

常文静,袁小龙,刘久波,等. 察尔汗盐湖含钾盐储层介质渗流-溶解过程中物性参数变化特征研究[J]. 盐湖研究, 2024, 32(1): 99-106.
Chang W J, Yuan X L, Liu J B, et al. Research on the changes in physical properties during the seepage-dissolution process of potassium salt-bearing reservoir in Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(1): 99-106.
DOI:10.12119/j.yhj.202401011

察尔汗盐湖含钾盐储层介质渗流-溶解过程中物性参数变化特征研究

常文静^{1,2,3},袁小龙^{1,2},刘久波^{4*},李梦玲^{1,2,3},朱登贤⁵,胡燕⁴,
李树伟⁴,唐朝生⁶,张西营^{1,2*}

- (1. 中国科学院青海盐湖研究所,中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室,青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学,北京 100049;
4. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院,青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室,青海
格尔木 816099; 5. 青海盐湖工业股份有限公司,青海 格尔木 816000;
6. 南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210023)

摘要:察尔汗盐湖低品位固体钾盐资源丰富,是我国钾盐工业可持续发展的重要后备资源。充分了解储卤层中钾盐矿物的溶解机理有助于提高资源开采的效率。本研究以察尔汗盐湖浅部储卤层中含有不同钾盐矿物的3种典型钻孔岩芯为研究对象,通过室内渗流溶解实验,开展储卤层中固体矿物的溶解效率、孔隙度以及渗透性变化特征模拟研究。室内渗流-溶解实验结果表明,3种储卤层中的钾盐矿物溶出率皆近100%,其中主要含光卤石的岩芯样品溶解速度最快,含钾石盐岩芯次之,含杂卤石岩芯最慢。实验过程中,溶解反应后的储卤层固相骨架皆未塌陷,表明饱和NaCl卤水起到了很好的保护作用。由于石盐析出和不溶矿物的运移堵塞,3种岩芯的孔隙度皆降低,其中含光卤石岩芯孔隙度降低了26%,含钾石盐岩芯孔隙度降低了20%,含杂卤石岩芯孔隙度降低了32%。受控于盐类矿物溶解、石盐的析出和不溶矿物的运移堵塞,各储卤层岩芯渗透性降低幅度为40%~70%,降幅显著。

关键词:储卤层;钾盐矿物;渗透系数;孔隙度;饱和指数

中图分类号:P619.211

文献标志码:A

文章编号:1008-858X(2024)01-0099-08

我国是农业大国,对钾肥需求量大,近50%需要依靠进口^[1]。察尔汗盐湖是我国最重要的钾盐钾肥基地,多年高强度的开采使得卤水采出量与品质逐年降低^[2]。盐湖浅部储卤层中赋存有29 600万t的低品位固体钾盐资源,是我国钾盐工业可持续发展的重要后备资源。自上世纪80年代开始,便对溶解驱动开采这些固体钾矿的可行性进行了探索^[3]。为探明低品位固体钾矿固液转化机理,寻找低成本、绿色、高效开采的方案,前人通过室内溶解模拟实验和现场溶采试验,获得了部分适用于溶矿模拟分析的参数及条件和溶矿过程中水动力场和水化学场的部

分变化规律^[4-8]。固体钾盐溶解过程依次分为溶解驱动阶段、光卤石溶解驱动阶段、钾石盐溶解驱动阶段和石盐溶解驱动阶段^[9],而微观上,溶解过程表现为盐类矿物的溶-析动态变化过程^[10,11]。前人研究表明,溶液中光卤石不饱和是溶解固相钾矿能力的关键^[5],而储卤层中的钾盐矿物的溶出效率受溶液类型^[12-14]、渗流速度^[9,15]、温度^[16-18]、矿层品级^[19]和渗透性^[20,21]等多种因素的影响。目前,在钾盐溶解开采过程研究中,对不同盐类矿物组合的储卤层渗透性特征以及固液转化过程中盐类矿物溶解规律不明,从而导致了溶矿开采效率偏低。为了研究含有不同

收稿日期:2023-11-04;修回日期:2023-11-27

基金项目:青海省地矿局项目:察尔汗盐湖固体钾盐液化开采制约因素及转化效率研究;中国科学院“西部之光-西部交叉团队”重点实验室专项计划(E210DZ0202);稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-039);

作者简介:常文静(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向为水文地质学方向。Email:changwenjing21@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者:刘久波(1985-),男,学士,工程师,从事矿产普查与勘探工作。Email:328537489@qq.com。张西营(1977-),男,博士,研究员,主要从事盐湖资源与盐类矿床研究。Email:xyzhchina@isl.ac.cn。

类型钾盐矿物的储卤层渗透溶解过程,以察尔汗盐湖别勒滩区段3种不同典型含钾盐钻孔岩芯为研究对象,进行室内渗流-溶解模拟实验,揭示不同钾盐类型的储卤层在渗流-溶解过程中储层渗透性和微观结构变化特征及可溶组分溶出规律,以期为深入了解察尔汗盐湖固液转化机理和优化液化开采方案提供科学依据。

