doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.026

助滤剂对细粒矿物过滤脱水效能与机理研究进展

郝贝宁[1,2,3],赵 冰[1,2,3],刘 杰[1,2,3],朱一民[1,2,3],
高 鹏[1,2,3],袁 帅[1,2,3]

(1. 矿物加工科学与技术全国重点实验室,北京 102628;
2. 东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819;
3. 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心,沈阳 110819)

摘 要: 细粒矿物受限于颗粒细微、表面能高、易水化等特有属性,其固液分离一直是矿物加工领域的难题。添加助滤剂作为一种经济、简便且不改变现有工艺流程的技术手段,可显著提升细粒矿物的过滤脱水效能。本文在现有研究上,系统地综述助滤剂的分类体系、效能评价指标、作用机理及复合助滤剂的协同效应。按分类体系划分,助滤剂主要分为四大类别:絮凝剂型(无机、天然及合成高分子)、表面活性剂型(阳离子、阴离子、非离子)、无机电解质类和颗粒型。在科学效能评价方面,通常选取过滤速率、滤饼含水率、平均质量比阻、滤饼孔隙结构特征及滤液性质等作为核心量化指标。从机理层面剖析,主要包含以下五点:絮凝架桥与颗粒团聚效应、滤饼渗透性的改善、电性中和与双电层压缩、表面疏水化改性、破坏水化膜并降低毛细管力,其中,特别是复合助滤剂体系,通过时序协同与空间协同使用,能够实现优于单一助滤剂的“1+1>2”的增效目标。絮凝剂-表面活性剂协同体系及多元协同体系的使用受到较多关注,未来应致力于深化助滤剂“分子结构-宏观性能”的研究,并着力开发可生物降解、环境友好的新型绿色助滤剂,以推动细粒矿物高效脱水技术的可持续发展。

关键词: 助滤剂;细粒矿物;固液分离;絮凝剂;表面活性剂;复合助滤剂

中图分类号: TD926 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0298-10

Research Progress on Filtration Dehydration Efficiency and Mechanism of Fine-grained Minerals by Filter Aids

Hao Beining[1,2,3], Zhao Bing[1,2,3], Liu Jie[1,2,3], Zhu Yimin[1,2,3], Gao Peng[1,2,3], Yuan Shuai[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China;
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
3. National-local Joint Engineering Research Center of High-efficient Exploitation Technology for Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, China)

Abstract: Fine-grained minerals are constrained by inherent characteristics including tiny particle size, high surface energy and strong hydration tendency, and their solid-liquid separation has long been a tough challenge in mineral processing. As a cost-effective, facile technical approach that requires no modification to the existing process flow, the addition of filter aids can drastically boost the filtration and dewatering performance of fine-grained minerals. On the basis of previous studies, this paper systematically reviewed the classification system, performance evaluation indices, action mechanisms of filter aids, as well as the synergistic effects of composite filter aids.Classified by system, filter aids fall into four major categories: flocculant type (inorganic, natural and synthetic polymers), surfactant type (cationic, anionic, nonionic), inorganic electrolyte type and particle type. For performance evaluation, filtration rate, filter cake moisture content, average mass specific resistance, pore structural characteristics of filter cake and filtrate properties were commonly adopted as core quantitative indicators. Mechanistic analysis revealed five primary action pathways: flocculation bridging and particle agglomeration,

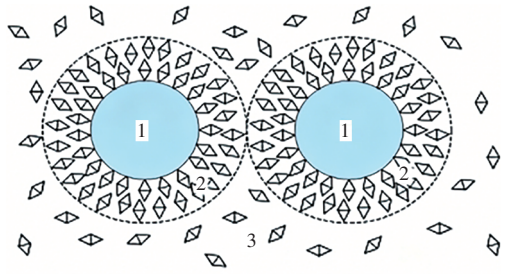
收稿日期: 2026-05-28
基金项目: 深地国家科技重大专项项目(2024ZD1004001)
作者简介: 郝贝宁(2001—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事难过滤矿物药剂的高效开发与利用。
通信作者: 赵 冰(1990—),女,辽宁沈阳人,博士,副教授,主要从事大宗固废无害化、资源化处理,以及复杂难选矿产资源、绿色浮选药剂开发与利用研究。

enhanced filter cake permeability, electric neutralization and electric double layer compression, surface hydrophobic modification, and hydration film disruption accompanied by reduced capillary force. Notably, composite filter aid systems rely on temporal and spatial synergy to deliver a "1+1>2" synergistic performance superior to single-component filter aids.Flocculant-surfactant composite systems and multi-component synergistic systems have attracted extensive research attention. Future research shall deepen investigations into the "molecular structure-macroscopic performance" correlation of filter aids and focus on developing novel biodegradable, eco-friendly green filter aids, so as to facilitate the sustainable advancement of high-efficiency dewatering technologies for fine-grained minerals.

Key words: filter aid; fine-grained minerals; solid-liquid separation; flocculant; surfactant; composite filter aid

0　引言

随着矿产资源的大规模开发和入选原矿品位的下降，处理低品位、组成复杂的矿石已成为必然趋势。由于矿石中目标矿物嵌布粒度细，为实现有用矿物的充分单体解离，精矿产品粒度变得越来越细，细粒及微细粒矿物产量不断增加。其颗粒细微(通常指粒径小于0.074 mm，其中20～74 μm为细粒区，小于20 μm为微细粒，小于10 μm为超细粒)、比表面积大、表面能高、易水化等特性，导致过滤脱水过程易形成高比阻、高含水率、高可压缩性滤饼，严重影响脱水效率和后续作业[1-2]，细粒矿物脱水成为矿物加工领域公认的技术瓶颈。细粒矿物脱水时颗粒间的表面水化作用力、静电排斥力与毛细管力占主导(图1[3]、图2)，传统机械力难以有效克服[4]。



