

文章编号: 1001-4888(2018)05-0757-12

加载速率与环境温度对黏土岩力学性质的影响*

何松, 薛凯喜, 胡艳香, 邹玉亮, 常留成, 李世鹏

(东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西南昌 330013)

摘要: 利用 SHT4305 伺服压力机系统, 对黏土岩试样分别在 0.1MPa/s、0.3MPa/s、0.5MPa/s、0.7MPa/s、0.9MPa/s 的加载速率和 25℃、55℃、85℃、115℃、145℃ 的环境温度下实施单轴压缩试验, 分析了不同加载速率和不同环境温度对黏土岩的峰值强度、弹性模量、应变状态、破裂形式、反应过程以及变化机制的影响。研究发现, 黏土岩试样在不同加载速率和环境温度作用下, 破坏过程经历压密、弹性、塑性、破坏四个阶段, 其中塑性阶段差异化明显。黏土岩峰值强度与加载速率近似线性相关; 在环境温度的作用下, 黏土岩峰值强度与弹性模量随温度的增加呈现出先增大后减小的趋势。上述研究结果对高放核废物处置库选址等领域备选具有重要的理论意义和参考价值。

关键词: 黏土岩; 温度; 加载速率; 单轴压缩; 力学性质

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-160

0 引言

黏土岩是一种含有大量黏土矿物的沉积岩, 近年来, 由于全球对高放核废物地质处置的高度关注, 黏土岩因具有较低的渗透性及较好核素吸附性等性质, 被确定为核废物地质处置备选岩体之一。理清深部黏土岩在其地层环境、深部地层掘进及处置库核废料衰变产生热量等因素影响下的变化趋势, 全面剖析黏土岩在温度及应力变化下的力学响应特征是地下废物处置工程建设的先行关键工作。

在岩石力学相关领域, 岩石在不同加载速率和温度条件下的力学性质一直都是重点研究方向。国内外关于加载速率及温度的相关研究已有部分成果, 且大部分加载速率均是基于控制应变速率来完成的, 控制应力加载速率的相对较少。Sang 等^[1]研究了在不同加载速率下凝灰岩和花岗岩强度的变化情况, 结果表明随着应变速率不断增加, 岩石的动态抗拉强度大大增加; 尹小涛等^[2]、苏承东等^[3]分别用数值模拟和试验的方法研究了加载速率对岩石材料力学行为的影响, 结果均表明岩石峰值强度与应变加载速率呈正相关性; 纪文栋等^[4]、任兴涛等^[5]分别研究了盐岩和花岗岩在不同应变加载速率下力学性能的变化, 结果表明盐岩及花岗岩的抗压强度均随着加载速率的提高而增大; 查文华等^[6]、陈国飞等^[7]、张志镇等^[8,9]先后在不同温度条件下对砂质泥岩、大理岩、花岗岩进行了相关研究, 结果显示随着温度的升高, 岩石的峰值强度逐渐降低; 张连英等^[10]通过对大理岩在高温环境下进行热损伤特性试验研究, 发现不同温度段岩石强度降低具有突变性, 但未对小范围突变异常进行深入分析。

在黏土岩研究领域, 学者们更关注其矿物成因、微观结构、基本力学性质参数和核废物处置方面的研究。刘群等^[11]、张素新等^[12,13]主要研究了黏土岩的矿物组成及成因; 唐朝生等^[14]、王长轩等^[15]阐述了黏土岩作为高放核废物处置备选材料的可行性问题; 张述兴等^[16]对黏土岩的微观结构进行了研究;

* 收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(41462011)、江西省科技支撑计划项目(20123BBG70214)、国防项目(科工二司[2014]1587号)

通讯作者: 薛凯喜(1981-), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 岩土工程。Email: xkx1257@foxmail.com

陈卫忠等^[17]对黏土岩在不同温度下的渗透性、剪切强度及蠕变特性等进行了相关研究;梁海安等^[18]对塔木素地区黏土岩进行了三轴试验,研究了在不同温度和围压作用下的力学特征;薛凯喜等^[19]基于前人的研究成果,对黏土岩物理力学及工程性质的研究现状进行了系统综述,同时对该领域的研究方向提出了一些建议。

鉴于此,为进一步研究环境温度和外部加载对深部黏土岩力学性质的影响,本文通过实施不同加载速率及不同环境温度作用下的室内单轴压缩试验,分析了黏土岩的强度与变形特性,对黏土岩在不同的加载速率及环境温度下的破坏规律进行了分析与探讨,以期进一步丰富该领域的相关研究成果,为高放核废物处置库选址等领域备选提供试验基础。

1 试验过程

1.1 试件制备

本次试验所采用的试样均来自于我国内蒙古自治区塔木素地区深度为 150~350m 的黏土岩,密度介于 $2.26\sim 2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 之间,结构均匀,呈灰色状。岩样主要矿物成分为云母、高岭石、蒙脱石等。由于前期地勘获取的样源为直径 70mm 的圆柱体,且该黏土岩样遇水易崩解,受高强外力易崩裂,所以本次试验参照《工程岩体试验方法标准》^[20]相关要求,采用高径比为 2 进行制样,用岩样切割机对样源进行干切处理,加工尺寸为 $\Phi 70\times 140$,如图 1 所示。



图1 黏土岩试样

Fig. 1 The clay rock sample



图2 试样编号

Fig. 2 Sample number

试件上、下两端面平行,并用磨石机进行磨平,使端面与试件轴线垂直度偏差不超过 0.25° 。考虑到试样样源深度不连续等局限性,为保证同批次黏土岩试件结果的稳定性,试验挑选样源深度相近、均匀性好、完整无裂缝的试样进行同一批次试验(见图 2)。

