

# A Study on Mechanical Properties and Damage Constitutive Model of Gypsum Caprocks under Cyclic Loading

Xuefei Tong<sup>1</sup> Dajun Shen<sup>1</sup> Zhuolin Song<sup>2</sup> Lu Yu<sup>1</sup> Ye Zhang<sup>3\*</sup>

1. Chongqing Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chongqing, 400021, China

2. Chongqing Natural Gas Storage and Transportation Company, Chongqing, 401147, China

3. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources (Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources), Chongqing, 401120, China

## Abstract

During the operation of underground gas storage reservoirs, the overlying strata undergo periodic loading and unloading caused by intense gas injection and extraction, resulting in highly complex mechanical properties and deformation patterns. Developing rock damage constitutive models under cyclic loading conditions is crucial for predicting reservoir sealing integrity and stability. Through cyclic loading-unloading tests on gypsum samples collected from field cores, it was observed that stress recovery paths deviate from loading trajectories, exhibiting distinct hysteresis loops. As cycle numbers increased, strain-stress curves followed a “sparse-dense-sparse” variation pattern. A gypsum softening damage constitutive model during loading was established based on statistical damage theory. Comparisons between theoretical predictions and experimental data demonstrated excellent agreement. This proposed constitutive model provides a novel approach to comprehensively understand deformation failure mechanisms in gas storage reservoirs subjected to intense injection-extraction cycles.

## Keywords

Gas storage operation; Cyclic loading and unloading; Damage variable; Constitutive model

# 循环荷载下储气库石膏盖层力学特性和损伤本构模型研究

童雪菲<sup>1</sup> 沈大均<sup>1</sup> 宋卓林<sup>2</sup> 喻璐<sup>1</sup> 张烨<sup>3\*</sup>

1. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 中国·重庆 400021

2. 重庆天然气储运有限公司, 中国·重庆 401147

3. 自然资源部页岩气资源勘查重点实验室(重庆地质矿产研究院), 中国·重庆 401120

## 摘要

在地下储气库运行过程中, 上覆盖层将受到由于气体强注强采而引起的周期性加载卸载作用, 导致其力学性质和变形规律变得极为复杂。研究循环荷载作用下岩石损伤本构模型对预测储气库盖层密封性和稳定性具有重要意义。通过对现场取心的石膏试样开展循环加载卸载力学试验, 发现卸载路径时并不按加载路径返回而是存在明显的应力滞回环。随着循环次数增加, 应力应变曲线呈现出“疏-密-疏”的变化特征。基于统计损伤理论, 建立加载过程中的石膏软化损伤本构模型。利用模型计算得到的理论值与试验获得的应力应变数据进行对比, 发现两者吻合效果良好。本文所提出的本构模型为深入了解储气库强注强采过程中盖层变形破坏规律提供了一条新途径。

## 关键词

储气库运行; 循环加载卸载; 损伤变量; 本构模型

**【基金项目】**本研究受中国石油西南油气田分公司重庆气矿 2023 年科研计划项目《重庆市地下储气库绿色建设运行规范研究》(项目编号: K23-Z1-16) 和《铜锣峡—黄草峡储气库运行地质安全评价体系研究》(项目编号为: K23-Z1-11) 资助。

**【作者简介】**童雪菲(1993-), 女, 中国重庆人, 本科, 工程师, 从事资源与环境研究。

**【通讯作者】**张烨(1976-), 男, 博士, 研究员、正高级工程师, 从事非常规油气勘探开发技术研究。

## 1 引言

天然气具有燃烧热值高、燃烧产物污染小等优点, 被认为是一种理想的清洁能源, 为我国经济社会发展提供了有力的能源保障<sup>[1]</sup>。据报道, 到 2025 年, 我国储存天然气的能力将突破  $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 这也将助推“碳达峰、碳中和”目标的实现进程<sup>[2]</sup>。气藏型地下储气库因其具备相对较高的注采效率和较低的运行成本优势, 现已成为我国运用规模最广的储气库类型<sup>[3]</sup>。与煤层气、页岩气等单向采气过程不同的是, 地下储气库运行其实是一个对气体进行强注强采的过程。气体不断向地层注入和采出极易对周围岩体地应力场产

