



# 考虑温度影响的岩石三向膨胀力测量仪及其 实验设计

朱宝龙, 任 龙

(西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621010)

**摘要:** 膨胀力是膨胀类岩石重要特性之一, 该文提出了一种考虑温度影响的岩石三向膨胀力测试方法与实验装置。基于实验设计, 利用该装置开展了黑色页岩、红层泥岩膨胀力实验, 得到两类岩石在不同温度下的膨胀力时程曲线; 分析了黑色页岩、红层泥岩膨胀力随时间的变化规律, 并与基于弹性力学原理计算得到的两类岩石膨胀力进行了对比, 进一步比较了温度对两类岩石膨胀力的影响规律。该装置结构清晰、操作简单, 更有利于学生对岩石膨胀力的理解, 也是对岩石力学实验教学内容的补充。

**关键词:** 岩石力学; 膨胀力; 三向; 温度; 实验教学

中图分类号: TU458

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230319

## Design of a Three-dimensional Swelling Force Measuring Instrument for Rock Considering Temperature and Its Teaching Experiment

ZHU Baolong, REN Long

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Swelling force is one of the important characteristics of the expansive rock. A method and experimental device for measuring the three-way swelling force of rock considering the effect of temperature are proposed. Based on the experimental design, the swelling force tests of black shale and red mudstone were carried out with this device, and the time history curves of the swelling force of the two kinds of rocks at different temperatures were obtained. The swelling force of black shale and red shale over time was analyzed, and compared with the swelling force of two kinds of rocks calculated based on the principle of elasticity, the influence of temperature on the swelling force of two kinds of rocks was further compared. The device has clear structure and simple operation, which is more conducive to students' understanding of rock swelling force, and is also a supplement to the teaching content of rock mechanics experiment.

**Key words:** rock mechanics; swelling force; three-dimensional; temperature; experimental teaching

自然界广泛存在膨胀性岩类, 由于其含有蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物, 吸水时产生膨胀, 失水时产生收缩, 易于引起如边坡滑动、路基沉降、路面龟裂、水坝渗漏等工程问题<sup>[1-2]</sup>。准确测量和研究膨胀性岩石的膨胀性质不仅对于工程建设至关重要, 在土木工程专业的岩石力学相关实验教学中也值得关注与重视<sup>[3]</sup>。

以往有关岩石的膨胀性质的研究与实验主要集中在单向膨胀率测量<sup>[4-5]</sup>, 但膨胀率或膨胀变形

无法全面反映岩石的膨胀性质, 膨胀力也是一种反映岩石特征的重要指标, 岩石膨胀力的大小和方向对于不同的工程应用有着不同的影响<sup>[6-7]</sup>。很多学者在测量一维和二维膨胀力方面做了大量的试验<sup>[8-9]</sup>, 得到了有益的结论; 同时, 相关行业的规范, 如《公路工程岩土工程技术规范》(JTG D30-2015)、《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——土石方工程》(SL631-2012)等也对岩石膨胀率和膨胀力测定提出了相关规定与要

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(41672342); 2021—2023 年四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-900)。

作者简介: 朱宝龙(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土力学方面的研究。E-mail: zhubaolong@swust.edu.cn

求, 但仅限单向膨胀率和膨胀力的测定要求。现实工程实践中, 岩石一般均处于三维环境, 其力学特征一般具有三维特性。同样的, 岩石膨胀性也具有三维特征, 如仅掌握单向或一维膨胀特征, 存在一定的局限性, 对工程实践活动也存在一定的不利影响<sup>[10]</sup>, 同时一般岩石力学实验指导书大多侧重于岩石物理力学性质的测试实验<sup>[11]</sup>, 而对岩石膨胀性关注较少, 影响了学生对岩石膨胀性的理解。有部分学者已注意到此问题, 开发了能够测量三向膨胀率和膨胀力的仪器, 以更全面地研究和评估膨胀性岩石的性质<sup>[12-14]</sup>。这些新型的岩石三向膨胀力测量仪器的研制和应用将有助于提高对膨胀性岩石的研究和工程应用的准确性和可靠性, 激发学生的兴趣, 提升相关课程实验教学的质量。但现有的三维膨胀仪器主要考虑岩石吸水膨胀, 对于温度在岩石膨胀中影响考虑略显不足。

