

DOI: 10.11779/CJGE201403025

碱渣回填地下废弃盐腔室内一维沉降试验研究

徐玉龙¹, 杨春和^{1,2}, 陈 锋¹, 李银平¹, 冀国栋²

(1. 岩土力学与工程国家重点实验室(中国科学院武汉岩土力学研究所), 湖北 武汉 430071;

2. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘 要: 盐矿水溶开采产出卤水的同时会在地下形成大量的废弃溶腔, 而盐化工企业利用采出的卤水制碱时会产生大量的固体废渣(即碱渣), 将碱渣与饱和卤水混合制成浆体注填到废弃盐腔的过程称为碱渣回填废弃盐腔。碱渣在充满卤水的溶腔内的沉降特性对回填效果会产生重要影响, 作为初步研究, 对两种不同类型碱渣与饱和卤水混合而成的碱渣浆进行了室内一维沉降试验研究。试验发现: 黏粒含量少的碱渣浆絮团发育程度低, 絮团小而相互独立, 沉降类型为絮凝均匀沉降, 黏粒含量多的碱渣浆絮团发育程度高, 絮团大而联结成网, 发生絮网沉降; 碱渣浆沉降过程可以分为 4 个阶段: 絮凝阶段、沉降阶段、主固结阶段和次固结阶段; 对比两种碱渣的沉降过程发现, 发生絮网沉降的碱渣浆在前 3 个阶段用时均较长; 沉降基本结束后, 形成的沉积体孔隙比较大, 沉积体内仍含有大量的自由水。本研究揭示了两种不同类型碱渣的一维沉降规律, 为进一步探索碱渣沉降固结机理及现场碱渣回填废弃盐腔工程提供一定参考。

关键词: 回填; 碱渣; 盐腔; 沉降; 絮凝

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0589-08

作者简介: 徐玉龙(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事工业固废地下处置研究。E-mail: xsy_xyl@126.com。

Experimental study on one-dimensional settlement of alkali wastes backfilled to abandoned salt caverns

XU Yu-long¹, YANG Chun-he^{1,2}, CHEN Feng¹, LI Yin-ping¹, JI Guo-dong²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control

Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The method of solution mining to explore halite will generate large quantities of abandoned caverns, while soda ash production whose raw materials are the brine produced by solution mining will generate abundant alkali wastes. The process that alkali wastes are mixed with the brines into slurry and pumped back into the abandoned caverns is defined as in-situ backfill. The settling behavior of the slurry is very important to the backfill effect. As a preliminary study to investigate the behavior of waste particles in brine-filled caverns, laboratory one-dimensional settlement experiments on two types of alkali wastes collected from different soda ash production techniques are conducted. The main results are: (1) the settlement of alkali wastes with a small amount of clay particles, whose flocs are small and independent, can be classified as uniform settling of flocculation, and that with a large amount of clay particles, whose flocs are large and connected, is net settling of flocculation; (2) the settling process of waste particles can be divided into four phases: flocculation phase, settling phase, primary consolidation phase and secondary consolidation phase; (3) by comparing the settling processes, durations of the first three phases are longer for the slurry with net settling of flocculation; (4) the void ratios of the two sediments are both very large when the primary consolidation is completed, indicating that there is a large amount of free water in the sediments. The settling behavior of the two types of alkali wastes is revealed, and the relevant factors are analyzed. This research may provide certain reference value for the study of the settling mechanism and site backfill.

Key words: backfill; alkali waste; salt cavern; settlement; flocculation

0 引 言

碱渣是制碱工业产生的废渣, 主要成分是碳酸钙

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304187); 国家自然科学基金面上项目(41272391)

收稿日期: 2013-07-05

和硫酸钙。中国纯碱的生产方法有氨碱法、联碱法和天然碱法，其中氨碱法和联碱法属合成法制碱，以原盐和石灰石为主料，通入氨水，经过一系列物理化学反应，生成纯碱。每生产 1 t 纯碱要排放固体废渣 0.3~0.6 t^[1]。2010 年，中国纯碱总产量 2100 万吨，其中两种合成制碱法产出的纯碱量占总产量的 90%^[2]，据此推算国内每年碱渣排出量高达 600~1200 万吨。碱渣通常采用地面堆积的处理方式，大量的碱渣堆积容易形成“白海”，占用大量土地，破坏生态环境，还会污染土壤和地下水。

