多粒径颗粒体系下板框压滤机水分分布特性的数值模拟研究*

张志刚[1,2]，马晓敏[1]，樊玉萍[1]，董宪姝[1]，霍云香[3]，王大国[3]，王世臣[3]，王景洲[1,4]

（1.太原理工大学 矿业工程学院， 山西 太原 030024；
2.山东能源集团西北矿业有限公司， 陕西 西安 710026；
3.陕西博选科技有限公司， 陕西 西安 710026；
4.神东洗选中心上湾选煤厂， 内蒙古 鄂尔多斯市 017209）

摘要：为揭示颗粒运动机制及入料参数对滤饼水分分布的影响规律，基于欧拉多相流模型与煤泥颗粒多尺度特性，构建了板框压滤机三维动态压滤数值模型，系统探究了颗粒相、液相运动过程及颗粒沉积过程，分析了煤泥质量分数和滤室厚度对滤饼水分分布的影响。研究表明，细颗粒（<0.1 mm）受流体曳力主导，压滤初期（0～120 s）出现流线弥散与“穿滤”现象，并在滤布表面形成体积分数占比接近80%的致密外壳；粗颗粒（≥0.1 mm）以重力沉降为主，在滤室中下部聚集构成支撑骨架。入料煤泥质量分数对滤饼结构影响显著，低入料煤泥质量分数（30%）下细颗粒和粗颗粒分层，导致滤饼中上部出现“夹心”水分聚集；煤泥质量分数为40%时可实现颗粒均匀分布与高效脱水；煤泥质量分数>50%时，因水流携带力减弱，颗粒同步沉降形成整体致密但水分分散的滤饼。此外，滤室厚度超过38 mm时，滤饼外层致密化与内部排水压力不足共同诱发滤饼中心出现“夹心”现象，且该现象随着滤室厚度的增加向滤室轴线偏移。研究成果可为压滤工艺参数优化提供理论依据。

关键词：板框压滤；多粒径颗粒；滤饼结构；“夹心”现象；数值模拟

中图分类号：TD92；TD94 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)07-0221-11

Numerical Simulation Study on Moisture Distribution Characteristics of Plate-and-Frame Filter Presses Under Multi-Size Particle Systems

Zhang Zhigang[1,2], *Ma Xiaomin*[1], *Fan Yuping*[1], *Dong Xianshu*[1], *Huo Yunxiang*[3], *Wang Daguo*[3], *Wang Shichen*[3], *Wang Jingzhou*[1,4]

(1.College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2.Shandong Energy Group Northwest Mining Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710026, China;
3.Shaanxi Boxuan Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710026, China;
4.Shangwan Coal Preparation Plant, Shendong Coal Washing Center, Ordos, Inner Mongolia 017209, China)

Abstract: To reveal the particle motion mechanisms and the effects of feed parameters on the moisture distribution within the filter cake, a three-dimensional dynamic filtration numerical model of a plate-and-frame filter press was constructed based on the Eulerian multiphase model and the multi-scale characteristics of coal slime particles. The motion processes of the particle and liquid phases, alongside the particle deposition process, were systematically investigated, and the impacts of coal slime mass fraction and filter chamber thickness on the moisture distribution of the filter cake were analyzed. The results indicate that fine particles (<0.1 mm) are dominated by fluid drag forces. During the initial filtration stage (0-120 s), streamline dispersion and particle bleed-through phenomena occur, forming a dense shell on the filter cloth surface with a volume fraction approaching 80%. Conversely, coarse particles (≥0.1 mm) are primarily governed by gravitational settling, aggregating in the middle and lower sections of the filter chamber to constitute a supporting skeleton. The feed mass fraction of the coal slime significantly impacts the filter cake structure. Under a low feed mass fraction (30%), fine and coarse particles undergo stratification, leading to a "sandwich" moisture accumulation in the middle and upper parts of the filter cake. At a mass fraction of 40%, a uniform particle distribution and efficient dewatering are achieved. When the coal slime mass fraction exceeds 50%, the weakened carrying capacity of the water flow causes particles to settle synchronously, resulting in an overall dense filter cake with dispersed moisture. Furthermore, when the filter chamber thickness exceeds 38 mm, the densification of the outer

* **收稿日期**：2025-08-03
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC2907704)；山西省自然科学基金面上项目(202403021221068)
作者简介：张志刚(1976—)，男，辽宁锦州人，硕士，正高级工程师，主要从事煤炭开发与加工利用等方面的研究。E-mail:zzg_0228@163.com
通信作者：马晓敏(1991—)，男，山西大同人，博士，副教授，主要从事煤炭分选与利用方面的研究。E-mail:ma_xiaomin@126.com

cake layer combined with insufficient internal drainage pressure collectively induces the "sandwich" phenomenon at the center of the filter cake, which shifts toward the chamber axis as the chamber thickness increases. The findings provide a theoretical basis for optimizing the process parameters of pressure filtration.

Key words: Plate-and-frame filter press, Multi-sized particle, Filter cake structure, "Sandwich" phenomenon, Numerical simulation

0 引言

作为煤炭加工中固液分离的关键设备,板框压滤机作用至关重要[1-3],但其设备结构庞大且压滤过程处于完全密闭状态,难以直接观测设备内部的颗粒运动规律及滤饼形成机制。传统研究通常仅能基于最终压滤结果进行分析,无法深入探究压滤过程的动态细节。

随着科学技术的不断发展,数值模拟方法逐渐成为研究压滤过程机理的重要手段[4-7]。Theliander 等[8]将滤饼形成过程离散化为多个增量,并据此开发了可模拟滤饼动态形成的计算程序,用于计算滤饼厚度、局部压力及半局部过滤比阻,与实测数据对比分析可知,模拟的滤饼厚度具有较高可信度,且过滤阻力变化趋势一致,进一步揭示了靠近滤布区域阻力较低、滤饼表层阻力较高的分布特征。在此基础上,Stickland 等[9]构建了一维数学模型,深入研究了固定滤室条件下的压滤行为,并强调了过滤压力与滤室厚度对其处理能力的显著影响。Ni 等[10]提出了以颗粒运动为基础的计算模型,可动态追踪滤饼厚度、密实度、流速与滤液体积的变化。近年来,随着计算流体力学(CFD)与离散元方法(DEM)的快速发展[11-12],滤饼形成过程的模拟研究逐渐精细化。尹占超[13]采用 CFD-DEM 方法考察了颗粒滞留、孔喉分布及压降的变化规律,分析了泥浆颗粒的过滤滞留特征及外部滤饼特性,并通过试验验证了模拟结果的准确性。Deshpande 等[14]利用 DEM-CFD 模拟了沉降过滤过程中滤饼结构的演变,研究了颗粒球形度、孔隙率和压降之间的相互关系。在三维模拟方面,肖萌[15]构建了立式压滤机的滤室几何模型,采用 Fluent 软件研究了滤室厚度、滤室高度、滤布速度和颗粒直径 4 个因素对立式压滤机单位产能的影响。白雪冬[16]通过对比不同进料方式发现,随着过滤时间的增加,滤饼含水率逐渐降低,并通过试验证实了模拟结果的可靠性。邓玲[17]则建立了厢式隔膜压滤机的固-液两相流 CFD 模型,分析了不同操作参数对其性能的影响,模拟结果与试验结果高度吻合,为压滤系统优化设计提供了依据。朱桂华等[18-19]进一步探讨了不同压力条件下的最佳滤室厚度,指出滤饼呈分层分布特征,滤布附近水分含量较低。万国顺等[20]、张大伟[21]针对 1250 型多滤室压滤机开展 CFD 模拟研究,发现颗粒沉积过程受曳力与颗粒密度的双重控制,高流量泵虽可加快脱水进程,却也增加了能耗。综上所述,压滤过程的数值模拟技术已从早期的一维理论发展为融合 CFD 与 DEM 的多维高精度建模,不仅在机理研究上取得了突破,也为实际工艺优化提供了可靠的理论依据。

