

DOI: 10.11779/CJGE201507018

复合温度条件下石灰岩多场耦合裂隙渗透侵蚀试验研究

贾春兰¹, 朱 凯²

(1. 新疆维吾尔自治区水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 深部岩石工程处在高应力、高水压力、高地热等复杂地质环境中, 这些因素相互作用将对岩石的渗透特性产生重要影响, 进而影响深部岩石工程的安全和生产效率。通过开展不同温度(25℃~90℃)条件下的同一块石灰岩裂隙多场耦合渗透特性变化试验, 得到了温度因素对石灰岩裂隙渗透特性的影响规律。试验结果表明: 在恒定有效压力作用下, 升温阶段的初始时刻有一个流量峰值过程, 温度恒定时, 流量缓慢减小并最终趋于稳定状态; 温度升高使得岩石裂隙渗透率单调下降, 裂隙开度进一步减小; 此外, 温度越高, 初始阶段裂隙开度闭合速度快, 趋于稳定开度值历时越短且最终稳定开度值越小。石灰岩的侵蚀溶解速度随温度的升高而加快, 裂隙面溶解出的矿物质增多, 因此, 渗出液中各离子的浓度随温度的升高变大。

关键词: 岩石裂隙; 渗透; 石灰岩; 裂隙开度; 离子浓度

中图分类号: TV43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)07-1307-06

作者简介: 贾春兰(1987-), 女, 硕士, 主要从事水利水电勘测设计研究。E-mail: 544960676@qq.com。

Evolution of rock fracture permeability in coupled processes with variable temperatures

JIA Chun-lan¹, ZHU Kai²

(1. Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The projects in deep rock are under complex geological environment of high stress, high water pressure, high heat, etc. These factors may have important influences on the permeability in fractured rock and further on the safety and productivity of deep rock projects. Flow-through tests on an artificial fracture in limestone are conducted at 25℃~90℃. The effects of different temperatures on the evolution of permeability in fractured rock are studied. The results show that at the initial stage of heating, the flow has a peak under constant effective stress. It decreases slowly until one steady count at constant temperature at last. The fracture permeability declines monotonically with the increasing temperature under constant effective stress. Faster speeds of fracture closure at the initial stage, shorter time required for stabilization and smaller aperture at the final equilibrium under higher temperatures can also be observed. The solubility speed and dissolved mineral matter of limestone increase with the increasing temperatures.

Key words: fractured rock; permeability; limestone; fracture aperture; ion concentration

0 引 言

水电开发在中国正如火如荼的进行着, 世界级的大坝高坝不断出现, 水工隧洞、地下厂房等都处在复杂地质条件下, 这些工程中, 地下岩石都处在高水压、高应力、高地温的环境下。这种特殊环境存在极其复杂的相互作用, 即渗流应力温度耦合作用^[1]。而岩石中的裂隙在高压、高水头和高地温的作用下, 裂隙的空间分布和几何形态的变化将影响到整个工程的长期安全稳定; 此外, 地下溶洞在高应力高水头和高地温的作用下, 其发展变化情况也是影响工程安全的重要因素。因此, 流固热耦合作用下裂隙岩石渗透特性变

化规律的研究对水电工程尤其是高坝工程具有十分重要的科学意义和应用价值, 是岩石力学领域一个亟待解决的基础性课题。

关于渗流应力温度耦合的研究起步较早, 国内外的学者们在试验研究和数值模拟研究方面都取得了丰富的成果: Polak 等^[2]试验研究了不同温度下石英岩裂隙渗流特性的变化过程, 在 900 h 的试验过程中裂隙等效水力开度降至原来的 1/5, 渗透性降低到原来的 1/25。Yasuhara 等^[3]在水热条件下对花岗岩单裂隙进行

了渗透试验研究, 得出了在室温下裂隙开度随时间单调减小, 并最终达到稳定状态, 温度升高到 90℃时, 裂隙开度重新减小, 且减小趋势一直持续到试验结束, 分析了温度升高裂隙开度减小的原因。Taron 等^[4]利用 THMC 模型来研究天然裂隙介质中的一些主要行为和渗透特性的变化机制, 结果表明在温度、应力和化学共同作用下, 流体注入和溢出之间渗透率有两个数量级的变化, 升高温度促进流体在裂隙中的运输。贺玉龙等^[5]研究了不同温度 (22.6℃~50℃) 和有效应力 (1~25 MPa) 下峨眉山紫红色细砂岩的孔隙度和渗透率变化规律, 研究表明在试验应力水平下, 温度升高时岩石渗透率减小幅度很大而孔隙度的变化却很小。张玉军等^[6]建立了饱和-非饱和双重孔隙-裂隙介质的热-水-应力-迁移耦合三维数值模型。

