

林雪松,李梦凡,王东,等.细煤泥电渗、振动挤压脱水试验研究及主控因素分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):8-16.doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240048
LIN Xuesong, LI Mengfan, WANG Dong, et al. Research of electrical osmosis and vibration dehydration experiments on fine coal slurry and analysis of the main controlling factors[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(1): 8-16. doi: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240048

细煤泥电渗、振动挤压脱水试验研究及主控因素分析

林雪松¹, 李梦凡¹, 王东², 赵龙¹, 刘晟楠¹, 李沈玲¹, 桑雨³, 王来贵⁴

(1. 辽宁工程技术大学理学院, 辽宁阜新 123000; 2. 阜新高等专科学校工程系, 辽宁阜新 123000;

3. 辽宁省监狱管理局信息技术处, 辽宁沈阳 110032; 4. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要:为探寻高效、快速促进细煤泥脱水的有效途径,采用改装的空心圆柱扭剪仪进行多组平行试验,对比3载荷连续作用、2载荷同时作用、3载荷同时作用下细煤泥脱水过程与效果。研究表明:连续作用最佳脱水方案为挤压-振动-电渗;振动在挤压压力较小或脱水早期效果较好,振动脱水所需时间较短,频率接近固体固有频率时振动脱水效果最佳;电渗在挤压压力较大或脱水后期效果较好,单独挤压基础上每增加一种脱水措施均会产生新增的脱水量,同时缩短脱水时间;在相同载荷水平下,多种脱水措施同时作用的脱水效果优于连续作用。

关键词:煤泥;脱水;挤压;振动;电渗;空心圆柱扭剪仪

中图分类号:TU411.4

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2025)01-0008-09

Research of electrical osmosis and vibration dehydration experiments on fine coal slurry and analysis of the main controlling factors

LIN Xuesong¹, LI Mengfan¹, WANG Dong², ZHAO Long¹, LIU Shengnan¹, LI Shenling¹, SANG Yu³, WANG Laigui⁴

(1. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Department of Engineering, Fuxin Higher Training College, Fuxin 123000, China; 3. Information Technology Department, Liaoning Prison Administration, Shenyang 110032, China; 4. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to explore an effective way to promote the dewatering of fine coal slime efficiently and quickly, multiple sets of parallel tests were carried out by using the modified hollow cylindrical torsion shear apparatus, and the dewatering process and effect of fine coal slime under the continuous action of 3 loads, the simultaneous action of 2 loads and the simultaneous action of 3 loads were compared. The experimental results show that the best dehydration scheme for continuous action is extrusion-vibration-electroosmotic; the effect of vibration dehydration is better when the extrusion pressure is small or the early stage of dehydration is better, the time required for vibration dehydration is shorter, and the vibration dehydration effect is the best when the frequency is close to the natural frequency of the solid. The effect of electroosmosis is better in the later stage of extrusion pressure or dehydration. On the basis of single extrusion, each additional dehydration measure will produce new dehydration amount and reduce the dehydration time. The dehydration effect of continuous action under the same load level is not as good as that of simultaneous action.

Key words: coal slime; dehydration; extrusion; vibration; electro-osmosis; hollow cylinder apparatus

0 引言

煤泥脱水是选煤工作的重点和难点。以机械加压为基础形成的挤压过滤脱水技术^[1]是煤泥脱水

的主流技术与方法。机械化开采的发展和煤炭加工利用率的提高使选煤厂细粒煤泥含量与日俱增^[2]。细粒含量的增加导致挤压脱水效果急剧下降,表现为脱水时间变长和脱水后产品含水量过

收稿日期: 2024-03-03 修回日期: 2024-04-09 接受日期: 2024-04-17 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC1503102); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220695); 国家自然科学基金项目(51874157)

作者简介: 林雪松(1979-),男,辽宁丹东人,博士,副教授,主要从事多孔介质渗流方面的研究。E-mail: lxs488@qq.com

高。如何进一步提升机械加压脱水能力是当前煤泥脱水工作面临的难题之一。

在煤泥等细粒介质挤压脱水方面,理论上电渗法和振动法均具有较好的促进作用。其中,电渗法已被引入煤泥脱水领域^[3]。1939年,CASAGRANDE^[4]首次将电渗法应用于铁路挖方工程,并取得了巨大成功,电渗法的理论与实践研究也由此展开。经过多年的发展,电渗法的研究取得了丰硕成果,主要可概括为以下方面:第一,提出二维以下电渗控制方程,并给出求解方法^[5-8],对电渗机理进行了深入讨论,为电渗法提供了理论基础;第二,对电渗法中电极的相关问题进行了研究,提出电极转换技术^[9],重点讨论了电极种类与电极附近试验对象的微观结构变化关系^[10-11],分析了电极不同材质、布置方式对电渗过程与结果的影响^[12-14];第三,分析了电渗法与机械挤压^[9,15]、真空预压^[16]等方法联合作用的效果。

振动法脱水主要用于软土地基处理,已积累了丰富的工程经验^[17-18]。工程经验表明,振动法脱水可在完成脱水的同时直接改善软土本身的力学性能,充分发挥土体潜在性能^[19],但能量较大的强夯振动容易形成“橡皮土”问题。为深入研究振动法脱水,房营光等^[20]进行了室内试验,得到振动法脱水体积与脱水条件、振动次数等因素的关系,并归纳了振动法脱水的作用机制与微观机理。OSIPOV等^[21]从力学角度对振动法脱水机理进行了分析。苗永红等^[22]对振动排水条件下软黏土渗透性变化规律进行了研究。以上研究为振动法脱水奠定了理论基础。

