

# 裂隙茅口灰岩水力学特性试验研究

罗世林, 万文\*, 赵延林, 唐劲舟, 王亚

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 湖南科技大学 煤矿安全开采技术 湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**利用 MTS815 多功能岩石力学试验机对茅口灰岩进行一系列不同轴压和围压下的渗流试验. 试验结果表明: 茅口灰岩裂隙流与 Darcy 流存在一定差异, 表现出非线性时变性即非 Darcy 流; 随着应变的增加, 岩石渗透率刚开始下降较快, 后期下降较慢. 采用 Origin 专业绘图软件对 Darcy 流与非 Darcy 流渗透率数据进行拟合分析发现, 幂函数能够很好的拟合二者之间的关系, 并提出了可靠又简便的茅口灰岩非 Darcy 流渗透率计算公式.

**关键词:**三轴应力; 裂隙岩体; 渗透率; 水力学特性

**中图分类号:**TD315.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674-5876(2016)03-0001-07

## Experimental study on hydraulic properties of fractured Maokou limestone

LUO Shilin, WAN Wen, ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou, WANG Ya

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining and Techniques of Coal Mine, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** This paper conducts a series of seepage test under different axial pressure and confining pressure on MTS815 multifunctional rock mechanics testing machine. Results show that different from Darcy flow, Maokou limestone fissures flow exhibits the nonlinear time-varying, which means Maokou limestone fissures flow meet non-Darcy laws; with the increase of strain, rock permeability decreases rapidly at first, but falls slowly at last; the Origin professional drawing software is adopted to fitting Darcy flow and the non-Darcy flow permeability test data. The fitting analysis shows that the power function relationship can be a good fit between the two, thus this paper putts forward the reliable and convenient formulas for calculating non-Darcy flow permeability of Maokou limestone.

**Key words:** triaxial stress; fractured rock; permeability; hydraulic property

裂隙岩体是采矿工程、水利工程、地下建设工程等工程中普遍存在的一种复杂工程介质, 岩体中裂隙的存在为地下水提供了储存和运移的场所, 地下水又直接影响着岩土工程的安全与稳定. 据统计<sup>[1]</sup> 90% 以上的岩体边坡破坏和地下水渗透力有关, 60% 矿井事故与地下水作用有关, 30% ~ 40% 的水电工程大坝失事是由渗透作用引起的. 因此裂隙岩体中渗流与应力耦合作用的研究具有十分重要的意义和深远影响. 曾亿山等<sup>[2]</sup> 通过在不同侧向应力和加载条件下裂隙流量变化规律的试验研究认为: 裂隙流量随法向应力的增加而减小, 随侧向应力的增加而增大; 刘才华等<sup>[3]</sup> 采用人工劈裂贯通裂隙进行三轴应力下的渗流实验, 研究表明, 法向应力、侧向应力以及渗压对裂隙渗透系数有显著的影响; 赵阳升<sup>[4]</sup> 给出了三轴应力作用下裂隙渗透系数的经验公式, 指出裂隙渗透系数与法向应力和侧向应力均呈负相关关系. 于洪丹<sup>[5]</sup> 通过一系列裂隙岩石的三轴应力作用下的渗流试验给出了加、卸载情况下岩石渗透率与有效围压的

收稿日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274097; 51174088); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067); 湖南省教育厅资助项目(13A020)

\* 通信作者, E-mail: wanwen68@163.com

关系式.

上述研究工作极大地推动了三轴应力作用下裂隙岩石渗流特性研究,但是对于不同应力作用下裂隙岩体的试验研究,特别是对我国南方广泛存在的一种工程地质体——茅口灰岩的水力耦合特性的研究还处于探索阶段,并未形成较成熟的理论.因此本文利用 MTS815 多功能电液伺服试验机,对含裂隙茅口灰岩进行一系列的不同围压、轴压加载下的渗透特性试验研究,揭示在不同荷载作用下的渗透特性变化规律,并根据实验结果,基于瞬态法测岩石渗透率理论,建立了在轴向应力和围压共同作用下的茅口灰岩渗透率的修正公式.

