

# 绿片岩的单轴压缩各向异性蠕变试验研究

熊良宵<sup>1,2</sup>, 杨林德<sup>1</sup>, 张 尧<sup>1</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 通过对锦屏二级水电站辅助交通洞的绿片岩单轴压缩蠕变特性试验, 研究了轴向荷载方向与层理之间的不同关系对瞬时应变、应力应变关系、轴向应变速率、衰减蠕变持续时间及蠕变破坏机理的影响。研究结果表明: 在相同低应力水平下, 垂直于层理时的瞬时应变增量大于平行于层理时的瞬时应变增量, 而在相同较高应力水平下垂直于层理时的瞬时应变增量小于平行于层理时的瞬时应变增量; 同等应力水平条件下, 垂直于层理时的轴向应变速率和衰减蠕变持续时间均小于平行于层理时的轴向应变速率和衰减蠕变持续时间。同时, 当轴向荷载垂直或者平行于层理时, 应力应变关系曲线均出现了压密、弹性变形、裂纹扩展和峰后破坏阶段, 且蠕变破坏类型均属于脆性破坏。

**关键词:** 绿片岩; 单轴压缩; 蠕变试验; 水电站; 层理

**中图分类号:** TU 45.2

**文献标识码:** A

## Anisotropic Creep Test of Greenchist Under Uniaxial Compression

XIONG Liangxiao<sup>1,2</sup>, YANG Linde<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** The uniaxial creep tests of green schist from auxiliary tunnel at Jinping second stage hydropower station were carried out. An analysis was made of the influence of relationship between axial loading orientation and bedding plane on instantaneous strain, stress strain relation, axial strain rate, time duration of transient creep phase and creep breach mechanism. The instantaneous strain increment when axial loading orientation is perpendicular to bedding plane is larger than that when parallel to bedding plane under the same lower stress level, while, the result is on the contrary under the same higher stress levels. The axial strain rate and time

duration of transient creep phase when axial loading orientation is perpendicular to bedding plane is smaller than that when the parallel to bedding plane under the same stress level. Meanwhile, the stress strain relation curve has initial crack closing stage, elastic deformation stage, crack extending stage and post failure stage when axial loading orientation is perpendicular or parallel to bedding plane, and the creep failure patterns under two kinds of conditions are both brittle.

**Key words:** green chist; uniaxial compression; creep test; hydropower station; bedding

自然界中, 很多岩石具有各向异性的特点, 以呈层状分布的软岩最为明显<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外也有少量关于软岩各向异性的蠕变特性试验和理论研究成果。如, Fabre<sup>[3]</sup>对 3 种含黏土成分较多的软岩进行了单轴压缩蠕变特性试验, 并考虑了不同加载方式、轴向荷载与层理之间的不同关系对蠕变试验结果的影响; 付志亮<sup>[4]</sup>以软岩非线性蠕变理论为基础, 对含油泥岩的弹性模量、泊松比、蠕变变形速率进行了测试和研究; Dubey<sup>[5]</sup>对盐岩进行了单轴压缩蠕变特性试验, 将轴向荷载与层理之间的关系分为 3 种, 即垂直、平行和呈 45°斜交, 并分析了轴向荷载与层理之间的不同关系对瞬时弹性变形、衰减蠕变阶段持续时间等的影响。然而, 除了这些软岩以外, 还有其他的硬性变质岩也具有明显的各向异性特点, 比如在锦屏二级水电站辅助洞和引水隧洞内均有出露的绿片岩也呈层状分布。但绿片岩与一般岩石的各向异性特征有所区别, 常见的各向异性岩体中层理或者软弱夹层的强度低于母岩的强度, 而绿片岩则正好相反, 母岩为绿泥石砂岩, 夹层为大理岩, 夹层的强度反而高于绿泥石砂岩<sup>[6]</sup>, 因此, 单轴压缩蠕变条件下, 绿片岩的瞬时应变、稳态蠕变速率、衰减蠕变阶

收稿日期: 2009-02-19

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50639090); 国家自然科学基金(青年)资助项目(41002108)

作者简介: 熊良宵(1982—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为岩石力学与隧道工程。E-mail: xiongliangxiao@163.com

杨林德(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为隧道与地下工程。E-mail: tjyanglinde@163.com

段持续时间和蠕变破坏形状随荷载与层理之间关系的变化规律,也将与常规各向异性岩石有所不同.

