了一系列基于超声驻波技术的声团聚方法处理微细粒煤浮选试验和基础理论研究。由微浮选试验结果知,在超声驻波场下, -0.074 和 $0.074 \sim 0.125$ mm 粒级煤浮选速率明显提高^[31]。进一步用高聚焦超声系统检测瞬态空化阈值研究亲疏水性二氧化硅颗粒悬浮液中气核,得出超声驻波技术能有效促进疏水性颗粒选择性团聚,为强化微细煤泥的浮选分离提供一种新的、高效的解决方案^[32]。通过研究超声驻波频率对微细粒煤和气泡间吸附矿化影响得出,与常规浮选相比,200 和 600 kHz 的高频超声驻波可提高细粒的浮选回收率和速率。当超声驻波频率 600 kHz 时,可获得最大浮选回收率,即从 22% (不使用超声驻波) 增至 53%。由空化阈值分析表明,提高超声驻波的频率可促进载体气泡形成;且受力分析表明,载体气泡间二次声辐射力随着频率增加而增加,高频超声驻波使载体气泡与常规浮选气泡相互吸引^[33]。由 600 kHz 超声驻波场中气泡与煤颗粒相互作用研究结果知,在煤颗粒表面形成的空化气泡会驱使煤颗粒在声压节点处聚集,然后在次级声辐射力的作用下被大气泡吸引。与传统重力场相比,气泡和煤颗粒在 600 kHz 超声驻波场中相互作用效率更高,因此在 600 kHz 超声驻波场下,微细煤泥的浮选回收率显著提高^[34]。王卫东等^[36]在驻波超声浮选装置中探究同步超声对微细煤泥浮选的影响,试验结果表明,相较常规浮选,超声同步浮选表现出好的浮选效果。当频率 100 kHz 时,超声同步浮选的精煤产率、可燃体回收率和浮选完善指标较常规浮选分别提高 6.82%、7.83% 和 2.79%。与常规柱选微细粒煤泥的结果相比,驻波超声柱选的精煤产率、可燃体回收率和浮选完善指标均得到提高,且精煤灰分降低 1.07%,原因是驻波声场中有煤与气泡聚集体形成^[37]。

由于超声波在介质中传播,对人体不造成危害,且超声驻波能强化微细煤泥的浮选效果,故在浮选领域引入超声波技术发展前景广阔。但超声驻波浮选强化技术从实验室走向工业化应用可能面临几个挑战:① 适用于工业浮选设备配套的大型超声驻波

装置或新型工业化设备研发难题;② 从经济成本角度,需综合考量该技术工业化的材料成本、生产效率、维护成本等问题;③ 在连续、稳定的工业化生产中,还要考虑超声驻波浮选设备及装置对煤质波动的自适应能力,以确保实际生产的正常运行。

2.2 减小气泡尺寸

气泡大小对浮选效果有重要作用,且当浮选气泡尺寸减小时,颗粒与气泡的碰撞概率 P_c 增大,因此可通过减小气泡尺寸强化微细煤粒浮选效果。纳米气泡的尺寸非常小 ($<1 \mu\text{m}$),具有气体溶解度高、表面积高、寿命长、改善固体表面疏水性等特点,因此纳米气泡在矿物分选领域得到广泛关注^[38]。且纳米气泡浮选技术已成为一种很有潜力的提高微细颗粒浮选效果的方法^[39-41]。

SOBHY 等^[42]使用配有水力空化纳米气泡发生器的浮选柱探究对伊利诺伊州细粒煤回收率的改善效果,结果表明,纳米气泡存在时,不同操作工艺条件, -0.15 mm 煤可燃回收率提高 5% ~ 50%,且纳米气泡可显著提高浮选分离效率。PENG 等^[43]设计了一种可产生微气泡的静态混合器和产生微纳气泡的空化文丘里管结合浮选柱系统以研究其对细粒煤泥的浮选效果。结果得出,通过该系统能获得灰分为 10% ~ 11% 的精煤,可燃体回收率 85% ~ 90%,且与传统浮选柱相比,捕收剂和起泡剂用量大幅减小。雷汪^[44]研究纳米气泡对低灰煤浮选行为影响,得到纳米气泡对 $-38 \mu\text{m}$ 粒级煤促进效果更好。

在煤炭浮选中,由水力空化产生的纳米气泡优先吸附在细粒煤表面,使细粒煤团聚,增加其被常规气泡捕获的概率,纳米气泡对细粒煤浮选回收机理如图 3 所示^[45]。此外纳米气泡提高碰撞和附着概率、气泡数量浓度,改善气泡和颗粒表面之间薄膜破裂,提高微细煤泥的浮选效果。通过有无纳米气泡的细粒煤浮选试验的对比可知,在相同精煤灰分下,纳米气泡的存在使煤泥的回收率提高 10% ~ 39%,起泡剂和捕收剂用量均约减少 $1/2$ ^[45]。郭思瑶等^[46]开展研究也证明纳米气泡确实可有效提高细粒煤回收率。

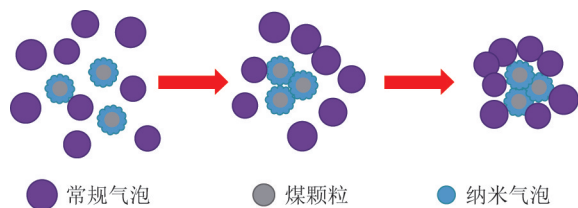


图3 纳米气泡对细粒煤浮选回收机理^[45]

Fig.3 Flotation recovery mechanism of nanobubbles on fine coal^[45]

高灰细粒煤洁净化利用受其粒度细的限制,原因是粒度细的煤颗粒与气泡的碰撞概率低,很难被气泡捕获;且细粒脉石的质量小,易被夹带回收进入泡沫精矿,对浮选精矿造成污染。为此,LI等^[47]提出一种将纳米气泡和PAC结合方法以提高细粒煤浮选效果。研究结果显示,纳米气泡使细粒煤表观粒径分布增加,提高细粒煤可燃物回收率。然而,在纳米气泡的存在下,脉石颗粒的回收率也通过夹带和/或截留而增大;但在PAC作用下,脉石颗粒粒径增大,这缓解了脉石颗粒的夹带和/或截留回收。该研究结果为浮选分离类似矿物的应用提供有价值的参考。EBRAHIMI等^[48]探究微纳气泡与超声波在煤泥浮选中相互作用,结果得出,微纳气泡和超声波对煤泥浮选均积极作用;在38 kHz超声波的作用下,与不含微纳气泡的试验结果相比,含微纳气泡的溶液可使细粒煤产率提高30%以上。

纳米气泡浮选技术对微细粒煤泥浮选效果的提升有明显优势,其在工业化方面也有突出的潜力,但目前该技术仍在实验室研究阶段。纳米气泡的制备方式有温差法、光化学反应法、电化学法、减压法、溶液交换法、水力空化法和超声空化法等^[49]。水力空化法是目前制备纳米气泡最有效方法,有望用于工业化。在未来纳米气泡浮选技术的发展应用中应着重关注纳米气泡发生器的设计、优化及放大研究,为选煤厂切实存在的微细粒煤泥浮选“卡脖子”问题的突破开拓新途径。

2.3 强化浮选过程的流体流动

浮选一般发生在湍流环境中,微观湍流直接作用于颗粒与气泡的碰撞与脱附,是微细颗粒浮选的关键影响因素^[50]。据报道,强湍流可提高微细颗粒

的回收率和浮选速率^[51-52]。因此提高微细粒矿化效率的有效方法之一是通过调控湍流强度提高颗粒动能,促使颗粒摆脱流线与气泡发生湍流碰撞^[53]。

为提高旋流静态微泡浮选柱处理细粒矿物的分选效果,借助CFD模拟设计并研究带有涡流发生器的新型旋流器管流装置。由实验室试验结果知,涡流发生器产生的流向涡度对管流单元湍流环境有促进作用,且改进后结构可提高细粒煤产率和可燃物回收率^[54]。然而,在管流中安装涡流发生器对不同粒度煤颗粒的浮选动力学影响鲜有报道;如何通过湍流调节实现给定颗粒尺寸的最佳浮选效果及湍流强度与不同疏水性颗粒的浮选速率之间关系等也有待研究。这些基础理论问题给涡流发生器的工业应用推广带来一定困难。

廖寅飞等^[55]探究浮选柱管流段紊流强度对细粒煤回收效果影响,结果表明,当管流段长度由1.5 m增至3.0 m后,0.074~0.045 mm和<0.045 mm粒级的回收率分别提高7.96%和8.41%,原因是管流段的长度增加后,管流段的紊流动能值增大,提高颗粒与气泡的碰撞效率,促进浮选指标的提升。