## 1 试验仪器及方案

### 1.1 仪器和试样制取

采用 MTS815 多功能岩石力学系统(见图 1)对含裂隙茅口灰岩进行渗透性试验,MTS815 多功能岩石力学系统由轴压、围压、孔隙水压和温度 4 套独立的闭环伺服系统组成,孔隙水压由稳压水箱 1 和稳压水箱 2 来提供试验时的渗透压差.整体刚度为  $1.05 \times 10^{10}$  N/m,最大轴向力为 4 600 kN,最大轴向拉力为 2 300 kN,最大围压为 140 MPa,最大孔隙水压力为 140 MPa.该实验系统可进行高低速数据采集,能实时监测岩石渗流的整个过程,其试验原理见缪协兴等<sup>[6]</sup>的研究成果.试验中所选岩石试样为茅口灰岩,取自湖南宁乡煤炭坝某煤矿中,并根据国际岩石力学学会推荐标准,将其加工研制成  $\Phi 50$  mm  $\times$  100 mm 的圆柱形试样.茅口灰岩作为一种硬度较大、孔隙度较低、表面无明显裂纹的岩石,其内部并没有丰富裂隙,因此须在外力的作用下诱发产生符合试验条件的次生裂隙(见图 2).



图 1 MTS815 多功能岩石力学试验系统

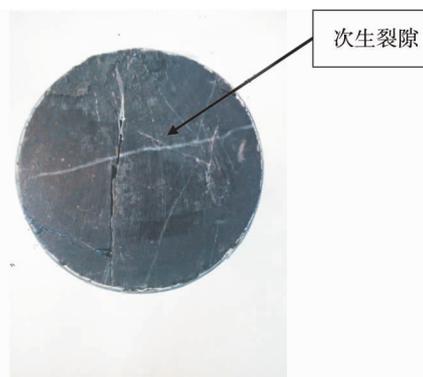


图 2 渗透试验试样端面

### 1.2 试验方案及步骤

将外力诱发作用下所制得的试样分别编号为 M01, M02, M03 一共 3 个,用砂纸对试样表面进行光滑处理,同时擦除试样表面的污渍;将环氧胶黏剂与固化剂质量按 3 : 2 的比例调配好之后均匀涂抹在试样侧面,剪下一段热塑管套住试样,用热吹风机或热风枪均匀烘烤热塑管,使之收缩贴合试件外表面.保持室内温度为 21  $^{\circ}$ C 左右,将包装好的岩石试样放置于试验及内(见图 3),渗流 - 应力耦合试验,其具体步骤如下:

1) 将三轴腔放下后用螺丝拧好,向缸中注硅油,由计算机控制先施加轴压 ( $\sigma_1$ ) 至预设值,再施加围压 ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) 至预设值,保持轴压、围压不变,30 min 后再施加孔隙水压.其目的是使系统达到稳定,防止试验失败,数据失真.

2) 施加孔隙水压 ( $p_1, p_2$ ). 先将孔压系统柜上两侧阀门打开,待水压达到 0.1 MPa 时关掉一侧阀门,即保持  $p_1$  不变,继续以 0.5 MPa/min 的速率施加水压至预设值  $p_2$ , 关闭阀门,形成孔隙压差  $\Delta p = p_2 - p_1$ .

3) 上述 2 个步骤完成后即可进行渗透试验,试件两端形成渗透压差后,引起渗流,渗流过程中  $\Delta p$  渗流压差不断减少,  $\Delta p$  减少的速率与岩石性质、应力水平有关,当两端孔隙压差为 0.2 MPa 时停止试验.绘出  $\Delta p - t$  曲线.

为研究不同轴压和围压下茅口灰岩的渗流特性,将试样方案设计如表1.

表1 渗流试验方案设计

试样 编号	轴向应力 $\sigma_1$ /MPa	围压 $\sigma_2 = \sigma_3$ /MPa	孔隙水压 $p$ /MPa
M01	6	10	2
		12	
M02	8	10	
		12	
M03	10	10	
		12	



图3 试验装置示意图

## 2 试验结果与分析

### 2.1 渗流理论

对于 Darcy 流,渗流速度与压力梯度之间服从 Darcy 定律,即

$$\xi = -\frac{u}{k_D}V. \quad (1)$$

式中,  $\xi$ :岩样的压力梯度; $u$ :渗流液体的动力粘度; $k_D$ :岩样 Darcy 流的渗透率; $V$ :渗流速度.