因此,为了更好地了解各向异性对绿片岩蠕变特性的影响,笔者采用 CSS-1950 型双轴压缩流变试验机,对锦屏二级水电站辅助交通洞的绿片岩进行了单轴压缩蠕变特性试验,探讨了轴向荷载与层理之间的关系同时对瞬时应变、应力应变关系、轴向应变速率、衰减蠕变阶段持续时间和蠕变破坏形状等的影响.

1 试验原理

1.1 试样特征

试件采用在锦屏二级水电站辅助交通洞 B 洞西端 6 号横通道内采集的绿片岩试样制作. 采样地点距离 B 洞西端洞口的距离约为 3 km,埋深约 1.6 km,自重应力约为 42 MPa.  $T_1^1$  绿片岩具片状构造,常夹有灰白色大理岩条带及透镜体. 绿片岩的主要矿物成分为石英,另有绢云母和斜长石. 绿片岩属于硬质岩,干燥状态下平均单轴抗压强度约 60~70 MPa,长期强度约 40~50 MPa.

1.2 试验分组

按轴向荷载与层理之间的关系,可以分为 2 组,每组 2 个试样,具体荷载等级、试件尺寸等见表 1.

表 1 试验分组  
Tab.1 Experimental group

试样编号	轴向荷载 /kN	试样尺寸(长×宽×高) / (mm×mm×mm)	轴向荷载与层理的关系
1 <sup>#</sup>	480	102.1×101.9×100.3	垂直
2 <sup>#</sup>	480	101.3×100.8×100.5	平行
3 <sup>#</sup>	480	100.2×100.8×100.1	垂直
4 <sup>#</sup>	300	101.4×101.5×100.2	平行

1<sup>#</sup> 试样和 2<sup>#</sup> 试样分 4 级加载,每级荷载为 120 kN. 3<sup>#</sup> 试样分为 7 级加载,即 100,200,300,400,440,460,480 kN. 4<sup>#</sup> 试样分为 3 级加载,即 100,200,300 kN. 每级加载速率均为 20 kN·min<sup>-1</sup>.

2 蠕变试验结果及其分析

2.1 应变—时间关系曲线

1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样的轴向蠕变试验曲线见图 1. 由图可知,虽然 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样的轴向荷载与层理之间的关系不同,但随着应力水平等级的增加,其瞬时应变增量均呈减小的趋势,蠕变增量则呈增加的趋势,蠕

变量占总应变的比例也随之提高. 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样各级应力水平下的瞬时应变增量和蠕变增量见表 2.

