

矿浆过滤脱水影响因素分析及过滤性能强化研究进展

常宝宇¹, 李树磊^{2,3}, 郜宇杰¹, 田丞¹, 徐帅⁴

(1. 山西潞安矿业集团慈林山煤业有限公司夏店煤矿, 山西 长治 046605; 2. 中国矿业大学 炼焦煤资源绿色开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116; 4. 山西潞安环保能源开发股份有限公司五阳煤矿, 山西 长治 048026)

摘要: 过滤广泛应用于选煤厂、选矿厂中精矿和尾矿的脱水作业, 其运行效果对产品质量和选厂高效运行至关重要, 提高矿浆过滤效能是当前国内外矿物加工领域研究的重要课题之一。鉴于此, 从矿浆的物化性质、过滤介质及过滤推动力三个方面, 系统探讨了影响矿浆过滤脱水的主要因素, 并对过滤脱水过程中的物理强化与化学强化研究进展进行了综合评述, 提出了矿浆过滤脱水未来发展的主要方向与趋势。

关键词: 矿物加工工程; 过滤; 矿浆性质; 过滤介质; 热压; 电化学; 助滤剂

doi:10.12476/kczhly.202502120014

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0020-12

引用格式: 常宝宇, 李树磊, 郜宇杰, 等. 矿浆过滤脱水影响因素分析及过滤性能强化研究进展[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 20-31.

CHANG Baoyu, LI Shulei, GAO Yujie, et al. Research progress on influencing factors of filtration and dewatering of pulp and enhancement of filtration performance[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 20-31.

过滤是借助于微孔材料介质, 使矿浆在压力差作用下将矿物颗粒截留形成滤饼, 滤液则通过滤饼与固体分离的过程, 广泛用于选煤厂、选矿厂中精矿和尾矿的脱水作业^[1]。随着矿石资源的不断开发, 富矿资源日渐枯竭, 复杂难选低品位矿石的开发占比逐渐攀升, 有用矿物嵌布粒度逐渐细化, 致使矿石解离粒度下限逐年降低, 导致分选后的精矿粒度细; 同时随着开采机械化程度大幅度提高, 煤泥含量大幅度提高, 浮选比例越来越大, 致使分选后产品浓缩、脱水十分困难, 精煤水分偏高, 带来精煤输送成本增加, 后续处理成本升高等问题^[2]。因此, 强化矿浆过滤性能并降低产品水分, 是当前国内外选矿领域的重要研究课题。矿浆过滤主要受矿浆性质^[3-5]、过滤介质^[6-7]、

过滤驱动力^[7-9]等因素影响, 将从矿浆过滤主要影响因素、矿浆过滤脱水的物理强化、矿浆过滤脱水的化学强化三个方面对其研究进展进行综述, 并提出了矿浆过滤脱水未来发展的主要方向与趋势, 以期矿浆过滤脱水强化研究提供理论参考和方法借鉴。

1 影响矿浆过滤的主要因素

影响矿浆过滤脱水的主要因素有矿浆的物化性质(成浆颗粒物性、浆体特征)、过滤介质及过滤推动力等, 将对这些因素展开逐一进行分析和总结。

1.1 矿浆物化性质

1.1.1 成浆颗粒特性

成浆颗粒特性主要包含几何特征参数(颗粒

收稿日期: 2025-02-12

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC2909604); 国家自然科学基金(51574240)

作者简介: 常宝宇(1985-), 男, 本科, 工程师, 主要从选煤厂生产与技术管理工作。

通信作者: 李树磊(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事微细矿物浮选强化研究工作。

粒径、粒度分布和形状)和物化特征(密度、表面亲疏水性、表面电性等)等^[2, 10-12]。矿浆中颗粒粒径与粒度分布对物料过滤性能具有决定性影响,粒度越细,其比表面积越大,所形成滤饼比阻越大,过滤越困难;颗粒粒度组成越集中、越均匀,形成滤饼孔隙越大,滤饼比阻越小,过滤过程越容易;矿浆颗粒粒度分布越宽泛,颗粒粒度越不均匀,所形成的滤饼比阻越大。纤维状、粒状或粗颗粒易形成开放型孔隙网络结构,滤饼比阻小,过滤效率高,通常水分较低,但粒度过大导致孔隙度增大,致使滤液澄清度下降;扁平状或细颗粒则形成低渗透性滤层,显著增加滤饼比阻,降低过滤效率,滤饼水分通常偏高;当体系含有胶体颗粒时,不仅会增加浆体黏度,更会在滤饼形成过程中堵塞毛细孔道,阻碍滤液排出^[13]。矿物颗粒表面粗糙度增大,其比表面积与表面能也相应提高,毛细管作用增强,毛细水的去除难度增加,过滤速率降低,导致滤饼水分升高^[14]。高密度颗粒加速滤饼层形成并降低滤饼的可压缩性,而低密度物料易形成疏松滤饼结构^[10]。颗粒表面电性及表面亲疏水性也是影响矿浆表面水分含量的关键因素。表面电位受矿浆的pH值、矿浆中离子组成、矿浆中电解质浓度等影响。当颗粒表面电位值接近零时,矿物颗粒因范德华力的作用而团聚成较大颗粒,这将加速沉降速度并降低滤饼的比阻,进而加快过滤速度^[1, 11]。颗粒表面疏水性愈强,与水的接触角愈大,水分不易附着于颗粒表面;反之,接触角愈小,颗粒表面的亲水性愈好,水分易附着于颗粒表面,表面水化膜愈厚,滤饼的含水率愈高。

1.1.2 浆体特征

矿浆过滤性能受多种浆体特性影响,主要包括浓度、温度、黏度、pH值以及残留药剂含量等。其中,浓度对过滤性能的影响尤为显著。低浓度矿浆会导致滤饼形成速率降低,同时易造成过滤介质孔隙堵塞。相比之下,高浓度矿浆中细颗粒会在介质表面形成“拱架桥”结构,从而有效缓解介质堵塞问题^[15]。此外,随着入料浓度的提高,滤饼达到预设厚度所需时间减少,但由于矿物颗粒在短时间内堆积不够致密,形成的滤饼结构较为疏松,这反而加快了滤液流速,提高了过滤效率,进而增加了单位时间和单位面积的处理

能力^[10]。矿浆黏度主要反映流体对流动状态的抵抗能力,其受体系温度影响较为显著,矿浆黏度随着温度的升高而降低。在实际生产中,适当提升矿浆温度可有效降低其黏度,减少内部摩擦阻力,促进滤液排出,进而提升过滤效率^[16]。同时,颗粒粒度与矿浆黏度密切相关,粒度越细,矿浆黏度越高,对过滤过程产生的影响越不利^[1]。矿浆黏度的增大会显著提高滤液通过滤饼时的阻力,当物料黏度过高时,固液分离过程中滤饼的比阻往往过大,这不仅会降低滤液的过滤速率,还会导致滤饼含水量增加。此外,矿浆中的残留药剂,一般除了表面活性剂会降低矿浆的黏度和表面张力,有利于过滤,其他药剂如水玻璃等增加了矿浆的黏度,不利于过滤^[1, 11]。在实际生产过程中,矿物颗粒表面的电位显著受到矿浆pH值的影响。通过适当调节矿浆的pH值,使颗粒表面电位趋近于零,可以促进细小颗粒的团聚作用,增大其表观粒径,从而加快沉降速度,并且有利于后续过滤过程的进行^[16]。

