

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0074-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.017

基于砂岩蠕变试验的非线性蠕变模型辨识研究

余健^{1,2}, 王晴^{1,2}, 付世荣³, 朱其志^{1,2}, 刘思利^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 310014)

摘要: 为了研究砂岩的蠕变特性, 利用全自动三轴伺服仪对砂岩试样进行 10 MPa 围压下的常规三轴试验和蠕变试验。为有效描述蠕变全过程, 提出了一种含分数阶导数的非线性蠕变模型并进行验证。结果表明: 在蠕变衰减、稳定阶段, 试样环向蠕变速率和轴向蠕变速率比较接近; 在蠕变加速阶段, 试样的蠕变速率迅速增大, 环向较轴向先发生加速蠕变, 且环向加速蠕变速率更大, 稳定蠕变速率随着应力水平的增大而增大, 环向稳定蠕变速率增幅较轴向大, 可见环向蠕变速率受应力水平影响更大, 建立的含分数阶导数的非线性蠕变模型能较好模拟蠕变全过程, 具有较高的准确性。

关键词: 砂岩; 蠕变; 分数阶; 非线性

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Study on Identification of Nonlinear Creep Model Based on Creep Tests of Sandstone

YU Jian^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, FU Shirong³, ZHU Qizhi^{1,2}, LIU Sili^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics & Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the creep characteristics of sandstone, the conventional triaxial and creep experiments of the sample under 10MPa confining pressures were carried out by using the full-automatic triaxial servo. On this basis, in order to simulate the whole creep process effectively, a nonlinear creep model with fractional derivatives is proposed and verified. The results show that the cyclic creep rate and axial creep rate of the specimens are close at the creep attenuation and stabilization stage. In the creep acceleration stage, the creep speed of the sample increases sharply. The accelerated creep occurs in the annular direction before in the axial direction, and the cyclic acceleration creep rate is higher. In addition, it was found that the steady-state creep speed increased with the increase of stress level, and the annular steady creep speed increased more quickly than the axial creep speed, suggesting that the annular creep speed was much more affected by stress level. The non-linear creep model with fractional derivative established in this paper can simulate the whole creep process well and has high accuracy.

Key words: sandstone; the creep experiments; fractional derivatives; nonlinear

随着岩体工程规模的不断增大, 岩石力学特性越来越受到研究者的关注。李永盛等^[1]对 4 种强度不一的岩石材料进行单轴压缩蠕变和松弛试验, 探究了岩石的蠕变和松弛规律; 杨圣奇等^[2]基于大理岩常规三轴试验, 发现岩石破坏应变能随着围压的增大而增大, 峰值应变与围压呈线性关系; 赵国

彦等^[3]进行三种不同应力路径下的三轴卸荷试验, 发现卸荷前围压越大, 卸荷释放的能量越大; 徐慧宁等^[4]以粉砂质泥岩进行三轴压缩试验, 表明围压越高, 长期强度越高; 蠕变类型与偏压高低相关。此外, 国内外很多学者^[5-9]对不同岩性、不同路径下的岩石进行了试验研究。

收稿日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679068); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501100)

作者简介: 余健(1996-), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 从事岩石力学与岩土工程方面的研究。

本文以砂岩为研究对象,进行了10 MPa围压下的常规三轴试验和单级加载蠕变试验,通过常规三轴试验为蠕变试验提供基本力学参数,然后对试样的力学特性进行研究分析,描述了试样的轴向变形、环向变形、蠕变速率等特性。同时,提出一种含分数导数的非线性蠕变模型来模拟蠕变全过程,并利用试验数据进行验证。

1 岩石单轴蠕变力学试验

1.1 试验仪器及试样准备

本文试验使用的是全自动岩石三轴伺服仪,主要由三轴压力室、围压伺服泵、轴压伺服泵、气渗系统、水压伺服泵、加热装置、超声波测试系统和计算机控制系统组成。可以进行常规单、三轴试验、三轴排水、不排水试验、蠕变试验等,最大偏压可以施加到500 MPa,最大围压可施加到150 MPa,测量精度可达0.01 MPa,如图1所示。



