

不同节理粗糙度系数的裂隙渗流规律研究

段慕白, 李 皋, 孟英峰, 赵 之, 马 骁, 李洪涛

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程 国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘 要: 裂隙的研究对石油开采、水利工程以及地下空间的利用都具有重要的意义。真实裂隙表面粗糙的几何形态会影响流体的流动特性及裂隙的传导能力,立方体定律难以满足使用条件。根据节理粗糙度(JRC)标准剖面轮廓曲线,采用逆向数字化建模方法,开展仿真模拟不同 JRC 裂隙渗流规律的研究。结果表明:作用在不同粗糙度裂隙两端的压差恒定时,随着节理粗糙度的增加裂隙内流体的流量逐渐减小;流入不同粗糙度裂隙单位体积流量恒定时,随着粗糙度的增加,作用在裂隙两端的压差逐渐增大;模拟结果与实验结果相对比,得出裂隙机械宽度与流量之间的关系曲线表现出明显的非线性特征,两条趋势线相吻合,均符合对数关系。

关键词: 节理粗糙度系数;裂隙;数字化建模;仿真模拟;渗流

中图分类号:TV131.63

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2013)05-0041-04

Research on regulation of fracture seepage in different joint roughness coefficients

DUAN Mubai, LI Gao, MENG Yingfeng, ZHAO Zhi, MA Xiao, LI Hongtao

(State Key Laboratory of Oil/ Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The research on fracture has important significance to oil development, irrigation works and underground space utilization. While the geometrical form of actual roughness of fracture surface will influence the specification of liquid flowing and conduction capability of fracture, cubic law is failed to be executed. Based on the standard section outline curve of JRC, various researches on different JRC regulation were performed via reverses digital modeling method. The result showed that when a consistent pressure differential acts on both sides of fractures owning different roughness, liquid flow is gradually reduced along with the increase of joint roughness, the differential pressure on both sides will be gradually increased with the increase of surface roughness when the flow that running into various certain surfaces is fixed. Comparing simulation result with experimental one, the relationship curve between fracture mechanical width and flow showed obvious non-linear feature, two lines match well and accord with logarithmic relation.

Key words: joint roughness coefficient; fracture; digital modeling; analogue simulation; seepage

1 研究背景

裂隙岩体渗流规律对工程作用下的岩体响应具有重要影响,建立正确的单裂隙渗流规律计算模型,是进一步研究裂隙网络渗流规律的基础和关键。Lomize^[1-3]等通过光滑平行板缝隙水流试验,提出了著名的立方体定律。光滑平行板模型的立方体定

律已被岩石力学界所接受,然而裂隙内的渗流受到粗糙度的影响,计算分析结果往往与实际情况相差较大,因此立方体定律不适用于天然裂隙面。研究实际粗糙度对裂隙渗流规律的影响一直都是难点。

国内外许多学者对粗糙裂隙渗流规律进行了大量的研究,Patir 等^[4]研究得出流体在光滑的裂隙表面与粗糙的裂隙表面流速是不同的。Barton 等^[5]基

收稿日期:2013-04-10; 修回日期:2013-04-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51104124);中央财政支持地方高校发展专项资金项目(P027);教育部博士点基金项目(20125121110001)

作者简介:段慕白(1984-),男,湖北潜江人,博士生,主要从事裂隙精细描述、裂隙闭合机理、压力波动裂隙变形仿真模拟研究工作。

通讯作者:李 皋(1976-),男,四川广安人,博士,副研究员,主要从事欠平衡钻井、气体钻井与储层保护方面的研究工作。

于大量的试验成果得出了水力等效隙宽和机械隙宽的关系与裂隙粗糙度系数值 JRC 有关,蒋宇静等^[6]研究剪切试验前后,分数维 D、JRC 与裂隙水力特征之间的关系。Hosseini^[7]通过对规则三角形裂隙与粗糙裂隙的仿真模拟计算得出了粗糙度对压差的影响关系。贺玉龙等^[8]对不同节理粗糙度系数单裂隙渗流试验,得出了不同 JRC 值单裂隙渗透率与有效应力之间的关系。王媛等^[9-12]对粗糙裂隙渗流研究的最新进展进行了总结。值得注意的是,在目前的相关研究中,有关仿真模拟计算真实裂隙粗糙度对渗流影响的文献较少,并且现有的裂隙模型均存在一定的局限性,仅能反映某种特定粗糙度的裂隙,或者是随机生成的裂隙模型,这些计算结果难以完全反映裂隙的水力特性。

