

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.16

裂隙岩体非线性渗流特性分析

蒙学礼¹, 蒙发强¹, 李涣森¹, 刘振龙², 彭鹏程²

(1. 广西壮族自治区第四地质队, 广西 南宁 530033; 2. 广西第一地质工程公司, 广西 南宁 530033)

摘要: 开展了不同围压下的裂隙岩体渗流试验, 提出了一种简单的裂隙隙宽测量方法, 并研究了渗流过程裂隙的变形特征; 基于 Forchheimer 非线性渗流方程, 计算了非线性系数及渗透率, 分析了围压与非线性系数及渗透率的关系。研究结果表明, 随着围压增大, 岩样的渗透率减小, 非线性渗流系数增大; 裂隙粗糙度越大, 越容易引起非线性渗流; 裂隙水力开度与力学开度随围压变化趋势一致, 水力开度约为力学开度的 5%。

关键词: 裂隙; 渗流; 非达西; 裂隙开度

中图分类号: O357.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0121-05

Analysis on non-Darcy flow characteristic for fractured rock

MENG Xueli¹, MENG Faqiang¹, LI Huansen¹, LIU Zhenlong², PENG Pengcheng²

(1. Geology Team No. 4 of Guangxi Zhuang Autonomic Region, Nanning, Guangxi 530033, China;

2. Guangxi No. 1 Geological Engineering Company, Nanning, Guangxi 530033, China)

Abstract: A series of flow tests on fractured rock are conducted under variable confining pressures. A simple measurement method for measuring fracture aperture is proposed, and fracture deformation is studied during the flow tests. Subsequently, the nonlinear flow coefficient and permeability were calculated based on the Forchheimer equation. The relation of confining pressure with nonlinear flow coefficient and permeability are investigated. The research results show that the permeability decreases with the increase of confining pressure, while the nonlinear flow coefficient increases. In addition, rougher fracture surface helps to stronger nonlinearity. The change trend of hydraulic aperture with confining pressure is similar to the curve of mechanical aperture versus confining pressure. It is found that the hydraulic aperture is 5% of mechanical aperture.

Keywords: fracture; seepage; non-Darcy; fracture aperture

0 引言

岩体裂隙中的渗流失稳是煤矿及隧道突水、瓦斯突出等动力灾害的表现形式, 其原因在于系统的非线性^[1]。裂隙岩体渗流已引起普遍关注, 并获得了许多有益成果。立方定律是目前应用最广的裂隙渗流模型之一。但受裂隙面粗糙度影响, 实际工程中的裂隙岩体渗流与立方定律存在较大偏差。因此, 研究者通过考虑粗糙度^[2]、接触面积^[3]、曲折效应^[4]等影响, 提出

了诸多修正的裂隙渗流模型。同时受粗糙裂隙面影响, 还会出现非线性渗流现象^[5]。ZHAO 通过瞬态法渗流试验, 得出裂隙岩体渗流在流速较小时满足 Izbash 非线性定律, 而高流速下满足达西渗流的结论^[6]。RONG 通过裂隙渗流试验, 提出了考虑裂隙三维形态的非达西渗流方程^[7]; ZOU 通过数值模拟分析了剪切作用下粗糙裂隙的渗流特性^[8]; ZHOU^[9]通过大量的粗糙裂隙渗流试验, 建立了基于裂隙参数的 Forchheimer's 系数表达式。裂隙岩体的非线性渗流

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-04-14

基金项目: 贵州省科技支撑项目([2018]2787)

第一作者: 蒙学礼(1969-), 男, 广西南宁人, 大专, 高级工程师, 主要从事水文地质工程地质环境地质及地质灾害防治方面工作。E-mail: gxgtno4mxl@sina.com

