

# 化学注浆条件下裂隙灰岩渗流特性的试验

马文豪,赵延林\*,唐利明,刘强,吴秋红

(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;  
湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为研究化学注浆条件下裂隙灰岩渗流特性,在MTS815多功能岩石试验机上进行裂隙灰岩和裂隙灰岩注浆体的瞬态渗流试验.对比试验结果发现注入化学浆液的裂隙灰岩渗透率明显比未注浆裂隙灰岩渗透率低,即裂隙灰岩注浆体的渗流时间更长.另一方面化学浆液配比也对渗流时间有一定的影响,进一步分析化学配比对裂隙灰岩注浆体的渗流特性的影响,发现主要体现在草酸含量上,注入浆液中的草酸含量越低,裂隙灰岩注浆体的渗透性越差.最后对注浆后 $M_1$ , $M_2$ , $M_3$ 试件中草酸含量和渗透率试验数据进行拟合,发现草酸含量-渗透率之间呈现指数函数关系.

**关键词:**裂隙灰岩;化学注浆;配比;草酸含量;渗透率

中图分类号:TD265 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2018)03-0001-07

## Experimental Study on Seepage Characteristics of Fractured Limestone under Chemical Grouting Condition

Ma wenhao, Zhao Yanlin, Tang Liming, Liu Qiang, Wu Qihong

(Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To study Seepage characteristics of fractured rock chemical grouting body, Transient penetration tests of fractured limestone and fractured limestone grouting bodies have been performed on the MTS 815 Multifunctional Rock Tester. Comparative test study found that the permeability of fractured limestone injected with chemical slurry was significantly lower than that of uninjected fractured, That is, the seepage time of fractured limestone grouting is longer. On the other hand, the ratio of chemical slurry also had a certain influence on the seepage time. The effect of chemical ratio on the seepage characteristics of fractured limestone grouting was further analyzed, Found mainly in oxalic acid content, The lower the content of oxalic acid injected into the slurry, The poor permeability of fractured limestone grouting bodies. Finally, the experimental data of oxalic acid content and permeability in  $M_1$ ,  $M_2$  and  $M_3$  specimens after grouting were fitted, Found that oxalic acid content-permeability showed an exponential function.

**Keywords:** fissured limestone; chemical grouting; matching ratio; oxalate content; permeability

近年来,随着地下岩体工程规模的扩展,水在裂隙岩体“渗、涌、突”<sup>[1]</sup>等问题越来越明显,岩体裂隙水稳定性问题已经是关系到诸如矿山工程等地下岩体工程能否长期安全运行的关键科学问题.在地下工程建设中,对于岩体裂隙水稳定性问题,常采用注浆的方法来实现涌水封堵和岩层加固<sup>[2-4]</sup>,以提高围岩隔水性能和

收稿日期:2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(517741316);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLCRSM16KF12);长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017508/KY)

\*通信作者,E-mail:yanlin\_8@163.com

承载能力,确保工程建设安全.早在 20 世纪 80 年代,P.D.Evdokimov 等<sup>[5]</sup>便研究了注浆对裂隙岩体剪切性能的影响规律.G.S.Littlejohn<sup>[6]</sup>运用图解的方法得出裂隙中浆液的渗透规律.同时国外学者也模拟了单裂隙中浆液流动实验,其通过不同模型进行裂隙注浆试验研究,得出了它们共有物理量之间的内在关系.国内目前已经对裂隙注浆基础理论进行大量研究,郝哲等<sup>[7]</sup>、罗平平<sup>[8]</sup>、许万忠<sup>[9]</sup>、阮文军<sup>[10]</sup>、杨米加<sup>[11]</sup>、谷拴成<sup>[12]</sup>、吴根水<sup>[13]</sup>等学者研究了裂隙注浆浆液扩散模型及煤岩破坏规律,动水条件下裂隙注浆也开展了大量研究:湛铠瑜<sup>[14]</sup>通过自主研发的裂隙动水注浆设备进行试验,获得渗流压力场的特点,张霄等<sup>[15,16]</sup>自主研发了可视化裂隙动水注浆模型试验平台,进行了裂隙岩体涌突水的注浆试验研究.刘健等<sup>[17]</sup>采用模拟和试验方法详细探究了裂隙中的水泥浆液在动静水条件下平面的扩散规律,刘人太<sup>[18]</sup>应用有限元计算软件建立了动水条件下裂隙注浆扩散的数值模型,并验证了模拟结果和试验结论进行的一致性.

