



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109283118 B

(45) 授权公告日 2023. 11. 14

(21) 申请号 201811366350.4
 (22) 申请日 2018.11.16
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 109283118 A
 (43) 申请公布日 2019.01.29
 (73) 专利权人 中国矿业大学
 地址 221000 江苏省徐州市大学路1号
 (72) 发明人 王骏辉 万志军 张源 程敬义
 熊路长
 (74) 专利代理机构 北京淮海知识产权代理事务
 所(普通合伙) 32205
 专利代理师 李鹏
 (51) Int. Cl.
 G01N 15/08 (2006.01)
 G06F 17/13 (2006.01)
 G06F 17/18 (2006.01)
 G06F 30/28 (2020.01)
 G06F 113/08 (2020.01)
 G06F 119/14 (2020.01)
 (56) 对比文件
 CN 209102578 U, 2019.07.12
 CN 102435539 A, 2012.05.02
 CN 105158039 A, 2015.12.16

CN 105606510 A, 2016.05.25
 CN 107167409 A, 2017.09.15
 CN 107515183 A, 2017.12.26
 CN 108318400 A, 2018.07.24
 EP 0564933 A1, 1993.10.13
 JP 2016142719 A, 2016.08.08
 KR 100840024 B1, 2008.06.20
 RU 165182 U1, 2016.10.10
 SU 1455234 A1, 1989.01.30
 WO 2016192077 A1, 2016.12.08
 WO 2017128479 A1, 2017.08.03
 张文泉;袁久党;王忠昶;朱纪明.采动裂隙
 岩体压剪渗透规律试验研究.岩土力学.2017,
 (第09期),全文.
 冯子军;赵阳升;万志军;李根威;王冲;张
 源.热耦合作用下无烟煤变形过程中渗透特
 性.煤炭学报.2010,(第S1期),全文.
 张鹏;李宁;陈新民.一种新的裂隙三维表面
 粗糙度表征方法.岩石力学与工程学报.2009,
 (第S2期),全文.
 张鹏;李宁;陈新民.一种新的裂隙三维表面
 粗糙度表征方法.岩石力学与工程学报.2009,
 (第S2期),全文. (续)

审查员 付友昱

权利要求书3页 说明书9页 附图2页

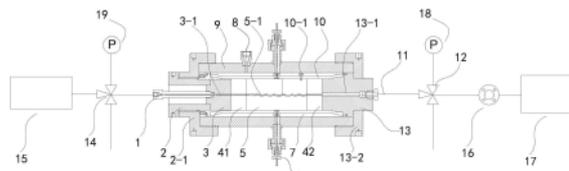
(54) 发明名称

裂隙表面粗糙度的表征方法和渗流试验系
统及试验方法

(57) 摘要

本发明公开了一种裂隙表面粗糙度的表征
方法和渗流试验系统及试验方法,该表征方法将
粗糙轮廓线微段的高差、斜率作为判断标准,将
对渗流过程中压力降影响不大的线段忽略,并结
合轮廓峰密度、分形计盒维数等多种参数对粗糙
度 φ_1 、 φ_2 进行描述,将其应用到非达西流区域
公式中时,无论数学形式还是物理意义上都能够
保持一致;通过新的表征方法和公式的建立,使
得非达西系数 β 和裂隙粗糙特性建立联系,该方

法突出了沿水流方向的粗糙特性对流体流动过
程中压力降的影响;通过对渗流试验系统的特别
设计,可以准确测量隙宽变化,结合预制的不同
裂隙面,可以研究无量纲量 A_D 、 B_D 与粗糙度参数
 φ_1 、 φ_2 的具体函数形式及变化规律。



CN 109283118 B

[接上页]

(56) 对比文件

张焯;尹学谦;陈珂.粗糙单裂隙高速非达西渗流特性的试验研究.河北工程大学学报(自然科学版).2018,(第01期),全文.

于可;王媛;牛玉龙.单裂隙中开度及粗糙度

对Forchheimer公式特征参数的影响.水电能源科学.2018,(第05期),全文.

王来贵;张阳;刘向峰;陈强.单裂隙砂岩渗流特性实验研究.硅酸盐通报.2018,(第05期),全文.

1. 一种裂隙表面粗糙度的表征方法,其特征在于,首先取一段随机生成的具有平直基准线的粗糙曲线,该粗糙曲线由等间距的N个点组成,各个点的横坐标为 x_i ,纵坐标为 z_i ($1 \leq i \leq N$),建立无量纲数 A_D 、 B_D 与粗糙度之间关系:

$$A_D = f(12\phi_1)$$

$$B_D = f(\phi_2),$$

式中, ϕ_1 、 ϕ_2 为粗糙度, ϕ_1 反映曲线整体的粗糙特性,代表了粗糙特性对Forchheimer公式线性部分的影响, ϕ_2 反映曲线沿水流方向的粗糙性对水流压力降的影响,代表了粗糙特性对Forchheimer公式非线性部分的影响, ϕ_1 、 ϕ_2 表达式如下:

$$\phi_1 = D_B$$

$$\phi_2 = \frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}$$

其中, D_B 为粗糙曲线的分形计盒维数, l 为粗糙曲线的基准线的长度, S_m 为轮廓微观不平度的平均间距,轮廓微观不平度间距是含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段基准线长度,则 $1/S_m$ 是粗糙曲线上轮廓峰的密度; M 指粗糙曲线包括的所有线段; m 为同时满足下列条件的线段数量,条件包括:

①判断每一段的斜率,

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| < Z_2$$

其中, Z_2 为表面轮廓线一次导数均方根,按下式求得:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2}$$

其中, N 为该粗糙曲线包含的点数;

②判断每一段的高差,

$$z_i \text{ 到中线距离} + z_{i+1} \text{ 到中线距离} < 2R_a$$

其中, R_a 为轮廓的算术平均偏差,即每个点到基准线的距离的算术平均值,

满足上述①和②条件的线段数为 m ;