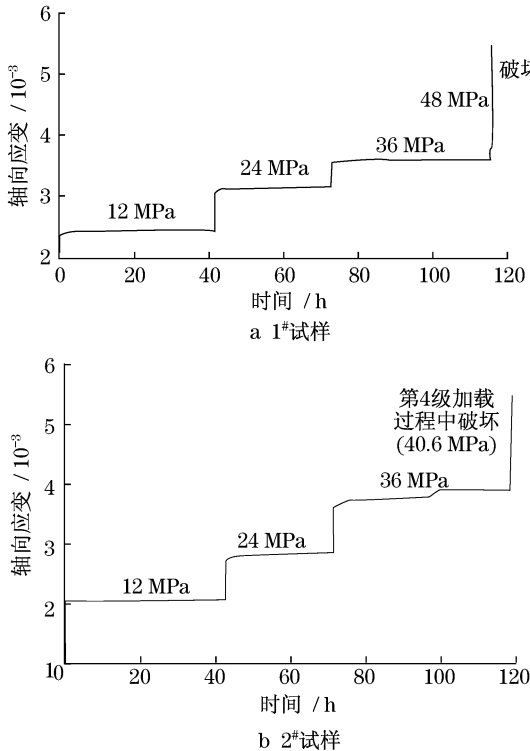


图 1 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样轴向蠕变试验曲线

Fig.1 Creep test curves of No.1 and No.2 specimens

表 2 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样各级的应变增量

Tab.2 Strain increment of No.1 and No.2 specimens under each stress stage

试样编号	应力水平 /MPa	历时/h	瞬时应变增量/10 <sup>-3</sup>	蠕变增量/10 <sup>-3</sup>
1 <sup>#</sup>	12	41.60	2.322	0.105
1 <sup>#</sup>	24	30.90	0.599	0.118
1 <sup>#</sup>	36	42.50	0.344	0.115
1 <sup>#</sup>	48	0.75	0.135	—
2 <sup>#</sup>	12	42.61	1.956	0.112
2 <sup>#</sup>	24	28.44	0.643	0.128
2 <sup>#</sup>	36	47.68	0.686	0.382
2 <sup>#</sup>	48	—	—	—

1<sup>#</sup> 试样在第 4 级应力水平(48 MPa)下,轴向蠕变试验曲线依然表现为黏弹性特征,只有衰减蠕变和稳态蠕变阶段,且在第 4 级应力施加完后 0.75 h 时,轴向应变为 3.846×10<sup>-3</sup>,此时,蠕变增量为0.11×10<sup>-3</sup>,但之后很快发生脆性破坏,直接由稳态蠕变阶段进入破坏阶段.

2<sup>#</sup> 试样则在施加第 4 级应力的过程中突然出现了脆性破坏,破坏时的应力为 40.6 MPa.

3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 试样的轴向蠕变试验曲线见图 2.

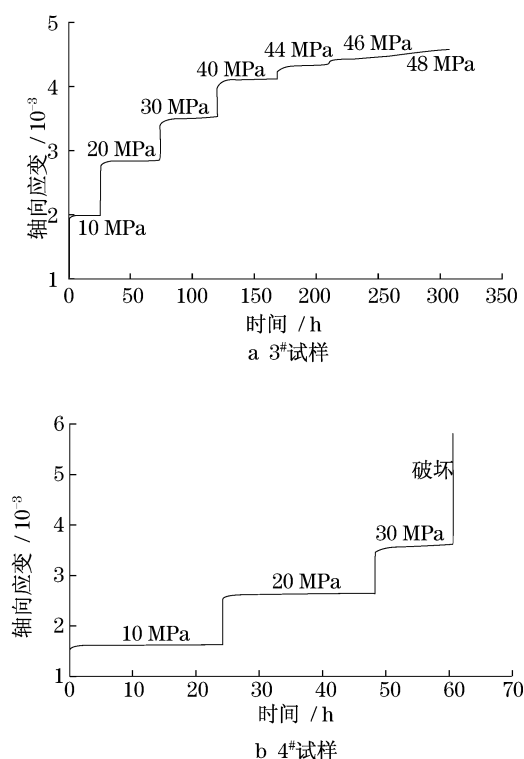


图2 3#和4#试样轴向蠕变试验曲线

Fig. 2 Creep test curves of No. 3 and No. 4 specimens

由于试验机的加载能力限制,3#试样前面4级中每级的应力增量为10 MPa,第5级、第6级和第7级的应力增量分别为4,2,2 MPa.3#试样前4级中每级的弹性应变增量和蠕变增量见表3.