1.2 试验设备及条件

本次试验采用的设备主要是最大试验力为 300kN 的 MTS(SANS)SHT4305 型微机控制电液伺服万能试验机(图 3)和自主研发的实时温控装置(图 4)。其中万能试验机能够实现荷载、位移和变形的三闭环控制要求,在试验过程中可全自动控制加载、自动测量并记录压力和变形数据。实时温控装置依岩样尺寸定制而成,可以任意设定 $0\sim 150^\circ\text{C}$ 的控制温度,并设有数显屏,实时显示加温套内温度,温度的程序精准控制可以满足本试验对于温度的要求。

1.3 试验方法设计

本文通过控制加载速率和环境温度对黏土岩进行单轴压缩试验。试验加载速率设定为 $0.1\text{MPa}/\text{s}$ 、 $0.3\text{MPa}/\text{s}$ 、 $0.5\text{MPa}/\text{s}$ 、 $0.7\text{MPa}/\text{s}$ 、 $0.9\text{MPa}/\text{s}$ 五个等级(如表 1 所示),进行三组平行试验,共计 15 个试样,室内温度稳定在 25°C 。在不同环境温度下进行黏土岩单轴压缩试验时,为了真实模拟深部岩样所处环境的温度及高放核废物处理时产生的影响温度,试验环境温度分别设为 25°C 、 55°C 、 85°C 、 115°C 、 145°C 这五个等级(如表 2 所示),升温速率为 $50^\circ\text{C}/\text{min}$,为了确保黏土岩试样完全受到设定环境温度影响且内部受热均匀,同时为了防止外界环境对试验环境温度产生影响,实时温控设备放置在密闭环境中进行,并恒温 3 小时,然后在实时温度作用下进行单轴压缩试验,试验采用 $0.5\text{MPa}/\text{s}$ 的加载

速率进行加载控制。为了确保试验结果的准确性,同时又考虑到试样取样深度的差异性,每个控制温度点进行 3 次平行试验,每批次试样取样深度相近,共计 15 个试样。



图 3 SHT4305 型微机控制电液伺服万能试验机
Fig. 3 SHT4305 microcomputer control electro-hydraulic servo universal testing machine



图 4 实时温控装置
Fig. 4 Real-time temperature control device

表 1 不同加载速率下单轴压缩试验参数设计
Tab. 1 Parameter design of uniaxial compression test under different loading rates

试样 编号	加载 速率 /(MPa/s)	温 度 /°C	高 度 /mm	直 径 /mm	深 度 /m
SL1-1	0.1	25	139.56	70.13	243
SL2-1	0.3	25	140.28	70.32	243
SL3-1	0.5	25	140.11	70.21	243
SL4-1	0.7	25	139.83	70.27	235
SL5-1	0.9	25	140.45	70.19	235
SL1-2	0.1	25	139.86	70.23	257
SL2-2	0.3	25	139.79	70.12	257
SL3-2	0.5	25	140.21	69.98	259
SL4-2	0.7	25	140.13	70.17	259
SL5-2	0.9	25	140.32	70.19	262
SL1-3	0.1	25	140.10	70.26	267
SL2-3	0.3	25	140.13	70.35	268
SL3-3	0.5	25	140.41	70.12	268
SL4-3	0.7	25	139.93	70.20	268
SL5-3	0.9	25	140.25	70.05	269

表 2 不同环境温度下单轴压缩试验参数设计
Tab. 2 Parameter design of uniaxial compression test under different ambient temperature

批 次	试样 编号	温 度 /°C	加载 速率 /(MPa/s)	高 度 /mm	直 径 /mm	深 度 /m
1	WD25-1	25	0.5	138.32	70.13	132
	WD55-1	55	0.5	138.82	70.32	132
	WD85-1	85	0.5	140.64	70.21	166
	WD115-1	115	0.5	140.52	70.27	166
	WD145-1	145	0.5	139.72	70.19	180
2	WD25-2	25	0.5	140.11	70.21	243
	WD55-2	55	0.5	140.28	70.21	250
	WD85-2	85	0.5	138.93	70.27	250
	WD115-2	115	0.5	140.08	70.18	266
	WD145-2	145	0.5	139.67	70.22	266
3	WD25-3	25	0.5	139.60	70.31	313
	WD55-3	55	0.5	139.23	70.23	313
	WD85-3	85	0.5	138.75	70.20	320
	WD115-3	115	0.5	140.11	70.18	320
	WD145-3	145	0.5	139.95	70.29	320

2 试验结果及分析

2.1 加载速率对黏土岩力学性质的影响

2.1.1 加载速率对黏土岩破坏特征的影响

通过对 0.1MPa/s、0.3MPa/s、0.5MPa/s、0.7MPa/s、0.9MPa/s 这五种不同加载速率下的单轴压缩试验结果进行整理和分析,不同加载速率下黏土岩试样典型的破坏形态如图 5 所示,单轴压缩试验结果见表 3。

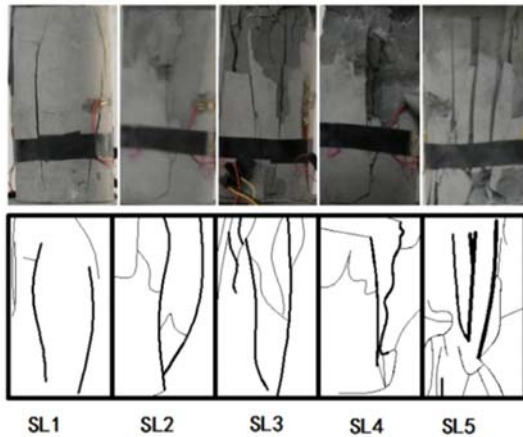


图 5 不同加载速率黏土岩试样单轴压缩破坏形态

Fig. 5 Damage morphologies of clay rock under different loading rates in uniaxial compression

