

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.08.018

裂隙水岩反应特征与雷诺数对溶解速率的影响

王者超, 卫如雷, 毕竞超, 毋振华
(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以中国首个地下大型水封油库——黄岛油库为依托,在不同雷诺数条件下进行花岗岩单裂隙水岩相互作用试验,分析花岗岩单裂隙水岩反应特征和雷诺数对花岗岩表面可溶矿物溶解速率的影响. 研究表明,在酸性条件下花岗岩发生化学反应的主要矿物为榍石;水岩之间发生的最主要化学反应为 $\text{CaTiSiO}_5 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{TiO}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ 和 $\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{TiO}_3 \downarrow + 2\text{H}^+$; 0 ~ 10 d 内水岩化学反应最强烈,随后逐渐降低,直至达到平衡;流体流动能显著提升榍石的溶解速率,相比 $Re = 2\,500$ 工况, $Re = 500$ 工况下流体流动对榍石溶解速率的影响更大,这是由于较高的流速降低了溶质运移速率,使得宏观化学反应速率降低.

关 键 词: 花岗岩;单裂隙;水岩化学反应;雷诺数;溶解速率

中图分类号: P 641 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2020)08-1174-06

Characteristics of Water-Rock Reaction and Effect of Reynolds Number on Dissolution Rate for Fractures

WANG Zhe-chao, WEI Ru-lei, BI Jing-chao, WU Zhen-hua
(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Zhe-chao, E-mail: wang_zhechao@hotmail.com)

Abstract: Based on the first large-scale underground water-sealed oil storage facility in China, viz Huangdao underground oil storage facility, the experiments of water-rock interaction in single fractures of granite at different flow rates were performed. The characteristics of water-rock reaction were observed and the effects of Reynolds number on the dissolution rate of soluble minerals on the surface of granite were analyzed. The results show that the main mineral of the chemical reactions of granite in acidic conditions is sphene. The dominant chemical reaction between water and rock are $\text{CaTiSiO}_5 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{TiO}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ and $\text{TiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{TiO}_3 \downarrow + 2\text{H}^+$. The chemical reaction rate is the highest in the first 10 days, then gradually decreases until equilibrium states are reached. Fluid flow can significantly increase the dissolution rate of sphene, however, the reaction rate in the experiment with Reynolds number of 500 is higher than that with Reynolds number of 2 500, due to higher flow rate reducing the transport rate of solute, making the macro chemical reaction rate lower.

Key words: granite; single fracture; water-rock chemical reactions; Reynolds number; dissolution rate

近年来,裂隙岩体中的溶质运移过程受到了相当多的关注.当地下水在岩体裂隙中流动时,会发生水岩反应,从而使得地下水中溶质的浓度发生改变,这种过程改变了地下水和岩体的物理和化学特性,对地下水封油库等工程的安全性

下水环境产生不利的影响.研究裂隙水岩反应特征对于评估地下水封油库等地下岩石工程的长期安全运行有重要作用.

随着地下核废料储置、地下油气储库和地热等岩石工程的开发与利用,水岩反应机理已经成

为国内外的研究热点^[1-2]。周辉等^[3]建立了岩盐溶解耦合模型和一维裂隙渗流-化学耦合模型; 速宝玉等^[4]建立了二维粗糙裂隙面的渗流-化学溶解耦合作用的偏微分方程组, 得到了渗流-化学溶解耦合作用下岩石单裂隙渗透特性的变化规律; 申林方等^[5]通过开展单裂隙花岗岩在长期荷载和化学溶液渗透下的试验, 得到了单裂隙岩石在应力-渗流-化学耦合环境下的综合响应特性; Wendland 等^[6]通过裂隙溶质运移试验研究了裂隙开度和水流对溶质运移的影响; Moore 和 Morrow 等^[7-8]通过试验研究了在流固热化学耦合条件下花岗岩裂隙渗透性的变化情况。在以往的试验研究中, 多数将岩石作为孔隙介质而非裂隙介质, 对花岗岩等多矿物岩体的研究也较少。