图1 全自动岩石三轴伺服仪

Fig.1 Full-automatic triaxial rock servo

试样为砂岩,采自云南武定县,所有试样均取自于同一岩块的同一区域,均质结构,岩性完整。试样为标准圆柱状样,尺寸为50 mm×100 mm(直径×高度),平均密度为2.43 g/cm³,孔隙率为7.2%。试样两端直径偏差不超过0.2 mm,端面平整度误差不大于0.05 mm,如图2所示。

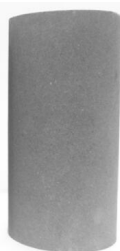


图2 砂岩试样

Fig.2 Sandstone sample

1.2 试验方案和方法

本文试验均在河海大学岩土工程双创团队试验室内进行,试验室温度控制在 $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 内,以减小温度对试验数据的影响。制定2组试验方案:(1)对天然状态下的砂岩进行10 MPa围压下的常规三轴试验;(2)进行围压10 MPa下的砂岩蠕变试验研究,偏压等级分别为:117 MPa、118 MPa、119 MPa。

试验时,加载围压至目标值并维持恒定,加载速率为3 MPa/min。待围压、温度稳定后,加载偏压。对于常规三轴试验:采用轴向位移控制方式加载,加载速率为0.02 mm/min,直至试样破坏;对于单级加载蠕变试验:采用轴向应力控制方法加载偏压至目标值,加载速率为0.3 MPa/min,保持偏压、温度稳定,直至试样破坏。

1.3 试验结果及分析

1.3.1 常规试验结果

根据常规三轴试验方案,在10 MPa围压下进行了3个试验,以减少试样的差异性造成的误差。表1描述了三个不同试样在围压10 MPa下的弹性模量 E 、泊松比 ν 、偏压 $\sigma_1-\sigma_3$ 、峰值强度 σ_c 、峰值轴向应变 ε_1 、峰值侧向应变 ε_3 等力学参数,并求其平均值。

1.3.2 蠕变试验结果及分析

蠕变试验采用的是单级加载法,把偏应力分别加载到目标值117 MPa、118 MPa、119 MPa。这种加载方式易于操作,和实际工程效果比较接近。如图5所示。由图可知,试样的蠕变特性较为一致。

试样单级加载蠕变试验一般会经历衰减蠕变I、稳定蠕变II及加速蠕变III阶段^[10-11]。在偏压119 MPa下的蠕变全过程曲线如图6所示,以此为例进行分析,试样在10 MPa围压下有如下特性:

(1) 轴向应变:当偏压加载至目标值119 MPa,试样先进入衰减阶段,该阶段持续时间较短,为0.28 h,应变增量较小,为0.123%。蠕变速率趋于定值,进入稳定阶段,这一阶段用时12.25 h,占整个蠕变过程的96.8%,变形增量为0.250%。而后变形迅速增加,进入加速阶段至试样破坏,整个过程仅用时0.12 h,变形增大至1.243%。

(2) 环向应变:总体而言,环向应变较轴向小,且应变变化和轴向应变类似。偏压加载至目标值119 MPa进入衰减阶段。这个过程持续时间较短,0.28 h后变形增大至0.343%,进入稳定阶段,环向变形速率稳定。与轴向变形比较可知,环向变形早

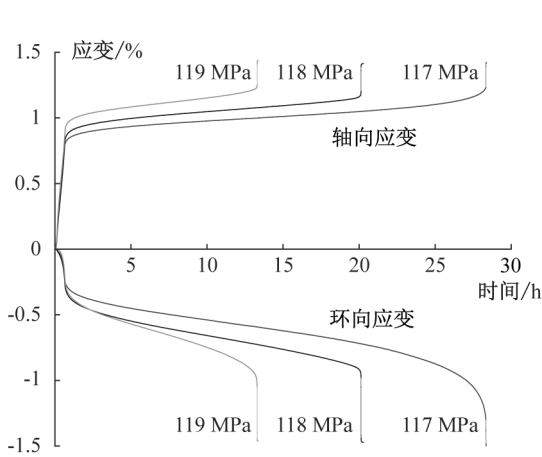


图3 不同强度下的试样蠕变试验应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of creep tests of specimens of different strength