针对机械搅拌、射流矿化和逆流矿化3种矿化方式均无法对矿化湍流强度做出有效调节的问题,提出一种浮选效率高、能量耗散率低紊流度均匀湍流调控外加颗粒的流化床浮选柱,该浮选柱及矿化床层中流化颗粒模型的示意图如图4所示^[56-57]。CHEN等^[56]通过研究液体流速和静床层高度对流化床浮选柱浮选不同粒径煤泥效果影响得到,在液体流速高和静床层高度低强湍流环境中,微细煤粒的回收率增大,原因是在强湍流环境下,微细煤粒与气泡的碰撞和黏附概率得到提高。

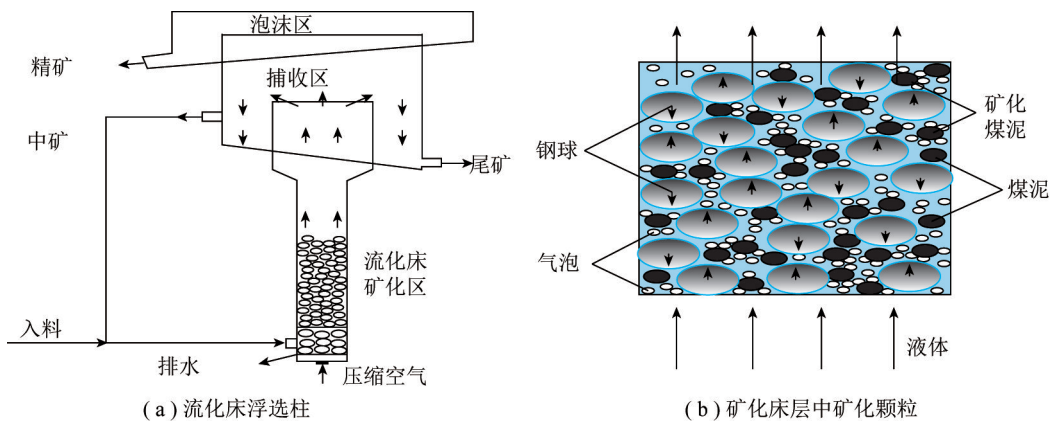


图4 流化床浮选柱及矿化床层中矿化颗粒示意^[56]

Fig.4 Schematic diagram of the fluidized bed flotation column and mineralized particles in the mineralized bed layer^[56]

由以上研究可知通过管流装置的研制、管流段长度的调整和流化床浮选柱的设计实现湍流强度的

调控,且由实验室研究结果得出这3种湍流强度的调控方式能提高微细煤粒与气泡的碰撞、黏附概率,

提升微细煤泥的浮选效果。

2.4 提高捕收剂性能

在矿物浮选过程中,为发挥浮选的分选作用,需要添加浮选药剂^[58]。其中,捕收剂是浮选作业环节中的重要药剂,其选择性和捕收性直接影响和决定浮选效果。煤泥浮选常用的传统捕收剂是非极性烃类油,如煤油和柴油等,然而它们对微细煤泥的浮选效果差,原因是微细煤泥比表面积大,且有微细脉石矿物覆盖在煤颗粒表面导致其表面亲水化,使烃类油较难与煤颗粒黏附,导致捕收剂用量大幅增加。因此学者们从乳化类捕收剂、油类替代品捕收剂、复配型捕收剂和纳米粒子捕收剂等开展高效捕收剂研究以提高微细煤泥浮选效果。

2.4.1 乳化类捕收剂

乳化是可改善烃类油分散性的有效方式,即借助添加乳化剂和外力将烃类油均匀分散到水中,以达减小油滴尺寸的目的^[59]。李志斌^[60]借助乳化柴油进行煤泥浮选试验,结果表明乳化柴油在微细粒煤泥浮选中体现出明显优越性,其中-0.045 mm 粒级煤泥的浮选完善指标较柴油的高 4.96%。杨春晖等^[61]选取 3 种不同类型表面活性剂制备乳化煤油,乳化后煤油油滴粒径减小,促进捕收剂在低阶煤表面吸附,改善低阶煤浮选效果。GAO 等^[62]研究使用 Span80 制备的油包水乳液(W/O)和水包油乳液(O/W)对微细煤泥浮选影响。与煤油相比,W/O 和 O/W 均能获得高精煤产率和精煤灰分。但由于传统乳化方式制备的乳化捕收剂热力学体系不稳定,存放时间长会导致破乳,影响煤泥浮选效果和实际生产。此外,乳化工艺及乳化装置的结构较复杂,运行费用高,也限制乳化烃类油捕收剂在煤泥浮选领域应用^[63]。

微乳液是由水、油、表面活性剂和助表面活性剂配制而成乳化类捕收剂,是透明的、能自发形成的热力学稳定体系,其存放时间远长于普通的乳化捕收剂,且还能简化制备工艺和装置。因此微乳液技术在煤泥浮选领域有广阔的应用前景。李琳等^[63]使用柴油与自制的微乳捕收剂 LY 分别作为捕收剂分选微细煤泥,结果表明,二者最佳浮选完善指标相近,但 LY 用量较柴油的低 100 g/t,节油率可达 73%。赵学敏等^[64]对比分析煤油和微乳液对屯兰煤泥的浮选效果时,也得到类似结论,即微乳液的用量较煤油可节约 50%左右。原因是微乳型捕收剂能显著增大煤样的接触角,提高煤粒的可浮性^[65]。此外,Gemini 微乳捕收剂^[66]、离子液体微乳液^[67]在微细粒煤泥浮选中也表现出好的捕收性能,且也可

节省药剂用量。

由前文综述可知絮凝浮选是处理微细煤泥的有效方法之一,该方法关键步骤是将微细煤颗粒团聚成大颗粒。在絮凝或凝聚中,除在煤颗粒表面形成的油膜需消耗捕收剂,填充絮体空腔时也要消耗捕收剂,其起将微细煤颗粒桥接在整体的作用,保证絮体稳定^[68]。如果用廉价材料(如水)部分取代絮凝体空腔中昂贵的油性捕收剂,且不削弱其结合或桥接能力时,就可减少油性捕收剂用量。为此,ZHAO 等^[69]用煤油、Span80 和硫酸钠溶液研制了一种新型的高内相(HIP)乳液捕收剂。浮选结果表明,与煤油相比,HIP 乳液可显著降低 90%的油耗。且 HIP 乳液有好的絮凝能力,其在微细煤泥浮选中起絮凝作用。此外,对 HIP 乳液和矿浆进行高剪切预处理再进行浮选,可显著提高浮选速率。

2.4.2 油类替代品捕收剂

随着石油资源的日益紧缺,合理利用现有的油类产品(如废轮胎热解油、废弃餐饮油、植物油等)替代非极性烃类油有重要意义。

废旧轮胎是当前常见可回收资源,若处置不当,必将带来严重环境污染隐患。在废旧轮胎资源化利用中,用热解法对废旧轮胎进行处理能得到炭黑、热解油和燃料气等有价值产品,其中热解油的成分主要为苯、萘及其烷基衍生物、烯烃等,符合煤用捕收剂条件。陈奎等^[70]对比废旧轮胎热解油、煤油和柴油作为捕收剂对东庞选煤厂煤泥的浮选效果发现当精煤灰分相近时,热解油的精煤产率低于煤油和柴油,但热解油的用量明显减少,且热解油作捕收剂时,起泡剂用量也少。由此表明,热解油有好的捕收性能和一定起泡性能,可减少起泡剂用量;但选择性略差于煤油和柴油,原因是热解油中含大量烯烃和酰胺类极性组分。王豪^[71]以轮胎热解油为基础制备热解油乳状液,并将其作为捕收剂浮选-0.074 mm 含量约 77%的平朔煤泥,与煤油和轮胎热解油作为捕收剂相比,在用量相同时轮胎热解油乳状液对平朔煤泥的浮选效果好。分析原因是热解油乳状液更易润湿煤样,经热解油乳状液处理煤疏水性更强。但轮胎热解油有强烈的刺激性气味,尽管乳化后可减轻气味,并降低用量,但若将其用于工业生产,可能会对现场工作环境及人员健康产生影响和危害。

餐饮业废弃油脂存在环境污染和食品安全的问题,若合理利用其所含成分,将其制备成浮用捕收剂,则可降低选煤厂对煤油、柴油等依赖,提高选煤厂的社会经济效益。XU 等^[72]、CHENG 等^[73]分别