Barton 等^[13-15]提出的 JRC 和 Mandelbrot^[16]提出的分数维 D 被大量应用在评价裂隙粗糙度的研究中。由于与裂隙的力学特征紧密联系,JRC 评价裂隙面粗糙度方法被国际岩石力学协会推荐使用。考虑到在工程实践中,裂隙的 JRC 值比裂隙的隙宽更容易获得可靠值,因此,基于 Barton 和 Choubey^[5]给出的 JRC 标准剖面轮廓曲线,本文建立了更加真实反映实际情况的十组不同 JRC 模型,运用仿真模拟计算了不同裂隙粗糙度 JRC 模型的渗流规律。

2 逆向数字化建模

2.1 JRC 标准轮廓曲线数字化

建立不同粗糙度裂隙的模型,是进行仿真模拟的基础和难点。建模的思路是根据 Barton 和 Choubey^[5]提出的 JRC 标准剖面轮廓曲线(图 1 所示),将其数字化后,利用逆向工程技术,按 1:1 的比例还原出 10 条不同 JRC 值单裂隙的模型。十条裂隙模型的尺寸为(裂隙长度为 100 mm,初始裂隙机械宽度为 1 mm)。如图 2 所示为数字化后的裂隙模型。在这里将模型假设成被拉伸的三维几何模型(图 3),拉伸的长度为 10 mm。

2.2 单裂隙模型网格的划分

有限元计算手段走向工程应用的桥梁是有限元网格的生成,研究有限元网格生成算法对计算几何和计算数学具有重要的理论价值。

基于裂隙模型结构的复杂性,其有限元网格的实现包括了模型区域分解和子域网格划分两个过程。利用波前法实现有限元网格的自动划分,图 4 所示为生成的裂隙有限元模型局部网格图。

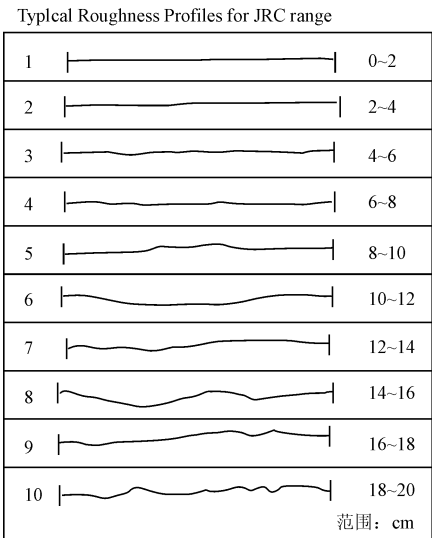


图 1 JRC 标准曲线图^[5]

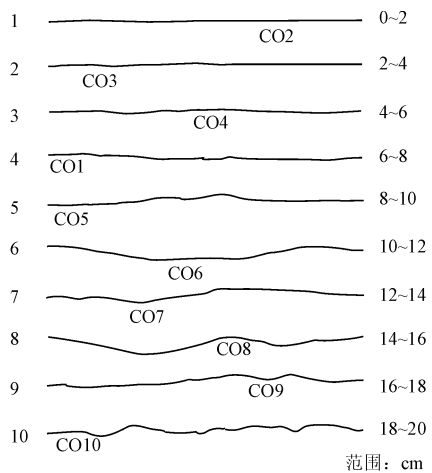


图 2 还原出的 10 条不同 JRC 曲线模型

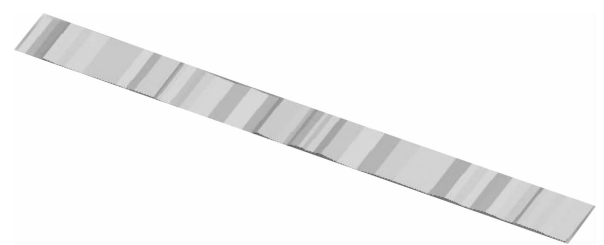


图 3 三维 CAD 实体模型

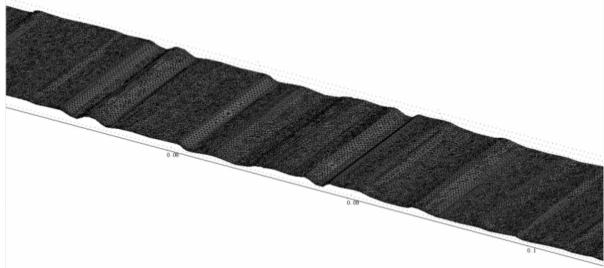


图 4 三维模型局部网格图

3 不同 JRC 值单裂隙中的渗流规律模拟

对粗糙、非平行、非平面的裂隙施加水力梯度后,将会产生三维的、非均衡的、弯曲的渗流场,还有可能导致不可忽略的惯性力,此时裂隙渗流可以用三维的 Navier – Stokes (NS) 方程来描述。裂隙中液体运动流体运动方程^[12],Navier – Stokes 方程:

∂u_i/∂t + (u_iu_j)_j = f_i - 1/ρ p_i + νu_{ij} (1)

式中:u_i 为流速;f_i 为单位质量力;ρ 为流体密度;p_i 为水压;ν 为液体运动粘滞系数。

假设在恒温条件符合层流、不可压缩流体粘性牛顿流体的稳态流动。对连续方程和动量方程进行求解得到压力场和速度场。模型中设定水的密度为 1 000 kg/m³、粘度为 0.001 kg/(m · s)、进口压力为 64 Pa,出口压力为 62 Pa。模拟求解的单条裂隙局部速度分布图(图 5)与压力场局部分布图(图 6)。

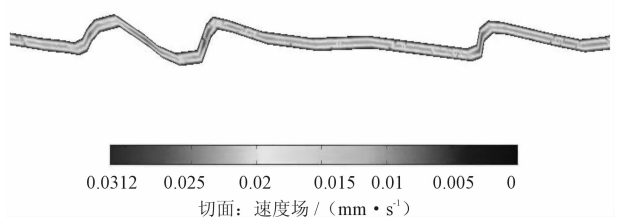


图 5 裂隙局部切面的速度场

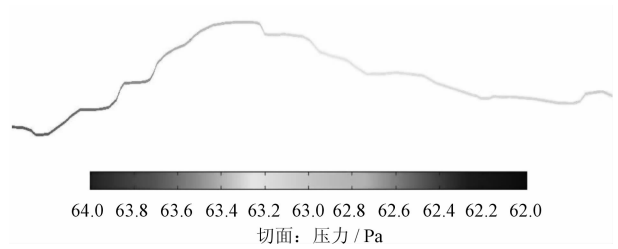


图 6 裂隙局部压力场

4 结果及讨论

4.1 粗糙系数 JRC 对流量的影响

通过对不同 JRC 裂隙模型进行计算求解,当压

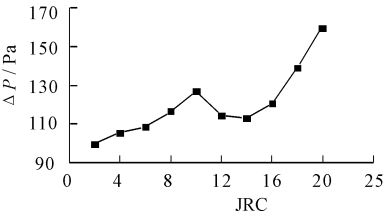


图 8 粗糙系数 JRC 与压差的关系曲线

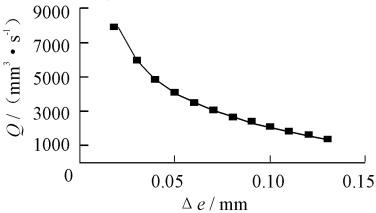


图 9 实验得出裂隙宽度闭合量与流量的关系曲线

差为一定值,裂隙宽度不变,得出粗糙系数 JRC 与流量的关系曲线,如图 7 所示随着裂隙表面粗糙系数增加裂隙中的流量逐渐减小,这种现象能够表现出当裂隙面的微凸体数量越多,减少了裂隙面的流通通道,导致流量降低。

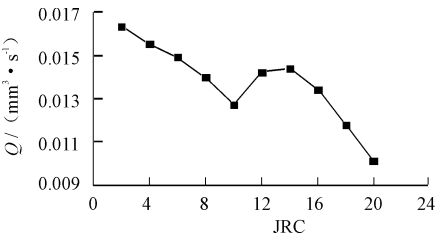


图 7 裂隙粗糙系数 JRC 与流量的关系曲线

4.2 粗糙系数 JRC 对压差的影响

将模型的进口速度设为 0.001 m/s,出口压力设定为零,裂隙宽度不变,对不同 JRC 裂隙模型进行更新求解,计算结果如图 8 所示,不同粗糙度的裂隙在进口速度恒定的情况下,得出不同的压力差。从图中能明显得出压差随着裂隙的粗糙系数的增加而逐渐变大。

4.3 裂隙宽度对渗流的影响

裂隙在正压应力作用下产生压缩,裂隙宽度^[17]减小。处于初始零应力状态的裂隙在压力作用下的最大闭合值称为最大机械隙宽(e_{max})。裂隙宽度是指裂隙的机械宽度(e_m),Δe 是裂隙宽度的闭合量。