本文介绍了一种自制的考虑温度影响的岩石吸水三向膨胀力测量仪<sup>[15]</sup>, 提供了温度的可选择性, 可以用来研究岩石在不同温度条件下的遇水膨胀性质。该仪器结构清晰, 使用步骤简单, 不仅为岩石吸水三向膨胀力的研究提供了一种简单、经济、有效的实验手段, 也为岩石膨胀力的研究和工程应用提供更为全面和准确的数据支撑, 更为学生对温度影响下岩石吸水膨胀性的理解提供了一个更直观更清晰的展现方式, 也有效补充了岩石力学实验平台。

## 1 实验仪器

实验所使用的岩石三向膨胀力测量仪如图 1 所示, 主要由储水箱、数据采集箱以及试验仓 3 部分构成, 并由导管和线材连接。其基本原理是压力平衡法, 当岩石试样吸水后产生向外的膨胀变形, 由于外侧的侧限作用, 限制了其变形的发生, 则岩石膨胀变形所产生的膨胀力向外作用到荷载传感器上, 以此测得岩样在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上膨胀力的大小。

储水箱通过导管与试验仓和氮气瓶相连接, 用于储存实验中使岩样发生膨胀变形的蒸馏水。在实验中, 通过氮气的加压将蒸馏水压入试验仓中, 使岩样发生吸水膨胀。

数据采集箱中集成了数据自动采集终端和处理输出终端。通过线材与试验仓外的高精度荷载

传感器相连, 在实验过程中自动读取荷载传感器的数据并记录。

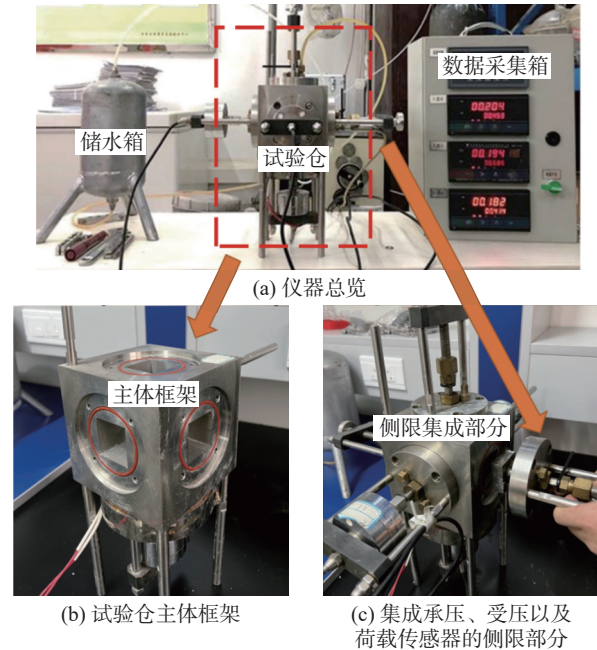


图 1 岩石三向膨胀力测量仪

试验仓是进行岩石三向膨胀力测试实验的核心部分, 岩样的三向膨胀实验就在试验仓中发生, 它由主体框架、承压透水推板、受压透水推板、测量系统以及温度控制系统组成, 具体细节如图 2 所示。主体框架是由拉杆和横梁组成的支架, 能够通过外部调节螺栓对试验仓起到固定作用。测量系统由荷载传感器和位移千分表组成, 荷载传感器分别安装在活塞杆顶部的横梁上, 使传感器处于仪器外部从而不受水和高温环境的影响; 位移千分表主要是用于掌握试验仓中岩石膨胀力引起的试验仓或实验装置的变形。温度控制系统为布置在 6 个受压透水垫板内侧上的加热环和温度传感器, 不仅能够对仓内进行加热, 还能够通过仪表盘对试验仓内部温度进行实时监控。

## 2 实验设计

### 2.1 实验方案

考虑不同温度对黑色页岩、红层泥岩吸水性岩石材料的吸水膨胀力的影响, 选择 25、50、75 °C 作为实验温度, 每一个岩样实验时间为 30 d。其中, 25 °C 是常温, 是实验结果与其他温度进行对比的基准; 50 °C 是典型的高温条件, 具有重要的地质意义, 也可用于研究岩石在高温下的性质

和行为; 75 °C 则是更高的温度条件, 用于研究岩石在极端条件下的性质和行为。本实验的目的是通过测量岩石在不同温度下的岩石吸水膨胀力, 掌握其吸水膨胀性质变化规律, 并为该类岩石在地质工程、环境监测和资源勘探等领域的应用提供理论依据和实验数据。