然而,目前多数关于压滤过程的数值模拟仍以单颗粒尺度为主,所考虑的影响因素较为有限,导致模拟结果与实际工况之间存在较大偏差。为解决这一问题,本文依托数值模拟方法,以选煤厂压滤机入料过程为原型,设计精确的入料参数,系统研究了颗粒在滤室中的运动规律,重点分析煤泥入料质量分数与滤室厚度对压滤效果的影响机制,以期为压滤工艺的优化与设备设计提供理论依据和技术支持。

1 泥浆颗粒的压滤脱水过程的数学模型

1.1 物理模型

根据实验室的小型板框压滤机具体结构参数,选取末端滤室作为建模对象,使用 SolidWorks 三维建模软件进行几何建模。单个滤室由两块滤板和其中间包夹的两块滤布构成。建模过程中发现滤板边缘存在一定的楔形区域,如图 1 所示。

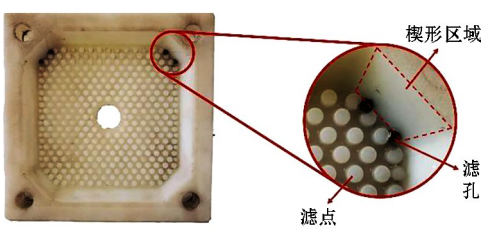


图 1 滤板实物示意

Fig.1 Schematic of filter plate physical

滤布为均匀多孔结构,厚度极薄,直接进行网格划分难度大。生产实践表明,透过滤布后的滤液压力较低,近似为自然流动,对滤室内料浆流场及滤饼成型的影响有限。由此采用多孔介质模型等效描述滤液在多孔板状结构中的流动特性,从而避免了对复杂几何结构进行精细网格划分。由于滤布在过滤

初期对滤饼的形成有重要影响，不可将滤饼外表面全部设置为排水口，因此模型保留了滤液流动空间与8个排水口。最终简化模型为200 mm×200 mm×40 mm的立方体，滤室厚度为34 mm，滤布厚度为1 mm，滤液活动区域厚度为2 mm。具体结构如图2所示。

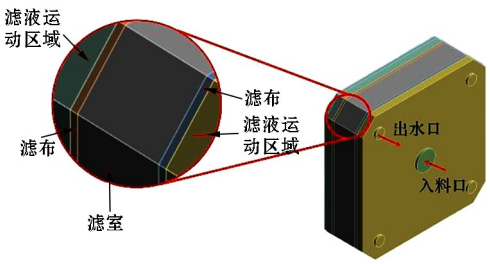


图2　滤室几何模型

Fig.2　Filter chamber geometric model

1.2　多相流模型

采用欧拉多相流模型对压滤机的压滤过程进行仿真分析，该模型在Ansys Fluent中得到广泛应用，成为模拟压滤过程的标准理论模型。欧拉多相流模型引入了相体积分数的概念，用以描述各相在空间中相互穿插、连续分布的特征。相体积分数是指某一相在空间中所占据的体积比例。每一相均遵循独立的质量守恒和动量守恒方程，这些守恒方程通过对每一相在瞬时局部区域的总体平衡求平均或基于混合理论推导得出。

假设相q的体积为V_q，则：

$$V_q=\int\alpha_q\mathrm{d}V \tag{1}$$

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q=1 \tag{2}$$

式中：α_q为第q相的体积分数；V为整体流体计算域的积分体积。

对于液相-固相(颗粒)两相流，即当$q=s$(固相)和$q=l$(液相)时，方程可改写为：

$$\alpha_l+\alpha_s=1 \tag{3}$$

式中：α_l表示液相的体积分数；α_s表示颗粒相的体积分数。

1.3　边界条件

压滤试验中，煤泥的入料速度受滤室内部压力影响。因此模拟中的入口边界不能设定为恒压或恒流。为准确定义模拟的入口边界条件，对图3中隔膜泵的扬程-流量特性曲线进行拟合。

$$H(v)=50.073-0.018v-0.000\ 229v^2 \tag{4}$$

式中：H为扬程，m；v为入口流量，m^3/h。

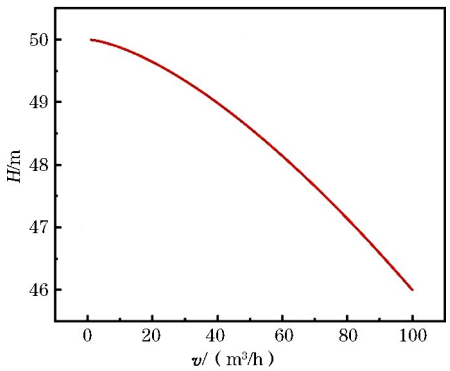


图3　隔膜泵的扬程-流量特性曲线

Fig.3　Head-flow characteristic curve of diaphragm pump

根据模拟中入口边界半径$r=25$ mm，将式(4)转换为流速-压力的函数关系式。

$$P(v)=808\ 010-1\ 591\ 720v-4\ 013\ 730v^2 \tag{5}$$

式中，P为入口压力，Pa。

将式(5)作为流体的入口边界条件，使用C++编写用户自定义函数(User-Defined Function，UDF)，从模拟中提取入口中心的压力值。基于压力值动态计算入口流速，将其作为入口边界条件应用于模拟。

1.4　参数设置

压力-速度耦合方法，动域、体积分数、动能、湍流能量耗散率的离散格式及压力插值方法这3种求解方法均对准确计算流场具有重要影响。

在Eulerian多相流模型中，压力-速度耦合方法有Phase Coupled SIMPLE、Coupled和Phase Coupled PISO三种。研究发现，Phase Coupled SIMPLE在计算后期存在发散现象，Phase Coupled PISO与Coupled精度相近，但Phase Coupled PISO在处理非定常流动和复杂的过渡流动时更为稳定。故选择Phase Coupled PISO作为压力-速度耦合方法。动量、湍流动能和湍流耗散率选用Second Order Up Wind格式离散，体积分数选用QUICK离散格式。