1.2 过滤介质

在过滤过程中,过滤介质的性能对过滤作业的效率 and 分离精度具有决定性影响,主要取决于介质的孔隙率、化学稳定性、机械强度以及亲疏水性等因素^[15]。介质的孔隙率决定了其对液体的透过能力,孔隙率较高时,液体通过的速度加快,有助于提高脱水效率,同时过滤介质的孔隙容易复原,即容易排除孔隙中阻留下来的固体颗粒。过滤介质的化学稳定性在脱水过程中扮演着关键角色,介质必须能够抵抗脱水过程中可能遭遇的化学物质,以防止介质受损或产生有害反应^[2]。过滤介质的机械强度同样对脱水效果产生影响,介质应具备足够的强度以承受过滤过程中的压力差,避免破裂或变形,确保过滤过程的连续性和稳定性^[17-18]。此外,过滤介质的亲疏水性会影响其与液体的相互作用,选择适当的介质能够促进或抑制水分的通过,从而有效控制脱水效果。我国矿山过滤机滤布的技术演进可分为四个关键时期:首先是以化学纤维替代传统棉质材料的转型期;随后进入纺布技术应用阶段;接着是单丝滤布的创新与发展时期;最终迎来了陶瓷及其他微孔过滤介质的应用时代。基于微孔介质在孔径性能方面的优势,国内不仅引进了先进的陶瓷真空

过滤设备,还自主研发了陶瓷微孔过滤材料。通过多种制备工艺,成功开发出复合膜滤布,其应用范围正在不断扩大。同时,金属丝网、金属及塑料烧结微孔过滤介质也在矿山行业中得到实际应用^[2]。

1.3 过滤推动力

过滤推动力通常指在过滤过程中作用于液体或悬浮液上的压力差,该压力差可由真空、正压或机械力产生^[2,16]。在过滤过程中,过滤机的推动力是一个至关重要的因素,它直接关系到矿浆的过滤效率和过滤效果。真空过滤机的驱动力主要来自真空泵产生的负压真空。因此,真空度对过滤机的生产效率、滤饼的水分含量以及滤液中固体颗粒的浓度具有决定性影响。压滤机的驱动力则主要来自压缩空气机,通过压缩空气产生的高压,在过滤介质两侧形成压差,进而促进滤液的快速流出。通常情况下,增加过滤机的驱动力可以提升其生产效率,并降低滤饼的含水量。特别是对于含有微细颗粒和高泥量的物料,采用更高的真空度或压强进行过滤,往往能获得更佳的效果。然而,过度的驱动力会导致滤液中固体颗粒含量增加,从而影响产品的回收率,并对环境造成较大影响。陶瓷过滤机的动力主要源自于陶瓷过滤片的特殊构造。该过滤片以氧化铝为主要成分,其表面布满了微细的小孔,通过应用开尔文数学原理所描述的毛细作用,在较弱的外部真空场作用下,能够实现超过 95% 的真空度,进而保持高效的过滤性能。

2 矿浆过滤性能强化研究进展

2.1 矿浆过滤性能物理强化的研究进展

2.1.1 物理掺粗强化浮选精煤脱水

正如前文所述,入料粒度细是造成矿浆过滤脱水难的一个极其重要原因,而滤饼的渗透性是决定滤饼阻力的关键因素。因此,提高矿浆中粗颗粒物料的比例,调整浆体的粒度组成,能够增强滤饼的通透性,从而优化矿浆的过滤脱水性能(图 1),该方法广泛应用于浮选精煤脱水^[19-24]。李彬彬等^[19]对掺入不同粒级粗颗粒对浮选精煤滤饼水分含量的影响进行了深入研究,在 -0.125 mm 粒级精煤中掺入 $1.0\sim 0.5$ 、 $0.50\sim 0.25$ 、 $0.250\sim 0.125\text{ mm}$ 粒级粗颗粒时,其较佳掺入比例分别为 13.33%、

20.00%、16.67%,超过该比例后脱水效果改善并不明显。赵卫^[20]基于级配理论的研究表明,在细粒煤泥中适量添加粗颗粒可有效降低滤饼水分,其中 $1.0\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级煤泥的掺入量与滤饼水分呈负相关,而 $0.50\sim 0.25\text{ mm}$ 和 $0.250\sim 0.125\text{ mm}$ 粒级则存在较佳掺入量,过量添加反而会降低脱水效率。张敬波等^[22]通过分析浮选入料性质对浮选精煤脱水工艺进行掺粗工程改造,将 1 组精煤磁尾旋流器底流产品掺入浮选精煤中,浮选精煤浓度控制在 280 g/L 以上, -0.045 mm 粒级煤泥控制在 40% 以下,加压过滤机周期可稳定控制在 250 s 左右,产品水分由 19.0% 降至 17.3%,精煤快开压滤机周期在 1 200 s 以下,滤饼水分由 25.2% 降至 23.4%。杨斌等^[23]对浮选精煤加压过滤过程的研究进一步证实,优化粒度组成可显著改善脱水效果,通过滤饼比阻分析发现,粗颗粒掺入量存在临界值,适量添加可有效提升脱水性能。刘汉刚等^[24]对选煤厂浮选精煤实施了粒度优化改造,通过调整入料粒度组成,有效提升了加压过滤机的运行效率。该改造措施不仅缩短了设备排料周期,提高了处理能力,同时改善了滤饼剥离效果,降低了滤饼含水率,使脱水性能得到显著提升。

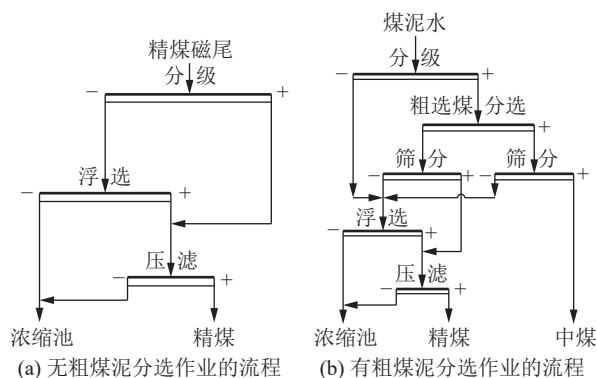


图 1 选煤厂常见掺粗流程^[21]