同时，中国盐矿水溶开采历史悠久，大约 90% 以上岩盐资源采用钻井水溶采矿方法进行开采^[3]，目前已经形成了大量废弃地下采卤溶腔。利用废弃采卤溶腔处置碱渣，既能消除碱渣地面囤积的困难，又能改善溶腔的稳定性^[4]。20 世纪 50 年代，英国曼彻斯特 Holford 盐田的废弃溶腔就已经开始回填碱渣。美国、加拿大、荷兰以及墨西哥等国家均已经使用废弃盐腔处置卤水净化产生的钙镁泥等废弃物。除了处置盐化产业的废物外，美国还将油田废渣回填到废弃盐溶腔内^[4-7]。近几年，随着国内土地征用成本的提高和环境污染的重视，国内也有盐矿企业开始将制碱工业产生的碱渣和卤水净化产生的废渣注填到废弃溶腔中，而且考虑到作为制碱工业主要原料的卤水来自盐溶腔，所以碱渣回填盐腔本质属于原位回填范畴，符合相关法律法规的要求。

碱渣回填溶腔的主要流程是，碱渣首先在地面与饱和卤水混合成一定浓度的碱渣浆，然后泵送到充满卤水的废弃溶腔中，同时置换出相同体积的卤水。在单井中，碱渣浆从中心管注入，卤水会从中间套管被压出^[5]；在双井对流井，一般是一个井口注浆，另一个井口出卤水。碱渣浆注入卤水体后，固体颗粒在各种分子力和重力作用下发生扩散、沉降，最终沉积在腔底，形成沉积层。碱渣颗粒的扩散、沉降特性，对溶腔的回填效果以及溶腔利用率具有重要的影响。如果碱渣颗粒在卤水体具有良好的扩散性，则碱渣颗粒可以均匀覆盖腔底，腔内就不会出现充填死角，而且溶腔回填率也会有所提高；碱渣颗粒的沉降特性决定了现场每次回填量和回填周期。另外，探究碱渣颗粒在卤水内沉淀形成的沉积层的物理力学性质及结构状态可以为回填腔稳定性评价及沉积层密实度改善工作提供指导。

目前，对碱渣的研究集中在将其作为工程土的相关特性研究^[8-9]，针对这一特殊材料在卤水内的沉降研究尚无。与固体颗粒在液体内沉降相关的研究集中在吹填淤泥领域，而且更注重固体颗粒沉降所形成的沉积层的固结研究，较早的是日本学者 Imai 对不同港口

的淤泥土在海水中的沉降规律研究，并将土颗粒在海水中的沉降的类型分为“单颗粒自由沉降”、“絮凝自由沉降”、“团沉降”以及“固结沉降”^[10-11]；Been 使用 X 射线装置和孔隙水压力传感器分别对沉降柱内浆液的密度和孔压变化进行了精确的测试，基于试验结果对 Gibson 大变形固结理论进行了修正和应用，并初步研究了浆液转化为太沙基土的转折点^[12]；加拿大阿尔伯特大学 Scott 教授带领的研究团队对细油砂进行了 3 组 10 m 高的沉降柱试验，建立了针对油砂的大变形固结方程，试验开始于 1982 年，目前仍在观测中^[13-14]。苏格兰学者 Blewett 从土-水混合体沉降过程中电阻变化的角度出发，初步探索了浆液转变为太沙基土的转折点^[15]。国内詹良通对浙江海域淤泥进行了沉积固结特性研究，分析了溶液浓度对沉积固结的影响^[16]；刘莹也对连云港吹填土进行了室内沉积试验研究，给出了土水比与沉积速度的关系^[17]。

以上研究几乎都依托于淤泥吹填工程，基料为淤泥，溶液多是海水，针对性较强。本文立足于碱渣回填盐岩溶腔的工程实际，通过沉降柱试验，对一定浓度的碱渣浆在卤水内的沉降过程和沉积体的物理状态进行了详细探究，为优化回填工艺、开展回填腔体的稳定性分析提供依据。

1 碱渣成分及物理性质

试验所用碱渣取自江苏两个碱厂，分别标号为 A、B，自然状态下的碱渣外观如图 1。因为不同碱厂的制碱流程及工艺有所不同，两种碱渣的化学成分及物性指标均有一定差异。

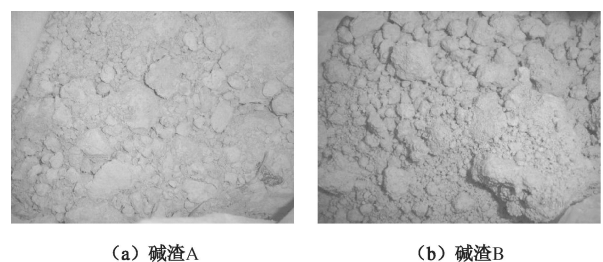


图 1 自然状态下碱渣外观图

Fig. 1 Appearance of alkali wastes in natural state

1.1 碱渣化学成分

碱渣化学成分分析试验在中国地质大学 X-RD 衍射实验室完成。在 105℃±5℃ 的温度环境下对碱渣试样进行 48 h 烘干后进行 X 射线衍射分析，分析结果见表 1。碱渣的主要成分为碳酸钙 (CaCO₃) 和半水硫酸钙 (CaSO₄·0.5H₂O)，含有少量的可溶盐。碱渣 B 中含有少量的铁复合物，所以其外观呈现褐色。需要指出的是，半水硫酸钙 (CaSO₄·0.5H₂O) 遇水就会形