表3 3#和4#试样各级的变形增量

Tab. 3 Strain increment of No. 3 and No. 4 specimens under each stress stage

试样编号	应力水平/MPa	历时/h	瞬时应变增量/ $10^{-3}$	蠕变增量/ $10^{-3}$
3#	10	25.7	1.864	0.120
3#	20	47.4	0.701	0.154
3#	30	45.9	0.435	0.233
3#	40	48.9	0.347	0.269
4#	10	24.1	1.517	0.135
4#	20	23.8	0.861	0.147
4#	30	12.4	0.706	—

4#试样在第3级应力水平(30 MPa)时,轴向蠕变试验曲线依然表现为黏弹性特征,只有衰减蠕变和稳态蠕变阶段,且在第3级应力施加完后12.4 h时,轴向应变变为 $3.726 \times 10^{-3}$ ,此时,蠕变增量为 $0.36 \times 10^{-3}$ ,但之后很快发生脆性破坏,直接由稳态蠕变阶段进入破坏阶段.

## 2.2 瞬时应变的比较

由表2、表3可知,瞬时应变增量随着应力水平

等级的增加而减小,蠕变增量则随着应力水平等级的增加而增加,而在分级加载条件下,每级的总瞬时应变为前面各级瞬时应变增量的累加值.因此,可计算得到各试样每级的瞬时应变增量和总瞬时应变,其比较结果见图3和图4.

由图3和图4可知,在相同低应力水平下,轴向荷载垂直于层理时的瞬时应变增量大于平行于层理时的瞬时应变增量,且总瞬时应变也大于平行于层理时的总瞬时应变;而在相同较高应力水平下,垂直于层理时的瞬时应变增量反而小于平行于层理时的瞬时应变增量,且总瞬时应变也小于平行于层理时的总瞬时应变.

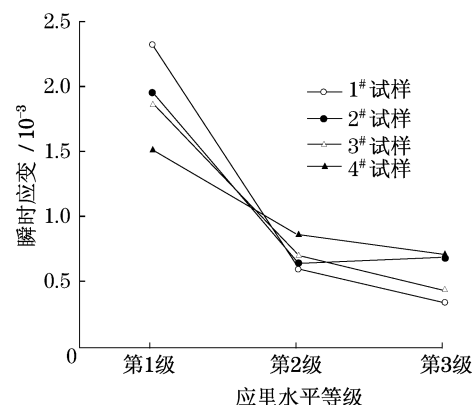


图3 瞬时应变增量的比较

Fig. 3 Comparison of instantaneous strain increment

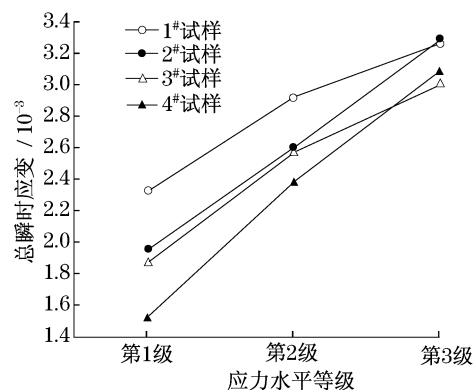


图4 总瞬时弹性应变的比较

Fig. 4 Comparison of total instantaneous strain

在低应力水平下,当轴向荷载垂直于层理时,不仅绿泥石砂岩(母岩)会发生轴向压缩变形,其所含的条带状大理岩(夹层)也会发生轴向压缩变形,同时层理之间的空隙也容易被压闭合;而当轴向荷载平行于层理时,此时主要是绿泥石砂岩发生轴向压缩变形,夹层的轴向压缩变形几乎可以不考虑.因此,在低应力水平下轴向荷载垂直于层理时的瞬时应变增量大于平行时的瞬时应变增量.当轴向荷载垂直于层理

时,绿砂岩之间的初始微观孔隙、层理之间的孔隙已基本被压闭合,因此,随着应力水平的增加,瞬时应变增量将会减小很多.当轴向荷载平行于层理时,随着应力水平的增加,容易造成层理之间的张开,导致侧向的扩张,从而引起轴向的压缩;所以,其瞬时应变增量又反而大于垂直时的瞬时应变增量.