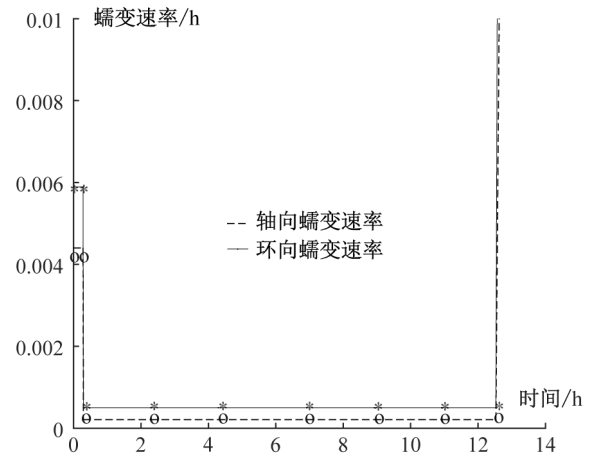


图5 围压 10 MPa 下偏压 119 MPa 的蠕变速率与时间关系
Fig.5 The relation between creep rate and time with a bias of 119 MPa at a confining pressure of 10 MPa

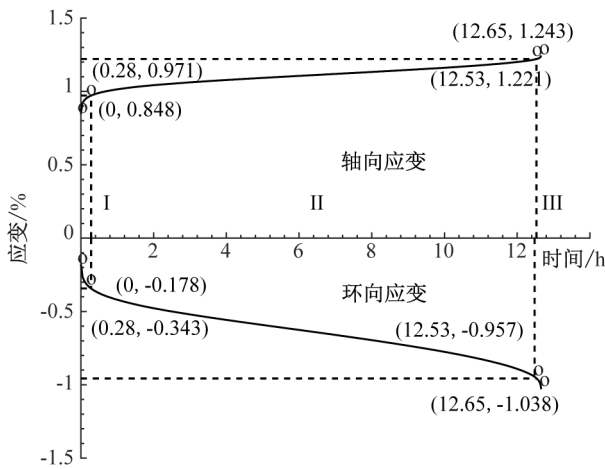


图4 围压 10 MPa 下的 119 MPa 蠕变全过程曲线
Fig.4 Creep curve of 119 MPa under confining pressure of 10 MPa

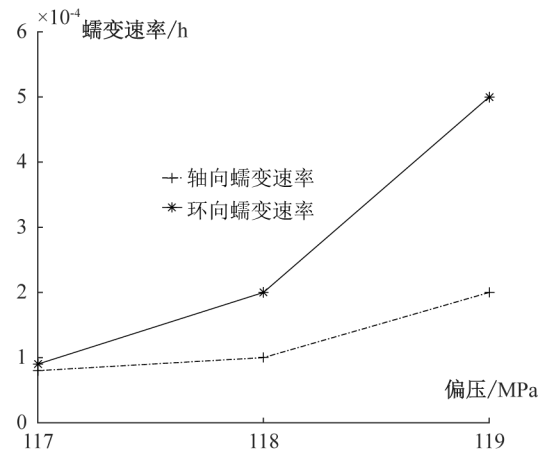


图6 试样蠕变速率与应力水平的关系
Fig.6 Relation between creep rate and stress level

于 12.53 h 进入加速阶段, 速率更快, 变形增量更大。可见, 环向变形更能反映蠕变加速特性。

(3) 蠕变速率: 图 5 描述了试样蠕变速率-时间曲线。对比可知, 在衰减、稳定阶段环向蠕变速率与轴向蠕变速率比较接近。加速阶段时, 环向加速蠕变速率可达到 0.035 78/h, 轴向可达到 0.01 442/h, 大于其他阶段蠕变速率, 且环向加速蠕变速率较轴向大, 这是岩石扩容至破坏的原因之一。由此可见, 环向蠕变速度应当更加重视。

