

泥质软岩蠕变机制研究

范秋雁¹, 阳克青², 王渭明³

(1. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 2. 南宁地矿地质工程勘察院, 广西 南宁 530007;
3. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 在分析已有岩石蠕变机制研究成果的基础上, 以南宁盆地泥岩为研究对象, 进行一系列单轴压缩无侧限蠕变试验和有侧限蠕变试验来分析泥岩的蠕变特性, 配合扫描电镜, 着重分析泥岩蠕变过程中细观和微观结构的变化并提出岩石的蠕变机制, 即岩石的蠕变是岩石损伤效应与硬化效应共同作用的结果。通过构建蠕变、损伤及硬化综合曲线说明蠕变 3 个阶段的形成机制: 第一阶段硬化效应强于损伤效应, 蠕变规律主要服从于硬化效应的衰减变化规律; 第二阶段损伤效应强于硬化效应, 蠕变规律主要服从于损伤效应的等速变化规律; 第三加速蠕变阶段的硬化效应已不显现, 蠕变规律服从损伤效应的加速变化规律。泥质软岩的蠕变机制与金属材料蠕变机制在蠕变参与对象及机制方面不同。

关键词: 岩石力学; 泥质软岩; 蠕变试验; 蠕变机制; 损伤效应; 硬化效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)08 - 1555 - 07

STUDY OF CREEP MECHANISM OF ARGILLACEOUS SOFT ROCKS

FAN Qiuyan¹, YANG Keqing², WANG Weiming³

(1. *College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China*; 2. *Geology and Mineral Engineering Investigation Institute of Nanning, Nanning, Guangxi 530007, China*; 3. *College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China*)

Abstract: Based on the analysis of existing research results of rock creep mechanism, the mudstone in Nanning Basin is taken as the mainly research object; and its creep property is deeply discussed by a series of tests under unconfined uniaxial compression and confined uniaxial compression. Especially, the creep changes of meso- and micro-structure are researched combining with scanning electron microscope(SEM) images of mudstone. It's indicated that the creep mechanism of the argillaceous soft rock is the result of the interaction between the damage effect and hardening effect. It is reasonable to explain and illustrate the mechanism of three creep phases by using the comprehensive curves, which include the creep curve, the damage effect curve and the hardening effect curve: at the first stage, hardening effect is much stronger than the damage effect and the creep mainly obeys the decay law of hardening effect at this stage; at the second stage, the damage effect is stronger than the hardening effect, and the creep mainly obeys the constant-rate law of the damage effect at this stage; at the third stage, the hardening effect disappears and the creep obeys the acceleration law of the damage effect. The creep mechanisms of the argillaceous soft rock and the metal materials are different in terms of magnitude of objects and the mechanism.

Key words: rock mechanics; argillaceous soft rock; creep test; creep mechanism; damage effect; hardening effect

收稿日期: 2010 - 03 - 04; **修回日期:** 2010 - 04 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772190); 广西壮族自治区自然科学基金项目(2010GXNSFA013005)

作者简介: 范秋雁(1961 -), 男, 博士, 1982年毕业于山东科技大学矿井建设工程专业, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。
E-mail: qiuyan@gxu.edu.cn

1 引言

岩石的流变性是岩石的重要力学特性之一,在众多岩石中作为泥质软岩类的泥岩的流变特性尤为显著,常常导致地面和地下众多岩石工程出现稳定性问题,例如在第三系泥岩中开采煤炭资源所出现的地下巷道软岩支护问题等。过去,人们对岩石流变性的研究主要集中在表象规律性的探索方面,随着岩石工程问题的日趋复杂,仅靠对表象规律性的了解已不能较好地解决复杂的工程问题,如新奥法的二次支护时间选择问题一直是学术界和工程界所争论的焦点问题之一。只有对岩石的蠕变机制进行充分地研究,才有可能较好地解决这些工程问题。因此,对岩石蠕变机制的研究,无论对于岩石力学基础理论发展,还是对于实际工程问题的解决都具有十分重要的意义。

岩石流变力学的创立是由金属材料流变学发展而来的,是材料流变学的一个重要分支。岩石流变力学成为一门独立学科的标志是1922年出版的Bingham名著《流动和塑性》及1929年美国流变协会创建^[1]。