### 2.3 应力应变关系的比较

1<sup>#</sup> 试样的应力应变关系曲线见图 5a. 由图 5a 可知,单轴压缩蠕变条件下,除去流变阶段,绿片岩的应力应变关系曲线特征与脆性岩石单轴压缩变形试验的特征相同,也可分为 4 个阶段,即压密阶段、弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和峰后破坏阶段. 单轴压缩蠕变条件下,在第 2 级、第 3 级或者更高的应力水平下,其应力应变关系曲线均由弹性变形阶段和裂纹扩展阶段构成. 这也说明脆性岩石在相对较低的应力作用下,就已经有新裂纹的产生或者旧裂纹的扩展.

2<sup>#</sup> 至 4<sup>#</sup> 岩样的应力应变关系曲线也具有 1<sup>#</sup> 岩样的特征,但轴向荷载与层理之间的关系不同时,应力应变关系曲线会有所差异,具体可见图 5.

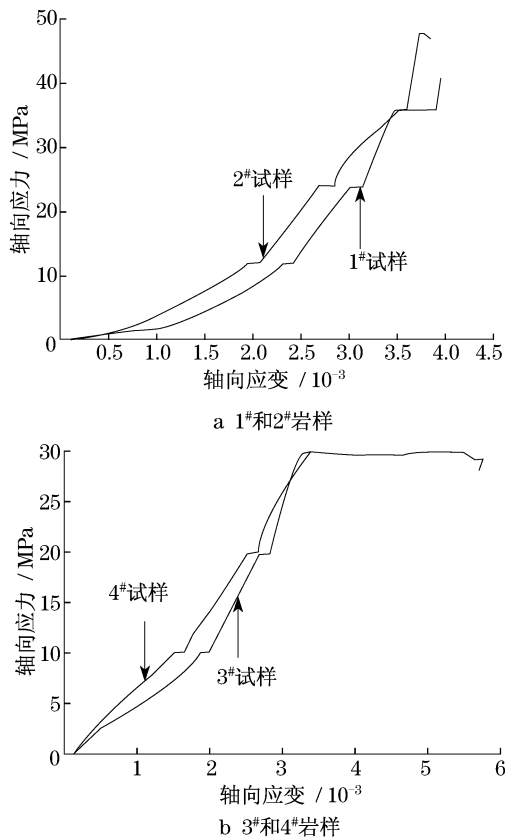


图 5 应力应变关系的比较

Fig.5 Comparison of the stress-strain relation

由图 5 可知,第 1 级荷载作用下,1<sup>#</sup> 试样应力应变曲线的斜率小于 2<sup>#</sup> 试样,而在第 2 级和第 3 级荷

载作用下,则大于 2<sup>#</sup> 试样;3<sup>#</sup> 试样和 4<sup>#</sup> 试样应力应变曲线的斜率也存在同样的变化规律. 这与前面瞬时应变增量的比较结果相对应,说明在相同低应力水平下,轴向荷载垂直于层理时比平行时容易发生变形,而在相同较高应力水平下,轴向荷载平行于层理时反而比垂直时容易发生变形.

## 3 稳态蠕变速率和衰减蠕变持续时间的对比分析

笔者先提出适合用于分析绿片岩黏弹性蠕变特性的经验模型,采用该模型对每级试验曲线进行拟合,再计算拟合曲线对应各时刻的斜率,从而得到应变速率.

### 3.1 经验模型及试验曲线拟合分析

通过试验得到的轴向应变与时间关系曲线出现了稳态蠕变阶段,因此,选择与 Burgers 流变模型相近的如下经验蠕变方程:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(t) + at + b[1 - e^{-ct}] + d[1 - e^{-et}] \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_0(t)$  为  $t = 0$  时的瞬时弹性变形; $a, b, c, d, e$  均为拟合得到的参数; $t$  为时间.