1—固体颗粒；2—水化膜；3—体相水。

图1　微细粒表面水化作用示意图[3]

Fig. 1　Schematic diagram of hydration on micro-fine particle surface[3]

近年来，国内外学者围绕细粒矿物脱水开展了大量研究。在设备与工艺方面，超高压压滤、深度隔膜压滤、真空过滤-热干燥耦合等装备快速迭代，显著提升了脱水效率[5-6]。在机理研究方面，研究视角已从宏观过滤速率、滤饼水分等指标逐步深入到界面水化膜弱化、双电层调控、颗粒间作用力、滤饼结构演化等微观机制。在助滤剂研究方面，添加化学助滤剂

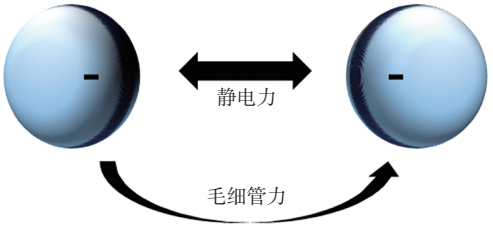


图2　颗粒表面静电力、毛细管力示意图

Fig. 2　Schematic diagram of electrostatic force and capillary force on particle surface

是强化细粒矿物过滤脱水最为经济、简便的技术途径之一[7]，它通过改变矿物颗粒表面特性、调节颗粒间相互作用、优化滤饼结构等方式，能够显著提升过滤速率、降低滤饼水分[8]，国内外学者对助滤剂的研究正逐步由单一药剂使用向复合体系发展，涌现出多种复配方案。尽管现有成果丰富，但仍存在明显不足。本文在上述研究基础上，构建"分类-评价-机理-协同"四位一体的综述框架，进行细粒矿物脱水的系统性归纳；重点解析复合助滤剂的协同机制，将协同效应从"定性有效"推向"过程可解释"；指出当前定量构效关系研究的短板，并提出未来应聚焦"分子结构-宏观性能"的构效关系研究，为高效助滤剂的理性设计提供方向。本文从以上几个方面进行综合评述，为助滤剂应用于细粒矿物脱水方向提供系统性参考。

1　助滤剂的分类

一般而言，任何能够增进过滤速度、减少滤饼含水量的添加剂，均可统称为助滤剂。根据化学组成和作用方式，应用于细粒矿物脱水的助滤剂可分为以下主要类型[9]。

1) 絮凝剂型助滤剂

助滤剂中的絮凝型种类主要包含三大类：无机絮凝剂、天然高分子絮凝剂，以及人工合成高分子絮凝剂[10]。

无机絮凝剂常见药剂涉及含铁、铝、镁的化合物，它们通过促进溶液中颗粒的凝聚过程来提升助滤效果。尽管这类药剂的获取成本相对较低，但其应用对工作环境温度及pH值等条件有严格要求，且可能对设备与生态环境产生一定的副作用。无机高分子絮凝剂包含聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铝(PAS)等，由于其分子量大、结构链长，加之制备原料易于获取、生产成本低廉、对环境影响较小，无机高分子絮凝剂在固液分离工艺中逐步取代了无机絮凝剂的地位[11]。

天然高分子絮凝剂源于自然界，主要是淀粉、树胶及其改性物等。当前，应用最为广泛的主要是人工合成的聚丙烯酰胺(PAM)及其衍生物[12]。聚丙烯酰胺是一类高分子聚合物的总称，分为非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)、阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)、阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)与两性型聚丙烯酰胺。其具有良好的可溶性与絮凝作用，分子量极大、分子链长、可针对离子类别进行定制合成，通过调整分子量和离子度，可实现对絮体尺寸、沉降速率和滤饼水分的精准调控，特别适用于细粒矿物等高难度体系的脱水。康长科等[13]深入探讨了不同离子型PAM对絮凝沉降行为的调控效能，分析了不同类型PAM在吸附能和氢键形成等界面行为方面的差异，系统阐释了分子层面的吸附行为决定宏观沉降效果的内在机制。Nasser等[14]研究高岭土悬浮液的絮凝沉降行为时发现，在相同pH条件和最佳聚合物浓度下，阴离子型PAM形成的絮体尺寸更大、沉降速率更高，而阳离子型PAM产生的絮体压缩性更强，表明不同类型PAM的最佳絮凝效果由电性中和与架桥作用的平衡共同决定。

2)表面活性剂型助滤剂

表面活性剂按离子类型可分为阳离子、阴离子型和非离子型[15]。常见的阳离子型表面活性剂大多是脂肪胺类化合物，具体如伯胺盐型(形如RNH_3^+)、仲胺盐型($R_2NH_2^+$)、叔胺盐型(R_3NH^+)与季铵盐型(R_4N^+)等。在细粒铁精矿的固液分离工艺中，十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)常作为试验药剂被用来提升过滤效能。相比之下，胺盐类阳离子表面活性剂的研究应用相对较少，其主要限制因素在于相对较高的成本削弱了其在工业实践中的广泛应用性和经济可行性[16]。邹昀[17]选用CTAB等共五种表面活性剂开展真空过滤试验。在最佳用量条件下，五种助滤剂均能使滤饼比阻和含水率降低，其中表面活性剂CTAB在改善滤饼比阻方面最为优异。

