

花岗岩网络裂隙水流及热量分配实验研究

高峰钧, 钱家忠*, 王沐, 王德建, 马雷

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥, 230009, Email:qianjiazhong@hfut.edu.cn)

摘要: 网络裂隙由于其裂隙通道的复杂性, 使得对于确定网络裂隙中水流形态具有很大的挑战。为了了解网络裂隙中优势流的分配规律, 本研究设计了一种花岗岩网络裂隙模型, 开展了不同水力梯度下的水流及温度运移研究, 以探究裂隙宽度及角度对花岗岩裂隙中的水流控制机理, 得到以下实验结果: 在本实验条件下, 裂隙水流流速 V 与水力梯度 J 呈非线性关系, 应用 *Forchheimer* 公式能对其关系进行较好的拟合; 隙宽及裂隙交角对裂隙中的流量分配具有不同程度的控制作用; 裂隙中水流及热量的分配在一定情况下具有相似性, 利用温度示踪裂隙水流规律具有一定的可行性。

关键词: 花岗岩裂隙; 优势流; 流量分配; 热量分配; 实验研究

1 引言

作为地下水赋存的主要载体裂隙介质, 由于受到自然界构造作用等的影响, 具有各种各样的特征, 不同的裂隙特征对于地下水的流动会形成不同的影响, 特别是对于网络裂隙, 由于裂隙通道的复杂性, 使得网络裂隙中水流规律的确定具有较大的困难。确定网络裂隙的优势水力路径对于其中水流规律的研究具有重要意义。然而以往的研究主要集中在隙宽, 裂隙粗糙度等对于基岩裂隙中渗流的影响^[1-4]。当水流在流经裂隙交叉点时, 会有偏流效应^[5], 造成各个裂隙中的流量分配有一定的差异, 确定裂隙中的优势路径对于岩土工程具有重要的意义^[6]。然而以往的研究多集中在简单的“x”及“y”型交叉裂隙或者是天然原状裂隙^[7,8]。裂隙中热量的变化情况与裂隙渗流特征有一定的联系, 其相关研究始于 20 世纪 80 年代末, 随着 Lapham^[9]提出使用温度量化地下水流相互作用的方法相关研究逐渐获得关注, 许多学者通过监测裂隙介质中的温度数据来研究渗流特性。Stonestrom 等^[10]提出了温度可以用来监测地下水的渗透交换, 特别是在防水温度记录仪出现后, 热量与地下水之间的关系被广泛研究。Becker^[11]使用机载温度传感器对区域地下水流量进行探测。Cherubini^[12]等设计了网络裂隙热传递的实验研究, 并用一定的网络模型模拟了温度曲线, 结果表明, 与溶质运移相比温度运移存在延迟效应。当掌握其中的联系之后我们便可以通过温度的变化

来反映裂隙中水流特征，这对于研究地下水是十分具有帮助的。基于上述研究，本文设计了一种花岗岩裂隙，探讨一进多出条件下，花岗岩网络裂隙中的优势流问题，设计了不同角度及隙宽的裂隙，通过测量进出水口的流量及水力梯度，探究该裂隙模型中角度及隙宽对优势流的控制作用，及花岗岩裂隙中热量分配与水流流量分配之间的关系。

2 实验设计方案

为了研究裂隙中的水流及热量分配问题，本文设计了一种一进多出的裂隙，裂隙介质由花岗岩切割而成。实验模型由三部分组成，进出水箱，花岗岩裂隙，温度监测系统。温度监测系统由温度光纤传感器及光纤光栅解调仪构成。将温度光纤传感器插入裂隙中，以监测裂隙不同部位的温度变化。为方便起见，将温度传感器编号与裂隙编号对应，裂隙从左至右，从上到下依次编为 8#, 4#, 1#, 3#, 7#, 2#, 5#, 共 7 条裂隙，隙宽和角度如图 1 (a) 所示。水流经 8# 裂隙流入，同时从 4#, 1#, 3#, 7#, 2#, 5# 裂隙流出（水流方向如图 1 (b) 中箭头所示）。通过调节进出水箱高度来改变裂隙中的水流速度，并对 6 个出口通道进行了流量测量及其相应的水力梯度的计算，探究不同条件下的水流分配问题。对于热量分配实验研究，将模型内注入一定量的热水，通过测出各裂隙通道不同位置处温度随时间的变化情况，分析过裂隙隙宽和偏转角度变化的对温度运移的影响，以及与每条出水通道中流量大小的对应关系。