1 研究区概况

柴达木盆地是我国大型内陆山间盆地之一,地处青藏高原东北侧,其为南部印度洋板块的俯冲挤

压作用而形成的中、新生代断陷盆地^[22,23]。察尔汗盐湖位于柴达木盆地中新生代中央坳陷带上,其南北两侧均有压扭性深断裂,NW走向的断裂(涩北、盐湖、哑叭尔等背斜构造)控制着盐湖矿区的北缘,NE向断裂控制着盐湖矿区的西缘^[24]。按照新构造运动与补给水系两大因素划分盐湖分区,察尔汗盐湖属于盆地中部强烈坳陷带盐湖区。察尔汗盐湖是盆地最低洼区域,为柴达木盆地最大的汇水中心(见图1)。察尔汗盐湖南侧主要补给源为周边地下水和地表河流,北侧主要受深层循环水补给^[25],而别勒滩地区最主要的补给河流为乌图美仁河。察尔汗盐湖是典型的干旱荒漠大陆性气候。



图1 察尔汗盐湖研究区域卫星地图及钻孔位置图

Fig. 1 Satellite map of Qarhan Salt Lake Research area showing the location of the drill core

整个察尔汗盐湖从西至东划分为别勒滩区段、达布逊区段、察尔汗区段和霍布逊区段。该盐湖不仅是我国最大的盐湖,同时也是一大型钾镁盐综合矿床。以往地质工作查明,其储卤层中含钾矿物种类主要以光卤石($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、杂卤石($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{SO}_4]_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)和钾石盐(KCl)为主,其中别勒滩区段主要钾盐矿物为光卤石和杂卤石^[24,26]。盐湖沉积中胶结松散的盐层(储卤层)是一种典型的多孔介质,其孔隙结构的形成多由盐类溶解所致,储卤层孔隙率及渗透率在空间上存在极强的非均匀性^[17],具有上部孔隙较大,下部孔隙较小的特征^[24]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

研究所需样品来自察尔汗盐湖储量核查项目施

工钻孔(2022),该项目在察尔汗盐湖别勒滩区段实施334个钻孔(累计进尺6824.68 m),为了研究不同类型含钾储层渗流-溶解规律,本文从中选取3个不同类型钾盐矿物的钻孔岩芯进行室内渗流-溶解实验。

样品岩芯1来自钻孔ZK56017,取样深度为5~10 m。岩性特征为黄褐色含光卤石粉砂中粗粒石盐,中粗粒结构,块状构造,岩芯松散,晶隙发育,透水性好,含水性好。石盐含量为70.5%,为黄白色晶粒,粒径2~10 mm。粉砂为黄褐色,含量为5.5%,充填于石盐晶体间,分布均匀,粒径0.1~0.2 mm。光卤石白色,含量为17%,粒径2~5 mm;

样品岩芯2来自钻孔ZK56816,取样深度为0~10 m。钾盐矿物为钾石盐。岩性特征为黄褐色含粉砂中粗粒石盐,中粗粒结构,块状构造,岩芯松散,晶隙发育,透水性好,含水量高。钾石盐含量2%。石

盐含量为 75.75%,为黄白色,晶粒粒 2~10 mm。粉砂含量为 7.25%,为灰黄色,粒径 0.1~0.2 mm,充填于石盐晶体间,分布均匀;

样品岩芯 3 来自钻孔 ZK56826,取样深度为 0~10 m。岩性特征为灰褐色含黏土粉砂中粗粒石盐,中粗粒结构,块状构造,岩芯松散,晶隙发育,透水性好,含水性好。杂卤石含量 13.67%。石盐含量为 65.33%,为黄白色晶粒粒径 2~10 mm。粉砂为灰黄色,含量为 9%,充填于石盐晶体间,分布不均匀。

