

大理岩裂隙渗流的时间效应试验研究^{*}

王辰霖¹, 郭保华^{1, 2}

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2.煤炭安全生产
河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘 要:应用自行研制的辐射型渗流试验装置对含单个张裂隙粗晶大理岩进行不同法向应力作用下的渗流试验, 分析法向蠕变对渗流特征与法向应力和水头大小关系的影响。结果表明: 在恒定法向应力作用下, 裂隙蠕变闭合量与时间呈对数函数关系, 随时间增加而增大, 呈现出明显的初始蠕变阶段特征; 降水头阶段和升水头阶段渗流量均与水头差呈线性关系, 岩石裂隙法向蠕变导致恒定法向应力下岩石裂隙渗流能力随时间增加而降低, 降水头阶段与升水头阶段相同水头差处流量差值随水头差的增加而增大; 在相同水头差作用下, 降水头阶段和升水头阶段渗流量均与法向应力呈负指数函数关系, 降水头阶段与升水头阶段相同法向应力处渗流量差值随法向应力增加而降低, 其原因为裂隙蠕变闭合量与法向应力呈正线性关系。研究结果对岩体裂隙渗流工程实践具有一定参考意义。

关键词:岩石力学; 辐射流; 张裂隙; 水头差; 法向应力

中图分类号: TD315

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1498-07

Experimental Study on Time Effect of Seepage Properties of Marble Fracture

Wang Chenlin¹, Guo Baohua^{1, 2}

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China;
2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China)

Abstract: Single fracture seepage tests under different normal stress were conducted by self-developed radial flow device for coarse-grained marbles with single tensile fracture, and the effect of the normal creep of rock joint on relationships between flow rate and normal stress, inlet water head were analyzed respectively. The results show that the fracture creep closure showing the characteristics of initial creep stage obviously increases and has an logarithmic relation with time under a constant normal stress; there is a positive linear relationship between flow rate and head difference in either head-decreasing stage or head-increasing stage; the normal creep of rock fracture led to conductive capacity of rock fracture decreasing with the increase of time under the constant normal stress, therefore, the flow rate difference between head-decreasing stage and head-increasing stage under the same water head increases with head difference; flow rate of fracture follows a negative exponential function with the normal stress in the head-decreasing stage and head-increasing stage under the same head difference; the flow rate difference between the head-decreasing stage and head-increasing stage under the same normal stress decreases with the normal stress, the reason is that fracture creep closure has a positive linear relationship with normal stress. The research results have some referencing value for the engineering application in rock fracture seepage.

Keywords: rock mechanics; radial flow; tensile fracture; head difference; normal stress

^{*} 收稿日期: 2018-06-03 (修改稿)

作者简介: 王辰霖 (1988-), 男, 河南鹤壁人, 博士生, 主要从事矿山岩体力学方面的研究。E-mail: wag_cheli@126.com

通讯作者: 郭保华 (1979-), 男, 河南淮阳县人, 博士, 副教授, 主要从事矿山岩体力学方面的教学与研究工作。

E-mail: guobaohua@139.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51109076); 河南省重点科技攻关项目 (152102210316)

0 引言

岩体中存在天然裂隙,当这些裂隙受到动水压力后,裂隙闭合量和渗流量会发生变化。大量工程建设都与裂隙岩体渗流密切相关,如水电大坝、矿井开采、岩石边坡等。进行渗流-应力耦合分析,得到岩体渗流规律与地应力及水头分布关系,对进一步提高裂隙岩体工程的安全可靠具有重要意义。近半个世纪以来,该课题得到了大量研究。