板框压滤模拟涉及固液两相流动、过滤压缩及滤饼形成，需合理选择压力插值方法。计算压力插值常用的方法有三种：Second Order方法适用于流动较为简单、无复杂多相流及压力突变的情况，难以应对压滤过程中固液不均匀与孔隙结构变化等复杂特征；PRESTO方法适用于较为稳定的流动或均匀的压滤场合，但在压力变化剧烈时会产生较大误差；

Body Forced Weighted 方法则更适合处理涉及高旋转流、自然对流及局部强梯度变化的复杂流动,能较为精准地捕捉固液两相流动和压滤过程中压力分布的细微变化。因此,对于涉及滤饼动态堆积的板框压滤过程,Body Forced Weighted 方法为最佳选择。

本研究以晋南选煤厂的压滤机入料为原型,测量其浓度、密度、黏度和粒度分布,并以此作为数值模拟中的入料参数,具体设置见表 1。

表 1 数值模拟中的入料参数

Table 1 Feeding parameters in numerical simulation

煤泥密度 ρ_s/(kg/m³)	煤泥黏度 V_s/(Pa·s)	液相密度 ρ_1/(kg/m³)	液相黏度 V_1/(Pa·s)	煤泥初始体积分数 α_0/%	滤布黏性阻力系数 D/m^{-2}	滤布惯性阻力系数 C_2/m^{-1}
1.9×10^3	0.019 3	1×10^3	0.003	40	2.965×10^{13}	1.872×10^{13}

表 2 设置了 6 种离散粒径的煤泥颗粒(K1～K6),其粒径分布为 0.045～1 mm,其中 K1(0.045 mm)和 K2(0.074 mm)属于亚微米级细颗粒(<0.1 mm),而 K3(0.125 mm)至 K6(1 mm)为粗颗粒(≥0.1 mm)。

表 2 颗粒相种类分布占比

Table 2 Proportion of particle phase species distribution

编号	煤泥粒径 d/mm	占比/%	α_s
K1	0.045	53.12	0.212
K2	0.074	8.92	0.036
K3	0.125	6.64	0.027
K4	0.250	15.56	0.062
K5	0.500	10.37	0.041
K6	1.000	5.39	0.022

2 压滤过程的数值模拟

2.1 颗粒相运动过程

图 4 为多粒径颗粒体系压滤过程的流线演变过程。由图 4 可知,细颗粒组(K1～K2)与粗颗粒组(K3～K6)的运动特征存在显著差异。细颗粒在流场中的最大流速为 5.45×10^{-1} m/s,流线在滤室中分布更加均匀,表明其受流体曳力作用更大;粗颗粒组最大流速为 3.81×10^{-1} m/s,流线呈聚集特征,表明其受重力影响更为显著。值得注意的是,同组颗粒间流线规律拓扑结构具有高度相似性,因此后续研究仅以 K1 和 K3 为例反映颗粒的运动过程,即 K1 的入料体积分数为 0.248,K3 的入料体积分数为0.152,入料颗粒总体积分数为 0.4。

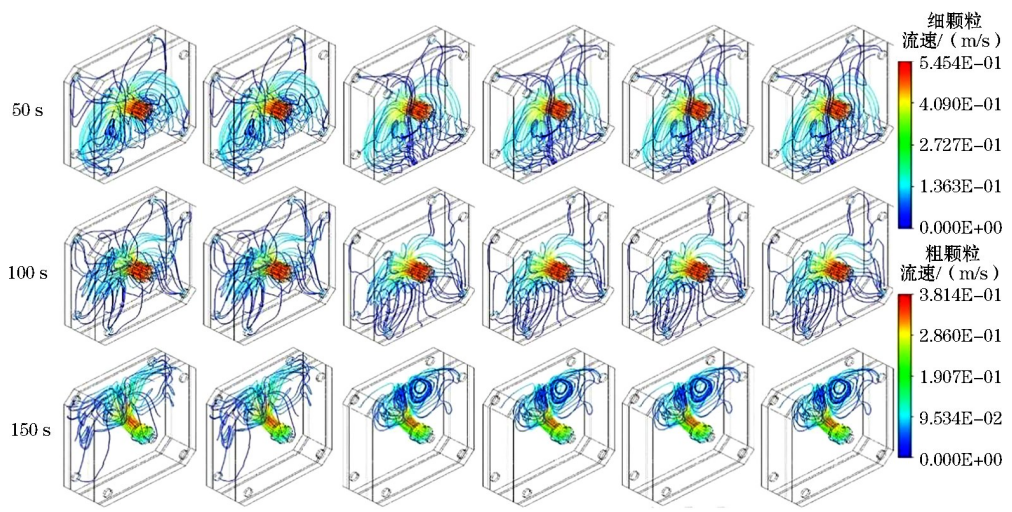


图 4 不同时刻各颗粒相流线演变特征

Fig.4 Evolution characteristics of particle phase streamlines at different time

图 5 为 Z 轴方向上粗细两种颗粒在不同时刻的流线演变过程。从图 5 中可以看出,细颗粒(<0.1 mm)在压滤初期(0～100 s)易穿透滤布,其穿滤速率远高于较粗颗粒(≥0.1 mm)。出现这一现象的主要原因是:模拟中设置的多孔介质对颗粒的黏性阻力系数 D(2.965×10^{13} m^{-2})和惯性阻力系数 C_2(1.872×10^{13} m^{-1})虽然很高,但入料速度较快,仍然会有部分颗粒穿过滤布。这一现象在 120 s 后基本消失,表明此时滤布上已形成了一层颗粒屏障,对颗粒的截留作用逐渐增强。

根据流线理论，当颗粒相流线速度降至0时，表明流体流速不足以维持颗粒悬浮，颗粒随即沉积并形成滤饼。由图5可知，在0～80 s，颗粒主要集中于下半滤室；在80～100 s，随着颗粒在下腔堆积，颗粒运行路径向入料口区域移动，入料流速亦有所下降，表明此时滤室内部滤饼结构已基本成型，内部压力增大；在120～180 s，流场结构发生了重构，流场呈现出非线性涡旋特征，涡流强度在上半滤室显著增加，流线曲率半径减小至8 mm以下。这一现象表明，滤饼形成后细颗粒的迁移受到显著空间限制，呈现出复杂的二次迁移机制。120 s后，细颗粒的“穿滤”现象完全消失，颗粒穿透量降至低水平(<0.1%)，说明滤饼层对细颗粒具有高效截留作用。