综上,振动法脱水、电渗法脱水的研究成果显著,但存在以下问题:①煤泥脱水仍以机械挤压为主,针对挤压与电渗法联合用于煤泥脱水的研究较少,对挤压、振动法和电渗法同时用于煤泥脱水的研究更少。②振动法的相关研究主要集中在软土地基处理领域,在煤泥脱水等其他领域应用较少。③理论上,电渗法和振动法可互相补充,但目前将这2种方法共同用于煤泥脱水的研究较少。

基于已有研究,利用具有电渗试验功能的空心圆柱扭剪仪(hollow cylinder apparatus, HCA)进行试验研究,讨论挤压、挤压联合电渗法、挤压联合振动法和3种方法同时使用下细煤泥的脱水

效果,并对结果进行分析,以此研究振动法、电渗法对挤压脱水的作用效果及其特点。

1 试验对象与设备

1.1 试验对象

取辽宁阜新某选煤厂的煤泥为试验对象,将干煤泥块进行粉碎,并在室温下干燥至质量稳定。经过粉碎处理后的煤泥比现场煤泥更细,对象筛分结果见表1。表1中,“灰分质量分数”为该粒径组内部灰分质量与总质量的比。灰分质量分数合计值由各粒径组“质量分数”与“灰分质量分数”乘积后求和得到。由表1可见,小于0.075 mm粒径的煤泥质量分数已达到66.55%,煤泥粒径水平总体较细,灰分较高。试验前将煤泥含水量调整为53.00%。制样时未进行任何击实。

表1 煤泥筛分结果

Tab.1 results of coal slurry screening

粒径/mm	质量分数/%	灰分质量分数/%
≥0.50	3.17	30.66
0.25 ~ <0.50	6.02	20.91
0.125 ~ <0.25	8.75	21.37
0.075 ~ <0.125	15.51	23.41
0.045 ~ <0.075	20.89	28.01
<0.045	45.66	36.77
合计	100.00	30.37

1.2 试验设备

为更好地完成试验,对GDS公司的HCA进行适当改装。仪器改装后可完成挤压脱水、振动脱水试验,以及电渗脱水试验。改装时在试件的上、下底面分别加装电极,通过导线连接电极与HCA压力腔室外部的电源正、负极,以此形成施加在试件内部的电势。为避免电极引入对仪器的排水造成影响,使用多层铜网作为电极。将试件底座上备用孔道延伸至可与试件接触的长度,则与电极连接的导线可通过延长后的备用孔道中引向试件之外,再通过压力室侧壁上的备用孔道引出压力腔室之外与外部电源相连。仪器的备用孔道和延伸备用孔道所使用的钻孔分别见图1。

装入电极后放入压力腔室中的试件,以及连接电极导线的位置见图2。

试验中使用RIGOL-DP832型可编程直流电源与导线相连并进行供电。

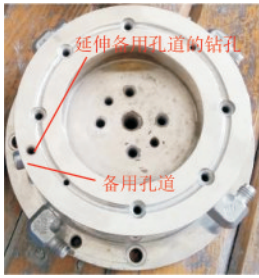


图1 备用孔道与钻孔
Fig. 1 backup tunnel and drilling

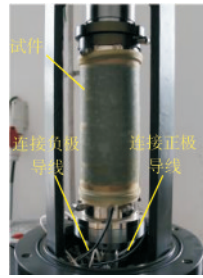


图2 试件与导线布置
Fig. 2 specimen and wire layout

2 试验目的与内容

通过改变挤压、振动和电渗3种载荷的施加顺序和大小开展试验,以此研究不同载荷组合下的细煤泥脱水规律,寻找最佳脱水方法。试验载荷施加情况见表2。表2中,电渗电压和振动频率、幅值均在参考已有研究^[10,19]和前期尝试性试验的基础上确定。挤压压力在前期尝试性试验的基础上确定。

表2 试验载荷情况

Tab.2 test load conditions

试验名称(简称)	载荷施加顺序	载荷			
		挤压压力/kPa	振动幅值/N	振动频率/Hz	电渗电压/V
3种载荷连续施加(连续试验)	连续1:挤压1→振动1/1→振动1/2→ 电渗1/1→电渗1/2	50、100、200、400	50、100	7	20、30
	连续2:挤压2→电渗2/1→电渗2/2→ 振动2/1→振动2/2		50、100	7	20、30
2种载荷同时施加	挤压、电渗同时施加	50、100、200、400			10、20、30
	挤压、振动同时施加		100	2、7、13	
3种载荷同时施加	挤压、电渗、振动同时施加	50、100、200、400	100	2、7、13	10、20、30

注:连续1中,振动1/1表示振动幅值为50 N,振动1/2表示振动幅值为100 N;电渗1/1表示电渗电压为20 V,电渗1/2表示电渗电压30 V。连续2中,电渗2/1表示电渗电压为20 V;电渗2/2表示电渗电压为30 V;振动2/1表示振动幅值为50 N;振动2/2表示振动幅值为100 N。连续1中的挤压1和连续2中的挤压2均指施加50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa静载的挤压脱水试验。