应用流体力学基本原理,基于裂隙水流运动规律推导出平行板裂隙光滑平行板流量公式即立方定律如下:

$$Q = C\Delta H b^3 \quad (1)$$

式中: Q 为流量; C 为常数,对于辐向流, $C = \frac{\pi g}{6\nu \ln(R/r_0)}$; ΔH 为通过裂隙面的水头差; R 为外边界半径; r_0 为内边界半径; ν 为运动粘滞系数; g 为重力加速度; b 为隙宽。实际上,天然裂隙都是粗糙不平的,对于粗糙裂隙,用等效水力隙宽 b_e 代替隙宽 b 。由公式(1)可知,裂隙渗流量主要与隙宽和水头差有关。隙宽主要受载荷大小影响,水头差则通过调节进口水头改变。

在岩石裂隙渗流量与法向应力关系研究方面, Louis^[1]进行了法向应力与渗流耦合试验,认为法向应力与渗透系数之间存在指数函数关系。Kranz等^[2]通过 Barre 花岗岩节理渗流试验,发现水流流速与有效应力呈负幂函数关系。Gale^[3]通过天然花岗岩裂隙渗流试验,发现裂隙水力传导系数与法向应力同样为负幂函数关系。刘继山^[4]根据结构面闭合法则,通过单裂隙岩石受正应力作用的渗流试验,发现渗流量与正应力呈负幂函数关系。李广平等^[5]根据 Sundaram 等人的试验结果建立了单裂隙岩石单位水头流量与法向应力呈负幂函数关系。沈洪俊等^[6]采用由两块圆形大理石板形成的单条圆盘形裂隙辐向流试验,发现在较低应力与较高应力下,单位水头流量均与法向应力呈负指数函数关系。速宝玉等^[7]采用砗块构造人工缝隙进行渗流试验,以研究贯通缝隙的渗流-应力耦合规律,发现单位水头流量随法向应力增加而降低。王媛^[8]综述了单裂隙渗流与应力耦合特性,认为裂隙面法向应力增大会使裂隙渗透性降低。薛变鸾等^[9]建立了渗流与法向应力耦合分析的复合单元模型,认为

法向应力变化导致裂隙面开度变化,从而引起裂隙导水系数变化。贺玉龙等^[10]通过进行不同粗糙度单裂隙渗流试验研究,认为渗透率随有效应力增加呈负指数减小。郭保华等^[11]试验研究了岩石张裂隙在法向闭合过程中的渗流分段特性及加载历史影响,认为渗流量与法向应力呈负指数函数关系。上述研究成果表明,裂隙渗流量随法向应力增加而降低,法向应力通过减小隙宽降低裂隙渗流量。

在岩石裂隙渗流量与水头差关系研究方面,许光祥等^[12]进行了5种裂隙形貌、5种隙宽及5级水力比降共125组裂隙渗流试验,发现单宽流量 q 与水力比降 J 呈幂指数关系,单宽流量 q 随水力比降增加而增大。沈洪俊等^[6]通过对4种不同隙宽岩石裂隙进行渗流试验发现渗流量与水头差线性相关,渗流量随水头差增加而增大。郑少河等^[13]对加工成 100 mm×100 mm×200 mm 的长方体单一贯穿裂隙试件进行三轴渗流试验,发现渗透系数与水压呈指数函数关系。徐礼华等^[14]通过进行岩石裂隙剪切渗流试验研究,认为裂隙水压力对裂隙渗透系数影响显著,裂隙水压力越大,渗透系数越大。尹立明等^[15]通过对6组人造节理试件进行恒定法向载荷和恒定法向刚度下的压剪渗流试验,发现透过率随渗透水压增大而增大。杨金宝等^[16]通过开展不同围压加卸载和不同水力梯度作用下的单裂隙花岗岩渗透试验,发现渗流量与渗透压差大致呈线性关系。刘杰等^[17]通过无充填砂岩劈裂裂隙渗流试验,发现恒定围压作用下渗流量与渗透压之间呈线性递增关系。于洪丹等^[18]对含裂隙砂岩和粉砂岩加载及卸载作用下的渗流特性进行试验研究,发现恒定围压下流量与水压呈正线性关系。赵志宏等^[19]基于离散裂隙网络模型,应用离散元方法模拟应力-渗流耦合过程,发现裂隙网络中宏观水头梯度较大时,裂隙中水流速度相对较快。