D. T. Griggs^[2]最早提出岩石发生蠕变的荷载阈值约为破坏荷载的12.5%。之后C. H. Scholz^[3]提出产生脆性岩石蠕变的主要原因为岩石微破裂过程的时间效应。M. Langer^[4]于1979年在第四届国际岩石力学大会上系统阐述了岩石流变的基本概念、规律及相关的工程问题。陈宗基早在20世纪50年代就将流变学应用于土力学中,提出了微观流变学基本原理、“黏土结构力学”学说和土的三向固结流变理论,并于1959年把流变理论引入岩石力学。刘雄^[5]借助金属材料的蠕变机制从细微观角度简要讨论了岩石的蠕变机制。王子潮和王绳祖^[6]通过分析岩石变形破坏特征,认为引起岩石半脆性蠕变破坏的3种机制是高应力作用下的岩石的剪切微破裂扩展、连通,并向摩擦滑动转变,高温下岩石塑性-假塑性流动失稳,介于两者之间的岩石由塑性-假塑性流动向破裂和摩擦滑动的转变。谷耀君^[7]用激活能理论分析砂岩的蠕变机制问题。范秋雁和朱维申^[8]通过将岩石蠕变曲线和单轴压缩曲线绘于同一图上,经分析提出岩石的蠕变机制是岩石的裂隙扩展与内部应力场不断发展与调整的过程。陈有亮和孙钧^[9]提出了判断岩石起裂的流变断裂准则以及

裂纹时效扩展机制。任建喜和葛修润^[10]通过对三轴压缩岩石蠕变损伤扩展特性CT实时分析试验,得到的结论为在蠕变瞬时段,裂纹在很短的时间内有一定的扩展,然后稳定扩展,岩石进入蠕变稳态段,随着时间的推移,岩石体积膨胀,轴向应变稳定增加,在稳态段的末期,裂纹扩展速度加快,岩石很快进入蠕变加速段。侯公羽^[11]通过分析岩石蠕变变形的混沌特性,提出了岩石蠕变变形的发展过程是一种从有序→混沌(无序)→有序的过程,并且控制岩石蠕变系统的应力水平是避免其混沌发生的主要途径。

从以上的国内外研究现状来看,对于岩石蠕变机制的研究相对较少,有必要进一步地深入研究。本文选择蠕变特性显著的第三系泥岩作为研究对象,进行室内单轴压缩无侧限蠕变试验和有侧限蠕变试验,探讨泥岩的蠕变特性,特别是配合扫描电镜,着重探讨泥岩蠕变过程中的细观和微观结构的变化,在此基础上深入分析岩石的蠕变机制。

2 试验及结果分析

2.1 试验内容及结果

岩石流变试验主要有:单轴压缩、单轴拉伸、三轴压缩、弱面剪切等类型的蠕变或松弛试验等。其中岩石的单轴蠕变试验是采用比较普遍的蠕变试验方法。本文以广西南宁市龙滩大厦后边坡开挖出来的原状泥岩作为岩石试件,用高压固结仪进行岩石单轴无侧限和有侧限压缩条件下的岩石蠕变室内试验,并用扫描电子显微镜分析各蠕变阶段岩石切片细微观特征。同时进行有侧限压缩条件下的岩石蠕变试验的目的是考虑到有些基础工程直接选择第三系泥岩作为持力层,这时有侧限条件下的蠕变规律性的研究就显得较为重要。为了获得各蠕变阶段的试件切片,用3块相同的试件在相同的荷载下同时进行单轴无侧限蠕变试验,分别在蠕变的第一、二、三阶段取出各一块切片。