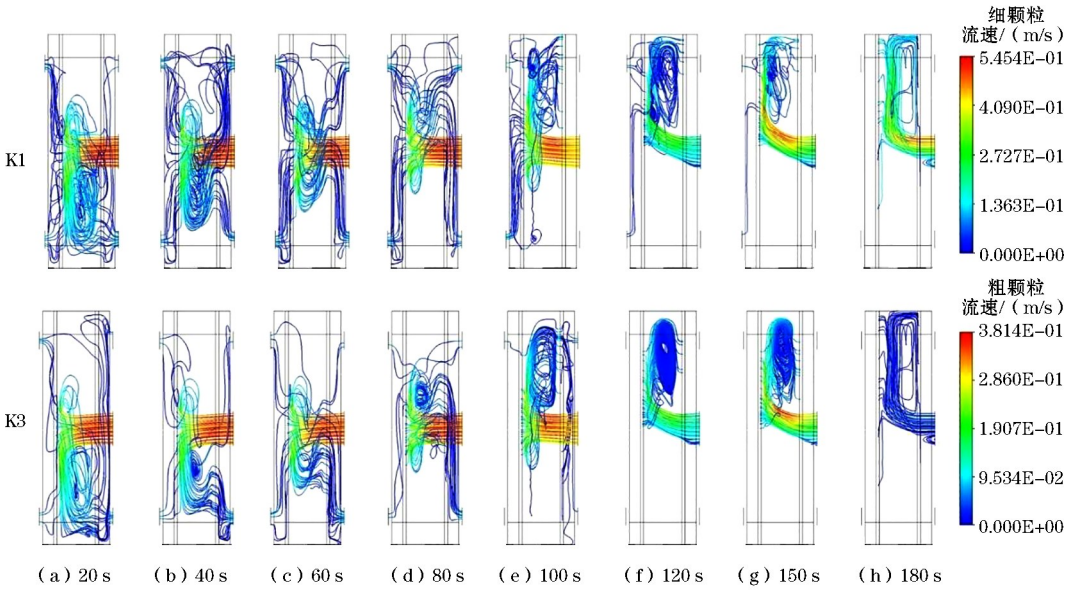


图5　不同时刻Z轴颗粒相流线演变特征

Fig.5　Evolution characteristics of Z-axis particle phase streamline at different time

为便于观察模拟后的颗粒分布，取煤泥颗粒K1和K3重新进行模拟计算，并对计算后的结果进行如下处理：对滤室在YZ平面上沿X轴方向进行切片处理，以4 mm为间隔依次截取，得到图6(a)所示的切片示意。计算各切面上颗粒的体积分数并取平均值，得到图6(b)所示的体积分数分布曲线。

图6(b)中横坐标表示滤室不同X坐标截面，0为滤室中心，−17 mm为滤室外侧，17 mm为滤室入口侧。由图6可知，K1的体积分数始终高于K3，越靠近滤室两侧，两者差值越大，滤布上K1的体积分数占比接近80%，而K3仅为20%左右。当靠近滤室中心区域，两种颗粒的体积分数差值逐渐缩短，当距中心区域8 mm内时，K1和K3颗粒的体积分数占比趋于稳定，K1约为60%，K3约为40%，相比之下，粗颗粒占比略高于初始入料占比，细颗粒略低于初始入料占比。

综上，压滤过程中滤室内颗粒体积分数分布呈现明显的空间差异：细颗粒在滤室两侧靠近滤布区域富集程度较高，而粗颗粒则主要集中于中心区域。

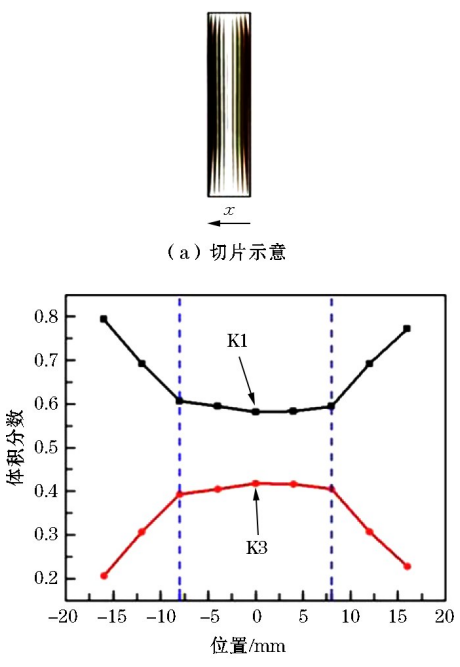


图6　不同位置切片示意及颗粒体积分布

Fig.6　Slice schematics and particle volume distribution at different positions

2.2 液相运动过程

为直观分析压滤过程中滤液的运动轨迹,图 7 截取了不同时刻的液相运动流线。图中蓝色区域内为滤室,蓝色为滤布,外围为滤液活动区,流线颜色表征速度快慢(颜色标识见电子版)。

由图 7 可知,在 0～80 s,滤室内部流场表现出高速均匀的流动特征,最大流速为 5.35×10^{-1} m/s。流线在滤室空间内呈发散状分布,各出水口均保持稳定排水;在 80～100 s,流场分布发生显著改变,流速下降至 4.01×10^{-1} m/s,流线向滤室中上部收缩聚集,形成明显的边界层效应;100 s 之后,随着滤室内液体运行空间的压缩和内部压力增大,流速进一步降低至 2.68×10^{-1} m/s 以下,流场呈现出复杂的涡旋流动结构,但通过滤饼微孔隙仍能维持有效的排水路径。随着压滤进行,流线逐渐聚集于滤室顶部区域且穿过滤布数量有所降低,表明脱水效率因滤饼厚度增加而呈衰减趋势。

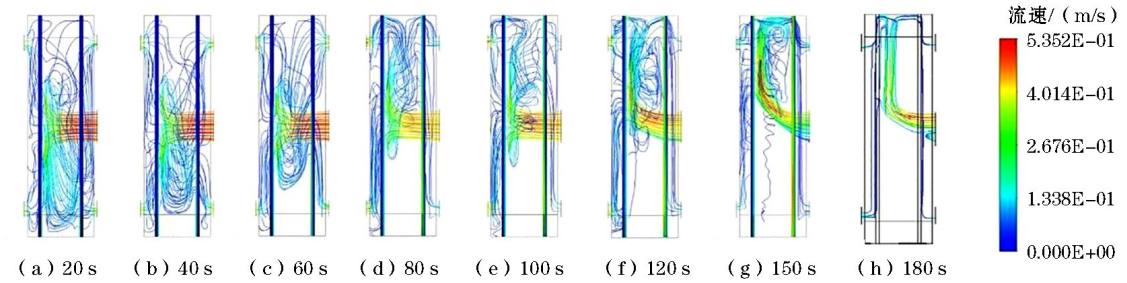


图 7 不同时刻液相流线演变特征

Fig.7 Evolution characteristics of liquid phase streamline at different time

2.3 颗粒沉积过程

由于 K1 在入料中占比最高且粒度最细,故选取 K1 追踪颗粒的沉积过程。图 8 为数值模拟中滤室内各个时刻 K1 的堆积过程,图中颜色由蓝变红代表颗粒在滤室中的体积分数逐步增多,可直观反映颗粒相的运动规律及滤饼的逐层形成过程(颜色标识见电子版)。