现采用该经验模型对 1<sup>#</sup> 试样的每级试验曲线进行拟合分析,拟合结果如图 6 所示,拟合得到的参数见表 4. 由图 6 和表 4 可知,采用该蠕变方程对试验曲线进行分析时,拟合曲线与试验曲线吻合程度比较好,相关系数比较高,说明采用该经验蠕变方程分析是合适的.

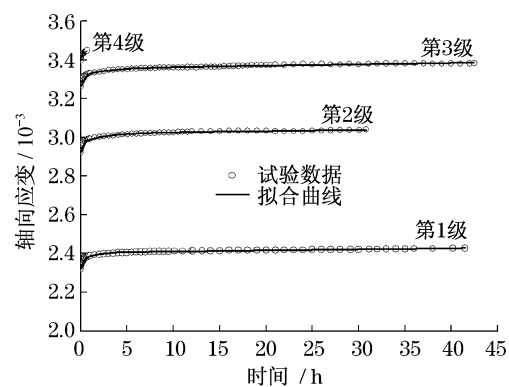


图 6 1<sup>#</sup> 试样试验曲线的拟合结果

Fig.6 Fitting result of test curve of No.1 specimen

### 3.2 轴向应变速率的对比分析

计算图 6 中拟合曲线对应各时刻的斜率,就可以得到 1<sup>#</sup> 至 4<sup>#</sup> 试样每级试验过程中应变速率与时间的关系曲线,具体如图 7 所示.

表 4 1<sup>#</sup> 试样的拟合参数值  
Tab.4 Fitting parameters of No.1 specimen

应力等级	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	相关系数
第 1 级	$5.588\ 3\times 10^{-7}$	0.000 04	39.369 05	0.000 04	0.835 19	0.994
第 2 级	$5.668\ 4\times 10^{-7}$	0.000 05	18.333 65	0.000 05	0.385 55	0.994
第 3 级	$6.969\ 8\times 10^{-7}$	0.000 05	19.646 49	0.000 04	0.393 71	0.991
第 4 级	$1.000\ 0\times 10^{-5}$	0.000 03	44.291 13	0.000 03	1.097 16	0.991

由图 7 可知,当轴向荷载垂直或者平行于层理时,轴向应变速率均会随着应力水平等级的增加而增加.2<sup>#</sup> 试样稍有不同,这是由于在第 2 级应力水平下,岩石内部裂纹的扩展导致应变出现了突变,因此,其应变速率反而比第 3 和第 4 级高.

现以 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样为例,分析轴向荷载与层理之间的关系对轴向应变速率的影响,对比结果如图 8 所示,通过计算得到 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样每级的稳态蠕变