成二水硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O), 渣场堆积的碱渣含水率非常高, 所以在渣场硫酸钙是以二水硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O) 的形式存在, 同样, 回填浆体的碱渣所含的也是二水硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O)。

表1 碱渣化学成分

Table 1 Chemical composition of alkaline wastes

编号	CaCO ₃ /%	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O /%	NaCl /%	SiO ₂ /%	铁复合 物/%
碱渣 A	58.82	39.01	1.59	0.59	
碱渣 B	32.49	62.70	0.04	1.71	3.06

1.2 碱渣物性指标

表2是碱渣的物性指标。由于碱渣含有一定量的可溶盐, 在进行物性指标时试验方法较为灵活^[8], 如比重测量需要用煤油作为中性介质, 含水率的测试需要烘干 48 h 才能让固体达到恒重等。

表2 碱渣的物性指标

Table 2 Physical indexes of alkaline wastes

编号	天然含水率 /%	比重	液限 /%	塑限 /%	塑性指数
碱渣 A	101.2	2.53	108.6	68.6	40.0
碱渣 B	103.7	2.56	118.6	89.5	29.1

碱渣的颗粒分析试验采用激光粒度分析仪, 碱渣颗粒级配曲线及粒度成分分别见图2。同时, 粒度分析仪给出碱渣 A, B 的特征比表面积分别为 1.13, 0.68 m²/g。

从图2中看出, 碱渣颗粒最大粒径不足 200 μm, 总体以粉粒为主, 约占总颗粒含量 80%, 碱渣 A 的黏粒含量约 20%, 碱渣 B 的黏粒含量约 10%。

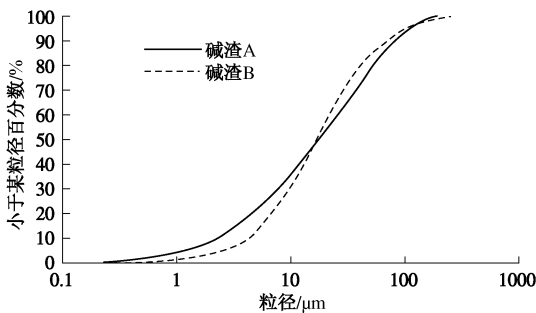


图2 碱渣颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution of alkali wastes

2 沉降柱试验

为便于观察浆液的变化, 沉降柱采用透明有机玻璃管, 管柱高 2 m, 内径 200 mm。底座采用尼龙材料加工, 通过密封圈与有机玻璃管连接, 见图3。

试验时, 首先将两种碱渣分别与饱和卤水混合, 配制成质量浓度均为 10% 的悬浊液。配制过程中, 碱渣使用的是自然湿基, 添加的卤水质量是扣除碱渣湿

基中水分的含量, 由于碱渣湿基中含有欠饱和的氯化钠溶液, 最终配制成的浆体中的液相应是欠饱和的氯化钠溶液。

试验时, 将两组碱渣浆倒入沉降柱中, 搅拌均匀, 让其沉降, 记录试验现象。试验初始, 柱内浆液的高度为 180 cm。

试验中, 由碱渣 A 配制的碱渣浆标记为 A 组, 碱渣 B 配制的碱渣浆标记为 B 组, 见图3。

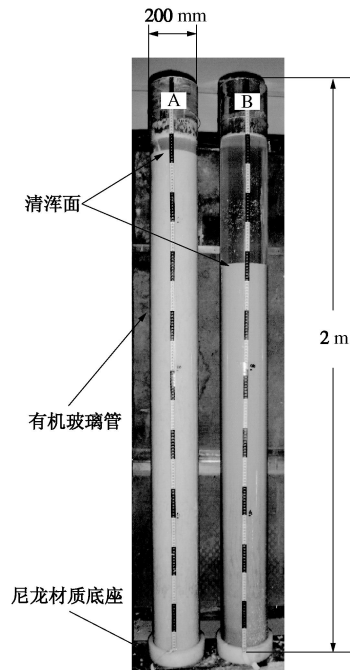


图3 沉降柱尺寸与材质

Fig. 3 Size and material of settlement columns

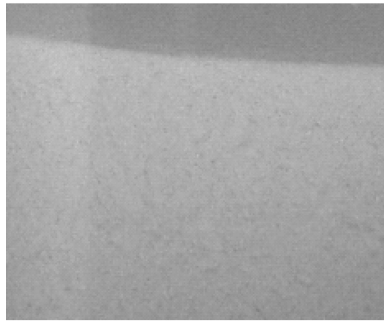
3 沉降过程及分析

3.1 沉降类型

碱渣浆倒入沉降柱内, B 组会立刻产生一个清晰的分界面, A 组约 20 min 后也出现清晰的分界面, 如图3, 分界面以上为清液区, 下部的浑浊区, 这个分界面在此称为清浑面。观察下部浑浊区, 会发现颗粒并不是分散存在, 而是形成团状体, 见图4(a)、(b), 这种团状体是絮团。絮团和清浑面都是絮凝作用的结果。



