

察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究

常政^{1, 2)}, 袁小龙^{1, 3)}, 刘万平⁴⁾, 李梦玲^{1, 2)}, 苗卫良^{1, 2)},
程怀德^{1, 2)}, 卜迪⁵⁾, 张昊⁵⁾, 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,
青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁 810008;

2) 中国科学院大学, 北京 100049; 3) 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

4) 青海盐湖工业股份有限公司, 青海格尔木 816000; 5) 青海盐湖镁业有限公司, 青海格尔木 816000

摘要: 察尔汗盐湖浅部储卤层赋存有储量可观的固体钾盐资源, 目前正处于溶解液化开采阶段。储卤层中固体钾盐矿物溶解及储卤层结构变化特征受到溶剂注入速率控制, 但其控制机制尚不明确。本文以察尔汗盐湖浅部储卤层典型钻孔岩芯为研究对象, 通过开展室内岩芯柱渗流模拟实验, 研究岩芯在三种流速条件下储卤层渗透系数和固体钾盐矿物溶出的变化规律。结果表明: (1)随着注入溶剂速率的增大, 岩芯渗透系数呈现逐渐增大的趋势, 渗出液中钾离子浓度呈现持续减小的趋势, 但在流速改变的时间节点处, 岩芯渗透系数和其对应溶出液中钾离子浓度均出现异常增加现象。矿物的溶解引起储层孔隙度增加, 而溶剂流速的改变会导致松散盐类矿物颗粒重组。(2)储卤层岩芯固体钾盐矿物溶解受到溶剂注入速率的影响明显。注入速率增加引起矿物颗粒重组以及滞留孔隙高浓度水体释放是造成渗出液中 K⁺浓度短暂性升高的主要原因。本次实验研究对于研究区低品位固体钾盐的水溶开采具有一定理论指导意义。

关键词: 察尔汗盐湖储卤层; 钾盐矿物; 渗透系数; 注入速率

中图分类号: TS312 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.021701

A Study on the Mechanism of Influence of the Dissolution of Solid Potassium Salt in Qarhan Salt Lake to the Rate of Solvent Injection

CHANG Zheng^{1, 2)}, YUAN Xiao-long^{1, 3)}, LIU Wan-ping⁴⁾, LI Meng-ling^{1, 2)}, MIAO Wei-liang^{1, 2)},
CHENG Huai-de^{1, 2)}, BU Di⁵⁾, ZHANG Hao⁵⁾, ZHANG Xi-ying^{1, 2)*}

1) Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008;
2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3) College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098;

4) Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud, Qinghai 816000;

5) Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co., Ltd., Golmud, Qinghai 816000

Abstract: The shallow brine reservoir of Qarhan Salt Lake contains considerable reserves of solid potash resources, and it is currently at the stage of liquefaction mining. The dissolution of solid potassium salt minerals in the brine reservoir and the structural changes of the brine reservoir are controlled by the solvent injection rate, however, the control mechanism is still unclear. In this paper, a typical borehole core in the shallow brine reservoir of Qarhan Salt Lake was investigated. Through the indoor core column seepage simulation experiment,

本文由中国科学院重点部署项目(编号: ZDRW-ZS-2020-3)、国家自然科学基金项目(编号: 41807216)和青海省科技厅项目(编号: 2020-ZJ-765)联合资助。

收稿日期: 2021-10-09; 改回日期: 2022-02-08; 网络首发日期: 2022-02-18。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 常政, 男, 1992 年生。硕士研究生。地质工程专业。E-mail: changercz@163.com。

*通讯作者: 张西营, 男, 1977 年生。博士, 研究员。通讯地址: 810008, 青海省西宁市城西区新宁路 18 号。E-mail: xyzchina@isl.ac.cn。

the permeability coefficient of the brine reservoir and the dissolution of solid potash minerals under three flow rates are studied. The results show that: (1) With the increase of the solvent injection rate, the core permeability coefficient shows a gradually increasing trend, and the potassium ion concentration in the exudate shows a continuous decreasing trend, but at the time node when the flow velocity changes, the rock core both the core permeability coefficient and the potassium ion concentration in the corresponding dissolution liquid showed an abnormal increase. The dissolution of minerals causes the porosity of the reservoir to increase, and the change of the solvent flow rate causes the reorganization of loose salt mineral particles. (2) The dissolution of solid potash minerals in the brine core was significantly affected by the solvent injection rate. The increase in injection rate causes the reorganization of mineral particles and the release of high-concentration water from the retained pores, which were the main reasons for the temporary increase of K^+ concentration in the exudate. This experimental study has certain theoretical guiding significance for the water-soluble mining of low-grade solid potassium salt in the study area.