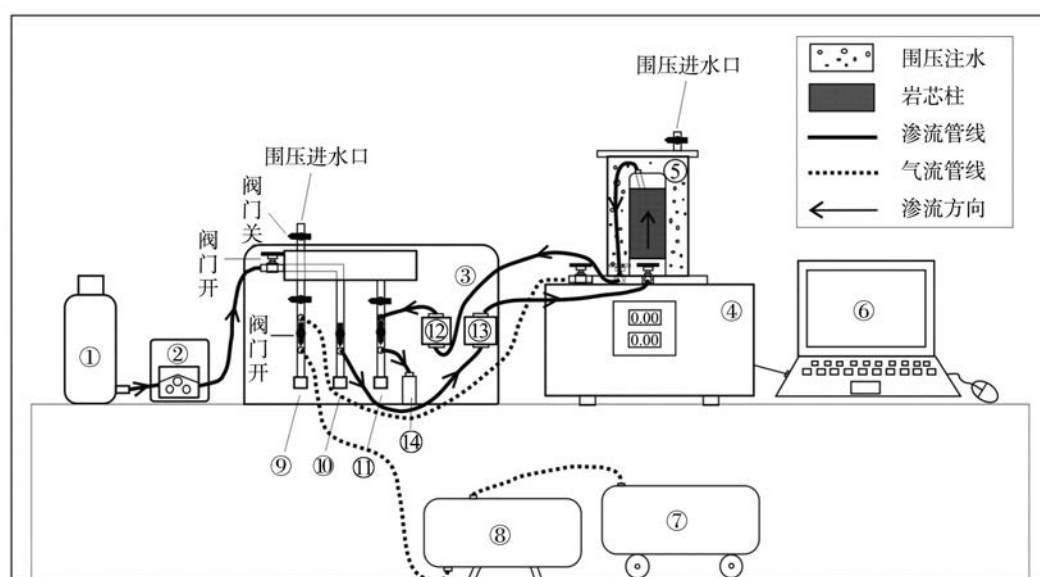
2.2 溶液配制

已知氯化钠的含量为其饱和度的 70%~80%、氯化镁含量为 5%~8% 的溶液对钾盐矿物具有较强的溶解能力^[7,27],通过各种不同类型无机盐溶浸剂溶浸结果对比分析表明,选择 5% 的 $MgCl_2$ 溶浸剂对含

杂卤石原料中的 K^+ 溶浸综合效果较优。本实验配制含 5% $MgCl_2$ 、饱和度为 75% 的石盐水溶液进行实验。溶液中主要离子为 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} ,各离子浓度分别为 10.95 mol/L、7.63 mol/L、1.00 mol/L。

2.3 实验装置

研究采用的实验装置为立方通达(天津)实验仪器有限公司生产的 LFTD1410 盐土渗透试验仪(图 2)。该实验装置由控制台、蠕动泵、储水罐、数据采集仪、渗透仪、渗出液收集装置、空压机等组成,可用于实时监测实验过程中进口压强、出口压强、进口流量以及出口流量等参数。该仪器实验过程严格遵循国标 GB/T 15406-2007《岩土工程仪器基本参数及通用条件》及美国 ASTM D5084-00 使用挠性壁渗透计测量饱和渗透性材料水压传导率的标准试验方法进行。



注:1-溶液瓶;2-蠕动泵;3-分水面板;4-渗流仪;5-围压室;6-控制台;7-空压机;8-储水罐;9-围压传感器;10-上水头压力传感器;11-下水头压力传感器;12-下水头流量计;13-上水头流量计;14-渗出液收集瓶

图2 渗流实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of seepage experiment equipment

2.4 实验步骤

将松散的岩芯样品用击实器以同样的击实功(锤重×落距×击实次数)装入饱和器中制成柱状岩芯。为消除边壁效应,在制成的岩芯柱上套一层具有收缩效果的橡胶膜,岩芯柱制成后将其装入渗透仪。向渗透仪围压室中注水并加载围压。加载围压后,向岩芯中注入溶液至顶端,以溶液注满岩芯孔隙所注入的体积来计算岩芯初始孔隙度,公式如下:

$$\Phi_1 = \frac{V_1}{V_0} \times 100\%$$

式中 Φ_1 为初始孔隙度,%; V_1 为注入溶液的体积, cm^3 ; V_0 为岩芯柱体积, cm^3 。

在控制台进行实验参数设置,设置泵速 3 rpm,对应流速 0.13 mL/s。经多次针对围压的预实验,得出 120 kPa 是在该泵速条件下能使岩芯柱和橡胶膜在实验过程中一直保持贴合的临界压强,故加载围压 120 kPa。采样间隔根据出口流量大小来设置:当出口流量 $Q > 5$ mL/min 时,设置采样间隔为 10 min,单次采集渗出液 50 mL,当出口流量 3 mL/min $< Q < 5$ mL/min 时,设置采样间隔为 10 min,单次采集渗出

液 30 mL, 当出口流量 $1.5 \text{ mL/min} < Q < 3 \text{ mL/min}$ 时, 设置采样间隔 20 min, 单次采集渗出液 30 mL。当出口流量 $Q < 1 \text{ mL/min}$ 时, 设置采样间隔 40 min, 单次采集渗出液 30 mL。

实验参数设置完毕后开始渗流溶解实验。按照设置的采样间隔采取渗出液样品, 并记录采样节点的进出口压强、进出口流量, 计算渗透系数。渗透系数是代表土体或岩体渗透性强弱的定量指标, 渗透系数越大, 表明土体或岩体的透水性越强。渗流实验拟通过达西定律评价实验过程中渗透性变化特征, 公式如下:

$$i = \frac{\Delta H}{l} \quad k = \frac{v}{i}$$

式中 i 为水力梯度; ΔH 为进出口水头差, cm; l 为渗流路径, cm; v 为渗流速度, cm/s; k 为渗透系数, cm/s。

溶解后结束实验, 卸载围压。将岩芯柱取出静置, 用重力流出的孔隙水体积来计算给水度, 公式如下:

$$\mu = \frac{V_2}{V_0}$$

式中 μ 为实验后给水度, %; V_2 为重力出水体积, cm^3 ; V_0 为岩芯柱体积, cm^3 。

将控水完毕的岩芯柱从橡胶模中取出, 放入烘箱烘干, 利用烘干前后质量差和渗出液的密度计算持水度, 持水度与给水度之和为实验后的孔隙度。

公式如下:

$$V_3 = \frac{m_1 - m_2}{p}$$

$$Cr = \frac{V_3}{V_0}$$

$$\Phi_2 = Cr + \mu$$

式中 V_3 为持水体积, cm^3 ; V_0 为岩芯柱体积, cm^3 ; m_1 为溶解后的岩芯样品烘干前的质量, g; m_2 为溶解后的岩芯样品烘干后的质量, g; Cr 为持水度; μ 为实验后给水度, %; p 为渗出液密度, g/cm^3 ; Φ_2 为实验后孔隙度。