阴离子型表面活性剂凭借其广泛的来源渠道和相对低廉的成本而备受青睐。该类别中，占据主导地位的品类主要涵盖琥珀酸磺酸盐(RSO_3^-)及其系列衍生物、羧酸盐类($RCOO^-$)、磷酸酯盐类(RPO_4^{2-})以及硫酸酯盐类(RSO_4^-)等。任晓汾等[18]选用3种不同类型的表面活性剂对浮选精煤进行脱水助滤，均起到一定助滤作用，其中阴离子型十二烷基苯磺酸钠(SDBS)降低了液体的表面张力，改善了颗粒表面的疏水性，减小了过滤阻力，降低了滤饼水分。Habibi等[19]研究结果表明，在铁精矿矿浆脱水过程中，分别加入十二烷基硫酸钠(SDS)、聚乙二醇4000(PEG4000)、十二烷基醚硫酸钠(SLES)和十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)这四种表面活性剂，SDS和SLES两种阴离子表面活性剂对降低滤饼水分有显著效果，滤饼平均水分降低。

非离子型表面活性剂，主要代表是聚氧乙烯醚($RO(CH_2CH_2O)_nH$)及其衍生物、氨基酸型、多元醇酯类、酰胺类、嵌段聚醚类等，这种表面活性剂起泡乳化能力强，性质比较稳定，可以降低溶液表面张力，增大矿物颗粒表面疏水性，降低滤饼水分，加快过滤速度[20]。Li等[21]研究考察了两种典型的APEO非离子表面活性剂(OP-10、TX-10)对煤表面润湿性的调控规律，通过测量发现后者亲水性更强，而烷基侧链较短的OP-10具有更强的吸附能力和更优的表面改性效果，揭示了APEO在矿物表面的吸附机制。Vaziri等[22]研究揭示了使用一种表面活性剂作为所有矿物的脱水剂，可能无法实现经济高效的脱水过程，针对不同HLB值选用相应表面活性剂能实现最佳脱水效果，可加快成饼时间、降低产品含水量。

3)无机电解质类助滤剂

无机盐类助滤剂如十八水合硫酸铝(ASO)、明矾等，会在解离作用下产生大量离子，对颗粒的电性具有中和作用，能有效压缩矿物表面的双电层，减小其分散斥力[23-24]，减弱水分子与矿物颗粒之间的作用力，增大絮团粒径，降低滤饼松散性，从而更易于脱水。谭兴富等[25]对多种无机盐类助滤剂的脱水效果进行了试验分析，结果表明，无机盐类助滤剂的加入能够有效提高过滤效率，水分脱除效果显著。这类助滤剂成本较低，显著降低热干燥能耗，但单独使用时效果往往有限，需要与其他药剂复合使用[26]。

4)颗粒型助滤剂

颗粒型助滤剂以硅藻土为代表，包括珍珠岩、石棉、纤维素、炭等，利用其多孔结构和吸附性能，在过滤介质表面形成预涂层，截留细粒矿物[27]。硅藻土经焙烧、助熔剂处理后，其过滤性能可得到显著提升[28]。颗粒型助滤剂常与其他化学助滤剂配合使用，

实现“物理＋化学”双重强化。如兖矿能源2025年授权的发明专利中[29]，将十二烷基三甲氧基硅烷改性的疏水沸石颗粒与聚丙烯酰胺、表面活性剂复配，通过刚性骨架与化学调控的协同作用高效脱除细颗粒煤泥中的水分。但是单独使用这类助滤剂过滤微细粒矿物时，会导致严重的滤饼堵塞，效果往往适得其反，不仅过滤效率低下，还增加运营成本[30]。

2　助滤效能的评价指标

评价助滤剂对细粒矿物过滤效能的影响，通常采用以下核心指标。

1）过滤速率：指单位时间内通过单位过滤面积所获得的滤液体积，计算方法如式(1)所示。

$$v=\frac{V}{Ft} \tag{1}$$

式中，v表示过滤速度；V为滤液体积；F为过滤面积；t为过滤时间。

2）滤饼水分：反映脱水程度的直接指标，是表征过滤效果的重要手段之一，计算方法如式(2)[31]所示。

$$W=\frac{M_1-M_2}{M_1}\times 100\% \tag{2}$$

式中，W表示滤饼水分；M_1为湿滤饼的质量；M_2为干滤饼的质量。

3）滤饼的平均质量比阻：每单位质量的干滤饼对过滤过程中产生的平均阻力大小。其在理论研究中是一个十分关键的评价指标，根据Ruth理论[32]，恒压过滤时其公式如式(3)所示。

$$\frac{t}{V}=\frac{\mu\alpha C}{2A^2\Delta P}V+\frac{\mu R_m}{A\Delta P} \tag{3}$$

通过直线斜率$K=\frac{\mu\alpha C}{2A^2\Delta P}$，可计算：

$$\alpha=\frac{2A^2\Delta PK}{\mu C} \tag{4}$$

式中，V为滤液的体积；t为过滤的时间；A为过滤面积；ΔP为过滤的压力；μ为滤液的黏度；R_m为过滤介质阻力；C表示单位体积滤液中所对应的干滤饼质量；α为平均质量比阻。

4）滤饼孔隙结构：包括滤饼的孔隙率、孔径分布，此类指标直接影响过滤性能。低场核磁共振(L-FNMR)技术广泛用于孔隙表征，其可以快速无损地检测滤饼孔隙结构。

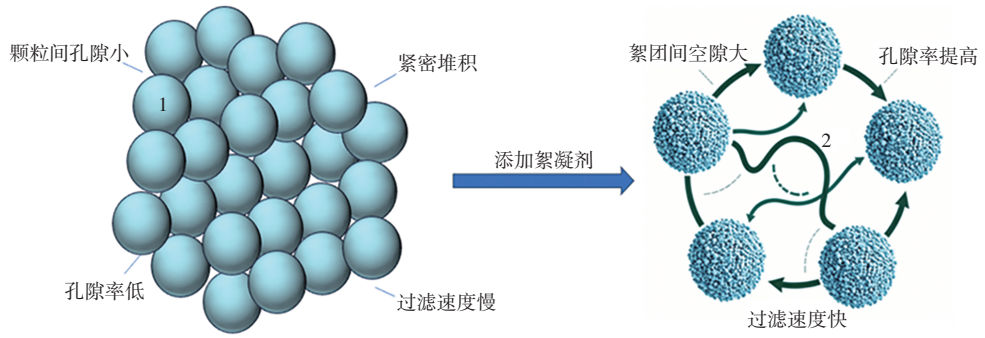
5）滤液性质：包括滤液表面张力、浊度等，可反映助滤剂对水分性质和固相流失的影响。