(a) 碱渣浆A絮网



(b) 碱渣浆B絮网

图4 碱渣浆絮凝团图

Fig. 4 Flocculation flocs of alkali waste-brine mixtures

含有黏粒（颗粒小于 5 μm 的颗粒）的土或废渣与一定浓度电解质溶液混合形成悬液，黏粒表面会带有电荷，当粒间的范德华力大于双电层斥力的时候，固体颗粒之间就会发生絮凝和聚沉。从图 4 可以看出，B 组的絮团较小，相互独立，而 A 组絮团尺寸大，并且已经发展成相互联接、充满整个沉降柱空间的网络结构。絮团形成过程中会裹挟着粉粒、沙粒和一些自由水，由于碱渣颗粒最大粒径不超过 200 μm，且碱渣颗粒比重较小，在此假设粉粒和沙粒全部被裹在絮团中，以便于在沉降类型的划分和沉降过程的分析。

综合港口淤泥和泥沙动力领域的研究成果^[10-11, 18-19]可发现，同一种土形成的悬液，随着悬液浓度的增大，絮团会经历部分絮凝、均匀絮凝到整体絮凝的过程，清浑面也会经历模糊到清晰的过程。在此，按照清浑面的变化及絮团发育程度，可将沉降类型分为 3 类，分别是：絮凝自由沉降、絮凝均匀沉降和絮网沉降，如表 3。碱渣 A，B 发生的分别为典型的絮网沉降和絮凝均匀沉降。两者碱渣浆浓度虽相同，但碱渣 A 的黏粒含量几乎是碱渣 B 的两倍（图 2），才导致沉降类型的不同。

表 3 沉降类型

Table 3 Types of settlement

悬液浓度	低	中	高
沉降类型	絮凝自由沉降	絮凝均匀沉降	絮网沉降
清浑面	模糊，呈现过渡区形态	清晰	清晰
絮团特点	絮团大小不一	絮团尺寸小，絮团相互独立	絮团尺寸大，相互联接成絮网

3.2 沉降过程

图 5~7 是清浑面随时间变化曲线。为清晰表达各个阶段曲线变化情况，清浑面下降曲线分别按照时长 60 min、72 h 和 105 d 给出。图 8 是清浑面下降曲线

的示意图。

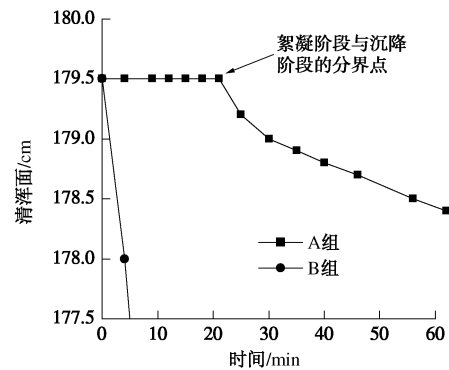


图 5 清浑面随时间变化曲线 (60 min)

Fig. 5 Variation of interface with time (60 min)

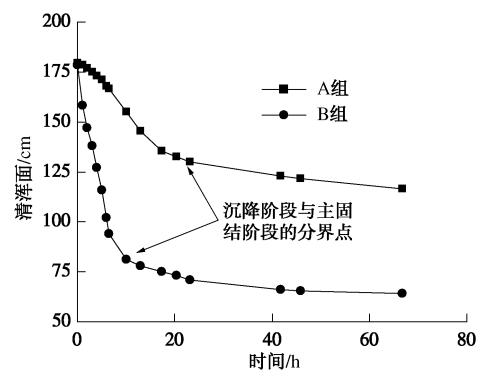


图 6 清浑面随时间变化曲线 (72 h)

Fig. 6 Variation of interface with time (72 h)

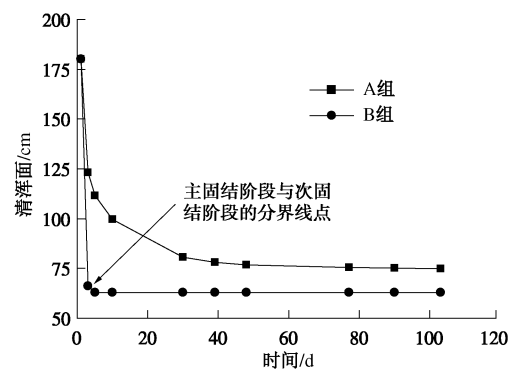


图 7 清浑面随时间变化曲线 (105 d)