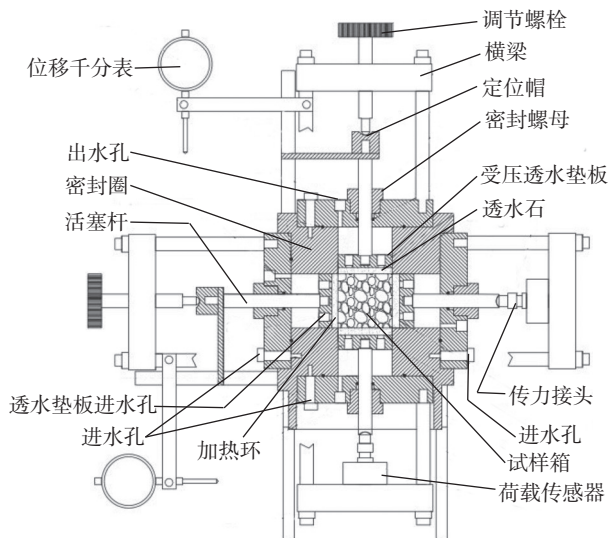


图 2 岩石三向膨胀力测量仪试验仓结构组成

## 2.2 岩样制备

膨胀性岩石之所以会发生膨胀, 是因为岩石内部含有如蒙脱石、伊利石等强亲水性黏土矿

物, 其晶层之间可吸收一定量水分子, 导致晶胞膨胀, 从而产生体积增大<sup>[16]</sup>。本实验的原理即是通过向试验仓中加水, 使岩样慢慢浸润并吸水, 岩样进而产生一定的膨胀变形, 测量由于限制膨胀变形产生的膨胀力。

本次实验使用黑色页岩和红层泥岩两类岩样, 黑色页岩样品取自重庆市武隆县江口镇下志留统龙马溪组黑色页岩地层新鲜露头, 红层泥岩样品取自四川省遂宁市大英县天保镇浅层风化带下的弱风化岩体。由于黑色页岩、红层泥岩均具有较为明显的层理性, 特别是黑色页岩层理性更突出, 为考虑层理方向性对膨胀力的影响, 取样的示意如图 3 所示, 岩样物理力学性质参数如表 1 所示。

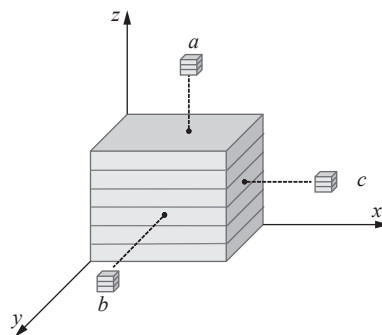


图 3 取样示意

表 1 两类岩石物理力学性质

类型	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水量 $w/\%$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	x向泊松比 $\mu_x$	y向泊松比 $\mu_y$	z向泊松比 $\mu_z$
黑色页岩	2.37	8.28	56.78	45.64	28.76	0.237	0.224	0.246
红层泥岩	2.47	1.64	56.78	1.03	28.10	0.376	0.381	0.392

对于三向膨胀力测试的岩样制作过程如下:

1) 采用人工开挖的方式从暴露的黑色页岩、红层泥岩露头取样并快速干燥, 样品为近似方形体, 最小边长 100 mm 以上;

2) 取样完成后, 用新鲜薄膜包裹, 再用锡纸盘绕, 并使用蜡密封以备实验使用;

3) 实验前将采集的样品切割为 42 mm×42 mm×42 mm 的正方体, 然后在专业机床上对样品进行研磨, 将尺寸调整至 40 mm×40 mm×40 mm 的标准样品, 如图 4 所示。

## 2.3 实验操作步骤

使用上述步骤制作完成岩样, 按以下步骤开展三向膨胀力测量实验。

### 1) 装样

调节试验仓的调节螺栓(图 2), 打开上方密封盖板, 在其余 5 个面上先放置透水石, 然后将岩样放入试验仓内, 在顶部紧挨岩样放置透水石, 盖上密封盖板, 拧紧密封螺栓, 使岩样、透水石、透水垫板三者紧密接触。

