

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

气化渣机械研磨改性强化脱水:孔结构调控、水分赋存演变及因素效应分析

肖宗穆^{1,2}, 陈莉晴^{1,2}, 张明成³, 聂成元³, 高圣涛⁴, 张一昕¹, 武建军^{1,2}, 郭凡辉^{1,2}

(¹ 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; ² 中国矿业大学化工学院, 江苏 徐州 221116; ³ 陕西长青能源化工有限公司, 陕西 榆林 721405; ⁴ 安徽理工大学安徽省现代煤炭加工技术研究院, 安徽 合肥 232001)

摘要: 针对气化细渣真空过滤效率低、滤饼含水率高的问题, 以原渣滤饼含水率为 53.14% 的气流床水煤浆气化工艺气化细渣为研究对象, 采用 $L_{16}(4^3)$ 正交设计, 探究研磨条件对脱水性能的影响, 并结合粒度分布分析 (PSD)、 N_2 吸附/脱附、压汞法 (MIP)、低场核磁共振 (LF-NMR) 和差示扫描量热法 (DSC) 等手段, 分析颗粒特性、孔结构、水分赋存状态及脱水行为的变化规律。结果表明: 极差分析显示, 三因素对滤饼含水率的主效应趋势为研磨时间 > 浆料浓度 > 研磨频率; 方差分析表明, 三因素整体效应在 95% 置信水平下均未达到显著水平, 但研磨时间呈接近显著趋势, 且 5 min 与 15 min、5 min 与 20 min 之间存在显著差异。相对于原渣 CQ, 在 30% 浆料浓度、15 min 研磨条件下, CQ7 的滤饼含水率由 53.14% 降至 42.90%, 相对降低 19.27%, 液上 25 s 累计滤液量由 127.10 mL 增至 153.00 mL, 提高 20.4%。适度机械研磨能够促进颗粒破碎与粒级重构, 使 >5500 nm 孔隙体积明显下降, 并减弱微细孔吸附和毛细束缚作用, 从而改善水分迁移与排出条件, 提升脱水性能。相比之下, 在 40% 浆料浓度、5 min 研磨时间和 50 Hz 研磨频率条件下, CQ13 的滤饼含水率仍为 50.30%, 说明高固含量、短时间研磨条件下脱水强化效果有限。综上, 机械研磨强化气化细渣脱水的关键在于优化颗粒级配、调控孔径分布和水分赋存状态, 实现储水空间减少与排水通道改善的协同优化。本研究为气化细渣高效脱水提供了理论依据及技术指导。

关键词: 煤气化细渣; 机械研磨; 孔结构; 因素效应分析; 脱水过程强化

中图分类号: TQ 536

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-14

收稿日期: 2026-03-31 修回日期: 2026-06-25

通信作者: 郭凡辉 (1992 年—), 男, 副教授, cumtgh@163.com

第一作者: 肖宗穆 (2001—), 男, 硕士研究生, zongmuxiao@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52404304); 安徽省现代煤炭加工技术研究院 (安徽理工大学) 开放基金项目资助 (MTY202405); 宁夏自然科学基金项目 (2025AAC02002)

引用本文: 肖宗穆, 陈莉晴, 张明成, 聂成元, 高圣涛, 张一昕, 武建军, 郭凡辉. 气化渣机械研磨改性强化脱水: 孔结构调控、水分赋存演变及因素效应分析[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-14

Citation: XIAO Zongmu, CHEN Liqing, ZHANG Mingcheng, NIE Chengyuan, GAO Shengtao, ZHANG Yixin, WU Jianjun, GUO Fanhui. Mechanical grinding modification for enhanced dewatering of coal gasification fine slag: pore structure regulation, water occurrence evolution, and factor effect analysis[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-14

Mechanical grinding modification for enhanced dewatering of coal gasification fine slag: pore structure regulation, water occurrence evolution, and factor effect analysis

XIAO Zongmu^{1,2}, CHEN Liqing^{1,2}, ZHANG Mingcheng³, NIE Chengyuan³, GAO Shengtao⁴, ZHANG Yixin¹, WU Jianjun^{1,2}, GUO Fanhui^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Coking Coal Resources Green Exploitation, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; ² School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; ³ Shaanxi Changqing Energy and Chemical Industry, Ltd., Yulin 721405, Shaanxi, China; ⁴ Anhui University of Science and Technology, Anhui Provincial Research Institute of Modern Coal Processing Technology, Hefei 232001, Anhui, China)

Abstract: To address the low vacuum filtration efficiency and high filter cake moisture content of coal gasification fine slag, this study investigated an entrained-flow coal-water slurry gasification fine slag with an initial filter cake moisture content of 53.14%. An $L_{16}(4^3)$ orthogonal design was used to examine the effects of grinding conditions on dewatering performance. Particle size distribution (PSD), N_2 adsorption/desorption, mercury intrusion porosimetry (MIP), low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), and differential scanning calorimetry (DSC) were combined to analyze the variations in particle characteristics, pore structure, water occurrence state, and dewatering behavior. The results show that range analysis indicated the main-effect trend of the three factors on filter cake moisture content followed the order of grinding time > slurry concentration > grinding frequency. Analysis of variance showed that the overall effects of the three factors did not reach statistical significance at the 95% confidence level. However, grinding time showed a near-significant trend, and significant differences were observed between 5 min and 15 min, as well as between 5 min and 20 min. Compared with the raw slag CQ, under the conditions of 30% slurry concentration and 15 min grinding, the filter cake moisture content of CQ7 decreased from 53.14% to 42.90%, corresponding to a relative reduction of 19.27%. The cumulative filtrate volume during the 25 s above-slurry filtration stage increased from 127.10 mL to 153.00 mL, representing an increase of 20.4%. Moderate mechanical grinding promoted particle breakage and particle size redistribution, significantly reduced the pore volume larger than 5500 nm, and weakened water adsorption in fine pores and capillary retention, thereby improving water migration and discharge and enhancing dewatering performance. In contrast, under the conditions of 40% slurry concentration, 5 min grinding time, and 50 Hz grinding frequency, the filter cake moisture content of CQ13 remained as high as 50.30%, indicating that the dewatering enhancement was limited under high-solid-concentration and short-duration grinding conditions. Overall, the key to enhancing the dewatering of coal gasification fine slag by mechanical grinding lies in the coordinated optimization of particle size distribution, pore size distribution, and water occurrence state, thereby reducing water storage space and improving drainage pathways. This study provides a theoretical basis and technical guidance for the efficient dewatering of coal gasification fine slag.

Keywords: coal gasification fine slag; mechanical grinding; pore structure; factor effects; enhanced dewatering

引 言

煤气化是煤炭清洁高效转化的重要途径。随着现代煤化工产业的快速发展,煤气化渣排放量持续增加,而气化细渣通常以高含水黑水形式排出,若不能实现高效脱水,将增加其运输、堆存及后续

资源化利用成本,并加大环境管理难度^[1-3]。气化细渣约占煤气化固废总量的40%~60%,其产量随煤气化产业扩张而持续增长^[4]。

气化细渣具有为复杂的组成与结构特征,使其难以高效脱水。已有研究表明,气化细渣由残碳与灰分颗粒共同构成,具有复杂的矿物组成、碳-灰嵌

布特征和显著的物化非均质性,颗粒级配、孔径分布及表面性质差异明显,这些因素共同决定了其固液分离行为^[5-6]。同时,煤气化渣在形成过程中还伴随着复杂的元素迁移与结构演变,这进一步增加了后续分离与处理过程的复杂性^[7]。在气化细渣滤饼中,水分并非仅以颗粒间自由水形式存在,而是同时包括自由水、毛细水、孔隙水以及受孔结构和表面作用约束的束缚水等多种赋存形态,其中高碳多孔结构和发育的孔道体系是造成其强持水性的关键原因^[5,8-9]。在研究路径上,国内已有工作从工况、结构、能耗、环境耦合角度出发,系统讨论黑水浓度与颗粒孔结构、滤饼结构对脱水的协同影响,并提出在效率、结构稳定性与能耗之间的折中区间^[10]。在真空过滤过程中,颗粒粒径组成、颗粒形貌及孔结构特征会影响滤饼堆积方式、孔道连通性和过滤阻力,从而决定滤液排出速率与终点含水率^[11]。随着过滤进行,滤饼还会发生压密、颗粒重排以及局部收缩裂纹演化,这些结构变化会进一步影响水分迁移路径和脱水效率^[11-12]。因此,气化细渣脱水困难并非单纯由操作参数决定,还是颗粒结构、孔结构、水分赋存状态与滤饼演化共同作用的结果。