演化机理复杂,影响因素较多,关于应力作用下的裂隙非线性渗流有待进一步深入研究。岩溶地区的煤矿及隧道突水突泥事故频发,灰岩是岩溶地区主要的碳酸盐岩,因此开展裂隙灰岩的非线性渗流特征研究更具有代表性,对于揭示煤矿及隧道突水机理具有重要的理论与实际意义。本文通过开展不同粗糙度的裂隙渗流试验,研究了非线性渗流系数及渗透率与围压的关系,分析了水力开度与力学开度的演化规律,为研究孔隙裂隙介质渗流提供理论基础。

1 试验方法

1.1 裂隙岩样制备

本文试验对象为二叠系茅口组石灰岩,样品取自于湖南宁乡煤炭坝矿山中。岩样采集方向平行于层理方向。选取三个灰岩岩样 M01、M02 和 M03 进行渗流试验。样品采集后将其加工成直径 50 mm、高 100 mm 的标准试件,并进行光滑处理。对打磨光滑的圆柱试样进行劈裂实验,形成不同裂缝形态的岩心试样,并通过文献[10]提出的裂隙面粗糙度测量方法,得到岩样 M01、M02 和 M03 的 JRC 值分别为 8.96、13.3 和 14.6。

$$JRC = 32.2 + 32.471 \lg Z_2 \quad (1)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{(x_{i+1} - x_i)}} \quad (2)$$

式中:JRC——粗糙度;

L——岩样长度;

x_i 、 x_{i+1} ——分别为第 i 点和第 $i+1$ 点的 x 方向坐标值;

y_i 、 y_{i+1} ——分别为第 i 点和第 $i+1$ 点的高度值。

1.2 裂隙隙宽测量

由立方定律可知,裂隙隙宽是决定渗透率大小的最重要因素之一。本文提出一种岩石裂隙开度测量的简单方法,具体步骤如下:

(1)采用水芯笔在岩样端面及侧面裂隙处每隔 1 cm 作标记。

(2)将带有标准刻度的尺子(精确度 0.1 mm)平行于裂隙安放,采用 10 倍放大镜对裂隙及 1 mm 刻度进行放大,并通过高清数码相机对放大后的标准尺及裂隙测点进行照相摄影。

(3)通过 CAD 软件对采集的图像进行放大,分别测量 1 mm 刻度的宽度及裂隙宽度,计算出裂隙宽度。

(4)重复进行步骤 2 及步骤 3 直至完成所有测点,裂隙隙宽取所有测点的平均值。

需要指出的是该方法主要用于测量微米级的裂隙

宽度。

1.3 渗流试验程序

采用瞬态法对裂隙岩样进行了不同围压下的渗流试验。渗流试验在 MTS815 多功能岩石试验系统上进行。该实验系统由围压、轴压和孔隙流体压力三个自动伺服装置组成,最大围压和孔压可达到 140 MPa,最大轴向压力为 4 600 kN,可自动监测应力、位移、孔压等数据。

采用的瞬态法试验步骤如下:

(1)对制备好的岩样饱水 24 小时;

(2)将岩样安置在三轴腔内,连接上游、下游 2 个容器,以 0.5 MPa/min 速率分别施加预设的围压及轴压荷载;

(3)在岩样上下游施加初始孔隙压力,并使试件内部和 2 个容器的孔隙流体压力达到平衡;

(4)保持出口端容器的流体压力不变,瞬时在进口端容器施加流体压力增量 Δp ,使两端产生孔隙压力梯度,从而引起流体在试样中流动;

(5)记录孔压随时间变化规律,直至达到平衡。施加下一级围压,重复步骤(4)进行下一组渗流试验。

2 试验结果分析

2.1 试验数据处理

大量研究表明裂隙中流体渗流满足 Forchheimer 定律^[5,12]。对于一维的 Forchheimer 非达西渗流,流体速度与压力可表示为^[13]

$$\rho c_a \frac{dV}{dt} = -j - \frac{\mu}{k} V + \rho \beta V^2 \quad (3)$$

式中: ρ ——流体密度;

c_a ——加速度系数;

