

难沉降煤泥水全流程处理技术研究进展

杨彦斌^{1,2}, 屈进州¹, 朱子祺², 周安宁¹

(1.西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054; 2.国家能源集团神东洗选中心, 陕西 榆林 719315)

摘要:针对湿法选煤工艺中难沉降煤泥水净化处理过程存在的煤泥沉降困难、处理效率低、成本高等难题,从煤泥水源头控制、煤泥水处理方法及煤泥水终端处理装备等方面着手,结合神东矿区难沉降煤泥水处理的生产实际,讨论了煤泥减量化技术和药剂制度优化、水质调节、电磁场强化、微波处理、微生物处理、高效浓缩压滤等新技术的研究与应用现状,分析了难沉降煤泥水全流程处理技术在工业化应用过程中存在的问题,并对该技术的发展趋势进行了展望。煤泥减量化技术是难沉降煤泥水处理的源头,通过采用驰张筛等对物料进行高效干法脱粉,可减少进入煤泥水系统的煤泥量;对于已建成且工艺比较成熟的选煤厂,常采用优化工艺流程、减小筛板筛篮筛缝、调整操作工艺参数等措施减少次生煤泥产率;在满足生产要求的条件下,采用无压给料重介旋流器、减小矸石脱介筛筛缝、单独处理矸石稀介质、单独沉降并处理高频筛筛下水等措施减少矸石细泥的混入;加强生产组织和水量管理,有助于控制煤泥水系统的水量,防止粗颗粒物料的混入。难沉降煤泥水处理技术是煤泥水处理的核心,可向煤泥水中加入无机钙盐等高价金属阳离子,以调节煤泥水水质,促使煤泥颗粒凝聚;采用电磁振动高频筛等对浓缩池入料进行深度分级,有效降低煤泥产率;通过改进浓缩、压滤工艺流程及设备,采用电场、磁场、微波场处理和微生物絮凝剂来协调强化对煤泥水的絮凝沉降效果,降低化学药剂对环境的副作用。煤泥水终端处理装备是难沉降煤泥水处理的落脚点和抓手,目前主要朝着大型化、国产化、高效化、智能化等方向发展。

关键词:难沉降煤泥水;煤泥减量化;脱粉;水质调节;微生物絮凝

中图分类号:TQ53;TK9

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)05-0106-09

Research progress of the whole process treatment technology for difficult-to-settle slime water

YANG Yanbin^{1,2}, QU Jinzhou¹, ZHU Ziqi², ZHOU Anning¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2.CHN Energy Shendong Coal Preparation Centre, Yulin 719315, China)

Abstract: In view of the technical problems of difficult-to-settle slime water purification and treatment in wet coal preparation process, such as difficult settling, low treatment efficiency and high cost, this paper discussed the research and application status of new technologies of slime reduction technology, agent system optimization, water quality regulation, electromagnetic field enhancement, microwave treatment, microbial treatment, high efficiency concentration and pressure filtration from the aspects of slime source control, slime water treatment method and slime water terminal treatment equipment, combined with the production practice of difficult settling slime water treatment in Shendong mining area. The problems existing in the industrial application of the whole process treatment technology of difficult-to-settle coal slurry water were analyzed, and the development trend of the technology was prospected. The slime reduction technology is the source of the treatment of difficult-to-settle slime water. The amount of slime entering the slime water system could be reduced by efficient dry screening of feeds using flip-flop screen. For the established and mature coal preparation plants, the yield of secondary slime often could be reduced with measures of the optimization of process flow, the reduction to screen gap of the screen basket, the regulation of

收稿日期:2020-03-24;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20032402

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-310)

作者简介:杨彦斌(1990—),男,甘肃渭源人,硕士研究生,从事选煤工艺优化及智能化研究。E-mail: 403348330@163.com。

通讯作者:周安宁,教授,博士,从事煤炭精细加工与多联产研究。E-mail: psu564@139.com

引用格式:杨彦斌,屈进州,朱子祺,等.难沉降煤泥水全流程处理技术研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(5):106-114.

YANG Yanbin, QU Jinzhou, ZHU Ziqi, et al. Research progress of the whole process treatment technology for difficult-to-settle slime water[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 106-114.



移动阅读

operating process parameters. In order to reduce the mixing of fine gangue, the methods for using heavy-medium cyclones with pressureless feed, reducing screen gap of the gangue screen for medium-removing, separately treating unqualified media of gangue, separately settling and treating water of high-frequency sieving under the condition of meeting the production requirements. It could contribute to control the water volume of the slime water system and prevent mixing of coarse-grained materials through strengthening the production organization and water management. The treatment technology of difficult-to-settle slime water is the core of slime water treatment. Inorganic calcium salts and other high-priced metal cations can be added to the slime water to adjust the water quality of the slime water and promote the coalescence of coal slime particles. The yield of slime is effectively reduced by deep classification using electromagnetic vibrating high-frequency screens. The effects of flocculation and sedimentation could be strengthened by improvement of the concentration, filter press process and equipment, using of the electric field, magnetic field, microwave field treatment and microbial flocculation agent. Besides, the side effects of chemical agents on the environment could be reduced. The slime water terminal treatment equipment is the foothold and starting point of the difficult-to-settle slime water treatment. At present, it is mainly developing in the direction of large-scale, localized, high-efficiency, and intelligent.