综上所述, 近些年来国外的学者们从理论和试验上探讨了多场耦合作用下裂隙岩石渗透特性变化机制, 并取得了初步的成效, 但其试验条件与实际工程的匹配性不好。而研究工作在国内主要集中在裂隙岩石的力学以及变形特性上、耦合模型以及力学关系上, 同时也进行了裂隙岩石在流-固-热三场耦合作用下的渗透特性试验研究, 但试验不是很多且代表性差, 研究的成果还比较薄弱。系统的从试验方面研究温度变化条件下渗流-应力多场耦合影响下裂隙岩石的渗透特性变化规律的较少。

本文结合实际工程环境, 通过开展渗透试验的方法, 探讨温度 (室温~90℃) 与其它影响因素耦合作用时对石灰岩裂隙渗透特性影响机理的研究, 为水电工程设计提供参考。

1 试验模型

1.1 试件制备

试件选用山东济宁市嘉祥县山体里面采集的石灰岩。通过 X 射线衍射仪 (HX041) 衍射分析得到其主要矿物成分及质量百分含量, 分别为方解石 CaCO_3 (45%~55%), 白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (40%~50%), 石英 SiO_2 (<3%), 水云母 (少量)。为研究温度 (室温~90℃) 的升温和恒温过程岩石裂隙的渗透特性, 在加工好的圆柱型石灰岩试件 (直径 50 mm, 高 100 mm) 上进行一系列的渗透试验。试件包括一条通过改进的巴西劈裂法 (将原有巴西劈裂法中岩石固定器去除, 直接至于压力机上, 并用相应钢条人工置于岩石与压力机上板接触处, 产生应力集中效应, 在压力作用下生成人工裂隙) 产生平行于轴线方向, 贯穿整个试件的人工粗糙裂隙面, 如图 1。

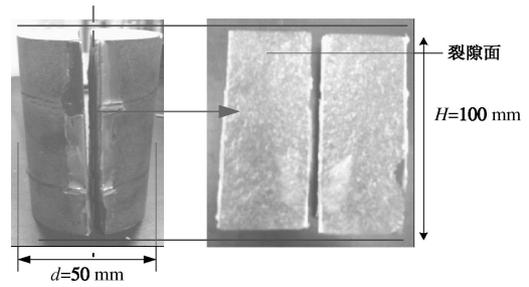


图 1 岩石裂隙表面

Fig. 1 Surface of rock fracture

1.2 试验系统

试验在多场耦合渗透试验平台上进行, 如图 2 所示。试验全过程微机控制, 实现进出口流量、变形、轴压、围压、渗透压电脑精确控制、自动采集。首先用蒸馏水轻轻冲洗裂隙表面, 再将两个半块岩石小心地拼在一起, 避免引入小碎屑在裂隙中, 然后将拼好的岩石试件外围均匀涂一层硅胶, 并套一层进口热缩套。这种谨慎处理岩石试件是为了避免高温高压下由于应力集中使热缩管套被击穿或破裂, 造成围压和渗透压之间的连通从而影响试验的进行。最后将其置于围压室腔体内。围压、轴压和渗透压均采用电脑自动控制系统独立施加压力, 动态测控精度均达到 ±0.5%。通过工艺油加热机对围压室腔体内的液压油进行加热, 能在 1 h 内完成从室温到 90℃的加热。通过炉温对渗透水流进行加热, 这种双重加热方法的组合使注入的流体温度与岩样的温度一起得到保持, 精确的温度控制器, 可对试验温度进行精确地设定和控制, 保证试验过程中温度持续而稳定。采用直接称取从压力室出口渗出的液体重量, 并记录获得的渗出液相应的时间的方法得到流体的流量。使用电感耦合等离子体发射光谱仪测量累计时段内渗出液中的离子浓度值。