裂隙渗流量与法向应力及裂隙进出口水头差关系均受到法向应力作用时间影响,然而上述渗流试验未考虑试验过程中裂隙法向蠕变影响。本文拟通过大理岩裂隙辐射流试验,研究裂隙短期法向蠕变对渗流量与法向应力和水头差关系的影响。

1 单裂隙渗流试验

1.1 试件制作

试验采用南阳白色粗晶大理岩,制作成6个

$\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试样,然后沿圆柱试样轴线钻取长度为 60 mm ,直径为 6 mm 的盲孔,再用自制劈裂装置(图 1)在试样长轴中点处垂直轴线劈裂,如图 2 所示。劈裂装置由两个相同的含有圆柱形槽的铁板组成,在每一个圆柱形槽的中点位置设置一条垂直于轴线的矩形槽,矩形槽内放置一条三角形断面的钢条。当劈裂装置包裹试样后,上下两条钢条夹持试样侧面形成的集中线载荷劈裂试样形成张拉裂隙。试验所用大理岩试样弹性模量为 51.95 GPa ,单轴抗压强度为 53.92 MPa 。

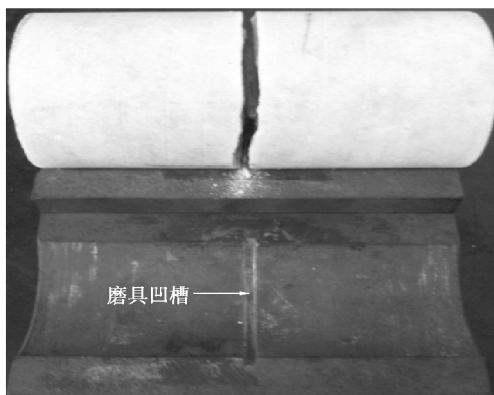


图 1 自制劈裂装置

Fig.1 Self-made split tool

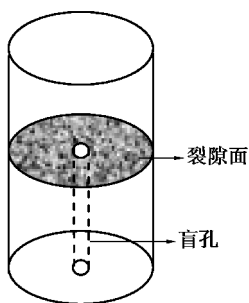


图 2 单裂隙岩石试件示意图

Fig.2 Sketch of single-fractured rock specimen

1.2 试验装置

岩石裂隙渗流试验在自行研制的辐射型渗流试验装置^[20]上进行,包括供水系统、加载-渗流-测量系统、集水系统三部分。供水系统中,水头通过调节供水管路中供水水箱高度提供;加载-渗流-测量系统中,法向加载由 UCT-2 型蠕变试验装置提供,由油泵压力计算得到法向应力,岩石裂隙法向变形用 3 个千分表测量。集水系统主要包括集水热缩管、排水管、集水瓶和天平,水流通过试件底部盲孔进入裂隙面,通过裂隙面流出。试验时,将试件放入已连接排水管的熱缩管内,用硅胶密封热缩

管上下端部,并将高弹性橡皮筋固定热缩管上下端部,再用管卡固定上下端部,防止水从热缩管的上下端部渗出;然后将上述试件放置于高刚度圆盘和底部供水压头之间,将 3 个固定杆件等间距固定在上圆盘,3 个千分表分别固定在 3 个杆件上,千分表的测头沿垂直方向顶在大理岩试件下端部的夹持装置上,千分表读数变化可以反映两圆盘间位移变化,裂隙法向闭合按照 3 个千分表读数变化平均值减去完整试样弹性变形量计算。