将餐饮废菜籽油、乳化废煎炸油作为微细低阶煤浮选的可再生替代捕收剂,发现与柴油相比,其均能提高煤泥的可浮性和浮选回收率。此外,SHEN等^[74]将废弃食用油热解产物作为捕收剂用于微细煤泥浮选时得到,废弃食用油热解产物有强的捕收性能和好的选择性,尤其是当废弃食用油热解产物中含气态产物时,可获得更好的浮选效果。直接使用废弃食用油作为煤泥捕收剂浮选效果较乳化后废弃食用油或废弃食用油热解产物的差,因此要使用废弃食用油替换传统非极性烃类油作为捕收剂,需考虑设置绿色、节能废弃食用油回收加工装置,以便制备出适合微细煤泥浮选的高效替代药剂。

由于植物油含丰富长链脂肪酸,故也被证实是细粒煤浮选的有效捕收剂^[75]。郝烨生等^[76]和陶亚东^[77]使用植物油作为捕收剂分选低阶煤时,其均取得了优于柴油/煤油的浮选指标。原因是植物油中含醇、酯和酸等含氧极性物质,这些极性成分能与煤粒表面极性位点相互作用,使煤粒表面极性部位疏水,增强了煤粒表面疏水性^[77]。BHARATH等^[78-79]使用可生物降解的植物油(Mahua Oil)作为捕收剂浮选低阶氧化煤。由于Mahua Oil有更多不饱和脂肪酸和含氧官能团,其能通过氢键与煤粒表面含氧位点结合,故同样取得了好的浮选效果。

2.4.3 复配型捕收剂

复配型捕收剂是单一极性药剂或多极性药剂与烃类油组合使用,如代业滨^[80]用柴油+Span80、柴油+十二胺、十二烷+Span80、十二烷+十二胺的4种方案制取复配捕收剂,这4种复配捕收剂浮选效果远优于柴油。

在微细粒低阶煤浮选中,用ODEA(酰胺类)、OP-4(醚类)、Span80(酯类)3种非离子型表面活性剂分别与煤油复配后作为捕收剂,结果表明复配捕收剂选择性和捕收性好,其浮选效果均好于煤油。原因是3类非离子型表面活性剂对煤泥表面疏水性有强化作用,一方面体现在药剂分子极性基团对煤粒表面亲水位点的疏水改性,另一方面体现在药剂乳化对烃类油的分散作用,作用机理如图5所示^[81]。

谢尧轩等^[82]用阳离子表面活性剂双十二烷基二甲基溴化铵(DTAB)、阴离子表面活性剂十二烷基醇聚氧乙烯醚硫酸钠(AES)和煤油进行混合得到复配型捕收剂。与煤油相比,使用复配捕收剂所得精煤产率和浮选完善指标分别提高51.22%和10.21%。由于DTAB⁺和AES⁻缔合后形成离子对和少量游离的DTAB⁺离子吸附后使表面活性剂疏水

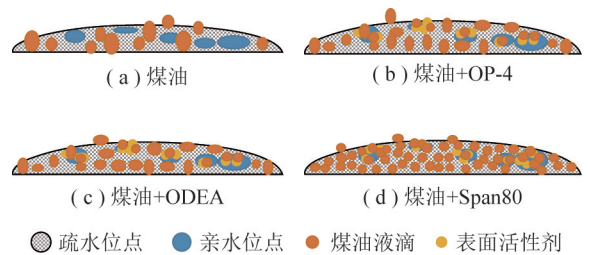


图5 不同类型捕收剂疏水改性低阶煤颗粒表面示意^[81]

Fig.5 Schematic of different types of collectors adsorbed onto the surface of low-rank coal^[81]

链暴露出来,掩盖低阶煤表面极性位点;这样非极性煤油除可吸附在低阶煤表面疏水位点外,还能吸附在药剂作用后暴露出的非极性位点,促进煤油在有机质表面铺展,故复配捕收剂能大幅提升煤泥的浮选效果。复配捕收剂吸附机理如图6所示。

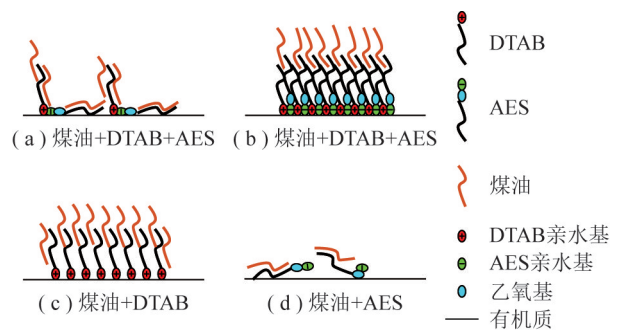


图6 复配捕收剂吸附机理^[82]

Fig.6 Adsorption mechanism of compound collectors^[82]

BAO等^[83]设计了一种高效的三元复配捕收剂(油酸OA、油酸油脂MO和柴油)用于微细低阶煤浮选,与柴油捕收剂相比,在最佳用量下,精煤产率提高41.40%,精煤灰分降低0.91%。这种复合捕收剂簇的非极性部分与极性部分通过疏水作用相互吸引,阻止了极性部分在高岭土表面上吸附,提高选择性。OA极性很强,覆盖在低阶煤亲水性表面,MO在亲水性和疏水性部分结合处平坦吸附使MO在低阶煤表面上吸附更强。此外,MO自覆盖能力强,使煤粒表面疏水性进一步提高。最后,形成了有强铺展能力的牢固油膜,该油膜也可通过疏水作用桥接。三元复配捕收剂协同吸附机理如图7所示。因此三元复配捕收剂协同吸附不仅提高其对煤粒的捕收能力,还保证了其选择性。

虽然表面活性剂可提高微细煤泥的浮选效果,但由于合成表面活性剂过程困难且比较昂贵,不太适合煤泥回收的工业化应用。捕收剂极性基团可通过氢键与煤表面含氧官能团相互作用,提高低阶煤或氧化煤可浮性。如羧基是有机极性含氧官能团,羧基间不存在氢键和缔合现象,且羧基可很好溶解

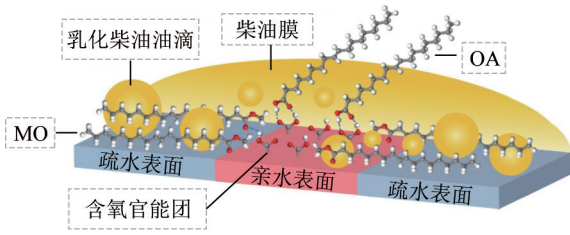


图7 三元复配捕收剂协同吸附机理^[83]

Fig.7 Schematic diagram of synergistic adsorption of ternary compound collector^[83]

在有机溶剂中。为此,LIU等^[84]探究十二烷和正戊酸的混合物作为捕收剂对微细低阶煤浮选强化效果,结果表明,以十二烷和正戊酸的混合物为捕收剂浮选效果明显优于单独使用十二烷或正戊酸的。AN等^[85]使用油酸与十二烷的混合物作捕收剂浮选微细低阶煤时也获得高可燃体回收率。是由于油酸与十二烷的混合物在低阶煤表面形成了相对有序的“超分子结构”,除捕收剂分子和煤表面基团之间氢键、疏水力或范德华力外,油酸链和十二烷链间还存在疏水力或范德华力。油酸与十二烷的混合物分子与低阶煤表面相互作用示意如图8所示。

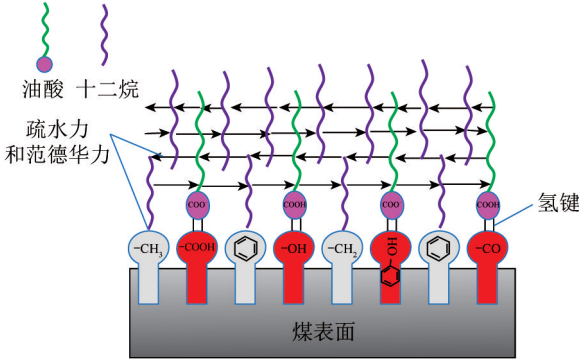


图8 油酸与十二烷的混合物分子与低阶煤表面相互作用示意^[85]

Fig.8 Schematic diagram of molecule interaction between oleic acid and dodecane molecules and low rank coal surface in water phase^[85]

2.4.4 纳米粒子捕收剂

由于新兴纳米材料是有尺寸优势,表现出特殊的量子尺寸效应、表面与界面效应、体积效应等,故吸引了学者们开拓其在矿物浮选领域研究,如作为稳泡剂提高泡沫稳定性^[86-87],或作为捕收剂提高矿物可浮性^[88-93]。煤泥浮选领域也有纳米粒子捕收剂研究。

LAI等^[93]根据是否添加纳米二氧化硅颗粒对纯煤进行浮选试验得到,添加了纳米二氧化硅颗粒的煤泥浮选回收率明显高于不添加纳米二氧化硅颗粒。曹明强^[94]用阳离子和阴离子型聚苯乙烯纳米粒子捕收剂探究其对3种煤泥的浮选效果,认为2种聚苯乙烯纳米粒子捕收剂对3种煤泥均好的捕收性和选择性。然而,江宁^[95]研究发现阳离子型聚苯乙烯纳米粒子用作捕收剂时会导致药剂用量过高问题。