在 MTS815 岩石力学系统上进行瞬态渗透试验时,其渗流速度与孔隙压差梯度变化率可表示为

$$V = \frac{c_f BH}{2A} \frac{d\xi}{dt}. \quad (2)$$

式中,  $B$ :MTS 孔隙压力系统中稳压器体积; $H, A$ :岩样高度和横截面积; $c_f$ :流体压缩系数;其中  $\xi = (P_2 - P_1)/H$  恒为非正数.

结合式(1)和式(2)可得:

$$\frac{d\xi}{dt} = -2 \frac{Ak_D}{c_f BH u} \xi. \quad (3)$$

设试验中按等间隔  $\tau$  采样,采样的总次数为  $n$ ,采样终止时刻  $t_f = n\tau$  的孔隙压力梯度为  $\xi_f$ ,对式(3)积分,得到

$$\ln \frac{\xi_0}{\xi_f} = 2 \frac{Ak_D t_f}{c_f BH u}. \quad (4)$$

式中,压力梯度  $\xi, \xi_0$  均为负值,即  $\xi_0/\xi$  为正值,故  $\ln(\xi_0/\xi)$  有意义,由式(4)可以计算出岩样的渗透率:

$$k_D = \frac{c_f BH u}{2t_f A} \ln \frac{\xi_0}{\xi} = \frac{c_f BH u}{2t_f A} \ln \frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}}. \quad (5)$$

式中,  $p_{10}, p_{20}, p_{1f}, p_{2f}$  分别为始末状态下稳压水箱1和稳压水箱2的压力.

式(5)就是目前在 MTS815 型岩石力学试验系统上进行岩样瞬态渗透试验计算岩样渗透率的公式.

### 2.2 试验结果分析

采用瞬态法进行渗透试验时是测定一定时间内孔隙压力梯度的变化值,并计算压力梯度的变化率,且基于压力梯度-压力梯度变化率散点图的拟合曲线得到岩石的渗透特性.因此利用式(5)可得式(3)的解为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (p_{10} - p_{20}) \exp\left(-\frac{t}{t_0} \ln\left(\frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}}\right)\right). \quad (6)$$

本文对 M01, M02, M03 这3个岩样进行曲线拟合和分析,其拟合结果如图4所示.

式(6)是基于 Darcy 流而推导出来,若式(6)能够很好的拟合实验数据即表示岩体裂隙流为 Darcy 流,但由图4可知利用式(6)对试验数据进行拟合发现所画出的曲线与试验数据存在一定的差别,而四次多项式可以很好拟合孔隙压差-时间曲线,因此说明茅口灰岩在渗流试验过程中其实际流动与 Darcy 流之间存

