

文章编号:1001-4888(2019)06-1019-08

加载方式和压力差对类软岩 稳态蠕变率影响的实验研究^{*}

秦楠, 于卓群, 冯学志, 王浩, 王永岩

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东青岛 266061)

摘要: 为研究加载方式和压力差对类软岩蠕变稳态率的影响, 统一配制类软岩试件, 采用分别加载和分级加载的方法进行单轴和三轴蠕变实验。利用 Boltzmann 迭加原理对原始实验结果进行处理, 建立了稳态蠕变率与压力差的关系函数表达式。结果表明, 加载历史是造成类软岩分级加载和分别加载稳态蠕变率大小不同的原因, 类软岩在轴压和围压不同组合关系作用下, 稳态蠕变率大小呈交替变化。研究结果可为矿区巷道及相关地下工程建设, 深部能源开发、开采提供参考。

关键词: 类软岩; 加载方式; 压力差; 稳态蠕变率

中图分类号: TU548

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-145

0 引言

在不同外界条件下, 岩石表现出的与时间有关的变形、流动和破坏等性质被称为岩石的流变性^[1]。岩石流变性主要表现为蠕变、流动、松弛、弹性后效和长期强度五个方面。材料在恒定荷载作用下, 变形随时间而增大的过程被称为蠕变。通过蠕变实验, 掌握工程岩体的蠕变特性, 为工程提出正确的支护策略, 是研究岩石蠕变的目的, 对软岩流变特性的研究更具有理论意义和实用价值。

国内外众多研究学者如蒋海飞^[2], 辛亚军^[3], 肖伟晶^[4,5], Hofmann^[6]等都在岩石力学性质和蠕变特性等方面展开了大量的研究。王明旭等^[7]对矿化花岗岩试件进行了单轴和三轴蠕变试验, 分析了不同荷载水平下蠕变曲线的特点。肖伟晶等^[8]对矿山深部灰岩开展分级加载单轴蠕变试验, 分析了各分级应力水平下轴向蠕应变、径向蠕应变和体应变的变化规律。谢文健等^[9]通过进行分级加载蠕变试验, 分析了红砂岩在不同加载应力条件下的蠕变特征。张向东等^[10]开展了盐岩的单、三轴蠕变试验研究, 分析了应力、围压等外在条件以及内部组成结构对盐岩蠕变特性的影响。胡波等^[11]通过对泥质粉砂岩样进行恒围压分级增轴压的三轴压缩蠕变试验, 研究了应力水平与蠕变速率的关系。虽然上述学者对岩石的蠕变特性开展了充分的研究, 但大部分都是考虑单一因素如应力水平对蠕变特性的影响, 鲜有考虑到不同加载方式产生的差异, 轴压和围压共同作用下压力差对蠕变特性影响的关系研究也较为缺乏, 因此本文通过采用分级加载和分别加载的方法开展类软岩试件单、三轴蠕变试验, 分析不同加载方式以及压力差对稳态蠕变率的影响。

^{*} 收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(51674149), 山东省自然科学基金(ZR2018PEE005), 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金(JYBSYS2018204), 博士科研启动金(210-010022667)

通讯作者: 秦楠(1987—), 男, 讲师, 主要从事工程材料力学行为研究与应用、材料强度理论、岩石损伤耗能理论的研究。Email: qinnan_qust@126.com

1 实验方案

1.1 类软岩试件的制配

目前对于真实软岩概念的界定没有统一说法,主要有以下四种:(1)描述性定义。陆家梁^[12]提出:松软岩层系指松散、软弱的岩层,它是相对于坚硬岩层而言的,自身强度很低。(2)指标化定义。抗压强度 $\sigma_c < 20\text{MPa}$ 的岩层称为软岩。(3)工程性定义。围岩松动圈厚度大于 1.5m 的围岩,称为软岩。(4)综合性定义:软岩分为地质软岩和工程软岩。①地质软岩是指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著或含有大量的膨胀性粘土矿物的松、散、软、弱层。②工程软岩是指在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体。查阅相关资料可知,描述性定义和综合性定义更为合理。描述性定义是对软岩的一个直观的描述,综合性定义是对比岩石强度和工程应力,只要工程应力足够大,都可以称为软岩。类软岩试件是利用水泥、砂子、粉煤灰、石膏等与岩石材料相近的土工材料,按一定比例配制,且具有一定单轴抗压强度的试件。本文研究对象原材料砂子、水泥、水的比例依次是 1:2:0.75;河沙目数为 40,自然风干 7 天。在不同的加载速率下,单轴抗压强度的变化范围是 24.15MPa~33.57MPa,最大差是 9.42MPa,平均强度值是 29.39MPa。实验工具和类软岩试件如图 1、图 2 所示。