Fig.1 Common coarse mixing process in coal processing plant

在选煤生产过程中,通过向浮选精煤中掺加粗颗粒来增强脱水性能,已凸显其显著成效,相较于开发新型设备与技术,掺粗显然是一种成本效益高且易于实施的技术手段。

2.1.2 热压强化矿浆脱水

近年来,热压过滤脱水已成为细粒物料脱水作业研究的重要课题之一^[25-29]。热压过滤技术包含两个关键步骤:首先是滤饼的形成,随后是对已

形成滤饼的再处理。在滤饼形成后，通过热态压缩空气穿透滤饼层，可实现机械与热力协同脱水。这一过程主要依靠气体置换、界面效应、压榨作用以及热力干燥等多重机制，显著降低物料含水量（图2）^[25]。近年来，该技术在褐煤脱水领域得到广泛研究。王振君^[26]通过对比分析褐煤在热压脱水前后的物理化学结构变化，发现脱水过程主要依靠热力效应、压密固结和闪蒸三种机制。研究表明，虽然热压脱水能有效降低煤样水分，但会对褐煤结构造成一定程度的破坏。郑星等^[27]在温度为250℃、压力为3 MPa、保压为60 min条件下对褐煤进行了热压脱水实验，研究发现褐煤最大脱水率可达93.67%，在外部热力协同作用下，加压实现了褐煤“攥拳式”脱水，挤出内水，改变了褐煤孔隙结构与官能团分布。

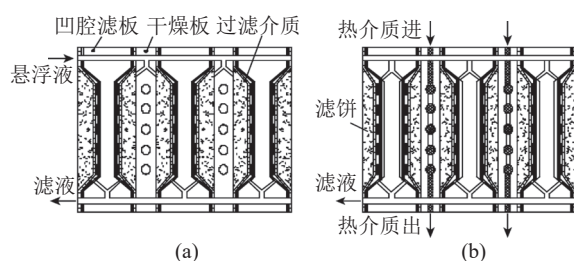


图2 热压过滤干燥脱水原理^[25]

Fig.2 Hot press filtration drying dehydration principle

热压过滤技术在脱水过程中需要消耗大量的热能，一定程度上会带来物料表面性质的改变，如褐煤，会带来表面官能团、比表面积、亲疏水性变化^[28-29]。所以，有必要对该技术成本进行核算，并依据对产品表面性质影响来综合评判。

2.1.3 过滤工艺优化与设备革新强化矿浆脱水

过滤脱水设备主要分为真空类和加压类两大类。真空类设备包括圆筒型、圆盘型、水平带型等多种形式^[30-31]，而加压类设备则涵盖压滤型、压力容器型、压榨型和旋转型等^[30]。在矿浆过滤脱水领域，最为常用的设备有转鼓过滤机、盘式过滤机、真空过滤机、平带式压滤机、板框式压滤机、快开压滤机、加压过滤机和高效压滤机等^[31]。以陕西华县某钼选厂为例，该厂原本采用中心传动耙式浓缩机浓缩、圆盘真空过滤机过滤和电磁螺旋干燥机干燥的三段脱水工艺，存在能耗高和钼金属流失严重等问题，改进后采用立式全自动隔膜压滤机进行脱水，取代了原有的过滤和干燥两段工艺，最终产品水分达到了设计要求^[32]。同

样，金堆城百花岭选矿厂也对其钼精矿的脱水工艺进行了改进，采用浓密-压滤两段脱水新工艺替代了原有的浓缩—过滤—干燥三段工艺，钼精矿产品水分降至10%以下，解决了细粒钼精矿脱水难、能耗高和环境污染等问题^[33]。江西铜矿铜精矿原脱水系统为折带式过滤机，铜精矿产品水分一般维持在14%左右，2004年新增了1台陶瓷过滤机，2008年，又新增1台板框压滤机；无论处理-0.037 mm含量低于60%的铜精矿产品，还是处理在处理-0.037 mm含量高于60%的铜精矿产品时，板框压滤机滤饼水分均显著低于陶瓷过滤机和折带式过滤机。2010年，投入使用压滤机系统，取代折带式过滤机系统，产品水分降至12.33%。2017年，隔膜压滤机投入使用，铜精矿水分进一步下降至11.10%左右^[34]。针对某铅锌混合精矿矿浆量小、浓度低以及建设场地受限等问题，淘汰了传统的浓缩+过滤两段脱水工艺，转而采用隔膜压滤机作为低浓度铅锌混合精矿浆的脱水设备。这一改进使得产品滤饼的水分控制在14%左右，取得了良好的脱水效果^[35]。矾山磷矿磷精矿原有设计先进入浓密机，底流由渣浆泵泵至筒型真空过滤机进行过滤，浓密机溢流自流至沉淀池，磷精矿产品水分维持在13%左右，干燥后才可装车运输，此外过滤机滤液浓度过高，增加了浓密机运行负荷，改造后陶瓷过滤机取代原有筒型真空过滤机，并新增1台Φ250 mm旋流器，进一步提高入料精矿浓度，磷精粉产品水分降至10%以下^[36]。谢桥选煤厂对煤泥压滤脱水设备进行了技术改造，采用新型高压压滤机替代快开隔膜压滤机。结果表明当入料时间为4 000 s、压榨时间为1 600 s、压榨压力为2.9 MPa时，滤饼水分降至17.9%，滤饼厚度达到2.90 cm，完全满足生产要求，显著提高了经济效益^[37]。针对煤泥产品水分高，煤泥售价低、销售波动大等问题，将原有的快开压滤机替换为超高压隔膜压滤机，并配套煤泥用锤式破碎机，煤泥压滤滤饼水分降至16%以下，滤饼破碎松散后直接掺配原煤或中煤中，尾煤泥销售不再受制约^[38]。

随着产品对水分指标的要求不断提高，脱水工艺和设备正在经历显著变革。传统的真空过滤机、折带式过滤机、陶瓷过滤机和盘式过滤机逐渐被加压过滤机、快开压滤机、高效压滤机甚至

超高压压滤机所取代。随着压滤技术的广泛应用,其发展趋势正朝着设备大型化、高压化和智能化方向迈进。同时,新型过滤介质的研发也将进一步推动压滤技术的推广和应用。

2.2 矿浆过滤性能化学强化的研究进展

2.2.1 助滤剂强化矿浆过滤脱水

(1) 介质型助滤剂

介质型助滤剂的助滤原理与前文物理掺粗相似,最为常见的有石棉、木质纤维素、珍珠光粉、硅藻土、塑料及其他粗颗粒填料等。这些介质型助滤剂可以直接添加至矿浆中,通过优化悬浮液中颗粒的粒径分布和重构滤饼孔隙网络拓扑结构,增强滤饼的渗透性,改善滤饼的脱水性,同时,还可以通过预涂层来改善过滤介质性能,有效减少介质堵塞。由于这些助滤剂有可能改变矿浆的固有性质,在选煤或选矿中的应用相对有限,但在工业污泥脱水方面展现出显著优势。介质型助凝剂作用原理类似于结构力学中的骨架强化模型,通过添加刚性介质颗粒形成稳固的网格状结构,通过应力传递效应抵抗有机胶体相的塑性形变来维持滤饼多孔性,有效缓解污泥中有机质的压缩性问题^[39]。相关研究表明,骨架构建体的材料选择对脱水性能具有显著影响。张昊等^[40]通过对比赤泥-水泥复合体系与石灰-水泥体系的助滤效果,发现前者不仅将污泥比阻降低了42.7%,同时将滤液 pH 值缓冲至中性范围,避免了石灰体系强碱性环境导致设备腐蚀问题。刘鹏等^[41]进一步证实骨架构建与芬顿氧化具有协同效应,芬顿体系产生的羟基自由基可有效裂解有机质结构,而刚性介质则提供机械支撑,实现了污泥的深度脱水。张辰^[17]研究表明珍珠岩很难提高煤泥的过滤速率, α -半水石膏轻微提高煤泥过滤速率,而低浓度和高浓度的硅藻土均不利于煤泥脱水性能提高,适当浓度硅藻土可以明显改善煤泥过滤速率。