Key words: Qarhan Salt Lake halogen reservoir; sylvite mineral; permeability coefficient; injection rate

柴达木盆地盐湖钾、锂、硼等资源极为丰富,以察尔汗盐湖为主的柴达木盆地盐湖是我国最重要的钾盐钾肥基地。这些盐湖钾矿以液态晶间卤水和固体钾盐两种形态存在,其中固体钾盐占50%以上。现代盐湖储卤层是一种典型的多孔介质,介质中卤水运移及溶质传输会导致介质中矿物溶解与重结晶,从而改变卤水化学性质、储层孔隙性及渗透性,受到矿物组成、孔隙结构的非均一性以及环境温度、流速等因素的影响,这一过程显得尤为复杂(袁小龙等,2018; 韩光等,2022)。储量巨大的低品位固体钾盐资源高效开发是目前盐湖开发的一个热门话题。1990年青海省盐湖勘查开发研究院在察尔汗盐湖做了淡卤水的回灌溶解驱动实验,分析认为固体钾石盐的溶解率与溶浸时间无相关关系,而与溶剂中的KCl浓度有关(谢志超等,1990)。李文鹏(1991)和Li and Liu(2008)分别在察尔汗盐湖进行的固体钾盐固液转化数值模拟研究发现,在溶浸过程中晶间卤水浓度具有明显的分带特征且 K^+ 浓度呈波浪式前进。郝爱兵和李文鹏(2003)通过溶解驱动开采固体钾矿的室内试验所用溶剂的化学平衡计算,认为溶剂中光卤石不饱和是溶解固体钾盐的关键所在。刘喜业等(2014)对溶解察尔汗盐湖浅部储卤层的低品位固体钾盐的溶剂进行了实验及数值模拟,建立了稳态渗流有限模型。周桓等(2015)通过对大浪滩低品位钾盐溶浸析钾规律的研究发现不同溶剂对固体钾盐的溶浸效果不同。王文祥等(2015)通过现场驱动溶解实验分析了驱动溶解固体钾矿过程中储卤层中水动力与水化学条件的变化特征。王兴富等(2017)通过配制溶浸剂并开发出固体钾矿浸泡式溶解开采技术来溶解开采低品位固体钾盐资源,效果良好。李瑞琴等(2021)通过室内实验结合PHREEQC软件模拟方法,对察尔汗盐湖低品位钾盐矿物特征及其溶解机理进行了研究,得出了溶解

钾盐的最佳溶剂配比,溶钾效果良好。Weisbrod et al.(2012)研究认为,岩盐在渗流溶解过程中,其溶解通道的形成受到许多因素的影响,当溶剂流速低于临界值,溶剂析盐会导致孔隙渗透系数降低,溶剂密度的差异性则会导致盐类矿物发生不均一溶解并形成优势通道。梁卫国等(2003)通过室内试验研究发现盐类矿物的动态溶解特性受到溶剂的流速与溶蚀面积的影响,流速过低或过高都会影响岩盐的溶解速率,溶蚀面积越大,岩盐的溶解速率越快。在相同温度条件下,溶质的迁移扩散能力会随渗透流速的增加而相应增强(Appelo and Postma, 2005; Zhao et al., 2006; 李仁政等,2015)。察尔汗盐湖储卤层中固体钾盐矿物溶解及储卤层结构变化特征受多种因素控制,本文通过开展储卤层岩芯渗流-溶解的室内模拟实验,设置不同流速条件,探讨察尔汗盐湖浅部储卤层在渗流-溶解动态过程中其结构特征及钾盐矿物溶解过程的变化规律,为察尔汗盐湖固液转化机理的深入认识和液化开采方案的优化与实施提供科学依据。

1 研究区概况

察尔汗盐湖位于青海柴达木盆地中东部新生代沉积区(图1),地理坐标为东经 94° — 96° ,北纬 36° — 37° ,东西长约168 km,南北宽20~40 km,面约为5856 km²,大致呈“哑铃”状东西向展布(李承宝和张秀春,2009)。察尔汗盐湖干盐滩按照地质矿产特征被分为四个区段,自西向东依次为别勒滩区段、达布逊区段、察尔汗区段以及霍布逊区段。察尔汗盐湖为典型的大陆荒漠性气候,干旱、多风、少雨、昼夜温差大,年降水量仅为20~30 mm,而蒸发量在3000 mm以上(陈克造和Bowler, 1985)。察尔汗盐湖区深居内陆,区域大气降水对地下水及卤水湖的补给意义不大,南部昆仑山区降水充沛,地表

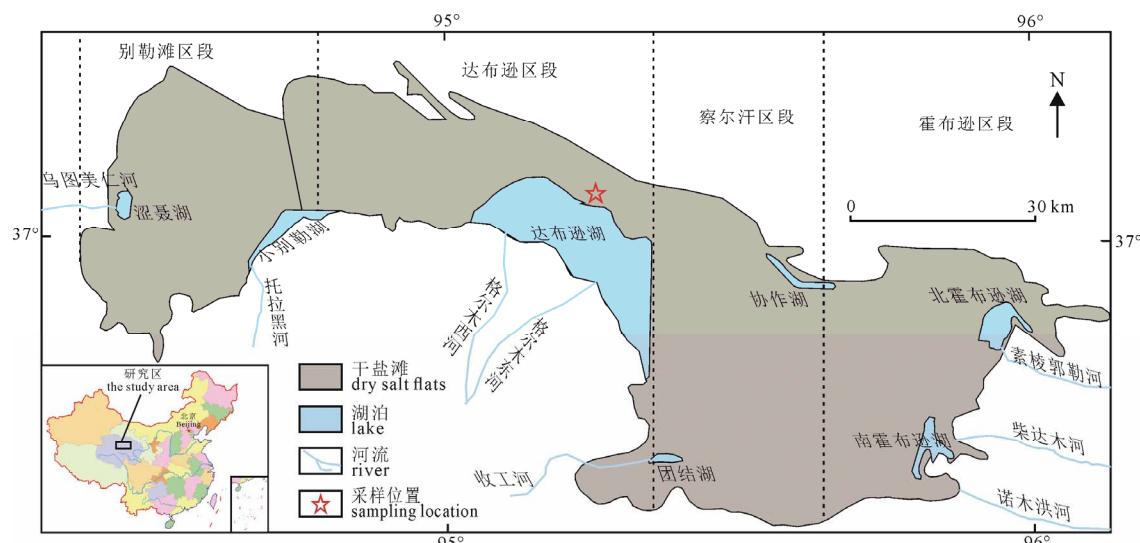


图 1 柴达木盆地察尔汗盐湖研究区域位置图(据于升松, 2000)