1.3 试验过程

先将试件固定在上部圆盘和下部供水压头之间,施加 1 MPa 法向应力。确定测量系统、集水系统准备完好后,记录 3 个千分表读数。然后,调节进口水头为 0.22 MPa ,打开入水开关,由集水系统记录裂隙渗流量,每级法向载荷和水头下渗流时间为 $3 \sim 4 \text{ min}$ 。在法向应力保持为 1 MPa 的情况下,每隔 0.05 MPa 逐级降低进口水头,直至水头为 0.07 MPa ;之后,再按照 0.05 MPa 间隔逐级增加进口水头,直到 0.22 MPa ,每次改变水头均记录渗流量和 3 个千分表数值。法向应力为 1 MPa 时的渗流试验完成后,按照 1 MPa 间隔逐级增加法向应力,直到法向应力达到 6 MPa 。在每级法向应力下,进口水头改变方式与法向应力为 1 MPa 时相同。在改变法向应力及进口水头时,均记录 3 个千分表读数和渗流量。

2 试验结果分析

2.1 裂隙蠕变闭合量与时间关系

恒定法向应力作用下,降水头阶段(即进口水头从 0.22 MPa 降到 0.07 MPa)与升水头阶段(即进口水头从 0.07 MPa 升到 0.22 MPa)累计裂隙蠕变闭合量 Δb 与试验时间间隔 t 的关系如图 3 所示,累计裂隙蠕变闭合量 Δb 随时间增加而增大,累计裂隙蠕变闭合量 Δb 变化速率随时间增加逐渐减小,曲线呈现下凹型,说明存在明显初始蠕变阶段特征,累计裂隙蠕变闭合量与时间存在对数函数关系,如下式所示:

$$\Delta b = p_1 \ln(t + p_2) + p_3 \quad (2)$$

式中: p_1 、 p_2 和 p_3 为拟合参数。拟合参数值及相关系数 R^2 如表 1 所示,从表 1 中可以看出,拟合相关系数均在 0.99 以上。恒定法向应力作用下,岩石裂隙蠕变闭合量随时间增加而增大,岩石裂隙

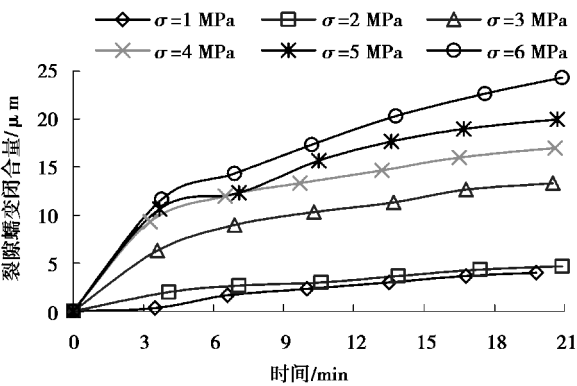


图 3 裂隙蠕变闭合量与时间的关系
Fig.3 The relationship between fracture creep closure and time

宽则随时间增加而减小。因此,相同法向应力下,裂隙渗流会随时间增加而降低。

表 1 式(2)拟合参数值及相关系数 R^2

Table 1 Regression parameters and correlation coefficients R^2 of Equation (2)

载荷/MPa	P_1	P_2	P_3	R^2
1	2.10	-1.35E-14	-2.34	0.99
2	2.39	3.69	-3.09	0.99
3	4.59	1.19	-0.81	0.99
4	4.43	0.47	3.33	0.99
5	6.73	1.17	-0.69	0.99
6	9.43	1.80	-5.47	0.99

2.2 裂隙蠕变闭合量与法向应力关系

图 4 为恒定法向应力作用下,水头差相同时升水头阶段与降水头阶段裂隙闭合量差值与法向应力的关系。从图 4 可看出,水头差相同时,裂隙蠕变闭合量 Δb_c 随法向应力增加而增大,且与法向应力呈线性相关,其表达式如下:

$$\Delta b_c = g\sigma + h \tag{3}$$

式中: g 和 h 为拟合参数,拟合参数值及相关系数 R^2 见表 2,拟合相关系数均在 0.93 以上;当水头差为 0.22 MPa 时,裂隙蠕变时间最长,约为 21 min,裂隙蠕变闭合量最大;当水头差为 0.17 MPa 时,裂隙蠕变时间约为 14 min;当水头差为 0.12 MPa 时,裂隙蠕变时间仅约为 7 min。各法向应力下,各水头差间隔时间不同,蠕变闭合量也随蠕变时间增加