围绕气化细渣难脱水这一问题,研究者已从设备强化、工艺优化和结构调控等方面开展了大量研究。工程应用表明,压滤、真空过滤等工艺可在一定程度上实现气化细渣减量化处理,但仍普遍存在脱水效率有限、能耗较高和滤饼含水率波动较大的问题^[3]。从机理研究看,孔结构及其尺度分布与机械脱水行为密切相关,较大孔径区间孔内水的释放对降低滤饼残余水分具有重要作用^[8-9]。值得注意的是,机械研磨能够通过破坏颗粒内部持水孔隙、调节孔径分布和重构颗粒级配,促使内部孔隙水向外部可迁移水转化,从而显著改善气化细渣的真空过滤脱水效果^[13]。然而,现有研究更多侧重于脱水设备比较、工艺参数优化或单一结构因素分析,对于气化渣本征结构变化引起的粒级重构、孔结构演化与水分赋存状态演变之间的内在关联仍缺乏系统阐释^[11,13]。特别是,适度研磨如何改善持水孔结构、强化排水通道,而过度研磨又是否会因细颗粒增多和孔道堵塞恶化脱水效果,其作用边界及影响机制尚不清晰。

综上,本文以气流床水煤浆气化工艺产生的气化细渣为研究对象,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交法系统考察浆液浓度、研磨时间和研磨频率对滤饼含水率的影

响。并选取代表性样品,结合粒度分布、 N_2 吸附/脱附、压汞仪、低场核磁共振和差示扫描量热等手段,系统揭示机械研磨诱导下的颗粒破碎与粒级重构、孔结构演化、水分赋存状态演变规律及其对真空过滤脱水行为的影响机制。研究可为气化细渣高效脱水过程强化提供理论依据和技术借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品来源与制备

本研究所用气化细渣 CQ 取自长青能源气流床水煤浆气化工艺。原渣经充分混匀后密封保存,试验前按实验要求进行分散和制浆。工业分析结果表明,CQ 的灰分含量为 67.45%,挥发分为 13.41%,固定碳为 28.02%,说明该样品属于典型高灰分、含残碳的气化细渣体系。原渣粒度分布较宽,D50 约为 $81\ \mu\text{m}$,D90 约为 $278\ \mu\text{m}$,增量分布主峰约位于 $267\ \mu\text{m}$,表明其中仍含有一定比例的中粗粒颗粒。在相同陶瓷膜真空过滤条件下,原渣滤饼含水率为 53.14%,表现出较强的持水性和较差的机械脱水性能。因此,有必要通过机械研磨调控颗粒级配和孔结构,以改善滤饼中水分迁移与排出条件。

1.2 真空脱水实验

正交试验所需 16 组样品采用棒磨法破碎气化细渣孔隙,浆料浓度(25%–40%),研磨时间(5min–20min),研磨频率(30Hz–50Hz)。真空过滤试验采用陶瓷膜真空过滤装置进行,由陶瓷膜滤板(江苏博通环保科技有限公司),陶瓷膜型号为(M20 型号),平均孔径为 $8\ \mu\text{m}$,有效过滤面积为 $64\ \text{cm}^2$ 。每次试验加入质量浓度为 12% 的气化细渣浆液 4L,过滤真空度控制在 0.07–0.09 MPa。过滤过程包括液下抽滤 20 s 和液上抽滤 25 s。过滤结束后,将滤饼整体从膜面剥离,并在中心及边缘区域均匀取样;滤饼厚度采用游标卡尺在中心及四周多个位置测量后取平均值,平均厚度为 4mm。滤饼含水率采用烘干法测定,样品在 105°C 下干燥至恒重后计算。每组试验重复 5 次,取平均值作为最终结果。原渣记为 CQ,正交样品按实验序号记为 CQ_n ,根据极差分析得到的最优水平组合 $\text{A}_2\text{B}_3\text{C}_2$ 另行开展验证试验,所得样品记为 CQ_{17} 。

1.3 方法

采用 $L_{16}(4^3)$ 正交设计,以浆液浓度、研磨时间和研磨频率为考察因素,对机械研磨工况进行筛选。

以滤饼含水率作为正交试验的主要评价指标,因为该指标能够直接表征过滤终点的脱水效率,是评价气化细渣脱水性能的关键工艺参数^[14]。为保证结果可靠性,各工况脱水试验均实施5次,结果取平均值。

使用激光粒度分布仪(BT-9300S)分析CQ在不同研磨条件下的粒径分布(PSD),用于表征机械研磨引起的颗粒细化和粒级重构,重点用于支撑后续孔结构与脱水性能关联。物理吸附仪(Autosorb-IQ2)用于测试样品的微孔/间孔结构、比表面积和孔径分布,脱气条件:300 °C、10 min。压汞仪(AUTOPORE IV)分析大孔孔径分布。

采用Frenkel-Halsey-Hill(FHH)模型计算分形维数D值,用于表征物料的不规则特征及表面粗糙度。

$$\ln V = A \left[\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \right] + C \quad (1)$$

$$A = D - 3 \quad (2)$$

使用低场核磁共振(LF-NMR)测试孔隙水尺寸分布。测试滤饼中水分的横向弛豫时间 T_2 分布,其中 T_2 可反映水分受颗粒表面和孔结构约束的强弱; A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 分别表示不同 T_2 弛豫峰对应的峰面积占比,用于表征不同赋存状态水分的相对比例。测试参数:超声间隔0.6 ms;等待时间1.5 s;回波次数10000;扫描次数32次。测量后,通过回波数据的多指数反演计算了横向松弛时间(t_2)分布,其中51个预设衰减时间以对数方式间隔,从0.1 ms到10 s。 t_2 与孔径的关系可表示为:

$$\frac{1}{t_2} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (3)$$

t_2 是表面相互作用引起的横向松弛时间, ρ_2 是表示横向松弛强度的常数, $\rho_2=50$ nm/ms, S/V 是相对于孔径的表面体积比。差示扫描量热仪(NETZSCH DSC 200F3)用于测定滤饼在-30 °C至30 °C范围内的水状态,加热速率为10 °C/min。

$$W_f = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \quad (4)$$

$$W_{nf} = W_t - W_f \quad (5)$$

采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)区分可冻结水 W_f 和不可冻结水 W_{nf} ,以辅助判断水分束缚状态。 ΔH 为差示扫描量热法测得的相变焓; ΔH_0 为冰融相变焓,334.7 J/g; W_t 为滤饼总含水量; W_f 为可冻水含量; W_{nf} 为不可冻水含量。

表1 气化细渣的工业分析

Table 1 Proximate analysis of coal gasification fine slag

样品	工业分析(wt.%)			
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_{daf}
CQ	0.59	67.45	13.41	28.02

注:ad:空气干燥基;d:干燥基;daf:干燥无灰基

2 结果与讨论

2.1 基于正交设计的主效应分析与方差分析

表2 因素水平表

Table 2 Levels of factors in the orthogonal design

因素水平	浓度(%)	时间(min)	频率(Hz)
1	25	5	30
2	30	10	35
3	35	15	40
4	40	20	50

表2为正交试验中研磨因素及其水平设置:浆料浓度为25%~40%,研磨时间为5~20 min,研磨频率为30~50 Hz,各因素均4个水平,覆盖了典型研磨条件。表3所示试验组合以工厂运行工况为基础,在兼顾设备稳定运行和工艺放大可行性的前提下,对关键参数进行扩展筛选,并用于识别主效应及筛选代表性工况样品开展后续机理分析^[15]。各工况试验均进行平行测定,表中结果取其平均值用于统计分析。对浆料浓度、研磨时间和研磨频率3个主效应进行分析。该设计总自由度为15,每个四水平因素占3个自由度,3个因素共占9个自由度;在未进一步引入交互项的情况下,剩余6个自由度并入残差项,用于估计未被主效应解释的实验误差。因此,表5中残差项的自由度为6。