Fig. 1 Map showing the location of Qarhan Salt Lake research area in Qaidam Basin (modified from YU, 2000)

水系发育, 山区地表水和地下水最终汇集成出山河流流入盆地, 成为盆地重要的补给来源, 研究区位于察尔汗盐湖达布逊区段, 其晶间卤水的补给来源主要是外围松散层孔隙水的侧向补给、越流补给以及达布逊湖水的补给。

察尔汗盐湖地表平坦, 附近出露地层及储卤盐层均为第四系沉积, 主要盐类矿物包括石盐、光卤石、石膏、钾石盐及水氯镁石等。浅层盐层中石盐晶体间颗粒空隙较为均匀, 晶间孔隙因充填不同比例细砂等碎屑沉积物, 其渗透性存在显著差异性, 盐层孔隙度最高可达 35%, 水平渗透系数为 390 m/d(王文祥等, 2010), 盐层孔隙赋存丰富的氯化物型富钾卤水。察尔汗盐湖含盐系沉积(图 2)主要由五个石盐沉积层(自下而上依次为 S₁—S₅)及五个碎屑层(自下而上依次为 L₁—L₅)组成。而湖区固体钾盐可分为 8 层, 自下而上依次为 K₁—K₈, K₁ 层分布于别勒滩区段的 S₁ 盐层上部, K₂ 层分布于别勒滩和达布逊区段 S₃ 盐层的上部, K₃ 层分布于察尔汗、达布逊、别勒滩区段的 L₄ 碎屑层局部地段, K₄—K₇ 分布于察尔汗、达布逊、别勒滩区段的 S₄ 盐层中, K₈ 分布于达布逊湖与团结湖北岸的 S₅ 盐层中(于升松, 2000)。

2 材料与方法

2.1 实验材料及装置

实验所用岩芯样品采集于察尔汗盐湖达布逊区段 S₅ 盐层(图 3), 样品采集深度为 4.0~4.1 m, 岩芯样品以中粗粒半自形石盐为主, 石盐颗粒多为立方体, 占比约为 81%, 其次为光卤石、水氯镁石、石膏、方解石及其他碎屑矿物, 占比依次为 6%、5%、3%、1%、4%, 光卤石主要分布于石盐颗粒表面和石盐颗粒之间, 呈粒状、条状和片状结构, 分

布不均一, 部分光卤石出现溶蚀现象。其余碎屑物主要由不溶的泥砂颗粒组成, 其一般附着于各种盐类矿物表面。

本研究拟通过室内渗透实验讨论不同流速条件下岩芯的渗透系数变化规律及钾盐溶出规律的问题。渗流装置包括样品室、测压管、蠕动泵和水箱组成(图 4), 其中, 样品室由底座、顶盖以及热缩管(热缩范围为 35~70 mm)组成。在岩芯顶部和底部分别放置孔径均匀的土工透水石, 保证渗流溶剂能够均匀进出整个岩芯断面并防止岩芯颗粒通过其孔隙

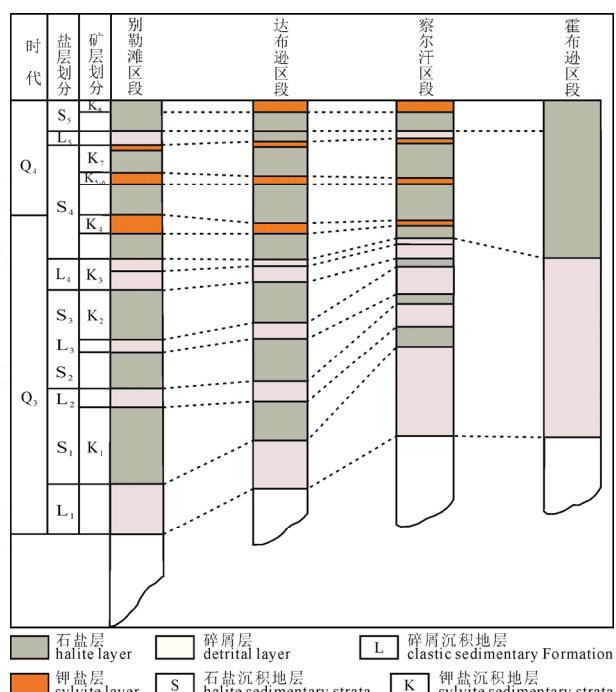
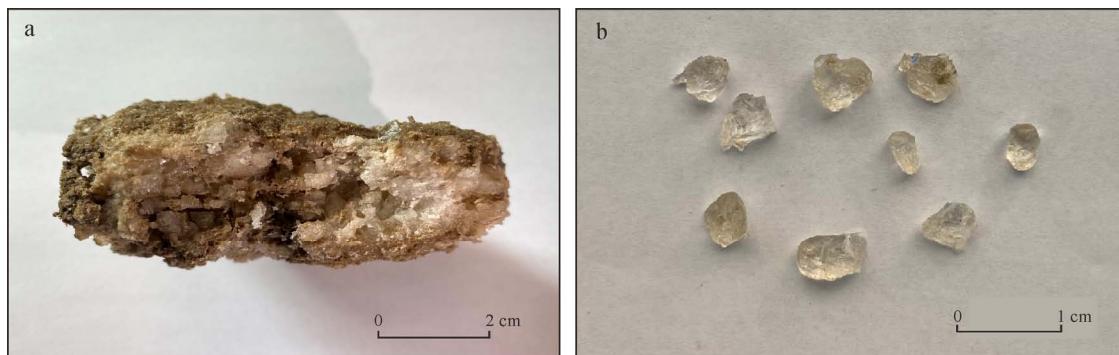