(1) 泥岩单轴无侧限和有侧限压缩蠕变曲线

分级荷载下泥岩单轴无侧限和有侧限压缩蠕变曲线见图1。

(2) 泥岩单轴无侧限压缩蠕变扫描电镜结果

对试件切片作电镜扫描的主要目的是观测泥岩原样和蠕变第一、二、三阶段的细微观变化特征,

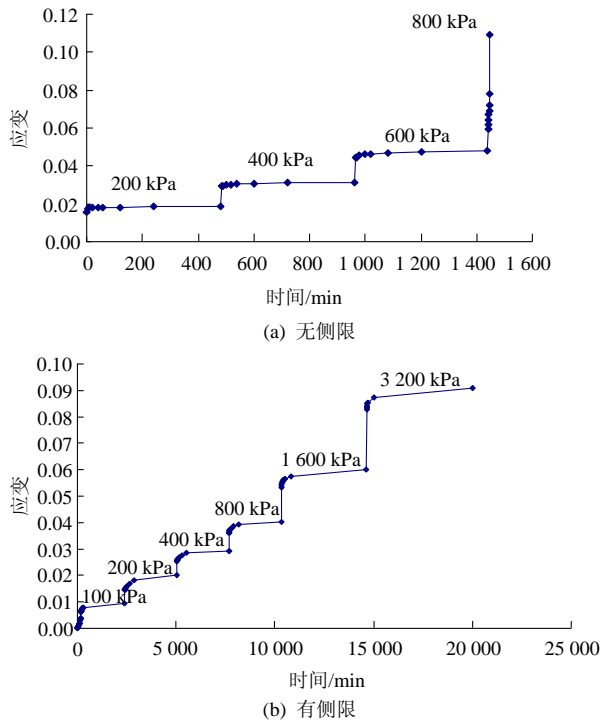


图 1 分级荷载下泥岩单轴压缩蠕变曲线

Fig.1 Uniaxial compression creep curves of mudstone under stepwise loading

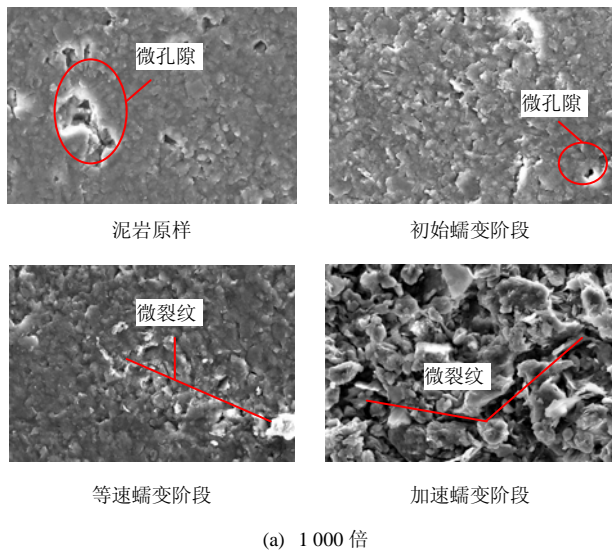
以寻求蠕变的不同阶段对泥岩细观结构上的影响。图 2 分别为在 900 kPa 恒载下泥岩单轴无侧限压缩蠕变各过程的 1 000, 20 000, 30 000 倍扫描电镜图像。