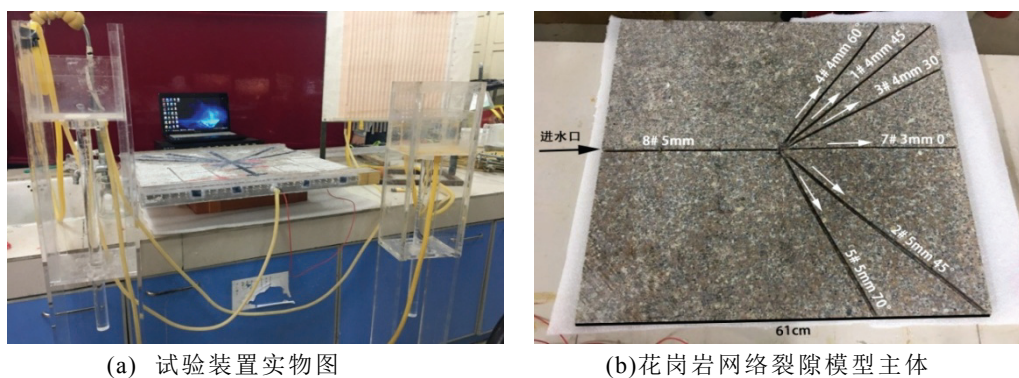


图 1 花岗岩网络裂隙模型

3 结果与分析

3.1 花岗岩网络裂隙水力梯度与流速的关系

首先进行裂隙的水力实验，探究该裂隙模型中的水流形态。

水力学中我们常用 Forchheimer 来表征水流的非达西流特征。其公式为

$$J = -(aV + bV^2) \text{ 或 } -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{K}V + \beta\rho V^2$$

式中： J 为水力梯度； a 和 b 为参数，分别表示黏滞项和惯性项所造成的水头损失； β 为惯性项阻力系数又称非达西系数，负号表示梯度的方向。方程式右侧的线性项表示黏性力，而二次项表示惯性力，反映了裂隙介质中达西流动和非达西流动的特征。