图 1 实验工具

Fig. 1 Instruments of the experiment



图 2 类软岩试件

Fig. 2 Test-specimen of similar soft rock



图 3 TAW-200 电子式多功能材料力学试验机

Fig. 3 TAW-200 Electronic multifunctional materials mechanical testing machine

1.2 类软岩单轴蠕变实验

实验采用分级加载和分别加载两种方式。在分别加载实验中,使用电子式多功能材料力学试验机(图 3)对试件进行单轴蠕变实验,即围压 $\sigma_3 = 0\text{MPa}$,轴压加载至 $\sigma_1 = 15\text{MPa}$,保持 12 小时;在分级加载实验中,对一个试件进行单轴蠕变实验,即围压 $\sigma_3 = 0\text{MPa}$,轴压分六个档次阶梯加载 $\sigma_1 = 5\text{MPa}$ 、 8MPa 、 10MPa 、 13MPa 、 15MPa 、 18MPa ,每级档位保持 12 小时。同一实验条件下,须对三个试件进行重复实验,目的是为了减少实验结果的分散性,每一试件的实验时间从加载开始起计算。

1.3 类软岩三轴蠕变实验

实验采用分级加载方式,对同一个试件进行三轴蠕变实验,即保持围压 $\sigma_3 = 5\text{MPa}$ 不变,轴压分为六个档次阶梯加载 $\sigma_1 = 10\text{MPa}$ 、 13MPa 、 15MPa 、 18MPa 、 20MPa ,每级档位保持 12 小时;然后继续加载,同时改变围压和轴压,使压力差 $\sigma_1 - \sigma_3 = 15\text{MPa}$

保持不变,即围压 $\sigma_3 = 7\text{MPa}$ 时,轴压 $\sigma_1 = 22\text{MPa}$;围压 $\sigma_3 = 10\text{MPa}$ 时,轴压 $\sigma_1 = 25\text{MPa}$;围压 $\sigma_3 = 11\text{MPa}$ 时,轴压 $\sigma_1 = 26\text{MPa}$;围压 $\sigma_3 = 12\text{MPa}$ 时,轴压 $\sigma_1 = 27\text{MPa}$ 。

针对轴压和围压设定值的说明:因为要研究稳态蠕变率的变化情况,压力差不易选择太大。根据经验,流变点即加速蠕变门槛值大约占到单轴强度值的 $2/3$ 左右,故蠕变压力值选在单轴强度值的 60% 以下;为了能有一个梯度的变化空间,在分别加载中,选用 15MPa ,占强度值的 50% 左右。在单轴分级加载中,压力差选在 $20\% \sim 60\%$ 之间,与三轴分级加载相呼应,压力差也是在 $20\% \sim 50\%$ 之间变化。且围压增大,轴压增大,压力差保持在 15MPa ,这种加载数值选择也可以与单轴分级加载和分别加载对比。