极差分析用于比较正交试验中各因素水平对指标的影响强弱。对某因素第 i 水平,将对应试验指标求和得 K ,除以该水平出现次数 r 得均值 K_{avg} ; $R = \max(K_{avg}) - \min(K_{avg})$ 表征因素影响程度, R 值越大,说明该因素主效应越显著^[16]。测出原渣滤饼含水率为53.14%,对16组试验结果进行极差分析,表4给出最优水平组合为 $A_2B_3C_2$,对应验证试验样品CQ₁₇的滤饼含水率为43.56%。

如图1所示,随着浆料浓度由25%增加至40%,含水率均值由46.10%升至47.22%,总体呈上升趋势;研磨时间由5 min延长至20 min,含水率均值由48.04%降至44.92%;研磨频率由30 Hz增至50 Hz

时,含水率均值表现为先降低后升高。综合均值变化幅度及R值可知,三因素对滤饼含水率的影响主次顺序为:研磨时间>浆料浓度>研磨频率,其中研磨时间是影响脱水效果的最强主效应趋势。

表3 正交设计及实验结果表
Table 3 Orthogonal design matrix and experimental results

水平 实验号	浓度(%)	时间(min)	棒磨频率 (Hz)	含水率 (%)
1	25	5	30	46.70
2	25	10	35	44.30
3	25	15	40	46.50
4	25	20	50	46.90
5	30	5	35	47.55
6	30	10	30	45.38
7	30	15	50	42.90
8	30	20	40	44.80
9	35	5	40	47.60
10	35	10	50	48.20
11	35	15	30	44.70
12	35	20	35	43.96
13	40	5	50	50.30
14	40	10	40	47.30
15	40	15	35	45.60
16	40	20	30	45.70

极差分析直观、计算简便,适合用于正交试验的初筛与因素主次排序;但其统计解释力有限:只能给出影响大小的相对比较,无法判断因素效应是否显著、在哪些水平上显著,也不能区分指标波动

表4 极差分析表

Table 4 Range analysis of the orthogonal test results

极差分析表格				
项	水平	浓度(A)	时间(B)	频率(C)
K 值	1	184.40	192.15	182.48
	2	180.63	185.18	181.41
	3	184.46	179.70	186.20
	4	188.90	181.36	188.30
K _{avg} 值	1	46.10	48.04	45.62
	2	45.16	46.30	45.35
	3	46.12	44.92	46.55
	4	47.23	45.34	47.08
最佳水平		2	3	2
R		2.08	3.12	1.73
水平数量		4	4	4
每水平重复数 r		4.0	4.0	4.0

来自因素变化的可解释差异还是试验随机误差。为弥补这一不足,本文进一步引入方差分析,对误差来源进行分解并检验因素效应的显著性^[17-18]。

方差分析结果表明,在95%置信水平下,研磨时间整体效应未达到95%置信水平显著性,但呈接近显著趋势。浆液浓度、研磨时间和棒磨频率对滤饼含水率的影响均未达到显著水平($p>0.05$)。其中,研磨时间的F值最高($F = 3.725, p = 0.080$),表明其对脱水性能的影响相对更强,并呈现出接近显著的变化趋势;相比之下,浆液浓度和棒磨频率的影响较弱。总体而言,在本试验范围内,研磨时间是影响滤饼含水率变化的最强主效应趋势,但其统计显著性仍有限。

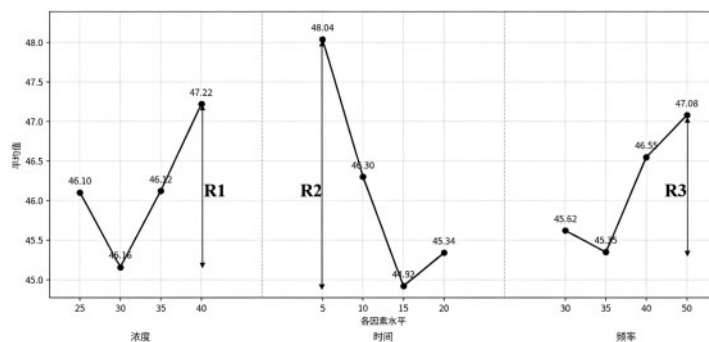


图1 滤饼含水率各因素水平均值图

Fig. 1 Main effects plot of factor level means for filter cake moisture content

由于方差分析只能判断因素整体效应是否显著,无法进一步区分具体水平间差异,在单因素方差分析基础上,采用Tukey HSD法对同一因素不同水平之间进行事后多重比较,Tukey HSD 结果表明,

研磨时间在部分水平之间存在显著差异。结果见表6。结果表明,浆液浓度和研磨频率各水平之间的两两比较均未达到显著性水平,说明二者组间差异相对有限。相比之下,研磨时间在5 min-15 min

表5 三因素方差分析结果

Table 5 Analysis of variance (ANOVA) for the three factors affecting filter cake moisture content

差异源	平方和	df	均方	F	p
浓度	8.578	3	2.859	1.391	0.333
时间	22.962	3	7.654	3.725	0.080
棒磨频率	7.731	3	2.577	1.254	0.371
残差	12.332	6	2.055		

($p=0.022$)和5 min–20 min($p=0.037$)之间差异显著,而15 min与20 min之间差异不显著($p=0.696$),表明将研磨时间延长至15–20 min可明显改善脱水,但时间效应在约15 min后趋于平台化。这进一步说明,研磨时间是影响气化细渣脱水性能的最强主效应趋势。

因此,本文后续关于研磨时间作用的讨论主要基于极差分析所反映的主效应趋势,以及 Tukey HSD 所揭示的部分水平间显著差异,而不将研磨时间表述为在整体方差分析中达到显著水平的因素。基于正交试验结果及后续机理分析需要,选取CQ₇、CQ₁₃和CQ₁₇作为代表样品开展多尺度表征。其中,CQ₇和CQ₁₇对应脱水效果较优的工况,CQ₁₃则代表高固体含量短时间研磨条件下脱水改善有限的工况,

表6 事后多重比较表

Table 6 Results of post hoc multiple comparisons

因素	比较水平	均值差值	标准误 SE	t 值	p 值
浓度	25 – 30	0.934	1.014	0.930	0.388
	25 – 35	-0.015	1.014	-0.015	0.989
	25 – 40	-1.125	1.014	-1.110	0.310
	30 – 35	-0.958	1.014	-0.945	0.381
	30 – 40	-2.068	1.014	-2.039	0.088
	35 – 40	-1.110	1.014	-1.095	0.316
时间	5 – 10	1.742	1.014	1.719	0.136
	5 – 15	3.113	1.014	3.070	0.022
	5 – 20	2.697	1.014	2.661	0.037
	10 – 15	1.370	1.014	1.351	0.225
	10 – 20	0.955	1.014	0.942	0.383
	15 – 20	-0.415	1.014	-0.409	0.696
棒磨频率	30 – 35	0.268	1.014	0.264	0.801
	30 – 40	-0.930	1.014	-0.917	0.394
	30 – 50	-1.455	1.014	-1.435	0.201
	35 – 40	-1.971	1.014	-1.181	0.282
	35 – 50	-1.723	1.014	-1.699	0.140
	40 – 50	-0.525	1.014	-0.518	0.623

用于揭示不同工况下颗粒重构、孔结构演化及水分赋存状态的差异。

2.2 粒度分布与颗粒形貌演变机制

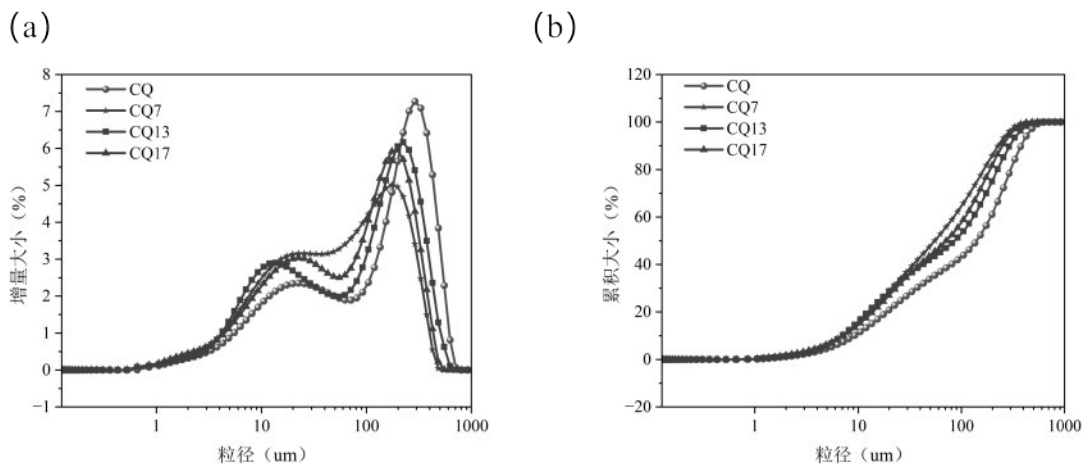


图2 颗粒尺寸增量分布(a)和累积分布(b)