图 6 描述了稳定蠕变速率与偏压的大小关系图。从图中可知, 围压一定, 稳定蠕变速率随着偏压增大而增大, 轴向蠕变速率由 8×10^{-4} /h 增大到 11×10^{-4} /h, 环向蠕变速率由 7×10^{-4} /h 增大到 4×10^{-3} /h, 可见环向蠕变速率受应力水平影响更大。

表 1 围压 10 MPa 下试样常规三轴压缩试验力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of conventional triaxial compression test under confining pressure of 10 MPa

编号	围压 /MPa	$\sigma_1-\sigma_3$ /MPa	σ_c /MPa	$\varepsilon_1/10^{-3}$	$\varepsilon_3/10^{-3}$	E/GPa	ν
F3	10	124.5	134.5	10.565	6.690	16.087	0.182
F1	10	124.2	134.2	10.379	6.462	16.257	0.190
F2	10	127.6	137.6	10.779	7.650	16.257	0.195
平均值	10	125.4	135.4	10.574	6.934	16.200	0.189

2 非线性蠕变模型建立及验证

2.1 含分数阶导数的非线性蠕变模型建立

在偏压加载初期，试样会出现压密阶段然后进入线弹性阶段。故引入一个硬化函数 $E(\sigma, t)$ 来模拟蠕变开始时的变形。在孙凯等^[12]人的研究中，分数阶阶数取值不同时模拟蠕变不同阶段，故提出一种含分数阶导数的非线性蠕变模型，如图 7 所示。

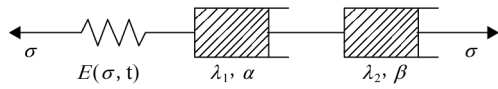


图 7 含分数阶导数的非线性蠕变模型

Fig.7 Nonlinear creep model with fractional derivatives

其中： $E(\sigma, t)$ 表示材料强度； λ_1, α 分别为粘弹性分数阶元件的元件常数和分数阶阶数，且 $0 < \alpha < 1$ ，可用来描述蠕变衰减、稳定阶段； λ_2, β 分别为粘塑性分数阶元件的元件常数和分数阶阶数，且 $\beta > 1$ ，可用来描述蠕变加速阶段。

2.2 模型本构方程推导

对于硬化函数，取其经典表达式可得：

$$E(\sigma, t) = E_0 \sigma^\eta t^n \quad (1)$$

其中： $E(\sigma, t)$ 为材料强度， E_0 为初始强度， σ 为应力， t 为时间， η, n 为材料常数。由前面分析可知，本文所用材料强度与时间无关，故取 $n=0$ 。

对于分数阶理论，采用 Riemann-Liouville 型分数阶微积分算子理论，其微分形式为：

$$D^r f(t) = \frac{1}{\Gamma(r)} \int_0^t f(t-\tau)^{r-1} f(\tau) d\tau \quad (2)$$

其中： $t > 0, r \in R^+, \Gamma(r) = \int_0^\infty t^{r-1} e^{-t} dt$ 为 Gamma 函数。

其积分形式与 r 相关，当 $r=Z$ (整数) 时，

$$D^r f(t) = \frac{d^r [f(t)]}{dt^r} \quad (3)$$

当 $Z-1 < r < Z$ 时，

$$D^r f(t) = \frac{d^a}{dt^a} \frac{1}{\Gamma(a-r)} \int_0^t f(t-\tau)^{a-r-1} f(\tau) d\tau \quad (4)$$