3种载荷连续施加试验时对试件施加恒定压力挤压脱水稳定后,再连续施加振动和电渗载荷,试件继续脱水,研究最终脱水量的影响因素。

2种载荷同时施加试验主要研究振动或电渗中的一种与挤压同时作用于试件时的脱水效果。挤压压力分别取50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa,电渗电压分别取10 V、20 V、30 V,振动振幅为100 N,振动频率分别取2 Hz、7 Hz、13 Hz。因此,挤压、电渗同时施加和挤压、振动同时施加,均共有12种载荷组合。后面的讨论中,挤压、电渗同时施加的试验称为挤压/电渗,用挤压/10V、挤压/20V和挤压/30V分别表示电渗电压取10 V、20 V和30 V的试验。挤压、振动同时施加的试验称为挤压/振动,用挤压/2Hz、挤压/7Hz和挤压/13Hz分别表示振动频率取2 Hz、7 Hz和13 Hz的试验。

3种载荷同时施加试验主要研究载荷同时作用于试件上时的脱水效果,并与前述载荷组合的脱水效果进行比较。由表2可知,3种载荷同时施加试验共有36种组合,需进行36次试验。在挤压压力不变的情况下,用“振动频率/电压”来表示一种载荷组合。比如,在某一挤压压力下,振动频

率为2 Hz,电渗电压为10 V,则该载荷组合试验称为2Hz/10V。

3 试验结果及分析

试验中试样较多,无法全部展示,仅展示7Hz/30V试验的试件,3种载荷同时施加试验的试件见图3。图3中,从左到右依次为50 kPa、100 kPa、200 kPa和400 kPa试验结束后的试件。该组试件可代表其他各组试件的总体特点。由于挤压压力越大脱水量越多,图3中试件体积随挤压压力的增加越来越小,400 kPa试件已明显变形。前期尝试性试验表明,挤压压力超过400 kPa时,试件在试验尚未结束时已经破坏,导致试验无法继续,因此取最大挤压压力为400 kPa。



图3 不同挤压压力下的试件
Fig.3 samples under different extrusion pressures

3.1 3种载荷连续施加

连续施加不同载荷, 试件的脱水情况见图 4。从图 4 可看出, 不同试验条件下初始阶段的两种挤压方式下脱水曲线重合较好, 说明试验的重复性强。试件在挤压脱水后, 再施加电渗和振动载荷均可产生一定的脱水量, 且每种载荷量增大时, 也可产生新的相对较少的脱水量。对比最终脱水总量可知, 连续 1 试验的脱水量明显优于连续 2 试验, 这说明载荷施加的顺序会直接影响试件的脱水效果。在挤压压力分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa 时, 电渗 2/1 脱水量均小于振动 1/1 脱水量, 但二者差距随挤压压力的增加而减小, 在挤压压力达到 400 kPa 时, 脱水量基本相等。

通过对图 4 中不同挤压压力条件下的脱水总量进行比较可看出: 随挤压压力的增加, 振动载荷形成的脱水量逐渐减小, 电渗载荷形成的脱水量基本不变, 所以二者的差值才会随挤压压力的增加而减小。该结果表明, 振动载荷脱水效果对挤

压压力较为敏感, 而电渗脱水效果受挤压压力影响较小。在连续 1 各试验中, 电渗 1/1 产生的脱水量均明显大于振动 1/2 的脱水量, 而连续 2 各试验在挤压压力较小时振动 2/1 的脱水量大于电渗 2/2 的脱水量, 挤压压力较大时 (挤压压力 400 kPa) 则不满足。这说明在施加载荷顺序合理的情况下 (如采用阶梯方式施加载荷), 第二种载荷第一阶梯脱水总量一定大于第一种载荷的最后阶梯脱水总量; 若施加载荷的顺序不合理, 则只能在挤压压力较小时满足。

在所有试验条件下, 振动脱水时间均少于电渗脱水时间, 证明振动脱水速度快, 且振动脱水快于电渗脱水的状态不随挤压压力的变化而变化。振动和电渗对挤压脱水可形成补充作用, 但此作用随挤压压力的增加而逐渐减弱。由图 4 中施加振动和电渗阶段的脱水曲线可见, 曲线的总体斜率随挤压压力的增加而减小, 但图中曲线对此趋势表现得不够明显, 下面通过各种载荷的脱水质量比进行说明。