Fig. 2 Incremental particle size distribution (a) and cumulative particle size distribution (b)

图2显示,随着研磨时间的延长,粒径逐渐趋于均匀化,表明颗粒的研磨效率在初期阶段达到最高。其中粗颗粒的减少最为显著,这说明在机械研磨过程中粗颗粒优先发生破碎^[19]。原渣CQ的增量分布以中、粗粒组为主,主峰约位于267 μm,累积分布整体偏右, D_{50} 约为81 μm、 D_{90} 约为278 μm,表明其粗颗粒占比较高,粒径整体偏粗,对应滤饼含

水率为53.14%,说明其较粗的粒级组成与较差的脱水表现相对应。经棒磨处理后,CQ₇和CQ₁₇的增量分布主峰分别左移至约196 μm和217 μm,累积分布曲线同步左移,其中CQ₇的 D_{50} 约为48 μm、 D_{90} 约为195 μm,CQ₁₇的 D_{50} 约为49 μm、 D_{90} 约为208 μm,说明粗颗粒组分明显减少,颗粒体系发生了显著细化与粒级重构,对应滤饼含水率分别降至42.90%和

43.56%,较原渣分别降低 10.24 和 9.58 个百分点。 CQ_{13} 虽也表现出一定细化,其主峰约位于 220 μm ,估算 D_{50} 约为 52 μm 、 D_{90} 约为 213 μm ,曲线左移幅度整体有限,滤饼含水率仍达 50.30%,仅较原渣降低 3.02 个百分点。总体来看,机械研磨使粒径分布主峰左迁移,并使 D_{50} 由约 81 μm 降至 48–52 μm ,表明

适度研磨能够促进颗粒细化与粒级优化,且这一变化与脱水性能提升趋势基本一致^[20]。30%、15 min 条件下的粒级调控效果更为明显,而高固含量短时间研磨条件下,粒级优化和脱水改善均不充分,这与气化细渣脱水中颗粒紧密堆积及孔道排水协同作用的认识一致^[21–22]。

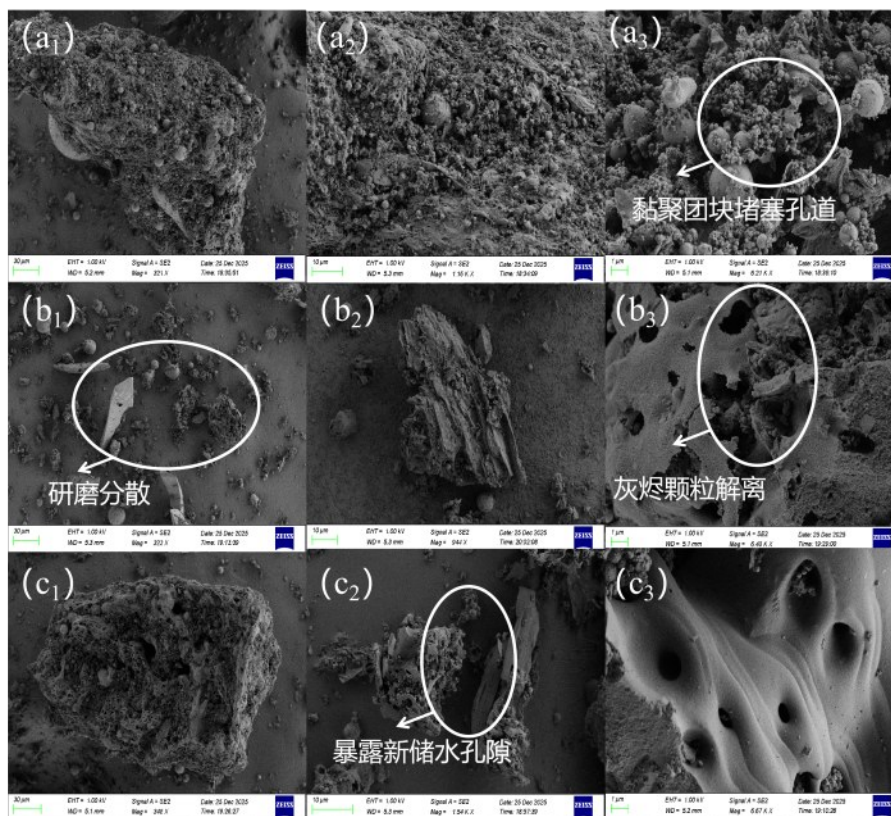


图3 CQ及 CQ_n 扫描电镜图

Fig. 3 SEM images of representative CQ and CQ_n samples

图3展示了残留碳颗粒与灰烬颗粒的形态差异。碳颗粒呈不规则几何形状,具有松散的多孔结构(图3b1),而灰烬颗粒则为表面光滑的球形(图3a2)。较大的灰烬颗粒以独立形式存在,而细小的灰烬颗粒与碳颗粒形成黏聚团块(图3a3)。炭灰的空间分布主要呈现三种形态:(i)碳基质包裹灰烬核心,(ii)颗粒间桥接形成交联网络,(iii)离散分布^[6]。图3表明,研磨可逐步减小CGFS颗粒尺寸并提升尺寸均匀性。然而,如(图3a3)所示,细颗粒积聚并堵塞碳孔隙,可能导致水分滞留^[23]。(图3c2)中的断裂带表明,研磨过程中外力作用使大颗粒破碎,暴露出新的储水孔隙,而(图3c3)中灰烬颗粒的解离减少了孔隙中的聚集,有利于水分排出。

2.3 孔结构重构表征与分形定量

由图4(a)可知,四组样品在 0.5 – 10 nm 范围内

均呈明显多峰分布,表明气化细渣具有典型的微介孔复合孔结构。原渣 CQ 在 1.5 nm 和 4.5 – 6.0 nm 附近分布较高,说明其微细孔吸附位点和介孔贡献较为明显,可能对应更强的水分吸附滞留和毛细束缚作用,对应较高含水率。相比之下, CQ_7 在 0.5 – 10 nm 范围内整体分布最低,尤其 < 2 nm 和 2 – 4 nm 孔段削弱明显,表明微孔吸附位点和小介孔相关滞留作用均有所减弱,其含水率最低。 CQ_{13} 在 1 – 2 nm 和 3 – 4 nm 附近峰值较高,说明高固体含量短时间研磨增加了微/小介孔贡献,增强了水分吸附滞留和孔隙束缚作用。 CQ_{17} 曲线整体介于 CQ_7 与 CQ_{13} 之间,在 < 2 nm 区域未明显增强,但在 4 – 6 nm 孔段仍保留一定介孔贡献。