V ——渗流速度;

t ——时间;

j ——水力梯度;

μ ——流体动力黏度;

k ——渗透率;

β ——非线性系数。

渗流速度及其变化率可通过孔隙压差数据计算得到^[11]。试验中间隔 1 秒采集孔隙压差数据 ($p_1 - p_2$) _{$t=i$} ($i = 1, 2 \cdots n$)。定义变化率 $\eta = \frac{dV}{dt}$ 。对于各时刻的压力梯度值、流速及其变化速率满足

$$\rho c_a \eta_i = -j_i - \frac{\mu}{k} V_i + \rho \beta V_i^2 \quad (i = 1, 2 \cdots n - 2) \quad (4)$$

构造泛函数 Π

$$\Pi = \sum_{i=2}^{N-2} \left(\rho \beta V_i^2 - \frac{\mu}{k} V_i - \rho c_a \eta_i - \xi_i \right)^2 \quad (5)$$

由泛函数 Π 的极值条件,可解出非线性系数 β 及渗透率 k 。

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (\rho \beta)} = 0; \quad \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i^4 \right) \rho \beta - \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i^3 \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \eta_i V_i^2 \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \xi_i V_i^2 \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \left(\frac{\mu}{k} \right)} = 0; \quad \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i^3 \right) \rho \beta - \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i^2 \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \eta_i V_i \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \xi_i V_i \right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (\rho c_a)} = 0; \quad \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i^2 \eta_i \right) \rho \beta - \left(\sum_{i=2}^{N-2} V_i \eta_i \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \eta_i^2 \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{N-2} \xi_i \eta_i \right) = 0 \quad (8)$$

2.2 渗透率 k 与围压关系

图 1(a) ~ (c) 为岩样的渗透率与围压关系曲线。由图可知,随着围压增加,岩样的渗透率先急速下降,再缓慢降低。这是由于围压增大,裂隙闭合度增大,但受裂隙面接触影响,裂隙闭合增量减小。对比图 1(a)、图 1(b) 和图 1(c) 发现,在同一围压下,岩样渗透率 $M01 > M02 > M03$,表明裂隙粗糙度越小,渗透率越大。为定量描述渗透率 k 与围压的关系,采用文献提出的幂数模型对试验数据进行拟合分析。

$$k = a_1 \sigma_c^{b_1} \quad (9)$$

式中: k ——渗透率;

σ_c ——围压,系数 a_1 和 b_1 为拟合系数。

图 1(a) ~ (c) 为试验数据和拟合曲线对比图。由图可知,二者吻合度较高,拟合系数均大于 0.96,说明渗透率 k 与围压满足幂数函数关系。

2.3 非线性系数 β 与围压关系

图 2 为非线性系数 β 与围压关系曲线。由图可知,随着围压增大,非线性系数逐渐增大,但增长速率变缓,说明围压越高,非线性效应越强。受岩样粗糙度的影响,在相同围压下,岩样 M03 的非线性系数最大,其次为 M02,而 M01 岩样最小。说明粗糙度越大,越容易发生非线性渗流,这与文献实验结果一致。ZHOU 认为裂隙表面越粗糙,越容易产生水力损失,因而非线性渗流越明显。MA^[12] 提出了对数函数来描述非线性系数 β 与围压的关系,