### 2) 吸水

通过进水孔压入少量蒸馏水, 使岩样慢慢受水湿润, 并多次压入, 使岩样尽量均匀吸水膨胀。

### 3) 监测与测量

将荷载传感器、位移千分表指针调节至合适读数, 随后可通过读数装置(图 1 中的数据采集箱)读出岩样吸水后在各个时刻的膨胀力的数值与



对应位移千分表上指示的变形量。

4) 加温

在其他条件均相同的情况下，利用温度控制系统，通过加热环将岩样加热至设定的温度，再

得到相对应温度下各个时刻岩样的膨胀力。如需变换温度，不能采用同一块岩样进行实验，需重新换装另一块岩样，按上述步骤重新开始实验，如图 5 所示。

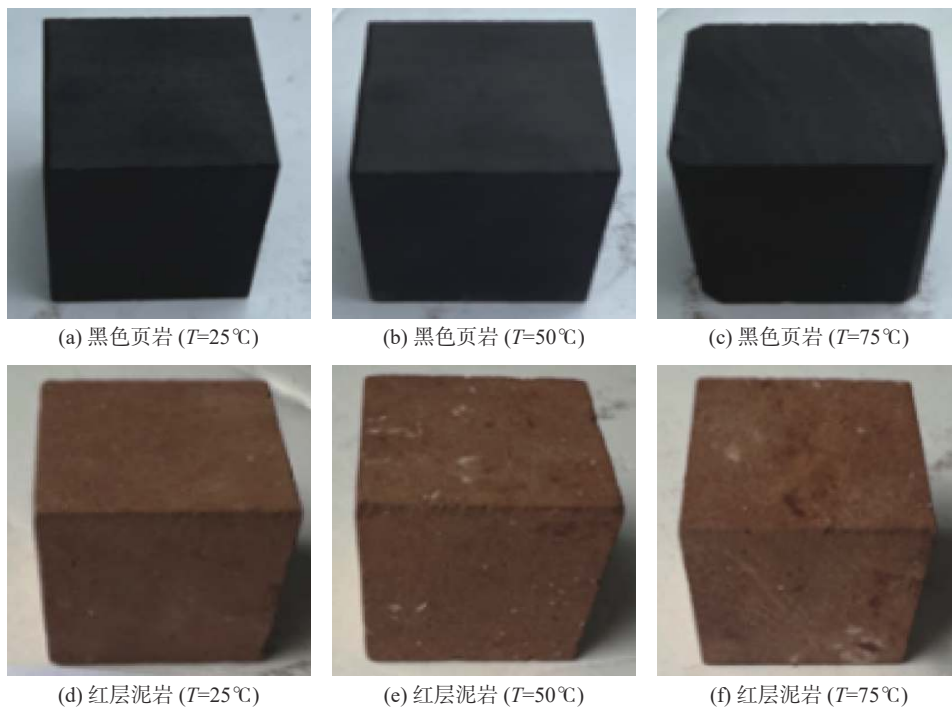


图 4 黑色页岩试样与红层泥岩试样

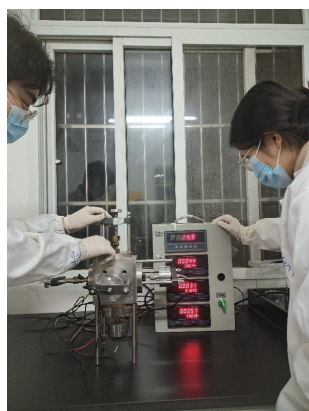


图 5 学生岩石膨胀力实验

5) 结束

实验结束后，拔除连线，将试验仓放置于阴凉通风处，使其自然降温，随后再拆卸装置，取出岩样并清洗仪器。

3 实验结果与分析

3.1 三向膨胀力时程曲线

在经过 30 d 的恒温吸水膨胀后，岩样含水率

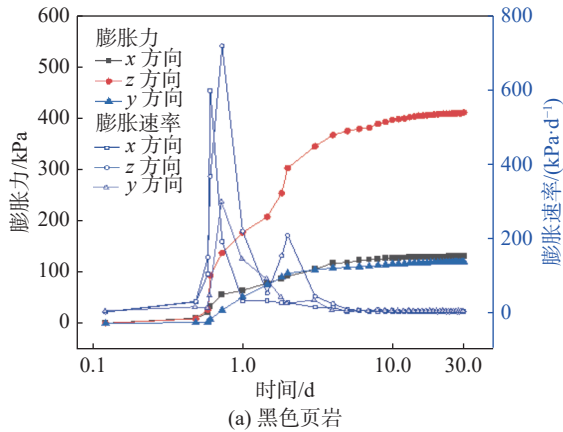
已基本饱和，膨胀过程基本结束。在实验过程中，三向的荷载传感器拾取了由受压透水垫板所传递的膨胀力，可得到如图 6 所示的温度 25 °C 时 30 d 内黑色页岩和红层泥岩膨胀力时程曲线。

在温度一定情况下，可以看出无论是黑色页岩还是红层泥岩，z 方向的膨胀力最大，发展也最快，x 方向和 y 方向其次。以黑色页岩为例，在岩样吸水后，x、y、z 方向膨胀力在初期增长较为快速。实验结束时 x 方向、y 方向的膨胀力分别为 z 方向膨胀力的 0.298、0.268 倍，表现出一定的各向异性，这主要是由于实验岩样存在着层理，导致物理力学性质的差异。依据膨胀力时程曲线的发展过程(图 6)，可将其分为加速发展、减速发展、稳定 3 个阶段。