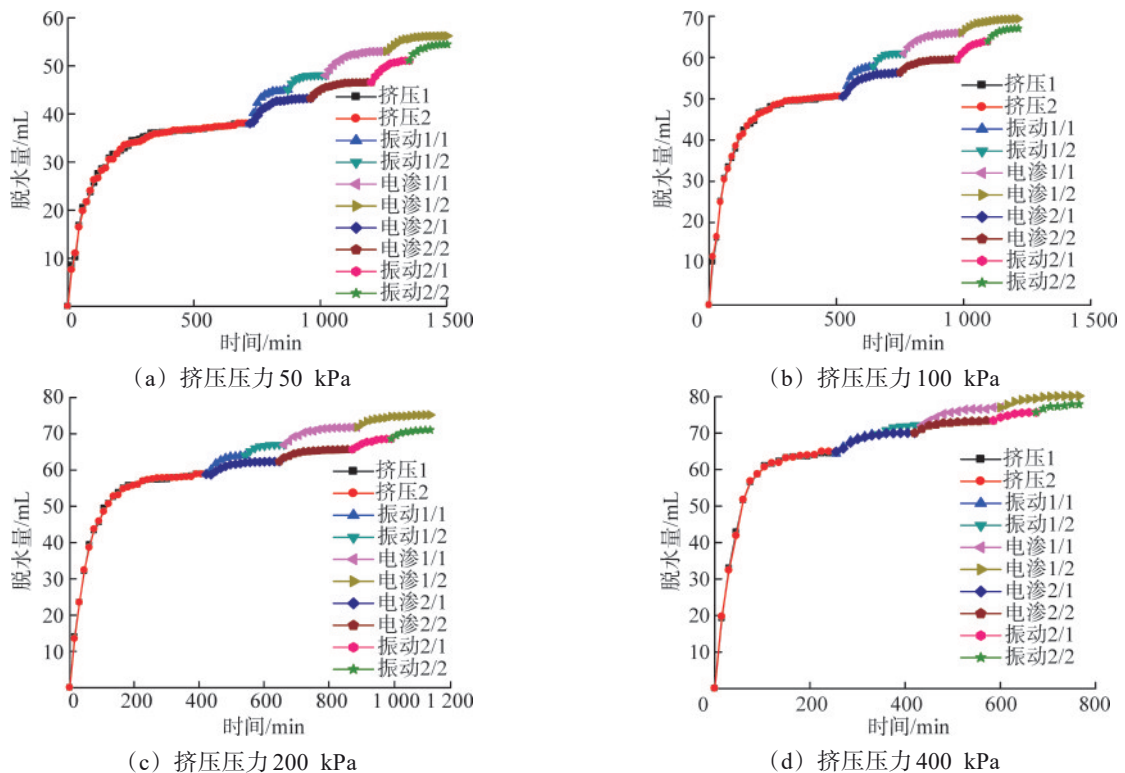


图 4 3种载荷连续施加的试验结果

Fig.4 test results of continuous application of 3 loads

每种载荷产生的脱水量占总脱水量的百分比见表 3。从表 3 可见, 在各种试验条件下, 挤压脱水量占比最高, 且随挤压压力的增大而增加, 但

其变化率逐渐减小。该趋势说明: 挤压方法仍是煤泥脱水的主要手段, 振动法和电渗法仅为挤压脱水的有效补充, 不可能取代挤压脱水; 增大挤

压压力产生的挤压作用并不能脱除试件中的全部水, 仅能使脱水量达到一个极限值, 达到该值后, 挤压压力继续增加不会增加脱水量。无论哪种载荷施加顺序, 振动、电渗的脱水量占比均随挤压压力的增大而减小, 但振动脱水占比变化更明显。在挤压压力达到一定值后(连续1为200 kPa, 连续2为100 kPa), 电渗脱水占比超过振动脱水占比。这进一步说明振动脱水效果随挤压压力的增加而减弱。当挤压压力达到一定值, 试件脱水量达到稳定后, 采用振动法将无法增强脱水效果。而电渗的脱水效果随挤压压力的增加, 减小相对缓慢。因此, 电渗可作为高压挤压脱水的有益补充, 振动法可作为低压挤压脱水的有效补充。

表3 各部分脱水量占比

Tab.3 proportions of dehydration in each section

挤压压力/kPa	连续1试验/%			连续2试验/%		
	挤压	振动	电渗	挤压	振动	电渗
50	67.41	18.02	14.57	69.84	14.48	15.68
100	72.79	15.19	12.02	75.45	11.13	13.42
200	78.39	10.66	10.95	82.86	9.48	9.66
400	80.31	9.70	10.00	83.34	5.65	11.01

综上, 若采用挤压、振动和电渗方法连续施加的方式促进煤泥脱水, 效率由高到低的方法为挤压、振动和电渗。

3.2 2种载荷同时施加

2种载荷同时施加时试件的脱水情况见图5。由图5可见, 挤压压力为50 kPa、100 kPa的试验中, 挤压/电渗的试验曲线均存在斜率波动, 挤压压力为200 kPa、400 kPa的试验中未出现此类波动。从图5中曲线的变化趋势来看, 挤压/振动能在相对较短的时间内进入稳定状态, 说明挤压/振动能先于挤压/电渗完成主要脱水过程, 可认为挤压/振动具有脱水时间较短的优点。从最大脱水量的角度分析可知, 施加振动载荷时, 电压越大, 脱水量越大, 频率在7 Hz左右的脱水效果最好, 可认为7 Hz为最佳振动频率。挤压/振动、挤压/电渗的最大脱水量的相对关系随挤压压力大小改变。挤压压力较小时, 挤压/振动的总脱水量大于挤压/电渗的总脱水量, 但随着挤压压力的增加, 挤压/电渗的最大脱水量(出现在30 V)超过挤压/振动的最大脱水量(出现在7 Hz)。