(2) 表面活性剂型助滤剂

表面活性剂型助滤剂主要分为水溶性和油溶性两大类。油溶性表面活性剂种类较少,价格较高,且助滤效果有限,因此在工程应用中受到一定限制。水溶性表面活性剂根据其是否发生解离,可进一步分为离子型和非离子型。离子型表面活性剂根据活性基团的电荷性质,可分为阳离

子型(如铵盐类、季铵盐类)、阴离子型(如羧酸盐类、磺酸盐类、磷酸酯盐类)、非离子型(如聚乙二醇类、多元醇类)以及两性型(如甜菜碱类、氨基酸类)。在矿浆体系中,表面活性剂的存在形式主要有四种:1)以游离态离子或分子溶解于液相中;2)吸附于气-液界面并形成定向排列;3)在溶液中通过分子间作用力自组装形成胶束;4)通过物理或化学作用吸附于固体颗粒表面。当表面活性剂浓度超过临界胶束浓度时,单层吸附会转变为多层吸附,胶束结构可能直接参与固-液界面的吸附过程,形成独特的胶束-表面复合吸附层。

李蕊等^[42]针对铁精矿滤饼颗粒细、孔道窄、脱水困难等问题,研究发现液态聚醚的助滤效果优于其他助滤剂。当用量为 150 g/t 时,铁精矿滤饼水分从 14.74% 降至 10.20%。此外,将液态聚醚与丙二醇按质量比 7:3 复配使用,相同用量下滤饼水分进一步降至 8.35%,助滤效果显著提升。研究表明,液态聚醚在铁精矿表面形成“蘑菇”型吸附,产生位阻排斥效应,使滤饼结构更松散,孔隙率增加,迂曲度和盲孔数量减少。邹昀等^[16]对比了五种表面活性剂(十二烷基磺酸钠、辛基酚聚氧乙烯醚-10、十六烷基三甲基溴化铵、丁二酸二异辛酯磺酸钠和十二烷基苯磺酸钠)对赤铁精矿的助滤效果,发现表面活性剂通过提高铁精矿表面接触角和降低矿浆表面张力,显著降低了滤饼水分。田建利等^[43]研究了助滤剂 CYG-4 和硫酸对磁赤混合铁精矿的助滤效果,证实 CYG-4 的助滤性能优于硫酸。刘丽艳等^[4]针对弱磁选铁精矿过滤效率低的问题,探讨了多种助滤剂的作用,进一步验证了表面活性剂通过调节气-液界面张力和颗粒润湿性,降低毛细管压力,从而改善铁精矿过滤性能的机制。颜阳等^[44]对比了油酸钠(NaOL)、十二烷基三甲基氯化铵(DTAC)和 Tween85 对煤泥的助滤效果,研究表明表面活性剂通过提高煤泥的疏水性、降低毛细管压力和破坏水化膜来改善煤泥的过滤性能。勾善新^[45]研究发现聚铵类有机助滤剂对煤泥的助滤效果明显好于聚合氯化铝和聚丙烯酰胺,可将过滤时间减少 61.50%,且煤泥颗粒表观粒径对过滤性能有明显影响。任晓汾等^[46]对比了非离子型 AEO-9、阴离子型 SDBS 和阳离子型 CTAB 的助滤效果,发现

CTAB 效果较佳,但药剂用量需控制在合理范围内,过量使用会增加煤浆黏度和过滤阻力,反而不利于滤饼水分降低。

表面活性剂在助滤过程中的作用机制主要包括以下三个方面:1)降低溶液表面张力。表面活性剂能够显著减小滤饼中水分的表面张力,促进毛细孔隙中的水分更易排出。2)增强颗粒表面疏水性。通过增大颗粒接触角,提高颗粒的疏水性,从而优化脱水效果,降低滤饼水分。3)促进颗粒凝聚与絮凝:部分表面活性剂能够诱导颗粒间的凝聚和絮凝,增大颗粒表观粒径,降低过滤比阻,提升过滤效率。不同种类的表面活性剂对各类矿浆产品的助滤效果存在明显差异。阴离子表面活性剂因成本低、来源广而备受青睐,但其较强的起泡性可能限制其应用范围;阳离子表面活性剂对表面带负电荷的颗粒吸附能力较强,助滤效果显著,但较高的成本不利于大规模推广;非离子表面活性剂不仅能增强颗粒表面疏水性,还能有效降低溶液表面张力,改善滤饼结构,表现出优异的综合助滤性能。

不同类型的表面活性剂对矿浆的助滤性能的影响存在明显的差异,需根据颗粒性质、脱水工艺要求以及脱水产品质量要求进行针对性选择,以实现较佳助滤脱水效果。

(3) 高分子絮凝型助滤剂

高分子絮凝型助滤剂可分为无机高分子助滤剂和有机高分子助滤剂两大类。无机高分子助滤剂主要包括聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铝(PAS)、聚合硫酸铁(PFS)、聚合氯化铁(PFC)和聚合氯化铝铁(PAFC)等。其作用机理主要通过电荷中和和压缩颗粒表面双电层,形成致密的初级絮体,从而改善过滤性能。潘鹏飞等^[47]研究表明,聚合氯化铝通过架桥作用增大赤铁精矿颗粒间隙,增强滤饼透水性,显著提高过滤效果。刘杰等^[48]研究发现,聚合氯化铝可显著改变煤泥表面电位,当用量增至6 kg/t时,表面电位升至-1.02 mV,过滤时长最短,孔隙率最大,过滤效果显著改善。无机絮凝剂多用于提高煤泥过滤性能,但无机高分子助滤剂在实际应用中存在药剂用量大、适用pH值范围小、对微细颗粒效果差等诸多弊端。

有机高分子助滤剂可分为天然和合成两类。

天然助滤剂主要包含淀粉、树胶及其改性产物。例如,夏畅斌等^[49]探究了阴离子型羧甲基钠盐田菁胶对细粒煤和超细粒煤脱水的影响,研究表明其能够明显降低滤饼水分,增加滤饼厚度。目前,应用最广泛的是人工合成的聚丙烯酰胺(PAM),根据类型和分子量的不同,可分为阴离子型、阳离子型和非离子型三大类。阴离子型PAM多用于碱性矿浆,非离子型PAM适用于酸性矿浆,而高分子量PAM主要用于矿浆沉降,中等分子量PAM则适用于矿浆过滤。杨晓玲^[50]研究了不同改性PAM对细粒级方解石的助滤效果,结果表明在相同分子量条件下,助滤效果依次为磺甲基化PAM>羟甲基化PAM>PAM>氨甲基化PAM。庄剑鸣^[51]比较了不同分子量的聚氧化乙烯(PEO)与PAM在浮选精煤脱水中的应用,发现高分子量PEO具有优异的絮凝能力,能显著降低滤饼比阻,提高过滤速率,并通过表面活性改善煤颗粒的亲疏水性,其脱水效果显著优于PAM类助滤剂。王趁义^[52]基于PAM与 Fe^{3+} 的配位作用,合成了新型聚丙烯酰胺铁高分子絮凝剂。该絮凝剂中的 Fe^{3+} 及其水解产物带正电荷,能吸附在悬浮煤颗粒的负电荷区,降低颗粒表面电荷,减少静电斥力,并通过高分子架桥和网捕卷扫作用形成大絮团,显著提升脱水性能。