最后将烘干后的岩芯以四分法研磨后, 分析测试溶解后固体样品矿物组成。

2.5 渗出液主要离子浓度测定与岩芯矿物组分分析

对渗出液进行水化学分析, 测试项目为: K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- , 对实验前后的岩芯样品进行 X 射线衍射矿物组分分析, 测试过程在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成。应用 PHREEQC 软件对渗出液中盐类矿物饱和指数进行模拟计算^[28], 采用的计算模型为 Pizer.dat 数据库模型^[4,6]。

根据岩芯样品的 XRD 分析结果可知(表 1), 该渗流过程发生溶解反应的主要矿物相为光卤石、钾石盐、杂卤石、石盐、石膏。

表 1 实验所用岩芯样品矿物组成

Table 1 Mineral composition of samples used in the experiment

岩芯编号	主要矿物成分/%								
	石盐	光卤石	杂卤石	多硅白云母	钾石盐	石英	石膏	钠长石	方解石
岩芯 1	70.50	17.00			2.00	5.50	6.50		
岩芯 2	75.75				2.00	6.00	12.00		1.25
岩芯 3	65.33		13.67	6.67		6.33	5.00	1.67	1.00

3 结果与讨论

3.1 渗透性变化特征

将不同含钾矿物组合的岩芯进行渗流实验的过程中, 岩芯渗透系数的变化如图 3。岩芯 1 的渗透系数初始为 $9.92 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 实验结束时为 $2.97 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 降低了 70%; 岩芯 2 的渗透系数初始为 $12.20 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 实验结束时为 $4.26 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 降低了 65.1%; 岩芯 3 的渗透系数初始为 $19.66 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 实验结束时为最低点, 为 $11.31 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 降低了 40%。研究结果表明, 随着含钾矿物由易溶到难溶, 渗透系数皆降低, 3 种岩芯渗透系数皆呈先波动下降后趋于平缓趋势。

用渗透系数表征岩芯渗透性, 孔隙度是渗透性大小的影响因素之一。实验后 3 种岩芯的孔隙度皆降低(图 4), 岩芯 1 实验后孔隙度降低了 26%; 岩芯 2 实验后孔隙度降低了 20%; 岩芯 3 实验后孔隙度降低了 32%。经渗流溶解, 3 种岩芯给水度远小于孔隙度, 这一现象表明岩芯骨架变化不大^[9]。

矿物的溶解会导致孔隙度增大, 渗透系数也本应增大, 然而本研究中虽有矿物的溶解, 但孔隙度和渗透系数皆降低。认为这是由于本研究的溶解过程中还发生了石盐析出与不溶矿物的迁移所导致。故推测本研究中出现此渗透性变化现象受控于 3 种因素: 压力溶解、矿物迁移、石盐析出。(1) 压力溶解。对于加载了一定围压的岩芯柱, 其处于水-应力-化学

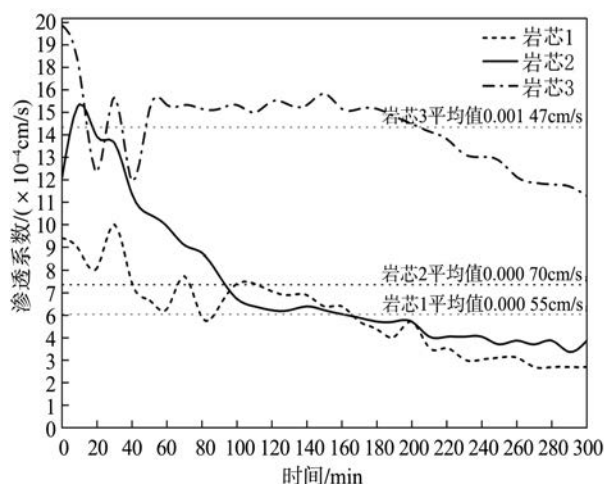


图3 渗透系数与时间关系

Fig. 3 The relationship between permeability coefficient and time of different samples