MIP 结果进一步表明,较大尺度孔结构变化主要影响储水能力。根据孔径分布特征并结合后续

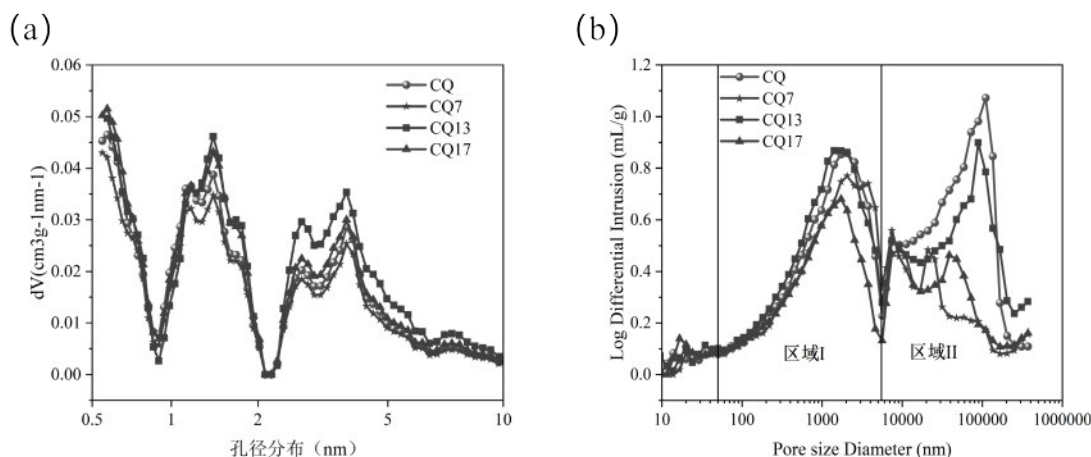


图4 不同研磨条件下气化细渣的孔径分布

Fig. 4 Pore size distribution of gasification fine slag under different grinding conditions

注:(a) N_2 吸附/脱附测定的微孔与介孔分布;(b)压汞法测定的大孔分布(a) Micro- and mesopore distribution obtained from N_2 adsorption/desorption; (b) Macropore distribution determined by MIP

水体空间分布分析,将孔径划分为两个区域:区域I (50 - 5500 nm)代表大孔分布,区域II (5500 - 220000 nm)代表超大孔分布。由图4(b)和表7可知,原渣CQ的总孔容最高,为1.9856 mL/g,孔隙率为79.7269%,区域I和区域II孔隙体积分别为0.8954和1.0040 mL/g,说明其内部储水空间较为发达。机械研磨后,各样品总孔容均下降,其中CQ₇、CQ₁₃和CQ₁₇分别为1.3640、1.9220和1.2824 mL/g;体积密度则由CQ的0.4015 g/mL分布提高至0.5233、0.4126和0.5518 g/mL,表明颗粒堆积趋于致密。尤其是CQ₇和CQ₁₇,孔隙率分别降至71.3754%和70.7603%,说明在30%、15 min条件下更有利于压缩整体孔隙空间并减少储水量。

比较区域孔体积可知,样品差异主要体现在区域II。CQ和CQ₁₃的区域II孔隙体积较高,而CQ₇和CQ₁₇分别仅为0.4588和0.5033 mL/g,说明有利脱水

的工况显著压缩了较大孔段储水空间,降低了自由水和孔隙水的容纳能力。CQ₁₃虽然区域I孔隙体积最高,但区域II仍保持较高水平,说明其既暴露了新的储水空间,又未有效削弱大孔储水空间,因此整体不利于脱水。CQ₁₇虽在 N_2 分布中局部介孔段仍有一定保留,但其总孔容最低、孔隙率最低、体积密度最高,且区域II孔隙体积明显低于CQ和CQ₁₃,说明其优势主要来自储水空间压缩与水分迁移通道优化,而非微介孔吸附作用的最大程度削弱^[24]。

机械研磨对气化细渣脱水性能的提升并非由单一孔径尺度决定,而是微介孔吸附与毛细滞留作用减弱,以及大孔储水空间和渗流通道重构共同作用的结果。这说明,机械研磨改善脱水性能的关键在于兼顾微细孔滞留作用减弱和大孔储水空间压缩之间的协同优化。

表7 通过MIP测定的CQ_n孔隙结构Table 7 Pore structure parameters of CQ_n determined by MIP

样品	孔隙率 (%)	平均孔径 (nm)	总孔容 (mL/g)	体积密度 (g/mL)	表观(骨架)密度 (g/mL)	区域 I 孔隙体积 (mL/g)	区域 II 孔隙体积 (mL/g)
CQ	79.7269	334.08	1.9856	0.4015	1.9806	0.8954	1.0040
CQ7	71.3754	430.93	1.3640	0.5233	1.8281	0.8394	0.4588
CQ13	79.2956	314.49	1.9220	0.4126	1.9926	0.9434	0.8544
CQ17	70.7603	330.43	1.2824	0.5518	1.8870	0.6944	0.5033

图5利用 N_2 吸附/脱附等温线与FHH分形模型表征了样品在微介孔尺度的吸附行为及孔结构复杂性。由图5a可知,四组样品均呈现明显的吸附/脱附滞后环,表明气化细渣中存在较发育的介孔结

构,并具有典型的毛细凝聚特征。不同样品的整体吸附量大小规律为CQ₁₃>CQ>CQ₁₇>CQ₇,说明CQ₁₃的表面吸附能力和毛细凝聚倾向最强,而CQ₇的微介孔吸附作用最弱。结合滤饼含水率结果可知,较高

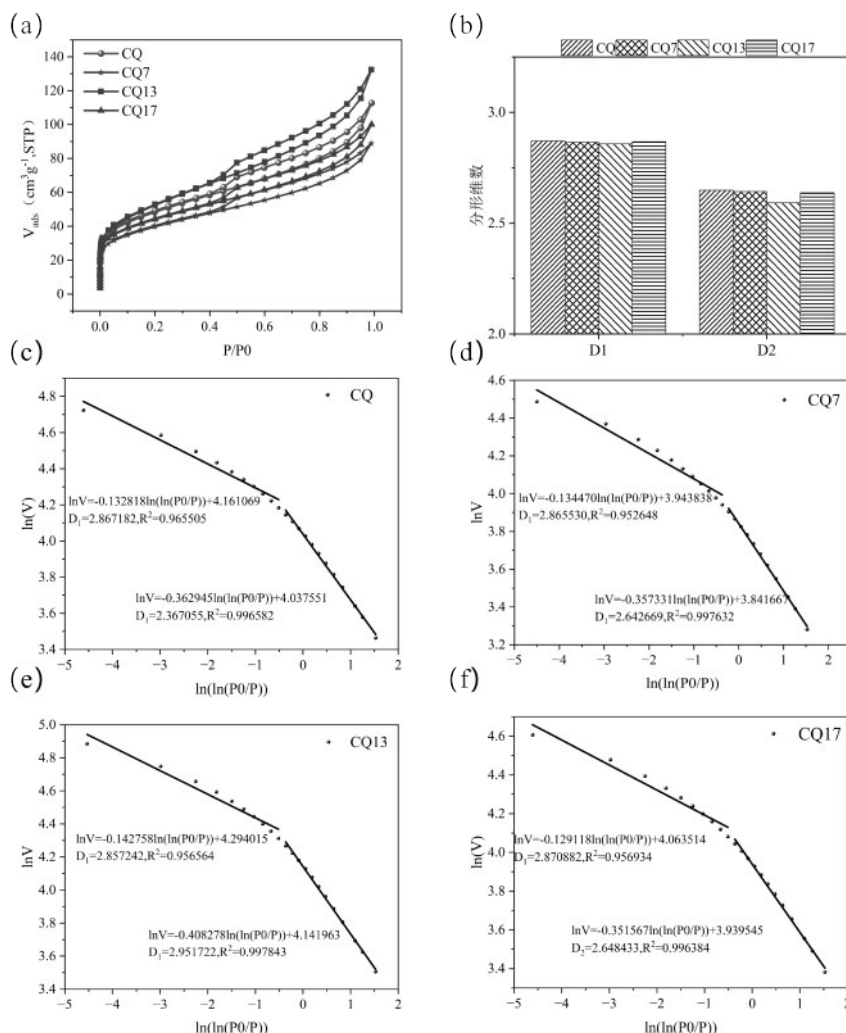


图5 N₂吸附/脱附等温线(a)、分形维数(b)及基于FHH模型的线性拟合(c-f)

Fig. 5 N₂ adsorption-desorption isotherms (a), fractal dimensions (b), and linear fitting based on the FHH model (c-f)