2.2 结果分析

2.2.1 泥岩的无侧限单轴压缩蠕变特性分析

(1) 蠕变过程分析

在各级荷载施加后, 泥岩首先产生瞬时变形, 之后进入初始蠕变阶段, 但泥岩的初始蠕变量较大, 等速蠕变阶段的变形则相对较小。试件破坏前



(a) 1 000 倍

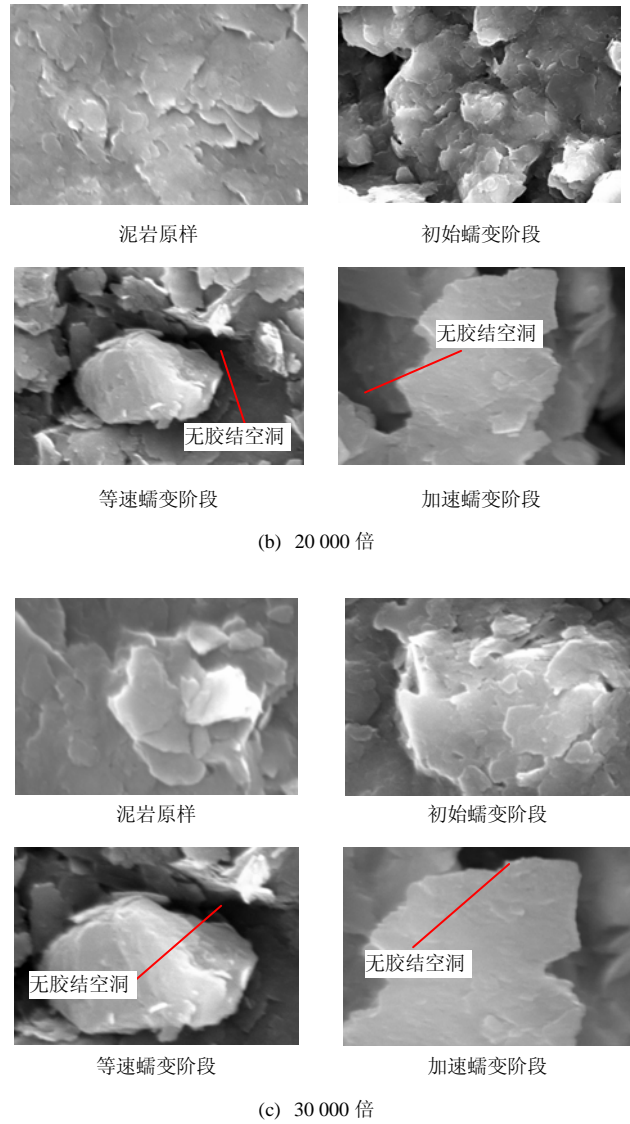


图 2 恒载蠕变过程的扫描电镜图像

Fig.2 SEM images during creep process under constant loading

出现比较明显的征兆, 即在蠕变曲线中出现了蠕变速率迅速增大的上翘阶段, 第三加速蠕变阶段所持续时间较短, 试件即发生失稳破坏。

(2) 瞬时应变增量随应力增加而减小

将每级荷载所产生的瞬时应变增量与相对应的应力进行整理可得瞬时应变增量 - 应力关系曲线 (见图 3), 由此可以发现, 泥岩的分级加载单轴蠕变试验过程中, 每加一级荷载所产生的瞬时应变增量有下降的趋势, 即瞬时变形量随着应力的增加而减小。

(3) 蠕变过程中岩石的硬化现象

由上述第(2)点分析可知, 在相同应力增量下, 泥岩的轴向瞬时应变增量并没有出现增大, 反而呈下降趋势。因此可以认为在轴向上, 泥岩试样的轴

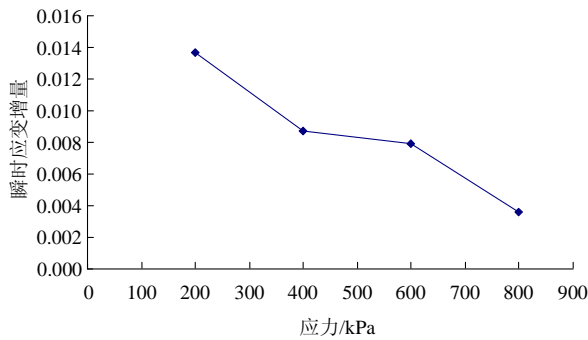


图3 分级荷载下泥岩试件瞬时应变增量-应力曲线

Fig.3 Transient strain increment-stress curve of mudstone sample under stepwise loading

向压缩模量增大,出现了硬化现象。高延法等^[12, 13]也论述过岩石在单轴压缩蠕变过程中存在硬化现象,但是文中并未提及硬化的机制。本文以下来讨论泥岩在蠕变过程中的硬化机制。

硬化,在金属材料学中又叫加工硬化或者应变硬化,最早应用于金属材料的变形过程研究,是指材料在应力作用下进入塑性变形阶段后,随着变形量的增大,应力不断提高的现象。硬化是材料阻止继续塑性变形的一种力学性能。对于金属材料的硬化机制,普遍认为是其塑性变形过程中的多系滑移和交滑移造成的,在多系滑移过程中,由于位错的交互作用,形成割阶、Lomer-Cottrell 位错锁和胞状结构等障碍,使位错运动的阻力增大,而产生硬化。在交滑移过程中,硬化主要是由于原滑移面中刃位错引起的,因为刃位错不能产生交滑移,因而随应变增加,刃位错密度增大,产生了应变硬化。