从图 5 中可以看出加载速率对试样破坏形态的影响,应力加载速率在 0.1MPa/s、0.3MPa/s 时,试样破坏以细裂缝为主,随着试验时间的增长,试件表面呈现出的微小裂缝越来越多,直至破坏;当应力加载速率大于 0.5MPa/s 时,相比小的加载速率来看,前期出现微小裂缝的现象逐渐消失,更多的是在某一破坏时间点瞬时破坏,破坏时以大破坏面、大裂缝为主,加载速率越高,破坏面越密集,试验现场试样岩爆飞溅现象越严重。随着加载速率的不断增加,试样的破坏形态从局部破坏失稳逐步转变为全面破坏失稳,这一点从上述试样破坏的裂纹试样和空间形态得以印证。试样的主要破坏面呈现出“V”或“Y”型,端部有明显的张拉破坏痕迹,破裂面在水平面的投影上贯穿试样的整个断面。同时在试验后试件整理的过程中,发现 SL4-1、SL4-2、SL4-3、SL5-1、SL5-2 试样的下部有完整的锥体,这说明随着加载速率的提高,试样整体剪切破坏增强,并且试样底部呈现环状分布微裂隙均布发展共同造成锥形破坏面。

表 3 不同加载速率下黏土岩单轴压缩试验结果

Tab. 3 Experimental results of uniaxial compression of clay rock under different loading rates

加载速率 /(MPa/s)	岩样 编号	峰值强度 σ /MPa	峰值应变 $\epsilon(10^{-3})$	弹性模量 E/GPa	加载速率 /(MPa/s)	岩样 编号	峰值强度 σ /MPa	峰值应变 $\epsilon(10^{-3})$	弹性模量 E/GPa
0.1	SL1-1	9.015	9.837	0.977	0.7	SL4-1	35.52	11.893	2.702
	SL1-2	10.932	8.479	1.194		SL4-2	31.505	18.978	1.338
	SL1-3	9.354	15.508	0.703		SL4-3	43.856	22.726	1.382
	均值	9.767	11.275	0.958		均值	36.960	17.866	1.807
0.3	SL2-1	9.296	14.672	0.500	0.9	SL5-1	42.153	20.031	1.521
	SL2-2	13.896	12.901	0.891		SL5-2	46.940	15.427	2.489
	SL2-3	14.873	15.782	0.808		SL5-3	54.777	22.071	1.800
	均值	12.688	14.822	0.732		均值	47.957	19.176	1.936
0.5	SL3-1	24.365	18.938	0.921					
	SL3-2	40.137	12.369	2.956					
	SL3-3	29.149	12.220	1.687					
	均值	31.217	14.509	1.855					

2.1.2 加载速率对黏土岩全应力—应变曲线的影响

图 6、图 7、图 8 为三个不同批次黏土岩试样在不同加载速率下单轴压缩的全应力—应变曲线,从图中可以看出曲线大致经历了压密、弹性、屈服、破坏四个阶段。由于试验采用的黏土岩属于致密岩样,所以在应力—应变曲线中弹性阶段较长,屈服阶段较短。在低加载速率作用下屈服阶段明显,随着加载速

率的不断增大,试样的弹性阶段曲线斜率增大,屈服阶段逐渐消失,达到峰值后瞬时破坏,强度迅速减小,试样失去承载能力,呈现出脆性破坏模式。这说明较高的加载速率将会在峰值强度前储存更多的弹性性能,屈服阶段的消失与试样的瞬时破坏现象相一致,说明加载速率越高越容易发生脆性破坏。

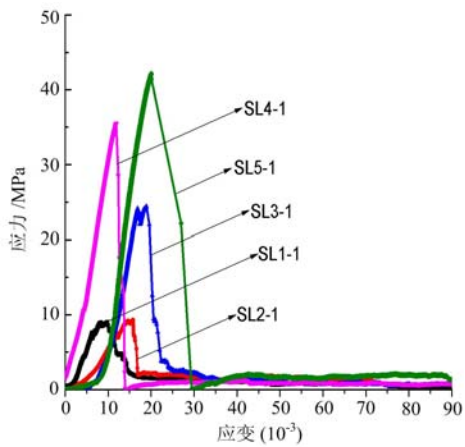


图 6 第一批次不同加载速率下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of first batch clay rock under uniaxial compression at different loading rates

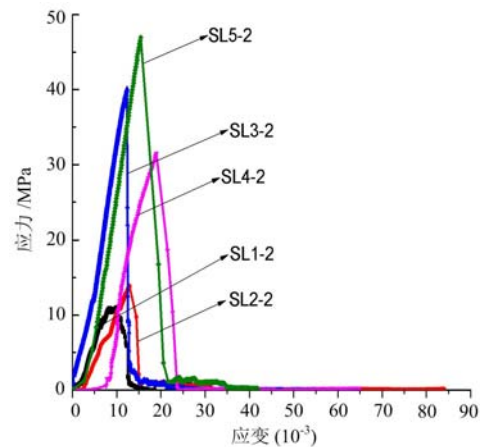


图 7 第二批次不同加载速率下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of second batch clay rock under uniaxial compression at different loading rates

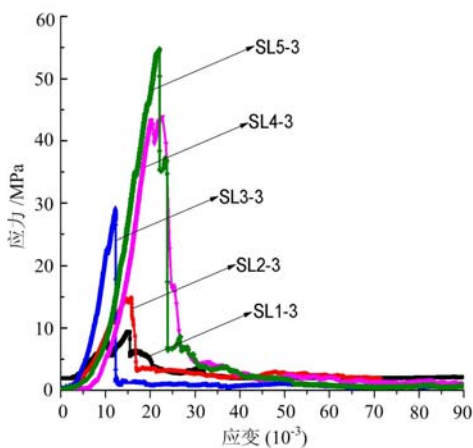


图 8 第三批次不同加载速率下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of third batch clay rock under uniaxial compression at different loading rates