吸附量通常对应更强的束缚水和毛细水滞留倾向。

图5b给出了基于FHH模型计算得到的分形维数。 D_1 为高相对压力区($P/P_0 > 0.5$)分形维数,反映较大孔结构相关的分形特征; D_2 为低相对压力区($P/P_0 < 0.5$)分形维数,反应较小孔或表面微观粗糙度相关的分形特征^[25]。图5(c-f)中各样品拟合曲线的 R^2 均大于0.92,表明拟合效果可靠。其中 D_1 反映颗粒表面粗糙度特征,数值越大表明表面具有较高的吸附率; D_2 指标反映孔结构特征, D_2 值越大表明颗粒孔隙的吸附性能越弱。本研究中分形维数 D_1 范围为2.870882至2.857242, D_2 范围为2.648433至2.591722。 D_1 变化量为0.01364, D_2 变化量为0.056711, D_2 变化更为明显,因此颗粒吸附性能的变化主要受孔结构变化主导。CQ13比其他样品 D_2 值明显降低,说明其颗粒孔隙的吸附性增强。分形特性与脱水性能之间并不存在简单的对应关系,仍需

结合孔径分布和水分赋存状态综合判断^[26]。

结合等温线吸附量大小规律以及前述孔径分布结果可知,CQ₇的整体吸附量最低,说明其微介孔吸附作用和毛细滞留效应较弱,更有利于水分迁移与排出;CQ₁₃的整体吸附量最高,说明其微介孔相关吸附与毛细凝聚作用更强,其 D_2 最低,表明低压区小孔结构或表面微观非均匀性也发生了变化。CQ₁₇的吸附特征与孔结构调控效应介于CQ₇与CQ₁₃之间。由此可见,机械研磨对脱水性能的影响并不取决于单一分形维数的变化,而是与微介孔吸附作用、毛细滞留效应以及储水空间和排水通道的协同调控密切相关。

2.4 研磨体系中的水赋存状态演变

LF-NMR中 T_2 弛豫时间与水分所处孔隙尺度及受限程度密切相关。一般而言, T_2 越短,说明水分与颗粒表面或孔壁之间的相互作用越强,水分迁移

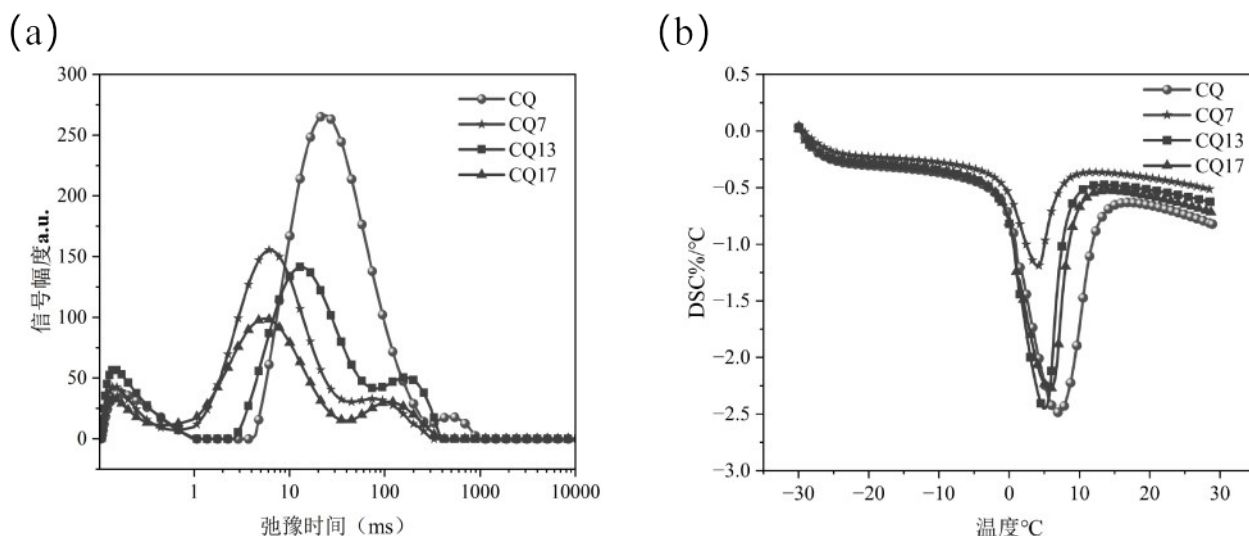


图6 滤饼样品的水分赋存特征:(a) T_2 横向弛豫时间分布;(b) $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温过程的 DSC 曲线

Fig. 6 Water occurrence characteristics of filter cake samples: (a) T_2 transverse relaxation time distributions; (b) DSC curves during heating from $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

自由度越低; T_2 越长, 则说明水分受限程度较弱, 更接近可迁移水或自由水状态。结合气化细渣滤饼孔结构特征及已有低场核磁研究, 本文根据 T_2 谱峰位置将水分划分为三个赋存区间: T_{21}/A_{21} 对应强束缚水或吸附水, 主要与微细孔表面吸附作用有关; T_{22}/A_{22} 对应毛细水或孔隙水, 主要受介孔和大孔中的毛细作用控制; T_{23}/A_{23} 对应弱受限水或相对自由水, 反映滤饼中较易迁移和排出的水分。 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 分别表示对应弛豫峰面积占比, 可用于比较不同研磨条件下水分赋存状态的相对变化。

图6(a)给出了滤饼的 T_2 分布, 结合表8将水体划分为: T_{21}/A_{21} (强束缚/吸附水)、 T_{22}/A_{22} (毛细水/孔隙水) 和 T_{23}/A_{23} (相对自由水/自由水)^[27]。该结果揭示了机械研磨引起的孔结构变化如何进一步影响水分赋存状态, 并最终反映到脱水差异上。原渣 CQ 的主峰主要集中在 T_{22} 区域, 且峰面积占比最大, 说明其滤饼中毛细束缚水占主导, 同时较长弛豫时间区仍保留一定峰强, 表明体系中仍存在一定量可迁移水分。相比之下, CQ₇ 和 CQ₁₇ 的 T_{22} 、 T_{23} 峰整体向短弛豫时间方向移动, 其中 CQ₇ 左移最明显, 且长 T_2 区峰强显著减弱, 说明经有效研磨后水分自由度下降。CQ₁₃ 则表现出不同特征: 其短 T_2 端峰有所增强, 但长 T_2 区并未像 CQ₇ 那样明显削弱, 表明该样品中一部分水向更强受限状态转化的同时, 仍保留一定可动水, 呈现出强束缚水增加与自由水残留。CQ₇ 的 A_{23} 由 CQ 的 9.115% 降至 4.214%, 说明相对自由水比例明显降低; 同时 T_{22} 由 24.362 ms 缩短至 8.010

ms, 表明残余孔隙水受限程度增强。这并不意味着滤饼中水分更难排出, 而是说明经过有效研磨和过滤后, 易迁移水分已被大量排出, 滤饼中残留水主要转化为较强受限状态, 因此最终含水率明显降低。

在 30% 浓度、15 min 的较优工况内, CQ₇ 与 CQ₁₇ 的含水率均降至 43% 上下, 但两者在水分调控方式上存在一定差异。CQ₇ 的 A_{23} 最低, 同时 T_{22} 缩短至 8.010 ms, 表明自由水削减更充分, 毛细水受限程度增强^[26]; 其 $W_f = 8.39\%$ 、 $W_m/W_f = 80.44\%$, 说明更易冻结、易排出的水分明显减少。CQ₁₇ 的 T_{22} 进一步缩短至 7.144 ms, 表明残余毛细水受限程度更高, 但 $A_{23} = 7.679\%$, 仍高于 CQ₇, 说明其自由水残留略多。由此可见, CQ₇ 更偏向于削减自由水, 而 CQ₁₇ 更表现为增强残余水约束, 两者终含水率虽接近, 但过滤过程的推进方式可能存在差异。

相比之下, CQ₁₃ 的 A_{21} 和 A_{23} 均高于其他研磨样品, 说明该工况下既产生了更多强束缚水, 又未能充分排出相对自由水。该结果表明, 高固含量短时间研磨可能暴露新的微细孔吸附位点, 但不足以有效重构排水通道, 导致吸附滞水和可动水残留并存, 从而使滤饼含水率仍保持在较高水平。图6(b)的 DSC 结果与之相一致: CQ₇ 的 W_f 最低、融化峰最弱; CQ 与 CQ₁₃ 的 W_f 较高, 融化峰更明显, 说明其仍保留较多可冻结水, 这与 NMR 中自由水或弱受限水占比较高的结果相吻合。