而增大。各水头下裂隙蠕变闭合量与法向应力拟合直线斜率随水头差降低而降低,主要与水头差较低时蠕变时间较短有关。

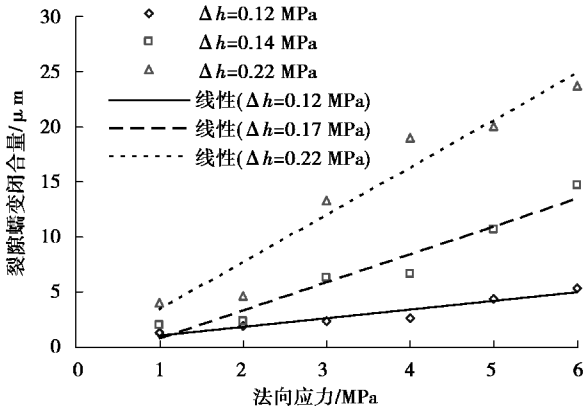


图 4 裂隙蠕变闭合量与法向应力关系

Fig.4 The relationship between fracture creep closure and normal stress

表 2 式(3)拟合参数值及相关系数 R^2

Table 2 Regression parameters and correlation coefficients R^2 of Equation (3)

水头差/MPa	g	h	R^2
0.12	0.79	0.22	0.93
0.17	2.53	-1.73	0.94
0.22	4.28	-0.89	0.94

2.3 流量与水头差关系

在恒定法向应力作用下,流量与水头差关系如图 5 所示,降水头阶段和升水头阶段渗流量 Q 均与水头差 ΔH 呈正线性相关,随水头差增加而增大,可用式(4)表示:

$$Q = k\Delta H + b \tag{4}$$

式中: k 为拟合直线斜率; b 为拟合直线截距,拟合参数值及相关系数 R^2 见表 3。从表 3 中可以看出相关系数 R^2 均在 0.97 以上,相关性较好。当法向应力为 1 MPa 时,降水头阶段与升水头阶段渗流量与水头差拟合直线斜率最大,裂隙渗流量速率最大。随法向应力逐级增大,降水头阶段与升水头阶段渗流量与水头差拟合直线斜率逐渐降低而且两条拟合直线越来越接近,说明裂隙渗流量变化速率逐渐减小且两阶段相同水头差处渗流量差值逐渐降低。图 5 也可以说明,当水头差一定时,裂隙渗流量并不是常数,而是随渗流时间的增加而降低,

所以,恒定法向应力作用下岩石裂隙渗流量并不与水头差呈一一对应的关系,建立裂隙渗流量与裂隙隙宽的量化关系才更有使用价值。

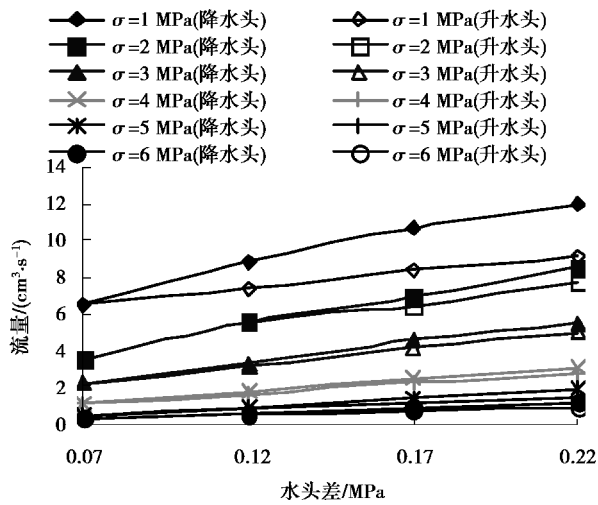


图 5 流量与水头差关系

Fig.5 Relationship between flow rate and head difference

表 3 式(4)拟合参数值及相关系数 R^2

Table 3 Regression parameters and correlation coefficients R^2 of Equation (4)