2 蠕变实验结果分析

2.1 实验数据处理方法

单轴和三轴蠕变都采用了分级加载的实验方法,前一级荷载产生的沿轴向方向的塑性不可逆变形,必将对下一级荷载产生的轴向变形产生影响。造成的结果就是在相同时间内,当应力增大时,蠕变变形可能会减小,这与岩石本身的蠕变力学行为不相符。在处理实验数据时,应把加载历史对蠕变变形的影响效应考虑进去,这样才能比较真实地揭示类软岩在不同应力水平下的蠕变特性。假设在粘弹性体的前提下,利用 Boltzmann 迭加原理对原始实验结果进行处理。如图 4(a)所示,从时间 $t=0$ 到 $t=t_0$,岩石在相同压力差 $\sigma_1 - \sigma_3 = \Delta\sigma$ 的作用下发生蠕变变形,如果实验进行到时间 t_0 时,继续保持压力,则由于此时岩石试件已进入稳态蠕变阶段,变形将沿虚线继续进行。对试件作用增量荷载 $\Delta\sigma$ 的效果发生了如图 4(b)虚线与实线之间的附加变形,从中找到以 $t=0$ 作为时间起点的蠕变值和以 t_0 作为时间起点应力增量 $\Delta\sigma$ 所引起的蠕变增量 $\Delta\epsilon(t)$ 。

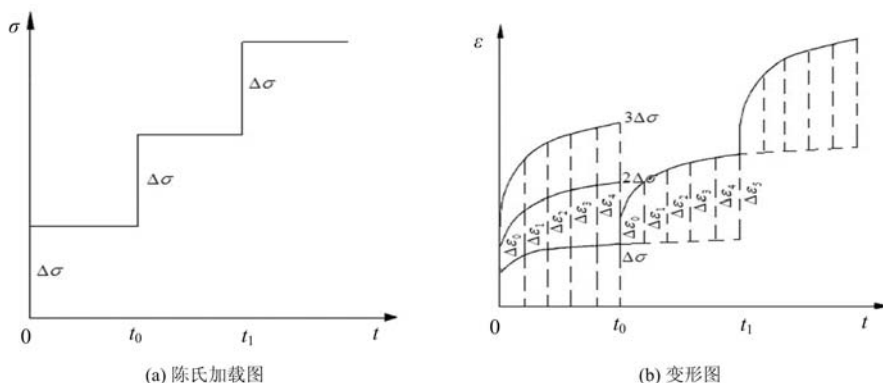


图4 蠕变实验数据处理方法^[13]

Fig. 4 The processing method of creep test data^[13]

在第一级荷载的基础上,叠加作用时间相同的下一级荷载引起的蠕变增量,就可以得到一次性加载为 $2\Delta\sigma$ 的蠕变曲线。接下来的分级加载,可在前一级的蠕变曲线上作同样的处理,得到一次性加载为 $\sigma_n = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i$ 的蠕变曲线,如图 4(b)所示。按上述处理方法,试样按分级加载获得的实验结果,能够转化为 n 个不同荷载作用下的蠕变曲线。

2.2 蠕变结果分析

图 5 是类软岩单轴蠕变分级加载实验曲线,图 6 是类软岩三轴蠕变分级加载实验曲线。由图 5、图 6 可知,相同围压条件下,类软岩轴向应变随着轴压 σ_1 的增大而增大。在同等轴压条件下,轴向应变与围压 σ_3 具有相反的变化趋势。保持压力差 $\sigma_1 - \sigma_3 = 15\text{MPa}$ 不变,同时增大轴压和围压,瞬时变形量变小。

类软岩的蠕变过程是硬化与软化相互作用的过程,硬化与软化主要是由类软岩的原始缺陷在荷载作用下的闭合与扩展造成的。轴压的增加加速了硬化的速率,同时也促使了软化的产生;而围压在不起主导作用的情况下具有相反的作用。

2.3 分级加载和分别加载对稳态蠕变率的影响

稳态蠕变率是稳态蠕变阶段的表征,表 1 是不同实验方案下的稳态蠕变率。当单轴蠕变分别加载,轴压 $\sigma_1=15\text{MPa}$ 时,平均稳态蠕变率是 $13.1\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$;当单轴蠕变分级加载,轴压 σ_1 加载到 15MPa 时,平均稳态蠕变率是 $4.15\times 10^{-3}\text{h}^{-1}$ 。通过数据来看,前者是后者的 3.15 倍。原因是分级加载时,前一级荷载产生的沿轴向方向的塑性不可逆变形对下一级荷载产生的轴向变形产生影响,使试件更加密实,弹性模量增大。由此可以看出研究稳态蠕变率时应考虑加载历史的影响因素。