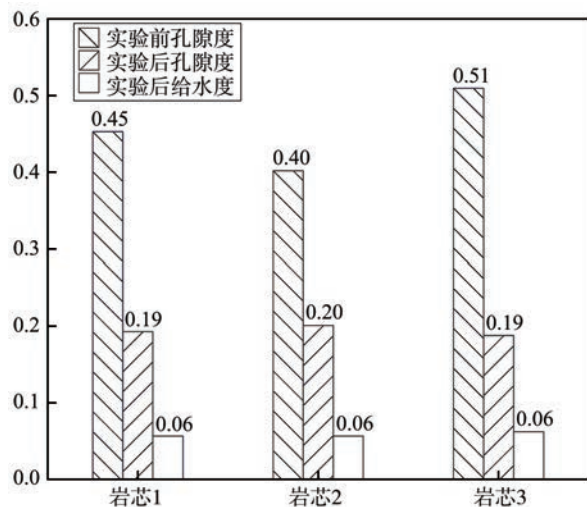


图4 溶解前后孔隙度、给水度变化

Fig. 4 Changes in porosity and specific yield before and after dissolution

耦合作用下,存在一定的压力溶解^[29],即发生于颗粒接触面的溶解,起初在三者耦合作用下溶解速度很快,随着溶解的发展,颗粒之间接触面积不断增大而接触面之间应力不断减小,溶解速度也逐渐降低,且溶液进入岩芯后易溶矿物的溶解会使溶液浓度升高,而溶液在渗透压的影响下一般由高浓度向低浓度方向运移,渗透压增大,渗透系数便增大。(2) 矿物迁移。前人研究发现,当松散颗粒达到启动所需的临界渗流强度时,颗粒将出现迁移行为^[30]。伴随着岩芯矿物的溶解,造成局部矿物颗粒失稳并发生塌落,同时粒间孔隙体积增大,使得岩芯渗透系数增加,岩芯内部渗流强度增大,细粒泥沙等不溶物发生迁移,随着实验进行迁移至应力较低处时沉淀下

来^[31],逐渐至下游堆积,使得岩芯渗透系数减小。(3) 石盐析出。本研究所使用的溶液为近饱和的石盐溶液,钾盐矿物杂卤石、光卤石和钾石盐的溶解使溶液中 KCl 含量不断增加。由于溶剂含有浓度较高的 $MgCl_2$, NaCl 与 $MgCl_2$ 之间的同离子效应及阳离子交换作用降低了石盐的溶解度,导致溶液中的石盐析出;同时,溶液中伴随着塌落迁移的细粒泥沙等不溶物与析出的石盐发生混合,堵塞孔隙,导致孔隙度降低,使得岩芯渗透系数减小。

虽 3 种岩芯的渗透系数变化趋势相似,但渗透性表现出明显强弱之分,推测这与初始孔隙度大小及不同钾盐矿物溶解特性有相关。岩芯 1 同时含有 17% 光卤石和 2% 钾石盐,岩芯 2 含 1.32% 钾石盐,岩芯 3 含 16.27% 的杂卤石。其中,光卤石最为易溶,岩芯 1 含光卤石最多,光卤石最为易溶,渗透系数的变化主要受光卤石溶解的影响。光卤石快速溶解过程中大量微晶石盐的析出与不溶矿物混合堵塞孔隙,导致岩芯渗透性降低,岩芯 2 同理。以杂卤石为主要钾盐矿物的岩芯 3 样品,初始孔隙度明显大于岩芯 1、2,矿物溶解析出变化不如岩芯 1、2 活跃,故岩芯骨架较为稳定,孔隙连通性一直较好,进而渗透系数大小一直维持在比较高的水平。

综上所述,3 种岩芯实验过程中渗透性变化特征为波动式降低后趋于平缓。不同钾盐矿物组分的岩芯渗透性存在明显差异,渗透性差异与孔隙之间的连通性程度密切相关,推测受初始孔隙度及所含钾盐矿物溶解度的影响。

3.2 矿物组分变化特征

经 5h 的溶解实验,实验后 3 种岩芯的石盐占比均为 90% 以上,3 种岩芯中的钾盐矿物含量均低于检测限(表 2)。本研究中的室内渗流溶解实验表明,实验所配置的含 5% $MgCl_2$ 、饱和度为 75% 的石盐水溶液对 3 种岩芯中的钾盐矿物皆有显著的溶解效果。

溶解过程中,由于水动力学和热力学条件的变化,矿物发生溶-析固液转化效应,该效应实质是溶液

表2 岩芯溶解后主要可溶盐类矿物组分表

Table 2 Table of mineral composition of samples after dissolution

岩芯编号	实验条件	主要可溶盐类矿物组分/%				
		石盐	光卤石	杂卤石	钾石盐	石膏
岩芯 1	溶解后	100.00				
岩芯 2	溶解后	90.53				9.47
岩芯 3	溶解后	95.74				4.26

中某一种盐不饱和发生溶解,另一种盐过饱和和从溶液中析出的过程^[3]。矿物在水溶液中的饱和状态用饱和指数(saturation index,缩写为 SI)来表征。当 $SI = 0$ 时,矿物在水溶液中处于平衡状态;当 $SI < 0$ 时,表明矿物在水溶液中未达到饱和状态,矿物将发生溶解反应;当 $SI > 0$ 时,表明矿物在水溶液中处于过饱和状态,矿物将会沉淀析出^[32]。