高分子絮凝剂的助滤作用源于多重协同机制:其一,聚合物长链通过桥联效应连接颗粒;其二,表面电荷中和降低颗粒间排斥势垒;其三,形成稳定的聚合物-颗粒络合体系。这种多机制协同作用显著提升了絮凝效果,促使物料形成具有三维网络结构的致密絮团,进而改变颗粒体系的粒径分布特征。絮体尺寸的增大有效降低了微细颗粒在过滤介质孔隙中的堵塞概率,同时形成了高渗透性滤饼结构,既加速脱水速率又显著降低滤饼水分,最终实现矿浆处理效能与固液分离效果的双重提升。理想的絮凝体系需满足以下三个关键条件:一是絮团须具备抗剪切稳定性,在机械扰动条件下维持结构稳定性;二是絮体内部结合水应具备可脱除特性,在压力作用下可实现水分排出;三是絮凝产物粒度均匀,确保微细颗粒的高效捕获。当前研究虽在功能化改性及新型聚合物开发方面取得进展,但聚丙烯酰胺及其衍生物仍占据有机高分子助滤剂的主导地位,其

优异的絮凝性能、多样的改性潜力以及广泛的应用适应性,使其在矿浆处理、废水处理等领域占据主导地位。未来研究将继续聚焦于进一步提升絮凝剂的性能,开发更高效、更环保的新型高分子絮凝剂,以满足工业应用中的多样化需求。

(4) 组合助滤剂

组合助滤剂是通过将表面活性剂类助滤剂与絮凝剂类助滤剂(无论是同种类型还是不同类型)复合使用,发挥不同助滤剂的多元作用机制,协同强化矿浆过滤性能。李志红等^[53]通过对比实验发现,表面活性剂 Span80 与高分子絮凝剂 PAM 的协同作用可显著优化脱水指标。当采用先投加 PAM 后添加 Span80 的加药顺序时,不仅使滤饼含水率下降至最优水平,同时实现了过滤速率的协同提升,综合效果优于单一助滤剂体系。常晓华^[54]系统考查了 PAM、PAC 及 SDBS 三种药剂的协同效应。实验数据显示,当 PAM (20 g/t) 与 SDBS (500 g/t) 复配使用时,滤饼水分较基准值降低 1.87%,其协同效果显著优于 PAM-PAC 组合体系。毕海怡等^[55]发现 PAM 与表面活性剂 L-64 存在显著的协同强化效应。研究揭示,PAM 主要作用于加速固液分离过程,而 L-64 则专注于改善滤饼结构。值得注意的是,加药顺序对作用效果产生差异化影响:PAM 后置时滤饼水分降低更显著,而 L-64 前置则能有效缩短滤饼形成周期。雷晓树等^[56]在煤泥脱水研究中利用阴离子聚丙烯酰胺(APAM)与十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作为助滤剂进行对比实验。研究发现 CTAB 主要通过增强煤样疏水特性和将滤液表面张力降低至 42.5 mN/m,但仅实现滤饼孔隙率 2.65% 的微弱提高。而 APAM 凭借其双效作用机制—通过电荷中和作用使颗粒表面电位降低至 -15.3 mV,同时促进絮凝体尺寸增长至 7~9 μm 范围,使得滤饼孔隙率提高 11.65%,表现出更优的助滤效果。闫奋飞^[57]探讨了非离子表面活性剂 Span80 在细粒煤脱水中的应用,发现以煤油为溶剂的复合助滤剂比单一药剂更具优势,能将滤饼水分率降低 6%。

综上,组合助滤剂体系通过协同作用可显著改善固液分离效能。其作用机理主要体现以下三个方面:协同增强物料疏水特性,有效调控滤液界面张力,以及构建多孔性絮体网络结构。该组合协同效应不仅加速了颗粒间隙水分的毛细迁

移,同时通过优化滤饼孔隙通道实现脱水效率与过滤动力学的双重优化。未来研究可进一步探索不同类型助滤剂的较佳复配组合、比例及添加顺序,以实现更高效的固液分离技术。

化学助滤剂在不改变现有脱水设备和工艺的前提下,能够显著提高过滤速度并降低滤饼水分,因此在煤泥、浮选精矿、污泥等物料的脱水中得到广泛应用。未来研究应紧密结合矿浆的特性和产品过滤的具体需求,深入探究化学助滤剂的脱水机理,并致力于开发新型环保型助滤剂。同时,需重点关注助滤剂与其他浮选药剂的配伍性及其环保性能,以确保其在工业生产中的高效性和可持续性,避免对生产过程造成负面影响。通过优化助滤剂的设计与应用,进一步提升脱水效率并满足环保要求,将是未来研究的重点方向。

2.2.2 电化学强化矿浆过滤脱水

电化学辅助过滤技术是基于超细颗粒表面电荷特性,通过施加电场或电流调控颗粒行为以实现固液分离的先进方法,主要包括电渗析法、电解质调控法、电磁场强化法及电凝聚法等。其核心机理在于利用电化学作用促使颗粒聚集、表面性质改变或定向迁移,从而显著提升脱水效率。

美国是电化学脱水技术工程化应用的先驱。Doll-Oliver 公司率先开发电沉积过滤装置并成功应用于高岭土脱水领域。我国相关研究起步较晚,20 世纪 90 年代初期,中国矿业大学单忠健教授创新性地将电渗法与加压技术耦合,实现了浮选精煤水分含量降至 15.8% 的突破^[58]。董宪妹等^[59]还进行了电解褐煤过滤脱水研究,在煤浆浓度 150 g/L、电解电流 0.75 A、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 用量 1 000 g/t 条件下,滤饼水分显著降低且过滤速率提升,尤其对内部结合水的脱除效果突出。马倩倩^[60]通过引入不同价态无机电解质揭示了电化学预处理对细粒煤泥脱水的调控机制。实验表明,NaCl 的添加会导致滤饼水分升高、过滤速率下降;而 CaCl_2 与 AlCl_3 则能有效降低滤饼水分并加速过滤过程。其中, Al^{3+} 通过与 OH^- 反应生成絮凝剂,促进细粒煤聚集成大颗粒,优化滤饼孔隙结构,其强化脱水效果尤为显著。

