

孔隙砂岩多次化学注浆试验研究

钱自卫, 曹丽文, 姜振泉, 孙 强

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 选取宁东地区典型的孔隙砂岩, 采用不同颜色示踪的化学浆液进行 4 次注浆试验; 揭示了浆液在孔隙中的扩散、充填规律及注浆次数与被注岩层渗透系数、孔隙率之间的关系。研究发现: 每次化学注浆浆液的充填情况有明显的差别, 首次注浆浆液在整个岩样均有较均匀的充填, 后续的各次注浆浆液均呈现部分区域积聚充填的现象; 随着注浆次数的增加岩样的渗透系数减小, 孔隙充填率增加, 渗透系数、孔隙充填率与注浆次数的关系可分别采用幂函数及对数函数拟合; 4 次注浆后岩样的渗透系数减小了 97%, 说明多次注浆起到了很好的减渗效果。依据试验成果, 建立数值计算模型, 预测了不同注浆次数、不同开挖条件下注浆孔及井筒的涌水量, 并与井筒实际涌水量进行对比, 发现两者数据较为吻合, 说明依据试验结果建立数值模型进行涌水量预测是可行的。

关 键 词: 孔隙砂岩; 多次化学注浆; 渗透系数; 数值模型; 涌水量

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Research on multiple chemical grouting experiment of porous sandstone

QIAN Zi-wei, CAO Li-wen, JIANG Zhen-quan, SUN Qiang

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: Four multiple grouting model tests have been finished with slurry tracked by different colors, by using typical porous sandstone selected in Ningdong. It reveals the law of diffusion and filling of slurry in pores, and the relationship between repetitions of grouting and permeability coefficient and porosity of the injected rock and soil mass. The studies found: the filling state of grout is obviously different from others in each single grouting of the multiple grouting test, the slurry of the first time grouting has more uniform filling in the entire profile, while the slurry shows accumulation of filling partly. In the experiment, the more the times of grouting is, the smaller the permeability coefficient of the model material and the greater the filling rate of pores will be. The relation between the permeability coefficient, filling rate of pores and number of repetitions of grouting can be fitted respectively by power function, and logarithmic function. The permeability coefficient of the model material is reduced by 97% after grouting for four times, which means that multiple grouting indeed has an influence on infiltration reduction. According to the test results, a numerical model is established to predict the water inflow of grouting holes and shaft with different grouting times and pore filling rate; and the water inflow of shaft is compared with the actual situation. The results are fairly consistent each other, showing that it is feasible to predict the water inflow by using numerical mode and basis of test results.

Key words: porous sandstone; multiple chemical grouting; permeability coefficient; numerical model; water inflow

1 引 言

在我国西北部广泛发育的弱胶结、强富水的孔隙性砂岩层已成为该地区矿井建设的制约因素^[1]。注浆法作为岩层防渗加固的一种重要方法, 已经开始在部分治理此类地层的矿井中使用。从该地区近期从事的几个注浆减渗工程实践中发现, 采用注浆

法治理孔隙性岩石的难度比较大, 主要存在岩层可注性差及注浆减渗幅度小两方面的问题。像普通的水泥浆液一般无法注入, 而化学浆液虽然其黏度较小, 但可注性依然较差, 即使注入, 减渗效果也达不到预期。在实践中往往要经过多次化学注浆才能控制井筒的渗漏, 像该地区的梅花井煤矿、文家坡煤矿、红四煤矿等都是经过多次注浆才达到验收标

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2013CB036000); 江苏省研究生培养创新工程资助项目(No. CXLX12_0963); 中国矿业大学大学生创新创业基金资助项目。

第一作者简介: 钱自卫, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事煤矿工程地质及灾害治理方面的研究工作。E-mail: 596406044@qq.com

准。

目前关于孔隙性砂岩多次注浆方面的研究较少, 而研究主要集中于单次注浆方面, 且偏重于松散介质。在多孔介质注浆理论研究方面的成果有马格理论(球形扩散理论)、柱形扩散理论、袖阀管理论; 试验研究方面, 杨峰^[2]、杨坪等^[3]、姚普^[4]、王档良^[5]、郭密文^[6]、张改玲^[7]、Tirupati^[8]、Bezuijen^[9]、Eisa^[10]等建立了不同模型材料、注浆材料、孔隙水压、注浆压力、监测手段的注浆模型试验, 研究了在不同试验条件下浆液的扩散、充填的机制、规律。