NMR 与 DSC 结果可知, CQ₁₃ 脱水改善有限的主

要原因在于结合水增加与自由水残留并存的双重滞水状态—“两极化滞水”，而CQ₇与CQ₁₇的差异则主要体现在自由水削减程度和残余毛细水受限程度的不同。这说明，当终含水率接近目标值时，工况优选除考虑最终含水率外，还应结合能耗和过滤过程收敛特征进行综合判断。

DSC 结果与 LF-NMR 结果具有较好的互补关系。LF-NMR 主要反映水分受限程度和不同弛豫组分的相对比例，而 DSC 通过冻结/融化行为区分可冻结水和不可冻结水。一般而言，LF-NMR 中较长 T₂ 组分对应受限程度较弱的水分，与 DSC 中可冻结水 W_f 具有一定对应关系；较短 T₂ 组分对应吸附水或强束缚水，与不可冻结水 W_{nf} 关系更为密切。CQ7 的 A₂₃ 最低，同时 W_f 也最低，说明有效研磨后滤饼中相对自由水和可冻结水均明显减少，易迁移水分已被充分排出。CQ₁₃ 的 A₂₁ 和 A₂₃ 均较高，且 W_f 仍保持较高水平，说明其既存在较强吸附束缚水，又残留较多可冻结水，进一步印证其脱水改善有限。CQ₁₇ 的 T₂₂ 较短，但 A₂₃ 和 W_f 均高于 CQ₇，说明其虽然增强了部分残余毛细水的受限程度，但自由水削减程度不及 CQ₇。因此，LF-NMR 与 DSC 结果共同表明，机械研磨强化脱水的关键不只是改变水分束缚强度，而是促进相对自由水排出并减少孔隙储水空间。

表 8 水分空间分布与赋存状态

Table 8 Spatial distribution and storage state of water fractions

指标类别	参数	CQ	CQ ₇	CQ ₁₃	CQ ₁₇
总体脱水指标	W _f (%)	53.14%	42.90%	50.30%	43.56%
	T ₂₁ (ms)	0.196	0.162	0.164	0.171
	T ₂₂ (ms)	24.362	8.010	16.322	7.144
	T ₂₃ (ms)	195.560	156.125	176.307	164.913
T ₂ 弛豫时间及峰值比例	A ₂₁ (%)	11.670	19.335	25.863	21.787
	A ₂₂ (%)	79.216	76.451	62.898	70.533
	A ₂₃ (%)	9.115	4.214	11.239	7.679
	W _f (%)	28.63	8.39	20.72	21.92
冰冻结状态	W _{nf} (%)	24.51	34.51	29.58	21.64
	W _{nf} /W _f (%)	46.12	80.44	58.81	49.68

2.5 研磨体系中的脱水动力学

为比较不同研磨条件下气化细渣的过滤响应特征，本文结合 Ruth 方程^[28]所反映的恒压过滤基本机理，对滤液体积随时间的变化规律进行分析。恒压过滤过程中，初期以液相快速排出为主，随后随着滤饼逐渐形成和增厚，体系阻力不断增大，滤液

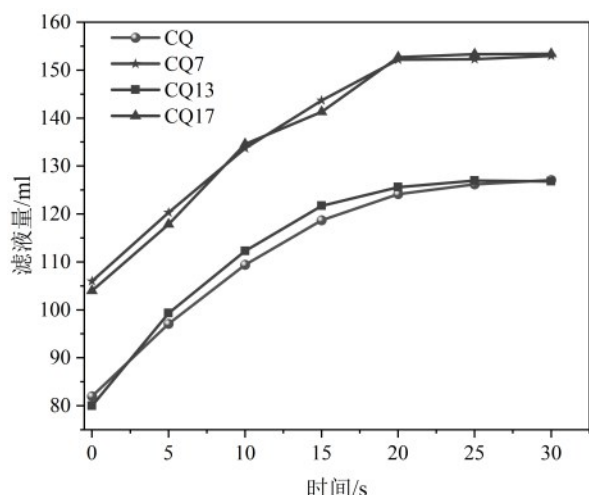
体积增长速率逐步下降^[29]。鉴于本文重点在于揭示机械研磨引起的孔结构演化、水分赋存变化与脱水性能之间的关联关系，因此对过滤过程主要进行机理解释和阶段特征分析，而不进一步开展严格动力学拟合求参。

本研究采用液下真空 20 s、液上真空 25 s 的过滤制度，图 7 给出了液上阶段(t = 0)累计滤液体积 V(t) 的变化。液上起始体积分别为 CQ = 82 mL、CQ₇ = 106 mL、CQ₁₃ = 80 mL、CQ₁₇ = 104 mL，其中 CQ₇ 和 CQ₁₇ 较 CQ 分别提高约 29% 和 27%，说明其液下预脱水更充分；而 CQ₁₃ 与 CQ 基本接近，预脱水改善不明显。

液上阶段的差异主要体现在 10 - 20 s 区间。0 - 10 s 内，各组滤液增量为 27.43 - 32.30 mL，差别较小；而在 10 - 20 s 内，CQ₇ 和 CQ₁₇ 的滤液增量分别为 18.49 mL 和 18.12 mL，明显高于 CQ 的 14.74 mL 和 CQ₁₃ 的 13.30 mL，说明 CQ₇ 和 CQ₁₇ 在滤饼逐渐固结阶段仍能保持较强的排水能力。20 s 后，各组逐渐趋于平台，其中 CQ₇ 和 CQ₁₇ 的增量仅为 0.80 mL 和 0.70 mL，平台化更早、收敛更快；而 CQ 在该阶段仍有 2.93 mL 的增量，反映其整体过滤效率较低。

液上 25 s 末，CQ、CQ₇、CQ₁₃ 和 CQ₁₇ 的累计滤液体积分别为 127.10、153.00、126.81 和 153.41 mL。其中，CQ₇ 和 CQ₁₇ 较 CQ 分别提高约 20.4% 和 20.7%，而 CQ₁₃ 与 CQ 基本一致。综合液上起始体积提升、10 - 20 s 区间推进增强及更早的平台收敛特征可知，CQ₇ 和 CQ₁₇ 在液下预脱水和液上抽吸阶段均表现出较稳定的优势，是脱水效率提升的主要贡献工况；而 CQ₁₃ 虽前期滤液排出较快，但中后期推进不足、终值提升不明显，说明其排水通道改善有限，滤饼固结后阻力增长更快。

从工程应用角度看，机械研磨强化脱水不宜简单追求更高研磨强度，而应在滤饼含水率、滤液排出效率和研磨能耗之间进行综合优化。本研究结果表明，30% 浆料浓度和 15 min 研磨时间可获得较好的脱水效果。当仅以最低滤饼含水率为目标时，CQ7 工况表现更优；而在滤饼含水率接近的情况下，CQ17 对应的较低研磨频率具有潜在能耗优势，更适合后续连续化运行和工业放大。因此，工程优化中可将“30% 浆料浓度、约 15 min 研磨时间、适中研磨频率”作为优先筛选区间。

图7 不同机械研磨条件下CQ_n脱水动力学Fig. 7 Dewatering kinetics of CQ_n under different grinding conditions

3 总结与展望

结果表明,机械研磨对气化细渣脱水具有明显的有效作用区间,其强化效果并不随研磨强度增强,而取决于颗粒级配优化、储水空间压缩与排水通道改善之间的协同作用。适度研磨能够有效削弱大孔储水和微介孔滞水作用,促进水分迁移与排出,从而显著提升脱水性能;而不合理工况则可能暴露更多微细储水空间,导致结合水增加、自由水残留,使脱水强化程度受限。

(1)机械研磨强化气化细渣脱水具有有效作用区间,其中研磨时间是最强主效应趋势。正交试验结果表明,极差分析显示三因素主效应趋势为研磨时间 > 浆料浓度 > 研磨频率,浆料浓度30%、研磨时间15 min是最优组合,在该条件下CQ7和CQ17的滤饼含水率分别降至42.90%和43.56%;而高固含、短时间研磨的代表样品CQ13含水率仍50.30%。说明机械研磨存在适宜强化范围,超过或偏离该范围并不能有效改善脱水性能。