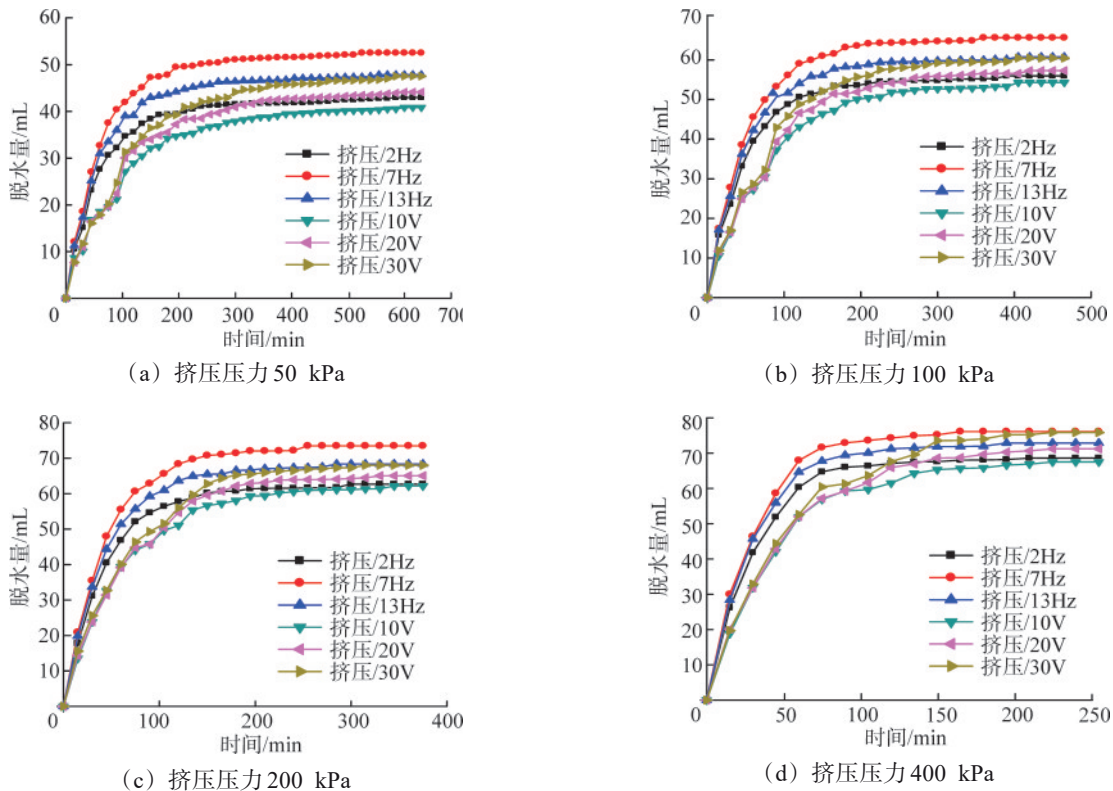


图5 2种载荷同时施加的试验结果

Fig.5 test results of simultaneous application of 2 loads

2种载荷同时作用与相同载荷水平下的连续作用脱水量之差列于表4。表4中与挤压/7Hz相同的载荷水平指连续1中的挤压-振动1/1-振动1/2部分,与挤压/30V相同的载荷水平指连续2中的挤压-电渗2/1-电渗2/2部分。虽然连续作用中,在7 Hz振动中先进行了50 N幅值试验,30 V电渗之前进行过20 V电渗试验,但由于最终的脱水条件是相同的,所以同样具有一定的可比性。观察表4可知,2种载荷同时作用的脱水效果大于连续作用。挤压/7Hz的脱水提升量随挤压压力的增加先增后减,在挤压压力400 kPa时具有一次较为强烈的降低。挤压/30V的脱水提升量随挤压压力的增加表现出缓慢增加的趋势。

表4 相对于连续作用的增量

Tab.4 increment relative to continuous action

挤压压力/kPa	脱水提升量/mL	
	挤压/7Hz	挤压/30V
50	4.51	0.96
100	4.59	0.88
200	6.53	2.34
400	3.95	2.41

3.3 3种载荷同时施加

不同挤压压力下,3种载荷同时施加的试验结果见图6。图6(a)、图6(b)中,2 Hz和13 Hz曲线斜率出现了明显波动,斜率出现了短暂增加后迅速减小至0。图6中其他曲线斜率均逐渐减小,最后变为0。