$$\beta = a_2 \ln(\sigma_c) + b_2 \quad (10)$$

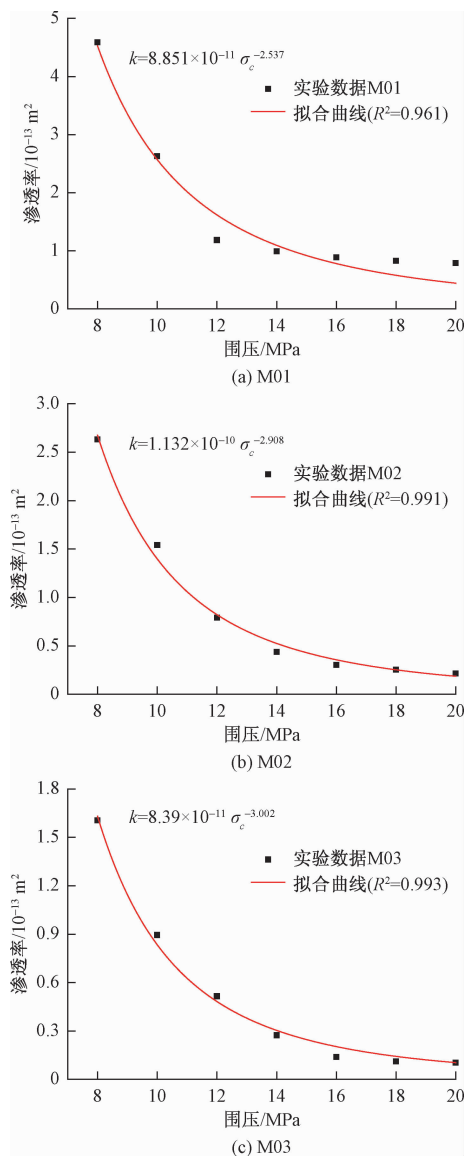


图 1 渗透率与围压关系曲线

Fig. 1 Permeability k -confining pressure curves of sample

式中: σ_c ——围压;

a_2 和 b_2 ——常数。

采用对数函数对本文试验数据进行拟合,如图 2(a) ~ (c) 所示。由图 2 可知,采用对数函数有偏差,其拟合系数均低于 0.9。为此,本文提出新的经验关系式如下:

$$\beta = a_3 \sigma_c \exp(\lambda \sigma_c) + b_3 \quad (11)$$

式中: a_3 、 λ 、 b_3 ——常数。

利用新的函数关系对非线性系数与围压数据进行拟合。对于新的拟合函数,其拟合系数 R^2 均大于 0.99,说明新函数能更好的预测出非线性系数 β 与围压关系。

2.4 裂隙变形

在渗流试验过程,围压压缩岩体裂隙导致裂隙闭

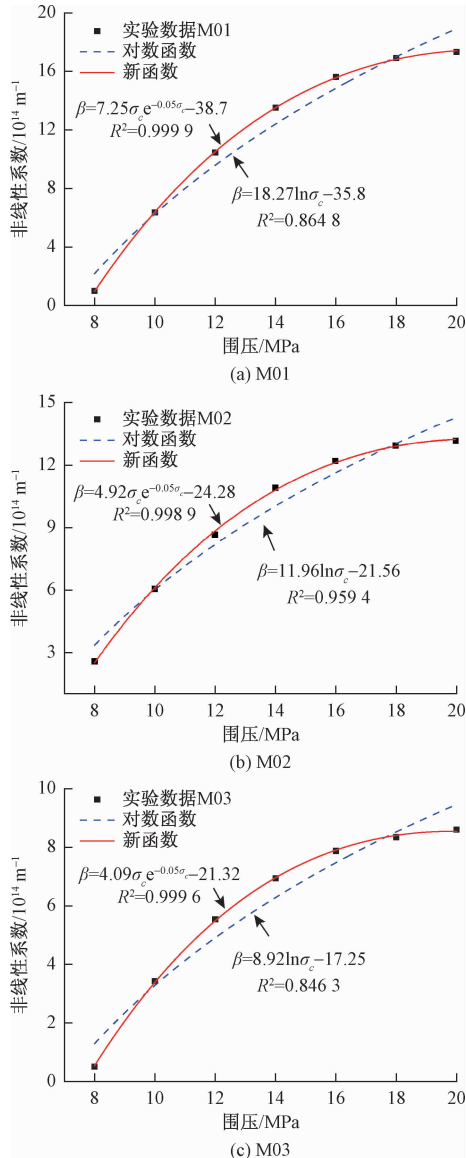


图2 非线性系数与围压关系曲线

Fig. 2 Non-Darcy coefficient-confining pressure curves of sample

合;孔压则导致裂隙张开,因此,裂隙岩体力学开度可计算为:

$$b_m = b_0 - \Delta b_1 + \Delta b_2 \quad (12)$$

式中: b_m ——裂隙力学开度;

b_0 ——裂隙初始开度,由2.2节裂隙隙宽测量方法得到;