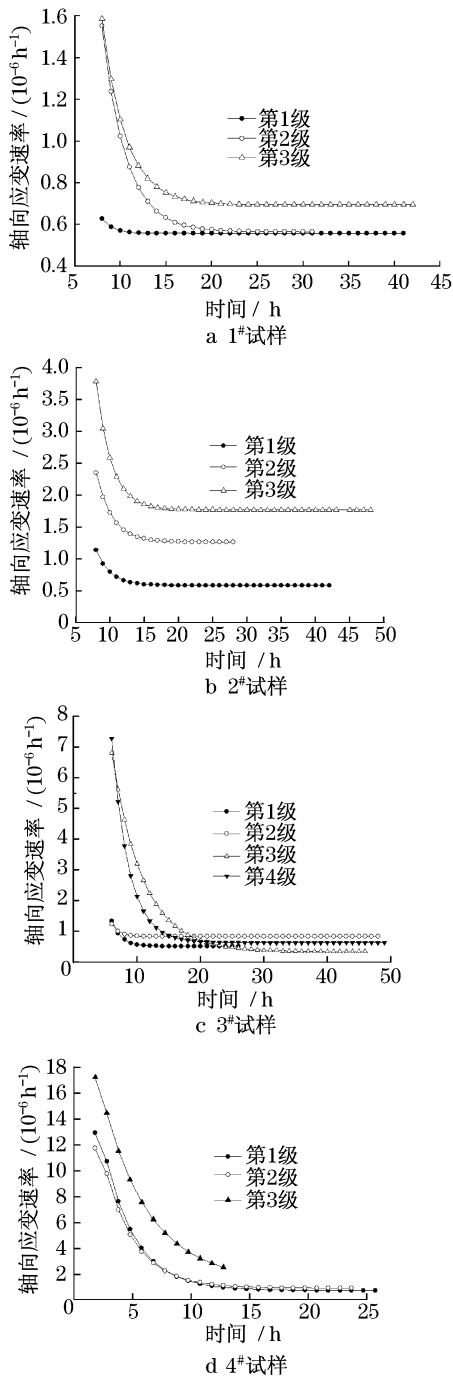


图 7 轴向应变速率  
Fig.7 Axial strain rate of specimens

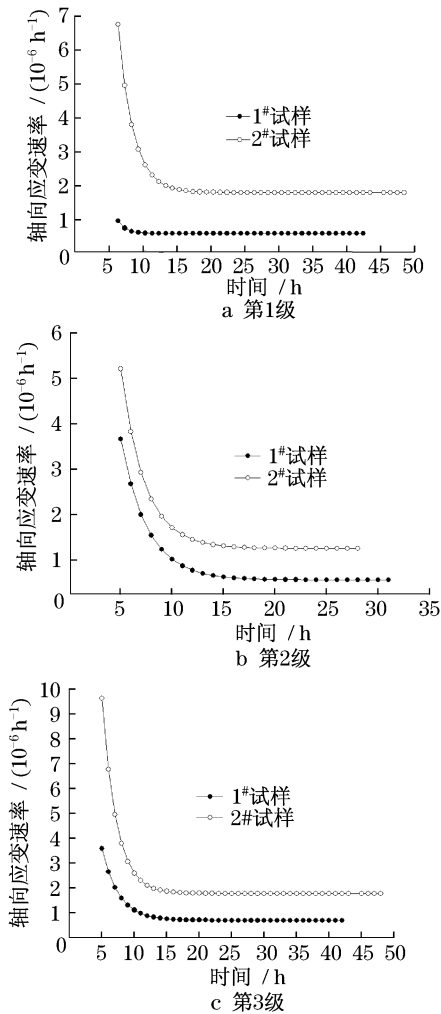


图 8 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 试样轴向应变速率的比较  
Fig.8 Comparison of axial strain rate between No.1 and No.2 specimens

速率,其值约为  $3.0 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1} \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ .

由图 8 可知,当轴向荷载垂直于层理时,同等应力水平下,衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段的轴向应变速率均小于平行时的轴向应变速率. 3<sup>#</sup> 试样与 4<sup>#</sup> 试样之间每级试验轴向应变速率的比较结果与图 8 的结果相同.

### 3.3 衰减蠕变持续时间的对比分析

由图 7 中每级试验的应变速率曲线可确定每级衰减蠕变结束的时间,即轴向应变速率开始保持恒定值的时刻,1<sup>#</sup> 与 2<sup>#</sup> 试样、3<sup>#</sup> 与 4<sup>#</sup> 试样之间的比较结果见图 9.

由图 9 可知,无论轴向荷载垂直还是平行于层理,其衰减蠕变持续时间均随着应力水平的增加而增加. 同时,当轴向荷载垂直于层理时,每级的衰减蠕变持续时间小于平行时的衰减蠕变持续时间.