用不同官能团对纳米粒子捕收剂进行修饰以获得选择性更好的捕收剂得到关注^[96]。廖寅飞等^[97]以四氢呋喃基团功能化的聚苯乙烯纳米粒子(TFPNs)为捕收剂强化微细低阶煤浮选,发现TFPNs作为捕收剂浮选回收率均高于聚苯乙烯纳米粒子(PNs)和柴油(DO),四氢呋喃基团功能化能增强PNs的捕收性能。TFPNs强化低阶煤浮选的作用机理如图9所示。先是四氢呋喃基团与含氧基团形成氢键作用后选择性地吸附在煤粒表面;然后是TFPNs在煤粒表面形成了微纳米级粗糙结构,其利于气泡-颗粒间润湿膜的薄化破裂、提高颗粒与气泡的黏附概率,实现强化微细低阶煤浮选。

虽然纳米粒子捕收剂在煤泥浮选领域研究备受关注,但由于纳米粒子捕收剂制备过程和周期长,制备成本高,浮选中用量多,且纳米粒子捕收剂对煤泥的浮选作用机制和相关基础理论研究还不是很完善,因此未来还需开展一系列研究攻克目前纳米粒子捕收剂所面临的问题,以优化纳米粒子捕收剂制

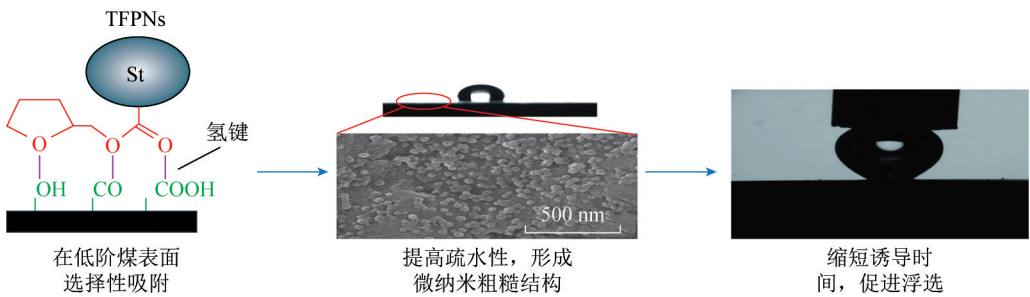


图9 TFPNs强化低阶煤浮选的作用机理^[97]

Fig.9 Enhancement mechanism of low-rank coal flotation using TFPNs^[97]

备过程和成本,降低其用量,并提高其浮选选择性,实现该类捕收剂在煤泥浮选领域大规模产业化应用。

综上,捕收剂优化是提高微细煤泥浮选效果的有效方法,故新型浮选捕收剂设计和开发是未来发展趋势。分子设计方法是运用电子计算机预测和设计化合物分子结构方法,其为理解浮选捕收剂结构-性能关系和开发新型捕收剂提供一条有效途径。绿色化学原理也将是新型浮选捕收剂设计和开发的重要组成部分,因此绿色合成方法和计算毒理学的有效结合和发展可进一步促进生态友好、低毒和可生物降解的浮选捕收剂分子设计,提高捕收剂开发效率和选择性。

2.5 优化浮选设备

目前我国选煤厂成熟的浮选设备为浮选机和浮选柱。由于入浮煤泥中细泥含量越来越大,故对浮选设备的适应和要求也越来越高。王海楠^[98]以强化微细粒煤泥化为出发点,结合机械搅拌式浮选机和喷射式浮选机特点,设计出一种兼具大吸气量和高矿化效果的环空射流浮选装置,工作原理是利用射流吸气,含气射流冲击叶轮搅拌,达到提高微细粒矿物浮选效率的目的。倪超^[6]在旋流微泡浮选柱基础上,以强化微细粒煤泥分离效果为出发点,且以提高浮选柱泡沫层中心区域的排液行为脱除细泥为目的,构建泡沫区内置倾斜板浮选柱。试验结果表明,该浮选柱既保证精煤产率,又能减少细泥对精煤污染,提高煤泥浮选效果。研究还发现采取柱体底部与柱体内多点组合充气、矿浆区添加稀释水并相应增大尾矿排料速度、泡沫层添加喷淋水这3种措施也可抑制细泥对精煤污染,有效降低浮选精煤灰分,达到强化微细粒煤泥浮选效果的目的。WANG等^[99]为改变浮选柱的气体流动模式,在浮选柱中引入电磁阀以产生振荡气流。由实验室得到,微细煤泥在36 Hz振荡气流下浮选效果明显优于稳定气流的。

以上浮选设备的优化均在现有浮选设备上改进,并通过实验室研究证实优化后浮选设备可提高微细煤泥的浮选效果,为微细煤泥浮选设备的升级提供理论基础和依据。

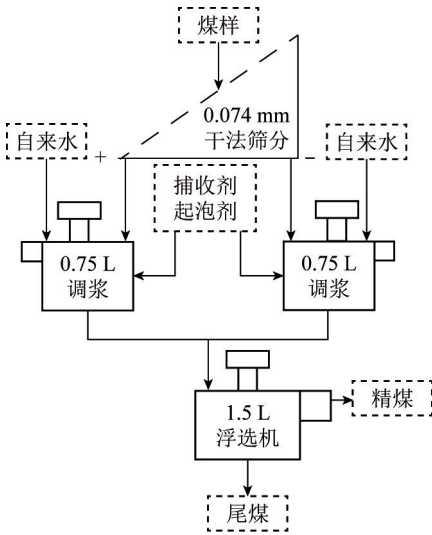
2.6 改进浮选工艺

随着煤炭洗选规模扩大、分选深度的加深和煤炭全入选理念的推广,煤泥浮选环节越来越受重视,且该环节运行的好坏对选煤厂的整体效益起着关键性影响。浮选设备性能虽不断提高,但对于某些煤泥的分选效果并不理想,故选煤厂还可采取

对现有浮选工艺进行改进的方法提高煤泥浮选效果。

煤泥浮选效果不理想的原因通常是由于煤泥中微细粒分选不彻底。为突破这个问题,在浮选工艺改进环节,学者们采取多种思路。潘集选煤厂为解决浮选入料中高灰细粒级含量大影响浮选作业和后续煤泥水处理作业的问题,用脱泥-两次浮选工艺,获得优于一次浮选的分选效果,提高选煤厂总精煤产率^[100]。XU等^[101]用与潘集选煤厂相同浮选工艺处理细粒煤泥,但不同之处在于二次浮选选择了性能更佳的浮选柱,在保证精煤质量时,其获得的精煤产率较浮选机高16.28%。丁华琼^[125]在回收微细粒含量约80%的浮选入料时,选择用浮选机一段+浮选机二段+浮选柱三段的精煤三级分选工艺。其中,一段尾煤成为最终尾煤,三段精煤成为低灰精煤,二段、三段尾煤作为中煤产品,最终提升了选煤厂的社会经济效益。李进等^[102]在原有两次浮选两次脱水工艺基础上,提出分流部分一次浮选三、四室的浮选精煤掺入二次浮选入料的工艺改造方法,掺入的精煤粗颗粒在二次浮选中发挥载体的作用,实现浮选精煤产率的提高。郭屯选煤厂面对原有“一粗一精”浮选工艺系统存在浮选精煤产率、尾煤灰分偏低,药剂用量大、浮选精煤水分高等问题,通过用一段浮选精煤使用沉降过滤式离心机脱水,离心液去二段浮选方式加强了微细粒煤泥的分选,各项浮选指标均取得了好的效果^[103]。除以上以精煤再选方式强化微细粒煤泥分选的工艺改进外,LI等^[104]通过实验室研究提出用图10所示的分级调浆-混合浮选工艺(SCBF)提高粗、细煤泥的浮选效率。与常规浮选工艺比较,使用SCBF处理的+0.074 mm粗颗粒回收率提高12.43%,精煤中-0.074 mm细颗粒的灰分降低2.42%。原因是+0.074 mm粗颗粒在高搅拌速度和长的调浆时间作用下,可提高其回收率;而-0.074 mm细颗粒在短的调浆时间作用下,可减少其对精煤污染。

关于改进浮选工艺研究既有工业实践层面的也有实验室层面的。其中,脱泥-两次浮选、机-柱联合浮选、精煤三级浮选等工业实践工艺的改进均在选煤厂现有工艺基础上开展的。这些改进方案在实现微细煤泥浮选效果提升的前提下,除不浪费原有设备资源而节省投资外,还便于浮选车间改造,为选煤厂创造好的经济效益。但部分改进后浮选工艺较复杂,增加运营成本和管理成本。受实验室分级调浆-混合浮选工艺研究结果的启发知,不同粒级的煤泥在调浆阶段所需搅拌能量不同,因此在工业实