在较大误差,表现出非线性时变渗流即非 Darcy 流.造成非 Darcy 流的原因国内外众多学者、专家做了大量研究认为<sup>[7-10]</sup>

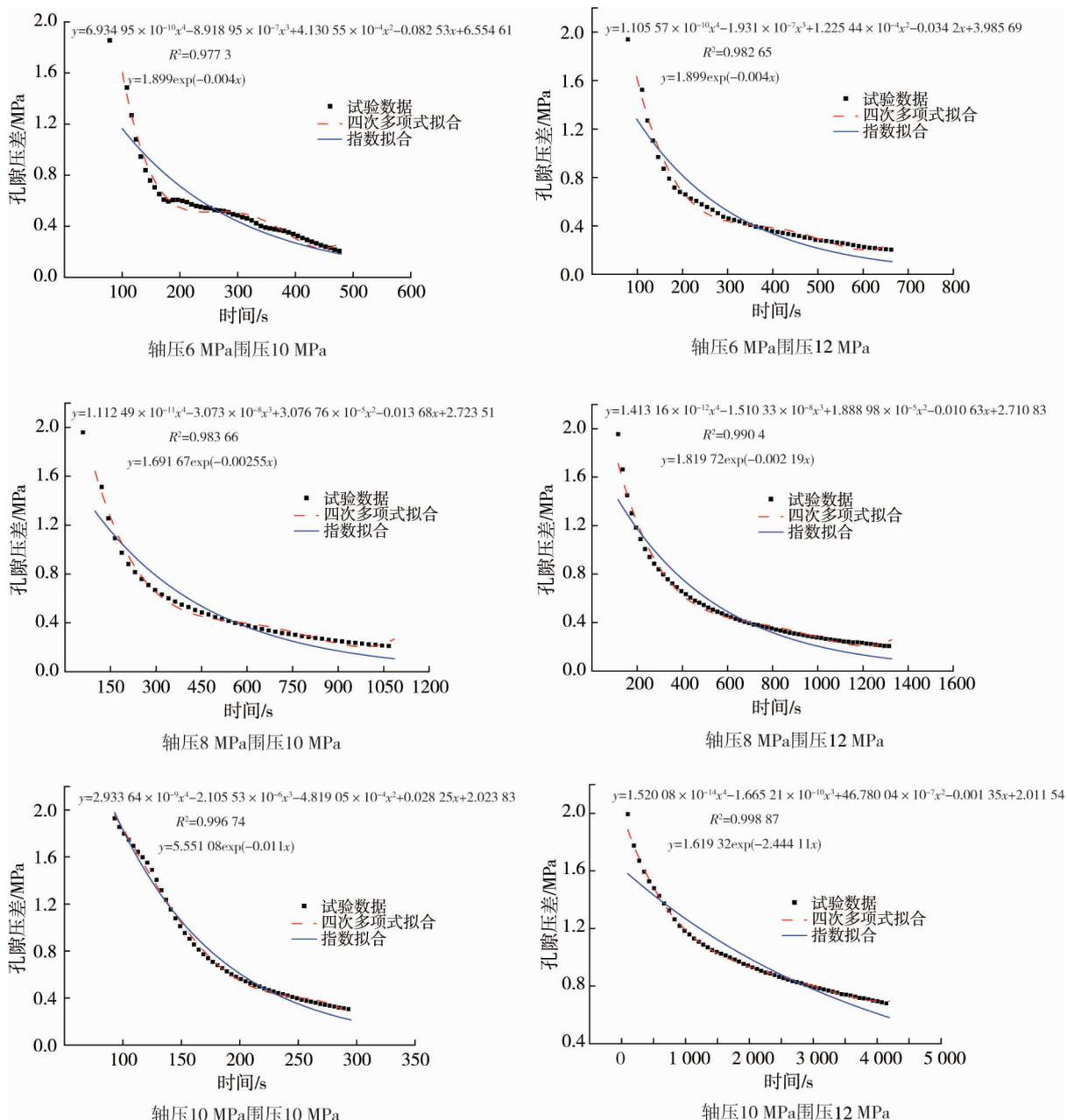


图4 不同轴压和围压作用下孔隙压差时间序列及其拟合曲线

1) 岩体孔隙喉道狭窄,喉道与喉道之间的连通性非常差;同时岩石中存在死端孔隙或滞留孔隙,虽然这类孔隙相互连通,但是对流体不仅几乎不起作用,反而会收缩渗流通道开口的几何形状,流体在这类孔隙中几乎不流动,因此孔隙喉道的连通性、大小、宽度以及类型是造成非 Darcy 渗流的重要因素.

2) 岩石经历了漫长的成岩和改造历史,其内部富含各种缺陷,包括微裂纹、孔隙以及节理裂隙等宏观非连续面,因此岩石作为一种多孔介质体,流体在其中渗流时,固液界面的明显存在亦会对造成非 Darcy 流产生影响.

3) 当岩石受到轴向或者侧向甚至三向应力时,岩石骨架非发生非常复杂的弹塑性变形,造成裂隙闭合,水力宽度变小,渗流通道阻力相应增加从而使得渗透率下降.

4) 流体本身的流变性质也会是渗透率发生变化.

众多试验表明岩石渗流过程基本满足 Forchheimer 关系<sup>[11]</sup>:

$$\rho c_a \frac{dV}{dt} = -\xi - \frac{u}{k}V + \rho\beta V^2. \tag{7}$$

式中,  $\rho$ : 流体密度;  $c_a$ : 非达西流加速度系数;  $k$ : 非达西流渗透率;  $\beta$ : 非达西流因子.