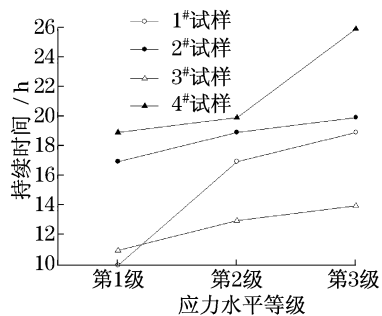


图 9 衰减蠕变阶段持续时间的比较

Fig.9 Comparison of time duration of transient creep phase

## 4 蠕变破坏机制分析

### 4.1 试件蠕变破坏形状分析

1<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 试样蠕变破坏形状见图 10.

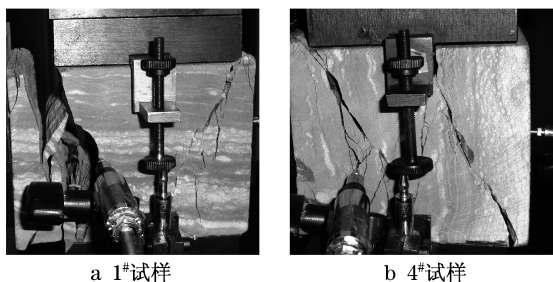


图 10 1<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 试样的破坏形状

Fig.10 Failure pattern of No.1 and No.4 specimens

由图 10 可知,当轴向荷载垂直于层理时,往往产生垂直于层理的裂纹,而随着时间的不断增长和应力水平的提高,这种裂纹会不断延伸和扩展,直至

绿片岩试件突然发生破坏,试件破坏后的残余承载能力很低;而当轴向荷载平行于层理时,层理间往往产生张拉裂纹,而随着时间的不断增长和应力水平的提高,这种裂纹会不断延伸和扩展,当受到的应力水平约为 30~40 MPa 时,会发生沿层理之间的劈裂破坏.

### 4.2 破坏机制的力学分析

由试样特征和图 10 可知,绿片岩往往夹带大理岩条带,可视为绿片岩与大理岩组成的互层状岩体,属于横观各向同性岩体,在单轴压缩蠕变条件下的破坏模型与单轴压缩变形条件下的破坏模型基本相同<sup>[7]</sup>.

当轴向荷载垂直于层理时,试件的轴向蠕变变形主要由绿片岩和大理岩的轴向压缩蠕变变形共同构成,而绿片岩与大理岩的蠕变变形并不一致,从而导致层与层界面之间产生径向张力,而绿片岩和大理岩在径向张力作用下产生微观裂纹,随着轴向应力水平和蠕变时间的增加,微观裂纹逐渐扩展并汇聚形成贯穿试件的宏观裂纹,从而试件发生破坏. 当轴向荷载平行于层理时,绿片岩和大理岩因受到上下端约束而具有相同的轴向蠕变变形量,但绿片岩和大理岩的弹性模量等并不相同,因此,绿片岩与大理岩之间会存在竖向应力差导致层间界面产生张拉裂纹,试件最后沿着层间界面形成张拉裂纹而发生破坏.

综合上述分析可知,单轴压缩蠕变条件下,绿片岩受到的轴向荷载垂直或者平行于层理时,其蠕变破坏均是由于裂纹的汇聚、扩展和贯通所导致,这种破坏往往是突然性的,属于脆性破坏. 绿片岩在蠕变试验过程发生脆性破坏,除了与该岩石的固有特性有关外,还与加载应力水平大小、加载等级数和试验设备等有关系.

## 5 结论

(1) 在相同低应力水平下,绿片岩受到的轴向荷载垂直于层理时的瞬时应变增量大于平行于层理时的瞬时应变增量;而在相同较高应力水平下,其瞬时应变增量反而小于平行于层理时的瞬时应变增量.

(2) 单轴压缩蠕变条件下,绿片岩的轴向应力应变曲线除了出现流变阶段外,还出现了压密阶段、弹性变形阶段、裂纹扩展阶段和峰后破坏阶段. 同

(下转第 1663 页)