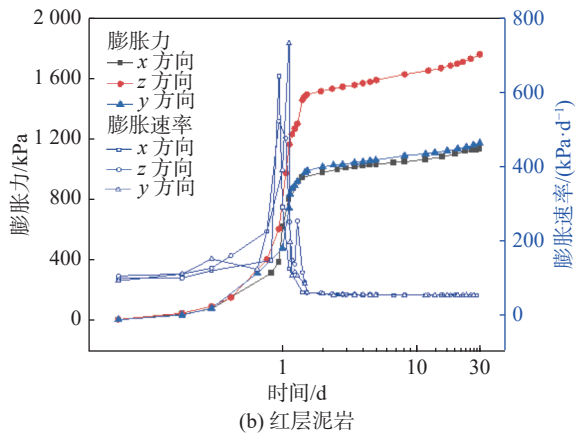
1) 加速发展阶段

随着岩样吸水，水较快进入岩样内部，并在微观层面上进入黏土矿物内部，引起晶层间距增大，在宏观上表现为产生膨胀力。在 0~1 d，岩样膨胀力增长平缓，1~2 d，膨胀力增长速度加快，其中，z 方向增长速度相较于 x、y 方向大 1 倍。

此阶段结束时,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上膨胀力在岩样 30 d 总膨胀力的占比分别为 68%、81% 和 72%。



(a) 黑色页岩



(b) 红层泥岩

图 6 25 °C 时黑色页岩和红层泥岩遇水膨胀力时程曲线

### 2) 减速发展阶段

在 2~8 d 内, 随着实验进行,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向膨胀力继续增长, 但增长速率明显减缓, 约为加速发展阶段的 52%。在此阶段  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上膨胀力在总膨胀力上午占比分别为 25%、14% 和 25%, 仍有部分水分子进入黏土矿物内部, 产生一定的膨胀性, 但由于前期已有大量水分子进入黏土矿物内部占据了空间, 膨胀力增长较第一阶段要小。

### 3) 稳定阶段

8 d 后,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向膨胀力发展基本达到最大值, 膨胀力时程曲线较为平缓, 处于稳定阶段。

同样的, 红层泥岩也符合上述发展规律, 但是由于泥岩具有更强的吸水能力, 其中所含的蒙脱石、伊利石所占比例也更高<sup>[17]</sup>。它的膨胀力发展阶段也可以分为加速发展阶段、减速发展阶段和稳定阶段, 并且测量得到的膨胀力也更高, 在

$x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的膨胀力分别是黑色页岩的 8.62、9.78、4.28 倍。

在实验结果中, 不论是黑色页岩还是红层泥岩, 之所以  $z$  方向膨胀力和  $x$ 、 $y$  方向的膨胀力具有较大差异, 是因为两种岩石均是较典型的具有层理结构的岩类, 其各类的力学性质参数都随着方向和层理角度有所不同。

假设岩体为空间连续性的弹性体(图 3), 则  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  关系可写作:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为泊松比。

由于岩石层理的影响, 黏土矿物定向排列方向性不同, 导致岩石在各个方向上物理力学性质的差异。考虑其方向性, 则  $z$  方向与  $x$ 、 $y$  方向的膨胀力关系可写为:

$$\begin{cases} S_x = \frac{\mu_x}{1-\mu_x} S_z \\ S_y = \frac{\mu_y}{1-\mu_y} S_z \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_z$  为  $z$  方向膨胀力,  $S_x$  为  $x$  方向膨胀力,  $S_y$  为  $y$  方向膨胀力,  $\mu_x$  为  $x$  方向泊松比,  $\mu_y$  为  $y$  方向泊松比。