Key words: difficult-to-settle slime water; slime reduction; depulverization; water quality regulation; microbial flocculation

0 引言

煤炭是我国的主要能源,2020年煤炭在我国一次能源消费中占57%左右^[1-2]。为满足不同用户对煤炭资源的差异化需求,并考虑环境保护要求和运输成本等因素,煤炭分选加工成为煤炭资源洁净利用的关键环节^[3]。煤炭分选加工按照分选过程中使用的介质种类,可以分为湿法选煤和干法选煤。其中,湿法选煤因分选工艺相对成熟、处理量大、自动化程度高、适应性强等特点被广泛应用。近年来,随着国家开展供给侧结构改革,逐步收紧采矿许可,迫使煤炭企业必须提升资源的利用率。一方面,随着煤炭回采率的不断提高和大采高采煤技术的逐步应用,使得采煤机械化程度和煤炭回收率提高,导致大量细粒级矸石进入开采原煤中,原煤煤质不断下降^[4-6]。另一方面,煤炭市场逐步由卖方市场变为买方市场,用户对商品煤的煤质要求越来越高,倒逼煤炭分选行业不断提升原煤的入选率^[4-5]。

目前,由于原煤中细粒级矸石含量和原煤入选率的增加,导致分选加工过程中原生煤泥和次生煤泥的比例逐年增加,特别是部分易泥化的矸石颗粒,在分选加工过程中产生了大量难沉降煤泥,显著影响选煤厂正常运行^[7]。同时,由于易泥化难沉降煤泥水成分及性质比较复杂,常规的煤泥水沉降方法难以实现难沉降煤泥水的高效净化处理。因此难沉降煤泥水处理的基础理论研究、技术研发与工业应用一直是选煤领域的研究热点^[8-12]。另外,随着原煤入选率不断提高,部分选煤厂的煤泥水处理系统难以满足生产需要,因此,煤泥水处理设备的大型化、国产化、自动化以及智能化问题亟需解决。

笔者将从煤泥减量化技术、难沉降煤泥水处理方法、技术开发与应用、煤泥水终端处理技术3方面

对难沉降煤泥水全流程处理技术进行论述。并结合选煤厂煤泥水净化处理工业生产实践,对煤炭分选加工领域中煤泥水全流程处理技术的发展趋势进行展望。

1 煤泥减量化技术

煤泥是指粒度小于0.5 mm的煤炭颗粒,通常夹杂着极细的矸石泥颗粒,主要成分为高岭石、伊利石等黏土类矿物^[13]。因煤和黏土类颗粒的粒度小、比表面积大,且黏土与煤泥水溶液相互作用后产生泥化现象、表面荷强负电、并在颗粒表面形成水化膜;颗粒表面疏水性在沉降过程中起着主导作用,而细泥易覆盖在煤颗粒表面提高了颗粒的亲水性,阻止了煤粒与絮凝剂分子的相互接触,影响了煤泥团聚,对煤泥水沉降产生不利影响,恶化了水质条件^[14]。宏观表现为水体中的煤泥颗粒难以沉降、煤泥产品水分大。

因此,减少细粒级粉煤的产生,防止其进入水体,是系统化解解决难沉降煤泥水处理问题的根本手段。

1.1 高效脱粉技术研发应用

选前脱粉的实质是细颗粒分级作业。选前脱粉作业可以分为筛分分级脱粉和风力分级脱粉2类。

筛分分级脱粉对于原生煤泥量的控制主要通过采用高效筛分脱粉设备来提高筛分效率,从而减少进入煤泥水系统的煤泥量。常用的高效筛分脱泥设备有弛张筛、等厚筛、变振幅等厚弹性杆筛分机等^[15]。王艾生等^[16]在泉一矿选煤厂采用3510型弛张筛对原料煤进行预先脱粉,筛分效率为61.75%,完全满足干法深度筛分的需求。李文利等^[17]在神东哈拉沟选煤厂采用弛张筛进行6 mm末煤选前脱泥,筛分效率大于85%,使进入后续末煤分选环节

的原生煤泥量显著降低,有效减轻了煤泥水处理系统的生产负荷。江海深^[18]利用变振幅等厚弹性杆筛分机对内蒙古鄂尔多斯潮湿煤炭进行6 mm深度筛分时,筛分效率为87.79%,总错配物含量为6.77%,取得了很好的筛分效果。吴鼓勇和王召召^[19]在新桥选煤厂采用弹性杆筛面实现了原煤的深度高效筛分,使原生煤泥量降低了约3.93%。潘森等^[20]设计了刚柔耦合弹性筛面结构的振动筛,开展了3 mm筛分试验,筛分效率89.00%,实现了黏湿动力煤干法深度高效筛分。

风力分级脱粉是利用不同密度和粒度的散装物料在风流场中沉降速度不同,将物料分成不同的粒度级别,从而实现脱粉^[21]。风力分级因能耗高、粉尘量大、适用性差,目前在煤炭分选加工行业应用较少。

1.2 次生煤泥减少措施

次生煤泥是煤炭分选过程中因浸水、碰撞、泵输送等作用而碎散成的细泥^[22]。次生煤泥增加了药剂消耗、强化了浓缩池悬浮层、降低了煤泥处理设备的效率,进而影响原煤入选率,降低煤炭提质增效幅度。

选煤厂工艺设计过程中应该减少次生煤泥的产生。煤炭泥化特征对选煤厂设计、煤炭分选和加工效果以及煤泥水处理的影响尤为重要。次生煤泥产率与煤质、分选工艺以及分选设备密切相关。一般情况下,浅槽分选时次生煤泥产率约为2%,有压两产品重介质旋流器分选时次生煤泥产率可以达到4%~6%。

对于已建成且工艺比较成熟的选煤厂,减少次生煤泥产率的措施为:优化工艺流程、减小筛板筛缝、合理调整操作工艺参数。此外,也可通过降低装载点落差、溜槽铺设缓冲装置、减少泵力输送、减少煤泥水泵打循环次数、采用通过式破碎机减少次生煤泥量^[23]。

1.3 矽石泥预先排除

矽石中黏土类物质,在水体中经历吸水、膨胀、碎裂,形成黏土细泥。这部分细泥是影响煤泥水沉降效果、药剂添加量、煤泥处理效率的根源。因此,要及时分离出高灰细泥,减少高灰细泥的循环集聚。矽石泥预先排除措施主要有:①在满足分选要求和精度条件下,分选旋流器的入料方式尽量采用无压给料;②矽石脱介筛处理能力有富余时,减小筛缝宽度,提前将高灰细泥排出分选系统;③将矽石稀介质悬浮液与精煤稀介质悬浮液分别磁选处理,使矽石系统的高灰煤泥提前排出^[24]。神东洗选中心