当溶液注入各岩芯后,相比于初始溶液(图5虚线左侧),除岩芯2、3中石盐外,其余矿物的饱和指数皆瞬间上升,说明除岩芯2、3中的石盐,其余矿物

皆迅速发生溶解。以渗出液从上水头流出的0时刻开始计时,岩芯1、2、3渗出液中石膏、杂卤石、光卤石、钾石盐及岩芯2中的石盐饱和指数呈降低趋势,溶解过程中各矿物溶解情况变化趋势总体表现为:随时间进行对应矿物溶解量逐渐降低。岩芯1、3的石盐饱和指数 $0 \sim -0.3$ 之间小范围波动,是由于石盐饱和和结晶析出导致出现溶液相对不饱和。岩芯3溶解过程中渗出液的杂卤石饱和指数大于溶液,且在溶解过程中逐渐降低,说明溶液对杂卤石有溶解能力,随着岩芯中杂卤石的减少,杂卤石的溶出量逐渐降低。

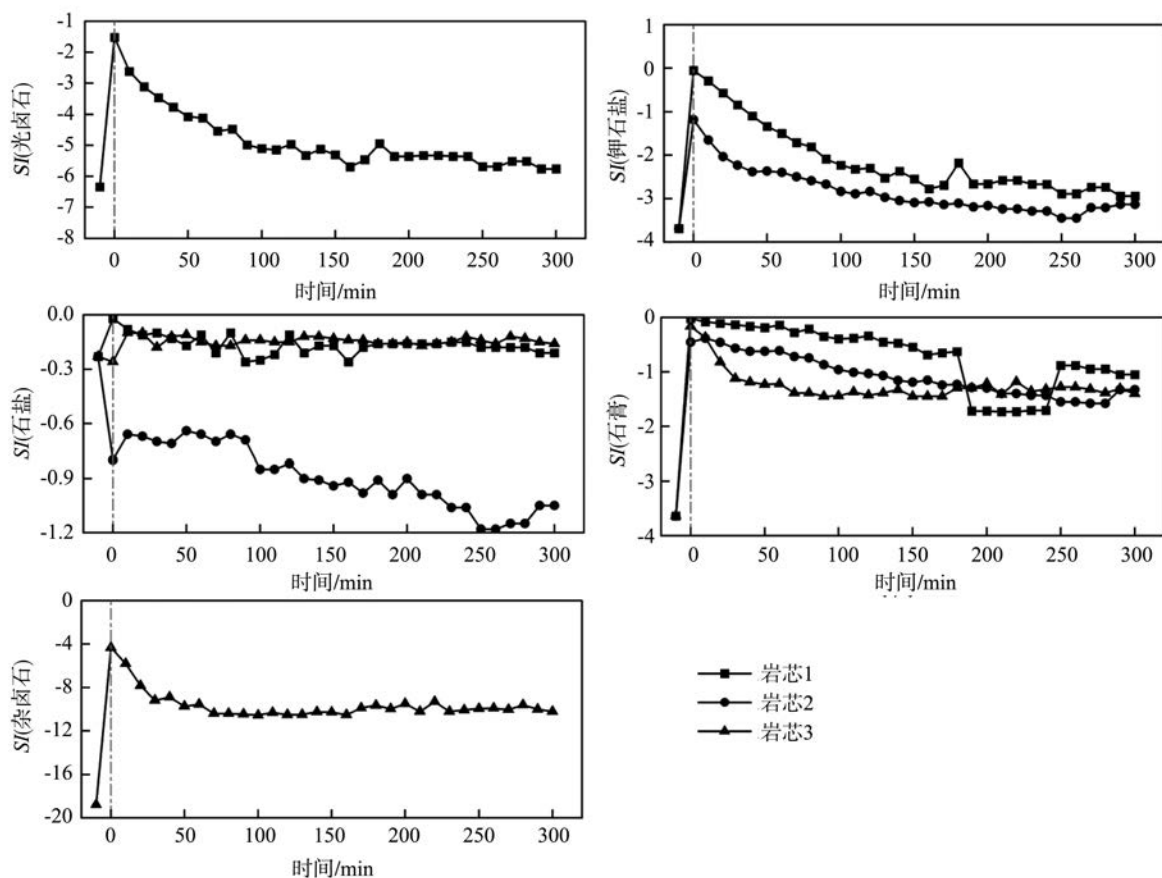


图5 饱和指数与时间关系

Fig. 5 Relation between saturation index and time

3.3 溶钾速率变化特征

本研究通过对渗出液中每分钟 K^+ 溶解量变化来评估不同岩芯样品溶钾速率。溶液对岩芯1、岩芯2和岩芯3中的钾盐矿物都具有良好的溶解能力,3种岩芯的 K^+ 溶解速率变化趋势各有不同(图6)。随着钾盐矿物的减少,在溶解过程中 K^+ 的溶解率会逐渐降低,岩芯1溶解率的下降幅度最大,在实验开始时便迅速溶解,在 $120 \sim 180$ min有波动现象,推测是由于少量未与溶液直接接触的光卤石、钾石盐,随着溶

解过程中内部结构变化,逐渐暴露出来与溶液接触发生溶解。岩芯2含钾量较少,且钾石盐溶解度比光卤石低,故溶解速率相对岩芯1较为缓慢,但实验结束前岩芯2中的溶解速率变化趋势平稳,说明岩芯2中的钾石盐几乎全部与溶液接触溶解完毕。岩芯1和2,120 min之后 K^+ 溶解量很低并几乎不变,说明含钾矿物在120 min前就已发生几乎完全溶解。含有杂卤石的岩芯3中, K^+ 溶解率自起初20 min内大幅下降后,便在一定区间内波动,直至实验结束,