图 2 柴达木盆地察尔汗盐湖研究区地层分布

(据于升松, 2000)

Fig. 2 Stratigraphic distribution of Qarhan Salt Lake research area in Qaidam Basin (modified from YU, 2000)



a—岩芯样品; b—光卤石晶体。

a—core sample; b—carnallite crystal.

图 3 实验所用岩芯样品及光卤石矿物晶体

Fig. 3 Core samples and carnallite mineral crystals analyzed in the experiment

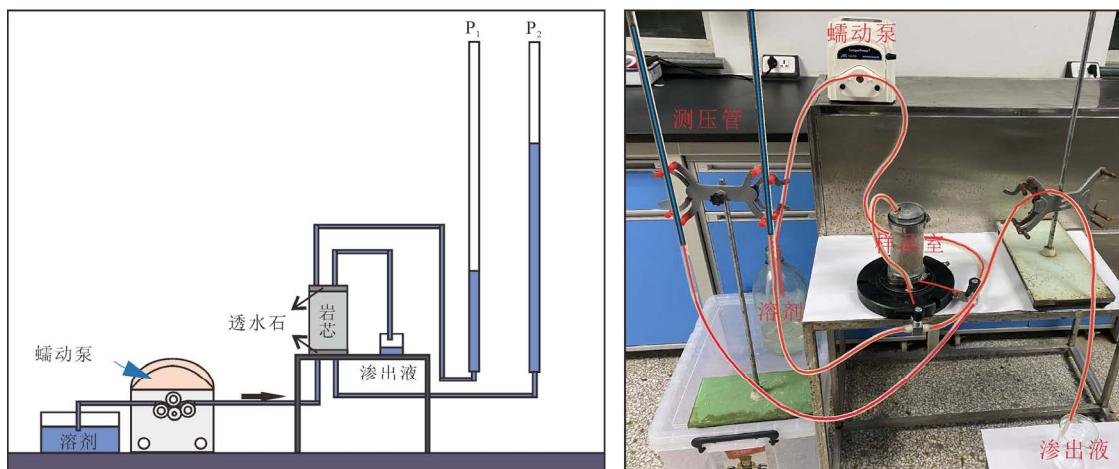


图 4 渗流实验装置示意图及实物图

Fig. 4 Schematic diagram and physical map of seepage experiment device

流出。圆柱状岩芯试样高度为 82 mm、直径为 61.8 mm, 圆柱高度与内径比为 1.327, 可以看作一维渗流实验设备(Benamar et al., 2005)。蠕动泵将水箱中的溶剂以不同流速输送进入岩芯中。

本实验溶剂采用 Li et al.(2021)的研究成果, 该溶剂由 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 组成, 各离子质量分数分别为 0.1%、2.9%、3.77%、0.05%、15.72%、0.13%。实验过程中, 每组实验设置三种不同溶剂注入速度, 分别为 $v_1=0.047 \text{ mL/s}$ 、 $v_2=0.14 \text{ mL/s}$ 、 $v_3=0.3 \text{ mL/s}$, 每一种注入速度持续 60 min, 实验持续时间为 180 min。开始实验前, 将岩芯放入烘箱中在 35°C 的条件下烘干 24 h。由于采集的岩芯大部分为松散未固结状态, 为了模拟原始钻孔岩芯孔隙特征, 本次实验首先通过体积法测试原状钻孔岩芯样品的初始密度, 其密度为 2.82 g/cm^3 , 并以该值作为填充样品密度参考值, 以此计算样品室($6.18 \text{ cm} \times 8.2 \text{ cm}$)内所需样品重量。将所称样品装入样品室之前, 在样品室内壁涂抹一层凡士林, 以减小“边壁效应”(尹升华等, 2018)。所有岩芯均采用干燥填装法, 均分 3 层填装, 同时对每层捣实相

同的次数以保证样品填装的均匀性。实验过程如下: ①通过蠕动泵以流速 v_1 向样品室通入溶剂; ②在预先设定的时间节点处(60 min、120 min)改变注入流速至 v_2 和 v_3 ; ③间隔一定的时间 t 收集渗流过程的渗出液并记录实时水位差 ΔH 及渗出液流量 Q , 采样时间间隔为: 5、10、15、20、30、40、50、60、65、70、75、80、90、100、110、120、125、130、135、140、150、160、170、180 min, 每组实验共采集渗出液样品 24 个。