所属选煤厂采取减少矽石脱介筛筛缝、矽石稀介单独处理、高频筛水单独沉降处理等措施减少进入浓缩池的矽石泥,取得了良好效果,保证了后续煤泥水沉降效果和压滤设备的处理效率。

1.4 循环水量管理

湿法选煤中,减小难沉降煤泥水处理量就要加强循环水和清水的管理,控制系统外水和清扫水用量。对于采用湿法分选的选煤厂,循环水质量与流量直接影响分选作业。循环水量不足和过大都易造成整个煤泥水系统紊乱,增加煤泥水处理压力。

采用跳汰分选机的选煤厂要加强用水制度管理,逐步引进先进操作方法,提高岗位司机的操作水平,加强用水量考核,逐步降低用水量,从而降低后续煤泥水处理压力^[25]。

重介质选煤厂脱泥筛喷水及脱介筛喷水及煤泥桶补水等工艺环节在实现工艺需求的基础上要控制好用水量,减少循环水量,从源头上减小难沉降煤泥水的处理量。

1.5 生产组织管理

在日常生产过程中,要提高粗煤泥分选设备的处理效率,及时更换弧形筛、高频筛的筛板,煤泥离心机筛篮,沉降过滤式离心机筛网,防止粗颗粒物料进入下一步煤泥水处理环节。关注水力分级旋流器的运行工况,防止因压力不足或底流嘴堵塞等出现“跑粗”现象,给煤泥水处理系统带来压力。

2 难沉降煤泥水处理技术

2.1 传统处理技术

传统处理难沉降煤泥水时,主要通过改进浓缩工艺流程、压滤工艺流程以及相关处理设备进行改进。晓明矿选煤厂通过使用和改造YDYY型带式压滤机,取得了良好的煤泥水处理效果,满足了选煤生产及煤泥水处理需求^[26]。任浩^[27]针对寺河矿选煤厂难沉降煤泥水处理问题,设计了一种基于BP神经网络的浓缩机药剂添加系统,实现了加药量自动预测并自动加药,大大降低了药剂用量,提高了煤泥水处理效果。

另外,煤泥水处理药剂开发与药剂制度优化也是提高难沉降煤泥水处理效果的重要方法。章青芳^[28]采用改良后的溶剂热法,研制出新型的磁性膨润土水处理剂,发现在煤泥水中加入磁性膨润土后,磁性膨润土会与煤泥颗粒表面所带负电荷作用,压缩双电层,使悬浮体系失稳,颗粒间彼此碰撞,产生凝聚,加速难沉降煤泥沉降。WANG等^[29]采用一种由丙烯酰胺和甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵组成

的新型阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的聚合方法处理难沉降煤泥水,当阳离子聚丙烯酰胺用量为6~7 mL时,沉降速度最快,透光率最高可达89.7%。吕一波等^[30]运用单因素逐项和多因素正交试验相结合的方法,探寻了絮凝剂CPBA的最佳合成方案,明晰了不同条件下絮凝剂和聚合硫酸铁对煤泥水颗粒的作用机理。李文俊和程志伟^[31]针对陕北张家峁选煤厂难沉降煤泥水,探讨了凝聚剂聚合氯化铝铁和絮凝剂聚丙烯酰胺(阳离子型、阴离子型和非离子型)复配比例、使用量和加料顺序等因素对煤泥水絮凝的影响,得到了最佳的复配工艺。陶亚东等^[32]对上湾选煤厂细泥集聚的煤泥水性质进行分析,选用聚丙烯酰胺和聚合氯化铝对该厂低变质程度煤泥水进行絮凝沉降试验,并优化了药剂用量。WANG等^[33]基于煤泥水(蒙脱石)沉降试验,发现电解质KCl可有效抑制蒙脱石的水化膨胀,并明显降低聚丙烯酰胺的用量,提高其絮凝沉降效果。

2.2 前沿处理技术

煤泥水难处理主要可归因于2方面:一方面,煤泥水是由高岭石、伊利石、蒙脱石等黏土矿物组成的高度浓缩的微固液悬浮分散体系。这些细颗粒的存在,尤其是高岭石黏土的存在,是煤泥水难以澄清的主要原因之一^[34]。另一方面,煤泥水中颗粒粒度极细,导致沉降脱水困难。黏土类矿物质遇水碎散成微米级颗粒,呈现胶体状态,导致煤泥沉降和脱水困难。

黏土类矿物具有特殊的晶体结构,易裂解形成大量(亚)微米级的细泥颗粒,长期稳定悬浮在煤泥水中,且会发生水化、选择性吸附、溶解及晶格取代作用等,表面荷负电,形成双电层和水化膜,进而产生静电斥力和空间位阻效应,导致煤泥水净化处理困难^[35]。LI等^[36]采用原位Zeta电位研究了黏土作用下的离子浓度与煤泥覆盖过程的相关性,分析了钙离子浓度和黏土矿物种类的作用规律和协同作用机理。Zeta电位是表征胶体颗粒荷电状态的一个重要参数,其大小决定了煤泥水的沉降性能,Zeta电位越大,粒子间静电斥力增大,此外颗粒表面弹性水化膜排斥作用,使得煤泥颗粒难以聚团,在水体系中呈现分散状态,难以沉降。因此,大部分难沉降煤泥水研究围绕如何减小煤泥水体系的Zeta电位展开。主要采用方法有调节水质、外加电磁场处理、微波处理、微生物处理等。