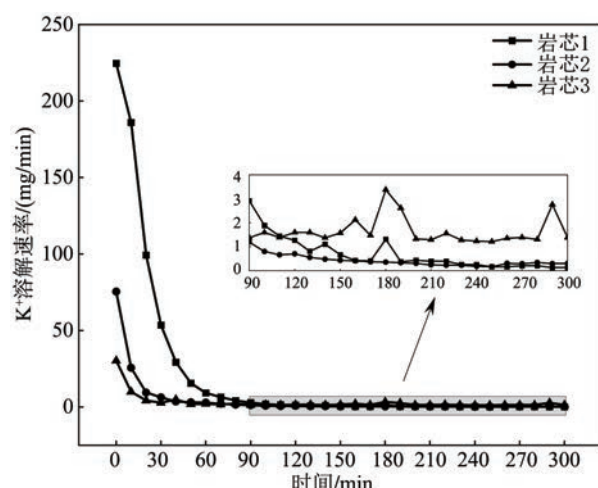


图6 钾离子溶解速率与时间关系

Fig. 6 Relationship between potassium dissolution rate and time

K⁺溶解量始终高于岩芯1和2,说明杂卤石始终处于缓慢溶解并释放K⁺状态。

4 结 论

本文针对3种含钾矿物的岩芯开展室内渗流-溶解实验,分别从储卤层岩芯孔隙率、渗透系数变化特征及渗出液中主要离子含量变化开展研究,阐述了整个渗流-溶解过程中不同含钾储层岩芯溶钾规律,并得出以下主要结论:

1) 本实验所配置的高钠低镁无钾的溶液,对3种储卤层中的不同钾盐矿物皆有溶解能力,溶解后的储卤层未检测出钾盐矿物,溶出率皆近乎为100%。其中主要含光卤石的储卤层溶解速率最高,其次为含钾石盐岩芯,含大量杂卤石的储卤层溶解速率最低。

2) 细粒不溶矿物的迁移堵塞是孔隙度皆降低的主要原因。由于石盐析出和不溶矿物的运移堵塞,其中含大量光卤石储卤层孔隙度降低了26%,含钾石盐储卤层孔隙度降低了20%,含大量杂卤石储卤层孔隙度降低了32%。实验结束时3种储卤层的给水度皆小于孔隙度,说明溶解后储卤层固相骨架仍有一定完整性。

3) 细粒不溶矿物迁移对储卤层渗透性影响更显著。渗流过程中,受控于盐类矿物的溶解,石盐的析出和碎屑物质的运移堵塞,含大量光卤石的储卤层渗透性呈现出波动降低趋势,渗透系数降低了70%;含钾石盐的储卤层降低趋势较平缓,降低幅度为65.1%;含大量杂卤石的储卤层降低趋势最为平缓,渗透系数降低了40%。

参考文献:

- [1] 王孝峰. 2021年钾肥行业形势分析及2022年预测[J]. 肥料与健康, 2022, 49(1): 1-5.
- [2] 杨永征, 李长辉. 察尔汗盐湖钾矿资源开采中的环境问题分析与对策[J]. 青海地质, 2001, 10(1): 1-3.
- [3] 鲍永恩. 察尔汗盐湖盐-水固液转化效应与资源开发[J]. 化工地质, 1983, 5(1): 30-37.
- [4] 李文鹏. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发[D]. 北京: 中国地质科学院, 1991.
- [5] 郝爱兵, 李文鹏. Pitzer理论在变温高浓卤水体系地球化学平衡研究中的应用[J]. 盐湖研究, 2003, 32(3): 24-30.
- [6] Li W, Liu Z. Numerical modelling of dissolving and driving exploitation of potash salt in the Qarhan Playa - A Coupled model of reactive solute transport and chemical equilibrium in a multi-component underground brine system [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2008, 82(5): 1070-1082.
- [7] 刘喜业, 李勇刚, 张兴儒, 等. 察尔汗盐湖表层低品位钾矿溶矿实验及数值模拟分析[J]. 无机盐工业, 2014, 46(8): 18-20.
- [8] 李瑞琴, 刘成林, 焦鹏程, 等. 现代盐湖低品位固体钾盐溶矿数值模拟研究——以察尔汗盐湖别勒滩矿区为例[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2150-2159.
- [9] 郝爱兵. 溶解驱动开采察尔汗盐湖固体钾矿的室内试验研究[D]. 中国地质大学(武汉), 1997.
- [10] 孙大鹏, 吕亚萍. 察尔汗盐湖首采区卤水溶解光卤石实验的初步研究[J]. 盐湖研究, 1995, 3(4): 40-43.
- [11] 王文祥, 李文鹏, 刘振英, 等. 涩聂湖湖水驱动溶解固体钾矿固液转化量计算[J]. 中国矿业, 2013, 22(4): 102-105.
- [12] 谢志超, 夏文, 王有德, 等. 青海省察尔汗盐湖淡水回灌溶解驱动实验报告[R]. 格尔木: 青海省盐湖开发研究院, 1990.
- [13] Li R, Liu C, Jiao P, et al. The effect of solvent chemistry on potassium dissolution extraction from low-grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake, China [J]. Applied Geochemistry, 2020, 115: 104550.
- [14] 常政. 柴达木盆地察尔汗盐湖浅部储卤层渗流-溶解室内模拟实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2022.
- [15] 常政, 袁小龙, 刘万平, 等. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 287-294.
- [16] 安莲英, 殷辉安, 唐明林, 等. 察尔汗盐湖固液矿转化实验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 75-77.
- [17] 袁小龙, 张西营, 盛金昌, 等. 环境温度对盐湖卤水化学组成及储卤层渗透性变化的制约[J]. 地质学报, 2018, 92(8): 1724-1732.
- [18] Li R, Liu C, Jiao P, et al. Simulation study on the mining conditions of dissolution of low grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 10539.
- [19] 王兴富, 王石军, 王罗海, 等. 柴达木低品位固体钾矿溶解转化率与品位关系[J]. 盐湖研究, 2020, 28(3): 61-65.
- [20] 韩光, 袁小龙, 韩积斌, 等. 察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中储卤层系统变化特征研究[J]. 地球学报, 2022, 43(3): 279-286.
- [21] 李梦玲, 袁小龙, 张西营, 等. 补水溶矿过程中达布逊湖北岸地下卤水水化学变化特征初步研究[J]. 盐湖研究, 2022, 30(2): 99-109.