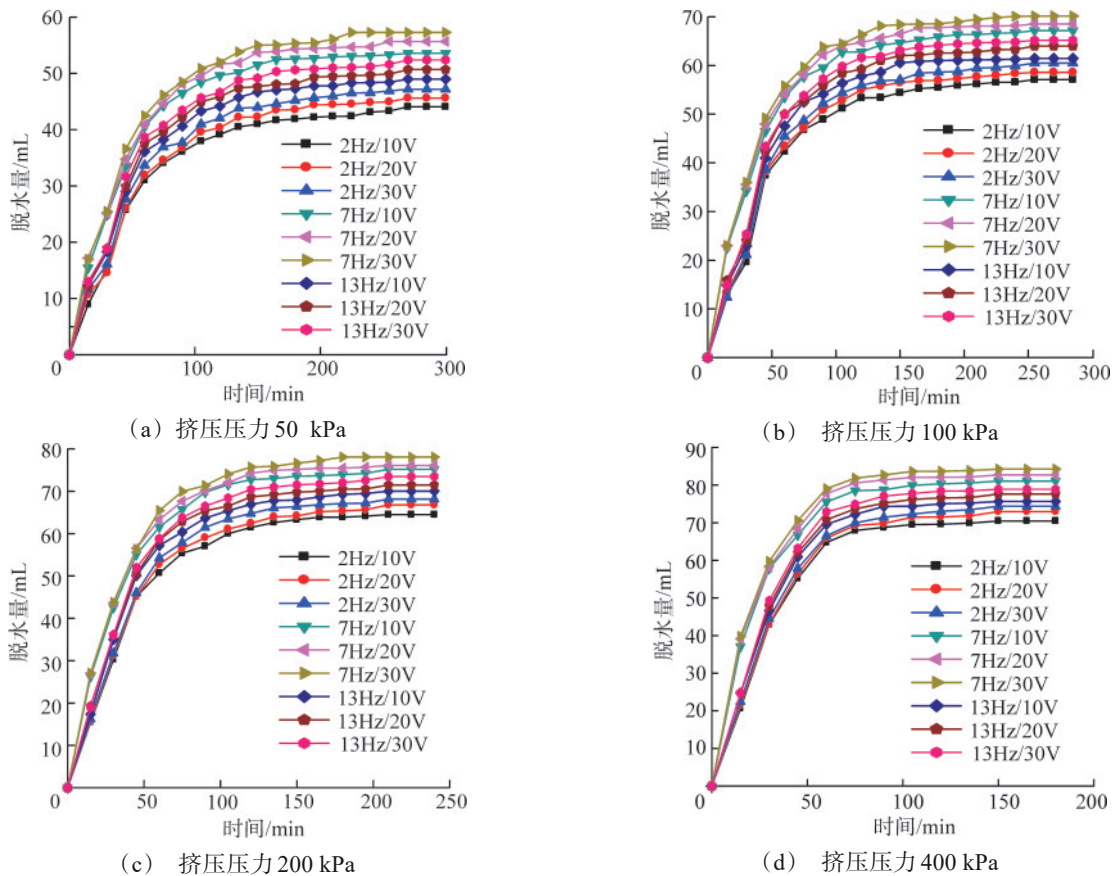


图6 3种载荷同时施加的试验结果

Fig.6 test results of simultaneous application of 3 loads

对比图5、图6可知,在相同挤压压力下,3种载荷同时施加时主要脱水阶段所需的时间短于2种载荷同时施加,因此具有时间优势。在3种载荷同时施加的情况下,挤压压力越大稳定时间越短。相同挤压压力下,施加其他不同载荷时,稳定时间无明显差别。由图6可见,不同挤压压力下,各

试验最终脱水量大小排序完全一致,由大到小依次为7Hz/30V、7Hz/20V、7Hz/10V、13Hz/30V、13Hz/20V、13Hz/10V、2Hz/30V、2Hz/20V、2Hz/10V。

为对比3种载荷同时施加时的脱水效果,将3种载荷同时施加相对于单独挤压、挤压/振动和挤

压/电渗产生的脱水量增量列于表 5~表 7, 与连续 3 种载荷同时施加所产生的脱水量相比于单独挤压作用最大脱水量差值列于表 8。由表 5~表 7 可知, 时提升较大, 增量均大于挤压/振动和挤压/电渗。

表 5 相对于挤压脱水的增量

Tab.5 increment relative to extrusion dehydration

挤压压力/kPa	脱水增量/mL								
	2Hz/10V	2Hz/20V	2Hz/30V	7Hz/10V	7Hz/20V	7Hz/30V	13Hz/10V	13Hz/20V	13Hz/30V
50	6.15	7.70	9.27	15.69	17.76	19.39	11.08	12.78	14.49
100	6.61	8.09	9.98	16.67	18.02	19.65	10.97	13.48	14.67
200	5.53	7.85	9.21	16.26	17.19	19.12	11.10	12.54	14.52
400	6.05	8.59	9.99	16.67	18.32	19.89	11.28	13.23	14.51

表 6 相对于挤压/振动脱水的增量

Tab.6 increment relative to extrusion/vibration

挤压压力/kPa	相对于挤压/2Hz 试验增量/mL			相对于挤压/7Hz 试验增量/mL			相对于挤压/13Hz 试验增量/mL		
	2Hz/10V	2Hz/20V	2Hz/30V	7Hz/10V	7Hz/20V	7Hz/30V	13Hz/10V	13Hz/20V	13Hz/30V
50	1.09	2.63	4.21	1.05	3.12	4.75	1.14	2.85	4.55
100	1.13	2.62	4.51	1.54	2.89	4.52	0.70	3.20	4.40
200	1.78	4.10	5.45	1.71	2.64	4.58	1.66	3.11	5.09
400	1.82	4.34	5.77	4.95	6.60	8.17	2.77	4.72	5.99

表 7 相对于挤压/电渗脱水的增量

Tab.7 increment relative to extrusion/electro-osmosis

挤压压力/kPa	相对于挤压/10V 试验增量/mL			相对于挤压/20V 试验增量/mL			相对于挤压/30V 试验增量/mL		
	2Hz/10V	7Hz/10V	13Hz/10V	2Hz/20V	7Hz/20V	13Hz/20V	2Hz/30V	7Hz/30V	13Hz/30V
50	3.20	12.73	8.12	1.44	11.50	6.52	-0.37	9.75	4.84
100	3.06	13.13	7.43	1.29	11.22	6.68	0.02	9.69	4.71
200	2.33	13.05	7.89	1.75	11.09	6.44	0.11	10.03	5.42
400	2.93	13.56	8.17	1.71	11.48	6.38	-1.48	8.41	3.03

表 8 与连续作用最大脱水量差值

Tab.8 difference in maximum dehydration between continuous action

挤压压力/kPa	脱水量差值/mL								
	2Hz/10V	2Hz/20V	2Hz/30V	7Hz/10V	7Hz/20V	7Hz/30V	13Hz/10V	13Hz/20V	13Hz/30V
50	-12.17	-10.62	-9.05	-2.64	-0.56	1.07	-7.25	-5.54	-3.84
100	-12.27	-10.79	-8.89	-2.21	-0.86	0.77	-7.90	-5.40	-4.20
200	-10.72	-8.40	-7.04	0.01	0.94	2.88	-5.15	-3.71	-1.73
400	-9.74	-7.23	-5.79	0.89	2.54	4.10	-4.50	-2.56	-1.28

由表 5 可知, 相对于单独挤压, 3 种载荷同时施加产生的脱水增量随挤压压力的增加并无明显变化。说明振动与电渗共同作用可克服挤压压力的增加带来的影响。分析原因为: 挤压压力较小时振动载荷有效促进脱水, 挤压压力较大时电渗载荷促进脱水, 导致最终脱水量并无明显变化。挤压压力不变时, 脱水增量随振动频率的变化趋势与挤压/振动作用结果一致, 增加量最大的是 7 Hz 组试验, 其次是 13 Hz 组试验, 最小的是 2 Hz 组试验。相同频率下, 脱水增量均随电压的增加而增加。