选取宁东地区典型的孔隙性砂岩为研究对象, 先进行室内化学注浆试验, 探讨其多次注浆的可能性, 揭示浆液在孔隙中扩散及充填规律、注浆次数与被注岩土体渗透系数、孔隙率之间的关系。并把

试验成果应用于工程实践, 指导现场注浆设计及施工。

2 室内注浆试验设计

2.1 注浆系统设计

试验系统如图1所示, 主要包括注浆系统、岩样装置系统及数据采集系统3个部分。注浆系统的核心装置是注浆泵, 本试验拟选用小流量高压恒泵量电动注浆泵; 岩样装置采用厚壁无缝钢管加工, 内径为17.85 cm, 装样长度为27.4 cm; 数据采集系统主要采集注浆过程的注浆泵量、注浆压力参数。在装置内壁加车螺纹, 以增加装置内壁与内装材料的有效接触, 减小边界影响。如此装置不但可用于注浆试验, 也可测量岩样渗透系数及孔隙率。

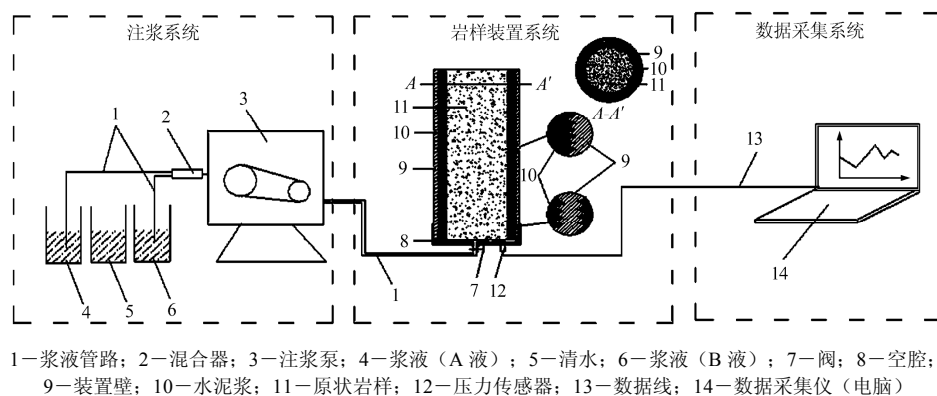


图1 试验系统设计示意图

Fig.1 Schematic of experimental system design

2.2 岩样制备及装配

试验选择岩样来自于宁东地区某煤矿进风立井609.5~625.0 m深度的粗粒砂岩层。该岩层呈灰黄-灰白色, 孔隙胶结, 块状、粗粒状结构, 局部含砾, 分选性较好, 磨圆度呈次棱角状, 该岩层孔隙性较强, 孔隙肉眼清晰可辨。直接选取该地层钻孔, 将岩芯加工成直径为100 mm, 长为274 mm试样。试验前测得试样单轴抗压强度 R 约为5.0 MPa, 孔隙率 n 为23.4%, 渗透系数 k 为0.35 m/d。

试样的装配方法是, 先把试样置于岩样装置中间, 然后在周围空间灌注黏稠的无收缩水泥浆液, 待浆液充分固化(7 d)后, 进行注浆试验, 装备示意图见图1(A-A'剖面), 如此装配可以有效防止边界条件的影响。

2.3 浆液选择及性能

试验选择中国矿业大学自主开发的ZK-III孔隙溶胶化学浆液^[11], 浆液使用时的反应为: (甲液+添加剂)+乙液→胶凝固结体。本试验选用2%乙液

的浆液, 起始黏稠度为12~15 mPa·s, 絮凝时间约为48 min。

采用染料对浆液进行染色, 保证每次注浆采用不同的颜色, 并且在试验前进行浆液性能测试, 防止染料对浆液性能产生较大的影响。试验前进行了几组浆液染色试验, 如图2所示, 浆液原色为白色, 被染成红色、灰色、蓝色, 被染色的浆液之间是完全可以区分的。