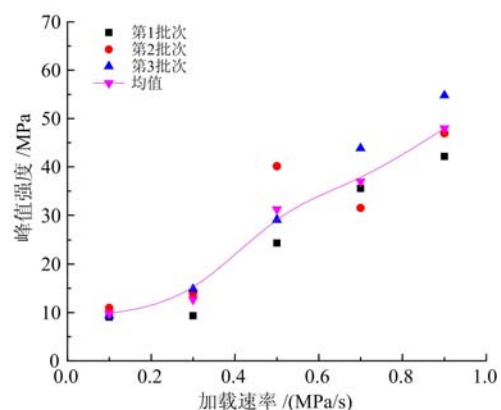


图 9 不同加载速率下黏土岩的峰值强度变化曲线
Fig. 9 Curve of peak strength of clay rock at different loading rates

2.1.3 加载速率对黏土岩峰值强度及峰值应变的影响

峰值强度可以直观地表达出在单轴压缩过程中试样所呈现出的强度大小,图 9、图 10 分别为黏土岩在不同加载速率下单轴压缩的峰值强度、峰值应变变化曲线,峰值应变为峰值强度所对应的应变值。同时为了量化分析,表 3 列出了在不同加载速率下黏土岩试样单轴压缩时的峰值强度、峰值应变、弹性模量等试验结果。从图 9 及表 3 可以看出,三批试样峰值强度均值从 9.767MPa 增长至 47.957MPa,它随着加载速率的增大而增大,且近似线性关系。这是由于加载速率较小时,细小的裂缝会发生错动和扩展;当加载速率较大时,仅有大裂缝才会发生错动和扩展。同时峰值强度随加载速率这一变化趋势的产生与高低加载速率下试样耗能方式有关,加载速率增加会使能量耗散和积聚更早发生。

同时,从图 10 中可以看出在加载速率为 0.1~0.9MPa/s 的区间范围内,三批试样的峰值应变除个

别试样在加载速率下有所波动外,其整体的变化趋势为随着加载速率的不断加,峰值应变也相应地增大。这说明试样的破坏程度随着作用在其上部的加载速率的增大而加剧。

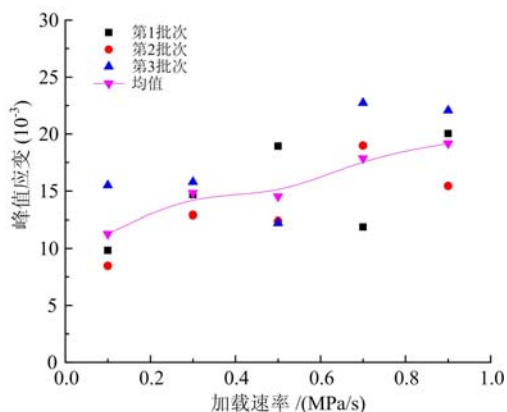


图 10 不同加载速率下黏土岩的峰值应变变化曲线
Fig. 10 Curve of peak strain of clay rock at different loading rates

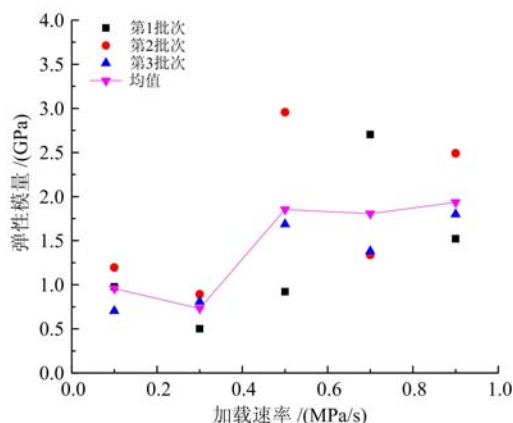


图 11 不同加载速率下黏土岩的弹性模量变化曲线
Fig. 11 Curves of elastic modulus of clay rock under different loading rates

2.1.4 加载速率对黏土岩弹性模量的影响

图 11 为黏土岩的弹性模量与加载速率的关系曲线,弹性模量反映岩石的抵抗变形的能力,本文中的弹性模量依据《工程岩体试验方法标准》^[20]采用式(1)进行计算,即应力—应变曲线峰值强度 50% 的应力值点的斜率。

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\epsilon_{50}} \quad (1)$$

式中, E_{50} 为弹性模量(MPa); σ_{50} 为峰值强度 50% 的应力值(MPa); ϵ_{50} 为与应力 σ_{50} 对应的纵向应变值。

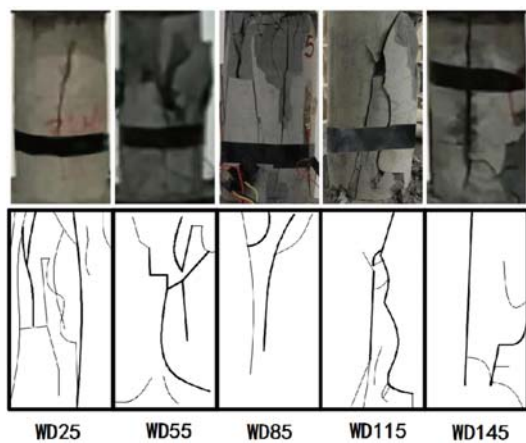


图 12 不同环境温度下黏土岩单轴压缩破坏形态
Fig. 12 Damage morphologies of clay rock under different ambient temperature in uniaxial compression

的破坏形态及破坏方式除与岩样本身因素有关外,与环境温度有很强的相关性。在不同环境温度作用下黏土岩试样的破坏形式存在显著差异,在环境温度较低的状态下,试样的破坏以大的剪切破坏面为主,呈现出“Y”型和“S”型;当环境温度较高时,试样的破坏大部分以竖向劈裂为主,极个别试样出现剪切破坏的断面,破坏面较粗糙,且内部细小裂隙较多。