图10 分级调浆-混合浮选工艺流程^[104]Fig.10 Flowsheet of the split-conditioning and bulk-flotation^[104]

践中,可考虑将入浮煤泥按某一粒度(如0.074 mm)分级,分别调浆再进行混合浮选,减少调浆环节的能量输入,也是很好的工艺改进创新点。

2.7 预处理强化

浮选前预处理环节是调浆,该环节能使煤泥混合均匀,还可促进药剂分散,提高药剂与煤泥的作用概率,因此调浆对煤泥浮选效果有重要影响^[104]。

煤泥粒度是影响调浆和浮选效果的主要因素之一,为此,HUANG等^[105]通过考察煤泥粒径、捕收剂用量和调浆转速对浮选指标影响,并提出一种煤泥的分级调浆浮选工艺,以提高-0.074 mm细颗粒的碰撞概率。与不分级调浆浮选相比,分级调浆浮选工艺使煤泥的浮选效果显著提高。黄根等^[106]研究得出,在调浆时搅拌速度增加,矿浆中-0.05 mm粒级含量减少,而+0.3 mm粒级含量增加,说明在此过程中,微细颗粒发生较明显剪切絮凝,形成疏水絮团,促进煤泥浮选效果的提升。曾红久^[107]研究调浆转速和时间对微细低阶煤浮选影响发现随着调浆转速和时间增加,精煤产率和可燃体回收率先增大后略降低。原因是调浆后煤样表面接触角随着调浆转速增加先增大后略减小;且减少煤样表面含氧官能团,使煤样表面疏水性增强;合理的调浆转速促进非极性油的分散,增大了捕收剂和煤颗粒的碰撞概率。

超声波作为物理处理方法,已广泛用于细粒煤浮选^[108]。与不进行超声波预处理而直接浮选的试验结果相比,超声波预处理提高浮选精煤产率。原

因是超声波的共振现象利于清洁煤粒表面,即去除煤粒表面覆盖的黏土矿物,故使煤粒表面疏水性增强,显著改善煤泥的浮选效果^[109]。为提高微细氧化煤可浮性,BARMA等^[110]尝试通过超声、促进剂乙醇和超声-促进剂乙醇联合预处理方式来去除氧化煤中含氧官能团。研究结果得出,与超声或乙醇单独预处理相比,超声-乙醇联合预处理表现出更高脱氧潜力,使其处理的煤中—OH峰的吸附带急剧减少。表明在浮选前用超声-乙醇联合预处理可改善煤颗粒的疏水性,显著提高煤可浮性。

高剪切调浆也是浮选前预处理方法之一,其可实现微细煤泥的悬浮分散及其与浮选药剂充分混合^[111]。张峰^[112]对比分析常规浮选和高剪切调浆浮选对3种微细煤泥的分选效果。与常规浮选相比,当药剂用量不变时,高剪切调浆浮选所得的可燃体回收率和精煤产率分别提高3%~5%和2%~5%;在可燃体回收率相当时,高剪切调浆浮选的捕收剂用量约节省40%~60%。由此表明,高剪切调浆预处理既可明显提高煤泥的浮选效果,又能节省浮选药剂用量。MEI等^[113]探究高剪切预处理和PVP协同作用对微细煤泥浮选的改善效果,发现该方式下浮选精煤灰分降低3.04%,浮选完善指标提高3.35%,原因是高剪切预处理可使煤泥中煤粒和脉石颗粒充分分散,为PVP能有效吸附在煤粒上提供机会。在工业实践中,郭屯选煤厂应用新型锯齿圆盘涡轮调浆设备对入浮煤泥水进行强制调浆,并与常规矿浆预处理器的使用效果进行对比。结果显示,不同药剂用量下,锯齿圆盘涡轮调浆设备可有效提高各粒级的可燃体回收率^[103]。龙禄财^[114]开展的工业调试试验表明,用强剪切混合调浆浮选微细煤泥可取得好的分选指标。

为使捕收剂充分分散于矿浆中,并提高药剂和煤颗粒的碰撞概率,在调浆预处理阶段要设定合理的调浆转速和时间。此外,还可用超声波预处理和高剪切预处理方式实现浮选前矿浆与药剂充分混合,促进煤泥的矿化效果,为后续浮选提供有利保障,以降低浮选药耗和提高煤泥浮选回收率。目前超声波预处理和高剪切预处理调浆仍在实验室研究阶段,如何将其大型化并用于工业实践中,还需进行更基础、更深入的理论探索。

结合以上多个角度的综述和分析,对不同微细粒煤泥浮选分离强化方法及技术的优势与不足进行汇总,见表1。

表1 不同微细粒煤泥浮选分离强化方法及技术的优势与不足

Table 1 Advantages and disadvantages of methods and technologies for enhancing flotation separation of fine coal slime

理论强化方法	强化技术	优势	不足
增大颗粒表观粒径	絮凝浮选	适用于微细及极细矿物分选,有高效的分选效果和广泛适用性	絮凝剂对目标矿物的选择性差、絮凝剂成本高、工业应用受限
增大颗粒表观粒径	载体浮选	微细煤泥的回收率高,减少药剂用量,降低药剂成本	载体制备与分离困难、生产率低、工艺复杂性和操作难度高
增大颗粒表观粒径	超声驻波团聚	微细矿物颗粒选择性团聚情况好,浮选效率高,环保节能,工艺适用性强	在实验室研究阶段,向实际工业应用中要考虑超声驻波装置的大型化和经济化及其对现场生产入选煤泥煤质波动的适应性等问题
减小气泡尺寸	纳米气泡浮选	浮选效率高,药剂消耗少,浮选选择性好	在实验室研究阶段,纳米气泡发生器的设计、优化及放大是突破未来工业应用的重点和难点
强化浮选过程的流体流动	调控湍流强度	可显著提高微细煤粒与气泡的碰撞、黏附概率	在实验室研究阶段
提高捕收剂性能	乳化类捕收剂	药剂分散性好,浮选效率高,可降低浮选成本	制备过程较复杂,存放时间有限
提高捕收剂性能	油类替代品捕收剂	轮胎热解油有较好捕收性能和一定起泡性能;废弃食用油捕收性能强、选择性好;植物油能提高微细煤泥的浮选效果。总体上可实现资源的再利用,环保效益好	轮胎热解油的选择性略差,且有强烈的刺激性气味。利用废弃食用油时需考虑设置绿色、节能的废弃食用油回收加工装置。植物油成分略复杂、成本高,针对特定矿物时有效
提高捕收剂性能	复配型捕收剂	对矿物适应性强,浮选效率高	合成表面活性剂困难且比较昂贵
提高捕收剂性能	纳米粒子捕收剂	能有效缩短颗粒-气泡诱导时间、提高颗粒与气泡的粘附概率,捕收性和选择性好	制备过程和周期长、成本高,用量多,药剂相关作用机制和基础理论研究少
优化浮选设备	设备改进	能提升微细煤泥的浮选效果,并实现节能降耗	由实验室研究到工业应用尚需克服工业设备设计、设备参数调整等困难,工业应用的成本投入和操作复杂性存在未知
改进浮选工艺	工艺改造	可有效提高微细煤泥浮选效果,且工业浮选车间改造易实现,并有效降低投资	部分改造后工艺较复杂,运营成本和管理成本高
预处理强化	调浆强化	可促进药剂和矿浆的混合效果,提高药剂和煤粒的碰撞概率,选前调浆改造易实现,可显著增强微细煤泥的浮选效果	超声波预处理和高剪切预处理调浆在实验室研究阶段

3 结论与展望

细粒煤高效清洁利用是当前选煤领域研究热点之一。由于微细粒煤泥浮选分离难,故学者们主要从增大颗粒表观粒径、减小气泡尺寸、强化浮选过程的流体流动和提高捕收剂性能等开展了微细粒煤泥浮选分离强化研究。笔者着重对微细粒煤泥浮选分离强化方法研究进展进行综述,得出以下结论并提出5点展望。

3.1 结论

1) 絮凝浮选是增大矿物颗粒表观粒径的有效方法,相较常规浮选,絮凝浮选利于强化微细粒煤泥的分选效果。但由于颗粒絮凝/团聚过程中选择性差、絮凝剂成本高、工业规模中煤泥水性质比实验室研究的情况更复杂等原因限制絮凝浮选的工业应用。