用分数阶微分形式表示本构方程，如式 (5)：

$$\sigma(t) = \frac{\xi d^\beta \epsilon(t)}{dt^\beta} \quad (5)$$

其中： ξ 和 β 均为材料常数。单级加载蠕变过程中，保持偏压为定值，故当 $\sigma(t)=\text{const}$ 时，对式 (5) 两边进行分数阶积分，可得蠕变本构方程为：

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{\xi} \frac{t^\beta}{\Gamma(1+\beta)} \quad (6)$$

(1) 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时，试样仅出现衰减、稳定蠕变，不会出现加速蠕变，则本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E(\sigma, t)} + {}_0D_t^{1-\alpha} \left(\frac{\sigma}{\gamma_1} \right) \quad (7)$$

其中： $\dot{\epsilon}$ 和 $\dot{\sigma}$ 分别为应变和应力的一阶导数。

对式 (7) 进行积分，得本构方程为：

$$\epsilon = \frac{\sigma^{1-\eta}}{E_0} + \frac{\sigma}{\lambda_1} \frac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} \quad (8)$$

(2) 当时，试样会产生加速蠕变，则本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E_0} + {}_0D_t^{1-\alpha} \left(\frac{\sigma}{\gamma_1} \right) + {}_0D_t^{1-\beta} \left(\frac{\sigma - \sigma_s}{\gamma_2} \right) \quad (9)$$

对式 (9) 进行积分，得到本构方程为：

$$\epsilon = \frac{\sigma^{1-\eta}}{E_0} + \frac{\sigma}{\lambda_1} \frac{t^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\lambda_2} \frac{t^\beta}{\Gamma(1+\beta)} \quad (10)$$

2.3 模型验证

为了分析本文所建立的非线性蠕变模型的准确性和合理性，了解该模型对于蠕变全过程尤其是加速蠕变阶段的适用性，现利用本文的蠕变试验数据进行模拟验证，拟合结果如图 8 所示。根据结果可知，本文提出的非线性蠕变模型能较好的描述蠕变试验的全过程，证明了模型的准确性与合理性，对于蠕变模型的研究具有一定的参考价值。

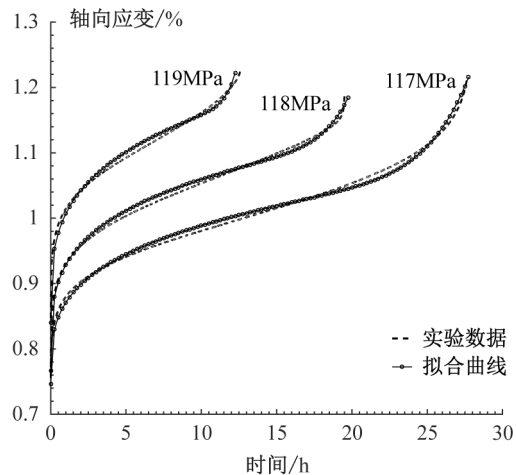


图 8 非线性蠕变损伤模型的拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of nonlinear creep damage model

3 结论

1) 单级加载蠕变试验中，围压一定，蠕变时间随着应力水平的降低而延长。比较发现，稳态蠕变速率随着应力水平的增大而增大，轴向由 0.008% 增大到 0.020%，环向由 0.009% 增大到 0.050%，可见环向蠕变速率受应力水平影响更大。同时，发现蠕变衰减阶段和稳定阶段的环向蠕变速率和轴向蠕变速率比较接近，蠕变加速阶段时环向较轴向先产生加速蠕变，且蠕变速率较轴向大，故环向加速蠕变

更能体现加速蠕变特性。

2) 本文基于分数阶理论, 引入硬化函数, 提出了一种含分数阶导数的非线性蠕变模型。经验证, 该模型能较好的描述蠕变全过程。

参考文献:

- [1] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 39-47.
- [2] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136-142.
- [3] 赵国彦, 戴兵, 董陇军, 等. 不同应力路径下岩石三轴卸荷力学特性与强度准则研究[J]. 岩土力学, 2015(11): 3121-3127.
- [4] 徐慧宁, 庞希斌, 徐进, 等. 粉砂质泥岩的三轴蠕变试验研究[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(1): 69-74.
- [5] 崔臻, 侯靖, 吴旭敏, 等. 脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工

程学报, 2014, 33(5): 983-995.