表 4 列出了在不同环境温度下黏土岩试样单轴压缩时的峰值强度、峰值应变、弹性模量等试验结果。同时,为了减少试样不同深度对试验结果的差异性影响以及为了对试验结果的离散型进行分析,参

从图 11 中可以看出,各批次试样弹性模量的离散程度随着加载速率的增大而增加。从三批试样的弹性模量均值中可以看出,除 0.3MPa/s 这一加载速率波动外,其他加载速率作用下,黏土岩的弹性模量呈现出一种逐渐增大的趋势。特别是当加载速率增加到 0.5~0.9MPa/s 这一区间范围内时,弹性模量值变化趋于平缓,出现了稳中有升的现象。由 0.5MPa/s 速率时的 1.855GPa 增长到 0.9MPa/s 速率时的 1.936GPa。由此说明采用应力控制的加载速率对黏土岩的弹性模量有一定程度的影响。

2.2 环境温度对黏土岩力学性质的影响

2.2.1 环境温度对黏土岩破坏特征的影响

图 12 给出了在不同环境温度下黏土岩单轴压缩典型的破坏形态。从图中可以看出,试样的

照《岩土工程勘察规范 GB50021 2001》^[21], 采用如下的统计方法对试验结果进行统计分析:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{S}{\bar{X}} \quad (4)$$

式中, \bar{X} 为均值; S 为标准差; ζ 为变异系数。

表4 不同环境温度下黏土岩单轴压缩试验结果

Tab. 4 Experimental results of uniaxial compression of clay rock under different ambient temperature

温度/°C	岩样编号	峰值强度 σ /MPa	峰值应变 $\epsilon(10^{-3})$	弹性模量 E /GPa
25	WD25-1	14.350	19.816	0.502
25	WD25-2	24.365	18.938	0.921
25	WD25-3	33.504	12.220	1.938
25	均值	24.073	16.991	1.120
25	标准差	9.580	4.155	0.738
25	变异系数	0.398	0.245	0.659
55	WD55-1	10.455	33.747	0.556
55	WD55-2	44.080	11.890	2.934
55	WD55-3	38.238	16.007	1.724
55	均值	30.924	20.548	1.738
55	标准差	17.966	11.615	1.189
55	变异系数	0.581	0.565	0.684
85	WD85-1	10.000	16.415	1.693
85	WD85-2	53.341	10.285	4.261
85	WD85-3	51.642	14.657	2.916
85	均值	38.328	13.786	2.957
85	标准差	24.547	3.157	1.284
85	变异系数	0.640	0.223	0.434
115	WD115-1	5.009	21.542	0.204
115	WD115-2	24.957	14.577	1.283
115	WD115-3	30.432	22.715	1.346
115	均值	20.133	19.611	0.944
115	标准差	13.381	4.399	0.642
115	变异系数	0.665	0.224	0.680
145	WD145-1	7.464	15.508	0.326
145	WD145-2	23.118	17.797	0.829
145	WD145-3	13.704	8.386	1.148
145	均值	14.762	13.897	0.768
145	标准差	7.880	4.908	0.394
145	变异系数	0.534	0.353	0.513

通过表 4 可以看出,试件在 25℃时,峰值强度较低,均值达到 24.073MPa。随着温度的增加,峰值强度也相应地增加,直至 85℃达到一个峰值,随后随着温度的增加,强度急剧减小,同时自 25℃之后试样的峰值强度变异系数从 0.398 突变至 0.581 左右,并且之后变异值持续维持在这一高度,故温度在 25℃之后黏土岩内部结构发生了较大变化,且在本试验中 85℃为温度影响的临界点。

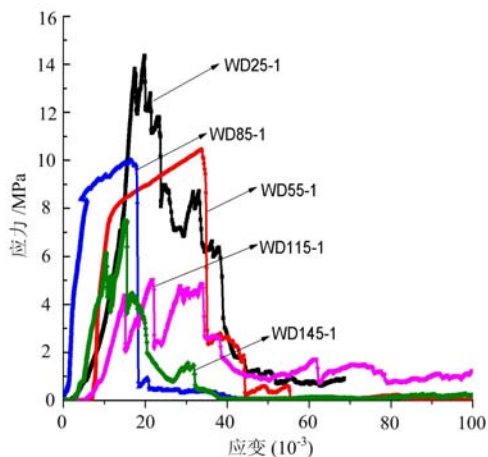


图 13 第一批不同环境温度下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves of first batch clay rock under uniaxial compression at different ambient temperatures

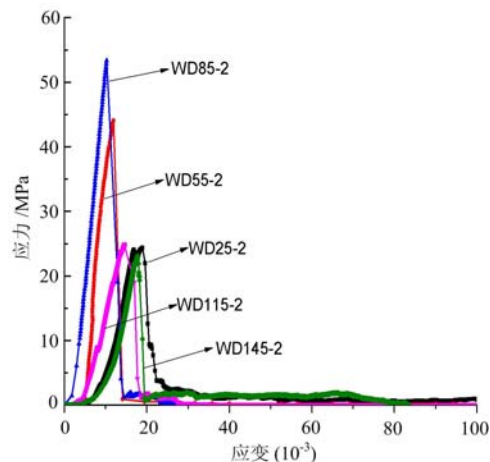


图 14 第二批不同环境温度下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curves of second batch clay rock under uniaxial compression at different ambient temperatures

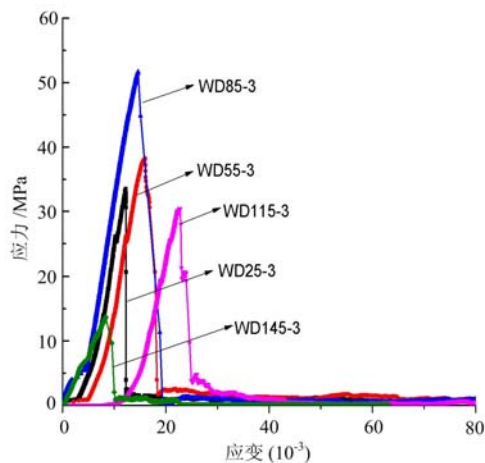


图 15 第三批不同环境温度下黏土岩单轴压缩全应力—应变曲线

Fig. 15 Stress-strain curves of third batch clay rock under uniaxial compression at different ambient temperatures