2) 微细煤粒在超声驻波场的初级声辐射力对

煤颗粒表面空化气泡的牵引作用下于声压节点处聚集,再在次级声辐射力的作用下被大气泡吸引,实现超声驻波强化微细煤泥浮选效果。但超声驻波浮选微细煤泥研究由实验室应用到实际工业中需考虑超声驻波装置的大型化和经济化,及其对现场生产入选煤泥煤质波动的适应性等问题。

3) 纳米气泡浮选技术对微细粒煤泥浮选效果的提升有明显优势。虽然目前该技术仍在实验室研究阶段,但水力空化法作为当前最有效制备纳米气泡的方法,其在工业化应用方面有突出的发展潜力,开展纳米气泡浮选技术成果转化是当务之急。

4) 捕收剂优化是微细粒煤泥浮选强化分离研究中热点。通过有效比较与筛选,不同类型捕收剂均能一定程度强化微细粒煤泥的浮选分离,但均面临实际应用时其优化过程比较复杂且成本略高的问题。各类捕收剂均需进行不同程度预处理,如乳化类捕收剂是烃类油、乳化剂和水在外力作用下乳化

得到;部分油类替代品捕收剂直接使用的效果不理想,也需进行乳化或热解处理;复配型捕收剂需要一种或多种表面活性剂与烃类油组合使用;纳米粒子捕收剂需要纳米粒子单体、乳化剂与引发剂混合制备合成。

5)以微细煤泥的特征和浮选湍流环境影响等理论研究成果指导现有浮选设备结构优化或新型浮选设备设计也是强化微细粒煤泥浮选分离效果的正确选择。

6)当前选煤厂实际生产角度,实施浮选工艺的智慧革新或矿浆预处理的精细强化策略,既可合理利用故有设备资源、提高分选效率,还便于降低车间改造与管理成本,或将是迅速实现阶段改善的微细煤泥浮选强化的有效候选方案。

3.2 展望

1)以研制经济优先、绿色高效的絮凝剂为目标,针对微细粒煤泥借助先进的模拟手段有目的地进行絮凝药剂分子设计和定向筛选的理论研究及实践探索,并逐步向半工业试验拓展,推进高水平微细粒煤泥絮凝浮选工艺的工业化应用。

2)在未来纳米气泡浮选技术的发展应用中应着重关注纳米气泡发生器的设计、优化及模拟放大研究,且可将纳米气泡技术与浮选柱设备相结合,充分发挥各自优势协同强化微细粒煤泥的浮选分离效果。

3)以捕收剂高选择性和低成本性为宗旨,有机结合药剂分子设计方法、绿色合成方法和计算毒理学等理论开展新型环境友好、低毒和可降解浮选捕收剂设计和开发研究。

4)以工艺极简、分选高效、管理便捷为原则,开展选煤厂煤泥浮选工艺创新,并致力于实现工艺革新与智能优化的深度融合,为选煤厂创造更高社会效益。

5)鉴于微细粒煤泥浮选中存在诸多影响因素,且强化其浮选分离的技术手段多样,为更有效地解决该问题,综合考虑各因素的交织影响,可构建涵盖多角度、多层面的浮选强化系统。

参考文献 (References):

[1] RAMUDZWAGI M, TSHIONGO-MAKGWE N, NHETA W. Recent developments in beneficiation of fine and ultra-fine coal - review paper [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 122693.

[2] 卜祥宁. 浮选柱捕集区压力波动与流体动力学特性参数相关性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

[3] 陈延伟, 孙良, 李伟明. 基于煤泥减量化的选煤工艺优化研究

与实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(9): 23-26.

CHEN Yanwei, SUN Liang, LI Weiming. Study on optimization of coal washing process in coal preparation plant based on coal mud reduction [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2023 (9): 23-26.

[4] 陈文胜, 付君浩, 韩海生, 等. 微细粒矿物分选技术研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2020(4): 134-145.

CHEN Wensheng, FU Junhao, HAN Haisheng, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020(4): 134-145.

[5] 印万忠, 王东辉, 马英强, 等. 微细粒矿物选择性聚团分选技术研究进展 [C]//中国冶金矿山企业协会矿山技术委员会, 冶金矿产资源高效开发利用产业技术创新战略联盟, 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 金属矿产资源高效循环利用国家工程研究中心, 《金属矿山》杂志社. 中国矿业科技文汇——2015. 龙岩: 福州大学紫金矿业学院, 2015: 5.

[6] 倪超. 柱浮选精煤细泥污染形成机理及抑制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

[7] 杨自立. 基于细泥絮凝的高灰细粒煤脱灰过程界面作用机制 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.

[8] FARROKHAPAY S, FILIPPOV L, FORNASIERO D. Flotation off-line particles: A review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2021, 42(7): 473-483.

[9] CAO L, CHEN X, PENG Y. The effect of aliphatic alcohol frothers on the dispersion of oily collector [J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106552.

[10] TAO D. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles—A review [J]. Separation Science and Technology, 2005, 39(4): 741-760.

[11] 李树磊. 微细粒辉钼矿选择性絮凝-浮选基础研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

[12] WEBER M E. Collision efficiencies for small particles with a spherical collector at intermediate Reynolds numbers [J]. Journal Separation Process Technology, 1981, 2: 29-33.

[13] WEBER M E, PADDOCK D. Interceptional and gravitational collision efficiencies for single collectors at intermediate Reynolds numbers [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1983, 94 (2): 328-335.

[14] YOON R H, LUTTRELL G H. The effect of bubble size on fine particle flotation [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1989, 5(1/2/3/4): 101-122.

[15] 张晓亮. 微细粒赤铁矿絮凝浮选行为及机理研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.

[16] 黄超军, 郭腾博, 李坤, 等. 氧化铅锌矿浮选法研究进展 [J]. 金属矿山, 2019(9): 8-14.

HUANG Chaojun, GUO Tengbo, LI Kun, et al. Progress on oxidized lead-zinc ore flotation methods [J]. Metal Mine, 2019 (9): 8-14.

[17] 郝海青. 菱铁矿絮凝浮选选择性的强化及调控机制 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.

[18] 王辉. 低灰细粒煤泥絮凝浮选试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.