对式(2)进行二次求导并结合式(7)构造泛函数  $\Pi$ , 同时求极值, 泛函  $\Pi$  的极值条件如下:

$$\text{泛函数 } \Pi = \int_0^{t_f} (\rho\beta V^2 - \frac{\mu}{k}V - \rho c_a \eta - \xi)^2 dt;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (\rho\beta)} = 0; (\int_0^{t_f} V^4 dt)\rho\beta - (\int_0^{t_f} V^3 dt)\frac{\mu}{k} - (\int_0^{t_f} V^2 \eta dt)\rho c_a = \int_0^{t_f} V^2 \xi dt; \tag{8}$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (\frac{u}{k})} = 0; (\int_0^{t_f} V^3 dt)\rho\beta - (\int_0^{t_f} V^2 dt)\frac{\mu}{k} - (\int_0^{t_f} V \eta dt)\rho c_a = \int_0^{t_f} V \xi dt; \tag{9}$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial (\rho c_a)} = 0; (\int_0^{t_f} V^2 \eta dt)\rho\beta - (\int_0^{t_f} V \eta dt)\frac{\mu}{k} - (\int_0^{t_f} \eta^2 dt)\rho c_a = \int_0^{t_f} \eta \xi dt. \tag{10}$$

联立式(8) ~ 式(10)可以得出非 Darcy 流  $\beta$  因子、加速度系数  $c_a$  和非 Darcy 流渗透率  $k$ , 结果见表 2.

表 2 试验计算结果

试样编号	轴向应力 $\sigma_1$ /MPa	围压 $\sigma_2 = \sigma_3$ /MPa	Darcy 流渗透特性		非 Darcy 流渗透特性	
			$k_D$ /m <sup>2</sup>	$k$ /m <sup>2</sup>	$\beta$ /m <sup>-1</sup>	$c_a$
M01	6	10	$2.56 \times 10^{-19}$	$1.15 \times 10^{-19}$	$3.96 \times 10^{23}$	$9.22 \times 10^{13}$
		12	$2.19 \times 10^{-19}$	$1.05 \times 10^{-19}$	$4.32 \times 10^{23}$	$9.67 \times 10^{13}$
M02	8	10	$1.80 \times 10^{-19}$	$1.02 \times 10^{-19}$	$4.56 \times 10^{23}$	$9.95 \times 10^{13}$
		12	$1.42 \times 10^{-19}$	$8.13 \times 10^{-20}$	$6.99 \times 10^{23}$	$1.25 \times 10^{14}$
M03	10	10	$8.50 \times 10^{-20}$	$7.86 \times 10^{-20}$	$7.45 \times 10^{23}$	$1.29 \times 10^{14}$
		12	$8.12 \times 10^{-20}$	$7.13 \times 10^{-20}$	$8.95 \times 10^{23}$	$1.42 \times 10^{14}$

根据表 2 试验数据计算结果可知, 非 Darcy 流渗透率  $k$  普遍比相同应力状态下 Darcy 流的渗透率  $k_D$  低. 对岩样 M01 数据分析可知  $\sigma_1 = 6$  MPa、围压从 10 MPa 增至 12 MPa 时, 渗透率  $k$  降低了 8.6%; 对岩样 M02 数据分析可知  $\sigma_1 = 8$  MPa, 围压从 10 MPa 增至 12 MPa 时, 渗透率  $k$  降低了 20.3%; 对岩样 M03 数据分析可知  $\sigma_1 = 10$  MPa, 围压从 10 MPa 增至 12 MPa 时, 渗透率  $k$  降低了 9.2%, 因为随着围压的增加, 试样裂隙面会产生非常复杂的弹塑性变形, 裂隙面上的凸起和起伏体被压碎甚至压平, 裂隙宽度减少, 同时 2 裂隙壁面的接触面积增大, 试样抵抗变形的能力越强, 因此随着围压的增大茅口灰岩渗透率  $k$  大体呈下降趋势. 当围压为 10 MPa, 轴压从 6 MPa 增至 10 MPa 时, 渗透率  $k$  分别减少 11.3%, 22.9%; 当围压为 12 MPa, 轴压从 6 MPa 增至 10 MPa 时, 渗透率  $k$  分别减少 22.5%, 12.3%.