3　助滤剂的作用机理

细粒矿物的过滤过程本质上是一个复杂的多尺度物理化学问题。添加助滤剂通过对界面作用与微观结构进行干预和调控，从而实现宏观过滤性能的显著提升，其中涉及颗粒表面性质、溶液化学环境、滤饼结构等多个维度的协同作用。基于现有的学术研究，其核心作用机理可以归纳为以下几个方面。

3.1　絮凝架桥与颗粒聚集

絮凝剂型助滤剂主要通过高分子链的吸附与架桥作用，将微细颗粒连接成较大的絮团。高分子絮凝剂(如APAM、NPAM)具有长的分子链，其活性基团可吸附在多个颗粒表面，在颗粒间形成“桥梁”，将分散的细粒连接成絮状聚集体[33]，絮体的形成改变了滤饼的结构特征，较大的絮体颗粒构建滤饼骨架时，颗粒间孔隙率增大，过滤速率相应提升(图3)。Fan等[34]在研究中采用聚羧酸钠与氧化钙作为复合助滤剂对超细煤泥进行脱水研究，聚羧酸钠通过吸附分散作用有效破坏了煤颗粒间的静电吸引或氢键桥接结构，显著降低了颗粒间作用力和滤饼表观黏度；而氧化钙水化生成氢氧化钙后构建了结构骨架，增强了滤饼的孔隙率。当两种药剂协同使用时，滤饼的表观黏度明显下降、孔隙结构显著改善，最终滤饼含水率大幅降低。



1—矿物颗粒；2—长链高分子絮凝剂。

图3　添加絮凝剂前后对比图

Fig. 3　Comparison charts before and after adding flocculant

然而絮凝架桥效果受分子量、电荷密度、药剂用量等关键因素影响。高宇等[35]系统探讨了不同试验条件对絮体形成的影响规律。研究表明絮凝剂的最佳投加量并非固定值,而是高度依赖于参数的变化,用量过低不足以形成有效架桥,用量过高则可能导致颗粒表面过度覆盖而再稳定。Ren 等[36]制备了三种疏水改性共聚物(烷基分别为乙基、丁基和辛基),从分子设计的角度对药剂的深层机理进行了探究,说明絮凝剂中的疏水基团能增强共聚物的絮凝性能,且疏水烷基链长度与絮凝性能呈正相关,烷基链越长,絮凝效果越好。

3.2 电性中和与双电层压缩

细粒矿物表面通常带有电荷,在水中形成双电层结构,当相邻颗粒的双电层相互重叠时,静电排斥力成为颗粒分散稳定性的主导因素,严重阻碍颗粒的自发聚集与过滤脱水。

采用密度泛函理论(DFT)和分子动力学(MD)模拟,可以考察助滤剂在矿物表面吸附行为以及它们的相互作用机制[37]。研究表明,阳离子型助滤剂(如 CTAB 等)带正电荷,可吸附于带负电的矿物表面,中和表面电荷,降低 Zeta 电位。复合助滤剂 CFA 可使矿物颗粒 Zeta 电位上升,显著减弱颗粒间静电排斥。无机电解质类助滤剂(如 ASO、PAC 等)通过提供高价阳离子(Al^{3+}等),压缩颗粒表面双电层厚度,降低静电排斥势垒,促进颗粒聚集。电性中和作用的直接效果是破坏颗粒分散状态,形成松散团聚体,从而改善滤饼的渗透性[11]。黄缓缓[31]研究表明,十二烷基三甲基溴化铵和苄基三甲基氯化铵因亲水基均为带正电荷的季铵基,它们通过正电荷与带负电的矿物表面发生离子配对吸附(图 4),亲水性基团规则地吸附在固体颗粒的表面,而疏水基团延伸到水相中,在颗粒表面形成疏水覆盖层,增强颗粒表面的疏水性。

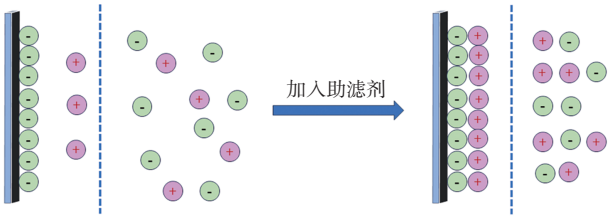


图 4 离子配对吸附图

Fig. 4 Ion pairing adsorption diagram

3.3 表面疏水改性

表面活性剂类助滤剂的核心作用机理就是改变矿物颗粒表面的润湿性,降低滤饼中毛细管水的含量。其作用机制:一方面,细粒矿物表面因羟基等极性基团的存在而形成结合紧密的水化膜,其中水分子通过氢键等作用力被牢牢束缚。表面活性剂的吸附不仅降低了固-液界面的表面自由能,更重要的是对水化膜结构产生了破坏效应,疏水基团向外伸展形成疏水覆盖层(图 5),迫使水化膜减薄甚至破裂,使原本被束缚在颗粒表面的吸附水得以释放剥离[38]。另一方面,针对以毛细管水形态赋存于滤饼孔隙结构中的水分,表面活性剂可降低滤液的表面张力,减小毛细管力,使滤饼水分更易在机械力作用下脱除[39]。但需注意的是,某些表面活性剂(如 SDBS)虽然降低表面张力效果显著,但在实际应用中可能因起泡等问题导致过滤时间延长[11]。Sun 等[40]研究表明,通过在羟肟酸表面活性剂中引入硫醚桥联基团,成功合成了辛硫基乙基羟肟酸(OTHA)。硫醚基团固有的疏水性进一步改善了矿物表面的疏水改性效果。