2.2.1 水质调节技术

水质调节技术的理论依据是:将高价金属阳离子加入难沉降煤泥水中,可减少煤泥颗粒表面的负

电性,压缩双电层,使煤泥水体系中的煤泥颗粒凝聚。在煤泥水中加入无机钙盐类后,煤泥水中的黏土矿物和疏水性煤颗粒表面会吸附一些无机阳离子,使煤泥水易沉降。张志军等^[37]研究发现煤泥水原生硬度是影响其沉降性能的关键因素,煤泥水原生硬度越低,越难处理,进一步提出了矿物颗粒实现自发凝聚的最低水质硬度这一临界硬度概念,并建立了基于DLVO理论的临界硬度数学模型。MIN等^[38]认为季铵盐表面活性剂可以提高煤泥水的疏水性,降低颗粒表面电荷,促进煤泥水的沉淀和过滤。在季铵盐存在的情况下,弱碱性溶液有利于高浊度煤泥水的疏水聚集和沉淀。这一理论对于现场难沉降煤泥水的处理有指导作用。在神东矿区大型动力煤选煤厂,矿井开采工作面过地质构造出现高灰细泥时,通过加入工业盐提高水质硬度,在加速煤泥水沉降方面取得了良好效果。

pH值也影响难沉降煤泥水处理效果。张涛等^[39]以煤泥水pH值为研究对象,通过沉降试验得出pH值对煤泥水沉降效果的影响规律一致,碱性条件比酸性条件下的煤泥水絮凝沉降效果更好。

2.2.2 深度分级

随着选煤装备发展,煤泥水的深度分级技术因成本低、效果好,仍是目前煤炭分选研究方向之一。进入浓缩池前,进行煤泥水深度分级,可大幅减少进入浓缩池的煤泥量。

电磁振动高频筛是一种新型的固、液物料筛分机械,被广泛用于煤泥水的深度分级。采用电磁激振器驱动传动系统,使传动系统振动筛网,达到提高筛分效率的目的,具有操作简单、性能稳定、效率高、功耗低、动载小、自清理筛网能力强等特点,筛面振动强度高,可达8~10倍的重力加速度,筛分效率高,处理能力大,处理粒度0.20~0.15 mm。叠层高频振动细筛一般具有5层筛面,物料在高频振动筛面上经历脱水、造浆的循环流程,分级深度达0.2 mm。

2.2.3 电场及磁场辅助沉降技术

电场辅助沉降技术的理论基础是外加赋能场改变荷电难沉降煤泥颗粒的受力变化,从而发生加速沉降。李明明等^[40]采用电化学方法对易产出高灰细泥的煤矸石中伊利石进行外加电场处理。发现通过提高电位梯度可以降低伊利石颗粒间的静电作用能、亲水排斥能等,促进颗粒间凝聚。控制电化学条件,对伊利石改性,可以有效提高伊利石颗粒间的凝聚沉降效果。董宪姝等^[41]综述了电场辅助沉降技术,提到部分学者采用电凝聚装置对煤泥水进行澄

清,可降低煤泥水处理中60%的聚丙烯酰胺用量。采用非对称直流电流的电凝聚技术对黏土矿物悬浮液进行处理时,颗粒沉降速度显著提高。目前电化学处理技术主要停留在试验研究阶段,存在电极消耗大和易钝化等问题,目前尚无法工业化应用。

磁场强化絮凝沉降是指在煤泥水中添加絮凝剂、磁种后,受到絮凝、吸附和架桥等作用,煤泥颗粒形成磁性絮团,在外加磁场的的作用下,分离磁性絮团,从而快速煤泥水澄清。李建军等^[42]研究了煤泥水在预磁化-絮凝沉降方法作用下的沉降特性,揭示了煤泥水预磁化-絮凝沉降的作用机制。结果表明,在0.15~0.25 T磁场下预磁化2~3 min时,煤泥颗粒的Zeta电位降幅达10.4 meV,煤泥颗粒的表面水化膜明显薄化。李桂春等^[43]对煤泥水先进行磁场预处理,再进行絮凝沉降试验,分析澄清区高度和清液浊度的变化。结果表明:在一定范围内,煤泥水的沉降效果随着磁场强度的增大、磁处理时间的增加而提高;当阴离子型聚丙烯酰胺(HPAM)用量1.5 mL、磁场强度200 mT、磁处理时间30 min时,澄清区的高度最大,清液的浊度最小。

2.2.4 微波处理技术

王楠等^[44]在微波场下对煤泥水进行预处理,探究了微波能量场对煤泥水自然沉降以及微波预处理-絮凝协同沉降效果的影响规律。结果表明,煤泥水试样经过微波预处理,其自然沉降效果明显改善,在微波预处理与絮凝剂的协同作用下,最佳药剂用量可以降低0.40 mL(降幅32%),减少了药耗,提高了沉降速度。SAHOO等^[45]研究了微波预处理对水煤浆流变特性的影响。结果发现,微波处理后,煤的表观黏度低于未处理煤的表观黏度。煤浆的非牛顿特性表现为黏度随剪切速率的增加而逐渐降低。黏度的增加与浓度呈指数关系。赵寒絮^[46]研究了煤泥水经微波预处理后,加入絮凝剂、凝聚剂后的沉降效果,对药剂添加量、微波功率和辐照时间进行了正交试验。结果表明:适宜的微波功率和辐射时间可以提升煤泥水的沉降效果,并减少絮凝剂、凝聚剂等药剂的添加量。目前微波处理煤泥水技术仍处于实验室研究阶段。

综合使用电化学、声化学等新型煤泥水处理方式成为国内外研究的新方向。王浩等^[47]研究了超声波和电化学协同作用下的煤泥水沉降效果机制,发现协同作用下煤泥疏水性增加,含氧官能团减少;与单独电化学作用下煤泥水沉降相比,上清液浊度降低了5.88 NTU,沉降速度提高了2 cm/min。ZHAO等^[48]对超声波-电化学协同处理难沉降煤泥

水进行研究,发现超声波可以促进电化学反应,并分析了电极、电解质、超声能量密度、超声时间等因素对难沉降煤泥水的影响规律,获得了最佳超声条件为:超声频率29 kHz,能量密度0.5 W/m³,超声时间4 min。