本文通过一种可模拟岩石裂隙水岩相互作用的试验仪器, 设计相关试验方案, 进行了不同雷诺数条件下水岩相互作用的试验, 重点分析了花岗岩单裂隙水岩反应特征和雷诺数对花岗岩表面可溶矿物溶解速率的影响, 研究成果展现了多矿物岩体裂隙中水岩反应的主要特征, 将为相关理论研究和工程设计提供重要支持。

1 试验方法

1.1 试验仪器

试验所用仪器主要包括: 温度传感器, 量程为 0~350℃; 涡流流量计, 量程为 0.04~0.4 m³/h; 电磁流量计, 量程为 0~1.2 m³/h; 压力传感器, 量程为 0~0.5 MPa。

试验研究对象为岩石裂隙介质, 能够通过变频增压泵和水压阀来获得不同雷诺数条件下的水流状态。设备整体性能良好。

1.2 试验材料

综合考虑黄岛油库库址区地下水成分及含量^[9], 试验溶液选择配置 6 L 浓度为 1 mmol/L 的 Na₂SO₄ 溶液, 同时为了加快水岩化学反应速率, 将其 pH 调整为 4。

本试验使用的花岗岩试样来自黄岛油库库址区。利用金刚石线切割机将岩样切割成 50 mm × 50 mm × 10 mm 的标准试样, 再通过打磨机将试样表面进行抛光处理。将制备好的试样编号, 每组 6 块。将试样放入蒸馏水中清洗, 再利用烘干仪器将试样干燥处理。烘干机温度设置为 60℃, 干燥处理 2 d。最后通过 0.01 g 实验室电子天平对试样称重处理, 按照编号记录试样质量。

1.3 试验过程

为了研究不同雷诺数条件下花岗岩裂隙水岩反应特征和雷诺数对花岗岩表面可溶矿物溶解速率的影响, 分别在 $Re = 500$ 和 $Re = 2\,500$ 工况下进行花岗岩裂隙水岩相互作用试验, 试验过程如下:

1) 试验进行前先对试验装置的密封性进行检查, 在水箱中加入 6 L 蒸馏水后运行试验装置, 观察是否漏水, 若漏水则立刻关闭变频增压泵开关, 重新检查装置的连接; 反复进行检查直至确保试验装置密封性完好。然后排出蒸馏水, 往水箱中加入事先配制好的 Na₂SO₄ 溶液进行试验。

2) 试验过程中通过调整变频增压泵和控制阀来改变流体流速, 以获得期望的雷诺数值。当水溶液流入到裂隙部位时, 发生裂隙水岩反应过程, 水溶液流出裂隙后再通过回水管路回到水箱, 形成 1 个水循环。同时, 在数据显示屏上可以显示实时的水压、温度和流量值。每天记录 3 次水压、温度和流量数据。此外, 在试验过程中, 每隔 5 d 取 100 mL 试验中的水溶液, 用于检测水溶液中离子浓度的变化情况, 同时往水箱中补充等体积的 Na₂SO₄ 溶液(浓度为 1 mmol/L, pH 为 4), 确保水循环系统中溶液总量不发生变化。整个试验过程取 9 次水溶液, 试验周期控制为 40 d。

3) 将试验过程中采集到的水溶液进行 pH、离子种类和浓度的检测分析。将反应后的花岗岩试样进行清洗、干燥和称重并记录试验后的质量。

2 试验结果

2.1 试样表面矿物成分

为了获得花岗岩试样表面矿物成分, 选择 $Re = 500$ 和 $Re = 2\,500$ 工况下的试样(见图 1)各一块进行成分分析。

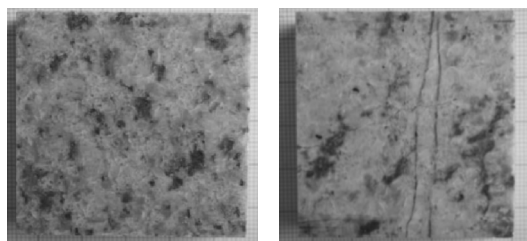


图 1 花岗岩试样制备过程

Fig. 1 Preparation of granite samples

(a)— $Re = 500$; (b)— $Re = 2\,500$ 。

在进行矿物成分分析时, 通过电子探针 X 射线显微分析仪对试样表面进行探测。电子探针的

分析方法主要有定点分析、线分析和面分析方法,本研究主要通过定点分析确定试样的表面矿物成分.