由图 8 可知,在前 80 s,颗粒主要在重力作用下沉积于滤室底部;80 s 后,整个滤室内已无深蓝色区域,颗粒已分布至整个滤室空间,但下半滤室中体积分数远高于上半滤室,说明上半滤室以液体为主;100 s 后,上半滤饼开始形成,但受中心入料口影响,该区域浓度始终偏低,当两侧区域颗粒体积分数达到 50%时,中心区域仅为 30%;压滤后期,随着上半滤室逐步填充完成,中心区域才逐步被填充。

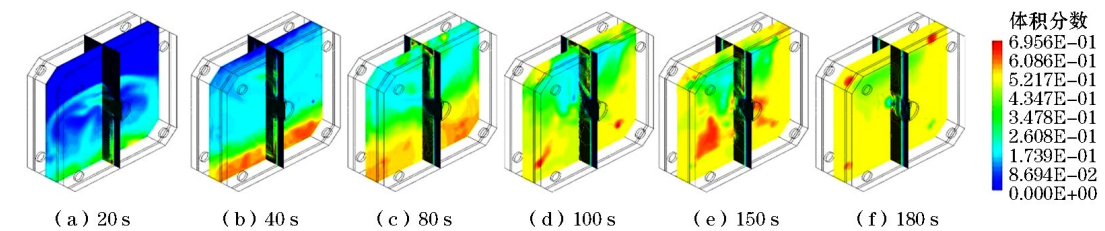


图 8 不同时刻滤室颗粒相分布特征

Fig.8 Particle phase distribution characteristics of filter chamber at different time

图 9 为压滤过程中不同时刻滤布上颗粒体积分数的空间演化规律。由图 9 可知,在压滤初期的前 80 s 内,颗粒在滤布上的分布呈现明显的梯度特征,表现为颗粒优先在滤布底部积聚,随后自下而上逐层填充;在 100 s 时,颗粒完成对滤布的全覆盖,此时,滤布下半部分的颗粒体积分数较上半部分高出 30%～40%,表明压滤初期颗粒沉积受重力与压力梯度的协同作用影响,颗粒在滤布上下呈非对称分布;100 s 后,颗粒的演化呈现两阶段特征,滤布下半部分颗粒的体积分数趋于稳定,维持在 0.65～0.68 之间,上半部分颗粒体积分数则通过颗粒迁移与孔隙填充作用持续增长,从 0.32 提升至 0.62;至 180 s 压滤终止时,全滤布区域的颗粒体积分数分布均匀。

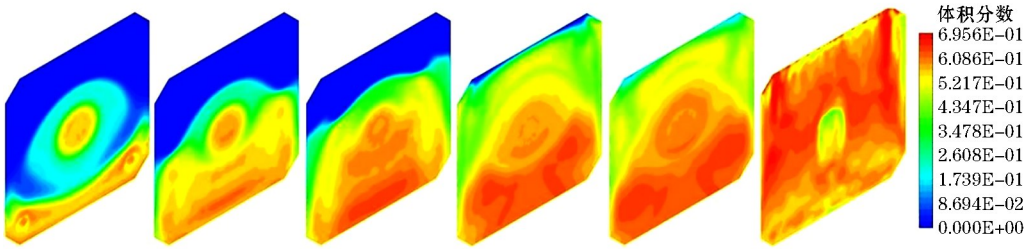


图 9　不同时刻三维滤布颗粒相分布特征

Fig.9　Particle phase distribution characteristics of three-dimensional filter cloth at different time

2.4　煤泥质量分数对滤饼水分的影响

在选煤厂生产中，压滤机入料煤泥质量分数在30%～60%之间波动，是影响滤饼质量的重要因素之一。为系统考察入料浓度的影响，固定其余模拟参数，仅选取煤泥质量分数分别为30%、40%、50%和60%进行模拟。不同煤泥质量分数下的颗粒体积分数占比见表3。

表 3　不同煤泥质量分数下颗粒体积分数占比

Table 3　Proportion of particle volume fraction under different coal slime mass fractions

煤泥质量分数/%	K1 体积分数	K3 体积分数
30	0.187 5	0.112 5
40	0.250 0	0.150 0
50	0.312 5	0.187 5
60	0.375 0	0.225 0

颗粒相体积分数的变化会影响数值模型的计算稳定性，导致不同煤泥质量分数下的模拟时长差异显著。为保证模拟结果的可比性，统一以系统发散作为计算终止条件(即滤液渗流通道完全闭塞导致数值解失稳)，据此同步输出最终状态数据。

图10为不同煤泥质量分数下滤室液相分布特征。由图10可知，压滤过程结束时，不同煤泥质量分数对应的滤室内部的液相分布及滤饼形态存在明显差异。随着煤泥质量分数从低到高递增时，压滤时长由360 s缩短至100 s，表明提高入料煤泥质量分数可显著加快压滤进程。然而，质量分数升高也会导致滤室区域出现液体残留(即“夹心”现象)，且“夹心”的形态特征随煤泥质量分数变化而呈现明显区别。