2.2.2 环境温度对黏土岩全应力—应变曲线的影响

根据黏土岩单轴压缩试验得到的轴向荷载、轴向位移数据,分析处理得到在不同环境温度影响下不同批次的黏土岩单轴压缩试验的全应力—应变曲线,如图 13、图 14、图 15 所示。从图中可以看出,在不同环境温度下黏土岩试样的全应力—应变曲线变化情况大体上可以分为四个阶段,即:1)初始压密阶段,其曲线形状为上凹形,随着应力增加变形的发展较快;2)线弹性阶段,应力应变呈线性关系;3)塑性变形阶段,这一阶段极少在第一批次的试样中体现出来,其他批次试样大部分没有塑性阶段,这一阶段试样产生了塑性变形,曲线呈现出平直线形和下凹形,黏土岩的延性明显增强,当应力达到峰值后,应变仍展示出缓慢增加的特性,但最后的破坏方式均相同;4)破坏阶段,本次试验大部分试样表现出脆性破坏。

由图 13、图 14、图 15 可以看出,图 13 与其他两个图的破坏方式差异性较大,考虑到初始试样的影响(第一批次的试样破坏后在其内部观察到部分白色斑质),其主要原因在于取样深度不同及成岩的时间与其本身的强度不同而导致,同时在第一批次黏土岩试样中为了固定其他测量线,在其中下部缠绕了一圈固定胶带,在达到峰值强度之后,胶带约束了试样碎块的脱落从而产生一定的残余应力,故第一批次黏土岩试样的单轴压缩曲线的形态稍有差异。

2.2.3 环境温度对黏土岩峰值强度及峰值应变的影响

图 16 为不同批次黏土岩试样单轴压缩的峰值强度与环境温度的关系曲线。从图中可以发现同一环境温度条件下黏土岩试样的峰值强度具有较大的离散性,这与不同批次黏土岩试样的取样深度有关,还与其内部微观构造、矿物组成、岩样密度以及试验实际操作误差有较大的关系。

从图 16 中曲线的整体变化可以看出,除第一批次试样结果外,其他两批次黏土岩的峰值强度均值随着环境温度的不断升高,呈现出先增大后减小的变化趋势。在 25~85℃ 这一温度区间范围内,随着环境温度的升高,峰值强度不断增大,从表 4 中可发现峰值强度均值从 25℃ 时的 24.073MPa 增加至 85℃ 时的 38.328MPa,增幅约为 59.216%,这是因为受到环境温度作用产生的热应力使黏土岩试样内部孔隙结构有容许变形和阻止裂纹扩展的作用,同时黏土岩中黏土矿物含量较多,黏土岩内部的矿物颗粒受热膨胀,从而减少了原生裂隙面积甚至导致其闭合形成热裂化的影响,继而黏土岩密实程度提高,强度也随之增大。在 85~145℃ 区间范围内,峰值强度随环境温度增加而减小,峰值强度均值从 85℃ 时的 38.328MPa 降低至 115℃ 时的 14.762MPa,降幅高达 61.485%,这是由于在高环境温度的作用下黏土岩内部结构热应力超过了试样的极限强度,从而内部发生破坏产生裂隙,随着温度的升高,内部裂隙会进一步扩大,裂纹数量也会相继增加,从而导致黏土岩试样的峰值强度进一步降低。另外,从图 16 中可以发现第一批次的黏土岩试样的峰值强度在随环境温度的增加而呈现出一种逐渐减小的趋势,和其他两批次差异较大,且通过比对破坏后断面内部情况发现,第一批次试样内部存在较多白色斑质,所以试样的微观组成差异或是造成第一批次试样结果规律偏差的原因。

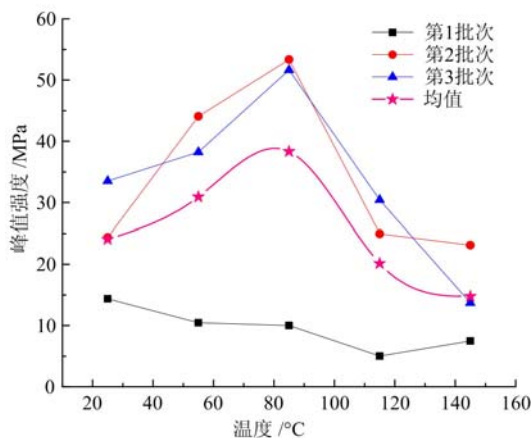


图 16 不同批次黏土岩试样峰值强度随环境温度变化曲线

Fig. 16 Curve of peak strength of different batches of clay rock with ambient temperature

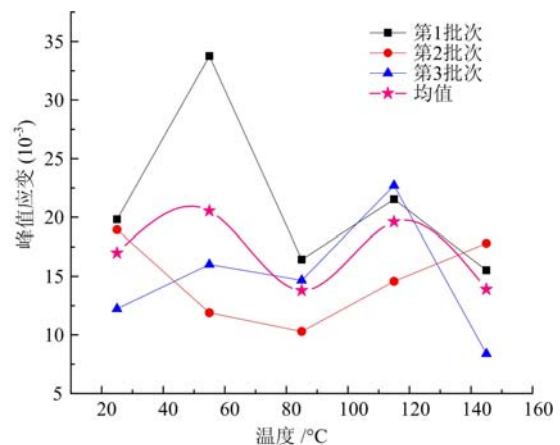


图 17 不同批次黏土岩试样峰值应变随环境温度变化曲线

Fig. 17 Curve of peak strain versus temperature in different batches of clay rock samples