图 2 所示为电子探针定点分析的部分电镜图及谱图,从谱图中可以看出点区域的元素种类. 图 2a 的谱图中 O, Si, Al, K 的含量高,同时含有少量的 Na;图 2b 的谱图中 O, Si, Na, Al 的含量高,同时含有微量的 Ca, K;图 2c 的谱图中 O, Fe 的元素含量高,含有少量的 Al;图 2d 的谱图中 O, Si, Ca, Ti 的元素含量高,含有少量的 Al, Fe. 根据各谱图的元素含量,对比矿物标准成分,分析出试样表面主要的矿物成分有钾长石、钠长石、石英、云母、楣石及钛铁矿.

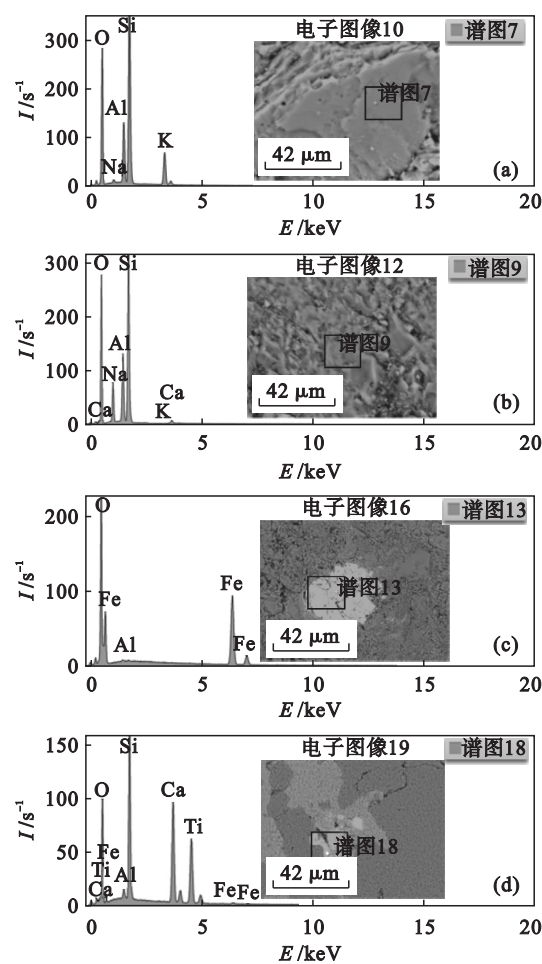


图 2 电子探针点分析电镜图及谱图
Fig. 2 Electron microscope and spectrum of electron probe point analysis

2.2 离子浓度及 pH 的变化

从检测结果来看,水溶液中的离子浓度和 pH 随时间均存在不同程度的变化. 图 3 和图 4 分别为两组工况条件下离子浓度和 pH 随时间的变化曲线. 主要变化特征如下.

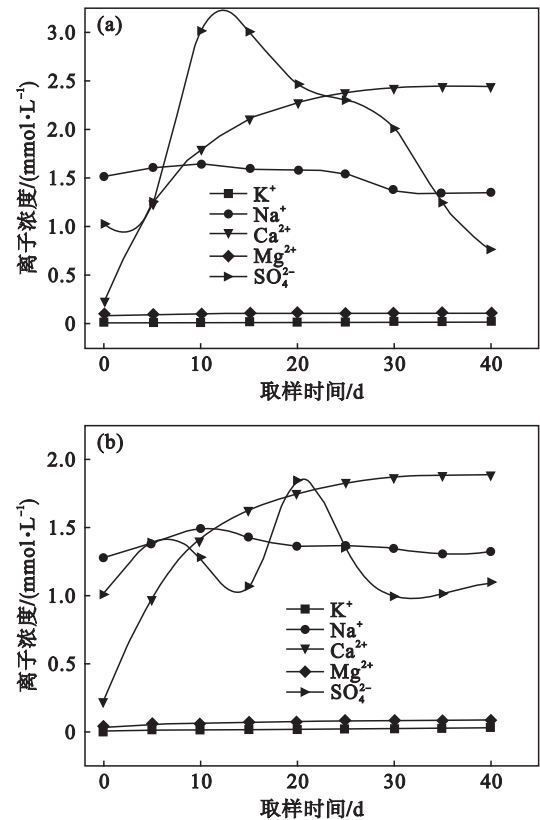


图 3 两组工况离子浓度随时间的变化曲线
Fig. 3 Curves of ion concentration changing with time under two working conditions
(a)— $Re = 500$; (b)— $Re = 2\,500$.