每条裂隙中水力梯度和平均流速关系如图 2 所示。

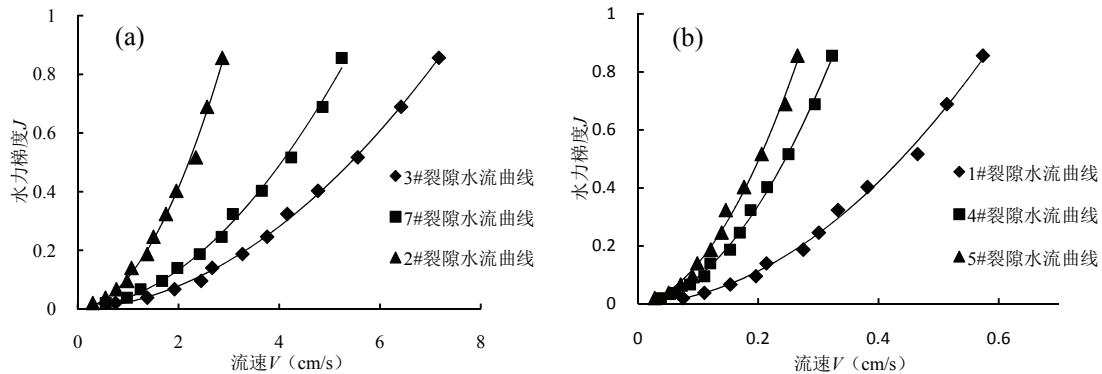


图 2 花岗岩网络裂隙平均流速 V 与水力梯度 J 关系

从图 2 可以看出，平均流速与水力梯度关系符合非线性流，用 Forchheimer 公式拟合效果较好。并且在同一水力梯度条件下，六条分支裂隙流速由高到低排序为：3#裂隙，7#裂隙，2#裂隙，1#裂隙，4#裂隙，5#裂隙。经过试验监测，前 3 条裂隙流速在同一量级，后 3 条裂隙流速较前者低一个数量级，所以将其流速分布分为两组。根据花岗岩裂隙通道不同隙宽和裂隙交角，从图 (a) 可以看出，3#裂隙与 7#裂隙夹角 30° ，而其裂隙隙宽比 7#裂隙大 1mm，隙宽增大的影响超过了交叉角度的影响，所以 3#裂隙流速大于 7#裂隙流速。然后 7#裂隙和 2#裂隙相比，隙宽增加 2mm，但是角度增加 45° ，此时角度的影响超过隙宽增大的影响，所以 7#流速大于 2#裂隙流速。图 2 (a) 中 3 条裂隙分流了大部分水流，使得剩下 3 条裂隙流速降低一个量级，其中 5#裂隙隙宽大于 1#和 4#裂隙，但是 5#裂隙偏离了 70° ，1#和 4#裂隙分别偏离 45° 和 60° ，角度偏离较大，影响超过隙宽增大的影响，所以 5#裂隙中流速最小，水流流量最少。

3.2 不同裂隙类型对流量分配的影响

为了分析花岗岩网络裂隙中流量分配的影响因素。根据前面试验介绍和所得结论，在 6 条出水支裂隙中将较大支裂隙（1#，2#，3#，4#，7#裂隙）的流量与最小支裂隙（5#裂隙）流量差分别记为优势流量 Δq_{35} ， Δq_{75} ， Δq_{25} ， Δq_{15} ， Δq_{45} 。统计优势流量与总流量的实验数据得到如下结果（图 3）。

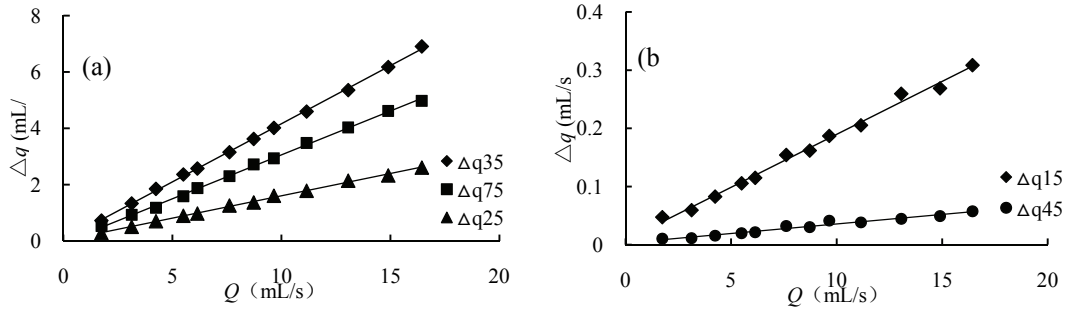


图3 花岗岩网络裂隙中优势流量 Δq 与总流量 Q 关系

(图中 a 分别为 Δq_{35} , Δq_{75} , Δq_{25} 与 Q 关系; 图中 b 分别为 Δq_{15} , Δq_{45} 与 Q 关系)

从图3结果可以看出,优势流量 Δq 与总流量 Q 之间存在较好的线性拟合关系,仅计算其相关系数 R^2 均达到0.95以上。图3中的斜率为 $\Delta q/Q$,斜率越大,说明优势流量占总流量的比率越大,从图3中我们可以看出优势流量 Δq_{35} 的斜率最大,说明3#裂隙是最大优势通道,然后依次是7#,2#,1#,4#,5#裂隙。这与上一节中花岗岩裂隙水流分析一致。

3.3 花岗岩网络裂隙中的热量运移

通过温度光纤传感器可以对该裂隙模型中的特定部位进行实时温度监测,了解温度在裂隙中的运移情况。图4中所列为不同裂隙中探头(温度光纤传感器)中监测到的温度随时间的变化情况,限于篇幅,这里仅给出了6条出水裂隙中距离裂隙交叉点最近的温度监测点的温度变化(图4)。