以上研究成果都是基于浆液在裂隙中的扩散规律以及浆后效果检测为主的,少有涉及研究化学注浆条件下裂隙岩体封堵水流的本质影响因素,以及如何合理表征影响渗流时间效应延长的内因.本文为揭示改性脲醛树脂化学注浆材料的封堵水流性能的关键因素,进行裂隙灰岩的化学注浆体渗流试验研究.获得了裂隙灰岩注浆体的渗流规律,对工程实践有一定的指导意义.

## 1 岩石裂隙的制备

本文试验岩样为茅口灰岩,尺寸 50 mm×100 mm(直径×高度)如图 1.将灰岩试块置于 RYL-600 剪切流变仪上分别进行劈裂.试验先采用轴向加载系统用位移控制让轴向加载压头快接近铁板;然后,轴向加载系统换用力控制方式,为了防止瞬间脆性破坏,试验加载速率严格控制 10 N/s,试验中随时监测岩样裂纹产生程度,当出现宏观贯通裂隙时立即停止实验.加载过程见图 2a,劈裂后的岩石裂隙面依次记作  $M_1$ ,  $M_2$  和  $M_3$ ,见图 2b~图 2d,同时各裂隙面的尺寸也标注在上面.



图 1 灰岩试块

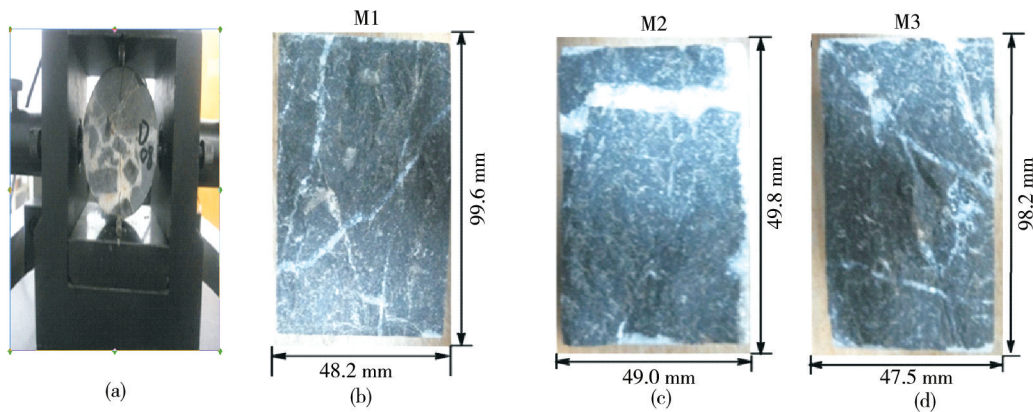


图 2 岩石裂隙劈裂

## 2 试验设备与原理

### 2.1 试验设备

试验采用由美国生产的 MTS815 多功能岩石试验机来完成,如图 3 所示.

### 2.2 渗流试验原理

采用 MTS815 多功能岩石试验机测定渗透率,通过记录渗流过程中水隙压力梯度随时间的变化值,计算出压力梯度的变化率,对压力梯度的变化率散点图进行拟合,从而得到裂隙灰岩的渗透规律.瞬态法的优点是采用此方法可在同批次岩样中得到不同的应力应变作用下岩石的渗透规律,而且试验时间比

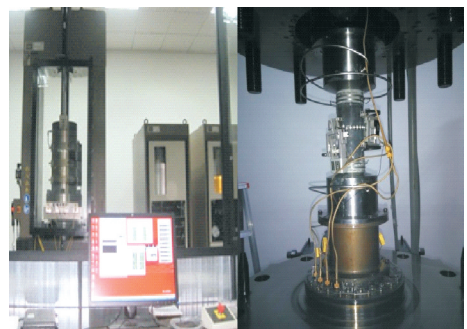


图 3 MTS815 多功能岩石试验系统

较短.图4为瞬态法测定岩石渗透率的试验原理流程图,MTS水压系统中两个稳压器水箱的体积设为 $B$ ,设灰岩岩样上端水压力为 $p_1$ ,下端的水压力为 $p_2$ ,灰岩截面积设为 $A$ ,高度设为 $H$ ,因为初始时刻作用于岩样两端面的水压力不同( $p_{10} > p_{20}$ ),即存在的水压力梯度为 $\xi_0 = \frac{p_{20} - p_{10}}{H}$ ,水箱1中的水会通过岩样缓慢渗入水箱2,使得水箱1中的水不断减少,水压不断降低,然而水箱2中的水不断增多,水压不断升高,最终2个水箱的水压相等成为平衡状态,设从水箱1渗入灰岩的水的流量为 $q$ ,假设通过灰岩的水为饱和孔隙水,则从灰岩进入水箱2中水的流量也为 $q$ ,则灰岩中孔隙水的渗流速度为 $v = \frac{q}{\rho A}$ .由流体的压缩性可以得

$$\frac{1}{c_f} = \rho \frac{dp_1}{d\rho}. \quad (1)$$

式中: $c_f$ 为压缩系数; $\rho$ 为密度.