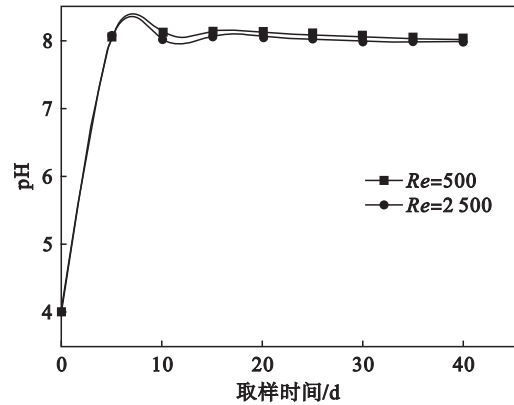


图 4 两组工况 pH 随时间的变化曲线
Fig. 4 Curves of pH changing with time under two working conditions

- 1) Ca^{2+} 的浓度增加量和增加速率远高于其他离子. 鉴于电子探针 X 射线显微仪的探测结果, Ca^{2+} 的来源为楣石的溶解, 可知楣石的溶解度高于钠长石、钾长石和石英等矿物, 是花岗岩中参与水岩化学反应的主要矿物质.
- 2) 从其他离子的浓度变化趋势来看, K^{+} , Mg^{2+} 浓度均有少量上升, Na^{+} 浓度先上升后下降然后基本不变. 从整体来看, 这些离子的浓度均变

化不大,这说明这些离子的来源矿物对本试验的水岩化学反应影响均不大. SO_4^{2-} 浓度均出现了先增大后减小的变化趋势,其浓度变化不是本文主要研究对象,将在之后开展的多工况试验中进行研究.

3) 溶液 pH 在试验开始阶段上升至 $\text{pH} = 8$ 左右然后轻微浮动,且不同雷诺数条件下变化特征基本一致. 矿物溶解过程会消耗 H^+ ,使得 pH 升高,在试验初期水岩反应速率最大,pH 也迅速上升,随着试验的进行,pH 也逐渐趋于稳定.

2.3 试样质量变化

表 1 所示为试验前后岩石质量变化情况,从表中可以看出,在 $Re = 500$ 时岩石实际质量减少了 40 mg, $Re = 2\ 500$ 时岩石实际质量增加了 40 mg.

表 1 试验前后岩石质量变化情况

Table 1 Changes of rock mass before and after test

g

试样号	Re = 500		Re = 2 500	
	反应前/后	质量差	反应前/后	质量差
1	59.16/59.14	-0.02	58.47/58.43	-0.04
2	58.57/58.55	-0.02	57.02/57.05	0.03
3	56.31/56.32	0.01	59.89/59.9	0.01
4	58.36/58.38	0.02	58.74/58.79	0.05
5	62.75/62.75	0	56.44/56.46	0.02
6	61.74/61.71	-0.03	58.89/58.86	-0.03
总计		-0.04		0.04

3 分析与讨论

3.1 主要化学反应

根据花岗岩试样成分分析、水溶液离子种类和浓度检测结果,可以判断试验过程中发生的水岩化学反应;根据试验过程中溶液离子检测情况,通过电荷守恒和质量守恒原理,对各个时间段的水岩化学反应进行计算分析. 表 2 和表 3 为试验过程中发生的水岩化学反应及其计算分析结果.