2.2.5 微生物絮凝技术

微生物絮凝剂属于天然有机高分子絮凝剂的范畴,是微生物菌体分泌的生物高分子物质。微生物的特定组成决定了其作为絮凝剂具有可分解性以及对环境无毒无害的性质。

目前,微生物絮凝煤泥水的研究仅处在菌种的筛选阶段,面临菌种分离提纯、微生物分泌物分离等难题^[49]。煤泥水絮凝沉降研究中,侯志翔^[50]研究发现枯草芽孢杆菌产絮凝剂、烟曲霉产絮凝剂在各自最佳絮凝工艺参数条件下絮凝率分别可达83.1%和81.6%,同时使用2种絮凝剂时,沉降效果更优,絮凝率可达92.3%。王滔^[51]采用黑曲霉和黄孢原毛平革菌协同、多黏类芽孢杆菌和球形红假单胞菌复合协同净化处理煤泥水,取得了很好的絮凝效果。LIANG等^[52]采用白腐真菌产生的生物絮凝剂联合助凝剂CaCl₂对高浓度微细煤泥水进行处理,在最优试验条件下获得了很好的絮凝效果(絮凝活性达98.71%)。冀敏敏^[53]采用球红假单胞菌、枯草芽孢杆菌、黄孢原毛平革菌对煤泥水进行多级絮凝试验研究,均取得了较好的絮凝结果。

3 煤泥水终端处理技术与装备

3.1 煤泥水处理设备的大型化、国产化

由于煤炭资源的整合和煤电企业的合并重组,选煤厂处理能力逐年提升,促使了大型煤泥水处理设备(浓缩机、压滤机)的开发应用。随着我国制造业的长足发展和企业降本增效需求的增加,煤泥水处理设备的国产化稳步推进。研发的各种规格型号的离心脱水机逐渐接近国际先进水平,并在选煤厂大量应用^[54]。

3.2 煤泥水处理设备的高效化

浓缩和压滤是煤泥水处理流程的终端环节。对于难沉降煤泥水的后续处理更应该关注高效的浓缩和压滤技术。最常用的浓缩澄清设备有水力旋流器、深锥浓缩机、高效浓缩机、倾斜板沉淀槽等。

高效浓缩机因具有处理量大、结构简单、浓缩效果好、占地面积小等优点而被广泛应用。在现场生产实践中发现与普通浓缩机相比,高效浓缩机的浓缩效果好,且单位处理量提高4~9倍,相同处理量其投资建设成本低30%^[55]。

高效快速压滤机具有结构简单、制造成本较低、生产效率高、运行稳定可靠、适用性广等特点。LAI等^[56]采用计算流体力学方法研究了滤饼内部的微空隙结构对液体流动的影响,滤液通道的微观结构及尺寸是影响液体外排的主要因素,可通过添加纳米级别的二氧化硅改善通道微观形态,进一步提高过滤速率和脱水效果。杨涛和王穿金^[57]基于ZKG300/2000快开高效压滤机对淮南矿业集团煤泥的处理实践发现,与普通板框压滤机相比,快开高效压滤机单位处理能力、产品水分和自动化程度均具有显著优势,其入料、卸料等辅助时间短,处理量提高了2.5倍,滤饼水分降低2%左右。刘俊娥^[58]通过分析KZG300~450/2000-U快开式压滤机在西山煤电西曲矿选煤厂的应用实践得出,快开式压滤机大大提升了煤泥卸料、滤布清洗等环节的自动化程度,取得了很好的应用效果,在保障生产质量的同时,可以大幅降低劳动强度。此外,LIN等^[59]研制了一种流体剪切强度逐级递减的流化床絮凝器,评价了设备在处理难沉降煤泥水絮凝过程的工艺性能,对床体内部颗粒的表观流速进行研究。

3.3 煤泥水处理设备的自动化与智能化

神东煤炭集团开发了基于煤泥水浓缩过程入料特性与固液界面协同的智能化控制系统,实时监控煤泥水处理系统技术参数数据,通过分析煤泥水入料,生成药剂添加量的前馈模型;采用超声波发射源获取浓缩机内煤泥水清水层界面,实时准确检测煤泥水浓缩过程真实状态,反馈优化药剂制度,形成入料特性与浓缩装置界面参数协同的控制策略,实现煤泥水浓缩系统稳定运行^[60]。

高勇等^[61]为了解决大隆矿选煤厂煤泥处理系统人工加药精确度低、影响生产等问题,研发了自动加药系统。该系统利用模糊控制理论,结合大隆矿选煤厂加药实践,总结出自动添加药剂的模糊控制规则,完成模糊控制器的设计。该系统能适应随时变化的煤泥水,参数可随时调整,药液配制均匀,避免了人工配药不准确和加药量变化不及时造成的药剂浪费现象,在加药平衡点上与手工加药相比可以节约药剂费用10%。

4 结语与展望

系统综述了难沉降煤泥水的全流程和全过程管控方法,有助于系统解决选煤过程中难沉降煤泥水处理难题。笔者从煤炭高效干法脱粉、次生煤泥减量、矸石预先脱泥、循环水量和生产组织管理等方面阐述了煤泥源头管控的煤泥减量化技术,从工艺设

备与药剂优化、水质调节、深度分级、电场及磁场辅助沉降、微波预处理、微生物絮凝等方面分析了难沉降煤泥水的处理技术,以及向大型化、国产化、高效化、智能化等方向发展的煤泥水终端处理装备。

1)采用高效筛分设备(驰张筛等)干法脱粉、优化选煤工艺参数和设备操作、减小次生煤泥和矸石细泥、加强循环水量管理等煤泥减量化生产组织手段,可从源头上控制难沉降煤泥水的产生量,这是当前煤泥水处理中最为经济有效的方法,可为后续煤泥水处理节约大量成本。