电化学脱水技术不仅可以有效脱除颗粒表面及间隙水,还可部分脱除毛细管水,具有分离效率高、能耗低及运行稳定的特点。该技术通过电

场精准调控颗粒界面行为，突破了传统机械脱水的局限性。未来需进一步深化机理研究，优化电场参数与电解质配伍方案，推动实验室成果向工程应用转化，以实现复杂物料脱水过程的绿色高效升级。

3 结 论

(1) 矿浆过滤效率受颗粒物理化学性质（粒径分布、形貌、密度、润湿性及表面电荷）与矿浆体系特性（浓度、温度、黏度、pH值及残留药剂类型）的双重影响。研究表明，具备窄粒度分布、粗表观粒径、光滑表面、高疏水性及零电位特征的颗粒更有利于脱水；高矿浆浓度、适宜温度（降低黏度）、pH值接近颗粒零电点、残留表面活性剂等条件可显著优化过滤动力学。过滤介质的孔隙率、化学稳定性、机械强度及疏水性直接影响渗透通量，而驱动力的提升虽能降低滤饼含水率，但过高压力会导致滤液固含量升高，需权衡脱水效率与产品回收率。

(2) 物理强化矿浆助滤方面，粗颗粒掺混与热压脱水虽具经济性，但存在技术局限：掺混粗粒虽能改善浮选精煤滤饼孔隙结构，却可能降低目标产物品位；热压脱水需消耗额外热能并可能改变颗粒表面性质，需综合考虑能源成本与产品质量要求。过滤工艺与设备的迭代升级成为突破方向，表现为过滤驱动力从真空负压向高压（>1 MPa）乃至超高压（>5 MPa）发展，过滤设备向加压过滤机、快开式压滤机、超高压压滤机及智能化大型装备演进，显著提升设备处理能力与自动化水平。

(3) 化学强化矿浆助滤方面，化学助滤剂通过界面调控（如电荷中和、疏水改性）与结构优化（絮体尺寸及孔隙率调控），在不改变工艺设备的前提下实现滤速提升与滤饼水分降低。组合助滤剂（如表面活性剂-絮凝剂复合体系）通过协同作用兼具降阻与疏水双重优势，可显著提高过滤速率和降低滤饼水分。未来研究需聚焦于新型环保助滤剂开发，重点解决其与浮选药剂的配伍性及生态毒性问题，同时深化助滤剂-颗粒-溶液多相界面作用机理研究，构建精准设计理论体系。电化学助滤是一种有效且经济的脱水处理方法，未来需进一步深化机理研究，优化电场参数

与电解质配伍方案，推动实验室成果向工程应用转化。

参考文献：

- [1] 陈少辉. 浮选精煤正压级配脱水机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [2] 宋强, 谢贤, 谢丹丹, 等. 精矿过滤技术研究现状[J]. *黄金*, 2017, 38(8):52-55.
- [3] SONG Q, XIE X, XIE D D, et al. Research status of concentrate filtration technology[J]. *Gold*, 2017, 38(8):52-55.
- [4] 黄缓缓. 疏水改性及矿物种类对煤泥脱水特性的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [5] HUANG H H. Effect of hydrophobic modification and mineral types on dewatering characteristics of coal slime[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [6] 刘丽艳, 吴飞飞, 徐秋桐, 等. 颗粒性质对弱磁选铁精矿过滤性能的影响[J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(3):268-275.
- [7] LIU L Y, WU F F, XU Q T, et al. Effect of particle properties on the filterability of low intensity magnetic separation iron concentrates[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(3):268-275.
- [8] Wu Z H, Hu Y J, Lee D J, et al. Dewatering and drying in mineral processing industry: potential for innovation[J]. *Drying Technology*, 2010, 28(7):834-842.
- [9] 宋志黎, 宋显洪. 等压滤饼过滤过程中过滤介质阻力定量变化规律的探讨[J]. *化工进展*, 2020, 39(S1):306-310.
- [10] SONG Z L, SONG X H. Discussion on the quantitative change of the resistance of filter medium in the filtration process of isobaric cake[J]. *Chemical Industry and Engineering Process*, 2020, 39(S1):306-310.
- [11] 许光前, 耿大将, 王焕忠, 等. 高压压榨和风穿流压滤脱水技术实验研究与应用[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(6):118-127.
- [12] XU G Q, GENG D J, WANG H Z, et al. Experimental research and application of high pressure pressing and wind flow pressure filtration dewatering technology[J]. *China Coal*, 2024, 50(6):118-127.
- [13] 闫奋飞. 不同过滤驱动力对细粒煤过滤脱水效果的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [14] YAN F F. Effect of different driving forces on filtration dewatering of fine coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of

Technology, 2017.

[9] 季现亮. 细粒煤过滤脱水技术研究现状与展望[J]. 选煤技术, 2023, 51(1):9-14.

JI X L. Current status and prospect of the research work on dewatering of fine coal through filtration[J]. Coal Preparation Technology, 2023, 51(1):9-14.

[10] 潘登. 细粒赤铁矿精矿过滤影响的研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2018.

PAN D. Study on the influence of fine hematite concentrate filtration[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology, 2018.

[11] 冯泽宇. 微细矿物滤饼微观孔隙结构特征及渗流机理研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.

FENG Z Y. Research on microscopic pore structure characteristics and seepage mechanism of filter cake formed by fine mineral[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology, 2021.

[12] 王云飞, 李宏亮, 董宪姝, 等. 伊利石对煤泥水过滤机制的影响研究[J]. 矿产综合利用, 2020(4):202-208.

WANG Y F, LI H L, DONG X S, et al. Study on effect of illite on the filtration mechanism of coal slime water[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(4):202-208.

[13] Zhang, N., X. Chen, and Y. Peng, Effects of froth properties on dewatering of flotation products-A critical review. Minerals Engineering, 2020, 155: 106477.

[14] 杨涛, 青格勒, 董香娟, 等. 矿粉颗粒表面微观形貌对过滤性能的影响[J]. 矿产综合利用, 2020(3):185-189.

YANG T, QING G L, DONG X J, et al. Effect of surface micro-morphology of mineral powder particles on the filtration performance[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(3):185-189.

[15] 黄文辉, 武彦, 刘利波, 等. 选煤厂煤泥压滤脱水研究[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2):77-80.

HUANG W H, WU Y, LIU L B, et al. Study on filter-press dewatering of slime in coal preparation plant[J]. China Coal, 2020, 46(2):77-80.

[16] 邹昀. 表面活性剂型助滤剂对赤铁矿精矿助滤实验研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2021.

ZOU J. Study on filtration of hematite concentrate with surfactant filter aids[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[17] 张辰. 煤泥加压脱水效果及滤饼压缩性与孔隙结构调控研究[D]. 太原:太原理工大学, 2022.

ZHANG C. Study on the effect of pressurized dewatering of

coal slurry and the regulation of compressibility and pore structure of filter cake[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology, 2022.

[18] 王东辉. 基于滤饼孔隙结构的煤泥水过滤脱水机理与调控研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2018.

WANG D H. Study on dewatering mechanism and regulation of coal slurry filtration based on filter cake pore structure[D]. Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing), 2018.