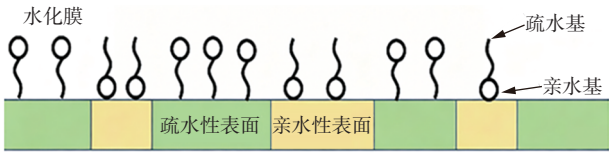


图 5 表面活性剂与矿物表面吸附示意图[38]

Fig. 5 The adsorption diagram of surfactant and mineral surface[38]

3.4 复合助滤剂协同作用机理

3.4.1 时序协同与空间协同作用

复合助滤剂并非单一组分效能的简单叠加,其核心优势源于组分间产生的深度协同作用。这种协同效应通常可从两个维度加以解析:时序协同是指不同药剂按照过滤工艺流程的先后次序发挥各自功能,前者为后者创造有利条件;空间协同是指不同药剂在滤饼的不同空间位置针对性发挥作用,通过多维度配合来实现整体性能的优化。

在时序协同方面,PAC 作为预处理药剂先发挥作用,通过提供高价正离子迅速中和颗粒表面负电荷,压缩双电层使颗粒脱稳凝聚,然后再加 PAM 形成大絮团,通过长分子链的吸附架桥作用将已脱稳的颗粒进一步连接成大尺寸絮团。这就是常见的“无机+有机”复合絮凝模式,这类方案常用于细粒矿物的脱水过程[11]。在空间协同方面,以多孔骨架颗粒(如硅藻土、疏水改性沸石)与化学助滤剂复合使用的体系最为典型[28]。化学助滤剂优先作用于微观层面,改善颗粒表面性质与絮凝状态,而颗粒型助滤剂则在滤饼的宏观尺度上构建预涂层或多孔骨架。这种明确

的空间分工，使复合体系能够实现对不同尺度下过滤阻力的精准调控，从而显著提升整体过滤效能。

3.4.2　絮凝剂-表面活性剂协同作用

絮凝剂与表面活性剂的复合使用是目前最受关注的方向之一[41]。刘丽艳等[42]的研究结果表明，丁二酸二异辛酯磺酸钠(OT)作为一种高效的表面活性剂，有利于毛细水的脱除，但当使用CPAM与OT在适当条件下复合使用，可使过滤速率进一步提高，滤饼含水率降低。平安等[43-44]针对非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)与十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)在煤岩组分脱水中的协同作用进行研究，结果表明NPAM与DTAB的组合体系在降低滤饼水分方面表现最佳，其协同增效的机理主要涵盖四个方面：一是产生新的吸附形态；二是有效改善颗粒润湿性；三是促进颗粒团聚与凝聚；四是增加滤饼平均孔径和孔隙面积。Ejtemaei等[45]系统研究了表面活性剂-絮凝剂混合物的协同效应。研究发现，混合阴离子表面活性剂-絮凝剂对脱水参数无积极影响；而阳离子表面活性剂-絮凝剂混合物相比单一絮凝剂来说，脱水效率更高，滤饼孔隙率得到改善，且具有经济效益。

3.4.3　多元协同体系

助滤剂设计正从二元复合向三元乃至多元协同演进。Wu等[46]采用阳离子表面活性剂十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)、聚二烯丙基二甲基氯化铵(PDADMAC)与非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)构建了三元复合试剂体系进行絮凝沉降试验。研究结果表明，CTAC通过疏水改性降低颗粒表面亲水性；PDADMAC通过电中和与空间位阻效应削弱表面羟基与水分子的氢键作用；NPAM的酰胺基与矿物硅羟基形成分子间氢键增强絮体结构。三种药剂各司其职、梯次发挥作用，在协同中实现了多重屏障的突破。Tang等[47]使用废弃大豆油与阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)对煤气化细渣进行脱水试验，在最优用量下，样品的含水率与平均质量比阻均显著降低。当大豆油吸附到颗粒上后，增大了组分之间的表面润湿性差异，促进了二者的分离，使滤饼表面和孔隙更加清洁，降低了比表面积和孔容，阻碍了水分在孔隙中的滞留；CPAM则促进了颗粒絮凝，形成了平均孔径增大的新型滤饼结构，改善了渗透性与脱水效率。

时序协同与空间协同是从不同维度进行划分，前者强调不同药剂在时间顺序上的先后配合，后者关注药剂在滤饼不同空间位置的分工；而絮凝剂-表面活性剂协同和多元协同则是从组合类型进行的划分，其中前者特指两类药剂的二元复配，后者指三种及以上组分的多元体系。这两类划分并非互斥的并列关系，而是存在交叉与层次：絮凝剂-表面活性剂协同或多元协同中，往往同时蕴含了时序协同与空间协同，因此后者是前者的具体实现形式，前者则为后者的作用机制提供了更细致的解释框架(如图6所示)。实际过滤过程中，单一类型助滤剂往往难以兼顾过滤速率和滤饼水分的双重优化，复合助滤剂可以通过多种组分的协同作用，实现“1+1>2”的助滤效果，合理的药剂组合可以进一步提升过滤效果。所以上述各类机理往往同时发生、相互影响[48]。