2)基于浓缩与压滤流程及设备改进、药剂开发与药剂制度优化的传统煤泥水处理方法需要结合理论研究强化工程应用;水质调节、外加电场及磁场处理、微波预处理和微生物絮凝等新技术的应用,显示了其独特的煤泥水絮凝处理效果,但由于电极材料等消耗较大、处理成本较高,也存在一定技术瓶颈,目前仍处于实验室研究阶段。需要进一步加强新技术工业化应用攻关,使高效低耗的先进技术惠及难沉降煤泥水的处理。

3)煤泥水处理技术与装备是选煤厂升级改造的重点和难点,大型化、国产化、高效化和智能化的煤泥水处理终端设备对选煤厂的自动化,乃至智能化具有重要的支撑和引领作用。

参考文献(References):

- [1] 林喆,杨超,沈正义,等.高泥化煤泥水的性质及其沉降特性[J].煤炭学报,2010,35(2):312-315.
LIN Zhe, YANG Chao, SHEN Zhengyi, et al. The properties and sedimentation characteristics of extremely sliming coal slime water [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 312-315.
- [2] BP. 2021版《BP世界能源统计年鉴》中国专题(中文版)[EB/OL]. (2021-07-08) [2021-09-22]. https://www.bp.com/content/dam/bp/country-sites/zh_cn/china/home/reports/statistical-review-of-world-energy/2021/Statistical-Review-of-World-Energy-2021-China.pdf.
- [3] 王文宾,刘加强,马超,等.煤泥水澄清循环新技术综述[J].资源信息与工程,2019,34(4):64-65.
WANG Wenbin, LIU Jiaqiang, MA Chao, et al. Overview of new technologies for slime water clarification and cycle [J]. Resources Information and Engineering, 2019, 34(4): 64-65.
- [4] 黄龙,潘淼,江海深,等.变振幅等厚筛分过程中生产率对粒群时空分布与分级效果的影响研究[J].选煤技术,2019(3):23-29.
HUANG Long, PAN Miao, JIANG Haishen, et al. A study of the effects on temporal and spatial distribution of particle groups and sizing effect produced by productivity in variable-amplitude equal bed-thickness screening process [J]. Coal Preparation Technology, 2019(3): 23-29.
- [5] 孙天虎,辛得祥.选煤厂煤泥减量化途径分析[J].煤炭加工与

- 综合利用,2019(6):33-35.
- SUN Tianhu, XIN Dexiang. Analysis of slime reduction methods in coal preparation plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2019(6):33-35.
- [6] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2016.
- [7] 肖宁伟,张明青,曹亦俊. 选煤厂难沉降煤泥水性质及特点研究[J]. 中国煤炭,2012,38(6):77-79.
- XIAO Ningwei, ZHANG Mingqing, CAO Yijun. Research on the properties and features of difficult-to-settling slurry water in coal preparation plant [J]. China Coal, 2012, 38(6):77-79.
- [8] 李桂春,闫晓慧,李明明. PAC作用下煤泥水絮凝沉降的EDLVO分析[J]. 黑龙江科技大学学报,2020,30(1):45-49.
- LI Guichun, YAN Xiaohui, LI Mingming. EDLVO analysis of flocculation and sedimentation of slime water under PAC [J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2020, 30(1):45-49.
- [9] 李振,于伟,颜冬青,等. 煤泥水处理新方法研究进展及发展趋势[J]. 选煤技术,2020(1):1-5.
- LI Zhen, YU Wei, YAN Dongqing, et al. Progress and developing trend of the research work on new coal slurry water treatment methods [J]. Coal Preparation Technology, 2020(1):1-5.
- [10] 宋帅,樊玉萍,马晓敏,等. 煤泥水中煤与不同矿物相互作用的模拟研究[J]. 矿产综合利用,2020,40(1):168-172,102.
- SONG Shuai, FAN Yuping, MA Xiaomin, et al. Simulation study on interaction between coal and different minerals in coal slurry [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1):168-172,102.
- [11] 黄鲁华,文献才,阎志刚,等. 高泥化煤泥水沉降试验研究[J]. 煤炭技术,2019,38(4):138-141.
- HUANG Luhua, WEN Xiancai, YAN Zhigang, et al. Experimental study on flocculation and coagulation treatment of high mud-died coal slurry water [J]. Coal Technology, 2019, 38(4):138-141.
- [12] 匡亚莉. 选煤工艺设计与管理[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2014.
- [13] 邢耀文,桂夏辉,韩海生,等. 颗粒气泡黏附科学:基于AFM和DWFA的颗粒气泡间疏水作用力研究[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1580-1585.
- XING Yaowen, GUI Xiahui, HAN Haisheng, et al. Bubble-particle attachment science-study on hydrophobic force between bubble and particle based on AFM and DWFA [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1580-1585.
- [14] 闵凡飞,陈军,刘令云. 难沉降煤泥水处理新技术研究现状及发展趋势[J]. 选煤技术,2018(5):4-9.
- MIN Fanfei, CHEN Jun, LIU Lingyun. State-of-the-art and developing trend of the new technologies for treating difficult-to-settle coal slurry [J]. Coal Preparation Technology, 2018(5):4-9.
- [15] 常发军. 煤泥减量化设计在宁东选煤厂的改造实践[J]. 煤炭加工与综合利用,2019(8):31-33.
- CHANG Fajun. Reformation practice of slime reduction design in Ningdong coal preparation plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2019(8):31-33.
- [16] 王艾生,刘国庆,刘文昌,等. 3510型弛张筛在阳泉一矿选煤厂的应用[J]. 选煤技术,2018(4):136-138,141.
- WANG Aisheng, LIU Guoqing, LIU Wenchang, et al. Application of the 3510 flip-flop screen at Yangquan No. 1 mine's coal preparation plant [J]. Coal Preparation Technology, 2018(4):136-138,141.
- [17] 李文利,张晓辉,谷林,等. 哈拉沟选煤厂煤泥减量化生产生产工艺改造实践[J]. 煤炭加工与综合利用,2017(9):33-38.
- LI Wenli, ZHANG Xiaohui, GU Lin, et al. Reformation practice of slime reduction production process at Halagou Coal Preparation Plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(9):33-38.
- [18] 江海深. 潮湿煤炭变振幅等厚弹性深度筛分机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [19] 吴鼓勇,王召召. 8 mm弹性杆筛板在煤泥减量化生产中的应用研究[J]. 能源与环保,2017,39(6):176-179.
- WU Guyong, WANG Zhaozhao. Study on application of 8 mm elastic-rod screenplate in slime-reduction [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(6):176-179.
- [20] 潘淼,段晨龙,石巍,等. 刚柔耦合弹性筛分机理与动力煤3 mm分级试验[J]. 洁净煤技术,2019,25(3):46-51.
- PAN Miao, DUAN Chenlong, SHI Wei, et al. Mechanism of rigid-flexible coupling elastic screening and 3 mm classification test of steam coal [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3):46-51.
- [21] 王金福,董兰忠,景山,等. 离心式散料风力分级原理及实验研究[J]. 化学工程,2001,29(2):43-45.
- WANG Jinfu, DONG Lanzhong, JING Shan, et al. Development of a new centrifugal pneumatic classifier for powder materials [J]. Chemical Engineering, 2001, 29(2):43-45.
- [22] 陈开寿. 选煤厂设计采用次生煤泥量的探讨[J]. 煤矿设计,1991(4):42-45.
- CHEN Kaishou. Discussion on the use of secondary slime in coal preparation plant design [J]. Coal Mine Design, 1991(4):42-45.
- [23] 陈凡,朱子祺. 神东煤制油选煤厂减少次生煤泥量的措施[J]. 煤炭加工与综合利用,2014(11):17-21.
- CHEN Fan, ZHU Ziqi. Measures to reduce the amount of secondary slime in Shendong Meizhiyou coal preparation plant [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2014(11):17-21.
- [24] 贺建明. 矸石泥化性质对煤泥水沉降性能的影响[J]. 洁净煤技术,2012,18(5):6-9.
- HE Jianming. Influence of gangue argillization on settlement of slime water [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(5):6-9.
- [25] 匡亚莉. 跳汰分选机理及专家知识库研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [26] 初静,陈文策,崔志强,等. YDYY带式压滤机在晓明矿的应用[J]. 科技视界,2019(23):37-38.
- CHU Jing, CHEN Wence, CUI Zhiqiang, et al. Application of YDYY belt filter press in Xiaoming coal mine [J]. Science & Technology Vision, 2019(23):37-38.
- [27] 任浩. 基于BP神经网络的浓缩药剂剂添加系统设计与应用[J]. 能源与节能,2018(12):178-179.