(2)脱水性能提升的关键在于孔结构调控、水分赋存转化与过滤过程改善的协同作用。30%、15 min条件下表现出大孔储水空间压缩、区域Ⅱ孔隙体积下降以及微介孔吸附与毛细滞留作用减弱,从而为水分迁移和排出提供了更有利条件;而40%、5 min条件下虽总孔容下降,但由于微介孔增加、A₂₁升高且A₂₃偏高,表现出明显的“两极化滞水”特征,导致孔结构变化未能有效转化为脱水性能提升。

(3)脱水动力学结果表明,优化工况不仅降低

了滤饼终含水率,也显著提升了全过程脱水效率。30%浆料浓度、15 min研磨条件下,样品在液下预脱水阶段表现出更强初始排液能力,在液上阶段亦保持更有利的滤液增长特征,说明孔结构重构有效改善了排水通道并降低了水分迁移阻力。相比之下,CQ13虽发生一定结构变化,但由于滞水增强与可动水残留并存,其持续脱水能力改善有限。对于脱水效果相近的CQ7与CQ17,两者均实现有效强化,但CQ7更有利于削减可动水,而CQ17对残余毛细水的抑制略显明显。

(4)工程优化应以达标含水率条件下的能效最优为原则,而不宜单纯追求最低滤饼含水率。本研究表明,30%浆料浓度和15 min研磨时间是较优的工况区间;在CQ7与CQ17脱水效果接近的情况下,较低频率工况具有更好的潜在能效优势,更适合连续稳定运行。该结果说明,L16(4³)正交设计不仅可用于实验室条件下的工况筛选,也可为现场工艺放大提供参数优化方向。

符号说明

- A₂₁——T₂₁峰对应峰面积占比,%
- A₂₂——T₂₂峰对应峰面积占比,%
- A₂₃——T₂₃峰对应峰面积占比,%
- C——浆液浓度,%
- D₁——FHH分形模型高相对压力区分形维数,表征颗粒表面粗糙程度
- D₂——FHH分形模型低相对压力区分形维数,表征孔结构复杂程度
- D₅₀——累计粒径分布达到50%时对应粒径,μm
- D₉₀——累计粒径分布达到90%时对应粒径,μm
- d——粒径,μm
- f——棒磨频率,Hz
- T₂——低场核磁共振横向弛豫时间,ms
- T₂₁——第1弛豫峰对应横向弛豫时间,ms
- T₂₂——第2弛豫峰对应横向弛豫时间,ms
- T₂₃——第3弛豫峰对应横向弛豫时间,ms
- t——研磨时间,min
- W_f——DSC测得的可冻结水含量,%
- W_{nf}——DSC测得的不可冻结水含量,%
- w_t——滤饼含水率,%

参考文献

- [1] Guo F H, Chen L Q, Li Y, et al. Review on the attribute cognition and carbon-ash-water separation of coal gasification fine slag[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 320: 124121.

- [2] 王鑫, 李晓东, 李臣威, 等. 煤气化渣资源化利用现状及碳-灰分离技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2025: 1-21.
Wang X, Li X D, Li C W, et al. Current status of resource utilization of coal gasification slag and research progress on carbon-ash separation technology[J]. Journal of China Coal Society, 2025: 1-21.
- [3] 胡余龙. 粉煤气化细渣脱水技术及板框隔膜压滤机的应用[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(8): 141-144.
Hu Y L. Dewatering technology of gasification fine slag and the application of plate and frame diaphragm press[J]. Coal and Chemical Industry, 2025, 48(8): 141-144.
- [4] Qu J S, Zhang J B, Li H Q, et al. A high value utilization process for coal gasification slag: Preparation of high modulus sodium silicate by mechano-chemical synergistic activation[J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149761.
- [5] Guo F H, Zhao X, Guo Y, et al. Fractal analysis and pore structure of gasification fine slag and its flotation residual carbon[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 585: 124148.
- [6] Fan Z H, Hu C, Zhu Q L, et al. Three-dimensional pore characteristics and permeability properties of calcareous sand with different particle sizes[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2659-2670.
- [7] 伍其威, 胡世豪, 刘婧雯, 等. 准东煤在液态排渣锅炉中的结渣特性和元素迁移规律[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(6): 27-35.
Wu Q W, Hu S H, Liu J W, et al. Slagging and element migration characteristics of Zhundong coal in horizontal liquid slag cyclone furnace[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(6): 27-35.
- [8] Guo F H, Liu H, Guo Y, et al. Occurrence modes of water in gasification fine slag filter cake and drying behavior analysis: a case study[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1): 104585.
- [9] Yu W, Wang X B, Liu L J, et al. Experimental study on pore structure and mechanical dehydration of coal gasification fine slag [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(2): 3629-3640.
- [10] Guo F H, Guo Y, Qiu G F, et al. A new separation flowsheet for resources recovery from waste coal gasification fine slag black water and its benefits analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 836-845.
- [11] 郭凡辉, 武建军, 张海军, 等. 煤气化细渣陶瓷膜真空脱水试验与数值模拟[J]. 化工进展, 2022, 41(8): 4047-4056.
Guo F H, Wu J J, Zhang H J, et al. Coal gasification fine slag vacuum dewatering by ceramic membrane and numerical simulation[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(8): 4047-4056.
- [12] 吴飞飞. 焙烧-弱磁选铁精矿滤饼收缩裂纹与过滤性能优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Wu F F. Research on the cake shrinkage cracks and filterability optimization of roasting-low intensity magnetic separation iron concentrates[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [13] Chen L Q, Wu J, Zhang S Z, et al. Mechanical grinding-induced pore structure regulation in coal gasification fine slag: Multiscale investigation of water release mechanisms[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 318: 122225.
- [14] Christensen M L, Keiding K, Nielsen P H, et al. Dewatering in biological wastewater treatment: a review[J]. Water Research, 2015, 82: 14-24.
- [15] Meng J Z, Chen S L, Wang J X, et al. Experimental study on the dissolution characteristics and microstructure of carbonate rocks under the action of thermal - hydraulic - chemical coupling[J]. Materials, 2023, 16(5): 1828.
- [16] Xu M Y, Liao Z Y, Liu Y, et al. Preparation and optimization of poly (lactic-co-glycolic acid) rod-shaped particles in nano size range for paclitaxel delivery[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 1103990.
- [17] Jia J Z, Li B, Liu F. Experimental study on mix proportion parameter optimization of cement anchoring material[J]. Materials, 2020, 13(1): 137.
- [18] Chen H M, Xie C Y, Fu C, et al. Orthogonal analysis on mechanical properties of basalt - polypropylene fiber mortar[J]. Materials, 2020, 13(13): 2937.
- [19] Chen C S, Shenoy S, Pan Y H, et al. Mechanical activation of coal gasification slag for one-part geopolymer synthesis by alkali fusion and component additive method[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134585.
- [20] Zhu M B, Xie G, Liu L, et al. Influence of mechanical grinding on particle characteristics of coal gasification slag[J]. Materials, 2022, 15(17): 6033.
- [21] Li S C, Guo F H. Efficient dehydration of waste coal gasification slag based on particles tight stacking and pore channel drying: a dehydration energy cascade adaptation strategy[J]. Energy, 2025, 335: 138019.
- [22] Bourcier D, Féraud J P, Colson D, et al. Influence of particle size and shape properties on cake resistance and compressibility during pressure filtration[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 144: 176-187.
- [23] Liu B, Lv P, Ma H, et al. Study on physicochemical properties, distribution modes, and formation mechanism of coal gasification fine slag in an industrial entrained-flow gasifier[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 299: 120509.
- [24] Guo F H, Liu H, Zhao X, et al. Insights on water temporal-spatial migration laws of coal gasification fine slag filter cake during water removal process and its enlightenment for efficient dewatering[J]. Fuel, 2021, 292: 120274.
- [25] Zhang S H, Tang S H, Tang D Z, et al. Determining fractal dimensions of coal pores by FHH model: Problems and effects[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 929-939.
- [26] He H F, Liu P C, Xu L, et al. Pore structure representations based on nitrogen adsorption experiments and an FHH fractal model: Case study of the block Z shales in the Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 203: 108661.
- [27] Yu W, Wang X B, Liu L J, et al. Characterizing moisture occurrence state in coal gasification fine slag filter cake using low field nuclear magnetic resonance technology[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45 (3): 8004-8014.
- [28] Ruth B F. Studies in filtration III. Derivation of general filtration equations[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1935, 27(6): 708-723.
- [29] 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.