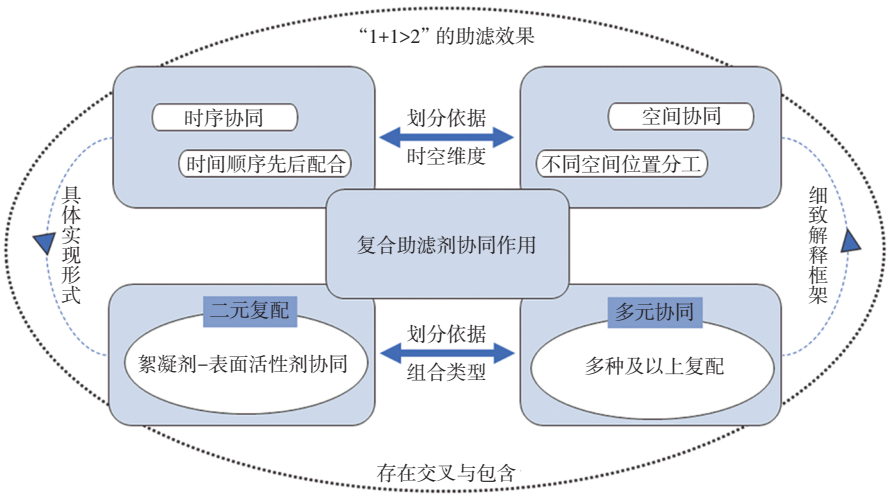


图6　复合助滤剂协同作用机理图

Fig. 6　Synergistic mechanism of composite filter aid

4 结论与展望

助滤剂作为提升细粒矿物固液分离效率的关键技术手段被广泛使用。本文通过综述助滤剂对细粒矿物脱水的研究进展,将其主要分为四大类型:絮凝剂型、表面活性剂型、无机电解质类和颗粒型。在效能评价方面,需综合考虑过滤速率、滤饼水分、滤饼孔隙结构等多维度指标。在作用机理层面,助滤过程主要包括双电层压缩与电荷中和、絮凝架桥以及矿物表面疏水改性等多种核心机制。在实际的过滤体系中,上述多种机理往往耦合发生、相互制约。不同助滤剂各有适用条件与局限性,需根据细粒矿物特性优化选型与复配,所以其中复合助滤剂的使用受到较多关注,但值得注意的是,本综述所涵盖的现有研究以实验室规模为主,工业应用验证案例有限,其长期运行经济性尚未得到充分评估。

当前新型助滤剂的研发进程相对迟缓,这在一定程度上掣肘了我国细粒矿物脱水技术的整体进步,未来研究可从以下几个方面展开:

1)未来应立足于对助滤机理的深刻认知,重点聚焦于“分子结构-宏观性能”的构效关系研究,推动高效新型及复合型药剂的发展。

2)复合助滤剂的长期运行经济性(包括药剂成本、能耗变化、维护费用及综合效益)尚未得到充分评估,需建立全生命周期成本模型,为实践推广提供决策依据。

3)顺应绿色化工发展理念,致力于开发兼具可生物降解性、低毒性及环境友好特性的新型助滤剂,同时探索利用废弃生物质或工业副产物制备低成本、高性能助滤剂的可行路径。

参考文献

[1] 来庆腾. 组合助滤剂强化低阶煤泥过滤机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
Lai Qingteng. Study on the filtration mechanism of low rank coal slime enhanced by combined filter aid[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[2] 胡筱敏,罗茜,王常任. 大分子表面活性剂的助滤行为与机理[J]. 矿冶,1996,5(1):40-45,80.
Hu Xiaomin, Luo Qian, Wang Changren. Filtration-aid behaviour and mechanism of polymeric surfactants[J]. Mining and Metallurgy, 1996, 5(1): 40-45, 80.

[3] 彭陈亮,闵凡飞,赵晴,等. 微细矿物颗粒表面水化膜研究现状及进展综述[J]. 矿物学报,2012,32(4):515-522.
Peng Chenliang, Min Fanfei, Zhao Qing, et al. A review: research status and progress on hydration layers near fine mineral particles[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(4): 515-522.

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

[5] 李红弟. STC超高压压滤机在燕子山洗煤厂的应用[J]. 山西焦煤科技,2024,48(4):19-20,24.
Li Hongdi. Application of STC ultra-high pressure filter press in Yanzishan coal washing plant[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2024, 48(4): 19-20, 24.

[6] 杜建鹏,郭伟,卢宇飞. 煤化工带液废固低温真空脱水干化一体化技术研究及应用分析[J]. 广东化工,2021,48(13):305-307.
Du Jianpeng, Guo Wei, Lu Yufei. Research and application analysis of low temperature vacuum dewatering and drying integrated technology for solid waste with liquid in coal chemical industry[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(13): 305-307.

[7] 任伟鹏,董宪姝,魏文珑,等. 选煤工业中常见助滤剂种类及其应用[J]. 中国煤炭,2009,35(4):94-97.
Ren Weipeng, Dong Xianshu, Wei Wenlong, et al. Common filtration-aiding kinds and its action principle in the coal preparation industry[J]. China Coal, 2009, 35(4): 94-97.

[8] 林海,松全元. 细粒悬浮液固液分离药剂的研究与发展[J]. 国外金属矿选矿,1996(9):21-25.
Lin Hai, Song Quanyuan. Research and development of solid-liquid separation agents for fine suspension[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1996(9): 21-25.

[9] 胡佛明,苏康,沈远海,等. 助滤剂降低铁精矿滤饼水分的试验研究[J]. 现代矿业,2024,40(10):147-149,153.
Hu Foming, Su Kang, Shen Yuanhai, et al. Experimental study on reduction of filter cake moisture in iron ore concentrate by filter aids[J]. Modern Mining, 2024, 40(10): 147-149, 153.

[10] 崔龙栓,张润身. 助滤剂降低铁精矿滤饼水分试验[J]. 现代矿业,2016,32(3):96-97.
Cui Longshuan, Zhang Runshen. Experiment on reducing water content of iron concentrate filter cake with filter aid[J]. Modern Mining, 2016, 32(3): 96-97.

[11] 李新祥,吕瑞祥,石萌,等. 复合助滤剂强化超细煤泥压滤脱水试验研究[J]. 煤矿现代化,2025,34(6):99-105,112.