### 3 应力相关性

为进一步说明且更加直观的反映渗透率与轴向应力的关系, 利用专业绘图软件 Origin 对试验结果进行绘图(见图 5).

结合表 2 和图 4 可知在茅口灰岩渗流试验中当保持围压不变, 轴压逐级递增时, 岩石渗透率  $k$  反而会降低, 这是因为试验过程中试件所受应力为三向应力, 围压不变, 轴压增加这一变化规律可以近似将其视为全应力-应变曲线峰前一小段, 而根据全应力-应变全过程中

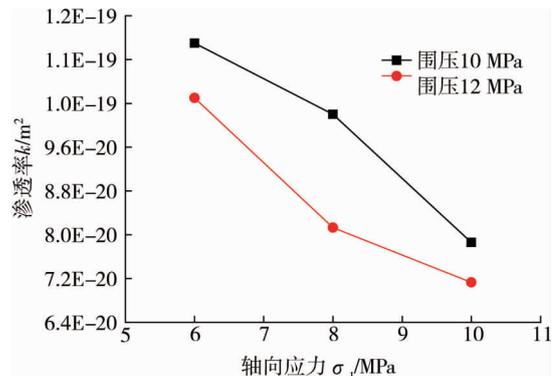


图 5 轴向应力与渗透率的关系

中渗流试验的典型实验结果可知在弹性阶段, 随着应变的增加, 岩石的孔隙和微裂隙压缩和闭合, 渗透率  $k$  降低, 当应力达到屈服点也就是弹性变形达到最大值时, 相应的渗透率  $k$  最小, 同时非 Darcy 流  $\beta$  因子和

加速度系数  $c_a$  达到最大,其中根据表 2 试验结果可知随着应变的增加非 Darcy 流  $\beta$  因子分别增加了 9.1%、5.6%、533.3%、6.6%、20.1%,加速度系数  $c_a$  分别增加了 4.9%、2.9%、25.6%、3.2%、10.1%。

## 4 非 Darcy 流渗透率公式建立

### 4.1 公式的提出

瞬态法测岩石渗透率首先是通过对比压差和时间序列进行曲线拟合来判断岩石裂隙渗流是否为 Darcy 流,若拟合曲线为指数函数则说明裂隙渗流符合 Darcy 定律,根据式(5)即可非常简单、快速的计算出 Darcy 流渗透率,反之若拟合曲线为四次多项式则说明裂隙渗流为非 Darcy 流,而非 Darcy 流渗透率的计算须构造泛函数且联立式(8)~式(10)方可计算得出,不仅公式复杂,而且计算过程也非常繁琐,因此本文通过修正由式(5)计算出的渗透率从而间接得出茅口灰岩在三轴应力作用下非 Darcy 流渗透率的计算公式。

在岩石 Darcy 流渗透率与非 Darcy 流渗透率的研究方面缪协兴等<sup>[6]</sup>通过研究砂岩、砂质泥岩、砂质页岩等沉积岩在应力-应变全过程的渗透特性认为 Darcy 流渗透率  $k_D$  与非 Darcy 流渗透率  $k$  之间存在近似幂函数的关系;因此仿照幂函数采用 Origin 专业绘图软件对其进行拟合,其拟合图形见图 6,拟合相关系数达  $R^2 = 0.90384$ ,修正方程:

$$k = 2.04006 \times 10^{-12} \times k_D^{0.39033} \quad (11)$$

### 4.2 公式验证

为进一步验证本文所得岩石渗透率修正公式(式(11))的可靠性,利用 MTS815 试验机再做 2 组验证试验,该验证试验的应力情况分别为

情况一,轴压  $\sigma_1 = 6 \text{ MPa}$ ,围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = 6 \text{ MPa}$ ;