[19] 李杉杉, 陈建中, 赵卫. 上限级配对浮选精煤脱水效果影响实验研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11):298-301.

LI S S, CHEN J Z, ZHAO W. Effect of upper limit in gradation on dehydration of flotation clean coal[J]. Coal Technology, 2017, 36(11):298-301.

[20] 赵卫. 基于分形级配对浮选精煤加压脱水影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.

ZHAO W. Study on gradation influence on flotation concentrate positive pressure dewatering based on fractal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[21] 李腾, 陈建中, 沈丽娟, 等. 浮选精煤掺粗对其脱水效果的影响[J]. 矿山机械, 2012, 40(3):85-88.

LI T, CHEN J Z, SHEN L J, et al. Influences of adding coarse coal into flotation of clean coal on dewatering effects[J]. Mining & Processing Equipment, 2012, 40(3):85-88.

[22] 张敬波. 辛置选煤厂浮选精煤掺粗工艺改造[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(S1):112-114.

ZHANG J B. Roughing process modification of clean coal in Xinzhi coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(S1):112-114.

[23] 杨琥, 孙远, 郝朋, 等. 通过改善粒度组成提高浮选精煤脱水效果实验研究[J]. 煤炭工程, 2013, 45(12):106-108.

YANG X, SUN Y, XI P, et al. Experiment study on dewatering effect of floatation clean coal upgraded with improvement of coal particle size composition[J]. Coal Engineering, 2013, 45(12):106-108.

[24] 刘汉刚, 赵正俊. 泉店选煤厂煤泥水处理系统的设计改造[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(4):16-18.

LIU H G, ZHAO Z J. Design and reconstruction of coal slurry treatment system in Quandian coal preparation plant[J]. [Clean Coal Technology](#), 2011, 17(4):16-18.

[25] 周明远, 关杰. 浮选精煤热压过滤干燥脱水机理与脱水动力学研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3):472-475.

ZHOU M Y, GUAN J. Mechanism and kinetics of flotation concentrate thermo-compression filtration-drying dewater-

ing[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3):472-475.

[26] 王振君. 两种不同脱水方式对褐煤结构的影响[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(4):9.

WANG Z J. Experimental study on effects of two different dehydration methods on lignite structure[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(4):9.

[27] 郑星, 欧阳聪聪, 叶子铭, 等. 褐煤热压脱水实验研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6):52-55.

ZHENG X, OU Y C C, YE Z M, et al. Experimental study of hot-pressing dehydration of lignite[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6):52-55.

[28] 赵洪宇, 郑星, 付兴民, 等. 热压脱水对褐煤结构及其热解特性的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5):1165-1173.

ZHAO H Y, ZHENG X, FU X M, et al. Effect of hot pressing dewatering on the structure and pyrolysis characteristics of lignite[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5):1165-1173.

[29] 印杨, 李超, 廖俊杰, 等. 褐煤脱水提质及其物化结构演变的研究进展[J]. 现代化工, 2017, 37(10):56-59+61.

YIN Y, LI C, LIAO J J, et al. Research progress of lignite upgrading and its physical and chemical structure evolution[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(10):56-59+61.

[30] 汪银梅, 罗仙平, 崔振红. 矿物加工过程中脱水设备与方法[J]. 采矿技术, 2009, 9(1):100-102.

WANG H M, LUO X P, CUI Z H. Dewatering equipment and method in mineral processing[J]. Mining Technology, 2009, 9(1):100-102.

[31] 王海雷. 矿物加工过程中的脱水设备与方法[J]. 冶金与材料, 2023, 43(2):93-95.

WANG H L. Dewatering equipment and method in mineral processing[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(2):93-95.

[32] 秦华江, 王恩祥, 赵涛, 等. 钼精矿浓缩脱水工艺研究及应用[J]. 现代矿业, 2016, 32(5):220-222.

QIN H J, WANG E X, ZHAO T, et al. Research and application of concentrating and dewatering technology of molybdenum concentrate[J]. Modern Mining, 2016, 32(5):220-222.

[33] 刘迎春, 李九洲, 张美鸽. 钼精矿脱水新工艺研究及应用[J]. 中国钼业, 2012, 36(1):30-32.

LIU Y C, LI J Z, ZHANG M G. New technology of molybdenum concentrate dehydration and its application[J]. China Molybdenum Industry, 2012, 36(1):30-32.

[34] 郑旭惠. 快开式隔膜压滤机在某厂铜精矿过滤的应用[J]. 铜业工程, 2020(1):1-5.

ZHENG X H. Application of fast-opening membrane filter press in a copper concentrator[J]. Copper Engineering, 2020(1):1-5.

[35] 乔吉波, 邱兆莹, 蒲雪丽. 铅锌混合精矿矿浆脱水工艺中隔膜压滤机效能分析及应用[J]. 云南冶金, 2023, 52(S1):43-47.

QIAO J B, QIU Z Y, PU X L. Efficiency analysis and application of diaphragm filter press in ore pulp dehydration process for lead-zinc blended concentrate[J]. Yunnan Metallurgy, 2023, 52(S1):43-47.

[36] 王洪智. 矾山磷矿磷精矿浆脱水工艺技术优化[J]. 化工矿产地质, 2023, 45(4):368-372.

WANG H Z. Optimization of dewatering technology of Fanshan phosphate concentrate pulp[J]. Geology of Chemical Minerals, 2023, 45(4):368-372.

[37] 汪水清. 高压压滤机在谢桥选煤厂的应用与研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2024(6):57-60.

WANG S Q. Application and research of high pressure filter press in Xieqiao coal preparation plant[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024(6):57-60.

[38] 孙涛, 刘涛, 信延才. 永锦选煤厂煤泥系统优化实践[J]. 煤炭加工与综合利用, 2024(4):13-15.

SUN T, LIU T, XIN Y C. Optimization practice of coal slurry system in Yongjin coal preparation plant[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024(4):13-15.

[39] Zall J, Galil N, Rehbun M. Skeleton Builders for Conditioning Oily Sludge[J]. Journal Water Pollution Control Federation., 1987, 59(7):699-706.

[40] 张昊, 杨家宽, 虞文波, 等. Fenton 试剂与骨架构建体复合调理剂对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10):2742-2749.

ZHANG H, YANG J K, YU W B, et al. Effects of composite conditioner comprising Fenton's reagent and skeleton builders on sewage sludge dewatering performance[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10):2742-2749

[41] 刘鹏, 刘欢, 姚洪, 等. 芬顿试剂及骨架构建体对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(10):146-151.

LIU P, LIU H, YAO H, et al. Influence of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(10):146-151.

[42] 李蕊, 潘昱嵩, 冯泽宇, 等. 液态聚酯/丙二醇提高铁精矿滤饼结构渗透性[J]. 金属矿山, 2023(10):133-139.

LI R, PAN Y H, FENG Z Y, et al. Permeability of iron concentrate filter cake structure improved by liquid

polyether/propylene[J]. *Metal Mine*, 2023(10):133-139.

[43] 田建利, 常庆伟, 李文凤, 等. 微细粒磁赤混合铁精矿助滤剂应用研究[J]. *矿冶工程*, 2017, 37(6):35-37.