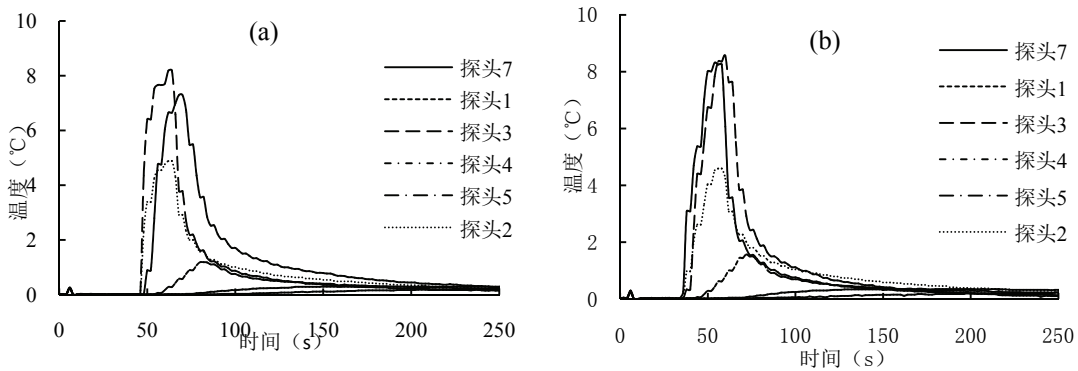


图4 花岗岩网络裂隙不同点温度示踪剂穿透曲线对比图

(图 a 流量为 4.24mL/s; 图 b 流量为 5.41mL/s)

图4为在注入量为20mL时的温度变化穿透曲线图。通过比较得出,同一组试验中,温度由高到低的探头顺序为 $3>7>2>1>4>5$,且前面三组温度变化值较接近,后面三组温度

变化很小,这与上一节优势流分析相对应,优势流量最多的3号探头温度变化也是最大的。另外,随着流速的增加,3号探头温度峰值增加,前面几组与7号探头温度差值不大,但是流速最大时与7号探头温度有明显的差值。说明优势流的作用随着流量的增加而增大。

3.4 花岗岩网络裂隙中热量分配与流量分配的比较

分析了不同流量和注入量条件下热量分配和流量分配的差异,在花岗岩温度监测试验中记总温度变化为 Q ,根据实验结果将3号、7号、2号探头(1号、4号与5号探头温度差值较小,未统计)与5号探头温度变化差值记为T35、T75、T25,他们与 Q 的关系统计如图5所示。

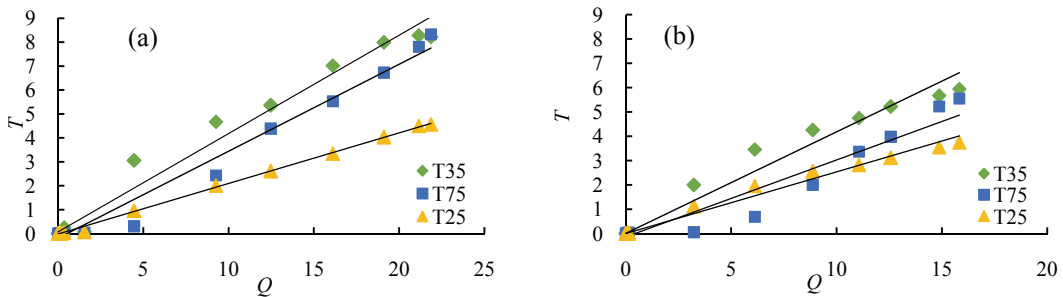


图5 花岗岩网络裂隙各通道温度变化差值与总温度变化差值对比图

(图 a 流量为 4.24mL/s 注入量 20 mL; 图 b 流量为 5.41mL/s 注入量 20 mL)

由于热量在运移的过程中会发生热传导,热对流及热辐射,会造成热量的耗散,而且裂隙中水流的运动和热量运移相互耦合,使得裂隙中热量运移的研究十分复杂,因此在不同的注入量及流速条件下,热量的分配会出现不同的结果,其不同条件下的热量分配结果与流量分配的对比关系如下表1所示。

表1 热量分配与流量分配的比较

优势流	流量分配 (%)	热量分配 (%)			
		a	b	c	d
△35	41.2	41.1	41.7	39.0	47.0
△75	31.1	36.3	31.6	35.1	21.9
△25	15.8	21.2	25.3	23.5	24.0

(a 流量为 4.24mL/s 注入量 20 mL; b 流量为 5.41mL/s 注入量 20 mL; c 流量为 6.70mL/s 注入量 20 mL; d 流量为 4.24mL/s 注入量 10 mL)