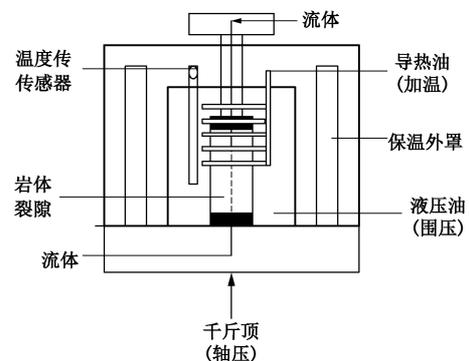


图 2 多场耦合试验装置简图

Fig. 2 Diagram of multi-field coupling test facility

1.3 试验过程

本试验主要研究温度改变下多场耦合作用对岩石裂隙渗透特性的影响, 不考虑压力、裂隙面初始粗糙度、试验过程中裂隙面的改变及岩石基质变化的影响,

因此,在同一块裂隙岩石试件上,围压设为 2.5 MPa,轴压 30 kN,进口处渗透压为 0.4 MPa,出口处与大气相通设为大气压,且在整个试验过程中保持恒定。待压力稳定后,将温度逐级升高(室温, 50℃, 70℃, 90℃)进行试验。在室温时,围压为 2.5 MPa,轴压 30 kN 的条件下进行的两个试验阶段用来观察改变渗透压条件下流量和裂隙开度的变化。具体试验条件见表 1。

表 1 不同试验工况条件

Table 1 Different conditions of tests

工况	围压 /MPa	渗透压 /MPa	温度 /℃	备注
1	2.5	0.25	25	采集数据
2	2.5	0.4	25	采集数据
3	2.5	0.4	50	温度稳定,采集数据
4	2.5	0.4	70	温度稳定,采集数据
5	2.5	0.4	90	温度稳定,采集数据

在同一块岩石试件上进行阶梯状加温,待温度达到目标值后,其他试验条件不变,进行恒温状态下的试验。每一恒温阶段在开始计时后,进行间隔性的流量测定和定时取水样检测离子浓度,当流速达到稳定状态并至少维持数天后再进入下一个温度试验阶段。流量记录和渗出液水样获取贯穿整个试验过程。试验中液体在裂隙中的流动速度很小,水流在裂隙中的流动可近似的看作为层流,根据测得的流量、已知的渗透压差等通过近似的平行板模型可以转化为水力开度^[7],

$$q = AV = AKJ = bD \frac{gb^2 H}{12\nu L} = \frac{Db^3 \Delta P}{12\nu \rho L}, \quad (1)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{12\nu \rho L q}{D \Delta P}}. \quad (2)$$

式中 q 为通过裂隙面的流量 (m^3/s); A 为裂隙横断面积 (m^2); V 为通过裂隙的流速 (m/s); K 为裂隙的渗透系数 (m/s); J 为通过裂隙的水力比降; b 为裂隙的平均开度 (m); D 为裂隙岩石的直径 (m); g 为重力加速度 (m/s^2); L 为裂隙岩石的高度 (m); ν 为水流的运动黏滞系数 (m^2/s) (与温度有关); ρ 为水流密度 (kg/m^3); H 为水头高度 (m); ΔP 为裂隙水流进出端的压力差 (Pa) (此处裂隙出口视为与大气相连接,相对压强 0 MPa,故此处压力差即为裂隙入口处的渗透压力)。

试验中使用的石灰岩矿物的主要成分是方解石 (CaCO_3) (45%~55%)、白云石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (40%~50%) 以及少量的石英 (SiO_2) (3%),所以本试验中主要检测渗出液里面 Ca 和 Mg 离子的浓度,以反应表面溶解作用的影响。

2 试验结果及分析

2.1 岩石裂隙流量及开度的变化

根据试验工况的不同,流经裂隙岩石流量的大小也有所不同。流量大小主要与岩石裂隙的渗透系数有关,因此流量大小的变化间接的反映了裂隙岩石渗透系数的变化情况,继而体现了裂隙开度大小的变化情况。

图 3 为常温下只改变渗透压时裂隙流量随时间的变化图,从图中两条曲线的变化趋势可以看出,两种工况下通过裂隙的流量随着时间的增长逐渐减小,并最终趋于稳定的状态,两种工况均是初始时刻的流量急剧减小,随后减小的速度开始变小。工况 1 初始时刻刚加载围压,裂隙还未完全闭合开度较大,通过裂隙的流量较大,约为 2.9 mL/h,其后在围压、渗透水的作用下流量逐渐减小到约 0.6 mL/h,并趋于稳定状态;工况 2 与工况 1 相比仅是增大渗透压,试验过程与工况 1 是连续的,故起始时刻流量有一个增大的过程,从 1.5 mL/h 升高到 2.2 mL/h,达到峰值后流量急剧减小,最终趋于 0.7 mL/h 的稳定流量。