- [6] 季晶晶, 李祥. 脆性砂岩预制裂隙扩展破坏过程试验研究[J]. 河南科学, 2018, 36(4): 547-553
- [7] 张龙云, 张强勇, 杨尚阳, 等. 硬脆性岩石卸荷流变特性及拟合回归分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(1): 6-11.
- [8] 张建智, 俞缙, 蔡燕燕, 等. 渗水膨胀岩隧洞黏弹塑性蠕变解及变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2195-2202.
- [9] 王延宁, 陈运涛, 黄玉龙, 等. 侧向约束条件下砂岩的压缩蠕变特性研究[J]. 金属矿山, 2010(7): 14-18.
- [10] 殷德顺, 任俊娟, 和成亮, 等. 一种新的岩土流变模型元件[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1899-1903.
- [11] 肖世武. 基于分数阶导数的静态黏弹性本构模型与应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2011.
- [12] 孙凯, 陈正林, 陈剑, 等. 基于分数阶导数的冻土蠕变本构模型[J]. 地下空间与工程学报, 2018(1).

(责任编辑 李新)

(上接第73页)

- [16] 杜乃正. 抚顺煤田中的木化石[J]. 化石, 1982, (3): 4.
- [17] 李东津, 吴昌桓. 吉林省中东部晚中生代含煤地层中的木化石[J]. 世界地质, 2007, 26(3): 267-272.
- [18] 张景森, 翟艳超, 高明尚, 等. 邯郸洪山金矿化区石英脉流体包裹体特征[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4): 98-103.
- [19] 孙熠. 河北邯邢地区早白垩世岩浆作用及成矿意义[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016.
- [20] 左永朝, 李冲. 梧桐庄矿突水机理分析及治理对策[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(12): 27-30.
- [21] 王夕明, 张景森, 张静, 等. 磁西煤系下岩溶热水水文地球化学特征及成因[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2009, 26(3): 97-101.
- [22] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust [M]. In: RUDNICK R L (ed). The Crust, Treatise on Geochemistry 3. Amsterdam: Elsevier, 2003, 1-64.
- [23] MCDONOUGH W F, SUN S-S. The composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 1995, 120(3-4): 223-253.
- [24] 常海亮. 准噶尔盆地西北缘乌尔禾地区下二叠统风城组喷流岩成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [25] 张帮禄, 彭建堂, 阳杰华, 等. 康家湾铅锌矿床方解石的稀土元素和碳-氧同位素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2018, 38(1): 25-35.

- [26] MIAO L, XU R S, MA Y L, et al. Geochemistry and biogeochemistry of rare earth elements in a surface environment (soil and plant) in South China [J]. Environmental Geology, 2008, 56, 225-235.
- [27] 赵存良. 邯邢矿区煤中伴生矿产及微量元素研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- [28] 黄智龙, 李文博, 陈进, 等. 云南会泽超大型铅锌矿床构造带方解石稀土元素地球化学[J]. 矿床地质, 2003, 22(2): 199-207.
- [29] 刘淑文, 李荣西, 刘云华, 等. 陕西南郑马元铅锌矿床热液白云石地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(6): 1083-1093.
- [30] 辛雨萌, 赵云云, 金超, 等. 邯邢石盒子组黏土岩矿物学与地球化学特征[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(3): 70-75.
- [31] 朱笑青, 王中刚, 黄艳, 等. 磷灰石的稀土组成及其示踪意义[J]. 稀土, 2004, 25(5): 41-45.
- [31] ADACHI M, YAMAMOTO K, SUIGISK I R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the Northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47: 125-148.
- [32] 王义昭. 缅甸硅化木“树化玉”的成因[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1628-1637.

(责任编辑 李新)