由表 6 可知, 相比于挤压/振动试验, 3 种载荷

同时施加产生的脱水增量随挤压压力的增大总体呈现增加的趋势。其中, 挤压压力为 400 kPa、频率为 7 Hz 时, 增量值出现了较大的跳跃, 13Hz/10V 试验、13Hz/20V 试验在挤压压力为 400 kPa 时变化也较为明显。同一电压下, 频率的变化未引起脱水增量的明显变化, 此时频率对脱水增量的影响不明显。这说明若在挤压/振动基础上增加电渗进行 3 种载荷同时施加能促进脱水, 新增脱水量随电压和挤压压力的增大而增大。

由表 7 可知, 3 种载荷同时施加产生的相对脱水增量随挤压压力的增加总体变化不明显, 只在

电压30 V组试验中表现出随挤压压力的增加而减少的趋势,在2Hz/30V试验中,脱水增量均很小,个别情况还出现了负值。脱水增量负值说明在挤压/电渗的基础上增加振动作用,排水量未增反降,因此在挤压/电渗的基础上再施加振动作用进行煤泥脱水时,需对振动参数取值进行分析。根据表7还可知,如果振动频率选择不合理会抑制脱水作用,施加最佳频率振动促进效果最明显。

由表8可知,挤压压力直接影响最终脱水量差值。挤压压力为50 kPa、100 kPa下,最终脱水量大于连续作用最大脱水量的试验为7Hz/30V,而挤压压力为200 kPa、400 kPa下,7 Hz参与的所有试验最终脱水量均超过了连续作用产生的最大脱水量,其中以7Hz/30V试验尤为明显。脱水量的差值均随挤压压力的增加而增加,有的由负值变为正值,有的一直为负值但绝对值在减小。较多的负值说明载荷同时作用时,载荷组合的不合理会造成脱水效果劣于连续作用。正值代表相对合理的组合,而7Hz/30V试验则是载荷同时作用中的最佳组合。从表8中还可看出,最佳组合在挤压压力较小时效果并不明显,而在挤压压力较大时效果明显。

试验结果表明,影响振动载荷作用发挥的主要因素为振动幅值和频率。振动幅值越大,脱水效果越好。但频率并不是越大效果越好,存在一个发挥作用的最佳频率。从2种载荷、3种载荷同时施加的试验中可看出,7 Hz为煤泥脱水的最佳频率,从共振的角度分析可知,该频率与煤泥颗粒系统的固有频率接近,通过共振使煤泥颗粒的振动加快,促进煤泥与水分离,达到增强脱水的效果。影响电渗法发挥作用的主要因素为电压,试验表明,电压越大,脱水效果越好。其原因是电压越大,煤泥水中的离子移动速度越快,离子以较大速度带动水分子脱离煤泥,从而达到脱水目的。

3.4 振动、电渗脱水机制及工程建议

(1) 振动、电渗脱水机制

振动脱水机制。振动形成的机械波在煤泥介质内传播,形成线性交变振动、激波、定向和空化等作用。多种作用的共同发力促进挤压脱水,其中主要的两条途径为:第一,振动使煤泥内固体颗粒运动和水运动频率不一致,从而促进二者的分离,降低固体对水流动的阻碍作用,增加渗透液体系数,加速水的脱出。当振动频率与固体

的固有频率相同时可实现固体与振源共振,振动产生的排水效果最好。第二,振动在煤泥内部形成较大的压力梯度,压力梯度触发直流的定向力促进煤泥脱水。根据振动排水机制可知,振动脱水发挥作用的前提是介质内质点容易振动,在试件密实度增加的情况下,介质振动振幅会明显减小,脱水效果也会减弱。

电渗脱水机制。第一,通电后自由层内的正离子在电场作用下拖拽水分子由正极到负极运动,形成排水效果。第二,通电后电流的热效应使煤泥内部温度升高,减小了水的黏度,形成提升渗透系数促进排水的效果。由电渗脱水机制可知,电渗脱水是煤泥内电流流动的基本效果,电流越大,脱水效果越好。电渗脱水效果与试件密实度无关,仅与导电离子浓度、电压等因素有关。

(2) 对相关试验结果的解释

试验结果表明,挤压压力越大或脱水时间越长,振动脱水作用会减弱,电渗脱水作用会相对明显。从振动、电渗脱水机制可作如下解释:在挤压压力较大或排水时间较长的情况下,试件密实度明显增加,此时煤泥内质点振动越来越困难,振动脱水作用被削弱。但此时试件体积的减小会导致导电离子浓度增加,在挤压作用下电极与试件的接触也变得更紧密,这些结果均有利于增大电流,提升电渗排水效果。

在图5、图6中,挤压压力较小的曲线斜率出现了波动,根据振动、电渗排水机制可作如下解释:挤压压力较小时,电渗脱水量与挤压(或挤压联合振动)脱水量相比基本可忽略不计。随着试验的进行,试件体积越来越小,导电离子浓度越来越高,电渗作用越来越明显,电渗作用的排水效果可消除挤压(或“挤压+振动”)脱水效果减弱的趋势,使曲线斜率出现上升的趋势。图6中,频率为7 Hz工况即使在挤压压力较小时也未出现曲线斜率波动,是因为此时频率达到或接近固体固有频率,振动脱水效果达到最佳,在电渗作用明显发挥之前消除曲线斜率减小的趋势。

(3) 对工程实践的建议

在实际的煤泥脱水中,建议在原有挤压脱水基础上增加振动和电渗脱水装置,同时施加挤压、振动和电渗3种载荷作用,可有效增加脱水量,减少排水时间。从经济成本角度分析,挤压、电渗的脱水量均随相应载荷强度的增加而增加,即经