2.2 分析方法

(1) 渗透系数测定

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:

计算水力坡度:

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

计算流速:

$$v = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

计算渗透系数:

$$K = \frac{v}{t} \quad (3)$$

式中: i 为水力梯度; v 为渗流速度(mL/s); ΔH 为上下游水头差(cm); L 渗流路径长度(cm); Q 某一时间段内的流量(cm^3); t 为时间(s); K 渗透系数(cm/s)。

(2) 离子浓度测定

利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)对渗出液卤水样品中的 K^+ 、 Mg^{2+} 等离子浓度进行测试, 各组分的检测限为 $\text{SO}_4^{2-} < 0.1 \text{ mg/L}$ 、 K^+ 与 $\text{Mg}^{2+} \leq 0.01 \text{ mg/L}$ 、 $\text{Ca}^{2+} \leq 0.001 \text{ mg/L}$; Cl^- 用化学滴定法进行分析, 误差小于 2%; Na^+ 通过差减法获得。所有分析测试工作均在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成。

3 结果与讨论

3.1 储卤层渗透系数变化的影响因素分析

实验过程中, 岩芯渗透系数的变化过程如图 5。在 $v_1=0.047 \text{ mL/s}$ 流速条件下, 在 60 min 渗流溶解过程中, 岩芯渗透系数缓慢增大, 由 0.017 2 cm/s 增加

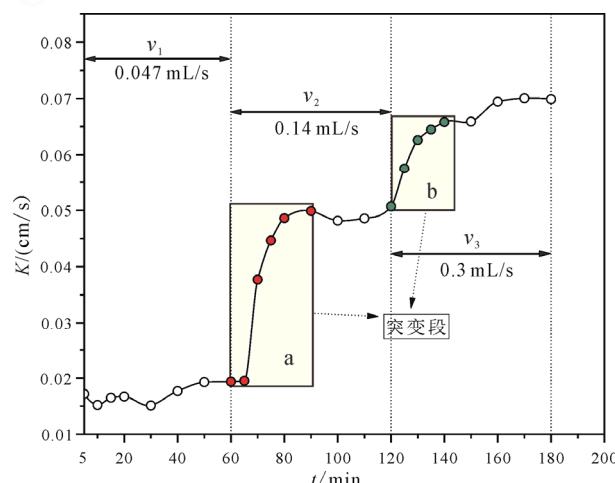


图 5 渗透系数与时间关系(a、b 为渗透系数突变段)

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient with time (a and b represent the abrupt changes in permeability coefficient)

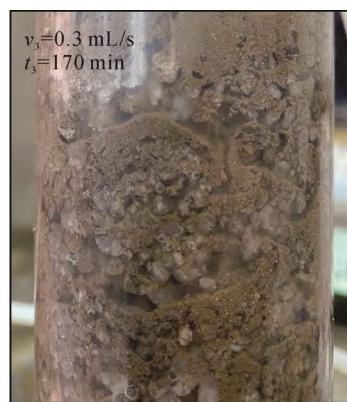
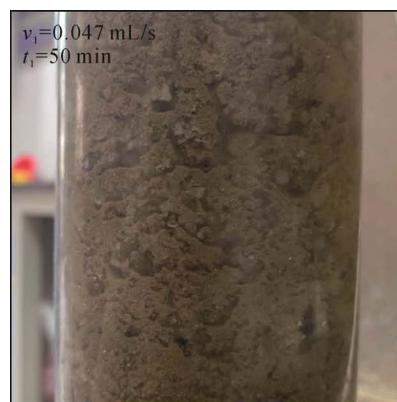


图 6 不同流速条件下岩芯内部孔隙分布

Fig. 6 Pore distribution inside the core under different flow velocity conditions

到 0.019 4 cm/s , 增长率为 12.8%; 之后, 渗透流速增大到 $v_2=0.14 \text{ mL/s}$, 并持续定流速溶解 60 min, 前 20 min, 渗透系数迅速由 0.0194 cm/s 增加到 0.048 6 cm/s , 增长率达到 150.5%(突变段 a), 后 40 min, 渗透系数呈现相对稳定的趋势, 其增长速率仅为 4.3%。当流速增加至 $v_3=0.3 \text{ mL/s}$ 并持续溶解同样时间, 渗透系数变化趋势与 v_2 相似, 均出现先快后慢的增长现象, 由 0.050 1 cm/s 增加到 0.064 5 cm/s , 快速增长期持续时间为 15 min, 且增长速率为 28.7%(突变段 b), 后 45 min 为渗透系数缓慢增长期, 增长速率仅为 8.4%, 增长率均明显小于前者。