表 1 实验加载方案及结果

Tab. 1 The experiment scheme and outcome of loading

加载方式	围压 σ_3 /MPa	轴压 σ_1 /MPa	压力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ /MPa	加载时长 /h	稳态蠕变率 /(h^{-1})	平均稳态蠕变率 /(h^{-1})
分别加载	0	15	15	12	12.6×10^{-3}	13.1×10^{-3}
					12.8×10^{-3}	
					13.9×10^{-3}	
分级加载	0	5	5	12	1.98×10^{-3}	2.07×10^{-3}
					2.09×10^{-3}	
					2.14×10^{-3}	
分级加载	0	8	8	12	2.5×10^{-3}	2.62×10^{-3}
					2.67×10^{-3}	
					2.69×10^{-3}	
分级加载	0	10	10	12	2.77×10^{-3}	2.86×10^{-3}
					2.83×10^{-3}	
					2.98×10^{-3}	
分级加载	0	13	13	12	3.88×10^{-3}	3.93×10^{-3}
					3.94×10^{-3}	
					3.97×10^{-3}	
分级加载	0	15	15	12	4.04×10^{-3}	4.15×10^{-3}
					4.12×10^{-3}	
					4.29×10^{-3}	
分级加载	0	18	18	12	7.26×10^{-3}	7.73×10^{-3}
					7.8×10^{-3}	
					7.77×10^{-3}	
分级加载	5	10	5	12	/	1.64×10^{-4}
分级加载	5	13	8	12	/	1.98×10^{-4}
分级加载	5	15	10	12	/	3.28×10^{-4}
分级加载	5	18	13	12	/	4.40×10^{-4}
分级加载	5	20	15	12	/	9.51×10^{-4}
分级加载	7	22	15	12	/	1.10×10^{-3}
分级加载	10	25	15	12	/	4.62×10^{-4}
分级加载	11	26	15	12	/	2.12×10^{-4}
分级加载	12	27	15	12	/	4.08×10^{-4}