2.4 试验过程控制

注浆岩样安装完成且水泥浆液充分固结后进行试验。试验时先打开各阀, 从注浆管口对试样进行注水使其充分饱和, 然后从注浆口进行注浆, 试样顶面返浆时则停止注浆, 关闭各阀, 待浆液充分固化后进行渗透系数及孔隙率测试。测试完成后进行再次注浆, 再次注浆选择与上次注浆不同颜色的浆液, 采用相同的注浆泵流量进行。各次注浆均选用注浆泵量 $q = 3.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。本试验共完成了4次注浆试验, 测量每次注浆前后试样的渗透系数、孔隙率

的大小。



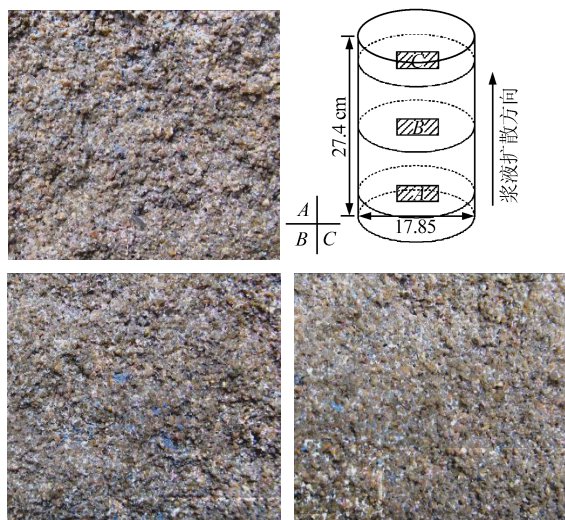
图2 浆液染色处理固化后
Fig.2 After curing of the stained slurry

3 试验结果及分析

3.1 浆液充填规律

3.1.1 宏观充填规律

图3为经过4次注浆后采集的岩样剖面数码照片,可见沿扩散方向浆液的孔隙充填率总体上呈减小趋势;每次注浆浆液的充填情况有明显的差别,首次注浆(白色浆液)在整个剖面上均有较均匀的充填,从第2次到第4次注浆(浆液从红色-灰色-蓝色)的浆液均呈现部分区域充填的现象,且充填的区域越来越小,特别是第4次注浆(蓝色浆液),浆液只充填了小部分区域。分析认为,首次注浆打破了岩样渗透的各项同性,导致后续注浆浆液呈现不均匀的扩散充填现象。



A—距离进浆面 4.5 cm 剖面; B—距离进浆面 13.5 cm 剖面;
C—距离进浆面 22.8 cm 剖面;

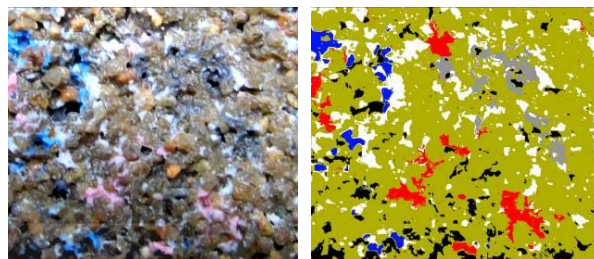
图3 注浆后岩样剖面数码照片

Fig.3 Profile digital photos of the model material after grouting

3.1.2 细观充填规律

图4为选取了典型的多次注浆浆液充填规律的细观照片,可见初次注浆(白色浆液)浆液扩散充

填较为均匀,而后续的第2(红色)、第3(灰色)、第4(蓝色)次复注,浆液均呈部分充填现象,且后续的注浆浆液基本未见相互充填关系,而是单次注浆浆液聚集现象,注浆后试样仍残留有孔隙。



(a) 原始图片 (b) 图像处理后的(黑色为孔隙)