储卤层岩芯渗透系数与渗透流速之间表现出明显的非线性特征, 受到多种因素控制。在定流速渗透溶解过程中, 流体对盐类矿物颗粒溶解及对细粒泥沙等不溶物的冲刷能力基本处于相对恒定状态。随着时间的推移, 溶解的矿物的量逐渐增加, 粒间孔隙体积相应增加, 然而, 储层渗透性出现了逐渐变慢的趋势, 这与矿物溶解结果不一致, 这是由于细粒泥沙等不溶物迁移并在下游堆积, 从而抵消了部分因盐类矿物溶解引起的渗透性增强。当流速增加, 流体对盐类矿物颗粒溶解及对细粒泥沙等不溶物的冲刷能力变强的同时, 盐类矿物由于不断溶解, 其骨架支撑能力减弱, 受到较高流速流体的冲击作用, 发生局部骨架坍塌, 增加了流体与矿物接触面, 从而增加了溶解速率, 储层渗透性也迅速增加。由图 6 可见, 实验进行到 $t_1=50 \text{ min}$ 、 $t_2=110 \text{ min}$ 、 $t_3=170 \text{ min}$ 时, 流速分别为 $v_1=0.047 \text{ mL/s}$ 、 $v_2=0.14 \text{ mL/s}$ 、 $v_3=0.3 \text{ mL/s}$, 岩芯内部的孔隙形状变化不同, 表现为流速越大、孔径越大, 连通性越好。到了实验后期, 流体对盐类矿物颗粒溶解及对细粒泥沙等不溶物的冲刷能力重新恢复至相对恒定状态, 渗透性表现出与 v_1 相似的变化特征。

3.2 储卤层固体钾盐矿物溶解特征

渗出液中钾离子浓度变化反应了储卤层固体钾盐矿物溶解特征。由图 7 可见, 在逐渐增加流速的

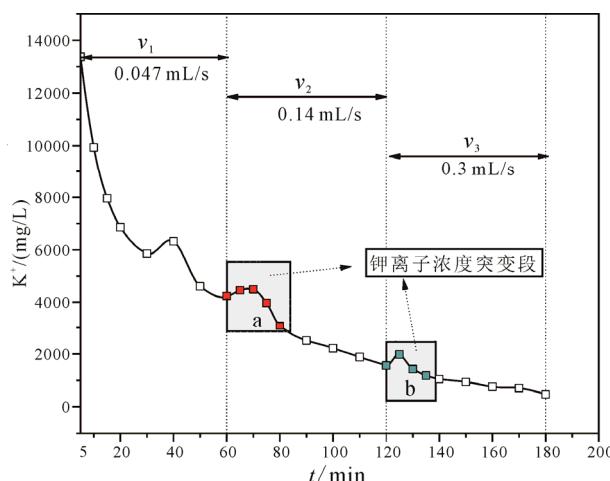


图 7 钾离子浓度与时间关系(a、b 为钾离子浓度突变段)

Fig. 7 The relationship between potassium ion concentration and time (a and b represent the sudden changes of K^+ concentration)

渗透实验中, 渗出液中钾离子浓度表现出总体下降的趋势, 但下降速率逐渐减缓。在当流速由 v_1 增加至 v_2 时, 渗出液中钾离子浓度出现了短时间增加的现象, 其浓度由 4207.48 mg/L 上升到 4490.97 mg/L , 之后由 4490.97 mg/L 迅速下降到 1564.09 mg/L 。同样, 当流速由 v_2 增加至 v_3 时, 渗出液中钾离子浓度表现出相似的变化特征, 即流速增加初期, 渗出液中钾离子浓度由 1564.09 mg/L 上升到 1983.87 mg/L , 之后由 1983.87 mg/L 迅速下降到 467.38 mg/L , 在这一过程中下降趋势逐渐平缓。钾离子浓度增加持续时间随渗流溶解的进行逐渐减小, 当流速为 v_2 时浓度升高持续时间约为 20 min (突变段 a), 但当流速增加为 v_3 时, 浓度增加持续时间只有约 10 min (突变段 b)。

钾盐矿物是钾离子的载体, 溶剂是钾离子运输的媒介, 溶剂与钾盐矿物的有效接触是钾离子溶出的关键。在渗流实验初期, 溶剂与固体钾盐矿物接触即发生溶解, 固体钾盐矿物逐渐溶解至溶剂中并由渗出液带出, 可溶钾含量逐渐降低, 导致渗出液中钾离子浓度持续降低。然而, 持续溶解缩小直至消失的盐类矿物颗粒势必造成大的孔隙的形成, 受到外界流体流速增加的影响, 盐类矿物颗粒骨架发生局部塌落, 引起储层内矿物颗粒短时间内重新堆积。在这一过程中, 前期未与溶剂接触的固体钾盐矿物经过颗粒的移动重组后, 与溶剂发生充分接触并发生溶解, 引起渗出液中钾离子浓度短暂性升高。另外, 储层结构是各向异性的, 其孔隙中孔喉的尺寸及结构也是混乱无序的, 溶剂在储层介质中形成优势渗流通道, 在储层渗流系统相对稳定的状态下, 渗出液经优势渗流通道流出, 由于与通道内固体钾接触

时间有限, 其溶钾能力减弱, 渗出液中钾离子浓度也随之持续下降, 同时部分溶剂会进入位于优势通道外围的孔隙中并处于相对停滞状态, 能够与固体钾盐矿物发生充分接触并维持足够长的反应时间, 这部分滞留溶剂中钾离子浓度则相对较高。当流体流速增加, 矿物颗粒发生迁移并重新排列堆积, 释放原有孔隙滞留的高浓度孔隙水, 也会引起渗出液中钾离子浓度升高。此后, 由于固体钾盐矿物减少, 可溶钾含量逐渐降低, 渗出液钾离子浓度恢复为持续降低趋势。每次流速增加引起的钾离子增加持续时间随着渗透溶解的进行而逐渐减小, 这是由于钾盐矿物溶解殆尽, 流速条件的改变能够引起的矿物溶解增强作用也明显减弱的缘故。