不同环境温度作用后黏土岩试样的峰值应变随温度变化如图 17 所示,从图中可以看出三个批次试样的峰值应变离散性较大,第二批次试样呈现出一种随着温度增加先降低后增加的状态,而透过峰值应变均值可知整体呈现出一种震荡的状态,相关性较低。笔者认为此次环境温度的作用下黏土岩试样的峰值应变无明显变化规律,可能与试验温度范围较小有关,至于温度对岩样的峰值应变是否具有相关影响以及明显的变化规律,在今后的相关研究中,还需要对试样做更多组且温度范围跨度更大的试验来进行论证。

2.2.4 环境温度对黏土岩弹性模量的影响

为研究弹性模量与温度的关系,同时考虑到不同批次黏土岩的单轴压缩全应力—应变曲线的差异化,取应力—应变曲线峰值强度 50% 的应力值点的斜率作为弹性模量。图 18 给出了不同批次黏土岩的弹性模量与环境温度的关系以及均值的变化曲线,从图中可以看出不同批次弹性模量随环境温度起伏变化,但分布离散性不大,这表明黏土岩试样致密性与均匀性较好。大体上黏土岩弹性模量随着环境

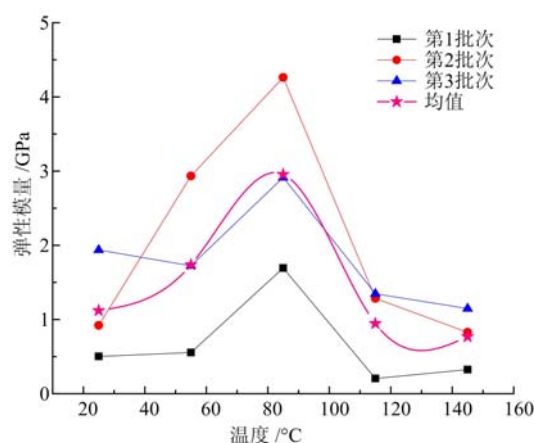


图 18 不同批次黏土岩试样
弹性模量随环境温度变化曲线

Fig. 18 Curves of elastic modulus of different
batches of clay rock with ambient temperature

温度的增加呈现出一种先增加后减小的变化趋势。在 85°C 之前,弹性模量随环境温度的增加而增加,由 1.120GPa 增加至 2.957GPa,增幅达到了 164.018%,变化显著;而在 85°C 之后,弹性模量随环境温度的增加而逐渐降低,由 2.957GPa 降低至 0.768GPa,降幅接近 74.027%,变化明显。这与黏土岩单轴压缩的峰值强度随环境温度的变化趋势相一致。

3 结论与建议

本文通过对黏土岩试样进行不同加载速率及不同环境温度下的单轴压缩试验,分析了不同加载速率及环境温度对黏土岩峰值强度、峰值应变、弹性模量及破坏形式等力学性质的影响,得到以下结论:

(1) 在不同加载速率下黏土岩单轴压缩过程先后经历压密、弹性、屈服和破坏四个阶段,大部分岩样屈服阶段极短,甚至弹性阶段发展至峰值强度后直接劈裂破坏,加载速率低于 0.5MPa/s 时试样呈现出很好的塑性阶段。

(2) 黏土岩峰值强度随着加载速率的增大而增大,呈现出近线性相关关系,这与试样内部原生裂隙错动以及不同加载速率下的耗能机制有关。峰值应变受加载速率的影响不大,在不同加载速率下弹性模量的总体变化趋势与峰值强度变化趋势相似。

(3) 加载速率越高,黏土岩试样破坏程度越高,同时端部破坏锥明显,这是剪切带及破坏裂纹同步发展造成的结果。

(4) 黏土岩力学特性与环境温度有着紧密的联系。数据表明在 85°C 出现了不同的拐点和峰值,在 25~85°C,峰值强度和弹性模量随着温度上升而增加,主要是由于黏土岩试样中产生的热应力使得原生裂隙得到闭合,抗破坏变形能力得到有效地提高;在 85°C 之后,峰值强度和弹性模量则随着温度的升高而减小,这主要是由于热应力超越了颗粒间接触力,继而内部原有裂隙进一步扩大,同时还在其内部产生新的裂纹,裂纹持续增多和扩大,导致黏土岩试样变形增大,峰值强度和弹性模量逐步降低。

在试验过程中发现,用应力控制的加载方式,试样在加载过程中破坏速度较快,不易观察试样的实时破坏动态且有一定的安全隐患,同时样源初始差异对试验结果影响较大,且不同材料岩样的基本物理力学性质变化规律差异性较大。建议在后期的相关试验中,采用位移控制方式进行试验,同时对于不同材料的岩样加大试样样品基数,严格控制试验环境及操作精准性,全面分析和总结不同岩样的基本物理力学性质参数的变化规律及差异性特点,为后续的相关研究提供可靠理论支撑。

参考文献:

- [1] Sang H C, Yuji O, Katsuhiko K. Strainrate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(5):763-777.
- [2] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2610-2615 (YIN Xiaotao, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2610-2615 (in Chinese))
- [3] 苏承东, 李怀珍, 张盛, 等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5):943-950 (SU Chengdong, LI Huaizhen, ZHANG Sheng, et al. Experimental investigation on effect of strain rate on mechanical characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5):943-950 (in Chinese))