图4 注浆后被注岩样典型剖面照片

Fig.4 Typical profile pictures of the injected model after grouting

3.2 渗透系数、孔隙充填率与注浆次数关系

在每次注浆结束后,分别测量岩样的平均渗透系数及孔隙率,得到了其与注浆次数之间的关系,如图5所示。可见整体上随着注浆次数的增加,岩样的渗透系数减小,孔隙充填率增加,但增加及减小的比率都逐渐放缓。岩样的渗透系数由原来的0.35 m/d,减小到0.01 m/d,减小比例达到了97%,说明多次注浆起到了减渗的效果。经过4次注浆后孔隙充填率达到51.7%,岩样的孔隙率由23.4%降为11.3%。渗透系数、孔隙充填率与注浆次数的关系分别可采用幂函数及对数函数拟合,相关系数都在98%以上。

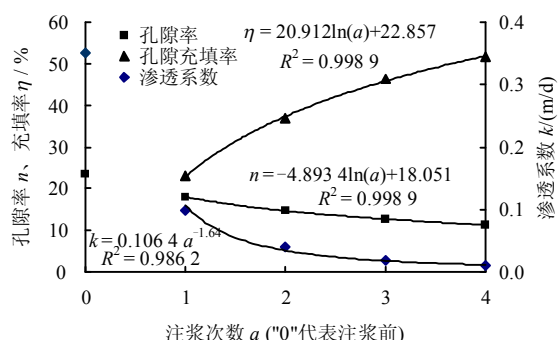


图5 孔隙率、孔隙充填率、渗透系数与注浆次数关系

Fig.5 Relationships between permeability porosity, pore-filling rate, permeability coefficient and grouting times

4 钻孔及井筒涌水量预测

4.1 模型建立

建立数值计算模型,依据达西定律,采用有限元方法预测各次注浆后注浆孔及井筒的涌水量。数值计算模型如图6所示,模型直径为100 m,厚度

为 15.5 m (预测底层厚度)。外围纵向边界施加 500 m 自然水位, 顶底面为不透水边界, 钻孔及井筒壁面为大气压力边界。

钻孔涌水量预测模型 (见图 6(a)) 中注浆孔径为 0.1 m, 浆液扩散半径预设 3.0 m。井筒涌水量预测模型中, 注浆帷幕范围采用预设的方法, 假设各注浆孔布孔于以井筒为中心的 15.0 m 直径的圆周上, 浆液扩散半径均为 3.0 m, 共布设 12 个注浆孔, 井筒开挖半径为 5.0 m, 则帷幕形状及厚度如图 6(b)、图 7(b) 所示。

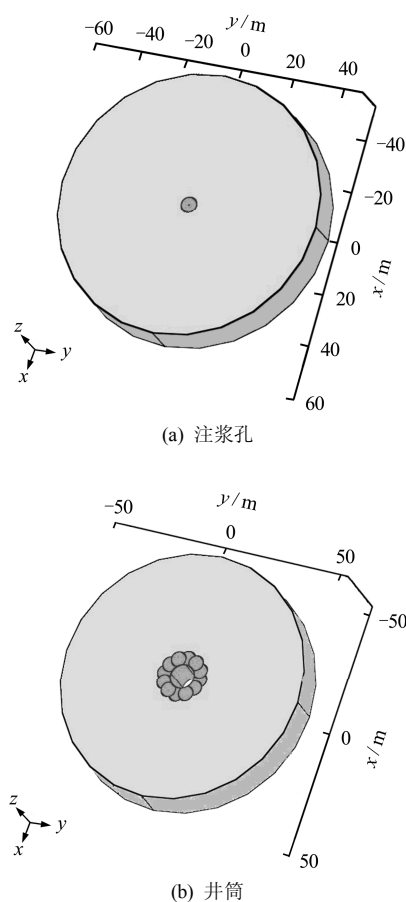


图 6 数值计算模型 (红色区域为浆液扩散范围)

Fig.6 Numerical models

在进行计算时, 浆液扩散范围内围岩分别采用各次注浆后的渗透系数 (见图 5), 然后计算涌水量。在进行井筒涌水量预测时, 分别计算了各次注浆后一次成井及分段凿井的涌水量。分段凿井计算时, 假设分段段高为 3.9 m, 如图 8 所示, 在进行下一段凿井施工前支护已开挖段, 支护厚度为 1.0 m, 假设支护混凝土井壁不渗水。