[19] 邹文杰, 曹亦俊, 孙春宝, 等. 煤泥选择性絮凝浮选中聚丙烯

- 烯酰胺的作用机制 [J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 299-305.
- ZOU Wenjie, CAO Yijun, SUN Chunbao, et al. Mechanism of action of polyacrylamide in selective flocculation flotation of fine coal [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(3): 299-305.
- [20] ZOU W, GONG L, HUANG J, et al. Adsorption of hydrophobically modified polyacrylamide P (AM - NaAA - C16DMAAC) on model coal and clay surfaces and the effect on selective flocculation of fine coal [J]. Minerals Engineering, 2019, 142: 105887.
- [21] LIANG L, TAN J, LI Z, et al. Coal flotation improvement through hydrophobic flocculation induced by polyethylene oxide [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2016, 36(3): 139-150.
- [22] 梁龙. 煤泥中黏土矿物的选择性团聚机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [23] WANG Y, ZHOU W, LI Y, et al. The role of polyvinylpyrrolidone in the selective separation of coal from quartz and kaolinite minerals [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 626: 126948.
- [24] XIA W, LI Y, WU F, et al. Enhanced flotation selectivity of fine coal from kaolinite by anionic polyacrylamide pre-conditioning [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 334: 116083.
- [25] 梁龙, 田枫, 王梦蝶, 等. 基于剪切速率调控强化煤炭浮选中石英的选择性絮凝 [J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(5): 988-997.
- LIANG Long, TIAN Feng, WANG Mengdie, et al. Enhancement of selective flocculation of quartz in coal flotation based on shear rate adjustment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(5): 988-997.
- [26] LIN Q, MEI Y, WU C, et al. Preparation of a novel silica-polyvinylpyrrolidone hybrid regulator and its role in ultrafine low-rank coal flotation [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2024, 44(2): 202-218.
- [27] 宋少先, 张嘉豪, 陈鹏. 疏水团聚浮选制备洁净煤 [J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 532-536, 580.
- SONG Shaoxian, ZHANG Jiahao, CHEN Peng. Preparation of clean coal by hydrophobic agglomeration flotation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 532-536, 580.
- [28] LIN Q, MEI Y, HUANG W, et al. Improving ultrafine low-rank coal flotation using polyacrylamide grafted polyvinylpyrrolidone [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2023, 43(10): 1772-1787.
- [29] WANG X, ZHOU S, BU X, et al. Investigation on interaction behavior between coarse and fine particles in the coal flotation using focused beam reflectance measurement (FBRM) and particle video microscope (PVM) [J]. Separation Science and Technology, 2021, 56(8): 1418-1430.
- [30] ZHOU S, WANG X, BU X, et al. A novel flotation technique combining carrier flotation and cavitation bubbles to enhance separation efficiency of ultra-fine particles [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 105005.
- [31] CHEN Y, XIE G, CHANG J, et al. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound [J]. Fuel, 2019, 248: 38-46.
- [32] CHEN Y, ZHENG H, TRUONG V N T, et al. Selective aggregation by ultrasonic standing waves through gas nuclei on the particle surface [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104924.
- [33] CHEN Y, CHELGANI S C, BU X, et al. Effect of the ultrasonic standing wave frequency on the attractive mineralization for fine coal particle flotation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105682.
- [34] CHEN Y, NI C, XIE G, et al. Toward efficient interactions of bubbles and coal particles induced by stable cavitation bubbles under 600 kHz ultrasonic standing waves [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64: 105003.
- [35] 陈昱冉, 胡悦, 卜祥宁, 等. 50 kHz/200 kHz 声场水中疏水颗粒的瞬态及稳态团聚规律 [J]. 声学学报, 2024, 49(1): 146-154.
- CHEN Yuran, HU Yue, BU Xiangning, et al. Transient and stable aggregation of hydrophobic particles in water in 50 kHz/200 kHz sound field [J]. Acta Acustica, 2024, 49(1): 146-154.
- [36] 王卫东, 靳立章. 细粒煤超声同步浮选的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2949-2955.
- WANG Weidong, JIN Lizhang. Ultrasonic simultaneous flotation of coal fines [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2949-2955.
- [37] 王卫东, 靳立章, 涂亚楠, 等. 驻波超声对浮选气泡的影响 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2740-2745.
- WANG Weidong, JIN Lizhang, TU Yanan, et al. Ultrasonic standing waves on flotation bubbles [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2740-2745.
- [38] NAZARI S, HASSANZADEH A, HE Y, et al. Recent developments in generation, detection and application of nanobubbles in flotation [J]. Minerals, 2022, 12(4): 462.
- [39] SOBHY A, TAO D. Effects of nanobubbles on froth stability in flotation column [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2019, 39(4): 183-198.
- [40] ZHANG F, XING Y, CHANG G, et al. Enhanced lignite flotation using interfacial nanobubbles based on temperature difference method [J]. Fuel, 2021, 293: 120313.
- [41] ZHANG Z, REN L, ZHANG Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles [J]. Minerals Engineering, 2021, 172: 107140.
- [42] SOBHY A, TAO D. Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 124: 109-116.
- [43] PENG F F, YU X. Pico-nano bubble column flotation using static mixer-venturi tube for Pittsburgh No. 8 coal seam [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(3): 347-354.
- [44] 雷汪. 纳米气泡的制备及其对煤泥浮选影响研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.

- [45] MA F, TAO D, TAO Y. Effects of nanobubbles in column flotation of Chinese sub-bituminous coal [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(4): 1126-1142.
- [46] 郭思瑶, 董红卫, 赵通林, 等. 纳米气泡浮选细粒煤效果及机理 [J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(1): 194-198.
GUO Siyao, DONG Hongwei, ZHAO Tonglin, et al. Effect and mechanism of nanobubbles flotation for fine coal [J]. *Multi-purpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(1): 194-198.
- [47] LI C, XU M, ZHANG H. Efficient separation of high-ash fine coal by the collaboration of nanobubbles and polyaluminum chloride [J]. *Fuel*, 2020, 260: 116325.
- [48] EBRAHIMI H, KARAMOOZIAN M, SAGHRAVANI S F. Interaction of applying stable micro-nano bubbles and ultrasonic irradiation in coal flotation [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(5): 1548-1562.
- [49] TAO D. Recent advances in fundamentals and applications of nanobubble enhanced froth flotation: A review [J]. *Minerals Engineering*, 2022, 183: 107554.
- [50] 付晓庆. 湍流强度对流化床浮选矿化影响研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [51] HOANG D H, HASSANZADEH A, PEUKER U A, et al. Impact of flotation hydrodynamics on the optimization of fine-grained carbonaceous sedimentary apatite ore beneficiation [J]. *Powder Technology*, 2019, 345: 223-233.
- [52] SAFARI M, HARRIS M, DEGLON D. The effect of energy input on the flotation of a platinum ore in a pilot-scale oscillating grid flotation cell [J]. *Minerals Engineering*, 2017, 110: 69-74.
- [53] 闫小康, 苏子旭, 王利军, 等. 基于湍流涡调控的煤气化渣炭-灰浮选分离过程强化 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1318-1328.
YAN Xiaokang, SU Zixu, WANG Lijun, et al. Process intensification on flotation separation of carbon and ash from coal gasification slag using turbulent eddy regulation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1318-1328.
- [54] WANG L, WANG Y, YAN X, et al. A numerical study on efficient recovery of fine-grained minerals with vortex generators in pipe flow unit of a cyclonic-static micro bubble flotation column [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 158: 304-313.
- [55] 廖寅飞, 刘炯天, 李树磊. 管段高紊流强化煤泥柱浮选的应用及作用机理 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(3): 549-553.
LIAO Yinfei, LIU Jiongtian, LI Shulei. Application and affect mechanism of high turbulence in pipe unit enhancing coal column flotation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(3): 549-553.
- [56] CHEN P, LI Y, HAN J, et al. Intensification of coal slime separation in fluidized bed flotation column: Change of turbulence [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2023, 43(4): 726-737.
- [57] 李延锋, 朱荣涛, 张文军, 等. 一种紊流度均匀湍流调控外加颗粒流化床矿化浮选设备: 专利号 [P]. 2017-07-14.
- [58] UCBEYIAY H. Hydrophobic flocculation and Box-Wilson experimental design for beneficiating fine coal [J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 1-8.
- [59] JONES T J, NEUSTADTER E L, WHITTINGHAM K P. Water-in-crude oil emulsion stability and emulsion destabilization by chemical demulsifiers [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1978, 17(2).
- [60] 李志斌. 柴油乳化及其对浮选影响研究 [D]. 唐山: 煤炭科学研究总院, 2017.
- [61] 杨春晖, 侯艺, 童美, 等. 不同类型表面活性剂乳化煤油对低阶煤浮选的影响研究 [J]. *煤炭工程*, 2023, 55(9): 158-164.
YANG Chunhui, HOU Yi, TONG Mei, et al. Impacts of kerosene emulsified by different surfactant on low rank coal flotation [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(9): 158-164.
- [62] GAO J, TONG Z, BU X, et al. Effect of water-in-oil and oil-in-water with Span 80 on coal flotation [J]. *Fuel*, 2023, 337: 127145.
- [63] 李琳, 刘炯天, 王运来, 等. 阴-非离子表面活性剂微乳捕收剂的制备及应用 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(11): 2315-2320.
LI Lin, LIU Jiongtian, WANG Yunlai, et al. Preparation and application of anionic-nonionic surfactant microemulsified collector [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(11): 2315-2320.
- [64] 赵学敏, 刘生玉, 樊民强. 基于煤油和仲辛醇的微乳液配制及应用 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(4): 205-210.
ZHAO Xuemin, LIU Shengyu, FAN Minqiang. Preparation and application of microemulsion based on kerosene and 2-octanol [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(4): 205-210.
- [65] 黄波, 徐宏祥, 李旭林. 微乳型捕收剂的稳定性和浮选性能的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2878-2885.
HUANG Bo, XU Hongxiang, LI Xulin. Experimental study on stability and flotation performance of micro-emulsion collector [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2878-2885.
- [66] 张伟. Gemini 微乳捕收剂的制备及煤泥浮选性能研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [67] ZHU X, WEI H, HOU M, et al. Thermodynamic behavior and flotation kinetics of an ionic liquid microemulsion collector for coal flotation [J]. *Fuel*, 2020, 262: 116627.
- [68] ÖZER M, BASHA O M, MORSI B. Coal-agglomeration processes: A review [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2017, 37(3): 131-167.
- [69] ZHAO X, TANG Y, ZHAO B, et al. Collecting behaviors of high internal phase (HIP) emulsion in flotation of ultrafine high-ash content coal slime [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(9): 2635-2655.
- [70] 陈奎, 宋璨鼻, 曹曦, 等. 废轮胎热解制备煤泥浮选捕收剂试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(2): 115-118.
CHEN Kui, SONG Can'ao, CAO Xi, et al. Experiment study on waste tyre pyrolysis to prepare collector of slime floatation [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(2): 115-118.
- [71] 王豪. 轮胎热解油及其乳状液作为新型煤用浮选捕收剂的试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [72] XU M, XING Y, CAO Y, et al. Waste colza oil used as renewable collector for low rank coal flotation [J]. *Powder Technology*, 2019, 344: 611-616.