济投入越多,脱水量越大。振动脱水在幅值恒定情况下,频率接近或达到固体固有频率时,可取得最优的脱水效果。因此在使用振动脱水之前,应先测量固体的固有频率,然后在实际中将该值设置为振动频率,可有效节约经济成本。

4 结论

(1) 多载荷连续施加脱水试验中,振动和电渗均可在挤压基础上增加脱水量,后施加载荷产生的脱水量一定小于先施加载荷。振动和电渗对挤压脱水的促进作用与施加顺序有关,最佳施加顺序为挤压、振动、电渗。

(2) 在不同挤压压力下,挤压/振动和挤压/电渗同时施加产生的脱水量均比单独挤压时增加明显,脱水时间也明显减少。在2种载荷同时施加的基础上增加一种载荷,多数情况下还可继续促进煤泥脱水,但在挤压/电渗的基础上增加振动脱水时则需注意振动频率的选择。在相同载荷水平下,同时施加效果优于连续作用。

(3) 影响振动脱水的因素为幅值、频率,影响电渗脱水效果的因素为电压。振动幅值越大、振动频率越接近固体颗粒的固有频率、电渗电压值越大,脱水效果越好。

参考文献(References):

- [1] PAN G C, ZHU H Z, SHI Q H, et al. Effect of bubble trailing vortex on coal slime motion in flotation[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126802.
- [2] 吴春野. 不同堆煤工况下的落煤塔结构静力特性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(5): 185-188.
WU Chunye. Static characteristics of structure of coal drop tower in different conditions of coal pile loading[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(5): 185-188.
- [3] DONG X S, HU X J, YAO S L, et al. Vacuum filter and direct current electro-osmosis dewatering of fine coal slurry[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 685-693.
- [4] CASAGRANDE L. Electroosmosis in soils[J]. *Géotechnique*, 1949, 1(3): 159-177.
- [5] ESRIG M I, ASCE M. Pore pressures, consolidation and electrokinetics[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(4): 899-921.
- [6] LEWIS R W, HUMPHESON C. Numerical analysis of electro-osmotic flow in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, 99(8): 603-616.
- [7] YIN C W, LIANG B, JIANG L G, et al. Analytical solution for one-dimensional electro-osmosis consolidation of low permeability soil in the recessed chamber filter press[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(11): 221156.
- [8] HUSSAIN A, FAROOQ N, AHMAD A, et al. Numerical approach for induced MHD sutterby fluid flow with electro-osmosis's function for chemical reaction and heat dissipation across the Wedge[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 56: 104268.
- [9] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(5): 473-491.
- [10] WU H, HU L M. Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101: 503-509.
- [11] WU H, HU L M, ZHANG G P. Effects of electro-osmosis on the physical and chemical properties of bentonite[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(8): 06016010.
- [12] 陶燕丽, 周建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 388-394.
TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(2): 388-394.
- [13] ZHOU J, TAO Y L, XU C J, et al. Electro-osmotic strengthening of silts based on selected electrode materials[J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(5): 1171-1180.
- [14] WEN L, YAN C H. Influence of the electric voltage gradient, electrode spacing and electrode radius on slurry dewatering by vertical electro-osmosis[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(11): 11326-11339.
- [15] SHAF AEI F, DOULATI F, BAHROUDI A, et al. Mechanical-Electrical dewatering (EDW) of mine Tailings: Influence of voltage level on water recovery and moisture reduction[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 175: 107303.
- [16] WANG J, MA J J, LIU F Y, et al. Experimental study on the improvement of marine clay slurry by electroosmosis-vacuum preloading[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(4): 615-622.
- [17] 白冰, 周健, 曹宇春. 冲击荷载作用下软粘土变形和孔压的若干问题[J]. *同济大学学报*, 2001, 29(3): 268-272.
BAI Bing, ZHOU Jian, CAO Yuchun. Some problems on the deformation and pore pressure of soft clay under impact loading [J]. *Journal of Tongji University*, 2001, 29(3): 268-272.
- [18] 张季超, 梁铁锚, 杨永康. 动力排水固结法处理软土地基的关键技术研究[J]. *施工技术*, 2012, 41(3): 42-45.
ZHANG Jichao, LIANG Tiemao, YANG Yongkang. Study on the key construction technology of dynamic consolidation by drainage for soft soil ground[J]. *Construction Technology*, 2012, 41(3): 42-45.
- [19] 李彰明, 林军华. 静动力排水固结法处理淤泥软基振动试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(9): 2378-2382.
LI Zhangming, LIN Junhua. In-situ tests and analyses on vibration influences during mud ground improvement with static-dynamic drainage consolidation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2378-2382.
- [20] 房营光, 朱忠伟, 莫海鸿, 等. 碱渣土的振动排水固结特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 43-47.
FANG Yingguang, ZHU Zhongwei, MO Haihong, et al. Experimental research on draining consolidation behavior of soda residue soil under vibration[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 43-47.
- [21] OSIPOV V I, NIKOLAEVA S K, SOKOLOV V N. Microstructural changes associated with thixotropic phenomena in clay soils[J]. *Géotechnique*, 1984, 34(3): 293-303.
- [22] 苗永红, 马小朋, 殷杰. 振动排水条件下软黏土的渗透特性试验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(1): 48-53.
MIAO Yonghong, MA Xiaopeng, YIN Jie. Experimental study on permeability characteristics of soft clay under vibration drainage conditions[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2024, 43(1): 48-53.