Fig. 7 Variation of interface with time (105 d)

本试验中，A 组未观察到次固结阶段，B 组未观察到絮凝阶段，但下文分析中可知，A，B 组缺失的阶段都是实际存在的，只是试验条件存在局限性而未能观察到。在此将碱渣浆的沉降过程划分为四个阶段：絮凝阶段、沉降阶段、主固结阶段和次固结阶段，每个阶段沉降柱内分区情况见图 9。

下面就结合絮凝均匀沉降和絮网沉降的机理和 A，B 组的试验现象各阶段的沉降情况进行描述和简单分析。

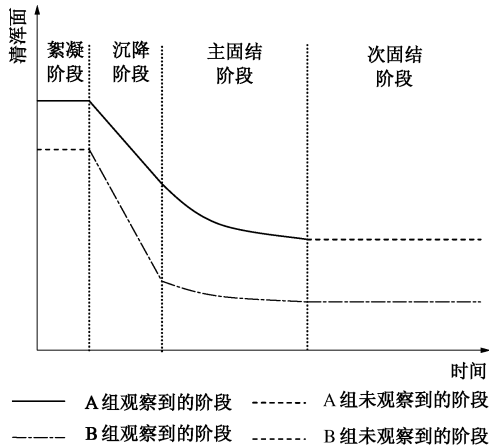


图 8 清液面随时间变化曲线示意图
Fig. 8 Variation of interface with time

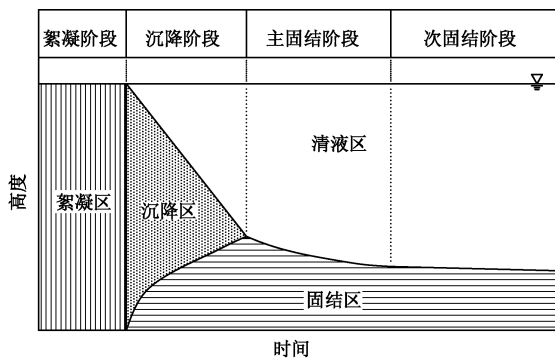


图 9 碱渣沉降示意图

Fig. 9 Variation of settlement of alkali wastes

(1) 絮凝阶段

试验中, 碱渣浆静置后 A 组通体均匀, 可观察到絮团变大并联结成网 (图 4 (a)), 约 20 min 后出现清浑面; B 组内几乎瞬时形成尺寸较小但均匀的絮团 (图 4 (b)), 并立刻出现清晰清浑面, 进入沉降阶段。A 组中前约 20 min 的阶段就是絮凝阶段。

絮凝阶段是絮团发育、清浑面出现以前的阶段。这个阶段时间一般较短, 持续大约在几秒到几十分钟^[10]。絮网沉降中一般可观测到絮凝阶段的存在, Imai^[10]曾用摄像机拍到过黏粒首先絮凝成团、逐渐变大最后联结成网的过程。絮网实质上是絮团发育程度很高的结果。既然絮网的形成并不是瞬时完成, 那么小絮团的发育也需要时间, 如此, 絮凝均匀阶段也应存在一个絮凝阶段。B 组没发现这个阶段的原因暂可解释为絮凝时间太短无法进行测量。

(2) 沉降阶段

沉降阶段以清浑面的出现作为起始点, 清浑面的下降表示絮团的沉积。此阶段沉降柱内会出现 3 个区域: 上层的清液区、中间沉降区和下部的固结区, 见

图 9, 更直观的见图 10。沉降阶段最典型的特征是清浑面趋于线性下降。

絮凝均匀沉降中, 小尺寸的絮团由于相互独立, 在不考虑沉降过程中的絮团相互接触再絮凝的情况下, 絮团会不断沉落, 并在沉降柱底部沉积成松散的堆积体, 即固结区。固结区内的絮团在自重作用和不断堆积的絮团压力作用下发生排水固结。随着时间的推移, 絮团不断堆积, 固结区逐渐变大, 沉降区相应变小。浑面下降呈现线性变化, 概因絮团在重力、黏滞阻力等多种力的作用下沉速会达到平衡所致, 后续研究中会对此进行更详尽的分析。