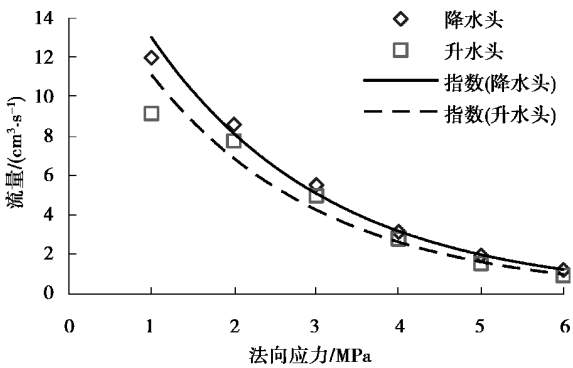
载荷/MPa	降水头阶段			升水头阶段		
	k	b	R^2	k	b	R^2
1	36.19	4.28	0.98	17.42	5.34	0.99
2	32.93	1.39	0.99	27.15	1.89	0.97
3	22.17	0.72	0.99	18.31	1.00	0.99
4	13.57	0.20	0.99	11.13	0.35	0.99
5	9.53	-0.17	0.99	6.70	0.06	0.99
6	5.62	-0.03	0.99	3.85	0.11	0.99

2.4 流量与法向应力关系

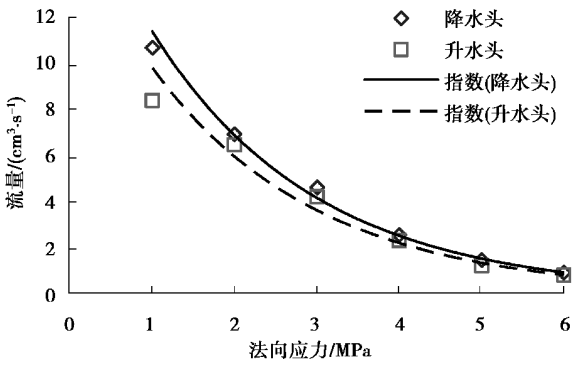
4 种水头差下流量与法向应力关系如图 6 所示,在 4 种水头差下,降水头阶段与升水头阶段裂隙渗流量 Q 均与法向应力 σ 呈负指数函数关系,渗流量随法向应力增加而减小,可用式(5)表示:

$$Q = a \exp(c\sigma) \tag{5}$$

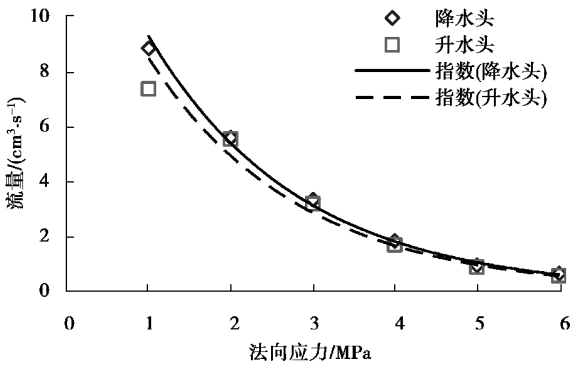
式中: a 和 c 为拟合参数,拟合参数值及相关系数 R^2 如表 4 所示。由表 4 可以看出,拟合相关系数均在 0.98 以上;表中 c 值相差不大,取值范围为-0.47~ -0.59,平均值为-0.52。在相同水头差下,降水头阶段和升水头阶段 c 值均比较接近。