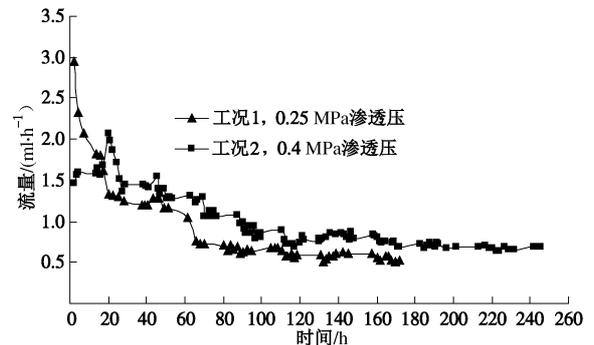


图 3 常温下渗透压为 0.25 MPa 和 0.4 MPa 下通过裂隙的流量曲线图

Fig. 3 Flux through fracture under osmotic pressure of 0.25 and 0.4 MPa

试验过程中,围压、轴压、以及渗透压都恒定不变的,且仪器精度较高,工况 1 和工况 2 中 15 m 的水头差可保持稳定不变,这对试验结果的准确性做出了一定贡献,但由于渗出液的称重、计时和读取等均人工操作以及室温的较小波动,使试验结果存在一定误差,但其影响不大。

图 4 均是在前一工况基础上,温度升高到 50℃, 70℃ 和 90℃ 时且各试验条件均达到稳定状态后的流量随时间变化曲线图,初始时刻流量随时间不断减小,但流量的减小幅度较小且缓慢。工况 3 初始时刻流量相对于工况 2 时刻末流量有小幅度增大,随后渗流量开始缓慢减小,这是由于温度的增大,水流的黏性变小,流动速度变大,使得渗流量有所增加;而温度的

升高又使裂隙两壁的岩石膨胀, 岩石裂隙经过温度作用所产生的热应力而封闭, 使得裂隙网络连通性以及导水性受到影响^[8]。

工况 4 和工况 5 分别在前一工况的基础上, 温度升高到 70℃ 和 90℃ 时渗流量随时间的变化。每一次升温阶段初始时刻都会有一个流量峰值过程, 工况 4 中流量从 1.05 ml/h 增加到约 1.2 ml/h, 增幅为 14.28%, 工况 5 中流量从 0.6 ml/h 增加到 0.88 ml/h 左右, 增幅为 46.67%。流量幅度增大说明升高温度促进流体在裂隙中的输运, 这种输运行为的促进通过流体黏滞系数的减小, 矿物质溶解^[4]。在工况 4 温度恒定的 200 多小时中, 流量缓慢稳步下降, 在初始的 80 h 中流量从最初的 1.2 ml/h 大幅度下降到 0.6 ml/h, 在随后的时间里流量减小幅度变小并最终趋于稳定状态。流量减小归因于在温度作用下裂隙凹凸不平处以及接触颗粒的溶解, 使原先凹凸不平的裂隙面变得平缓, 在围压的挤压作用下裂隙闭合, 裂隙的渗透性减小。在工况五中流量在初始的 50 h 里从 0.88 ml/h 下降到 0.5 ml/h, 流量在随后的减小过程中波动较大, 这是由于温度加载到 90℃ 时, 温度控制仪器出现了故障, 导致温度波动较大, 进而使流量出现较大波动。这也很好的说明了温度对通过裂隙面流量的影响。

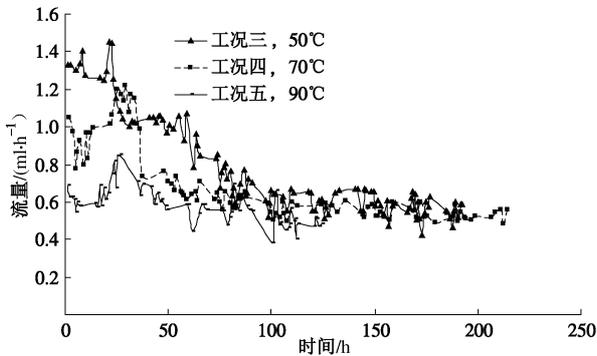


图 4 50℃, 70℃, 90℃ 渗透压为 0.4 MPa 下通过裂隙的流量曲线图

Fig. 4 Flux through fracture under osmotic pressure of 0.4 MPa and temperature of 50°C, 70°C and 90°C