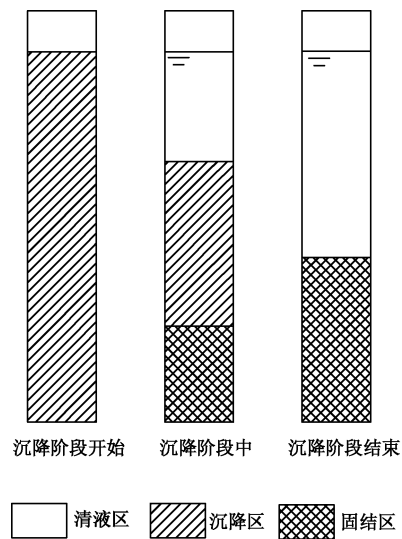


图 10 沉降阶段沉降柱内分区

Fig. 10 Zones in settlement column during settling phase

絮网沉降中的沉降阶段, 清浑面虽然也呈现线性下降, 但絮团的沉积与絮凝均匀沉降的情形有所不同。图 4 (a) 可见絮网中存在大量的裂缝, 这些裂缝都是较弱的联结面, 如同层状岩石里的弱面一般, 在重力作用下, 絮网就会沿着这些弱联结面断裂, 分裂成一个个的絮团。这些絮团相互簇拥着下沉, 絮团之间会存在排水通道, 水从中向上排, 相应絮团下降并在底部堆积。这些簇拥的絮团下降速度影响因素更为复杂, 在此亦不进行深入。

对比 A, B 两组沉降阶段的曲线斜率 (图 6) 可发现, B 组的沉速要明显大于 A 组。一般而言, 大絮团的等效水力直径大, 下落速度应该会快, 但在絮网沉降中, 由于断裂形成的絮团很大, 被沉降柱壁限制而相互簇拥, 与沉降柱壁的摩擦不可忽略, 而且排水通道也相对较少, 所以造成 A 组沉速很小。图 11 是沉降过程中从沉降柱侧壁观察到的排水通道, A 组数量很少, 而 B 组数量很多, 呈现树枝状分叉结构。这说明 B 组下部的水能够更为顺畅的排除。另外, 从 B 组还可以观察到, 排水通道最先出现在沉降柱底部,

随着沉降的进行，通道底部逐渐愈合，并不断上移，最后消失。通道愈合后的碱渣层，较上部显得更为密实。而且树枝状排水通道消失的时间，与沉降阶段和主固结阶段的分界点出现的时间大致吻合，这表明，排水通道末端所在的位置正是沉降区与固结区的分界面。A组排水通道也在发生上移，但由于数量较少，难以据此判断沉降区与固结区的分界面。

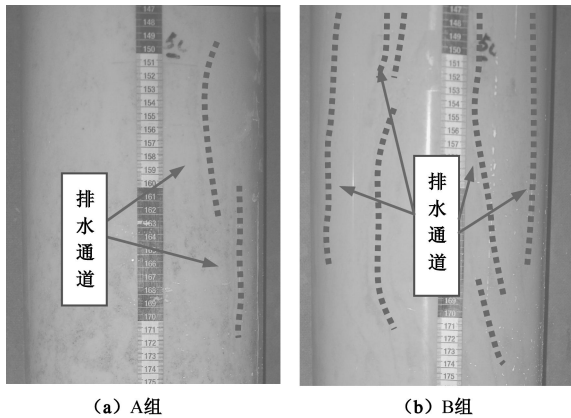


图 11 沉降过程中的树枝状通道

Fig. 11 Channels similar to tree branches during settling

(3) 主固结阶段

絮团全部沉积完毕后，进入主固结阶段，此时沉降柱内只存在上部的清液区和下部的固结区的阶段。事实上，从图 9 可知，沉降阶段的固结区已经发生主固结。沉降阶段堆积的絮团会将一部分自由水封闭在絮团之间的孔隙，在自重压力作用下，絮团之间的孔隙水压增大，形成微小的超孔隙水压，这部分水透过上部絮团的孔隙连接成的通道内慢慢从向上排出，同时絮团内部存在自由水，絮团在被挤压的时候会发生断裂，释放内部自由水，这部分自由水也会从缝隙中排出，这就形成自重作用下的主固结。沉降阶段存在同时发生的絮团的下落和固结两个过程，而主固结阶段则只发生固结。

试验进行 5 d 时，B 组清浑面就不再变化，而 A 组在静置 105 d 的时仍在发生沉降，但此时变化已经相当缓慢，可认为 A 组主固结已经基本结束。

从清浑面下降曲线（图 6 和图 7）可以看出，A 组固结沉降速度要远远小于 B 组，而且持续时间要远远大于 B 组。这是自由水向上排出的难易所造成。图 12 是主固结完成后两组试验分界面图像，A 组分界面光滑平整，而在 B 组分界面可发现类似于火山口的形态体，这种火山口应该是固结区排水通道的出口。B 组分界面有如此形状的通道出口，亦能说明 B 组在主固结阶段排水会更通畅些。其次，A 组絮团大，不仅絮团内部包络的自由水多，还因为它等效水力直径大，下沉后絮团之间包络的自由水量也会较多，而且存在