综上,单裂隙水渗流过程中非达西流阶段的Forchheimer公式可以表达为公式(1):

$$\nabla P = f(12\phi_1) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f(\phi_2)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2 \quad (1)$$

即:

$$\nabla P = f(12D_B) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f\left(\frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}\right)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

2. 一种用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验方法,其特征在于,包括如下步骤:

1) 找组成粗糙曲线N个点的最小二乘中线,作为粗糙曲线的基准线,基准线方程为 $z = ax + b$;

2) 根据matlab程序计算该曲线的粗糙度相关的参数,包括分形计盒维数 D_B 、表面轮廓线一次导数均方根 Z_2 、轮廓的算术平均偏差 R_a 、轮廓峰的密度 $1/S_m$,根据 Z_2 、 R_a 求出该曲线的(M -

m) /M, 则该曲线的粗糙度可以表示为:

$$\phi_1 = D_B$$

$$\phi_2 = \frac{M - m}{M} \cdot \frac{l}{S_{m_i}}$$

其中, m为同时满足下列条件的线段数量, 条件包括:

①判断每一段的斜率,

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| < Z_2$$

其中, Z_2 为表面轮廓线一次导数均方根, 按下式求得:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{Z_{i+1} - Z_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2}$$

其中, N为该粗糙曲线包含的点数;

②判断每一段的高差,

$$z_i \text{ 到中线距离} + z_{i+1} \text{ 到中线距离} < 2R_a$$

其中, R_a 为轮廓的算术平均偏差, 即每个点到基准线的距离的算术平均值,

满足上述①和②条件的线段数为m;

3) 将在砂线切割机上用线径0.33mm的金刚砂线将单裂隙试样(5)的裂隙切割成粗糙曲线, 该曲线只在水流方向有粗糙特性, 粗糙度由步骤2) 得出;

4) 在裂隙中垫厚度300um的铜片, 将单裂隙试样(5)裂隙两侧用AB胶密封, 推入夹持器中, 用定位柱(10-1)定位, 保证隙宽测量装置(6)与裂隙面(5-1)垂直, 试样放入后拧上夹持器的入口端盖(2)和出口堵头(13), 裂隙的初始隙宽为 b_0 ;

5) 施加围压 σ_3 , 此时测出裂隙变形为 Δb , 可以知道在围压 σ_3 条件下的裂隙隙宽为 $b_0 - \Delta b$;

6) 围压稳定后, 设置背压阀(16)的压力, 用恒流恒压泵(15)注入压力为 P_1 的液体, 流量稳定后出口压力表(18)测得的出口压力值 P_2 等于背压阀(16)的压力, 用出水流量计(17)测出在压力梯度 $(P_1 - P_2) / l$ 的流量 Q_1 , 然后逐级加压, 分别测出在不同压力梯度 ∇P 下的流量 Q_i , 可以得到一条 $\nabla P - Q$ 的关系曲线;

7) 改变围压条件, 对单裂隙试样(5)施加不同的围压得到不同的裂隙隙宽 b , 再进行上述步骤5) - 步骤6)的试验, 这样可以改变公式(1)的裂隙隙宽条件, 得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

8) 再生成不同的粗糙曲线, 这样可以改变公式(1)中的 $12\phi_1$ 和 ϕ_2 的条件, 重新进行上述步骤1) - 步骤7), 得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

9) 可以看出, 在下面公式中, ∇P 、 Q 、 b 、 w 、 μ 、 ρ 都是可以得到的量, 将每种工况下的试验数据分别在origin软件中进行二次多项式拟合, 拟合如下面公式形式, 可以得到对应工况下的 A_0 和 B_0 值:

$$\nabla P = f(12D_B) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f\left(\frac{M - m}{M} \cdot \frac{l}{S_{m_i}}\right) \rho}{b w^2 b^2} Q^2$$

10) 通过上述得到的不同工况下的 A_D 和 B_D 值,可以研究得到相同表面粗糙度不同隙宽条件、相同隙宽不同表面粗糙度条件下,达西和非达西区域中无量纲量 A_D 、 B_D 与粗糙表征量 ϕ_1 和 ϕ_2 之间的函数的具体形式及变化规律。

3. 用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,用于实现权利要求2的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验方法;

包括夹持器,所述夹持器包括套筒(9),所述套筒(9)中与其同轴设有胶套(10),套筒(9)内壁与胶套(10)外壁之间设有围压腔(7),且套筒(9)外设有围压加载装置;一入口假岩芯(41)和一入口堵头(3)依次从夹持器的入口侧塞入胶套(10)中,且夹持器的入口侧设有入口端盖(2),一出口假岩芯(42)和一出口堵头(13)依次从夹持器的出口侧塞入胶套(10)中,所述入口假岩芯(41)和出口假岩芯(42)沿各自中轴线分别设有水流通道(20),且入口假岩芯(41)和出口假岩芯(42)彼此相对的侧面上各自从中心沿径向发散设有多个渗流槽(21);

所述入口堵头(3)中沿其中轴线设有水流通孔(3-1),水流通孔(3-1)通过入口管路(1)连通至外部的恒流恒压泵(15),入口管路(1)上设有三通阀I(14),三通阀I(14)的分支口上设有入口压力表(19);

所述入口假岩芯(41)、出口假岩芯(42)、胶套(10)围成的空腔中设有单裂隙试样(5),所述出口堵头(13)中沿其中轴线设有水流引出孔(13-1),水流引出孔(13-1)露出出口堵头(13)的一端通过出口管路(11)连接至一出水流量计(17),所述出口管路(11)上设有三通阀II(12)和背压阀(16);三通阀II(12)的分支口上设有出口压力表(18),所述套筒(9)外部设有隙宽测量装置(6),所述隙宽测量装置(6)的探头垂直于裂隙面(5-1)穿过套筒(9)和胶套(10)并顶住单裂隙试样(5)的外壁。

4. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,所述围压加载装置包括环压泵,所述套筒(9)上设有进油孔(8),进油孔(8)从围压腔(7)通至套筒(9)外部;所述环压泵的出口通过一加压管路连接至进油孔(8)上。

5. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,隙宽测量装置(6)包括LVDT位移传感器,隙宽测量装置(6)的探头与LVDT位移传感器连接。

6. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,所述胶套(10)外壁设有定位柱(10-1),定位柱(10-1)可配合嵌入套筒(9)内壁的孔中,当定位柱(10-1)嵌入套筒(9)内壁的孔中时,单裂隙试样(5)的裂隙面(5-1)与隙宽测量装置(6)的探头刚好垂直。

7. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,所述单裂隙试样(5)的裂隙面(5-1)通过砂线切割机切割而成。

8. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,入口端盖(2)通过入口保护盖(2-1)固定在套筒(9)的入口侧,出口堵头(13)通过出口保护盖(13-2)固定在套筒(9)的出口侧。

9. 根据权利要求3所述的用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,其特征在于,入口压力表(19)、出口压力表(18)、隙宽测量装置(6)、出水流量计(17)共同连接至一数据采集器上。

裂隙表面粗糙度的表征方法和渗流试验系统及试验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种裂隙表面粗糙度的表征方法和渗流试验系统及试验方法,属于渗流研究领域。

背景技术

[0002] 裂隙岩体中的流体动量传输在大量工程现场应用普遍,包括矿山地热工作、地下隧道、地热能量提取、油气开采、污染物封存等,针对工程问题提取出的离散裂隙网络模型(DFN模型)普遍应用在渗流研究中,其中的单裂隙渗流是研究基础。单裂隙中水的流动过程满足N-S方程,对条件进行简化后得到达西流区域的 $Q-\nabla P$ 关系,即通过平滑平板裂隙的流量 Q 与隙宽 b 的立方成正比,如下式所示:

$$[0003] \quad Q = -\frac{wb^3}{A_D\mu} \nabla P$$

[0004] 上式中, Q 为渗流流量, m^3/s ; w 为过流面宽度, m ; b 为裂隙的机械隙宽, m ; μ 为流体的动力黏度, $Pa \cdot s$; ∇P 为裂隙两端的压力梯度, Pa/m 。其中 A_D 值为 $f(12\phi_1)$, ϕ_1 为代表粗糙度的一个无量纲数,当裂隙面完全光滑时, $\phi_1=1$,当裂隙面粗糙时, $\phi_1>1$ 。

[0005] 在水力、隧道、石油开采等一系列实际工程建设的渗流特性分析中,越来越多的试验资料和监测资料证实了很多偏离达西渗流规律现象的存在,即渗流速度和水力坡降不呈线性关系,目前对于这种非线性出现的主要原因归结为:①由于裂隙粗糙流线迂曲,当水的流量增大时,由于水流速度和方向的变化,惯性力不可忽略。②紊流过程中形成的涡流导致能量耗散,这种条件下导致的压力降更大。③粗糙面导致流动的水阻增大。可见,裂隙面的粗糙特性对单裂隙渗流过程有重要影响,国内外用Forchheimer公式来描述非达西流区域的流量 Q 和压力降 ∇P 之间的关系,在此基础上进行无量纲化,如下式所示:

$$[0006] \quad \nabla P = A_D \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{B_D}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

[0007] 其中 $B_{D/b}=\beta$, β 为非达西系数, m^{-1} , B_D 为一个代表裂隙粗糙度的一个无量纲数,更偏向反映流体渗流过程中的压力非线性损失。

[0008] 从以上的各公式可以看出,无论流体在达西流阶段或非达西流阶段,裂隙表面的粗糙特性都对流体状态的描述有重要影响,而由于裂隙粗糙面形状复杂,国内外大多用统计学方法或分形几何方法对其描述,但这些研究结果偏差较大。

发明内容

[0009] 针对上述现有技术存在的问题,本发明的目的是提供一种能够表征出表面裂隙粗糙度对非达西渗流的影响情况的裂隙表面粗糙度的表征方法,本发明还提供了用于研究裂隙表面粗糙度的渗流试验系统及试验方法。

[0010] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案是:一种裂隙表面粗糙度的表征方法,首先取一段随机生成的具有平直基准线的粗糙曲线,该粗糙曲线由等间距的 N 个点组成,各个

点的横坐标为 x_i ,纵坐标为 z_i ($1 \leq i \leq N$),建立无量纲数 A_D 、 B_D 与粗糙度之间关系:

$$[0011] \quad A_D = f(12\phi_1)$$

$$[0012] \quad B_D = f(\phi_2),$$

[0013] 式中, ϕ_1 、 ϕ_2 为粗糙度, ϕ_1 反映曲线整体的粗糙特性,代表了粗糙特性对Forchheimer公式线性部分的影响, ϕ_2 反映曲线沿水流方向的粗糙性对水流压力降的影响,代表了粗糙特性对Forchheimer公式非线性部分的影响, ϕ_1 、 ϕ_2 表达式如下:

$$[0014] \quad \phi_1 = D_B$$

$$[0015] \quad \phi_2 = \frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}$$

[0016] 其中, D_B 为粗糙曲线的分形计盒维数, l 为粗糙曲线的基准线的长度, S_m 为轮廓微观不平度的平均间距,轮廓微观不平度间距是含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段基准线长度,则 $1/S_m$ 是粗糙曲线上轮廓峰的密度; M 指粗糙曲线包括的所有线段; m 为同时满足下列条件的线段数量,条件包括:

[0017] ①判断每一段的斜率,

$$[0018] \quad \left| \frac{dz}{dx} \right| < Z_2$$

[0019] 其中, Z_2 为表面轮廓线一次导数均方根,按下式求得:

$$[0020] \quad Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2}$$

[0021] 其中, N 为该粗糙曲线包含的点数;

[0022] ②判断每一段的高差,

$$[0023] \quad z_i \text{到中线距离} + z_{i+1} \text{到中线距离} < 2R_a$$

[0024] 其中, R_a 为轮廓的算术平均偏差,即每个点到基准线的距离的算术平均值,

[0025] 满足上述①和②条件的线段数为 m ;

[0026] 综上,单裂隙水渗流过程中非达西流阶段的Forchheimer公式可以表达为公式(1):

$$[0027] \quad \nabla P = f(12\phi_1) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f(\phi_2)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2 \quad (1)$$

[0028] 即:

$$[0029] \quad \nabla P = f(12D_B) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f\left(\frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}\right)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

[0030] 本发明还公开了用于上述裂隙表面粗糙度表征的渗流试验系统,包括夹持器,所述夹持器包括套筒,所述套筒中与其同轴设有胶套,套筒内壁与胶套外壁之间设有围压腔,且套筒外设有围压加载装置;一入口假岩芯和一入口堵头依次从夹持器的入口侧塞入胶套中,且夹持器的入口侧设有入口端盖,一出口假岩芯和一出口堵头依次从夹持器的出口侧塞入胶套中,所述入口假岩芯和出口假岩芯沿各自中轴线分别设有水流通道的,且入口假岩芯和出口假岩芯彼此相对的侧面上各自从中心沿径向发散设有多个渗流槽;

[0031] 所述入口堵头中沿其中轴线设有水流通孔,水流通孔通过入口管路连通至外部的恒流恒压泵,入口管路上设有三通阀I,三通阀I的分支口上设有入口压力表;

[0032] 所述入口假岩芯、出口假岩芯、胶套围成的空腔中设有单裂隙试样,所述出口堵头中沿其中轴线设有水流引出孔,水流引出孔露出出口堵头的一端通过出口管路连接至一出水流量计,所述出口管路上设有三通阀II和背压阀;三通阀II的分支口上设有出口压力表,所述套筒外部设有隙宽测量装置,所述隙宽测量装置的探头垂直于裂隙面穿过套筒和胶套并顶住单裂隙试样的外壁。

[0033] 上述围压加载装置包括环压泵,所述套筒上设有进油孔,进油孔从围压腔通至套筒外部;所述环压泵的出口通过一加压管路连接至进油孔上。环压泵可将压力油泵出、通过加压管路注入进油孔,继而进入围压腔中向胶套加压。

[0034] 优选的,隙宽测量装置包括LVDT位移传感器,隙宽测量装置的探头与LVDT位移传感器连接,能够根据隙宽选择量程,可以测量试样裂隙的垂直变形量 Δb ,且LVDT位移传感器连接至数据采集器上。测得的裂隙变形量可以直接在数据采集器上显示出来。所用的数据采集器可以选用研华科技的PCI720型采集器。

[0035] 优选的,所述胶套外壁设有定位柱,定位柱可配合嵌入套筒内壁的孔中,当定位柱嵌入套筒内壁的孔中时,单裂隙试样的裂隙面与隙宽测量装置的探头刚好垂直。装入时先将单裂隙试样推入胶套中,再将胶套通过定位柱定位在套筒内,定位柱方便了裂隙面的定位,能够保证装样后单裂隙试样的裂隙面与隙宽测量装置的探头始终垂直。

[0036] 本发明单裂隙试样的裂隙面是提前设计的,通过砂线切割机切割而成。

[0037] 优选的,为了保证连接稳固,入口端盖通过入口保护盖固定在套筒的入口侧,出口堵头通过出口保护盖固定在套筒的出口侧。

[0038] 进一步的,入口压力表、出口压力表、隙宽测量装置、出水流量计共同连接至一数据采集器上。数据采集器可以实时接收到各检测部件的检测数据并实时显示出来。

[0039] 用于裂隙表面粗糙度表征的渗流试验方法包括如下步骤:

[0040] 1) 找组成粗糙曲线N个点的最小二乘中线,作为粗糙曲线的基准线,基准线方程为 $z = ax + b$;

[0041] 2) 根据matlab程序计算该曲线的粗糙度相关的参数,包括分形计盒维数 D_B 、表面轮廓线一次导数均方根 Z_2 、轮廓的算术平均偏差 R_a 、轮廓峰的密度 $1/S_m$,根据 Z_2 、 R_a 求出该曲线的 $(M-m)/M$,则该曲线的粗糙度可以表示为:

[0042] $\phi_1 = D_B$

[0043] $\phi_2 = \frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}$;

[0044] 3) 将在砂线切割机上用线径0.33mm的金刚砂线将单裂隙试样的裂隙切割成粗糙曲线,该曲线只在水流方向有粗糙特性,粗糙度由步骤2)得出;

[0045] 4) 在裂隙中垫厚度300um的铜片,将单裂隙试样裂隙两侧用AB胶密封,推入夹持器中,用定位柱定位,保证隙宽测量装置与裂隙面垂直,试样放入后拧上夹持器的入口端盖和出口堵头,裂隙的初始隙宽为 b_0 ;

[0046] 5) 施加围压 σ_3 ,此时测出裂隙变形为 Δb ,可以知道在围压 σ_3 条件下的裂隙隙宽为 $b_0 - \Delta b$;

[0047] 6) 围压稳定后,设置背压阀的压力,用恒流恒压泵注入压力为 P_1 的液体,流量稳定后出口压力表测得的出口压力值 P_2 等于背压阀的压力,用出水流量计测出在压力梯度 $(P_1 - P_2) / l$ 的流量 Q_1 ,然后逐级加压,分别测出在不同压力梯度 ∇P 下的流量 Q_1 ,可以得到一条 $\nabla P - Q$ 的关系曲线;