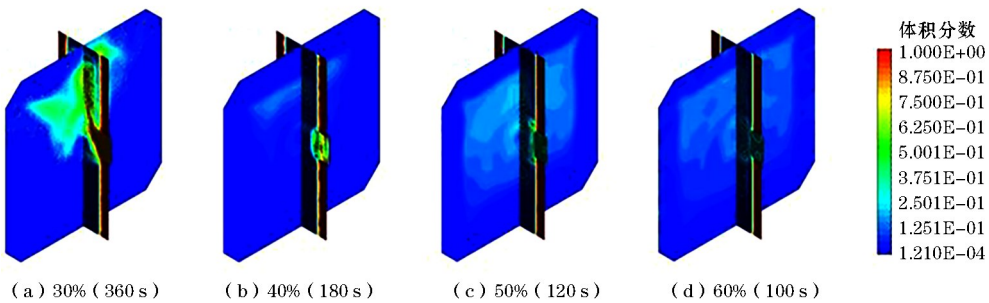


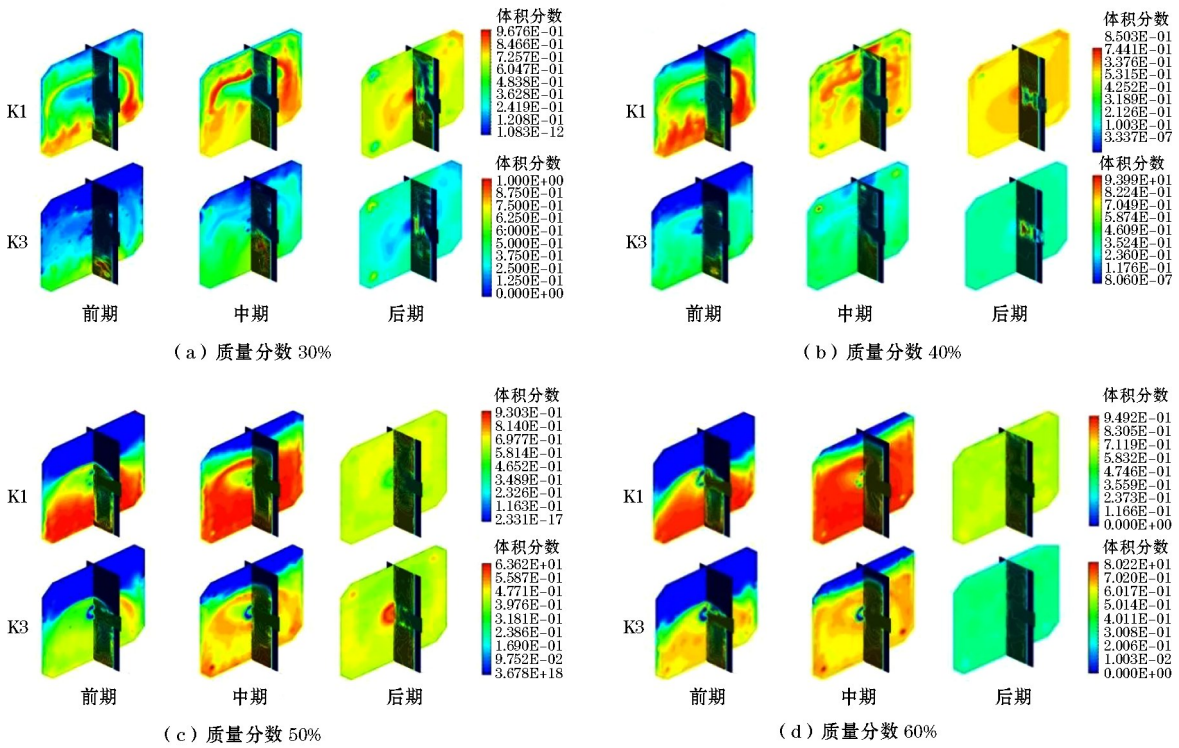
图 10　不同煤泥质量分数滤室液相分布特征

Fig.10　Distribution characteristics of liquid phase in filter chamber under different coal slime mass fractions

由图10可知，在低煤泥质量分数条件下，滤饼内部的“夹心”现象尤为显著，主要集中在滤饼的中上部区域，下部滤室未观测到该现象，说明下部滤室的颗粒填充较为致密，水分较易排出；而在高煤泥质量分数条件下，“夹心”现象的特征明显减弱，强度有所降低，但其分布范围明显扩大，几乎覆盖整个滤室中心区域。

为进一步探究不同煤泥入料质量分数导致压滤终止时液相在滤饼内部分布差异的问题，构建了由*YZ*平面与滤布切面组成的三维空间。图11为不同煤泥质量分数下颗粒相在滤室中的分布特征，为反映压滤过程中颗粒的积累过程，选取压滤过程中前期、中期和后期3个时间段的颗粒相分布特征进行研究。随着煤泥质量分数升高，细颗粒(K1)与粗颗粒(K3)在滤室中的迁移-堆积过程及其最终空间分布均发生显著改变。这种演变不仅直接影响滤饼的形成速率与结构特征，也决定了滤饼内部水分的滞留机制及其空间分布形态。

由图 11(a)可知,在低煤泥质量分数条件下,细颗粒(K1)与粗颗粒(K3)的迁移-堆积行为存在显著差异。细颗粒粒径小、质量轻,具有较高的表观黏度,更易受到水流的拖曳与携带,主要向滤布表面及滤室上部区域迁移,并优先吸附于滤布表面形成初始滤层;相比之下,粗颗粒在重力作用下迅速下沉,优先沉积于滤室底部,在滤布表面的黏附量较低。由此,在低入料质量分数下,粗颗粒优先沉降于底部构成滤饼的主体骨架,而细颗粒优先吸附于滤布表面形成致密滤饼外壳。致使压滤中后期,较厚且致密的外壳阻碍了内部滞留水分的排出;同时,因底部区域已由粗颗粒填充密实,最终在滤室中上部区域形成特征显著且分布集中的"夹心"现象。



(a) 质量分数 30%　(b) 质量分数 40%

(c) 质量分数 50%　(d) 质量分数 60%

图 11　不同煤泥质量分数下滤室颗粒相分布特征

Fig.11　Particle phase distribution characteristics in filter chamber under different coal slime mass fractions

由图 11(b)可知,当煤泥质量分数处于适宜范围(40%)时,细颗粒与粗颗粒在滤室中表现出良好的协同沉积行为,其堆积速率与滤液的流动速率达到动态平衡。在此条件下,水流对细颗粒的拖曳作用虽略有减弱,但仍具备一定的携带与分散能力,促使细颗粒持续地在滤布表面及滤室上部区域沉积,形成具有一定厚度的滤饼外壳层。同时,在重力和流体力学作用的共同驱动下,部分细颗粒逐渐向下迁移沉积,与前期沉积的粗颗粒相互交织、填充,从而实现颗粒间的有效渗透与嵌合。这种自上而下、内外结合的颗粒堆积模式,有助于构建结构贯通、孔隙分布合理的三维滤饼骨架,使滤液能够沿通畅路径迅速排出,显著提升脱水效率。最终所形成的滤饼整体结构均匀,未出现典型的细颗粒滞留于滤饼中部的"夹心"现象,呈现为典型的正常滤饼形态。

由图 11(c)和图 11(d)可知,随着煤泥质量分数进一步升高,滤饼结构及颗粒沉积行为均发生显著变化。细颗粒堆积过程逐渐趋同于粗颗粒,二者均优先沉积于滤室底部,而在滤布表面的附着量则显著减少。这主要是因为在较高煤泥质量分数条件下,颗粒沉积速率增大,滤室内含水量相对减少,水流对细颗粒的携带能力随之大幅减弱,致使细颗粒难以被输送至滤布表面或上部区域,而直接随重力向滤室底部迁移并沉积,致使滤室内颗粒分布逐步趋于空间均匀化,滤饼各区域的固体骨架结构趋于一致,部分水分被包裹于滤饼内部而难以彻底脱除,但其空间分布呈现弥散状态,未在特定区域集中聚集,故"夹心"现象表现不显著。