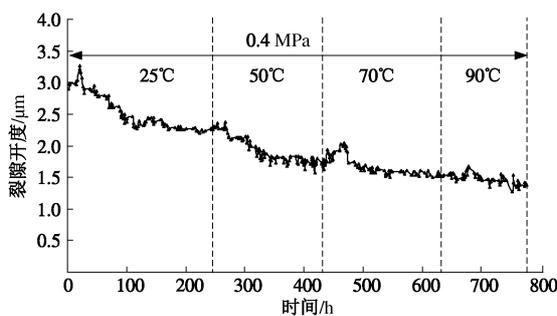


图 5 温度变化作用下裂隙平均开度变化曲线图

Fig. 5 Average opening of fracture under function of temperature variation

图 5 显示, 裂隙的平均开度随时间的变化与流经裂隙的流量随时间的变化趋势是完全一致的。从渗透试验总体来看, 裂隙开度是单调减小的。工况 1 中开度随时间的增加逐渐减小并最终趋于稳定状态, 工况 1 中裂隙的平均开度最大, 工况 2 其次, 工况 3 到工况 5 随着温度的不断增加, 裂隙平均开度逐渐减小。这是由于在工况 1 时渗透压较小, 且试验是在室温下进行的, 室温下水的黏滞系数较大, 裂隙岩石在较低的温度下临界应力较大, 裂隙面支撑颗粒不易破碎, 故稳定时其裂隙的开度依旧较大; 工况 2 也在室温下进行的, 但渗透压增大, 流体在裂隙中的流速较大, 对裂隙面的侵蚀溶解作用增大, 可以溶解裂隙表面的一些凹凸不平, 在施加的围压作用下裂隙压紧闭合, 故稳定后裂隙的平均开度较小; 工况 3、工况 4 和工况 5 的平均裂隙开度更小, 这主要是由于温度增加, 裂隙面支撑颗粒发生不可逆的破碎以及接触颗粒的溶解, 这样就铲除了原先裂隙中的尖角, 溶解的矿物质被流动的水流带走以及矿物质的沉淀引起裂隙空间的堵塞^[9], 裂隙在围压力作用下闭合。工况 2 中岩石裂隙的开度从初始时刻的 2.9 μm 降到了 2.3 μm, 历时约 245 h; 工况 3 历时 192.4 h 后开度降到 1.75 μm; 工况 4 中的试验在经历 214.6 h 后开度降为 1.5 μm; 工况 5 的试验在经历 124.15 h 后裂隙开度降为 1.4 μm。说明开度随温度升高而减小。

从试验整个过程来看, 每加一级温度, 初始时刻裂隙开度都会增加随之进一步减小, 温度恒定后, 开度逐渐减小并最终趋于稳定。开度的单调减小归因于矿物颗粒的重新分布, 裂隙的粗糙处和接触颗粒的破坏、溶解以及流动喉道处矿物颗粒的沉淀等综合作用。裂隙由于应力所产生的破坏是不可逆的^[10]。温度属于环境条件, 温度变化影响裂隙开度的改变是通过改变裂隙岩石的化学反应、流体流通特性、材料性质等过程, 这些过程均依赖于温度的影响, 从而影响裂隙开度和渗透特性的变化。

试验进入恒温阶段后, 裂隙开度缓慢变小。由于温度升高后裂隙岩石临界应力变小, 促进压力溶解。在压力溶解作用下裂隙表面的支撑颗粒破碎, 经过围压的挤压裂隙慢慢闭合。随着接触面积的不断增大, 溶解速率逐渐变小, 最终裂隙开度趋于稳定值。