结合图5及表1可以总结出以下结论:图5中(a)、(b)为不同流量在同一注入量20mL条件下各探头温度变化差值与总温度变化关系,经过与前文优势流差值占比图3(a)对比得出,流速为4.24mL/s时,各探头温度变化分配与流量分配最接近。表1中详细列举了不同流速及注入量条件下热量分和流量分配的对比关系,综合分析得出,在流量为4.24mL/s注

入量 20 mL 时, 热量分配与真实的流量分配最接近, 3 条曲线相对误差值分别为 0.34%、16.70%和 33.52%。

4 结论

(1) 在该花岗岩不同隙宽和偏转角度的裂隙通道中, 平均流速与水力梯度关系符合非线性流, 用 Forchheimer 公式拟合效果较好。

(2) 隙宽及裂隙角度均对裂隙中的水流分配有一定的影响, 但裂隙偏转角度及隙宽的影响程度不同: 在本实验中, 同一水力梯度条件下, 隙宽增大 1mm 的影响超过了 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间的一个裂隙偏转角度值的影响。

(3) 裂隙中热量分配特征与水流分配特征在一定条件下具有相似性, 利用热量变化来反映水流规律具有一定的可行性。

致谢

本文得到国家自然科学基金 (41831289、41772250 和 41877191) 及安徽省公益性地质调查项目 (2015-g-26) 支持)。

参考文献

- 1 Qian J Z, Chen Z, Zhan H B, et al. Experimental study of the effect of roughness and Reynolds number on fluid flow in rough-walled single fractures: A check of local cubic law. *Hydrol. Processes*, 2011, 25(4): 614-622.
- 2 Qian J Z, Zhan H B, Luo S H, et al. Experimental evidence of scale-dependent hydraulic conductivity for fully developed turbulent flow in a single fracture. *J. Hydrol.*, 2007, 339(3/4): 206-215.
- 3 Qian J Z, Zhan H B, Zhao W D, et al. Experimental study of turbulent unconfined groundwater flow in a single fracture. *J. Hydrol.*, 2005, 311(1): 134-142.
- 4 Zhang Z Y, Nemeik J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures. *J. Hydrol.*, 2013, 477(16): 139-151.
- 5 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性. *地质学报*, 1986 (2): 90-102.
- 6 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体渗流的优势水力路径. *四川大学学报: 工程科学版*, 2012, 44 (6): 108-115.
- 7 Zou L C, Jing L R, Cvetkovic V. Modeling of flow and mixing in 3D rough-walled rock fracture intersections. *Adv. Water Resour.*, 2017, 107: 1-9.

- 8 桑盛, 刘卫群, 宋良, 等. 岩体交叉裂隙水流分配特性研究. 实验力学, 2016, 31 (5): 577-583.
- 9 Lapham W W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. U.S.: Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1989.
- 10 Stonestrom D A, Constantz J. Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams. U.S.: Geol. Surv. Circ., 2003: 1 - 96.
- 11 Becker M W. Potential for Satellite Remote Sensing of Ground Water. Groundwater, 2006, 44(2): 306-318.
- 12 Cherubini C, Nicola P, Giasi C I, et al. Laboratory experimental investigation of heat transport in fractured media. Nonlinear. Proc. Geoph., 2017, 24(1): 23-42.

Study on flow and heat distribution in granite fracture network

GAO Feng-jun, QIAN Jia-zhong, WANG Mu, WANG De-jian, MA Lei

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009.

Email: qianjiazhong@hfut.edu.cn)

Abstract: Because of the complexity of network fissures, it is a great challenge to determine the flow pattern in network fissures. In order to understand the distribution law of dominant flow in network fissures, a granite network fissure model is designed in this paper, and the flow and temperature migration under different hydraulic gradients are studied to explore the mechanism of fissure width and angle controlling the flow in granite fissures. The following experimental results are obtained: Under the experimental conditions, the velocity V of fissure flow has a non-linear relationship with the hydraulic gradient J . The Forchheimer formula can be used to fit the relationship well; the width and intersection of the fissures have different control effects on the flow distribution in the fissures; the distribution of water flow and heat in the fissures has similarity under certain circumstances, and it is feasible to trace the flow law in the fissures by using temperature.

Key words: granite fissures; dominant flow; flow distribution; heat distribution; experimental study