[0048] 7) 改变围压条件,对单裂隙试样施加不同的围压得到不同的裂隙隙宽 b ,再进行上述步骤5) - 步骤6)的试验,这样可以改变公式(1)的裂隙隙宽条件,得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

[0049] 8) 再生成不同的粗糙曲线,这样可以改变公式(1)中的 $12\phi_1$ 和 ϕ_2 的条件,重新进行上述步骤1) - 步骤7),得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

[0050] 9) 可以看出,在下面公式中, ∇P 、 Q 、 b 、 w 、 μ 、 ρ 都是可以得到的量,将每种工况下的试验数据分别在origin软件中进行二次多项式拟合,拟合如下面公式形式,可以得到对应工况下的 A_D 和 B_D 值:

$$[0051] \quad \nabla P = f(12D_B) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f\left(\frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}\right)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

[0052] 10) 通过上述得到的不同工况下的 A_D 和 B_D 值,可以研究得到相同表面粗糙度不同隙宽条件、相同隙宽不同表面粗糙度条件下,达西和非达西区域中无量纲量 A_D 、 B_D 与粗糙表征量 ϕ_1 和 ϕ_2 之间的函数的具体形式及变化规律。

[0053] 相对于现有技术,本发明具有如下优势:

[0054] (1) 本发明的裂隙表面粗糙度的表征方法,应用到非达西流区域Forchheimer公式中时,无论数学形式还是物理意义上都能够保持一致;通过新的表征方法和公式的建立,使得非达西系数 β 和裂隙粗糙特性建立了联系,包括隙宽、高差、斜率和轮廓峰密度,该方法突出了沿水流方向的粗糙特性对流体流动过程中压力降的影响,这是其他现有技术不具备的;

[0055] (2) 本发明将粗糙轮廓线微段的斜率、高差作为判断标准,将对渗流过程中压力降影响不大的线段忽略(如高差小、坡度小的线段),并结合轮廓峰密度、分形计盒维数等多种参数对粗糙度 ϕ_1 、 ϕ_2 进行描述,这样大大减少了研究量且突出研究重点;

[0056] (3) 本发明设计了对应的渗流试验系统,通过对不同粗糙特征的单裂隙岩样的渗流试验,得到相应的 $\nabla P - Q$ 曲线,通过二次项拟合,能够得到不同工况下 A_D 、 B_D 的值,最终建立 A_D 、 B_D 与粗糙度参数的关系。

[0057] (4) 本发明的渗流试验系统在进行裂隙渗流过程中,通过设计的隙宽测量装置可以准确测量裂隙隙宽 b 的变化量(精度到 $1\mu\text{m}$),垂直裂隙面的探头紧贴试样的外表面,充分考虑到了胶套变形带来的测量影响,大大消除了测量误差,保证了研究结果的准确和可靠性。由于该夹持器可以精确测量裂隙隙宽的变形,通过预制不同的裂隙面,可以研究 $A_D = f(12\phi_1)$ 、 $B_D = f(\phi_2)$ 的具体函数形式及变化规律。

附图说明

[0058] 图1是随机中点法生成的粗糙曲线示意图;

[0059] 图2是基准线为直线的粗糙曲线及构成的粗糙面示意图;

[0060] 图3是图2中的一段粗糙曲线；

[0061] 图4是本发明用到的渗流试验系统；

[0062] 图5是本发明入口假岩芯和出口假岩芯彼此相对的侧面示意图；

[0063] 图中,1.入口管路;2.入口端盖;2-1.入口保护盖;3.入口堵头;3-1.水流通孔;4.入口假岩芯;5.单裂隙试样;5-1.裂隙面;10-1.定位柱;6.隙宽测量装置;7.围压腔;8.进油孔;9.套筒;10.胶套;11.出口管路,12.三通阀Ⅱ,13.出口堵头;13-1.水流引出孔;13-2.出口保护盖;14.三通阀Ⅰ;15.恒流恒压泵;16.背压阀;17.出水流量计;18.出口压力表;19.入口压力表;20.水流通通道;21.渗流槽。

具体实施方式

[0064] 下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

[0065] 单裂隙渗流过程中,沿水流方向的粗糙特征对进出口压力降的损失影响最大,为了突出研究对象,只考虑沿随流方向的粗糙性。

[0066] 粗糙度的表征方法:

[0067] 如图1是根据随机中点法生成的一个二维的粗糙曲线,其可以反映粗糙平面的轮廓,可以从图中看出基准线(反映一个裂隙方向的直线,一般为最小二乘中线)是有起伏的;为了研究方便,取一段随机生成的具有平直基准线的粗糙曲线进行研究,如图2所示。图3是图2粗糙曲线中的一段,该曲线是由间距为0.5mm的200个点组成,200个点的横坐标x从0至100mm,纵坐标z在基准线上下浮动(具有统计学规律),为了研究该粗糙曲线对非达西流的影响,需要建立无量纲数 A_D 、 B_D 与粗糙度之间关系,对此,提出粗糙度表征方法:

$$[0068] \quad A_D = f(12\phi_1)$$

$$[0069] \quad B_D = f(\phi_2)$$

[0070] 式中, ϕ_1 、 ϕ_2 为粗糙度,但各具侧重点, ϕ_1 主要反映一个曲线整体的粗糙特性,代表了粗糙特性对Forchheimer公式线性部分的影响, ϕ_2 主要反映一个曲线沿水流方向的粗糙性对水流压力降的影响,代表了粗糙特性对Forchheimer公式非线性部分的影响, ϕ_1 、 ϕ_2 表达式如下:

$$[0071] \quad \phi_1 = D_B$$

$$[0072] \quad \phi_2 = \frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}$$