4 结论

本文通过室内模拟实验探究了不同渗透流速条件下储层物理结构变化特征以及储层中固体钾盐矿物溶解规律, 得到以下结论:

(1) 储层岩芯渗透系数与渗透流速之间表现出明显的非线性特征。定流速条件下, 受到矿物溶解及细粒泥沙迁移堆积双重作用, 渗透系数增加缓慢。增加流速后, 矿物溶解及细粒泥沙迁移能力增强, 岩芯骨架部分坍塌引起矿物颗粒重组, 增加了流体与矿物接触面, 从而增加了溶解速率, 储层渗透系数也迅速增加。

(2) 储层岩芯固体钾盐矿物溶解受到溶剂注入速率的影响明显。注入速率增加引起矿物颗粒重组以及滞留孔隙高浓度水体释放是造成渗出液中 K^+ 浓度短暂性升高的主要原因。

致谢: 青海盐湖工业股份有限公司的王罗海工程师、严群雄工程师与青海盐湖所的李俊博士在野外协助采集了岩芯样品, 青海盐湖所盐湖分析测试中心的王波、李海军、韩丽、薛园、李园、马修臻、朱广琴等老师在实验分析过程给予了大力帮助, 易磊博士在研究过程中提供了建设性的意见和建议, 在此一并表示衷心感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by Chinese Academy of Sciences (No. ZDRW-ZS-2020-3), National Natural Science Foundation of China (No. 41807216), and Science and Technology Department of Qinghai Province (No. 2020-ZJ-765).

参考文献:

- 陈克造, BOWLER J M. 1985. 柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究[J]. 中国科学(B 辑), (5): 463-473.

- 韩光,袁小龙,韩积斌,刘久波,范增林,胡燕,张西营. 2022. 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, 43(3): 279-286.
- 郝爱兵,李文鹏. 2003. 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, 11(3): 24-30.
- 李承宝,张秀春. 2009. 青海察尔汗盐湖钾资源开发现状[J]. 现代矿业, 25(2): 16-19.
- 李任政,王心义,刘小满,杨建. 2015. 温度及渗透流速影响下的溶解性有机质运移特征[J]. 环境工程学报, 9(11): 5193-5198.
- 李瑞琴,刘成林,赵艳军,刘万平,王石军,江雨彤. 2021. 青海别勒滩试验区低品位固体钾盐液化开采的野外实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 76-88.
- 李文鹏. 1991. 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.
- 梁卫国,李志萍,赵阳升. 2003. 盐矿水溶开采室内试验的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 22(1): 54-57.
- 刘喜业,李勇刚,张兴儒,崔小琴,张爱华. 2014. 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, 46(8): 18-20.
- 王文祥,李文鹏,安永会,郝爱兵,焦鹏程,刘成林,刘振英. 2015. 察尔汗盐湖单级与增程驱动溶解固体钾矿试验对比研究[J]. 地质论评, 61(5): 1177-1182.
- 王文祥,李文鹏,刘振英,郝爱兵,王石军,焦鹏程. 2010. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场试验研究探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 697-703.
- 王兴富,王石军,田红斌,于雪峰,朱金义,刘万平. 2017. 青海盐湖提钾技术进展与我国钾肥工业的发展[J]. 化工矿物与加工, 46(11): 48-52.
- 谢志超,夏文,王有德,刘霞. 1990. 青海省察尔汗盐湖淡卤水回灌溶解驱动实验报告[R]. 格尔木:青海省盐湖勘查开发研究院.
- 尹升华,齐炎,谢芳芳,陈勋,王雷鸣,邵亚建. 2018. 风化壳淋积型稀土矿浸出前后孔隙结构特性[J]. 中国有色金属学报, 28(10): 2112-2119.
- 于升松. 2000. 察尔汗盐湖首采区钾卤水动态及其预测[M]. 北京:科学出版社.
- 袁小龙,盛金昌,张西营,李斌凯,周同亮,高东林. 2018. 昆特依盐湖浅部储卤层对卤水组成的影响[J]. 水文地质工程地质, 45(2): 13-20.
- 周桓,王晶,白晓琴,贾琳,陈高祺,纪律. 2015. 大浪滩低品位钾矿溶浸富钾规律研究[J]. 化工矿物与加工, 44(9): 1-4, 30.
- References:**
- APPELO C A J, POSTMA D. 2005. Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd Edition[M]. Netherlands: A. A. Balkema Publishers: 86-106.
- BENAMAR A, WANG H Q, AHFIR N D, ALEM A, MASSEI N, DUPONT J P. 2005. Flow velocity effects on the transport and the deposition rate of suspended particles in a saturated porous medium[J]. Comptes Rendus Geosciences, 337(5): 497-504.
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M. 1985. Sedimentary characteristics and paleo climate evolution of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin[J]. Scientia Sinica Series B, (5): 463-473(in Chinese).
- HAN Guang, YUAN Xiao-long, HAN Ji-bin, LIU Jiu-bo, FAN Zeng-lin, HU Yan, ZHANG Xi-ying. 2022. Comparative Analysis on the Characteristic Changes of the Brine Reservoir System before and after Exploration of the Qarhan Salt Lake (Huobuxun Area)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 279-286(in Chinese with English abstract).
- HAO Ai-bing, LI Wen-peng. 2003. The application of Pitzer theory in the geochemical equilibrium study of high concentration brine system with variable temperature[J]. Journal of Salt Lake Research, 11(3): 24-30(in Chinese with English abstract).
- LI Cheng-bao, ZHANG Xiu-chun. 2009. Status quo of development of potassium resource in Cha-er-han Salt Lake in Qinghai[J]. Morden Mining, 25(2): 16-19(in Chinese with English abstract).
- LI Ren-zheng, WANG Xin-yi, LIU Xiao-man, YANG Jian. 2015. Migration characteristics of dissolved organic matter under influence of temperature and seepage velocity[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 9(11): 5193-5198(in Chinese with English abstract).
- LI Rui-qin, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, HU Yu-fei, LIU Wan-ping, WANG Shi-jun. 2021. Simulation study on the mining conditions of dissolution of low grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake[J]. Scientific Reports, 11(1): 10539.
- LI Rui-qin, LIU Cheng-lin, ZHAO Yan-jun, LIU Wan-ping, WANG Shi-jun, JIANG Yu-tong. 2021. A study of the field experimental liquefaction and exploitation of low-grade solid potassium resource in the Bieletan experimental area, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 76-88(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-peng, LIU Zhen-ying. 2008. Numerical modelling of dissolving and driving exploitation of potash salt in the Qarhan Piaya—A coupled model of reactive solute transport and chemical equilibrium in a multi-component underground brine system[J]. Acta Geologica Sinica, 82(5): 1070-1082.
- LI Wen-peng. 1991. The model of dissolving and driving exploita-