图4 瞬态法试验原理

利用关系 $d\rho = \frac{-qdt}{B}$ 和 $q = \rho Av$ ,可得

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{Av}{c_f B}. \quad (2)$$

同理有

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{Av}{c_f B}. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以得到

$$\frac{d(p_2 - p_1)}{dt} = 2 \frac{Av}{c_f B}. \quad (4)$$

或

$$v = \frac{c_f B H}{2A} \frac{d\xi}{dt}. \quad (5)$$

式中: $\xi$ 为岩样的裂隙水压力梯度,即 $\xi = \frac{p_2 - p_1}{H}$ .

在达西流里压力梯度和渗流速度都符合 Darcy 定律,即

$$\xi = -\frac{u}{k_D}. \quad (6)$$

式中: $u$ 为渗透液体的动力粘度; $k_D$ 为岩样 Darcy 流的渗透率.将式(5)带入式(6)得

$$\frac{d\xi}{dt} = -2 \frac{A k_D}{c_f B H u} \xi. \quad (7)$$

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(7)积分,得到:

$$\ln \frac{\xi_0}{\xi_f} = 2 \frac{A k_D t_f}{c_f B H u}. \quad (8)$$

式(8)中,压力梯度 $\xi, \xi_0$ 均为负值,即 $\frac{\xi_0}{\xi}$ 为正值,故 $\ln \frac{\xi_0}{\xi}$ 有意义,由式(8)可以计算出岩样的渗透率.

$$k_D = \frac{c_f B H u}{2 t_f A} \ln \frac{\xi_0}{\xi} = \frac{c_f B H u}{2 t_f A} \ln \frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}} \quad (9)$$

式(9)是在 MTS815 多功能岩石力学实验室通过瞬态法测定的灰岩渗透率的计算公式.

### 3 试验步骤

1) 对未注浆的裂隙岩石试件  $M_1, M_2, M_3$  一一在 MTS815 进行渗流实验. 具体实验加载过程以试块  $M_1$  为例, 先加载围压至  $P_1$ , 再加载轴压至  $P_2$ , 最后加载水压至  $P_3$  ( $P_3 < P_1$ ), 突然增加试件上端的裂隙水压力至  $P_4$ , 使岩样两端形成裂隙水压差, 在试件两端形成  $\Delta P = P_4 - P_3$  渗透压差, 在裂隙水压差的作用下发生渗流. 在渗流过程中数据从水压至  $P_3$  时开始采集, 当裂隙水压差  $\Delta P$  等于零时结束采集. 在数据采集, 设置采集数据的频率是 2 Hz, 实时采集裂隙水压差随时间变化的裂隙水压差时间序列, 可以计算出该应力状态下的渗透率, 并绘制  $\Delta P-t$  曲线. 其中力的加载速率控制在 1 kN/s ( $P_1 = 7.5$  MPa,  $P_2 = 8$  MPa,  $P_3 = 2$  MPa,  $P_4 = 6$  MPa), 渗流试验流程见图 5 (具体的过程).