- REN Hao. Design and application of thickener pharmacy adding system based on BP neural network[J]. Energy and Energy Conservation, 2018(12):178-179.
- [28] 章青芳. 磁性膨润土的制备及其在水处理中的应用研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
- [29] WANG Yanfen, LI Benxia, LI Mengting, et al. Fabrication of new cationic polyacrylamide flocculant used for treating slime water[J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, 26:1349-1351.
- [30] 吕一波, 蒋振东, 张乃旭. 絮凝剂 CPBA 的合成及其对高泥化煤泥水沉降特性的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(4):417-422.
- LYU Yibo, JIANG Zhendong, ZHANG Naixu. CPBA synthesis and its influence on sedimentation characteristics of extremely slimming coal slime water [J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2017, 27(4):417-422.
- [31] 李文俊, 程志伟. 陕北张家峁某选煤厂煤泥水处理的絮凝工艺研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10):139-141.
- LI Wenjun, CHENG Zhiwei. Study on flocculation process of coal slime water treatment in Zhangjiamao coal preparation plant of northern Shaanxi[J]. Coal Technology, 2019, 38(10):139-141.
- [32] 陶亚东, 朱子祺, 张佳彬, 等. 上湾选煤厂煤泥水絮凝试验研究与优化[J]. 煤炭技术, 2018, 37(5):228-290.
- TAO Yadong, ZHU Ziqi, ZHANG Jiabin, et al. Research and optimization of coal slime water flocculation in Shangwan coal preparation plant[J]. Coal Technology, 2018, 37(5):228-290.
- [33] WANG Weidong, WANG Huifeng, SUN Juntao, et al. Experimental study on slimewater flocculation sediment based on the montmorillonite hydration expansion inhibition [J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2013, 19(4):530-534.
- [34] 董宪姝. 煤泥水处理技术研究现状及展趋势[J]. 选煤技术, 2018(3):1-8.
- DONG Xianshu. State-of-art and developing trend of slime water treatment technology [J]. Coal Preparation Technology, 2018(3):1-8.
- [35] LIN Zhe, LI Panting, HOU Dou, et al. Aggregation mechanism of particles; Effect of Ca^{2+} and polyacrylamide on coagulation and flocculation of coal slime water containing illite [J]. Minerals, 2017, 30:1-10.
- [36] LI Hongliang, CHEN Jun, PENG Chenliang, et al. Salt coagulation or flocculation in situ zeta potential study on ion correlation and slime coating with the presence of clay: A case of coal slurry aggregation [J]. Environmental Research, 2020, 189:109875.
- [37] 张志军, 刘炯天, 冯莉, 等. 基于 DLVO 理论的煤泥水体系的临界硬度计算 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1):121-125.
- ZHANG Zhijun, LIU Jiongtian, FENG Li, et al. Calculation of critical hardness of coal slime water system based on DLVO theory [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1):121-125.
- [38] MIN Fanfei, CHEN Jun, PENG Chenliang, et al. Promotion of coal slime water sedimentation and filtration via hydrophobic coagulation [J/OL]. International Journal of Coal Preparation and Utilization; 1-15. [2018-10-16]. <https://doi.org/10.1080/19392699.2018.1535491>.
- [39] 张涛, 张鸿波, 杨福娟, 等. pH 值对煤泥水沉降效果影响的试验研究 [J]. 煤矿机械, 2019, 40(10):65-67.
- ZHANG Tao, ZHANG Hongbo, YANG Fujuan, et al. Experimental study on effect of pH value on slurry water settlement [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(10):65-67.
- [40] 李明明, 徐硕, 卢冀伟, 等. 电化学作用对伊利石颗粒凝聚沉降性能的影响 [J]. 矿产综合利用, 2017, 37(1):125-127.
- LI Mingming, XU Shuo, LU Jiwei, et al. Effects of the electrochemical on coagulation and sedimentation performances of illites in water [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, 37(1):125-127.
- [41] 董宪姝, 姚素玲, 张凌云. 电化学絮凝的应用与发展 [J]. 选煤技术, 2008(4):138-141.
- DONG Xianshu, YAO Suling, ZHANG Lingyun. Application and development of electrochemical flocculation [J]. Coal Preparation Technology, 2008(4):138-141.
- [42] 李建军, 乔尚元, 朱金波, 等. 煤泥水磁化改性及磁化-絮凝沉降研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4):1-4.
- LI Jianjun, QIAO Shangyuan, ZHU Jinbo, et al. Magnetization modification and pre-magnetization flocculation and sedimentation of slime water [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4):1-4.
- [43] 李桂春, 庄国锋, 吕玉庭. 磁处理强化煤泥水絮凝沉降的实验研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2016, 26(1):36-38.
- LI Guichun, ZHUANG Guofeng, LYU Yuting. Study on flocculating sedimentation of slim water treated by magnetic field [J]. Journal of Heilongjiang University of Mining & Technology, 2016, 26(1):36-38.
- [44] 王楠, 王卫东, 郭庆, 等. 微波场下煤泥水沉降特性的研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35(3):283-285.
- WANG Nan, WANG Weidong, GUO Qing, et al. Settling characteristics of coal slime water pretreated in microwave field [J]. Coal Technology, 2016, 35(3):283-285.
- [45] SAHOO B K, DE S, MEIKAP B C. Artificial neural network approach for rheological characteristics of coal-water slurry using microwave pre-treatment [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 12:379-386.
- [46] 赵寒絮. 微波辐照辅助煤泥水沉降试验研究 [D]. 淮南:安徽理工大学, 2016.
- [47] 王浩, 樊攀峰, 郑剑平, 等. 超声电化学协同处理难沉降煤泥水的实验研究 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(5):118-121.
- WANG Hao, FAN Panfeng, ZHENG Jianping, et al. Experimental research on coal slurry pretreatment with ultrasound and electro-chemistry [J]. Coal Engineering, 2015, 47(5):118-121.
- [48] ZHAO Yue, MENG Liang, SHEN Xiaoning. Study on ultrasonic-electrochemical treatment for difficult-to-settle slime water [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64:104978.
- [49] 王伟. 微生物絮凝剂对煤泥水中微细粒煤与矿物选择絮凝及其机理研究 [D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- [50] 侯志翔. 煤泥水多菌种絮凝优化试验及絮体分形维数研究 [D]. 淮南:安徽理工大学, 2013.