- [4] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507—2513 (JI Wendong, YANG Chunhe, YAO Yuanfeng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12):2507—2513 (in Chinese))
- [5] 任兴涛, 周听清, 钟方平, 等. 花岗岩动态力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(6):723—730 (REN Xingtao, ZHOU Tingqing, ZHONG Fangping, et al. Experimental study for the dynamic mechanical behavior of granite[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6):723—730 (in Chinese))
- [6] 查文华, 宋新龙, 武腾飞. 不同温度条件下煤系砂质泥岩力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4):809—816 (ZHA Wenhua, SONG Xinlong, WU Tengfei. Experimental study of mechanical characteristics of coal-serial sandy mudstone at different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4):809—816 (in Chinese))
- [7] 陈国飞, 杨圣奇. 高温后大理岩力学性质及其破坏规律研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8):189—196 (CHEN Guofei, YANG Shengqi. Study on failure mechanical behavior of marble after high temperature[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8):189—196 (in Chinese))
- [8] 张志镇, 高峰, 徐小丽. 花岗岩力学特性的温度效应试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8):2346—2352 (ZHANG Zhizhen, GAO Feng, XU Xiaoli. Experimental study of temperature effect of mechanical properties of granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8):2346—2352 (in Chinese))
- [9] 张志镇, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩应力脆性跌落系数的实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(5):589—597 (ZHANG Zhizhen, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Experimental study of brittle stress drop coefficient of granite endured high temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(5):589—597 (in Chinese))
- [10] 张连英, 茅献彪, 李天珍. 高温环境下大理岩热损伤特性的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 505—511 (ZHANG Lianying, MAO Xianbiao, LI Tianzhen. Experimental research on thermal damage properties of marble at high temperature[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4):505—511 (in Chinese))
- [11] 刘群, 袁选俊, 林森虎, 等. 鄂尔多斯盆地延长组湖相黏土岩分类和沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1016—1025 (LIU Qun, YUAN Xuanjun, LIN Senhu, et al. The classification of lacustrine mudrock and research on its' depositional environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6):1016—1025 (in Chinese))
- [12] 张素新, 赵来时, 童金南, 等. 湖北兴山大峡口浅海相二叠系—三叠系界线附近粘土岩研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(3):94—100 (ZHANG Suxin, ZHAO Laishi, TONG Jinnan, et al. Study on the claystone near the permian triassic boundary from the Daxiakou section, Xingshan, Hubei Province[J]. Journal of Mineral Petrol, 2007, 27(3):94—100 (in Chinese))
- [13] 张素新, 喻建新, 杨逢清, 等. 黔西滇东地区浅海、滨海及海陆交互二叠系—三叠系界线附近粘土岩研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4):81—86 (ZHANG Suxin, YU Jianxin, YANG Fengqing, et al. Study on clayrocks of the neritic, littoral and marine-terrigeneous facies across the permian triassic boundary in the eastern Yunnan and western Guizhou, South China[J]. Journal of Mineral Petrol, 2004, 24(4):81—86 (in Chinese))
- [14] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 高放废物处置库中 CO_x 黏土岩回填材料压缩特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12):2459—2465 (TANG Chaosheng, CUI Yujun, TANG Anh-Minh, et al. Compression behaviors of crushed CO_x argillite used as backfilling material in hlw repository[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12):2459—2465 (in Chinese))
- [15] 王长轩, 刘晓东, 刘平辉. 高放废物地质处置库粘土岩场址研究现状[J]. 辐射防护, 2008(5):310—316 (WANG Changxuan, LIU Xiaodong, LIU Pinghui. The general situation of clay site for high-level waste geological disposal repository[J]. Radiation Protection, 2008(5):310—316 (in Chinese))
- [16] 张述兴, 王昌贤. 黏土岩微结构研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(4):614—617 (ZHANG Shuxing, WANG Changxian. Research on micro-structure of clay stone[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2008, 27(4):614—617 (in Chinese))
- [17] 陈卫忠, 龚哲, 于洪丹, 等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(5):1217—1238 (CHEN Weizhong, GONG Zhe, YU Hongdan, et al. Review of thermo-hydro-mechanical coupled tests and constitutive models of clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5):1217—1238 (in Chinese))

- [18] 梁海安, 杨泽平, 刘晓东, 等. 不同温度下塔木素黏土岩力学强度特性研究[J]. 世界核地质科学, 2014, 31(1): 233—238 (LIANG Hai-an, YANG Zeping, LIU Xiaodong, et al. Mechanical strength properties of claystone in Tamusu under different temperatures[J]. World Nuclear Geoscience, 2014, 31(1):233—238 (in Chinese))
- [19] 薛凯喜, 刘帅, 刘晓东, 等. 黏土岩物理、力学及其工程特性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16):110—121 (XUE Kaixi, LIU Shuai, LIU Xiaodong, et al. Review of the physical, mechanical and engineering properties of clay rocks[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(16):110—121 (in Chinese))
- [20] 中国电力企业联合会. GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2013.
- [21] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.

On the influence of loading rate and ambient temperature on the mechanics properties of clay rock

HE Song, XUE Kai-xi, HU Yan-xiang, ZOU Yu-liang, CHANG Liu-cheng, LI Shi-peng

(State key Laboratory for Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: By using SHT4305 hydraulic servo press system, uniaxial compression experiment was carried out for clay rock samples at loading rate of 0.1MPa/s, 0.3MPa/s, 0.5MPa/s, 0.7MPa/s and 0.9MPa/s and at different temperature of 25°C, 55°C, 85°C, 115°C and 145°C, respectively. The peak strength, and elastic modulus, strain state, rupture form, reaction process and variation mechanism of clay rock samples at different loading rates and ambient temperatures were analyzed. Results shows that the failure process of clay rock samples at different loading rates and at different ambient temperature experiences four stages: compaction, elasticity, plasticity and destruction, in which the plasticity stage is obviously different. Peak strength of clay rock is approximately linearly correlated with the loading rate. Under the action of ambient temperature, the peak strength and elastic modulus of clay rock increase first and then decrease with the increase of temperature. Above results may have important theoretical significance and reference value for the selection of high-level radioactive nuclear waste disposal sites.

Keywords: clay rock; temperature; loading rate; uniaxial compression; mechanical property