Δb_1 ——围压引起的裂隙闭合量;

Δb_2 ——孔压导致的裂隙变形量。

围压作用下,裂隙岩体的变形可分为裂隙闭合和基质变形两部分。通过环向引伸计测量渗流试验过程岩样变形可得到裂隙的闭合量。根据 VOGLER 和

ZHAO 的试验研究^[13-14],围压引起的裂隙变形可由下式进行计算得到:

$$\Delta b_1 = \frac{d_c \Delta d_c - d_{cr} \Delta d_{cr}}{2\pi w} \quad (13)$$

式中: w ——裂隙宽度;

d ——岩样截面周长;

Δd ——围压引起的环向变形。

下标“c”和“cr”分别表示裂隙岩样和完整岩样。

图3为围压作用下的岩样环向变形图。由图可知,随着围压增大,岩样的环向变形接近线性增长,裂隙岩样的环向变形约为完整岩样变形的五倍。固定围压时,随着渗流时间增长,环向变形先迅速增长;随着孔隙压差的逐渐消散,变形逐渐趋于稳定,如图4所示。通过测量环向变形数据,由式(13)计算出裂隙力学开度。

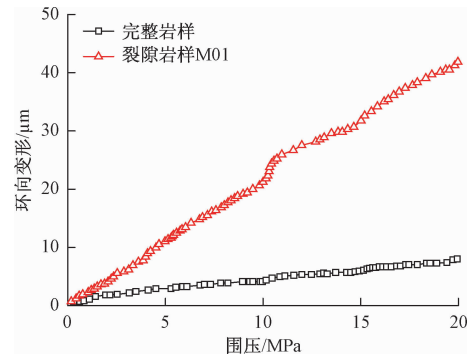


图3 完整岩样和裂隙岩样 M01 的环向变形

Fig. 3 Circumferential deformation of intact sample and fractured sample (M01)

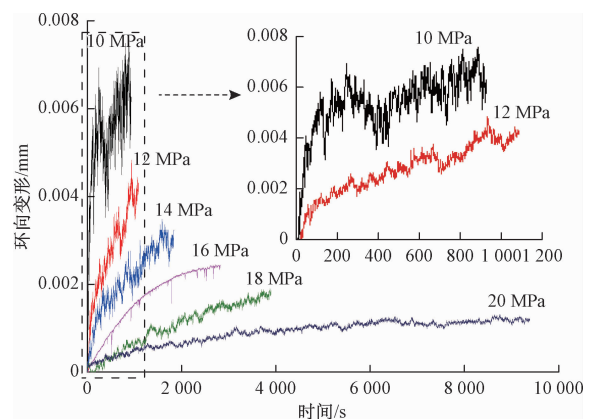


图4 渗流过程裂隙岩样 M01 环向变形

Fig. 4 Circumferential deformation of sample M01 during transient pulse test

由立方定律,可计算得到裂隙渗流的水力开度:

$$k = \frac{b_h^2}{12} \quad (14)$$

式中: b_h ——水力开度。

图5为力学开度与水力开度的对比图。由图可知,随着围压增加,岩体力学开度与水力开度均呈下降的趋势。且裂隙水力开度均小于力学开度,水力开度约为力学开度的5%,这与前人的研究结果一致^[7]。