2.2 渗出液离子的浓度变化

岩石裂隙在水流的作用下, 其表面的矿物质会被水流冲刷、侵蚀、溶解, 并被带走, 其不仅导致了裂隙平均开度的变化, 而且也对渗出液中离子的浓度产生影响。

图 6 中 Ca 离子和 Mg 离子均出现一个峰值, 分别为 23 mg/L 和 5 mg/L, 这是由于岩石在劈裂时裂隙面

产生的碎屑, 未冲洗干净, 在试验过程中, 这些微粒溶解在溶液中通过水流被带出, 随着裂隙表面碎屑被带出, 随后测得的离子浓度为裂隙面被侵蚀溶解所得。图 6, 7 对比发现, 相应时刻增大了渗透压的工况 2 中各离子的浓度反而比工况 1 中的要小, 在工况 2 中, 由于裂隙表面“游离”的矿物微粒已经随着渗出液被带走, 而环境温度为常温, 常温作用下石灰岩岩样被侵蚀溶解的作用相对较弱, 裂隙面的矿物质只能缓慢的被侵蚀溶解。故虽然其渗透压力比工况 1 时要大, 但被流经的水流带出的离子浓度却较小。

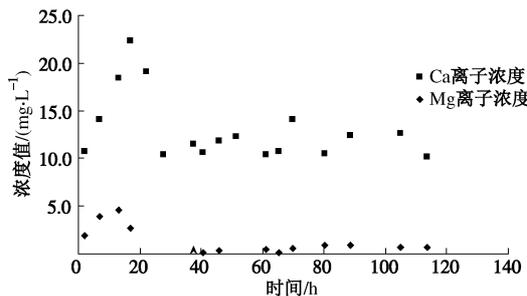


图 6 工况一 25°C 渗透压为 0.25 MPa 下离子浓度变化图
Fig. 6 Variation of ionic concentration under osmotic pressure of 0.25 MPa and temperature of 25°C

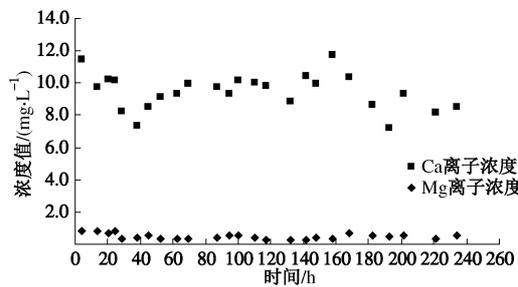


图 7 工况二 25°C 渗透压为 0.4 MPa 下离子浓度变化图
Fig. 7 Variation of ionic concentration under osmotic pressure of 0.4 MPa and temperature of 25°C

图 8, 9 描述了不同试验温度作用下 Ca 离子和 Mg 离子浓度随时间的变化曲线。室温下测得的 Ca 离子平均浓度为 9.46 mg/L, Mg 离子平均浓度为 0.49 mg/L。并在这一试验阶段有小的波动。当试验温度升高到 50°C 时, Ca 离子平均浓度为 14.16 mg/L, Mg 离子平均浓度为 0.5 mg/L, 试验过程中离子浓度波动较大, Ca 离子和 Mg 离子的浓度较 25°C 时均增加。特别是 Ca 离子的浓度十分依赖于温度。而当试验温度升高到 70°C 时, Ca 离子平均浓度为 17.11 mg/L, Mg 离子平均浓度为 0.53 mg/L。Ca 离子和 Mg 离子浓度较 50°C 进一步增大。石灰岩的矿物成分中 Ca 离子含量较 Mg 离子要高许多, 因此渗出液中检测到的 Mg 离子比较少, 但其随温度的变化趋势和 Ca 离子是相似

的。

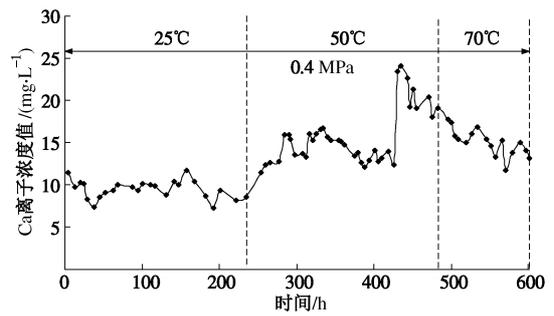


图 8 不同温度下渗透压为 0.4 MPa 下 Ca 离子浓度变化图
Fig. 8 Variation of calcium ion under different temperatures and osmotic pressure of 0.4 MPa

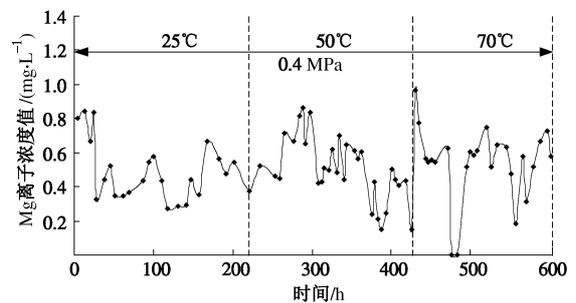


图 9 不同温度下渗透压为 0.4 MPa 下 Mg 离子浓度变化图
Fig. 9 Variation of magnesium ion under different temperatures and osmotic pressure of 0.4 MPa