将黑色页岩的相关参数带入式 (2) 中, 可以由  $S_z$  实测值反推得出理论上  $x$  方向和  $y$  方向的膨胀力, 分别是:  $S'_{x(\text{shale})} = \frac{\mu_x}{1-\mu_x} S_{z(\text{shale})} = 127.93 \text{ kPa}$ ,  $S'_{y(\text{shale})} = \frac{\mu_y}{1-\mu_y} S_{z(\text{shale})} = 118.92 \text{ kPa}$ ,  $x$  方向与  $y$  方向的实测值比理论值分别大  $\delta_{x(\text{shale})} = 2.66\%$ 、 $\delta_{y(\text{shale})} = 1.01\%$ 。同样的, 红层泥岩也可以利用式 (2) 反推得出理论上  $x$  方向和  $y$  方向的膨胀力, 分别是:  $S'_{x(\text{mudstone})} = \frac{\mu_x}{1-\mu_x} S_{z(\text{mudstone})} = 1391.09 \text{ kPa}$ ,  $S'_{y(\text{mudstone})} = \frac{\mu_y}{1-\mu_y} S_{z(\text{mudstone})} = 1421.13 \text{ kPa}$ ,  $x$  方向与  $y$  方向的实测值比理论值分别大  $\delta'_{x(\text{mudstone})} = 3.96\%$ 、 $\delta'_{y(\text{mudstone})} = 1.89\%$ 。上述黑色页岩和红层泥岩  $x$  方向和  $y$  方向的理论值与实测结果之间的相对误差小, 也从侧面证明了本仪器的准确性。

### 3.2 温度对三向膨胀力的影响

对其他温度下的岩样进行膨胀力实验, 得到如图 7 所示的 50 °C 和 75 °C 温度下各个方向 30 d 内黑色页岩和红层泥岩的膨胀力变化, 可以看出温度确实对岩样的遇水膨胀性有一定的影响。

实验得到的 25、50、75 °C 下的三向膨胀力趋

势基本相似，但随着温度的升高，黑色页岩和红层泥岩 30 d 内的膨胀力也逐渐升高，且膨胀力的增大幅度变小。

当温度升高时，黑色页岩的膨胀力也有明显升高。从 z 方向来看，膨胀力  $S_{z(25\text{ }^\circ\text{C})}=412.26\text{ kPa}$ ， $S_{z(50\text{ }^\circ\text{C})}=512.43\text{ kPa}$ ， $S_{z(75\text{ }^\circ\text{C})}=557.25\text{ kPa}$ ；从 x 方向来看，膨胀力  $S_{x(25\text{ }^\circ\text{C})}=131.43\text{ kPa}$ ， $S_{x(50\text{ }^\circ\text{C})}=158.91\text{ kPa}$ ， $S_{x(75\text{ }^\circ\text{C})}=169.24\text{ kPa}$ ；从 y 方向来看，膨胀力  $S_{y(25\text{ }^\circ\text{C})}=120.144\text{ kPa}$ ， $S_{y(50\text{ }^\circ\text{C})}=142.817\text{ kPa}$ ， $S_{y(75\text{ }^\circ\text{C})}=167.912\text{ kPa}$ 。尤其是 z 方向的膨胀力涨幅比较显著， $\Delta S_{z(25\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=35.17\%$ ， $\Delta S_{z(25\sim 50\text{ }^\circ\text{C})}=24.29\%$ ， $\Delta S_{z(50\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=8.70\%$ 。可以看出，膨胀力的增长幅度随温度的升高而减小。这是由于随着温度的升高，黏土矿物在水溶液中的水化分散越剧烈，水

分子进入黏土矿物晶层表面的能力越强，从而使原来未被水化的晶层表面水化而产生膨胀。但达到一定温度后，由于黏土矿物晶层间已基本充满水分子，再升高温度继续充填水分子的空间也有限，因此，膨胀力随温度升高增加的幅度会减小。

黑色页岩岩样的膨胀力发展趋势和膨胀速率也受温度的影响而有所不同。当温度为 25 °C 时，0~2 d 为膨胀力的加速发展阶段，2~8 d 为膨胀力的减速发展阶段，8~30 d 为膨胀力的稳定发展阶段；当温度为 50 °C 时，加速发展阶段提前到了 0~1.8 d；减速发展阶段延长至 1.8~8.5 d；当温度为 75 °C 时，加速发展阶段进一步提前至 0~1.3 d，减速发展阶段也延长至 1.3~9.0 d。