- [22] 翟光明, 宋建国, 靳久强, 等. 板块构造演化与含油气盆地形成与评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [23] 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 等. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [24] 于升松, 谭红兵, 刘兴起, 等. 察尔汗盐湖资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] 于升松. 察尔汗盐湖首采区开采过程中钾卤水动态及其预测[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [26] 牛雪. 察尔汗盐湖别勒滩区段固体钾盐特征及成因机理研究[D]. 中国地质大学(北京), 2014.
- [27] 姜虹. 溶剂溶解盐湖低品位固体钾盐的动力学研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015.
- [28] Saini-eidukat B, Yahin A. Web-phreeq: a WWW instructional tool for modeling the distribution of chemical species in water[J]. Computers & Geosciences, 1999, 25(4): 347-353.
- [29] 谢芳芳, 尹升华, 袁长林, 等. 浸矿液对离子型稀土矿孔隙影响机制研究[J]. 稀土, 2018, 39(6): 48-56.
- [30] 吴爱祥, 尹升华, 李建锋. 离子型稀土矿原地溶浸液渗流规律的影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(3): 506-510.
- [31] Yasuhara H, Elsworth D, Polak A. A mechanistic model for compaction of granular aggregates moderated by pressure solution[J]. Journal of Geophysical Research-solid Earth, 2003, 108(B11): 2530.
- [32] 刘琦, 冯振华, 管川, 等. 钾盐溶浸开采溶解实验研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(11): 19-23.

Research on the Changes in Physical Properties during the Seepage-Dissolution Process of Potassium Salt-bearing Reservoir in Qarhan Salt Lake

CHANG Wenjing^{1,2,3}, YUAN Xiaolong^{1,2}, LIU Jiubo^{4*}, LI Mengling^{1,2,3}, ZHU Dengxian⁵, HU Yan⁴, LI Shuwei⁴, TANG Chaosheng⁶, ZHANG Xiyang^{1,2*}

(1. CAS Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2 Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Xining, 810008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4 Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin of Qinghai Province, Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, 816099, China; 5 Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, 816000, China; 6 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: Qarhan Salt Lake is endowed with abundant low-grade solid potassium salt resources, playing a crucial role in the sustainable development of the potash industry in China. A thorough understanding of the dissolution mechanism of potassium salt minerals in brine reservoirs is essential to optimize resource exploitation. In this study, three representative drill cores containing different types of potassium salts from the shallow brine reservoir of Qarhan Salt Lake were selected for investigation. Through a laboratory seepage dissolution experiment, the efficiency of solid minerals' dissolution, as well as changes in porosity and permeability of the drill cores, was simulated. The results of the percolation-dissolution experiment revealed that the potassium salt minerals in the three drill cores were totally dissolved. Among the core samples, those containing carnallite exhibited the highest dissolution rate, followed by sylvite-rich core samples, while, polyhalite-rich core samples showed the lowest dissolution rate. Throughout the experiment, the skeleton of the brine reservoirs did not collapse after the dissolution reaction, indicating effective protection provided by NaCl-saturated brine. The porosities of the three core samples declined due to halite precipitation and the migration of insoluble minerals. Specifically, the porosity of the carnallite-rich core decreased by 26%, while that of the sylvite-rich and polyhalite-rich cores decreased by 20% and 32%, respectively. Controlled by the dissolution of salt minerals, precipitation of halite, and migration/blockage of insoluble minerals, the core permeabilities of brine reservoirs diminished by 40%-70%. This research highlighted the importance of considering complex factors for a comprehensive understanding of the changes in the reservoir's physical properties during the seepage-dissolution process.

Key words: Brine reservoir; Potassium salts; Hydraulic conductivity; Porosity; Saturation index