TIAN J L, CHANG Q W, LI W F, et al. Performance of filter aids in reducing moisture of micro-fine magnetite-hematite mixed concentrate[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2017, 37(6):35-37.

[44] 颜阳, 黄鲁华. 无机盐与表面活性剂对细粒低阶煤脱水效果的影响[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(6):102-108.

YAN Y, HUANG L H. Effect of inorganic salts and surfactants on dewatering performance of fine low-rank coal slime[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(6):102-108.

[45] 勾善新. 聚铵类有机助滤剂在煤泥水压滤中的应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.

GOU S X. Application of polyammonium organic filter aid in hydraulic filtration of coal slime[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2020.

[46] 任晓汾, 李志红, 刘爱荣, 等. 表面活性剂对浮选精煤脱水的助滤作用[J]. *中国煤炭*, 2018, 44(5):84-88.

REN X F, LI Z H, LIU A R, et al. Filtration aiding effect of surfactants on coal flotation concentrates dehydration[J]. *China Coal*, 2018, 44(5):84-88.

[47] 潘鹏飞, 王长艳, 徐冬林, 等. 赤铁矿精矿助滤剂及其溶液制备方法: 201410744197.X [P]. 2015-03-25.

PAN P F, WANG C Y, XU D L, et al. Hematite concentrate filter aid and solution preparation method: 201410744197.X[P]. 2015-03-25.

[48] 刘杰, 赵静, 邹佳运 等. 聚合氯化铝对贯屯煤泥的助滤机理研究[J]. *煤炭技术*, 2017(9):301-303.

LIU J, ZHAO J, ZOU J Y, et al. Study on filter mechanism of filtering of PAC on Guantun coal slime[J]. *Coal Technology*, 2017(9):301-303.

[49] 夏畅斌, 黄念东, 何绪文. 新型助滤剂对细粒煤和超细粒煤脱水的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2000(3):46-48.

XIA C B, HUANG N D, HE X W. Study on dewatering of fine and ultrafine coal with a new filter aid[J]. *Coal Science and Technology*, 2000(3):46-48.

[50] 杨晓玲, 殷树梅, 杨秀英, 等. 改性聚丙烯酰胺对方解石的助滤性能[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(4):333-336.

YANG X L, YIN S M, YANG X Y, et al. Study on filterability of polyacrylamide and modified polyacrylamide to calcite[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2003, 24(4):333-336.

[51] 庄剑鸣. 聚氧乙烯对细粒浮选精煤的助滤性能与机理[J]. *矿冶工程*, 1998(2):37-39.

ZHUANG J M. Filtration-aiding properties and mechanism of polyethyleneonide in dewatering of fine flotation coal[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1998(2):37-39.

[52] 王趁义. 聚丙烯酰胺铁的合成及其在煤泥助滤脱水中的应用[J]. *工业水处理*, 2007(8):43-44.

WANG C Y. Synthesis of polyacrylamide molysite and its application to the filtration and dehydration of fine coal slime[J]. *Industrial Water Treatment*, 2007(8):43-44.

[53] 李志红, 杜兵, 田毓仁, 等. 化学助滤剂对微细粒煤泥的助滤作用研究[J]. *选煤技术*, 2009(2):9-12+80.

LI Z H, DU B, TIAN Y R, et al. Research on filtration effect of ultra-fine slime with chemical filter-aids[J]. *Coal Preparation Technology*, 2009(2):9-12+80.

[54] 常晓华, 李志红, 樊民强. 煤泥脱水助滤剂的组合与优化[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(3):75-77+82.

CHANG X H, LI Z H, FAN M Q. Combination and optimization of filter aid for coal slime dewatering[J]. *China Coal*, 2019, 45(3):75-77+82.

[55] 毕海怡, 樊民强, 武晋川, 等. 复合药剂强化浮选精煤加压脱水效果研究[J]. *煤炭工程*, 2024, 56(1):183-190.

BI H Y, FAN M Q, WU J C, et al. Enhanced dewatering effect of compound agents in pressurized filtration of flotation clean coal[J]. *Coal Engineering*, 2024, 56(1):183-190.

[56] 雷晓树, 胡金良, 柳骁. APAM 和 CTAB 强化低阶动力煤过滤机理研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(11):167-172.

LEI X S, HU J L, LIU X. Study on the filtration mechanism of APAM and CTAB enhanced low-rank power coal[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(11):167-172.

[57] 闫奋飞, 齐健, 王怀法. 表面活性剂在细粒煤过滤脱水中的作用研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(3):61-65.

YAN F F, QI J, WANG H H. Investigation on impact of surfactants in filtration dewatering[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(3):61-65.

[58] 单忠健, 狄平宽, 晏学民. 精煤脱水与煤泥水净化的新途径[C]. 第六届全国选煤和水煤浆学术会议论文集, 1991: 205-210.

SHAN Z J, DI P K, YAN X M. A new approach to clean coal dewatering and coal slime water purification[C]. *Proceedings of the sixth National Conference on Coal Preparation and Coal Water Slurry*, 1991: 205-210.

[59] 董宪姝, 牛东方, 姚素玲, 等. 褐煤电解过滤脱水效果的研究[J]. *选煤技术*, 2012(2):23-26.

DONG X S, NIU D F, YAO S L, et al. Study on the dewatering effect of lignite by Electrolysis and filtration[J]. *Coal Preparation Technology*, 2012(2):23-26.

[60] 马倩倩. 基于电化学预处理对细粒煤脱水效果的实验研

究[J]. *煤矿现代化*, 2021, 30(4):107-109.

MA Q Q. Experimental study on dewatering effect of fine coal based on electrochemical pretreatment[J]. *Coal Mine Modernization*, 2021, 30(4):107-109.

Research Progress on Influencing Factors of Filtration and Dewatering of Pulp and Enhancement of Filtration Performance

CHANG Baoyu¹, LI Shulei^{2,3}, GAO Yujie¹, TIAN Cheng¹, XU Shuai⁴

(1.Xiadian Mine, Shanxi Lu'an Mining Group Cilinshan Coal Co., Ltd., Changzhi, Shanxi 046605, China; 2.State Key Laboratory of Green Development for Coking Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3.National Engineering Research Center for Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4.Wuyang Mine, Shanxi Lu'an Environmental Protection and Energy Development Co., Ltd., Changzhi, Shanxi 048026, China)

Abstract: Filtration is widely used in the dewatering of concentrates and tailings in coal preparation plants and mineral processing plants, and its operation efficiency is crucial to product quality and high-performance operation of processing plants. Improving the filtration efficiency of pulp is an important topic in the field of mineral processing both domestically and internationally. In this paper, three key factors, slurry physicochemical properties, filter media, and filtration driving forces, were systematically discussed, and a comprehensive review of recent advancements in physical and chemical enhancement techniques during the dewatering process were provided. Furthermore, the study proposes principal development directions and future trends for pulp filtration and dewatering technology.

Keywords: mineral processing engineering; filter; pulp properties; filter medium; hot pressing; electrochemistry; filter aid