4.2 计算结果

第 4 次注浆后钻孔及井筒一次成型 (不支护) 时, 孔壁及井壁外围压力头分布如图 7 所示; 第 4

次注浆后分段开挖时, 井壁外围压力水头分布如图 8 所示; 各次注浆后注浆孔及井筒涌水量计算成果见图 9; 各次注浆后分段凿井井筒涌水量计算成果见图 10。通过计算可知 (见图 9), 经过几次的化学注浆, 注浆孔及井筒的涌水量均呈减小趋势, 注浆孔由注浆前 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 减小到 $4.28 \text{ m}^3/\text{h}$, 减小幅度达到 95%; 井筒由 $235.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 减小到 $26.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 减小幅度达到 89%。

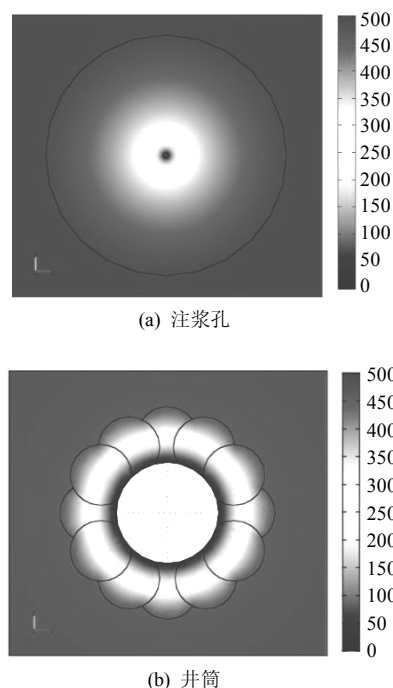


图 7 4 次注浆后一次成孔、成井压力水头分布云图 (单位: m)

Fig.7 Pressure head distribution nephograms of once-through drilling and once-through well drilling after four times grouting (unit: m)

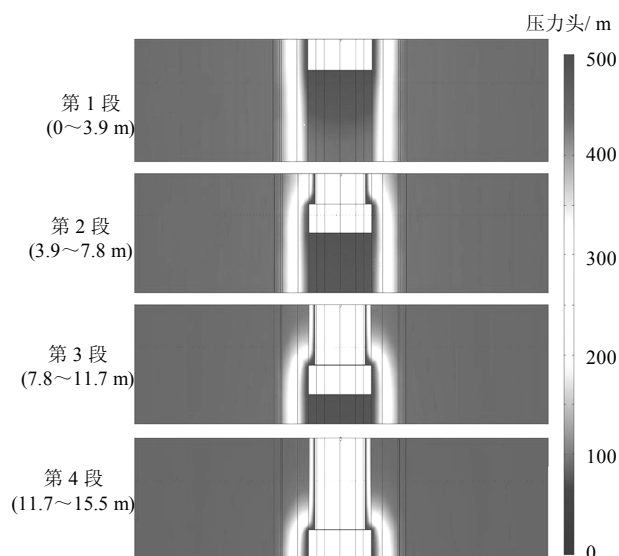


图 8 4 次注浆后分段凿井压力水头分布云图
Fig.8 Pressure head distribution nephograms of segmentation sinking after four times grouting

5 钻孔及井筒实际涌水情况

试验注浆孔位于井筒中央,垂直施工,穿过含水层,钻孔直径为 100 mm,一次成孔后注浆,共进行 4 次注浆。各次注浆前后钻孔涌水量如图 11(a)所示,实际涌水量由 75 m³/h 减小到 2.0 m³/h,