[0073] 其中, D_B 为这条粗糙曲线的分形计盒维数,对二维曲线值为1~2,平直时 $D_B=1$, l 为这条粗糙曲线的基准线的长度, S_m 为轮廓微观不平度的平均间距,轮廓微观不平度间距指的是含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段基准线长度,则 $1/S_m$ 实际就是粗糙曲线上轮廓峰的密度。

[0074] 上式中, M 指的是这条粗糙曲线包括的所有线段,在本例中是199; m 为同时满足下列条件的线段数量,条件包括:

[0075] ①判断每一段的斜率,

$$[0076] \quad \left| \frac{dz}{dx} \right| < Z_2$$

[0077] 其中, Z_2 为表面轮廓线一次导数均方根,按下式求得:

$$[0078] \quad Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{Z_{i+1} - Z_i}{x_{i+1} - x_i} \right)^2}$$

[0079] 其中,N为该粗糙曲线包含的点数,在本例中是200;

[0080] ②判断每一段的高差,

[0081] $Z(x_i)$ 到中线距离+ $Z(x_{i+1})$ 到中线距离 $< 2R_a$

[0082] 其中, R_a 为轮廓的算术平均偏差,即每个点到基准线的距离的算术平均值。

[0083] 满足上述①②条件的线段数为m。

[0084] 综上,单裂隙水渗流过程中非达西流阶段的Forchheimer公式可以表达为公式(1):

$$[0085] \quad \nabla P = f(12\phi_1) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f(\phi_2)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2 \quad (1)$$

[0086] 即:

$$[0087] \quad \nabla P = f(12D_B) \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{f\left(\frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}\right)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

[0088] 这个公式具有明确的物理意义,当单裂隙中流体流量较小时,流体满足达西定律,即 $\nabla P - Q$ 满足线性关系,相同流量Q条件下,压力降 ∇P 与粗糙度 ϕ_1 有关,这个粗糙度反映裂隙面整体的粗糙程度。当单裂隙中流体流量大于临界值时,流体满足非达西规律,即 $\nabla P - Q$ 偏离了线性关系,非线性部分 $\frac{f(\phi_2)}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$ 表示因为流量增大后裂隙粗糙导致的压力降,这个粗糙表征更偏向于沿水流方向的粗糙特性,其中,将高差、斜率作为判断标准,将对流体压力降影响不大的线段忽略(如高差小、坡度小的线段),这样大大减少了研究量且突出重点,且 $\frac{f\left(\frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m}\right)}{b}$ 无论在数学形式还是物理意义上都和非达西系数 β 一致,通过本公式的建立,使得非达西系数 β 和裂隙粗糙特性建立了联系,包括隙宽、高差、斜率和轮廓峰密度。

[0089] 进行单裂隙渗流的非达西流动时,为了研究 $A_D = f(12\phi_1)$ 、 $B_D = f(\phi_2)$ 具体函数形式及表达关系式,设计了渗流试验系统,结构如下:

[0090] 渗流试验系统如图4和图5包括夹持器,所述夹持器包括套筒9,所述套筒9中与其同轴设有胶套10,套筒9内壁与胶套10外壁之间设有围压腔7,且套筒9外设有围压加载装置;一入口假岩芯41和一入口堵头3依次从夹持器的入口侧塞入胶套10中,且夹持器的入口侧设有入口端盖2,一出口假岩芯42和一出口堵头13依次从夹持器的出口侧塞入胶套10中,所述入口假岩芯41和出口假岩芯42沿各自中轴线分别设有水流通道20,且入口假岩芯41和出口假岩芯42彼此相对的侧面上各自从中心沿径向发散设有多个渗流槽21;

[0091] 所述入口堵头3中沿其中轴线设有水流通孔3-1,水流通孔3-1通过入口管路1连通至外部的恒流恒压泵15,入口管路1上设有三通阀I14,三通阀I14的分支口上设有入口压力表19;

[0092] 所述入口假岩芯41、出口假岩芯42、胶套10围成的空腔中设有单裂隙试样5,所述

出口堵头13中沿其中轴线设有水流引出孔13-1,水流引出孔13-1露出出口堵头13的一端通过出口管路11连接至一出水流量计17,所述出口管路11上设有三通阀Ⅱ12和背压阀16;三通阀Ⅱ12的分支口上设有出口压力表18,所述套筒9外部设有隙宽测量装置6,所述隙宽测量装置6的探头垂直于裂隙面5-1穿过套筒9和胶套10并顶住单裂隙试样5的外壁。

[0093] 上述围压加载装置包括环压泵,所述套筒9上设有进油孔8,进油孔8从围压腔7通至套筒9外部;所述环压泵的出口通过一加压管路连接至进油孔8上。环压泵可将压力油泵出、通过加压管路注入进油孔8,继而进入围压腔7中向胶套10加压。

[0094] 优选的,隙宽测量装置6包括LVDT位移传感器,隙宽测量装置6的探头与LVDT位移传感器连接,能够根据隙宽选择量程,可以测量试样裂隙的垂直变形量 Δb ,且LVDT位移传感器连接至数据采集器上。测得的裂隙变形量可以直接在数据采集器上显示出来。所用的数据采集器可以选用研华科技的PCI720型采集器。

[0095] 为了减少水流从夹持器入口流入裂隙的热量损失,所述入口端盖2设计为中空结构,入口堵头3采用非金属聚酰亚胺材料,入口假岩芯41采用聚四氟乙烯材料,采用这样的材料导热效率低,保证夹持器入口水温与夹持器中的裂隙入口水温基本一致,保证试验外部因素的稳定。