由表 2 和表 3 可知,本试验中发生的最主要化学反应为: $\text{CaTiSiO}_5 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{TiO}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$, $\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{TiO}_3 \downarrow + 2\text{H}^+$. 在所有发生的反应中,这三个反应在不同时间段均占 80% 以上. 0 ~ 10 d 内,水岩反应现象最强, $Re = 500$ 时物质的量变化为 48.96 mmol,占整个反应过程中的 71.3%; $Re = 2\ 500$ 时物质的量变化为 40.46 mmol,占整个反应

过程中的 74.2%. 10 ~ 30 d 内,水岩反应强度逐渐降低, $Re = 500$ 时物质的量变化为 19.16 mmol,占整个反应过程中的 27.9%; $Re = 2\ 500$ 时物质的量变化为 13.35 mmol,占整个反应过程中的 24.5%. 30 ~ 40 d 内,水岩反应速率逐渐变慢直至平衡, $Re = 500$ 时物质的量变化为 0.59 mmol,占整个反应过程中的 0.9%; $Re = 2\ 500$ 时物质的量变化为 0.74 mmol,占整个反应过程中的 1.4%.

对比两组工况条件下物质的量变化总量与矿物溶解总量,可以看出在不同时间段 $Re = 500$ 的物质的量变化总量与矿物溶解总量均比 $Re = 2\ 500$ 时要大,这说明在试验中, $Re = 500$ 要比 $Re = 2\ 500$ 时的水岩化学反应总量要高,相比 $Re = 2\ 500$ 工况, $Re = 500$ 时发生的水岩化学反应要更强烈.

从矿物活性的角度来看,0 ~ 40 d,在 $Re = 500$ 和 $Re = 2\ 500$ 工况条件下, 榴石溶解反应分别占总反应的 22.89% 和 22.13%,其他矿物的反应占比总和不超过总反应的 5%. 在花岗岩试样所含矿物成分中,榴石反应的总量和其占总反应的比例均远大于其他矿物,是试样的主要反应矿物,钠长石、磁铁矿相对榴石有少量溶解,钾长石、石英、金云母、铁云母基本未发生溶解.

从表中可以得出,在 $Re = 500$ 和 $Re = 2\ 500$ 时岩石理论质量分别增加了 275.12 mg 和 241.41 mg,而实际情况是两组工况的岩石质量只变化了 40 mg,理论值远大于实际值. 试验过程中在已清洁干净的水箱内可以观察到白色细微颗粒,这是因为实际上许多沉淀会由于水流的冲刷而在流速缓慢的地方比如水箱里面沉淀下来,而不是全部附着在岩石试样上,故实际质量变化要小于理论质量变化.

3.2 雷诺数影响

在试验过程中, Ca^{2+} 浓度变化特征明显,因此,在研究雷诺数变化对水岩化学反应速率的影响时,以榴石溶解速率和 Ca^{2+} 浓度变化特征为对象进行研究.

在岩石溶解过程中,考虑流体流动的影响,通过以下公式来进行计算^[10-11]:

$$r = k \cdot f(Re) \cdot (1 - c/c_{eq}), \tag{1}$$

$$k = k_{25} \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right)\right]. \tag{2}$$

式中: r 为岩石表面矿物溶解速率, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; c 为矿物溶解的溶质浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; c_{eq} 为矿物溶解达到平衡时溶质浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; k 为静止状态下矿物溶解反应中的动力学常数, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

k_{25} 为非流动状态下 25 ℃ 时矿物的溶解速率, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; E_{a} 为反应活化能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为普适气体常数, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}$; $f(Re)$ 为流体的雷诺数

对反应速率的影响程度. 在本研究中, 已知非流动状态下 25 ℃ 时榍石 $k = 10^{-9}\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $E_{\text{a}} = 12.8\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, $R = 8.314\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}$.