Li Xinxiang, Lü Ruixiang, Shi Meng, et al. Study on enhanced dewatering of ultrafine coal slurry using composite filter aids in pressure filtration[J]. Coal Mine Modernization, 2025, 34(6): 99-105, 112.

[12] 余长军. 细粒矿物脱水技术研究现状及发展趋势[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(2): 1-4.
Yu Changjun. Present situation and development tendency of fine mineral dewatering technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(2): 1-4.

[13] 康长科, 崔宝玉, 沈岩柏, 等. 不同离子型PAM调控赤铁矿絮凝沉降的跨尺度机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(5): 1152-1166.
Kang Zhangke, Cui Baoyu, Shen Yanbai, et al. Cross-scale mechanism of hematite flocculation and sedimentation regulated by different ionic PAMs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(5): 1152-1166.

[14] Nasser M S, James A E. The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions[J]. Separation and Purification Technology, 2006, 52(2): 241-252.

[15] 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, 41(4): 202-208.
Wang Yunfei, Li Hongliang, Dong Xianshu, et al. Study on effect of illite on the filtration mechanism of coal slime water[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 41(4): 202-208.

[16] 黄鲁华. 表面改性对细粒低阶煤脱水效果影响的试验研究[D]. 徐州：中国矿业大学, 2019.
Huang Luhua. Experimental study on the effect of surface modification on the dewatering effect of fine-grained low-rank coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[17] 邹昀. 表面活性剂型助滤剂对赤铁矿精矿助滤试验研究[D]. 武汉：武汉科技大学, 2021.
Zou Yun. Experimental study on surface active filter aid for hematite concentrate[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.

[18] 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 Xiaofen, Li Zhihong, Liu Airong, et al. Filtration-aiding effect of surfactants on coal flotation concentrates dehydration[J]. China Coal, 2018, 44(5): 84-88.

[19] Habibi Nejad S, Ghaffarinejad S, Rezazadeh R, et al. Effect of surfactants on the vacuum filtration in the dewatering process from iron concentrate slurry[J]. Iranian Chemical Engineering Journal, 2023, 22(129): 39-49.

[20] 赵珂, 刘生玉, 张素红. 表面活性剂结构对细粒煤过滤脱水的影响及其机理研究[J]. 日用化学工业, 2022(9): 951-959.
Zhao Ke, Liu Shengyu, Zhang Suhong. Effect of surfactant structure on filtration dewatering of fine coal and its mechanism research[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2022(9): 951-959.

[21] Li Jiajun, Kong Shaoqi, Yan Guochao, et al. Adsorption mechanism of alkylphenol ethoxylates surfactants (APEO)on anthracite surface: a combined experimental, DFT and molecular dynamics study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 396: 124030. DOI: 10. 1016/j. molliq. 2024. 124030.

[22] Vaziri Hassas B, Karakaş F, Çelik M S. Ultrafine coal dewatering: relationship between hydrophilic lipophilic balance(HLB)of surfactants and coal rank[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 133: 97-104.

[23] 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 Yang, Huang Luhua. Effect of inorganic salts and surfactants on dewatering performance of fine low-rank coal slime[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 102-108.

[24] Mamghaderi H, Aghababaei S, Gharabaghi M, et al. Investigation on the effects of chemical pretreatment on the iron ore tailing dewatering[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 625: 126855. DOI: 10. 1016/j. colsurfa. 2021. 126855.

[25] 谭兴富, 卢军. 无机盐类助滤剂在煤泥压滤中的应用研究[J]. 中国煤炭, 2023, 49(2): 109-114.
Tan Xingfu, Lu Jun. Study on the application of inorganic salt filter aid in slime filtration[J]. China Coal, 2023, 49(2): 109-114.

[26] 李晓强, 任建宾, 张东利. 复合助滤剂在煤泥压滤中的研究与应用[J]. 山西化工, 2021, 41(3): 138-140.
Li Xiaoqiang, Ren Jianbin, Zhang Dongli. Study and application of composite filter aid in slime pressure filtration[J]. Shanxi Chemical Industry, 2021, 41(3): 138-140.

[27] 王月, 都丽红, 王士勇, 等. 硅藻土助滤剂助过滤行为的研究[J]. 化工装备技术, 2010, 31(3): 23-25.
Wang Yue, Du Lihong, Wang Shiyong, et al. Study on filtration behavior of diatomite filter aid[J]. Chemical Equipment Technology, 2010, 31(3): 23-25.

[28] 任子杰. 利用硅藻土选矿精土制备助滤剂试验研究[D]. 武汉：武汉理工大学, 2012.

Ren Zijie. Experimental study on the preparation of filter aid by using diatomite concentrated soil[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.

[29] 杨再君, 史博文, 骆建营, 等. 一种细颗粒煤泥脱水用组合助滤剂及其制备方法和应用: CN202411520168.5[P]. 2024-12-31.
Yang Zaijun, Shi Bowen, Luo Jianying, et al. A combined filter aid for dewatering of fine coal slime and its preparation method and application: CN202411520168.5[P]. 2024-12-31.

[30] 张杰, 胡杰, 肖峰, 等. 助滤剂在高黏度可压缩物料过滤中的应用[J]. 化工机械, 2016, 43(3): 279-283, 346.
Zhang Jie, Hu Jie, Xiao Feng, et al. Filter aid application in filtration of compressible materials with high viscosity[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43(3): 279-283, 346.

[31] 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.
Huang Huanhuan. Effect of hydrophobic modification and mineral types on dewatering characteristics of coal slime[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.

[32] 李蕊. 有机聚合物助滤微细铁精矿试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
Li Rui. Experimental study on organic polymer filter-assisted fine iron concentrate[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.