[0096] 优选的,所述胶套10外壁设有定位柱10-1,定位柱10-1可配合嵌入套筒9内壁的孔中,当定位柱10-1嵌入套筒9内壁的孔中时,单裂隙试样5的裂隙面5-1与隙宽测量装置6的探头刚好垂直。装入时先将单裂隙试样5推入胶套10中,再将胶套10通过定位柱10-1定位在套筒9内,定位柱10-1方便了裂隙面5-1的定位,能够保证装样后单裂隙试样5的裂隙面5-1与隙宽测量装置6的探头始终垂直。

[0097] 本发明单裂隙试样5的裂隙面5-1是提前设计的,通过砂线切割机切割而成。

[0098] 优选的,为了保证连接稳固,入口端盖2通过入口保护盖2-1固定在套筒9的入口侧,出口堵头13通过出口保护盖13-2固定在套筒9的出口侧。

[0099] 进一步的,入口压力表19、出口压力表18、隙宽测量装置6、出水流量计17共同连接至一数据采集器上。数据采集器可以实时接收到各检测部件的检测数据并实时显示出来。

[0100] 本发明通过夹持器两端的入口压力表19、出口压力表18可以测得渗流过程中两端压力梯度;所述出水流量计17为电子天平,电子天平每隔一段时间测量注入烧杯的水流重量,即可得出流量,该流量数值等于输入夹持器入口的流量 Q ,从夹持器中出来的水流更加稳定,测得的流量更加准确可靠。

[0101] 利用上述系统进行渗流试验的方法如下:

[0102] 1) 找200个点的最小二乘中线,作为该曲线的基准线,基准线方程为 $z = ax + b$;

[0103] 2) 根据matlab程序计算该曲线的粗糙度相关的参数,包括分形计盒维数 D_B 、表面轮廓线一次导数均方根 Z_2 、轮廓的算术平均偏差 R_a 、轮廓峰的密度 $1/S_m$,根据 Z_2 、 R_a 求出该曲线的 $(M-m)/M$,则该曲线的粗糙度可以表示为:

[0104] $\phi_1 = D_B$

[0105]
$$\phi_2 = \frac{M-m}{M} \cdot \frac{l}{S_m};$$

[0106] 3) 将在砂线切割机上用线径0.33mm的金刚砂线将单裂隙试样5的裂隙切割成图3所示曲线,该曲线只在水流方向有粗糙特性,粗糙度由步骤2)得出;为了保证试验更加精

确,可在设备运行之前进行标定工作,对测量裂隙变形的探头与套管之间的阻力进行标定(阻力为P);

[0107] 4) 在裂隙中垫厚度300um的铜片,将单裂隙试样5裂隙两侧用AB胶密封,推入夹持器中,用定位柱10-1定位,保证隙宽测量装置6与裂隙面5-1垂直,试样放入后拧上夹持器的入口端盖2和出口端盖,此时裂隙的初始隙宽 $b_0=300\mu\text{m}$;

[0108] 5) 施加围压 σ_3 ,此时测出裂隙变形为 Δb ,可以知道在围压 σ_3 条件下的裂隙隙宽为 $b_0 - \Delta b$;

[0109] 6) 围压稳定后,设置背压阀16的压力为0.1MPa,用恒流恒压泵15注入压力为 P_1 的液体,流量稳定后出口压力表18测得的出口压力值等于背压阀16的压力0.1MPa,压力梯度为 $\nabla P = (P_1 - 0.1)/L$,用出水流量计17测出在压力梯度 $(P_1 - 0.1)/L$ 的流量 Q_1 ,然后0.1MPa逐级加压,分别测出在不同压力梯度 ∇P 下的流量 Q_i ,可以得到一条 $\nabla P - Q$ 的关系曲线;

[0110] 7) 改变围压条件,对单裂隙试样5施加不同的围压得到不同的裂隙隙宽 b ,再进行上述步骤5)-步骤6)的试验,这样可以改变公式(1)的裂隙隙宽条件,得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

[0111] 8) 再生成不同的粗糙曲线,这样可以改变公式(1)中的 $12\phi_1$ 和 ϕ_2 的条件,重新进行上述步骤1)-步骤7),得到对应工况条件下的 $\nabla P - Q$ 曲线;

[0112] 9) 可以看出,在下面公式中, ∇P 、 Q 、 b 、 w 、 μ 、 ρ 都是可以得到的量,将每种工况下的试验数据分别在origin软件中进行二次多项式拟合,拟合如下面公式形式,可以得到对应工况下的 A_D 和 B_D 值,试验数据的统计表格示意如表1。

[0113]
$$\nabla P = A_D \frac{\mu}{b^3 w} Q + \frac{B_D}{b} \frac{\rho}{w^2 b^2} Q^2$$

[0114] 表1. 试验数据统计表格

[0115]

	隙宽	A_D	B_D
粗糙曲线 1	$b_0 - \Delta b_1$		
	$b_0 - \Delta b_2$		
	$b_0 - \Delta b_3$		
	$b_0 - \Delta b_4$		
	$b_0 - \Delta b_5$		
	$b_0 - \Delta b_6$		
粗糙曲线 2	$b_0 - \Delta b_1$		
	$b_0 - \Delta b_2$		
	$b_0 - \Delta b_3$		
	$b_0 - \Delta b_4$		
	$b_0 - \Delta b_5$		
	$b_0 - \Delta b_6$		
粗糙曲线 3	$b_0 - \Delta b_1$		
	$b_0 - \Delta b_2$		
	$b_0 - \Delta b_3$		
	$b_0 - \Delta b_4$		
	$b_0 - \Delta b_5$		
	$b_0 - \Delta b_6$		
...	...		