絮团沉积后再次发育成网的可能，导致其排水较慢。

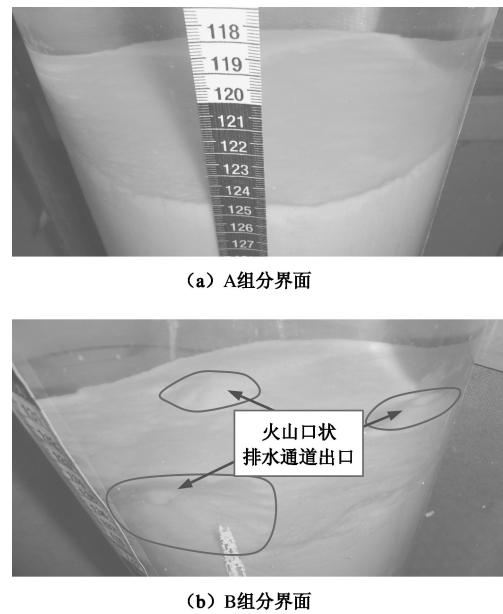


图 12 浆液区内部类似于火山口的通道出口
Fig. 12 Channels outlet similar to volcanic vent

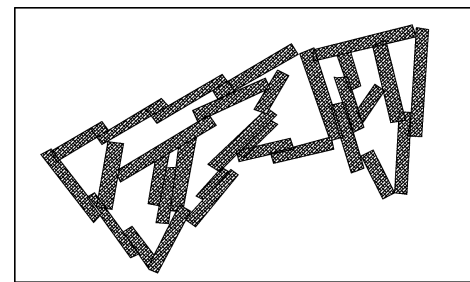


图 13 碱渣沉积层片架结构^[21]

Fig. 13 Flocculation formation of sedimentary layer^[21]

黏性土在海水中会形成盐絮凝式片架结构^[21]，据此可以推测，主固结阶段结束后，A，B 两组碱渣沉积层也属于盐絮凝式片架结构，如图 13 所示。此时颗粒虽然能够点接触，但因为颗粒端面带正点、侧面带负电的原因，多出现的是颗粒之间端面与侧面连接的情况，同时卤水中富含离子，最终形成如图 13 的盐絮凝结构。

表 4 静置 105 d 后沉积层参数

Table 4 Physical parameters of sedimentary layers

组号	密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙率 n/%	孔隙比 e	含水率 /%
A	1.36	88	7.52	358.11
B	1.39	86	6.26	293.94

试验进行 105 d 后，对沉积层的物理参数进行计算，结果见表 4，表中各项参数均为沉积层的平均值。可发现，A，B 两组孔隙比均较大，分别为 7.52 和 6.26。对比沉积层的含水率与两种碱渣液限（表 2），发现两

种碱渣浆形成的沉积层液性指数 I_L 均远大于 1, 这说明固结区内还含有大量的自由水, 沉积体还处于一种浆体状态(流塑状态)。现场回填中, 如果能尽量多的排出沉积层的自由水, 甚至是弱结合水, 对提高溶腔回填率和改善回填腔稳定性具有重要的意义。

(4) 次固结阶段

主固结阶段结束后, 沉积层已经处于静力平衡状态。次固结阶段就是沉积层在重力作用下发生蠕变、结构继续调整、同时自由水继续上排的过程。次固结阶段由于自重较小, 引起的沉降极微弱, 所以 B 组静置 5 d 后清浑面几乎没有变化。次固结是蠕变引起, 只要有自重就会出现这个阶段, 所以如果沉降试验静置时间足够长, 也会观察到 A 组进入次固结阶段。自重引起的次固结沉降的相关研究还较少, 在此仅提出这个阶段的存在, 更深入的研究还有待开展。

4 结 论

基于室内 2 m 高、200 mm 内径沉降柱试验, 对两种不同类型碱渣与卤水混合成的浆体的一维沉降规律进行探索, 根据絮凝现象和清浑面的下降曲线对沉降类型和过程进行了分类和分析, 主要得到以下的结论:

(1) 黏粒含量低的碱渣浆絮团尺寸小, 分布均匀, 相互独立, 沉降类型为絮凝均匀沉降; 黏粒含量高的碱渣浆絮团大, 并相互联结成网, 发生絮网沉降。

(2) 两组浆体均出现清晰的清浑面, 根据清浑面随时间变化曲线将两种碱渣浆沉降过程都分为 4 个阶段: 絮凝阶段、沉降阶段、主固结阶段和次固结阶段。絮凝阶段只发生絮凝, 不出现清液区; 沉降阶段清浑面下降趋于线性, 在沉降柱侧壁出现树枝分叉状通道, 沉降柱底部的自由水通过这些通道向上排出; 主固结阶段的碱渣在自重作用下发生主固结, 清浑面下降缓慢; 次固结阶段沉积体在蠕变作用下继续固结, 清浑面下降不明显。

(3) 对比两种碱渣的沉降过程发现, 发生絮网沉降的碱渣浆絮凝阶段、沉降阶段、主固结阶段所持续的时间较长。

(4) 主固结基本完成后, 两组沉降柱中的沉积体孔隙比均较大, 沉积体内仍含有大量的自由水。

致 谢: 本文试验得到了江苏井神盐化股份有限公司的项目资助, 在此表示感谢!