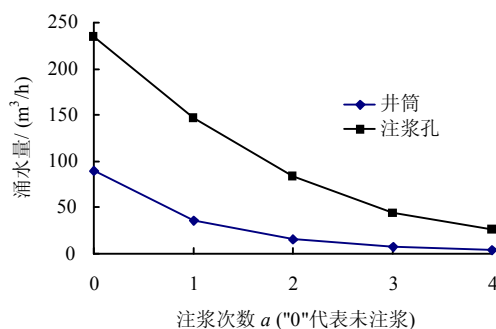


图 9 各次注浆后注浆孔涌水量
Fig.9 Water inflow of grouting hole after each grouting

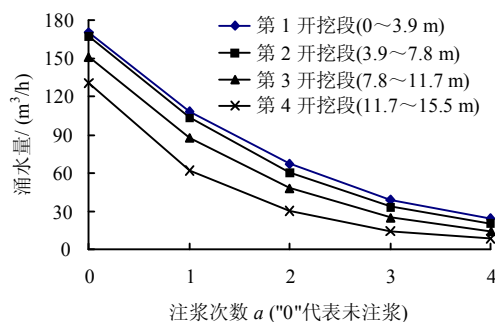


图 10 各次注浆后分段凿井井筒涌水量
Fig.10 Water inflow of segmentation sinking shaft after each grouting

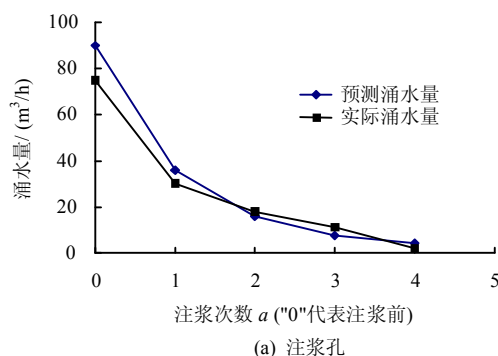
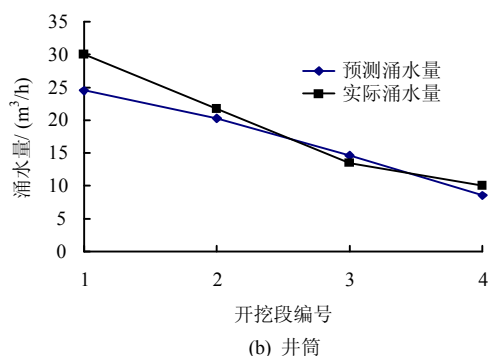


图 11 注浆孔及井筒预测涌水量及实际涌水量对比图

Fig.11 Comparisons of predicting and actual water inflow of grouting hole and shaft



6 结 论

(1) 原状孔隙砂岩进行多次化学注浆是可以实现的。单次化学注浆浆液的充填情况有明显的差别,首次注浆浆液在整个岩样均有较均匀的充填,后续的各次注浆浆液均呈现部分区域积聚充填的现象,注浆后岩样仍残留有大量的孔隙。

(2) 随着注浆次数的增加,岩样的渗透系数减小,孔隙充填率增加,渗透系数、孔隙充填率与注浆次数的关系分别可采用幂函数及对数函数拟合;4 次注浆后岩样的渗透系数由原来的 0.35 m/d,减小到 0.01 m/d,减渗率达到了 97%,说明多次注浆起到了较好的效果。

(3) 依据试验成果,建立数值计算模型,可以预计不同注浆次数、不同开挖条件下钻孔及井筒的涌水量;通过模型计算可知,如井筒采用一次全段

减小幅度达到 97%。实际注浆过程中采用与数值计算模型中类似注浆孔布置方式,第 4 次注浆后,分段凿井、支护,各段的涌水量如图 11(b)所示。通过对比分析可见,实际涌水量与预测涌水量较为接近,说明了试验结果的准确性及数值计算模型的合理性。

开挖成型,则不注浆及经过 4 次注浆后井筒的涌水量分别为 235.4、26.5 m³/h,减渗幅度达到 89%。

(4) 进行实际涌水量与预测涌水量的对比发现,两者数据较为吻合,验证了室内注浆试验结果的准确性及数值计算模型的合理性,说明依据试验结果及数值模型进行涌水量预测是可行的。

参 考 文 献

- [1] 钱自卫,姜振泉,曹丽文,等.弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J].岩土力学,2013,34(1):139-142.
QIAN Zi-wei, JIANG Zhen-quan, CAO Li-wen, et al. Experiment study of penetration grouting model for weakly cemented porous media[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 139-142.
- [2] 杨峰.砂砾石层灌浆试验研究及渗流计算分析[D].北京:中国水利水电科学研究院,2005.