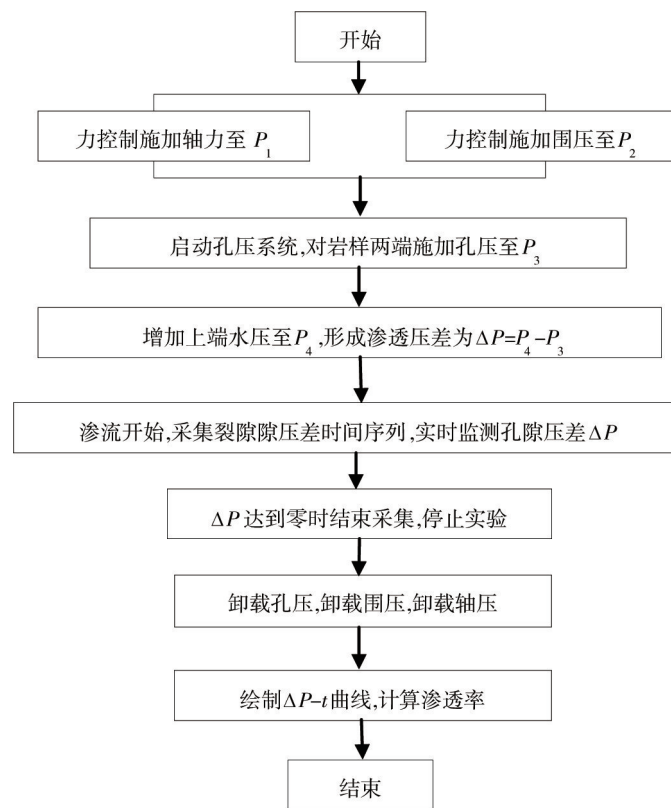


图 5 试验程序流程

2) 上述渗流试验完成后, 将其取出, 进行化学浆体充填岩石裂隙试验, 达到预定注浆时间后, 将其从容器中取出, 准备进行裂隙岩石注浆体的渗流试验.

3) 灰岩裂隙注浆体置于 MTS815 的三轴腔内重新进行渗流实验. 渗流试验完成后, 将其从三轴腔内取出, 将灰岩裂隙面上的浆液固化物去除, 重新按另一个配比进行调配浆液, 并进行再次注浆, 然后进行渗流试验. 共进行 8 组这样的试验.

### 4 结果分析

由于裂隙灰岩注浆体  $M_1, M_2, M_3$  试件做的渗流实验数据相似性较大, 为了有效分析灰岩裂隙注浆体

的渗流特性,选取具有代表性试件  $M_1$  试验数据进行分析,图6为不同浆液配比在轴压 7.5 MPa,围压 8 MPa,水压差 4 MPa 的水-力环境下水压差  $\Delta P$  与时间  $t$  关系曲线(注:图中标注的配比为改性脲醛树脂与草酸的质量比)。

#### 4.1 $\Delta P-t$ 关系曲线分析

从图6可以看出未注浆裂隙灰岩水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线从开始渗流实验到实验  $t_1$  ( $t_1 = 2.5 \times 10^2$  s) 这段时间里近似呈直线下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间保持不变.而从  $t_1$  到  $t_2$  ( $t_2 = 7.5 \times 10^2$  s) 这段时间水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线呈曲线下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间增加而减小.

最后水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线从  $t_2$  到实验结束呈曲线缓慢下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间增加而保持不变.而注过浆的裂隙灰岩水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线从开始渗流实验到实验  $t_3$  ( $t_3 = 5 \times 10^2$  s) 这段时间里近似呈直线下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间保持不变.而从  $t_3$  到  $t_4$  ( $t_4 = 7.5 \times 10^2$  s) 这段时间水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线呈曲线下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间增加而减小.而从  $t_4$  到  $t_5$  ( $t_5 = 7.5 \times 10^2$  s) 这段时间水压差  $\Delta P-t$  时间关系曲线呈曲线缓慢下降,其水压差  $\Delta P$  下降速率随时间增加而不变.从而在图6中可以明显得出注浆后裂隙灰岩相比未注浆裂隙灰岩花费渗流时间更长,其封堵水流能力明显得到提升.而不同浆液配比的注浆后裂隙灰岩在一定程度上其封堵水流能力也是不同的.

#### 4.2 化学比对裂隙灰岩注浆体的渗流特性的影响

试验中记录了不同配比下灰岩试块  $M_1$  注浆前后的渗流时间,制成表1.从表1中可看出,当草酸含量介于 10%~30%时,同等条件下随着草酸含量的减少,注浆体灰岩试块堵水时间增长,即草酸含量越低,注浆堵水效果越好.配合比介于 2 : 1~9 : 1 的化学浆液注浆后的裂隙岩石注浆体的渗流时间为注浆前的 1.5~2.1 倍.从表1中可以发现裂隙岩石注浆体的渗透性明显比未注浆时要低,化学比对裂隙岩石注浆体的渗流特性的影响主要体现在草酸含量上,即,草酸含量越低则裂隙岩石注浆体的渗透性愈差.