[0116] 10) 通过上述得到的 A_D 和 B_D 值,可以研究相同表面粗糙度不同隙宽条件、相同隙宽不同表面粗糙度条件下,达西和非达西区域中无量纲量 A_D 、 B_D 与本文提出的粗糙表征量 ϕ_1 和 ϕ_2 之间的函数的具体形式及变化规律,如下所示:

$$[0117] \quad A_D = f(12\phi_1)$$

$$[0118] \quad B_D = f(\phi_2)。$$

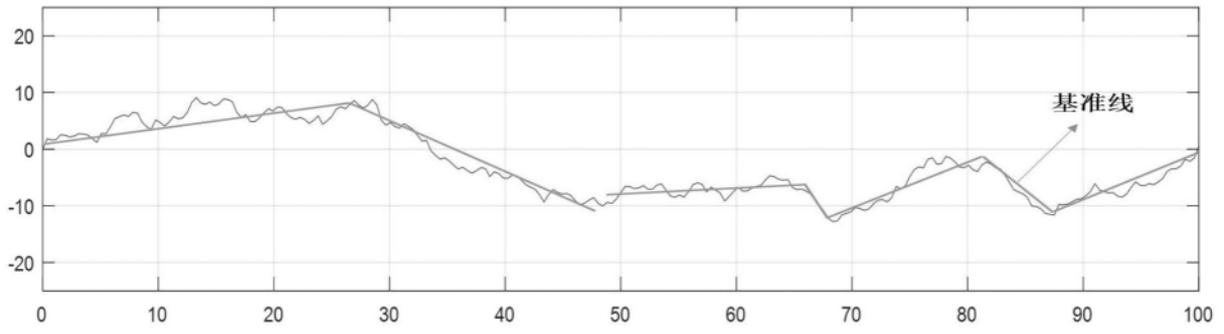


图1

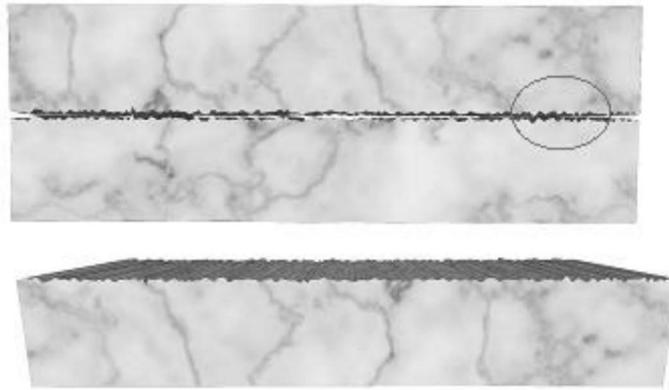


图2

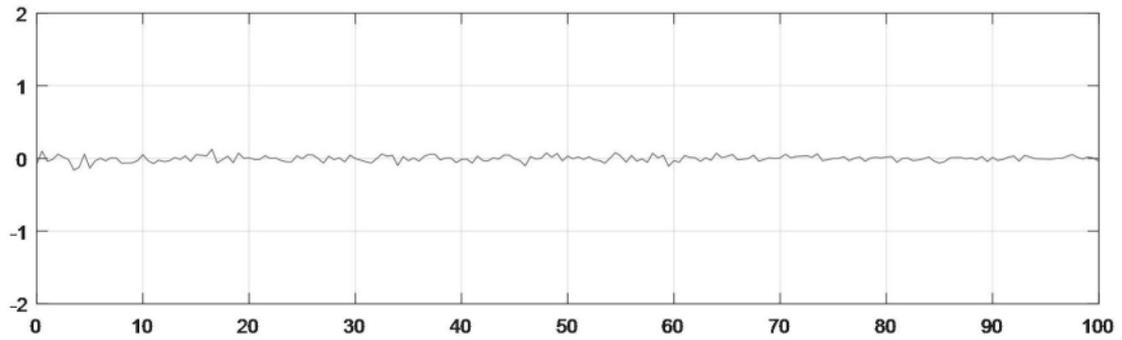


图3

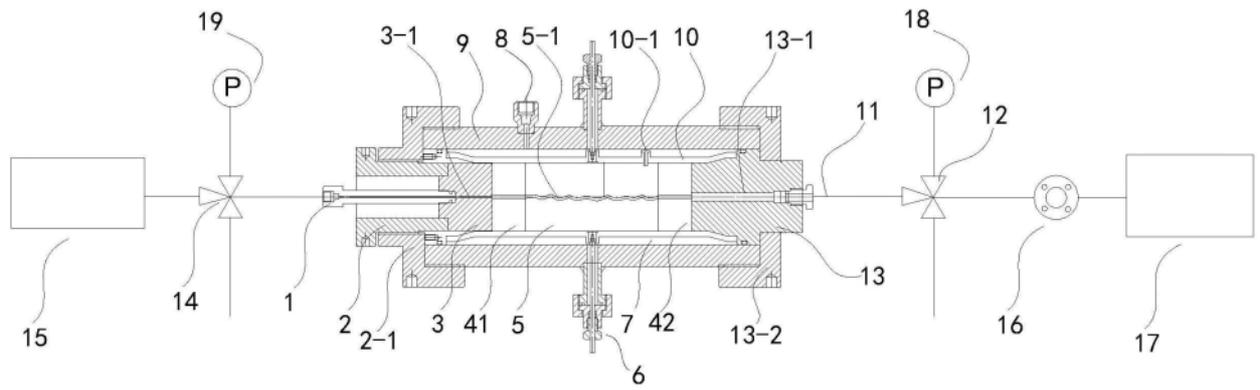


图4

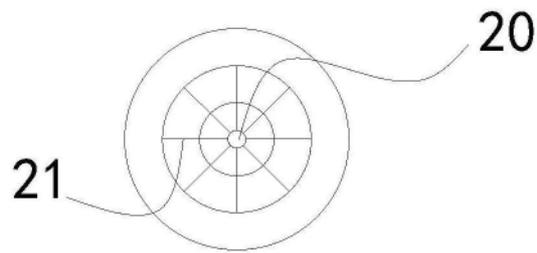


图5