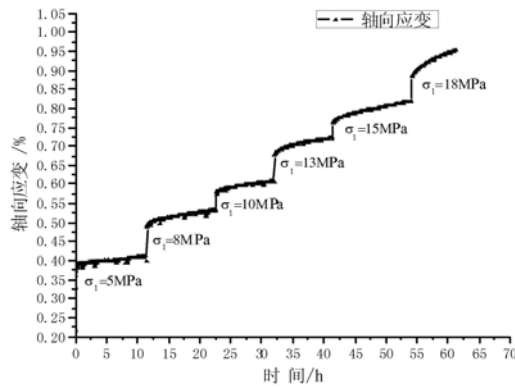


图5 类软岩单轴蠕变曲线

Fig. 5 The uniaxial creep curve of similar soft rock

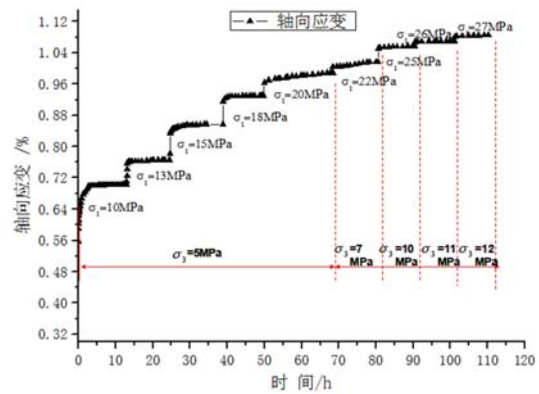


图6 类软岩三轴蠕变曲线

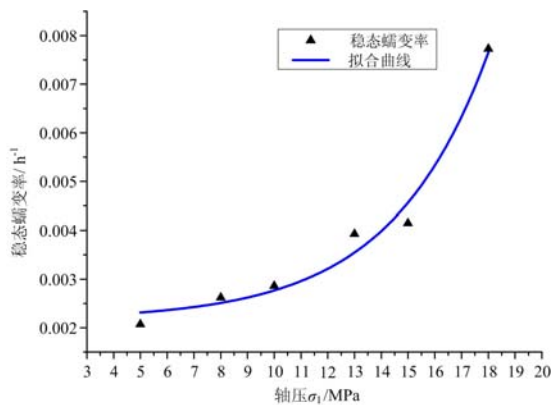
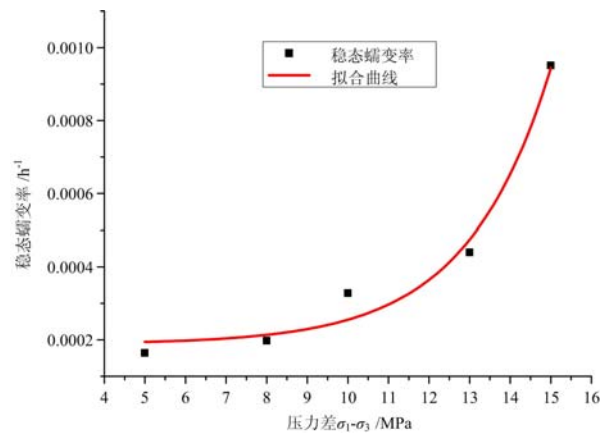
Fig. 6 The triaxial creep curve of similar soft rock

2.4 压力差对稳态蠕变率的影响

图7是单轴蠕变情况下,稳态蠕变率与轴压(压力差)的变化关系图。由表1和图7可知,在围压一定($\sigma_3=0$)的情况下,稳态蠕变率随轴压的增大而增大。主要原因是轴压促使了类软岩微观缺陷的增长,加快了裂隙的产生和发展。稳态蠕变率与轴压之间存在近似的指数函数关系,即

$$\bar{\epsilon}_1 = a_1 e^{b_1 \sigma_1} + c_1 \quad (1)$$

式中, a_1, b_1, c_1 均为材料常数,通过回归法可得: $a_1 = 3.865 \times 10^{-5}$, $b_1 = 0.275$, $c_1 = 0.00216$;由 $R^2 = 0.96755$ 可知,相关性较好。

图7 稳态蠕变率与轴压(压力差)的关系
(围压 $\sigma_3=0$ MPa)Fig. 7 The relationship between stable creeping rate and axial load (confining load $\sigma_3=0$ MPa)图8 稳态蠕变率与压力差的关系(围压 $\sigma_3=5$ MPa)Fig. 8 The relationship between creeping rate and pressure difference (confining load $\sigma_3=5$ MPa)

单轴蠕变实验是三轴蠕变实验的一个特例,前者的围压等于0,此时轴压的变化即为压力差的变化。对于一般情况的三轴蠕变实验,保持围压 $\sigma_3=5$ MPa 不变,增加轴压,即增大压力差,得到稳态蠕变率与压力差关系拟合曲线,如图8所示。

三轴蠕变情况下,稳态蠕变率与压力差之间也存在近似的指数函数关系,即

$$\bar{\epsilon}_2 = a_2 e^{b_2 (\sigma_1 - \sigma_3)} + c_2 \quad (2)$$

式中, a_2, b_2, c_2 均为材料常数,通过回归法可得: $a_2 = 5.238 \times 10^{-7}$, $b_2 = 2.0622$, $c_2 = 1.882 \times 10^{-4}$; $R^2 = 0.96193$,相关性较好。

由式(1)和式(2)可知,不管是单轴还是三轴蠕变实验,稳态蠕变率与压力差的关系函数可统一用指数函数来表达,即

$$\bar{\epsilon} = ae^{b(\sigma_1 - \sigma_3)} + c \quad (3)$$

式中, a, b, c 均为材料常数, 可根据实验数据拟合得到。

由表 1 可知, 相同轴压下, 围压的增大对稳态蠕变率增长是起抑制作用的, 且影响较大。如图 9 所示, 当轴压 $\sigma_1 = 18 \text{ MPa}$, 围压 $\sigma_3 = 0 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率是 $7.73 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$; 围压 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率降至 $4.40 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$, 后者相对前者减少了 94%。对比图 7 和图 8 可知, 相同压力差下, 单轴稳态蠕变率明显比三轴稳态蠕变率要大, 几乎是十倍的关系。