表1 不同配比下砂岩试块  $M_1$  注浆前后的渗透时间

$10^3$  s

| 配比    | 2 : 1 | 3 : 1 | 4 : 1 | 5 : 1 | 6 : 1 | 7 : 1 | 8 : 1 | 9 : 1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 注浆前时间 | 2.15  | 2.15  | 2.15  | 2.15  | 2.15  | 2.15  | 2.15  | 2.15  |
| 注浆后时间 | 3.20  | 3.50  | 3.70  | 3.75  | 3.90  | 4.20  | 4.30  | 4.40  |

为进一步研究草酸含量对岩石裂隙注浆体的渗透性的影响,通过式(9)计算出  $M_1, M_2, M_3$  在不同配合比下轴压 7.5 MPa,围压 8 MPa,水压差 4 MPa 的水力环境下的渗透率.如表2.

表2 渗透率数据

$10^{-21} \text{ m}^2$

| 配比    | $M_1$  | $M_2$  | $M_3$  |
|-------|--------|--------|--------|
| 2 : 1 | 11.020 | 10.210 | 13.280 |
| 3 : 1 | 10.270 | 9.841  | 12.610 |
| 4 : 1 | 9.340  | 8.842  | 11.880 |
| 5 : 1 | 8.762  | 8.040  | 11.240 |
| 6 : 1 | 8.432  | 7.676  | 10.690 |
| 7 : 1 | 8.014  | 7.429  | 10.140 |
| 8 : 1 | 7.881  | 6.791  | 9.533  |
| 9 : 1 | 7.299  | 6.180  | 9.038  |

根据表1中的数据,分别将试件  $M_1, M_2, M_3$  在不同配合比下注浆后的渗透率进行数据拟合见图7~

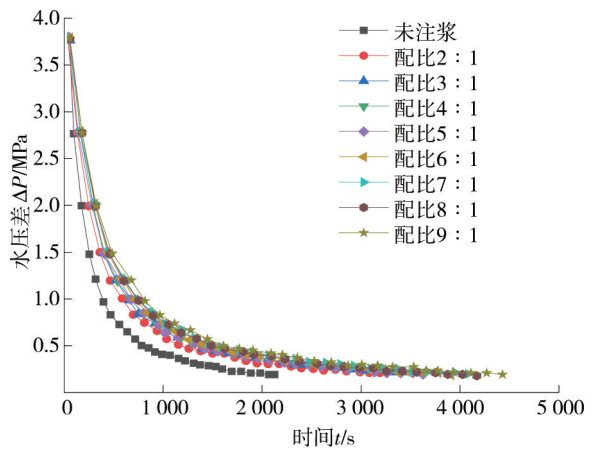
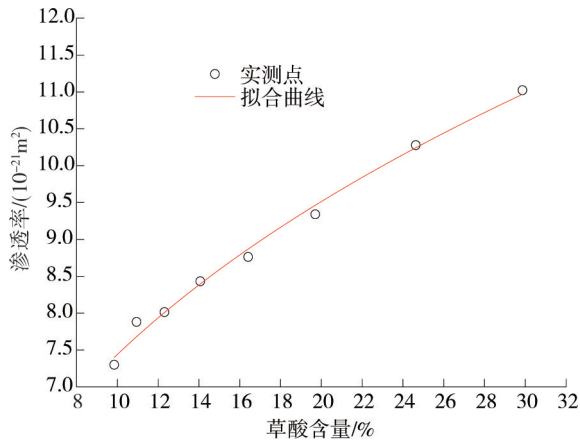
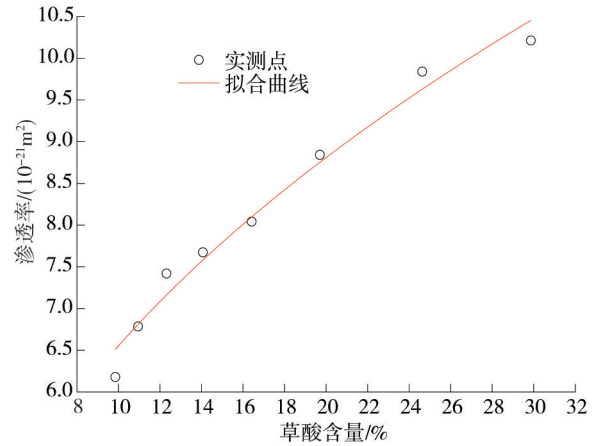
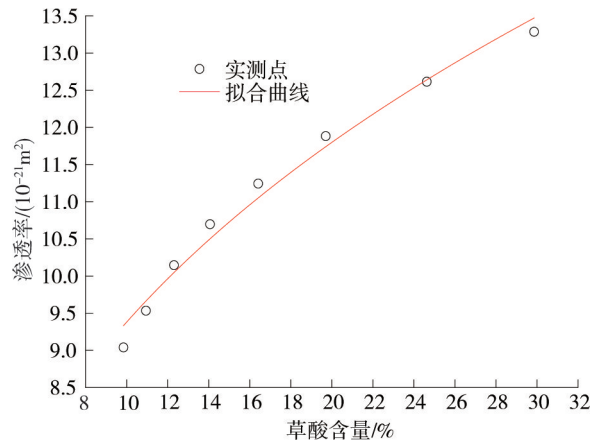


图6  $M_1$  注浆前、后的  $\Delta P-t$  对比曲线

图9.