张有天^[18]进行了单一裂隙水力学试验研究。试件是实际裂隙的复制件尺寸(26 cm × 24.5 cm × 10 cm)。将两个裂隙面合成裂隙时,不可能完全吻合,裂隙上下面之间产生相对较小的位错而形成变隙宽的裂隙。他们主要研究了正应力作用下裂隙位移以及各种正应力条件下裂隙水力学特性。图 9 为实验测得隙宽的闭合量与流量的关系曲线。

通过对不同裂隙宽度的裂隙模型进行更新求解计算,得出图 10 中隙宽的闭合量与流量的关系曲线。将模拟结果与实验结果相对比,两条曲线表现出明显的非线性特征,两条曲线趋势线相吻合,均符合对数关系。

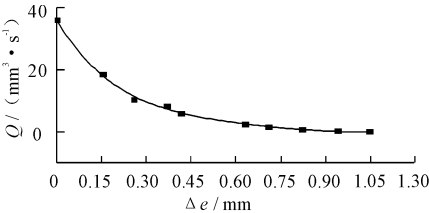


图 10 模拟计算裂隙宽度闭合量与流量的关系曲线

5 结 语

(1) 裂隙粗糙度对裂隙的渗流有较大的影响,作用在不同粗糙度裂隙两端的压力恒定时,随着节理粗糙度的增加裂隙内流体的流量逐渐减小;流入不同粗糙度裂隙单位体积流量恒定时,随着粗糙度的增加,作用在裂隙两端的压差逐渐增大。

(2) 裂隙机械宽度与流量之间的关系曲线表现出明显的非线性特征,模拟结果与实验得出的趋势线相吻合,均符合对数关系。

参考文献:

- [1] Lomize G M. Flow in fracture rock [M]. Moscow: Gesen-ergoizdat, 1951.
- [2] Romm E S. Flow Characteristics of fractured rocks [M]. Moscow: Nedra, 1966.
- [3] Louis C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses[R]. London: Imperial College, 1969.
- [4] Patir N, Cheng H S. An average flow model for determining effects of three - dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication [J]. Journal of Lubrication Technology, 1978, 100(1): 12 - 17.
- [5] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joint S in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1 - 2): 1 - 54.
- [6] Jiang Yujing, Li Bo, Tanabashi Y. Estimation the relation between surface roughness and mechanical properties rock joints [J]. International Journal of Rock Mechanics and

- Mining Sciences, 2006, 43(6): 837 - 846.
- [7] Hosseinian A. Analytical and numerical analysis of fluid flow through rough natural fracture profiles[C] // . 2010, SPE. ARMA218.
- [8] 贺玉龙, 陶玉敬, 杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(z1): 3235 - 3241.
- [9] 王 媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 83 - 87.
- [10] 蒋宇静, 李 博, 王 刚, 等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2377 - 2386.
- [11] 蔡金龙, 周志芳. 粗糙裂隙渗流研究综述[J]. 勘察科学技术, 2009, (4): 18 - 23.
- [12] 熊祥斌, 张楚汉, 王恩志. 岩石单裂隙稳态渗流研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1839 - 1847.
- [13] Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joints [J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287 - 332.
- [14] Barton N. Modeling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design[R]. Columbus, OH: Office of Nuclear Waste Isolation, 1982.
- [15] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in the organic practice [J]. Rock Mechanics, 1997, 10(1/2): 1 - 54.
- [16] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W. H. Freeman, 1983.
- [17] 王 媛, 连宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 61 - 68.
- [18] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

(上接第 40 页)

- [37] 王 琪, 史基安, 张中宁, 等. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 46 - 52.
- [38] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 67 - 74.
- [39] 关元秀, 刘高焕, 王劲峰. 基于 GIS 的黄河三角洲盐碱地改良分区[J]. 地理学报, 2001, 56(2): 198 - 205.
- [40] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 等. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1091 - 1097.
- [41] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation [J]. Ecological Applications, 2001, 11(4): 1046 - 1059.
- [42] Rossatto D R, Silva L C R, Villalobos - Vega R, et al. Depth of water uptake in woody plants relates to groundwa-

- ter level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77: 259 - 266.
- [43] Derek E, Ray F, Robyn L, et al. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain the health of groundwater - dependent vegetation [J]. Australian Journal of Botany, 2006, 54(2): 97 - 114.
- [44] 樊自立, 陈亚宁, 李和平, 等. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 1 - 5.
- [45] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 华北平原地下水生态环境水位研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003(3): 323 - 326 + 330.
- [46] 王水献, 吴 彬, 杨鹏年, 等. 焉耆盆地绿洲灌区生态安全下的地下水埋深合理界定[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 422 - 430.