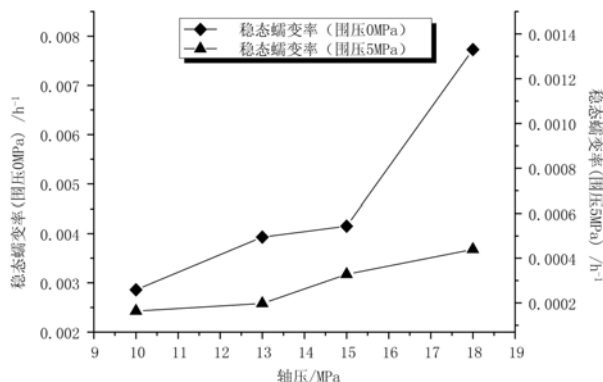


图 9 相同轴压下稳态蠕变率与围压的关系

Fig. 9 The relationship between stable creeping rate and pressure difference in the same axial load

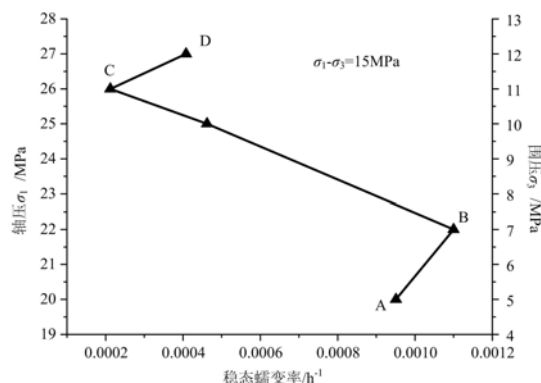


图 10 稳态蠕变率与轴压、围压的关系

(压力差 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 15 \text{ MPa}$)

Fig. 10 The relationship between stable creeping rate with axial load and confining load (pressure difference $(\sigma_1 - \sigma_3) = 15 \text{ MPa}$)

2.5 压力差恒定, 轴压和围压对稳态蠕变率的影响

由表 1 可得, 在压力差 $\sigma_1 - \sigma_3 = 15 \text{ MPa}$ 恒定的情况下, 轴压和围压同时增大, 稳态蠕变率先增大后减小又增大, 变化趋势如图 10 所示。

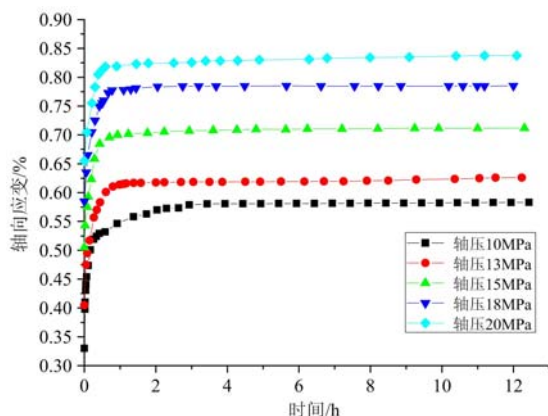


图 11 模型与实验曲线对比图(围压 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)

Fig. 11 The comparison diagram of creeping model with test curve (confining pressure $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$)

从图 10 可以看出: 当轴压 $\sigma_1 = 22 \text{ MPa}$, 围压 $\sigma_3 = 7 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率达到最大值 $1.10 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, 当轴压 $\sigma_1 = 26 \text{ MPa}$, 围压 $\sigma_3 = 11 \text{ MPa}$ 时, 稳态蠕变率达到最小值 $2.12 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 。通过前面的分析, 轴压能促进类软岩微观缺陷的发展, 使稳态蠕变率增大, 围压起反作用。由图 10 可知, BC 段轴压从 22 MPa 增大到 26 MPa , 围压从 7 MPa 增大到 11 MPa 时, 两者同时增大, 稳态蠕变率呈减小趋势, 说明此时围压起主导作用。而另外两个阶段: AB 段 ($20 \text{ MPa} < \sigma_1 < 22 \text{ MPa}$, $5 \text{ MPa} < \sigma_3 < 7 \text{ MPa}$) 和 CD 段 ($26 \text{ MPa} < \sigma_1 < 27 \text{ MPa}$, $11 \text{ MPa} < \sigma_3 < 12 \text{ MPa}$), 轴压起主导作用, 稳态蠕变率相对增加。通过这一现象可以得出结论: 稳态蠕变率受轴压和围压的共同影响,