图 8, 9 显示, 试验条件不变的情况下, 随着温度的升高, 裂隙表面溶解出的矿物质增加, 大量的 Ca 离子和 Mg 离子流失。这表明系统温度提高促进裂隙表面溶解。在岩石裂隙中, 接触颗粒和自由表面上都会发生化学溶解作用。化学反应的过程是分子之间碰撞的结果, 具有一定能量的分子才能发生碰撞, 系统温度提高增加活化能分子数量, 由 Arrhenius 方程可知温度升高促进溶解速率常数, 因此, 接触颗粒和自由表面上的溶解作用加速。测得的离子浓度与温度表现出明显的关系, 溶液中的溶解质量源于接触凹凸处的破碎和裂隙自由面的溶解, 如果自由面溶解占主导地位, 那么裂隙的开度将随时间增大, 反之则相反, 这两种情况是不兼容的^[3], 因此, 图中同一恒定温度下离子浓度有增有减。从整个试验过程看, 温度越高溶解速率越大, 支撑粗糙处通过溶解而发生断裂, 渗出液中离子浓度增加。

3 结 论

(1) 常温下, 其他试验条件不变, 增大渗透压, 初始时刻流量有一个增大的过程, 待达到峰值后又大幅度减小, 并最终趋于稳定流量值。

(2) 3次升温过程中(50℃, 70℃, 90℃), 初始时刻均出现一个流量峰值, 相应的裂隙开度都有一个变大过程, 说明温度升高能促进岩石裂隙渗透性的改变。每一级温度恒定后, 流量以较小的速度稳步下降并最终趋于稳定状态。整个试验过程裂隙平均开度单调减小, 并随温度的升高进一步减小。常温下开度减小22%, 50℃时减小40%, 70℃时和90℃时减小52%。观察到的裂隙开度的减少过程可能是接触颗粒由于挤压发生的机械破碎以及裂隙支撑颗粒和自由面的溶解所引起。

(3) 随着试验过程中温度的不同, 石灰岩的侵蚀溶解速度随温度的升高而加快, 裂隙面溶解出的矿物质增多, 因此渗出液中各离子的浓度也随之增大。

参考文献:

- [1] FENG X, LIU J, JING L. Research and application on coupled t-h-m-c processes of geological media in china-a review[J]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2004, 2: 37 - 48.
- [2] POLAK A, ELSWORTH D, YASUHARA H, et al. Permeability reduction of a natural fracture under net dissolution by hydrothermal fluids[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(20).
- [3] YASUHARA H, KINOSHITA N, OHFUJI H, et al. Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(12): 2074 - 2088.
- [4] TARON J, ELSWORTH D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5): 855 - 864.
- [5] 贺玉龙, 杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2420 - 2427. (HE Yu-long, YANG Li-zhong. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2420 - 2427. (in Chinese))
- [6] 张玉军, 张维庆. 三维双重孔隙-裂隙介质热-水-应力-迁移耦合模型及其有限元分析[J]. 中国科学(技术科学), 2010, 40(12): 1426 - 1436. (ZHANG Yu-Jun, ZHANG Wei-Qing. 3D thermo-hydro-mechanical-migratory coupling model and femanalyses for dual-porosity medium[J]. Sciences China (Technology Sciences), 2010, 40(12): 1426 - 1436. (in Chinese))
- [7] GANGI A F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure[C]// Prestened at the First International Symposium on Induced Seismicity(ISIS). Banff, 1975.
- [8] 刘亚晨. 裂隙岩体介质 THM 耦合问题中的渗透特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(1): 80 - 84. (LIU Ya-chen. Study on the permeable behavior of coupled thermo-hydro-mechanical problem in fracture rock mass media[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(1): 80 - 84. (in Chinese))
- [9] YASUHARA H, ELSWORTH D. Compaction of a rock fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(7): 1289 - 1306.
- [10] POLAK A, YASUHARA H, ELSWORTH D, et al. The evolution of permeability in natural fractures-the competing roles of pressure solution and free-face dissolution[J]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2004, 2: 721 - 726.