图7 M<sub>1</sub>在不同配比注浆后渗透曲线拟合图8 M<sub>2</sub>在不同配比注浆后渗透曲线拟合图9 M<sub>3</sub>在不同配比注浆后的渗透率拟合

试件 M<sub>1</sub> 的草酸含量-渗透率拟合函数为

$$k = 3.286 \times 10^{-21} c^{0.355}. \quad (10)$$

式中:  $k$  为渗透率;  $c$  为草酸含量.

试件 M<sub>2</sub> 的草酸含量-渗透率拟合函数为

$$k = 4.377 \times 10^{-21} c^{0.331}. \quad (11)$$

试件 M<sub>3</sub> 的草酸含量-渗透率拟合函数为

$$k = 2.453 \times 10^{-21} c^{0.427}. \quad (12)$$

## 5 结论

1) 在同等压力条件下的渗透压趋于稳定时,裂隙灰岩注浆体比裂隙灰岩渗流时间更长.注浆后的裂隙灰岩的渗透性明显比未注浆时要低,即裂隙灰岩注浆体的渗透率更小.

2) 化学配比对裂隙岩石注浆体的渗流特性的影响主要体现在草酸含量上,当草酸含量介于化学浆液 10%~30% 含量时,同等条件下随着草酸含量的减少,渗流时间增长.即草酸含量越低,注浆堵水效果越好.

3) 为进一步研究草酸含量对岩石裂隙注浆体的渗透性的影响,将试件 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> 在不同配合比下注浆后的渗透率进行数据拟合,得出同一量级的指数拟合函数,证明草酸含量-渗透率之间的关系呈现指数函数形式.

## 参考文献:

- [1] 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 & Mining Sciences, 2017, 91:139-154.
- [2] 张民庆,张文强,孙国庆.注浆效果检查评定技术与应用实例[J].岩石力学与工程学报,2006,25(s2):3909-3918.
- [3] 薛翊国,李术才,苏茂鑫,等.青岛胶州湾海底隧道涌水断层注浆效果综合检验方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1382-1388.
- [4] 曹胜根,刘长友.高档工作面断层破碎带顶板注浆加固技术[J].煤炭学报,2004,29(5):545-549.
- [5] Evdokimov P D, Adamovich A N, Fradkin L P, et al. Shear strengths of fissures in ledge rock before and after grouting [J]. Hydrotechnical Construction, 1970, 4(3):229-233.
- [6] Littlejohn G S. Chemical grouting [J]. Grouting Engineering, 1985(4):10-12.
- [7] 郝哲,王介强,何修仁.岩体裂隙注浆的计算机模拟研究[J].岩土工程学报,1999,21(6):727-730.
- [8] 罗平平,朱岳明,赵咏梅,等.岩体灌浆的数值模拟[J].岩土工程学报,2005,27(8):918-921.
- [9] 许万忠,潘进兵,周治平,等.节理裂隙岩体注浆渗透模型分析[J].中国铁道科学,2010,31(3):47-51.
- [10] 阮文军.基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15):2709-2714.
- [11] 杨米加,贺永年,陈明雄.裂隙岩体网络注浆渗流规律[J].水利学报,2001(7):41-46.
- [12] 谷拴成,苏培莉,王建文,等.烧变岩体特性及其注浆扩散行为研究[J].岩土力学,2009,30(s2):60-63.
- [13] 吴根水,余伟健,王平,等.基于逾渗机理的含瓦斯煤体变形破坏机制及试验研究[J].煤炭学报,2018,43(3):724-734.
- [14] 湛铠瑜,隋旺华.动水条件下单裂隙注浆模型试验系统设计[J].实验室研究与探索,2011(10):19-23.
- [15] 张霄.地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机制研究及应用[D].济南:山东大学,2011.
- [16] 李术才,张霄,张庆松,等.地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2377-2396.
- [17] 刘健,刘人太,张霄,等.水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2445-2452.
- [18] 刘人太,张连震,张庆松,等.速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s1):3297-3306.