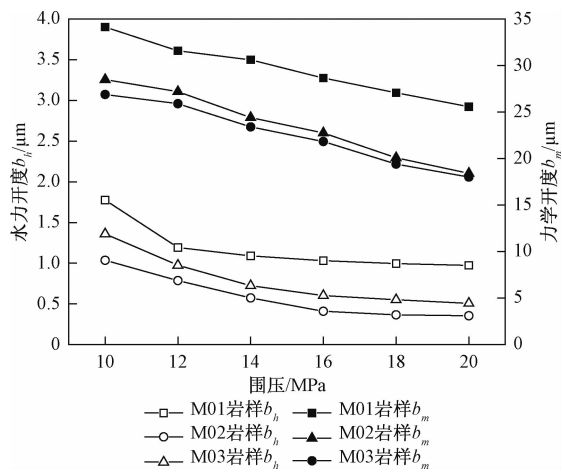


图5 水力开度与力学开度

Fig.5 Hydraulic aperture and mechanical aperture

3 结论

本文开展了不同粗糙裂隙的渗流试验,研究了裂隙灰岩的非线性渗流系数及渗透率与应力关系,得出主要结论如下:

(1)提出了一种简便的裂隙隙宽测量方法,操作简单,经济可靠。

(2)随着围压增加,岩样的渗透率先急速下降,再缓慢降低,二者满足幂数函数关系。

(3)随着围压增大,非线性渗流系数 β 逐渐增大,但增长速率变缓,基于试验数据提出了非线性渗流系数与围压经验关系式;裂隙越粗糙,非线性效应越强。

本文试验在灰岩条件下进行,对于其它类型裂隙岩体的非线性渗流特征有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 孙明贵,黄先伍,李天珍,等. 石灰岩应力-应变全过程的非 Darcy 流渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3):484-491. [SUN M G, HUANG X W, LI T Z, et al. Seepage properties of non-darcy flow in complete failure process of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3):484-491. (in Chinese)]
- [2] LOUIS C. Rock hydraulics[M]//Rock Mechanics. Vienna: Springer Vienna, 1972: 299-387.
- [3] 周创兵,熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定理[J]. 岩土力学, 1996, 17(4):1-7. [ZHOU C B, XIONG W L. A generalized cubic law for percolation in rock joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996, 17(4):1-7. (in Chinese)]
- [4] 肖维民,夏才初,王伟,等. 考虑曲折效应的粗糙节理渗流计算新公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12):2416-2425. [XIAO W M, XIA C C, WANG W, et al. Study of a new equation for fluid flow through a single rough joint considering tortuosity effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2416-2425. (in Chinese)]
- [5] ZHOU J Q, HU S H, FANG S, et al. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80:202-218.
- [6] ZHAO Y L, ZHANG L Y, WANG W J, et al. Transient pulse test and morphological analysis of single rock fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 91:139-154.
- [7] RONG G, HOU D, YANG J, et al. Experimental study of flow characteristics in non-mated rock fractures considering 3D definition of fracture surfaces [J]. Engineering Geology, 2017, 220:152-163.
- [8] 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 and Mining Sciences, 2015, 75:102-118.
- [9] CHEN Y F, ZHOU J Q, HU S H, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529:993-1006.
- [10] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5):303-307.
- [11] MA D, MIAO X X, CHEN Z Q, et al. Experimental investigation of seepage properties of fractured rocks under different confining pressures [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(5):1135-1144.
- [12] MA D, BAI H B, CHEN Z Q, et al. Effect of particle mixture on seepage properties of crushed mudstones [J]. Transport in Porous Media, 2015, 108(2):257-277.
- [13] VOGLER D, AMANN F, BAYER P, et al. Permeability evolution in natural fractures subject to cyclic loading and gouge formation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9):3463-3479.
- [14] ZHAO Y, WANG C L, ZHAO Y L, et al. Experimental characterization and dependence of rock fracture permeability on 3D stresses [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(2):1-9.