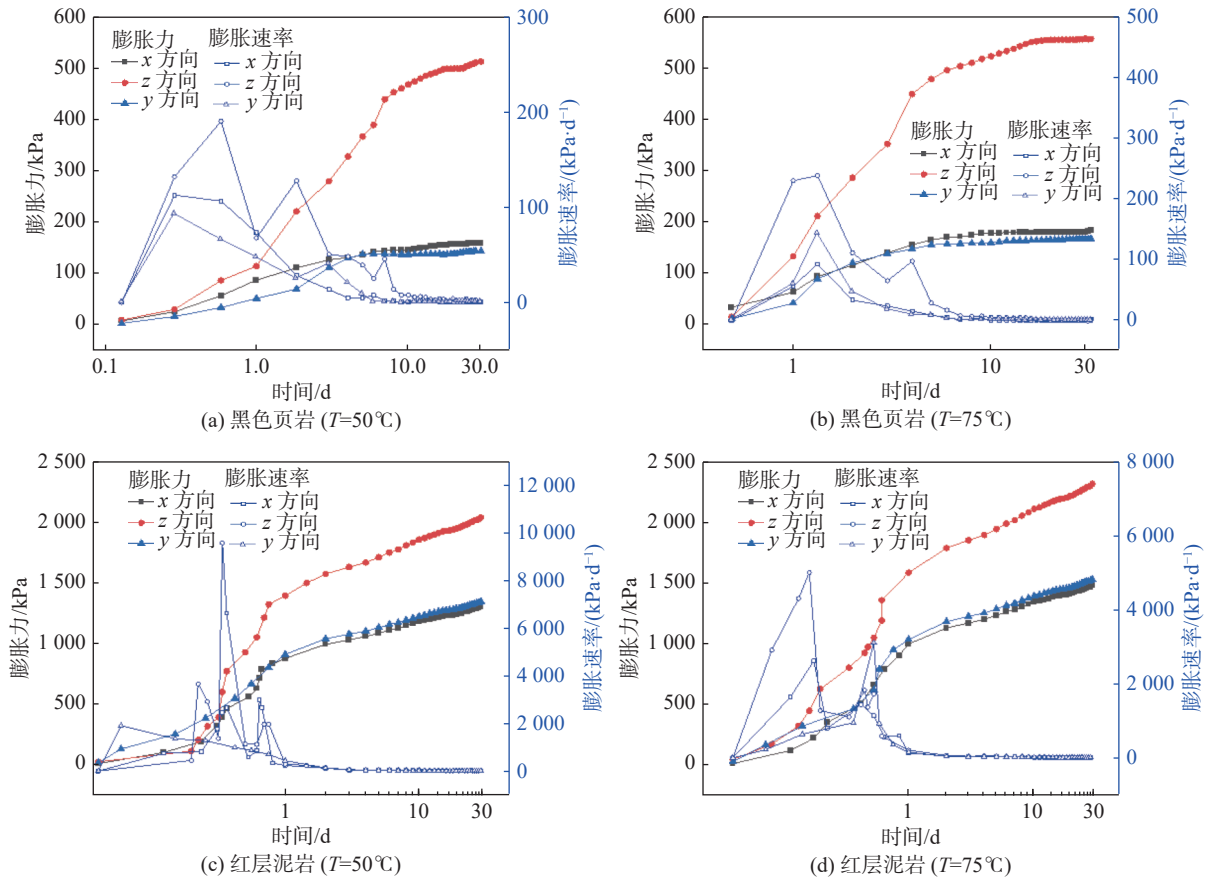


图 7 不同温度下的膨胀力时程曲线

对于红层泥岩来说也有着类似的发展规律，温度的升高也使得膨胀力升高，从 z 方向来看，膨胀力  $S_{z(25\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 762.76\text{ kPa}$ ， $S_{z(50\text{ }^\circ\text{C})}=2\ 033.49\text{ kPa}$ ， $S_{z(75\text{ }^\circ\text{C})}=2\ 310.79\text{ kPa}$ ；从 x 方向来看，膨胀力  $S_{x(25\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 133.79\text{ kPa}$ ， $S_{x(50\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 297.91\text{ kPa}$ ， $S_{x(75\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 474.90\text{ kPa}$ ；从 y 方向来看，膨胀力  $S_{y(25\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 175.17\text{ kPa}$ ， $S_{y(50\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 341.89\text{ kPa}$ ， $S_{y(75\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 524.87\text{ kPa}$ 。同样其 z 方向的膨胀力涨幅比较显著， $\Delta S_{z(25\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=31.04\%$ ， $\Delta S_{z(25\sim 50\text{ }^\circ\text{C})}=15.36\%$ ， $\Delta S_{z(50\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=13.63\%$ 。除此之外，其红层泥岩膨胀速率也是远大于黑色页岩，所以其各发展阶段的时间占比也与黑色页岩有所不同。

1175.17 kPa， $S_{y(50\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 341.89\text{ kPa}$ ， $S_{y(75\text{ }^\circ\text{C})}=1\ 524.87\text{ kPa}$ 。同样其 z 方向的膨胀力涨幅比较显著， $\Delta S_{z(25\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=31.04\%$ ， $\Delta S_{z(25\sim 50\text{ }^\circ\text{C})}=15.36\%$ ， $\Delta S_{z(50\sim 75\text{ }^\circ\text{C})}=13.63\%$ 。除此之外，其红层泥岩膨胀速率也是远大于黑色页岩，所以其各发展阶段的时间占比也与黑色页岩有所不同。