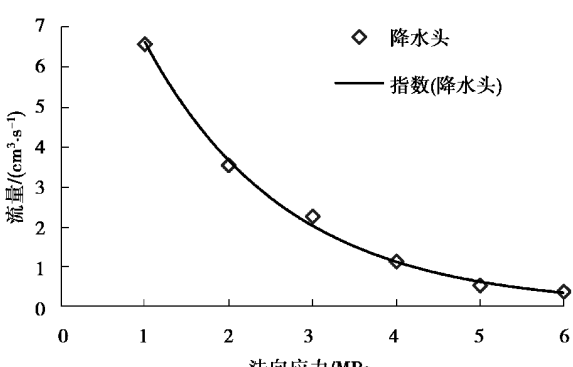
(a) $\Delta h = 0.22 \text{ MPa}$



(b) $\Delta h = 0.17 \text{ MPa}$



(c) $\Delta h = 0.12 \text{ MPa}$



(d) $\Delta h = 0.07 \text{ MPa}$

图 6 流量与法向应力关系

Fig.6 Relationship between flow rate and normal stress

相同水头差下,降水头阶段与升水头阶段裂隙渗流量差值随法向应力增加而降低,当法向应力为 1 MPa 时,该流量差值最大。由于 1 MPa 是首次施加的法向应力值,此时新鲜裂隙面粗糙程度较高,相同时间差内,裂隙的法向蠕变更为明显。

图 6 同时也说明,流量与法向应力之间并不存在一一对应的关系,是由于法向应力与裂隙法向闭合之间也不存在一一对应的关系。因此,建议在裂隙法向蠕变明显的渗流计算中,尽量不采用裂隙渗流量与裂隙法向应力关系式进行裂隙渗流量计算。

表 4 式(5)拟合参数值及相关系数 R^2

Table 4 Regression parameters and correlation coefficients R^2 of Equation (5)

	水头差/MPa	a	c	R^2
降水头 阶段	0.22	20.80	-0.47	0.99
	0.17	18.88	-0.50	0.99
	0.12	16.03	-0.54	0.99
	0.07	11.98	-0.59	0.99
升水头 阶段	0.12	14.63	-0.54	0.99
	0.17	16.17	-0.50	0.98
	0.22	17.98	-0.48	0.98

3 结论

(1)恒定法向应力作用下,累计裂隙蠕变闭合量 Δb 与试验时间间隔 t 呈对数函数关系,累计裂隙蠕变闭合量 Δb 随时间增加而增大;升水头阶段与降水头阶段相同水头差处裂隙闭合量差值 Δb_c 与法向应力呈线性相关,随法向应力增加而增大。

(2)恒定法向应力下,降水头阶段与升水头阶段的裂隙渗流量均与水头差呈线性关系,降水头阶段与升水头阶段相同水头差处裂隙渗流量差值均随水头差增加而增大。同一法向应力下,较大水头差试验间隔时间较长,岩石裂隙蠕变闭合量也随时间增加而增加,岩石的力学隙宽持续减小,导致恒定法向应力作用下岩石裂隙渗流量随时间增加而降低,并不与水头差呈一一对应关系。

(3)相同水头差下,降水头阶段与升水头阶段渗流量均与法向应力呈负指数函数关系,裂隙渗流量随法向应力增加而降低;相同法向应力下,降水头阶段与升水头阶段裂隙渗流量差值随法向应力

增加呈减小趋势。其原因为,裂隙蠕变闭合量差值 Δb_c 随法向应力增加而增大。在相同水头差下,岩石裂隙渗流量与法向应力也不呈一一对应关系。

本文仅对裂隙法向蠕变对裂隙渗流量与法向应力和水头差关系的影响进行了初步研究,认为裂隙渗流量与法向应力和水头差不具有一一对应关系。所做渗流蠕变时间较短,裂隙法向蠕变仅反映短期蠕变特征,而岩石裂隙长期蠕变对渗流的影响需要进一步研究。

参考文献(References)

[1] Louis C. Rock hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer-Verlag, 1974.

[2] Kranz R L, Frankel A D, Engelder T, et al. The permeability of whole and jointed Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(4): 225-234.

[3] Gale J E. The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships[A]//Goodman R E, Heuze F E. ed. Proc 23rd Symposium on Rock Mechanics[C]. New York: AIME, 1982: 290-298.