虽然两者保持差值不变且同时增大, 但两者在不同阶段每升高单位强度对稳态蠕变率的影响权重不同。如 AB、CD 轴压影响权重重大, 稳态蠕变率增大; BC 段围压影响权重重大, 稳态蠕变率减小。

2.6 类软岩蠕变模型拟合

图 11 是考虑加载历史影响的模型与实验曲线对比图, 由类软岩三轴蠕变分级加载获得。设置条件为围 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 时, 逐级加载轴压 10 MPa 、 13 MPa 、 15 MPa 、 18 MPa 、 20 MPa 。

从图 11 可知: 类软岩在经历瞬时变形后便进入变形速率逐渐减小的衰减蠕变阶段, 而后是变形速

率较稳定的稳态变形阶段。采用经验法和模型法,利用 origin 强大的拟合功能,在多种函数中进行对比拟合,发现幂函数关系式拟合较好。

$$\epsilon(t) = a + bt^c \tag{4}$$

式中, t 是时间, a, b, c 是拟合参数,针对不同工况得表 2。

表 2 实验加载方案及结果
Tab. 2 Program and the results of the test load

σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	a	b	c	R^2
5	10	-70.4	70.9	3.78E-4	0.9968
5	13	-128.6	129.2	2.02E-4	0.9870
5	15	0.2378	0.4243	0.0631	0.9979
5	18	0.0879	0.6608	0.0314	0.9976
5	20	-0.7321	1.5308	0.0128	0.9916

考虑到加载是在极短的时间内完成,所以经验公式无法描述瞬时弹性阶段。拟合蠕变公式(4)可解决这一问题,它能描述瞬时变形, R^2 值都接近于 1,可见对衰减蠕变和稳态蠕变阶段吻合性良好,是较理想的类软岩蠕变曲线的拟合模型。

3 结论

通过开展类软岩常温下的单轴和三轴蠕变实验,分析研究了蠕变加载方式、压力差及轴压和围压对稳态蠕变率的影响规律,得出了以下主要结论:

- (1) 加载历史是造成类软岩分级加载和分别加载稳态蠕变率大小不同的原因。
- (2) 建立了稳态蠕变率与压力差的关系函数表达式,即 $\dot{\epsilon} = ae^{b(\sigma_1 - \sigma_3)} + c$,在相同压力差下,单轴稳态蠕变率近似是三轴稳态蠕变率的十倍关系。保持压力差恒定,同时增大轴压和围压,发现在不同阶段,两种荷载每升高单位强度对稳态蠕变率的影响权重不同。类软岩在轴压和围压不同组合关系作用下,稳态蠕变率大小呈交替变化。
- (3) 本文对类软岩蠕变模型和蠕变特性影响因素进行了深入研究,所得结果可为矿区巷道及相关地下工程建设,深部能源开发、开采提供参考。

参考文献:

[1] 王芝银,李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2008 (WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Rheological theory of rock mass and its numerical simulation[J]. Beijing: The Science Publishing Company, 2008 (in Chinese))

[2] 蒋海飞,刘东燕,赵宝云,等. 高应力高水压下砂岩三轴蠕变特性试验研究[J]. 实验力学,2014,29(5):556—564 (JIANG Haifei, LIU Dongyan, ZHAO Baoyun, et al. Experimental study on three axial creep properties of sandstone under high stress and high water pressure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):556—564 (in Chinese))