综上所述,作为工程中常见的两类膨胀性岩石,黑色页岩和红层泥岩都具有较强的膨胀性质。虽然相比较于黑色页岩更显著的层理性,红层泥岩的层理性相对较弱,但是两者在实验中均表现中层理方向影响下膨胀能力不同的性质,其垂直于层理方向膨胀力要大于沿层理方向的膨胀力,并且由于所含膨胀性矿物成分的不同,其吸水膨胀性质也有所不同。在本实验中红层泥岩的三向膨胀力远大于黑色页岩,反映到工程实践中,红层泥岩地区更容易遭受由于岩石膨胀导致的灾害。

#### 4 结束语

基于岩石力学的理论基础,自主研制了一种考虑温度影响的测量岩石三向膨胀力的实验装置。相较于传统仪器只能测量单向膨胀力,三向膨胀力测量仪能够全方位地测量岩石的膨胀力,将岩石吸水膨胀的过程体现得更加直观。

本文详细介绍了膨胀力测量仪的结构组成、使用方法和步骤,并对测量结果进行了分析。通过对黑色页岩、红层泥岩两类不同岩样在不同温度下的实验结果的分析,发现温度会影响膨胀性岩石的吸水膨胀能力,并且红层泥岩的三向膨胀力在各个温度下都大于黑色页岩。将膨胀力试验值与基于弹性力学原理的计算值进行了对比,证明了膨胀仪的准确性和可靠性。

在实验教学中,通过本仪器可以在实验过程中观测三向膨胀力变化,更直观地体现水与岩石作用机理,使得深奥的理论概念变得可视化、简单化,提高了教学内容的记忆点和可学性,加深了学生对于岩石类材料吸水膨胀过程的理解,也弥补了现有岩石力学实验中关于膨胀性实验设备方面的不足。

#### 参考文献

[1] 马婧,陈永贵,刘聪,等.化学作用下压实膨润土膨胀力

响应机制研究进展[J].*岩土工程学报*,2023,45(10):2042-2051.

- [2] WEI S J, YANG Y S, XU C B, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of gypsum rock during high-temperature dehydration-hydration expansion[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(2): 1121-1140.
- [3] 林蔚然,汤彬,陈凯,等.“新工科”背景下能源类通识课程综合实践教学项目的探索[J].*实验技术与管理*,2021,38(1):148-152.
- [4] 范振宇.硬石膏岩膨胀力及其测试方法的试验研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [5] 曹帅,毛耀建,陈宝.高压实膨润土膨胀渗透各向异性研究[J].*路基工程*,2023(1):7-12.
- [6] 许福周.膨胀土吸水膨胀系数及其工程应用的试验研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [7] 张廷雷,李蓉仑,杨鸿,等.岩石含水状态对岩石膨胀力影响的研究[J].*高速铁路技术*,2021,12(1):6-11.
- [8] 张锐,龙明旭,刘昭京,等.膨胀土的二维膨胀各向异性试验研究[J].*中国公路学报*,2022,35(10):65-74.
- [9] 吴岗,贾景超,巴潇,等.膨胀土二维膨胀力特性研究[J].*农业与技术*,2023,43(2):60-64.
- [10] 赵化蒙.泥岩遇水软化-膨胀复合力学模型及应用[D].武汉:长江科学院,2021.
- [11] 刘伟,汪权明编.岩体力学试验指导[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [12] 郭永春,许福周,许嘉伦,等.岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究[J].*水文地质工程地质*,2020,47(3):86-92.
- [13] 李亚奇,谭波,徐良.南宁灰白膨胀土三向膨胀率试验研究[J].*土工基础*,2020,34(3):351-354.
- [14] 刘洪伏.邯郸强膨胀土三向膨胀特性及强度试验研究[D].重庆:西南大学,2020.
- [15] 朱宝龙,汪镭,李晓宁.一种岩石三向膨胀及渗透系数的测量仪及测量方法:CN2018102841635[P].2018-09-28.
- [16] 朱宝龙,李倩,王圣林,等.考虑时间效应的黑色页岩遇水三向宏观膨胀力模型研究[J].*铁道科学与工程学报*,2021,18(10):2610-2619.
- [17] 郭永春,赵峰先,闫圣龙,等.红层泥岩三轴膨胀力的试验研究[J].*水文地质工程地质*,2022,49(3):87-93.

编辑 葛晋