参考文献:

[1] 严 驰, 李 琳, 孙月红. 碱渣压缩变形特性[J]. 青岛建筑

工程学院学报, 2003, 24(4): 8 - 11. (YAN Chi, LI Lin, SUN Yue-hong. Deformation characteristics of alkali waste [J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 2003, 24(4): 8 - 11. (in Chinese))

[2] 王建成, 朱文剑. 国内外盐化工产业发展的现状[J]. 产业经济, 2012, 6: 70 - 73. (WANG Jian-chen, ZHU Wen-jian. Domestic and overseas saline chemical industry development[J]. Industrial Economy, 2012, 6: 23 - 25. (in Chinese))

[3] 李学锋, 唐绍辉, 范育青. 水溶开采地面沉降的机理分析与控制措施[J]. 化学矿物与加工, 2008(11): 27 - 29. (LI Xue-feng, TANG Shao-hui, FAN Yu-qing. Mechanism analysis and control methods of subsidence induced by solution mining[J]. Industrial Minerals and Processing, 2008(11): 27 - 29. (in Chinese))

[4] LANGER M. Underground disposal of wastes requiring special monitoring in salt rock masses[C]// Proceedings of 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Germany: Clausthal-Zellerfeld Press, 1993: 583 - 603

[5] HOTHER H A, CHALLINOR D. The use of salt cavities for the disposal of wastes[C]// SMRI Meeting Paper, Hannover, Solution Mining Research Institute, 1994.

[6] WAREEN J K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons[M]. New York: Springer, 2006.

[7] VEIL J. Preliminary technical and legal evaluation of disposing of nonhazardous oil field waste into salt caverns[R]. Final Report. NM: Sandia National Laboratories, 1996.

[8] 王 芳, 徐竹青, 严丽雪, 等. 碱渣土工试验方法及其工程土特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1211 - 1214. (WANG Fang, XU Zhu-qing, YAN Li-xue, et al. Study on test methods and geotechnical properties of soda residue[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1211 - 1214. (in Chinese))

[9] 严 驰, 宋旭坤, 朱 平, 等. 高含水率碱渣的强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1683 - 1688. (YAN Chi, SONG Xu-kun, ZHU Ping, et al. Experimental study on strength characteristics of soda residue with high water content[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1683 - 1688. (in Chinese))

[10] IMAI G. Settling behavior of clay suspensions[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 61 - 76.

[11] IMAI G. Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 7 - 20.

- [12] BEEN K. Stress strain behavior of a cohesive soil deposited under water[D]. Oxford: Oxford University, 1980.
- [13] AZAM S, JEERAVIPOOLVARN S, SCOTT J D. Numerical modeling of tailings thickening for improved mine waste management[J]. Journal of Environmental Informatics, 2009, **13**(2): 111 - 118.
- [14] JEERAVIPOOLVARN S. Compression of oil sand tailings [M]. Edmonton: University of Albert, 2005.
- [15] BLEWETT J, MCCARTER W J, CHRISP T M, et al. Monitoring sedimentation of a clay slurry[J]. Géotechnique, 2001, **51**(8): 723 - 728.
- [16] 詹良通, 童 军, 徐 洁. 吹填土自重沉积固结特性试验研究[J]. 水利学报, 2008, **39**(2): 201 - 205. (ZHAN Liang-tong, TONG Jun, XU Jie. Laboratory study on self-weight sedimentation and consolidation behaviors of hydraulic-dredged mud[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(2): 201 - 205. (in Chinese))
- [17] 刘 莹, 肖树芳, 王 清. 吹填土室内模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(4): 518 - 528. (LIU Ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Research on indoor scale-down test of dredger fill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(4): 518 - 528. (in Chinese))
- [18] 赵 明. 黏性泥沙的絮凝及对河口生态的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (ZHAO Ming. On flocculation of cohesive sediment and its ecology effect in estuaries[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [19] 李富根. 黏性泥沙悬浮体系絮凝特性的初步研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (LI Fu-gen. The study on the flocculation-properties of cohesive sediment suspensions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [20] 章莉娟, 郑 忠. 胶体与界面化学[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006. (ZHANG Li-juan, ZHENG Zhong. Colloid and interface chemistry[M]. 2nd ed. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [21] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Earthwork principle and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water and Power Press, 1996. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
 封 3 苏州南智传感科技有限公司
 封 4 南京南瑞集团公司
 后插 1 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 2 台州市建元勘察仪器有限公司
 后插 3 北京理正软件股份有限公司
 后插 4 西安力创材料检测技术有限公司