- [51] 王滔. 物多菌种对煤泥水的絮凝试验及絮凝机理研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.
- [52] LIANG Zhi, HAN Baoping, LIU Hong. Optimum conditions to treat high-concentration microparticle slime water with biofloculants[J]. Mining Science and Technology (China), 2010, 20(3):478-484.
- [53] 冀敏敏. 低阶煤的生物多级絮凝研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.
- [54] 石焕,程宏志,刘万超. 我国选煤技术现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2016,44(6):169-174.
SHI Huan, CHENG Hongzhi, LIU Wanchao. Present status and development trend of China's coal preparation technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6):169-174.
- [55] 王雷,李宏亮,彭陈亮,等. 我国煤泥水沉降澄清处理技术现状及发展趋势[J]. 选煤技术,2013(4):82-86.
WANG Lei, LI Hongliang, PENG Chenliang, et al. Current situation and developing trend of coal slime water settlement and clarification treatment technology in China[J]. Coal Preparation Technology, 2013(4):82-86.
- [56] LAI Qingteng, LIAO Yinfei, LIU Zechen, et al. Enhanced low-rank coal slime dewatering by adjustment of channel wall structure and surface wettability[J]. Separation and Purification Technology, 2020, 248:116970.
- [57] 杨涛,王穿金. 快速高效隔膜压滤机在淮南矿业集团的应用[J]. 煤质技术,2006(4):56-57.
YANG Tao, WANG Chuanjin. The application of fast and high efficiency operating pressure filter in Huainan Coal Mining Group Corporation Ltd. [J]. Coal Quality Technology, 2006(4):56-57.
- [58] 刘俊娥. 快开压滤机在西曲矿选煤厂煤泥水车间生产中的研制与应用[J]. 矿业装备,2019(3):186-187.
LIU Jun'e. Development and application of quick-opening filter press in the production of slime water workshop of Xiqu coal preparation plant[J]. Mining Equipment, 2019(3):186-187.
- [59] LIN Zhe, SUN Xiaolu, WANG Quanwu, et al. Evaluation of the effect of hydraulic shear intensity on coal-slime water flocculation in a gradient fluidized bed[J]. Powder Technology 2020, 360:392-397.
- [60] 宋文革. 大型选煤厂智能化技术研究[J]. 洁净煤技术,2019, 25(4):144-150.
SONG Wenge. Research on intelligent technology of large-scale coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4):144-150.
- [61] 高勇,王德刚,孙涛,等. 煤泥水处理工艺中自动加药系统的研究与应用[J]. 煤炭加工与综合利用,2018(S1):20-26.
GAO Yong, WANG Degang, SUN Tao, et al. Research and application of automatic dosing system in slurry process[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2018(S1):20-26.