为系统全面地分析不同煤泥质量分数条件下压滤过程结束时滤室内部颗粒相与液相的空间分

布特征，参照图 6(a)的分区方式，对模拟后不同位置的颗粒相和液相体积分数进行提取和计算，得到不同煤泥质量分数下滤室颗粒分布特征，如图 12 所示。

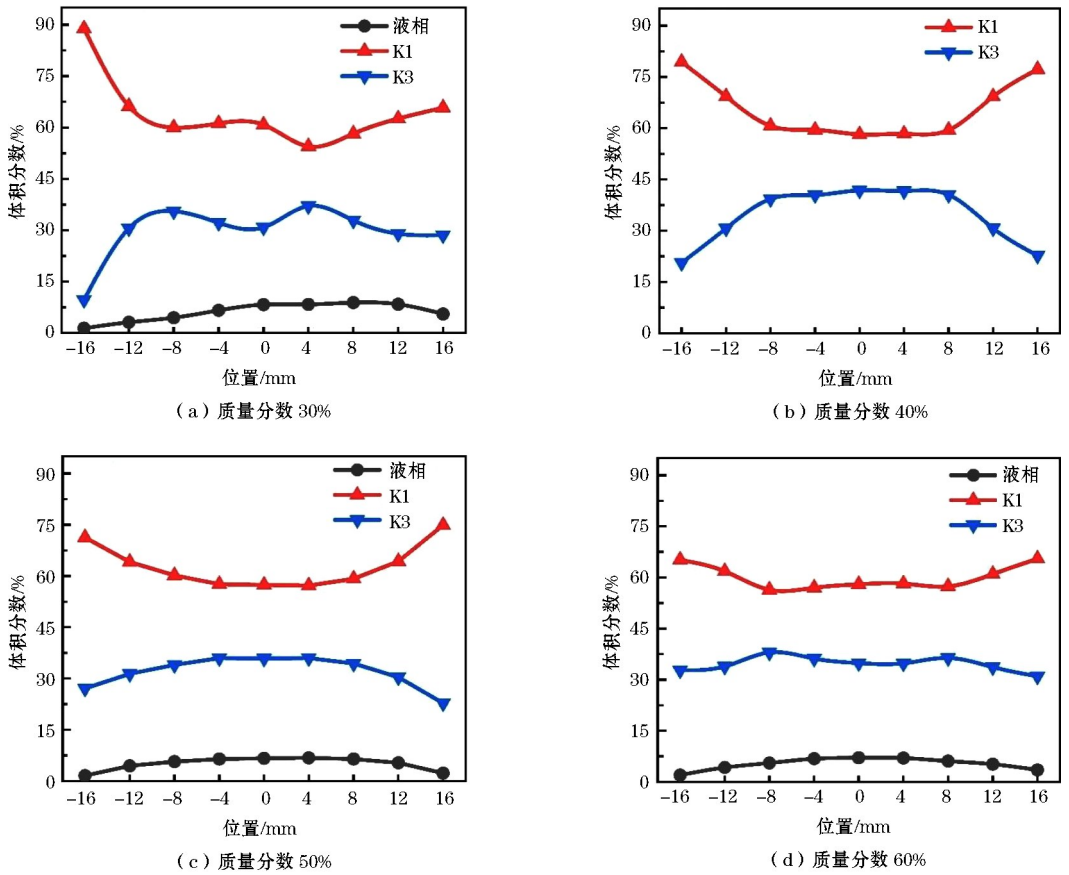


图 12　不同煤泥质量分数下滤室颗粒分布特征

Fig.12　Particle distribution characteristics in filter chambers under different coal slime mass fractions

如图 12(a)可知，当入料煤泥质量分数为 30%时，压滤结束后液相于滤室入口处呈现显著的聚集现象，体积分数峰值达 10%，细颗粒在外层的体积分数近 90%，粗细颗粒在内部分布混乱，呈现出液相与颗粒相分布不均的现象。由图 12(b)可知，当入料煤泥质量分数提升至 40%时，滤室内无明显液相富集区，细颗粒在滤室两侧体积分数约为 80%，中心区域降至 60%左右，粗颗粒在边缘区域体积分数约为 20%，中心区域约为 40%，与前文滤饼粒度分析结果一致。图 12(c)和图 12(d)进一步表明，当入料煤泥质量分数超过 50%后，液相和颗粒相分布渐趋均匀，液相在滤室中心占比最高并向滤布递减，粗细颗粒在不同区域的体积分数差异缩小，最终在滤室内呈现均匀分布趋势。

2.5　滤室厚度对滤饼水分的影响

选煤厂中压滤机的尺寸是影响压滤效果的重要因素之一。对此，构建了滤室厚度分别为 30 mm、34 mm、38 mm、42 mm 和 46 mm 的三维模型，通过数值模拟手段探究滤室厚度对滤饼水分的影响。各模型采用相同的网格划分方法，网格质量参数见表 4。入口边界条件及其他计算参数保持不变，进行数值模拟计算，直到系统发散为止，记录压滤终止时的液相空间分布特征。

表 4　模型网格质量参数

Table 4　Grid quality parameters of model

滤室厚度/mm	网格数量	节点数量	平均质量
30	273 432	328 722	0.841
34	297 706	313 764	0.885
38	321 998	378 320	0.881
42	341 250	397 954	0.893
46	360 502	417 588	0.883

不同滤室厚度下滤室液相体积分数的空间分布特征如图 13 所示。第一行为 Z 轴视图，第二行为 YZ 轴侧视图。由图 13 的 Z 轴视图可知，随着滤室厚度增加，滤室中液相的体积分数逐渐升高，滤室厚

度为 34 mm 以下时,滤室内几乎无滤液留存;当滤室厚度为 38 mm 时,滤室中出现明显的液相留存区域,该区域未和滤室入口相连,呈现内部“夹心”现象;当滤室厚度为 42 mm 时,滤室中出现大面积的液相留存区域,这一区域与滤室入口相连,表明此时滤液排出受阻。由图 13 的 *YZ* 轴侧视图可知,随着滤室厚度增加,液相开始留存在滤室中心及其靠上位置,滤饼“夹心”现象逐渐出现,并在滤室厚度超过 42 mm 后基本达到稳定,“夹心”在滤室中呈现围绕中心入料口的圆形区域。

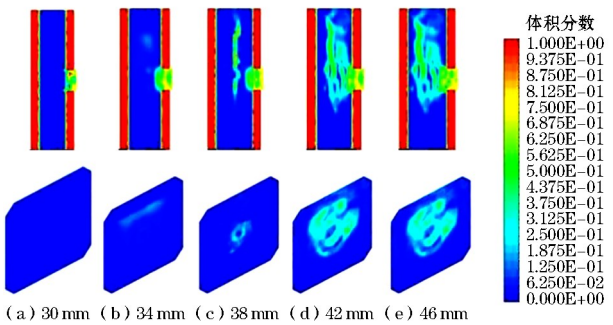


图 13 不同滤室厚度各滤室液相分布特征

Fig.13 Liquid phase distribution characteristics of each filter chamber under different filter chamber thicknesses

3 结论

(1) 粗细颗粒的运动机制与分布规律存在本质差异,共同决定了滤饼的宏观结构。细颗粒(粒径<0.1 mm)受流体曳力主导,最大流速达 0.545 m/s,在压滤初期(0~120 s)出现明显的“穿滤”与流线弥散现象,并于滤布表面富集形成体积分数高达 80% 的致密外壳;粗颗粒(粒径≥0.1 mm)以重力沉降为主,最大流速为 0.381 m/s,集中于滤室中下部,构成滤饼的支撑骨架。这种运动与分布差异是导致滤饼结构与水分分布非均质性的根本原因。