表 2 不同时间段各个反应发生比例						
Table 2 Proportion of reactions and mass changes at different time periods						
化学反应	反应占比/%					
	<i>Re</i> = 500			<i>Re</i> = 2 500		
	0 ~ < 10 d	10 ~ < 30 d	30 ~ 40 d	0 ~ < 10 d	10 ~ < 30 d	30 ~ 40 d
$\text{CaTiSiO}_5 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{TiO}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$	23.11	22.30	23.27	21.49	24.08	21.89
$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{CaSO}_4 \downarrow$	3.93	2.35	2.53	3.93	3.37	4.86
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.47	1.66	1.01	0.44	0.45	0.81
$2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \downarrow + 4\text{SiO}_2 + 2\text{K}^+$	0.00	0.19	2.02	0.09	0.27	1.62
$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4 \downarrow + 4\text{SiO}_2 + 2\text{Na}^+$	1.54	0.53	3.04	3.19	0.18	5.68
$\text{KAlMg}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 10\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{K}^+ + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 3\text{Mg}^{2+}$	0.07	0.05	0.67	0.13	0.28	0.54
$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 10\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{K}^+ + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + 3\text{Fe}^{2+}$	0.01	0.03	0.00	0.01	0.04	0.00
$\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{H}^+$	0.08	0.08	0.67	0.14	0.33	0.54
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{H}^+$	0.12	0.19	1.01	0.59	0.90	0.00
$\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow + 3\text{H}^+$	1.18	3.32	2.02	0.89	0.90	1.62
$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	46.33	46.97	40.47	47.45	44.93	40.54
$\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SiO}_3 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + \text{SiO}_3^-$	0.05	0.03	0.00	0.15	0.18	0.00
$\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{TiO}_3 \downarrow + 2\text{H}^+$	23.11	22.30	23.27	21.49	24.08	21.89

表 3 不同时间段的质量变化情况						
Table 3 Mass changes at different time periods						
<i>Re</i>	时间段/d	浓度变化总量/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	物质的量变化 总量/mmol	矿物溶解 总量/mg	矿物沉淀 总量/mg	质量变化/mg
500	0 ~ < 10	8.16	48.96	-2 487.59	2 717.38	229.78
	10 ~ < 30	3.19	19.16	-955.63	999.94	44.31
	30 ~ 40	0.10	0.59	-38.16	39.19	1.03
2 500	0 ~ < 10	6.74	40.46	-2 124.24	2 308.83	184.59
	10 ~ < 30	2.23	13.35	-681.74	735.56	53.83
	30 ~ 40	0.12	0.74	-49.15	52.13	2.99

由式(1)可知,在 Ca^{2+} 接近饱和时,其微小的变化就会对结果产生较大影响,故只取 0 ~ 20 d 的数据对 $f(Re)$ 值进行计算. 同时由于不同工况下的反应温度和反应面积存在差距,故在计算时对反应温度和反应面积也进行了修正,修正后单位面积榍石的溶解速率随时间变化曲线如图 5 所示.

试验开始时,榍石的溶解速率很高,随着试验的进展,榍石的溶解速率逐渐下降到零. 通过比较两组工况,可以看出, $Re = 500$ 工况下的榍石溶解速率比 $Re = 2\,500$ 工况下的大.

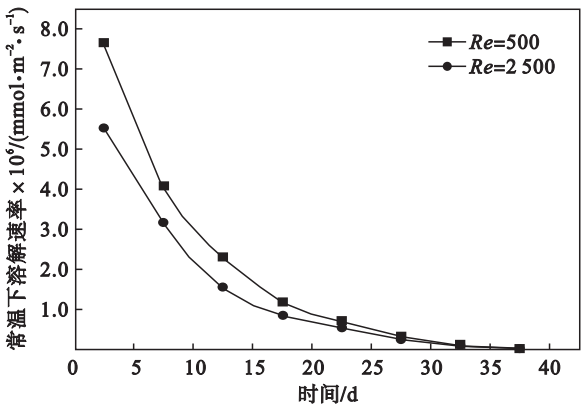


图 5 修正后榍石的溶解速率变化曲线
Fig. 5 Modified dissolution rate curves of sphene

根据式(1)可计算出 Re 对榴石溶解速率影响的程度 $f(Re)$: $Re = 500$ 时, $f(Re) = 11\ 162.9$; $Re = 2\ 500$ 时, $f(Re) = 8\ 134.4$. 计算结果表明, 流体流动能显著提升榴石的溶解速率, 相比 $Re = 2\ 500$ 工况, $Re = 500$ 工况下流体流动对榴石溶解速率的影响更大. 这是因为当流速增大时, 裂隙流中出现了大量旋涡, 这些旋涡中的流体不参与对流过程, 因此降低了溶质运移速率^[12]. 这导致了 $Re = 2\ 500$ 工况下流速虽大, 但宏观化学反应速率降低, 从而说明实验过程中水流速度越快, 并不能使得水岩反应越充分.