与金属材料的硬化机制不同,岩石存在着大量的微孔、微裂纹以及软弱相,对于岩石材料的晶格结构而言,产生相应变形的应力不足以,或者很少能驱使岩石内部晶格产生变形以及位错滑移等。更大程度上是在应力作用下,微孔、微裂隙的闭合及软弱相的压缩。所以轴向的硬化,是微孔不断闭合及弱相不断得到压缩,可变形结构强度不断提高的结果。

2.2.2 泥岩有侧限条件下蠕变分析

(1) 蠕变过程分析

由试验结果可知,每加一级荷载后,蠕变就较快衰减到一个相对稳定的值,但这一过程比无侧限状态下的明显缓慢,也即在初始蠕变阶段又可分为两个阶段,其中第一阶段速率较快,而第二阶段速率相对较慢,这是由于有侧限条件下内部应力调整

及硬化过程的复杂性所产生的。

因此,泥岩在有侧限条件下的蠕变只产生了初始蠕变阶段,主要表现为稳定蠕变。

(2) 初始蠕变速率随荷载增大而逐渐增大

经整理分析,初始蠕变变形随着应力水平的提高相应增大。应力水平较低时,以第一阶段蠕变衰减较快,最终趋向某个稳定值。并且当应力水平低时,其对应的第一阶段持续时间较短。随着应力水平的提高,其对应的第一阶段持续时间加长。由于环刀限制了岩块的侧向变形,泥岩样被不断挤密压实,有侧限条件的压缩模量,随着应力的增加而增大,强度得到提高。蠕变过程中没有出现蠕变速率增加而发生破坏的阶段。

(3) 泥岩的体积蠕变

关于体积压缩性岩石(和土)与其他材料,例如金属相比,显示了十分不同的特性,从某种意义上来说,体积压缩性是显著的并且部分是永久性的^[14]。

在对泥岩进行有侧限条件下的单轴压缩蠕变试验过程中可以看出,有侧限蠕变条件下的蠕变是一个压缩过程,随着应力的增加,时间的发展,试件的体积不断被压缩,并没有侧向膨胀,因而试件总体积不断减小,并且随着应力的增加有增加的趋势。出现了随时间而变化的现象,即发生了体积蠕变,由于是在有侧限条件下所做的压缩蠕变试验,所以体积蠕变与轴向蠕变有相同的规律性。

2.2.3 扫描电镜试验结果分析

从微观方面研究岩石的破坏规律,将微观破坏形态特征同岩石微观裂纹扩展到断裂破坏的力学机制联系起来进行研究是探讨岩石变形和破坏机制的一种有效途径。

(1) 1 000 倍下的扫描电镜结果分析

从图 2(a)中可以看到,泥岩颗粒总体分布相对均匀,粗粒之间被黏土类胶结物填充,胶结在一起。同时存在相当数量的气孔(微孔),并没有发现微裂纹的存在。

经历了第一阶段初始蠕变后,试件在 1 000 倍扫描电镜下,基本上还是保持相对均匀的结构特征,但是 SEM 图像表明,蠕变第一阶段的微孔数量相对原样少了很多,画面只有为数不多的 1~2 个。同样,在此阶段下还没有出现微裂纹。由此可见,在蠕变第一阶段,微孔得到了闭合,而较细观的裂纹尚未形成。

在第二阶段等速蠕变中,可以看到试件表面的

粗糙程度已经有所提高, 出现了散落的碎屑, 并且出现了细观上的微裂纹, 但是这些裂纹尚未贯通。

从处于第三阶段加速蠕变的图像可以清楚地看到, 试件表面已完全粗化, 粗粒已出现了分离, 颗粒之间的胶结物已明显弱化, 并且在试件表面已出现相对贯通的裂纹。

(2) 20 000 倍下的扫描电镜结果分析

从泥岩原样在 20 000 倍下的电镜图像来看, 可以清楚地看到泥岩的片状结构, 周围胶结物包裹, 颗粒间被胶结物填充。表面结构相对较平整。

蠕变第一阶段后, 出现了少量片状结构的剥落, 从结构尺寸上来看相对原样的片状结构变得细小, 同时可以看到存在即将断裂的片状结构, 图像表面显得粗糙。这些变化都是由于微孔被压缩闭合的结果。