情况二,轴压  $\sigma_1 = 8 \text{ MPa}$ ,围压  $\sigma_2 = \sigma_3 = 8 \text{ MPa}$ 。

情况一所测岩样 Darcy 流渗透率  $k_D = 3.70 \times 10^{-19}$ ,非 Darcy 流渗透率  $k = 1.33 \times 10^{-19}$ ;情况二所测岩样 Darcy 流渗透率  $k_D = 2.28 \times 10^{-19}$ ,非 Darcy 流渗透率  $k = 1.05 \times 10^{-19}$ ,将 2 种情况下所得 Darcy 流渗透率  $k_D$  代入修正式(11)得非 Darcy 流渗透率  $k$  分别为  $1.30 \times 10^{-19}$ 、 $1.08 \times 10^{-19}$ 。

可见,同样的材料属性下,通过试验计算所得的渗透率和修正公式计算所得渗透率基本相等,验证了本文修正公式的正确性。

## 5 结论

1)通过一系列不同轴压、围压下的茅口灰岩渗流试验,对孔隙压差和时间序列进行拟合分析认为茅口灰岩岩样的实际渗流跟 Darcy 流存在较大的差异,其裂隙渗流表现出非线性时变渗流。

2)通过对试验结果分析可知若茅口灰岩的变形处于弹性变形阶段,随着应变的增加,岩石的孔隙和微裂隙压缩和闭合,渗透率  $k$  降低。

3)茅口灰岩 Darcy 流渗透率与非 Darcy 流渗透率存在一个定量关系,故对其进行拟合得非 Darcy 流渗透率的间接计算公式,通过验算,与情况一和情况二的试验结果基本相等。因此利用瞬态法测茅口灰岩渗透率时若裂隙流为非 Darcy 流可通过修正公式间接计算其非 Darcy 流渗透率。

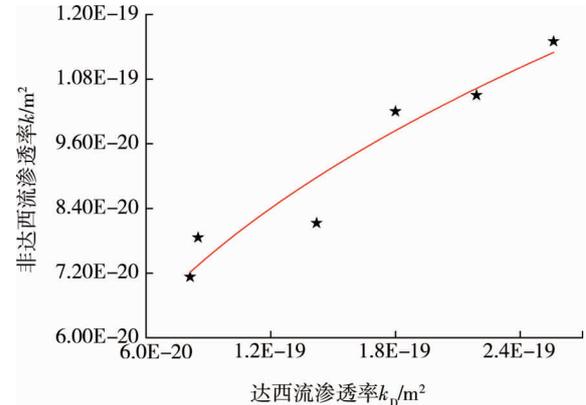


图 6 Darcy 流与非 Darcy 流渗透率的曲线拟合

**参考文献:**

- [1] 仵彦卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
- [2] 曾亿山,卢德唐,曾清红,等. 单裂隙流-固耦合渗流的试验研究[J]. 实验力学,2005,20(1):10-16.
- [3] 刘才华,陈从新. 三轴应力作用下岩石单裂隙的渗流特性[J]. 自然科学进展,2007,17(7):989-994.
- [4] 赵阳升,杨栋,郑少河,等. 三维应力作用下岩石裂缝水渗流物性规律的实验研究[J]. 中国科学 E 辑(技术科学),1999,29(1):82-86.
- [5] 于洪丹,陈飞飞,陈卫忠,等. 含裂隙岩石渗流力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(s1):2788-2795.
- [6] 缪协兴,刘卫群,陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [7] Li B, Friedmann F. A Novel Response Surface Methodology Based on "Amplitude Factor" Analysis for Model Nonlinear Response Caused by both Reservoir and Controllable Factors[J]. Society of Petroleum Engineers(SPE),1964,31(2):419-429.
- [8] Van Den Hoek P J. A Simple and Accurate Description of Nonlinear Fluid Leak off in High-Permeability Fracturing[J]. Society of Petroleum Engineers(SPE),1971,45(4):502-511.
- [9] Vakili A, Jansen J D, Esmail T, et al. On the Ad Joint of a Nonlinear Diffusion-Convection Equation to Describe Flow in Porous Media[J]. Society of Petroleum Engineers(SPE),1972,48(3):313-322.
- [10] Fair P S. Investigation of Diffusivity Equation with General Pressure-Dependent Rock and Fluid Properties as Applied to Well Testing[J]. Society of Petroleum Engineers(SPE),1976,52(6):215-223.
- [11] 孙明贵,李天珍,黄先伍,等. 破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2003,23(2):11-13.