- tion and the software development in Qarhan Salt Lake[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- LIANG Wei-guo, LI Zhi-ping, ZHAO Yang-sheng. 2003. Experimental study on solution mining of salt deposit[J]. Journal of Liaoning Technical University, 22(1): 54-57(in Chinese with English abstract).
- LIU Xi-ye, LI Yong-gang, ZHANG Xing-ru, CUI Xiao-qin, ZHANG Ai-hua. 2014. Dissolution experiment and numerical simulation on surface salt of Qarham Salt Lake[J]. Inorganic Chemicals Industry, 46(8): 18-20(in Chinese with English abstract).
- WANG Wen-xiang, LI Wen-peng, AN Yong-hui, HAO Ai-bing, JIAO Peng-cheng, LIU Cheng-lin, LIU Zhen-ying. 2015. Research on comparision of one channel and multiple channel dissolving and driving solid potassium in Qarhan Salt Lake[J]. Geological Review, 61(5): 1177-1182(in Chinese with English abstract).
- WANG Wen-xiang, LI Wen-peng, LIU Zhen-ying, HAO Ai-bing, WANG Shi-jun, JIAO Peng-cheng. 2010. A tentative discussion on in-situ experimental liquefaction and exploitaion of low grade solid potassium resources in Qarhan salt lake[J]. Mineral Deposits, 29(4): 697-703(in Chinese with English abstract).
- WANG Xing-fu, WANG Shi-jun, TIAN Hong-bin, YU Xue-feng, ZHU Jin-yi, LIU Wan-ping. 2017. Potassium extraction technology progress in Qinghai Salt Lake and development of potash fertilizer industry in China[J]. Industrial Minerals & Processing, 46(11): 48-52(in Chinese with English abstract).
- WEISBROD N, ALON-MORDISH C, KONEN E, YECHIELI Y. 2012. Dynamic dissolution of halite rock during flow of diluted saline solutions[J]. Geophysical Research Letters, 39(9): L09404.
- XIE Zhi-chao, XIA Wen, WANG You-de, LIU Xia. 1990. Experimental report on recharging solution drive of fresh brine in Qarhan Salt Lake, Qinghai Province[R]. Golmud: Qinghai Institute of Salt Lake Exploration and Development(in Chinese).
- YIN Sheng-hua, QI Yan, XIE Fang-fang, CHEN Xun, WANG Lei-ming, SHAO Ya-jian. 2018. Porosity characteristic of leaching weathered crust elution-deposited rare earth before and after leaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 28(10): 2112-2119(in Chinese with English abstract).
- YU Sheng-song. 2000. Dynamics and prediction of potassium brine in the first mining area of Qarhan Salt Lake [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- YUAN Xiao-long, SHENG Jin-chang, ZHANG Xi-ying, LI Bin-kai, ZHOU Tong-liang, GAO Dong-lin. 2018. Influence of shallow reservoir upon the components of brines in the Kunteyi playa[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(2): 13-20(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Chong-bin, HOBBS B E, ORD A, HORNBYS P, PENG Sheng-lin, LIU Liang-ming. 2006. Theoretical and numerical analyses of pore-fluid flow patterns around and within inclined large cracks and faults[J]. Geophysical Journal International, 166(2): 970-988.
- ZHOU Huan, WANG Pin, BAI Xiao-qin, JIA Lin, CHEN Gao-qi, JI Lü. 2015. Rules of leaching recovery of potassium in Dalangtan low-grade potash[J]. Industrial Minerals and Processing, 44(9): 1-4, 30(in Chinese with English abstract).