当处于蠕变第二阶段时, 图 2(b)中出现了较大粗粒的分离, 没有了第一阶段中相对尺寸较大的结构, 而多数以细小片状结构出现, 呈现片状结构形态的极不均匀性。表面变得更为不平整, 同时因破碎而散落的结构增多。

蠕变第三阶段在 20 000 倍情况下, 随着放大倍数的增大, 视角范围变小, 图像中表现出更多粗粒周围出现无胶结填充的空洞, 这体现了宏观裂纹的发展。

(3) 30 000 倍下的扫描电镜结果分析

30 000 倍下的扫描结果基本上和 20 000 倍下的情况相似, 通过观察泥岩试件在 30 000 倍电镜扫描图像, 可以清楚地看到泥岩的片状结构, 周围胶结物包裹, 颗粒间被胶结物填充。表面结构相对较均匀。蠕变第一阶段后, 细观图像表明, 片状结构相对原样显得更薄, 并且有少数片状结构出现了断裂脱落, 同时也存在断裂脱落的薄片。当处于蠕变第二阶段时, 图 2(c)中粗颗粒上也有存在细小薄片脱落现象。蠕变第三阶段在 30 000 倍情况下, 可以清楚地看到粗粒同样也是由无数细粒胶结而成, 粗粒周围出现无胶结填充的空洞。

(4) 泥岩蠕变机制分析

泥岩单轴压缩蠕变过程, 是一个应力不断调整, 硬化和损伤不断发展并相互作用的过程。

为分析蠕变的机制问题, 先讨论泥岩的细微观结构。泥岩中黏土颗粒含量较高, 这些细小的黏土颗粒构成了较大的集粒, 相互交织定向排列, 呈絮

凝状结构, 单元体以细小颗粒构成了较大的集粒, 它们相互交织呈定向排列, 这种结构反映了泥岩主要由黏土矿物组成的特性, 其孔隙存在于絮凝状结构之间, 分布较为均匀。泥岩中黏土矿物可分为晶态和非晶态, 非晶态黏土矿物有水铝英石、伊毛缟石、硅铁石、蛋白石等。泥岩中的石英、云母、长石等构成了泥岩的粗粒部分, 而黏土颗粒则充填在这些粗粒之间, 起到了胶结的作用, 从而形成了粗颗粒骨架 - 黏粒絮凝结构。其中每个小的片状颗粒又是由更小的片状颗粒组成。这些颗粒呈片状, 并且形状较为规则, 基本为多边形薄片状结构, 它们是高岭石晶体颗粒, 结构松散, 孔隙较多较大, 呈面 - 面接触或点 - 面接触的结构。其形成的主要原因是泥岩长期受上覆岩体的重力作用以及频繁的地质构造运动的影响, 使矿物晶体定向排列, 形成了较为有序的薄片状微结构, 同时使矿物颗粒在接触处胶结, 这种胶结连结在应力的作用下容易发生破坏, 颗粒间产生错动, 从而使泥岩损伤软化。而泥岩硬化的细微观机制已在前文中阐述过。

由本文的试验结果和高延法等^[12]的试验结果表明, 蠕变过程存在硬化和损伤 2 种效应。硬化效应, 是微孔不断闭合及弱相不断被压缩, 可变形结构强度不断提高的结果。损伤效应是泥岩胶结连结在外力的作用下容易发生破坏, 颗粒间产生错动, 不断发展最终出现宏观裂纹。高延法等^[12]还针对某些试验分别给出过量化的硬化和损伤曲线。任建喜等^[15]也给出过类似的反映损伤的 CT 数变化曲线。本文通过分析总结前人研究成果, 并结合本文试验结果, 给出蠕变曲线、硬化和损伤综合曲线示意图(见图 4)。以下结合图 4 分别从蠕变的 3 个阶段讨论整个蠕变的发生和发展过程, 即讨论蠕变机制:

① 蠕变第一阶段: 初始蠕变阶段

在初始蠕变阶段, 应力使岩石原有的开口裂隙或者微孔逐渐接近闭合。因为在泥岩内的颗粒之间含有大量的黏土类胶结填充物, 这些物质具有很强的压缩变形能力, 经应力作用, 胶结物发生压缩, 产生硬化现象, 宏观上表现为强度不断提高, 同时损伤有所发展, 但相对较弱。所以总体上这一阶段虽然有一定的损伤效应但是硬化效应相对较强, 表现为泥岩的蠕变速率随时间增长而降低, 即第一阶段的蠕变规律主要服从于硬化效应的衰减变化规律。图 4 中硬化曲线趋于基本稳定的拐点 A, 即为

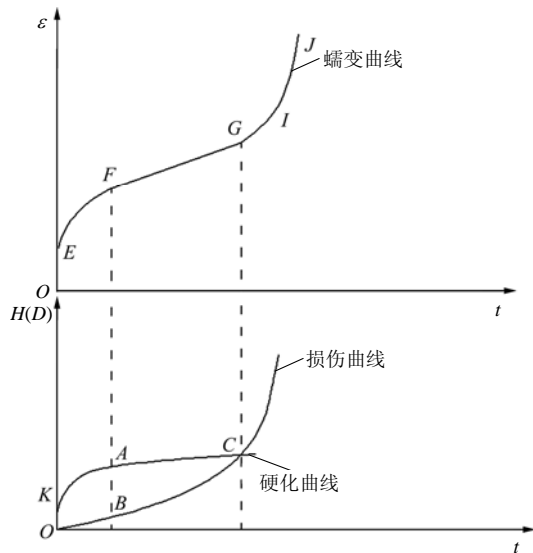


图4 蠕变、硬化和损伤综合曲线示意图

Fig.4 Sketch of creep, damage and hardening curves

对应蠕变曲线的第一个拐点 *F*。

② 蠕变第二阶段：等速蠕变阶段

在蠕变第二阶段，随着应力的不断调整，微裂隙开始扩展，但第二阶段微裂隙扩展是等速的。侯公羽^[11]指出，该阶段的损伤发展几乎与时间呈线性关系。在这一阶段中，硬化效应在岩块内局部仍有作用，但对蠕变的发展影响不大。所以总体上这一阶段虽然有一定的硬化效应但是损伤效应相对较强，表现为泥岩的蠕变速率随时间等速变化，即第二阶段的蠕变规律主要服从于损伤效应的等速变化规律。图4中损伤曲线趋于加速发展的拐点 *C*，即为对应蠕变曲线的第二个拐点 *G*。

③ 蠕变第三阶段：加速蠕变阶段

在蠕变第三阶段，随着应力的进一步调整，微裂隙进一步扩展，但第三阶段微裂隙扩展是加速的。进入第三阶段后，硬化效应已不显现，表现为泥岩的蠕变速率随时间加速变化，即第三阶段的蠕变规律服从损伤效应的加速变化规律。

3 泥质软岩与金属蠕变机制的区别

金属材料的蠕变机制主要有位错滑移、原子扩散和晶界滑动。位错滑移蠕变机制是由位错的滑移、塞积、攀移等使材料产生蠕变变形；原子扩散蠕变机制是指在应力作用下材料内部原子和空位发生有规律的热激活扩散而产生蠕变变形；晶界滑动蠕变机制是指晶界在应力的作用下，晶界的相对滑动而引

起变形产生蠕变。

泥质软岩的蠕变机制则主要是岩石损伤与硬化效应共同作用的结果。所以，泥质软岩的蠕变与金属蠕变机制上的区别为：

(1) 二者参与蠕变的对象属于不同的数量级。金属蠕变的参与对象主要是位错、原子、空位和晶界，而泥质软岩的蠕变的参与对象主要是微裂隙、微孔、颗粒。

(2) 二者在机制上也有不同，金属材料的蠕变是由位错滑移、原子扩散和晶界滑动所引起的，而泥质软岩的蠕变则主要是由岩石损伤与硬化效应共同作用产生的。

4 结 论

(1) 无侧限条件下蠕变瞬时应变增量随应力增加而减小，蠕变过程中出现了岩石的硬化现象。有侧限蠕变与无侧限蠕变的区别在于有侧限条件下第一初始蠕变阶段可分2个阶段，即速率较快阶段和速率相对较慢阶段。