[4] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质, 1987, 14(2): 28-33. (Liu Jishan. Seepage formula of single fracture under normal stress [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, 14(2): 28-33. (in Chinese))

[5] 李广平,陶振宇. 法向应力作用下单裂隙渗流规律的研究[J]. 武汉水利电力学院学报,1993,26(2): 167-173. (Li Guangping, Tao Zhenyu. Study on the seepage law of single fracture under normal stress[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 1993, 26(2): 167-173. (in Chinese))

[6] 沈洪俊,张奇,夏颂佑. 单条裂隙径向流试验的初步探讨[J]. 河海大学学报,1995,23(2): 94-98. (Shen Hongjun, Zhang Qi, Xia Songyou. Preliminary study of single fracture radial flow test [J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(2): 94-98. (in Chinese))

[7] 速宝玉,詹美礼,王媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,1997,19(4): 73-77. (Su Baoyu, Zhan Meili, Wang Yuan. Experimental study of the fractured rock under coupled seepage and stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 1997, 19(4): 73-77. (in Chinese))
- [8] 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. (Wang Yuan. Coupling characteristics of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 83-87. (in Chinese))
- [9] 薛变鸾, 陈胜宏. 岩石裂隙渗流与法向应力耦合的复合单元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2613-2619. (Xue Luanluan, Chen Shenghong. Composite element model of seepage-normal stress coupling rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp. 1): 2613-2619. (in Chinese))
- [10] 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(增1): 3235-3241. (He Yulong, Tao Yujing, Yang Lizhong. Experimental research on hydraulic behaviors in a single joint with various values of JRC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp. 1): 3235-3241. (in Chinese))
- [11] 郭保华, 苏承东. 多级加载下岩石裂隙渗流分段特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 3787-3794. (Guo Baohua, Su Chengdong. Test research on piecewise seepage characteristics of rock fracture under multistage loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp. 1): 3787-3794. (in Chinese))
- [12] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 74-79. (Xu Guangxiang, Zhang Yongxing, Ha Qiuling. Super-cubic and sub-cubic laws of rough fracture seepage and its experiments study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 74-79. (in Chinese))
- [13] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 133-136. (Zheng Shaohé, Zhao Yangsheng, Duan Kanglian. An experimental study on the permeability law of natural fracture under 3D stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 133-136. (in Chinese))
- [14] 徐礼华, 谢妮. 岩石剪切裂隙渗流特性试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2249-2257. (Xu Lihua, Xie Ni. Test and theoretical research on permeability characteristics of shear fracture in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2249-2257. (in Chinese))
- [15] 尹立明, 陈军涛. 渗透水压对节理应力-渗流耦合特性的影响试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2563-2568. (Yin Liming, Chen Juntao. Experimental study of influence of seepage pressure on joint stress-seepage coupling characteristic[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2563-2568. (in Chinese))
- [16] 杨金宝, 冯夏庭, 潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1629-1635. (Yang Jinbao, Feng Xiating, Pan Pengzhi. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1629-1635. (in Chinese))
- [17] 刘杰, 于振民, 王瑞红, 等. 砂岩劈裂裂隙无充填多因素影响下渗流规律研究[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 54-63. (Liu Jie, Yu Zhenmin, Wang Ruihong, et al. Study on the seepage law of the influence of multi factors for splitting sandstone without filling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 54-63. (in Chinese))
- [18] 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(增1): 2788-2795. (Yu Hongdan, Chen Feifei, Chen Weizhong, et al. Research on permeability of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp. 1): 2788-2795. (in Chinese))
- [19] 赵志宏, 井兰如, 宋二祥. 裂隙岩体中力学-渗流-传输耦合离散元模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1023-1029. (Zhao Zhihong, Jing Lanru, Song Erxiang. Discrete element modeling of coupled mechanical-flow-transport processes in fractured rocks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1023-1029. (in Chinese))
- [20] Guo B H. Experimental Study on relationship between mechanical, seepage characteristics and 3D morphology parameters of marble joint[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2016, 10(1): 513-523.