[3] 辛亚军,安定超,李梦远,等. 高强度红砂岩峰后分级加载蠕变及强度特征[J]. 煤炭学报,2017,42(7):1714—1723 (XIN Yajun, An Dingchao, LI Mengyuan, et al. Graded creep and strength characteristics of high strength red sandstone after peak loading[J]. Journal of Coal Mine, 2017, 42(7):1714—1723 (in Chinese))

[4] 肖伟晶,王晓军,陈辰,等. 分级加载条件下深部灰岩蠕应变特性研究[J]. 长江科学院院报,2017,34(8):135—138,143 (XIAO Weijing, WANG Xiaojun, CHEN Chen, et al. Study on creep strain characteristics of deep limestone under graded loading[J]. Proceedings of the Yangtze Academy of Sciences, 2017, 34 (8):135—138, 143 (in Chinese))

[5] 肖伟晶,李永欣,李士超,等. 深部灰岩分级加载蠕变试验及蠕应变增量分析[J]. 矿业研究与开发,2017,37(12):14—17 (XIAO Weijing, LI Yongxin, LI Shichao, et al. Graded loading of creep test and creep strain

- increment analysis of deep limestone[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(12):14—17 (in Chinese))
- [6] Robert Hofmann. Creep behaviour and remediation concept for a deep-seated landslide, Navistal, Tyrol, Austria [J]. Geomechanics and Tunnelling, 2017, 10(1):59—73.
- [7] 王明旭, 许梦国, 杜宇翔. 三轴加载作用下矿化花岗岩的蠕变试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(10):49—54 (WANG Mingxu, XU Mengguo, DU Yuxiang. Triaxial creep test of mineralized granite[J]. Chemical Minerals and Processing, 2017, 46(10):49—54 (in Chinese))
- [8] 肖伟晶, 陈辰, 李永欣, 等. 分级加载条件下深部灰岩蠕变试验及模型[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(2):76—82 (XIAO Weijing, CHEN Chen, LI Yongxin, et al. Creep test and model of deep limestone under step loading[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(2):76—82 (in Chinese))
- [9] 谢文健, 龚囡, 刘勇锋, 等. 分级加载条件下红砂岩蠕变特性试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6):34—39 (XIE Wenjian, GONG Ching, LIU Yongfeng, et al. Experimental study on creep behavior of red sandstone under step loading[J]. China Safety in Production Science and Technology, 2017, 13(6):34—39 (in Chinese))
- [10] 张向东, 傅强. 泥岩三轴蠕变实验研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2):154—158 (ZHANG Xiangdong, FU Qiang. Triaxial creep experiment of mudstone[J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(2):154—158 (in Chinese))
- [11] 胡波, 王宗林, 梁冰, 等. 岩石蠕变特性试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):438—446 (HU Bo, WANG Zonglin, LIANG Bing, et al. Experimental study on creep properties of rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):438—446 (in Chinese))
- [12] 陆家梁. 论松软岩层及其分类[J]. 煤炭科学技术, 1986(7):46—48 (LU Jialiang. On soft rock and its classification[J]. Coal Science and Technology, 1986(7):46—48 (in Chinese))
- [13] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994 (LIU Xiong. An introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese))

Experimental study on influence of loading mode and pressure difference on steady state creep of similar soft rock

QIN Nan, YU Zhuo-qun, FENG Xue-zhi, WANG Hao, WANG Yong-yan

(Mechanical and Electrical Engineering College of Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: In order to study the influence of loading mode and pressure difference on the steady state creep rate of similar soft rock, the uniaxial and the three-axial creep tests are carried out on the similar soft rock samples by separate and stepwise-incremental loadings, respectively. The original experimental results are processed by the Boltzmann superposition method, and the function expression of the relation between the steady state creep rate and the pressure difference is established. The results show that the loading history is the cause of different steady state creep rate of similar soft rock under different loading modes. Besides, under the action of different combinations of axial pressure and confining pressure, the steady state creep rate of the similar soft rock is alternately changed. The present work has great guiding significance for the mine roadway and related underground engineering construction, and has reference value for the deep energy development.

Keywords: similar soft rock; loading mode; pressure difference; steady-state creep rate