4 结 论

1) 试样表面主要的矿物成分有钾长石、钠长石、石英、云母、榴石及钛铁矿, 其中榴石为主要的反应矿物.

2) 在花岗岩单裂隙水岩相互作用的模拟试验中, 发生的最主要化学反应为: $\text{CaTiSiO}_5 + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{TiO}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Ca}^{2+}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ 和 $\text{TiO}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{TiO}_3 \downarrow + 2\text{H}^+$. $0 \sim 10\text{ d}$ 内水岩化学反应最为剧烈, 随后逐渐减弱, 直至达到平衡. 在试验中, $Re = 500$ 比 $Re = 2\ 500$ 时的水岩化学反应总量高, 该工况下发生的水岩化学反应更剧烈.

3) $Re = 500$ 时, 榴石的溶解动力学常数是是非流动状态下的 $11\ 162.9$ 倍; $Re = 2\ 500$ 时, 榴石的溶解动力学常数是是非流动状态下的 $8\ 134.4$ 倍. 计算结果表明, 流体流动能显著提升榴石的溶解速率, 且 $Re = 500$ 工况下流体流动对榴石溶解速率的影响更大. 这是因为流速增大时裂隙流中出现的大量旋涡降低了溶质运移速率, 从而使得 $Re = 2\ 500$ 工况下的宏观化学反应速率降低, 这说明了实验过程中增加流体的流速, 并不能使得水岩反应更充分.

参考文献:

- [1] 王者超, 王心语, 韦昌富, 等. 水化学条件对高岭土压缩性的影响机理[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(5): 109–117.
(Wang Zhe-chao, Wang Xin-yu, Wei Chang-fu, et al. The effect of hydrochemical conditions on compression characteristics of kaolinite [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2018, 48(5): 109–117.)
- [2] Qiao L P, Huang A D, Wang Z C. Alteration of minerals and temporal evolution of solution in reactive flow through granitic rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104–105.
- [3] 周辉, 汤艳春, 胡大伟, 等. 盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 946–950.
(Zhou Hui, Tang Yan-chun, Hu Da-wei, et al. Study on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 946–950.)
- [4] 速宝玉, 张文捷, 盛金昌, 等. 渗流-化学溶解耦合作用下岩石单裂隙渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3361–3366.
(Su Bao-yu, Zhang Wen-jie, Sheng Jin-chang, et al. Study of permeability in single fracture under effects of coupled fluid flow and chemical dissolution [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3361–3366.)
- [5] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 单裂隙花岗岩在应力-渗流-化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1379–1388.
(Shen Lin-fang, Feng Xia-ting, Pan Peng-zhi, et al. Experimental research on mechano-hydro-chemical coupling of granite with single fracture [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(7): 1379–1388.)
- [6] Wendland E, Himmelsbach T. Transport simulation with stochastic aperture for a single fracture—comparison with a laboratory experiment [J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(1): 19–32.
- [7] Moore D E, Lockner D A, Byerlee J D. Reduction of permeability in granite at elevated temperatures [J]. *Science*, 1994, 265(5178): 1558–1561.
- [8] Morrow C A, Moore D E, Lockner D A. Permeability reduction in granite under hydrothermal conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106 (B12): 551–560.
- [9] Wang Z C, Glais Y, Qiao L P. Hydro-geochemical analysis of the interplay between the groundwater, host rock and water curtain system for an underground oil storage facility [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 466–477.
- [10] Dreybrodt W, Gabrovsek F. Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst [M/OL]//Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation [2019–05–18]. http://speleogenesis.info/directory/karstbase/pdf/seka_pdf4469.pdf.
- [11] Steefel C I, Lasaga A C. A coupled model for transport of multiple chemical species and kinetic precipitation/dissolution reactions with application to reactive flow in single phases hydrothermal systems [J]. *American Journal of Science*, 1994, 294(5): 529–592.
- [12] Zou L C, Jing L R, Cvetkovic V. Roughness decomposition and nonlinear fluid flow in a single rock fracture [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 75: 102–118.