[33] 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 Xiaoshu, Hu Jinliang, Liu Xiao. Study on the filtration mechanism of APAM and CTAB enhanced low-rank power coal[J]. Coal Engineering, 2023, 55(11): 167-172.

[34] Fan Yuping, Wen Pengcheng, Ma Xiaomin, et al. Enhancement of ultra-high-pressure dewatering of fine coal slurry: synergistic regulation mechanism of pore interface chemistry by polycarboxylate-CaO[J]. Fuel, 2026, 412: 138136. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.138136.

[35] 高宇, 周普玉, 杨霞, 等. 絮凝剂对工程废弃泥浆脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5597-5602.
Gao Yu, Zhou Puyu, Yang Xia, et al. Effect of flocculants on dehydration properties of construction waste slurry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(10): 5597-5602.

[36] Ren Haijing, Chen Wenna, Zheng Yunfei, et al. Effect of hydrophobic group on flocculation properties and dewatering efficiency of cationic acrylamide copolymers[J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(7): 601-608.

[37] Qi Shengjun, Song Yongqiang, Zhang Jingqi, et al. Effects of inorganic cations on the adsorption energy, electrostatic energy and adsorption strength of filter aid on flotation clean coal[J]. Separation Science and Technology, 2025, 60(14): 1851-1860.

[38] 闵凡飞, 任豹, 陈军, 等. 基于水化膜弱化促进煤泥脱水机理及试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 368-376.
Min Fanfei, Ren Bao, Chen Jun, et al. Mechanism and experimental study on promoting coal slime dewatering based on weakening of hydration layer[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 368-376.

[39] Yoon R H, Asmatulu R, Yildirim I, et al. Development of dewatering aids for minerals and coal fines[R]. Office of Scientific & Technical Information, 2004.

[40] Sun Qing, Yang Diling, Chen Jingsi, et al. Thioether-bridged surfactants for interfacial hydrophobic regulation and enhanced mineral flotation recovery[J]. AIChE Journal, 2025, 71(5): 18772. DOI: 10.1002/aic.18772.

[41] 胡剑锋. 复合助滤剂对浮选精煤脱水特性的影响及其助滤机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
Hu Jianfeng. Effect of composite filter aid on dewatering characteristics of flotation concentrate and its mechanism[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[42] 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.
Liu Liyan, Wu Feifei, Xu Qiutong, 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.

[43] 平安, 王梦蝶, 牛晨凯, 等. 表面活性剂改善浮选精煤脱水效果及其机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 211-216.
Ping An, Wang Mengdie, Niu Chenkai, et al. Effect of surfactant on dewatering of flotation clean coal and its mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 211-216.

[44] Ping An, Liu Xinran, Zheng K, et al. Enhanced dewatering performance of vitrinite and inertinite: synergistic effect of flocculants and surfactants[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2025, 45(11): 2625-2646.

[45] Ejtemaei M, Ramli S, Osborne D, et al. Synergistic effects of surfactant-flocculant mixtures on ultrafine

coal dewatering and their linkage with interfacial chemistry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 953-965.

[46] Wu Jiawei, He Jingfeng, Wang Xinyao, et al. A strategy for effective flocculation and sedimentation of coal gasification fine slag using a composite reagent system of CTAC/PDADMAC/NPAM[J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 79: 108912. DOI: 10. 1016/j. jwpe. 2025. 108912.

[47] Tang Hailong, He Jingfeng, Wu Jiawei, et al. Strategies and mechanisms for synergistic enhancement of coal gasification fine slag dewatering by waste soybean oil and polyacrylamide[J]. Powder Technology, 2026, 469: 121825. DOI: 10. 1016/j. powtec. 2025. 121825.

[48] 孙冬，董宪姝. 微乳液型复合助滤剂中各组分对煤的脱水协同效应[J]. 选煤技术，2012(1): 26-29.
Sun Dong, Dong Xianshu. Comprehensive effect of constituent elements in micro-emulsion composited filter-aids on dewatering of coal[J]. Coal Preparation Technology, 2012(1): 26-29.

（本文编辑 汪东芳）

【缅怀寄语】

孙传尧院士是我国矿物加工领域的卓越先驱，是东北大学杰出校友。孙院士始终关心母校发展，心系矿业专业师生成长，与东北大学资源与土木工程学院情谊深厚。百年校庆期间，他亲率可可托海东大校友捐赠锂辉石、绿柱石矿物标本。多年来，屡次返校进行学术报告，讲述自己从东大求学、钻研技术到培养学生、献身矿业的精彩奋斗人生，再现当年服从分配、满怀热情奋战在环境条件恶劣的新疆可可托海，实现了选矿厂从无到有、技术由弱到强的奋斗故事，以亲身经历激励师生投身矿业、奉献科研。“可可托海的东大人”精神是东大人的红色基因，是文化育人的强基之本，是东北大学师生不可多得的精神财富。

孙院士著的《足迹与情怀》，我们系教师人手一套。工作劳累之余，我总喜欢翻看阅读，如同跟随一位矿冶先行者走完八十年风雨人生路。上下两卷的回忆录，没有华丽辞藻，只用平实真挚的文字记录下他从东北校园到新疆戈壁、从一线矿工到学术泰斗的漫漫征程。一页页文字是踏遍山川的奋斗足迹，字里行间是扎根矿业、报国为民的赤子情怀，读完内心满是震撼与崇敬，也让我读懂何为真正的科学家精神。

2023年夏天，有幸与年近八旬的孙院士同行，前往老人家早年扎根的新疆可可托海。站在三号矿坑、8859稀有金属选矿厂旧址、历经沧桑的8766选厂面前，大风吹过，听亲历者对当年的工作生活娓娓道来的讲述，那些奋斗着的日日夜夜，点点滴滴，是“可可托海的东大人”精神具象化的呈现，时时刻刻鼓励着我努力向前。

——赵 冰