(2) 根据蠕变试验及扫描电镜试验结果，结合前人的研究成果认为：蠕变过程中的硬化效应是微孔不断闭合及弱相不断被压缩，可变形体强度不断提高的结果；损伤效应是泥质软岩胶结连结在应力的作用下容易发生破坏，颗粒间产生错动，不断发展最终出现宏观裂纹。

(3) 泥质软岩的蠕变机制是蠕变过程中损伤效应与硬化效应共同作用的结果。第一阶段初始蠕变有一定的损伤效应但是硬化效应相对较强，表现为泥质软岩的蠕变速率随时间增长而降低，即第一阶段的蠕变规律主要服从于硬化效应的衰减变化规律。第二阶段等速蠕变有一定的硬化效应但是损伤效应相对较强，表现为泥质软岩的蠕变速率随时间等速变化，即第二阶段的蠕变规律主要服从于损伤效应的等速变化规律。第三加速蠕变阶段硬化效应已不显现，表现为泥质软岩的蠕变速率随时间加速变化，即第三阶段的蠕变规律服从损伤效应的加速变化规律。泥质软岩的蠕变机制与金属蠕变机制不同。

参考文献(References):

[1] 王思敬, 杨志法, 傅冰俊. 中国岩石力学与工程的世纪成就[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.(WANG Sijing, YANG Zhifa, FU Bingjun.

- Century achievement of rock mechanics and rock engineering in China[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.(in Chinese))
- [2] GRIGGS D T. Creep of rocks[J]. Journal of Geology, 1939, 47: 225 - 251.
- [3] SCHOLZ C H. Experimental study of the fracturing process in brittle rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(2): 1 447 - 1 454.
- [4] LANGER M. Rheological behavior of rock masses[C]// Proceedings of the 4th International Congress on Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1979: 29 - 62.
- [5] 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))
- [6] 王子潮, 王绳祖. 中下地壳温度压力条件下岩石半脆性蠕变的试验研究[J]. 地震地质, 1990, 12(4): 335 - 342.(WANG Zichao, WANG Shengzu. Experimental study of semi-brittle behavior of rocks at temperature and pressure corresponding to middle-lower crust[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4): 335 - 342.(in Chinese))
- [7] 谷耀君. 黄河小浪底细砂岩单轴压缩蠕变性质的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1986, 5(4): 343 - 358.(GU Yaojun. A study of creep properties of Xiaolangdi fine sandstone under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1986, 5(4): 343 - 358.(in Chinese))
- [8] 范秋雁, 朱维申. 软岩最优支护计算方法[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 77 - 82.(FAN Qiuyan, ZHU Weishen. Method of calculating optimum support for soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 77 - 82.(in Chinese))
- [9] 陈有亮, 孙 钧. 岩石的蠕变断裂特性分析[J]. 同济大学学报, 1996, 24(5): 504 - 508.(CHEN Youliang, SUN Jun. Characters of rheological fracture of rock[J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(5): 504 - 508.(in Chinese))
- [10] 任建喜, 葛修润. 岩石蠕变损伤扩展机制细观分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增 1): 871 - 874.(REN Jianxi, GE Xiurun. Primary study of meso-law of creep damage propagation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.1): 871 - 874.(in Chinese))
- [11] 侯公羽. 岩石蠕变变形的混沌特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1 909 - 1 914.(HOU Gongyu. Study of chaotic characteristics of rock creep[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1 909 - 1 914.(in Chinese))
- [12] 高延法, 范庆忠, 崔希海, 等. 岩石流变及其扰动效应试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.(GAO Yanfa, FAN Qingzhong, CUI Xihai, et al. Experimental study of the perturbation effect of rock rheology[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese))
- [13] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 391 - 396.(FAN Qingzhong, GAO Yanfa. Study of creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391 - 396.(in Chinese))
- [14] 章根德, 何 鲜, 朱维耀. 岩石介质流变学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1 - 378.(ZHANG Gende, HE Xian, ZHU Weiyao. Rheology of rock media materials[M]. Beijing: Science Press, 1999: 1 - 378.(in Chinese))
- [15] 任建喜, 葛修润, 杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机制 CT 实时试验[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 130 - 133.(REN Jianxi, GE Xiurun, YANG Gengshe. CT Real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 130 - 133.(in Chinese))