- [73] CHENG G, ZHANG M, LU Y, et al. New insights for improving low-rank coal flotation performance via emulsified waste fried oil collector [J]. *Fuel*, 2024, 357: 129925.
- [74] SHEN L, MIN F, LIU L, et al. Application of gaseous pyrolysis products of the waste cooking oil as coal flotation collector [J]. *Fuel*, 2019, 239: 446-451.
- [75] XU M, ZHOU Y, HAO Y, et al. Enhancing flotation performance of low-rank coal using environment-friendly vegetable oil [J]. *Minerals*, 2023, 13(6): 717.
- [76] 郝烨生, 刘金成, 包西程, 等. 植物油脂捕收剂强化低阶煤浮选作用机理及其构效关系 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 642-649.
- HAO Yesheng, LIU Jincheng, BAO Xicheng, et al. Mechanism and structure-activity relationship of vegetable oil collectors to enhance the low rank coal flotation [J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(S2): 642-649.
- [77] 陶亚东. 布尔台低阶煤植物油浮选试验研究 [J]. *煤炭技术*, 2023, 42(4): 261-265.
- TAO Yadong. Buertai low-rank coal flotation with vegetable oil [J]. *Coal Technology*, 2023, 42(4): 261-265.
- [78] BHARATH K L, NIKKAM S, UDAYABHANU G. Beneficiation of high-ash Indian coal fines by froth flotation using bio-degradable-oil as a collector [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(9): 2685-2702.
- [79] BHARATH K L, NIKKAM S. Mahuaoil as an alternative biodegradable collector for the flotation of low-rank high-ash oxidized coals based on kinetic studies [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2023, 43(3): 448-467.
- [80] 代业滨. 复配捕收剂对龙王沟长焰煤浮选强化试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2021, 53(9): 160-164.
- DAI Yebin. Flotation enhancement of Longwangou long flame coal using compound collector [J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(9): 160-164.
- [81] 王磊, 李孟乐, 常国慧, 等. 非离子型复配捕收剂强化长焰煤浮选试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 323-333.
- WANG Lei, LI Mengle, CHANG Guohui, et al. Study on mechanism of non-ionic compound collector for enhancing flotation of long flame coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 323-333.
- [82] 谢炙轩, 张雷, 郭建英, 等. 阳-阴离子表面活性剂协同非极性油对低阶煤浮选的影响 [J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 267-275.
- XIE Zhixuan, ZHANG Lei, GUO Jianying, et al. Effect of cationic-anionic surfactant synergistic non-polar oil on low-rank coal flotation [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 267-275.
- [83] BAO X, XING Y, LIU Q, et al. Investigation on mechanism of the oleic acid/methyl oleate/diesel ternary compound collector in low-rank coal flotation [J]. *Fuel*, 2022, 320: 123894.
- [84] LIU Z, LIAO Y, WANG Y, et al. Enhancing low-rank coal flotation using a mixture of dodecane and n-valeric acid as a collector [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(1): 97-111.
- [85] AN M, LIAO Y, CAO Y, et al. Improving low rank coal flotation using a mixture of oleic acid and dodecane as collector: A new perspective on synergetic effect [J]. *Processes*, 2021, 9(3): 404.
- [86] PANNEERSELVAM P, MORAD N, TAN K A. Magnetic nanoparticle (Fe_3O_4) impregnated onto tea waste for the removal of nickel(II) from aqueous solution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 160-168.
- [87] NASIRIMOGHADDAM S, MOHEBBI A, KARIMI M, et al. Assessment of pH-responsive nanoparticles performance on laboratory column flotation cell applying a real ore feed [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(2): 197-205.
- [88] YANG S, PELTON R, RAEGEN A, et al. Nanoparticle flotation collectors: Mechanisms behind a new technology [J]. *Langmuir*, 2011, 27(17): 10438-10446.
- [89] YANG S, PELTON R, MONTGOMERY M, et al. Nanoparticle-flotation collectors III: The role of nanoparticle diameter [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, 4(9): 4882-4890.
- [90] YANG S, PELTON R, ABARCA C, et al. Towards nanoparticle flotation collectors for pentlandite separation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 123: 137-144.
- [91] YANG S, RAZAVIZADEH BB M, PELTON R, et al. Nanoparticle flotation collectors: The influence of particle softness [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(11): 4836-4842.
- [92] KIM H, YOU J, GOMEZ-FLORES A, et al. Malachite flotation using carbon black nanoparticles as collectors: Negative impact of suspended nanoparticle aggregates [J]. *Minerals Engineering*, 2019, 137: 19-26.
- [93] LAI Q, LIAO Y, AN M, et al. The enhanced flotation of coal by nanosilica particles [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2021, 41(5): 321-333.
- [94] 曹明强. 聚苯乙烯纳米粒子作为浮选捕收剂的试验研究及机理分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [95] 江宁. 纳米粒子捕收剂在煤和石英矿物表面原位吸附行为研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [96] 赵一帆. 功能化疏水性纳米粒子的制备及对低阶煤浮选特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [97] 廖寅飞, 任厚瑞, 安茂燕, 等. 新型纳米粒子捕收剂强化低阶煤浮选机理 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2767-2775.
- LIAO Yinfei, REN Hourui, AN Maoyan, et al. Mechanism of enhancing low rank coal flotation using nanoparticles as a novel collector [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2767-2775.
- [98] 王海楠. 环空射流浮选装置能量分布及气泡分散特性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [99] WANG J, WANG L. Improving column flotation of oxidized or ultrafine coal particles by changing the flow pattern of air supply [J]. *Minerals Engineering*, 2018, 124: 98-102.
- [100] 罗金洋, 韩正伟, 毕争, 等. 潘集选煤厂脱泥两次浮选工艺的应用研究 [J]. *煤炭技术*, 2023, 42(4): 253-256.
- LUO Jinyang, HAN Zhengwei, BI Zheng, et al. Application of

- desliming twice flotation process in Panji coal preparation plant [J]. *Coal Technology*, 2023, 42(4): 253-256.
- [101] XU G, BU X, MAO Y, et al. Combined column and cell flotation process for improving clean coal quality: Laboratory-scale and industry-scale studies [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2024, 42(21): 2678-2687.
- [102] 李进, 金雷, 韩春阳, 等. 二次浮选工艺的优化 [J]. *选煤技术*, 2020(4): 70-73.
LI Jin, JIN Lei, HAN Chunyang, et al. Optimization of the secondary flotation process [J]. *Coal Preparation Technology*, 2020(4): 70-73.
- [103] 单洪客. 郭屯选煤厂浮选系统技术改造 [J]. *选煤技术*, 2022, 50(3): 75-79.
SHAN Hongke. Technical transformation of the flotation system at Guotun Coal Preparation Plant [J]. *Coal Preparation Technology*, 2022, 50(3): 75-79.
- [104] LI S, GAO L, CAO Y, et al. Effective beneficiation of a fine coking coal using a novel flotation scheme [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, 38(1): 40-51.
- [105] HUANG G, XU H, MA L, et al. Improving coal flotation by classified conditioning [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, 38(7): 361-373.
- [106] 黄根, 徐佳琪, 黎戡正, 等. 调浆强化细粒煤泥浮选作用机理 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(S1): 246-256.
HUANG Gen, XU Jiaqi, LI Kanzheng, et al. The mechanism of conditioning on improving fine coal flotation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(S1): 246-256.
- [107] 曾红久. 调浆对低阶煤浮选的影响及其机理研究 [J]. *煤炭工程*, 2023, 55(7): 165-170.
ZENG Hongjiu. Effect of conditioning on flotation of low-rank coal and its mechanism [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(7): 165-170.
- [108] MAO Y, XIA W, PENG Y, et al. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review [J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 195: 106150.
- [109] KOPPARTHI P, BALAMURUGAN S, MUKHERJEE A K. Effect of ultrasonic pre-treatment time on coal flotation [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2020, 40(12): 807-823.
- [110] BARMA S D, PRANEETH TEJ S S, RAMYA B, et al. Ultrasound-promoter pretreatment for enhancing the yield and combustible matter recovery of high-ash oxidized coal flotation [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 8165-8175.
- [111] 刘旭, 韩华, 申世钰, 等. 动力煤煤泥高剪切调浆浮选提质研究 [J]. *矿产综合利用*, 2022(3): 158-162, 192.
LIU Xu, HAN Hua, SHEN Shiyu, et al. Upgrading of steam coal slime using high intensity conditioning flotation [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3): 158-162, 192.
- [112] 张峰. 高剪切调浆煤泥浮选动力学研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [113] MEI Y, LIN Q, CAO D, et al. Enhancement of ultrafine coal slime flotation using high-shear pretreatment and polyvinylpyrrolidone [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2023, 43(12): 2136-2151.
- [114] 龙禄财. 细粒煤泥强剪切调浆装备开发与工业应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.