(2) 入料煤泥质量分数显著影响滤饼结构形成与水分分布特征,当入料煤泥质量分数为 30% 时,颗粒按粒度显著分层,细颗粒在滤布表面形成致密外壳,阻碍内部水分排出,导致滤饼中上部出现明显“夹心”式水分聚集(液相体积分数峰值达 10%)现象;当煤泥质量分数为 40% 时,颗粒-流体系统达到动态平衡,滤饼结构均匀,无水分脱除障碍;当煤泥质量分数超过 50% 时,水流携带力减弱,颗粒同步沉降,形成整体致密但水分分散的滤饼结构,压滤周期由低质量分数下的 360 s 缩短至 100 s,但脱水效率下降。综上,最优入料煤泥质量分数为 40%。

(3) 滤室厚度存在临界值(38 mm),超过该值将引发中心“夹心”现象。滤室厚度低于 34 mm 时,滤室内无明显液相滞留;滤室厚度达到 38 mm 时,滤室中心出现未与入口相连的孤立液相区;滤室厚度超过 42 mm 后,液相滞留区扩展至整个中心区域并与入口相连,形成以入料口为中心的圆形“夹心”带。该现象是外层滤饼致密化导致排水阻力增大与内部脱水动力不足共同作用的结果,且滞留区随滤室厚度的增加向滤室轴线偏移。

参考文献(References):

[1] 李博,杨小权,乔少利.选煤厂煤泥水系统智能压滤技术应用研究[J].矿业安全与环保,2024,51(6):200-204.
Li Bo, Yang Xiaoquan, Qiao Shaoli. Research on the application of intelligent pressure filtration technology for slime water system in coal preparation plant[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(6):200-204.

[2] 赵阳,陶亚东,周安宁,等.难沉降煤泥水处理技术研究进展[J].应用化工,2025,54(3):742-747.
Zhao Yang, Tao Yadong, Zhou Anning, et al. Research development trends of mudded coal slurry water treatment [J]. Applied Chemical Industry,2025,54(3):742-747.

[3] 李文婷.石圪台选煤厂煤泥处理中板框压滤机效率优化[J].洁净煤技术,2021,27(增刊 2):140-143.
Li Wenting. Efficiency optimization of pressure filter in the slime treatment of Shigetai coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology,2021,27(Suppl.2):140-143.

[4] 赵俊吉.CTAB-PAC 复配助滤剂强化低阶煤泥脱水机制研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
Zhao Junji. Study on strengthening dewatering mechanism of CTAB-PAC composite filter aid for low rank coal slime[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2022.

[5] 汪建新,肖萌,王宇晨,等.新型立式压滤机较优滤室厚度参数研究[J].矿产综合利用,2025,46(3):206-210.
Wang Jianxin, Xiao Meng, Wang Yuchen, et al. Research on optimal filter chamber thickness parameters of new vertical filter press[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2025,46(3):206-210.

[6] 周贺彬,林顺才,刘伟,等.刚柔叶片组合搅拌机的数值模拟与工业试验[J].矿业研究与开发,2022,42(9):170-174.
Zhou Hebin, Lin Shuncai, Liu Wei, et al. Numerical simulation and industrial test of mixer with rigid-flexible blade combination[J]. Mining Research and Development, 2022,42(9):170-174.

[7] 王洪江,彭青松,杨莹,等.金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望[J].工程科学学报,2022,44(6):971-980.
Wang Hongjiang, Peng Qingsong, Yang Ying, et al. Research status and prospect of thickening technology for metal tailings[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44 (6):971-980.

[8] Theliander H, Fathi-najafi M. Simulation of the build-up of a filter cake[J]. Filtration & Separation, 1996, 33(5): 417-421.

[9] Stickland A D, De Kretser R G, Scales P J, et al. Numerical modelling of fixed-cavity plate-and-frame filtration: formulation, validation and optimisation [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(12): 3818-3829.

[10] Ni L A, Yu A B, Lu G Q, et al. Simulation of the cake formation and growth in cake filtration [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10): 1084-1097.

[11] Puderbach V, Schmidt K, Antonyuk S. A coupled CFD-DEM model for resolved simulation of filter cake formation during solid-liquid separation[J]. Processes, 2021, 9(5): 826.

[12] Yin Tong, Zhang Zixin, Huang Xin, et al. On the morphology and pressure-filtration characteristics of filter cake formation: insight from coupled CFD-DEM simulations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103856.

[13] 尹占超.考虑渣土影响的盾构泥浆在饱和砂层中的渗透规律研究[D].济南:山东大学,2024.
Yin Zhanchao. Study on infiltration behavior of shield slurry containing excavated sand into saturated sand[D]. Jinan: Shandong University, 2024.

[14] Deshpande R, Antonyuk S, Iliev O. DEM-CFD study of the filter cake formation process due to non-spherical particles [J]. Particuology, 2020, 53: 48-57.

[15] 肖萌.多孔介质中水运移规律研究及在立式压滤机设计中的应用[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
Xiao Meng. Study on water transport law in porous media and its application in the design of vertical filter press[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023.

[16] 白雪冬.提升钢铁工业污水处理中隔膜式压滤机脱水性能的研究[D].包头:内蒙古科技大学,2020.
Bai Xuedong. Study on dewatering performance of diaphragm filter press for sewage treatment in iron and steel industry[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.

[17] 邓玲.厢式隔膜压滤机污泥深度脱水过滤特性研究[D].长沙:中南大学,2014.
Deng Ling. Filter characteristics research on deep dehydration of sludge in van membrane filter press[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[18] 朱桂华,王万斌,张丽欣,等.厢式隔膜压滤机深度脱水最优过滤压力[J].环境工程学报,2015,9(10):5045-5048.
Zhu Guihua, Wang Wanbin, Zhang Lixin, et al. Optimization of filtration pressure on deep dehydration of sludge in van membrane filter press[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 5045-5048.

[19] 朱桂华,高明泉,马凯,等.厢式压滤机滤室厚度优化设计研究[J].计算机仿真,2016,33(1):234-238.
Zhu Guihua, Gao Mingquan, Ma Kai, et al. Optimum design and research on width of filter chamber in van membrane filter press[J]. Computer Simulation, 2016, 33(1): 234-238.

[20] 万国顺,张大伟,宋伟,等.厢式压滤机的煤浆压滤脱水过程数学建模与数值模拟[J].高校化学工程学报,2018,32(5):1171-1177.
Wan Guoshun, Zhang Dawei, Song Wei, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of pressure filtration and dewatering of coal slurry in chamber filter press [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2018, 32(5): 1171-1177.

[21] 张大伟.压滤机使役过程分析与优化设计[D].济南:山东大学,2021.
Zhang Dawei. Working process analysis and optimal design of filter press[D]. Jinan: Shandong University, 2021.