生周期性扰动，从而导致储层和盖层受到交变荷载的作用。岩石的变形破裂是其内部微裂纹的萌生、扩展及贯通的宏观表现结果<sup>[4]</sup>。储层在反复地周期性扰动作用下会出现疲劳损伤，其抵抗变形破坏能力将大大降低，对地下储气库的安全运行造成严重威胁。因此，深入了解交变荷载作用下岩石的力学行为和变形特征，对科学指导储气库盖层动态密封性评价和提高注采效率具有重要现实意义。

目前，国内外许多学者对大理石、花岗岩、煤岩等岩石在循环荷载下的强度及变形特征开展了大量的试验和理论研究，并取得了一系列丰硕成果，为煤矿开采、硐室开挖等地下岩体工程提供了有效指导。葛修润等<sup>[5]</sup>对比分析单轴压缩和循环加卸载试验结果，发现岩石疲劳破坏时的应变受静态加载曲线控制。此外，岩石疲劳寿命决定于循环荷载幅值和峰值应力大小。张媛等<sup>[6]</sup>由不同围压下砂岩的循环加卸载力学试验观察到应力应变曲线滞回环的面积随围压的增大而减小，认为这与砂岩渐进破坏时裂纹扩展所需能量密切相关。王天佐等<sup>[7]</sup>对红砂岩开展不同循环加卸载路径下的试验研究，得到恒下限循环加卸载下岩石平均抗压强度较单轴压缩试验有所提高。Yu 等<sup>[8]</sup>对 Boom 粘土开展循环加卸载三轴试验，揭示了应力应变曲线滞回环的形成机理，并发现水分对滞回环面积大小有重要影响。为印证加卸载作用下岩石的变形破坏过程实际上是内部能量耗散的结果，Meng 等<sup>[9]</sup>借助 MTS 816 岩石力学测试系统对不同类型岩石进行了大量的单轴循环加卸载试验。研究结果表明：随循环指数的增加，岩石弹性能密度呈现出先增加后减小的趋势，而弹性能密度变化表现出相反规律。进而从能量的角度揭示了岩石变形破坏的内在机理。随着研究的不断深入，岩石在循环加卸载条件下本构模型的构建越来越被重视。曹文贵等<sup>[10]</sup>基于统计损伤理论，提出了用于模拟岩石破裂全过程的应变软化统计损伤本构模型。再根据应力应变曲线的极值性，给出了岩石变形强度准则的一般表达式。周宏伟等<sup>[11]</sup>充分利用分数阶在描述媒体在受力变形时表现出强非线性方面的优势，建立了基于分数阶导数理论的煤岩黏弹性本构模型，通过不同温度下的循环加卸载试验结果对模型的合理性进行了验证。Ren 等<sup>[12]</sup>以大理石为试验研究对象，设计了两种不同应力（恒定幅值和改变幅值）条件下的循环荷载试验，推导出综合考虑岩石压实和开裂的耦合损伤变量，进一步构建了适用于循环荷载作用下的统计损伤本构模型。为有效评估循环荷载作用下岩石强度与变形之间关系，Liu 等<sup>[13]</sup>采用耗散能定义损伤变量，进而采用递归法建立了循环荷载作用下的损伤本构模型。

基于以上分析，本文将对从黄草峡储气库所取盖层岩心进行多组循环荷载试验，探究盖层在交变荷载作用下的力学特性。基于损伤力学原理，假设岩石微元强度服从 Weibull 分布，推导用于描述岩石变形破坏过程中的损伤演

化模型。根据连续介质力学理论，以残余轴向应变为材料内变量，进一步构建交变荷载作用下的岩石疲劳本构模型，并利用试验所得结果对模型的合理性与可靠性进行验证。所做研究以期为地下储气库盖层动态密封性评价和安全运行提供一定理论指导。

## 2 交变荷载力学试验

### 2.1 试验样品

试验所需岩样取自黄草峡储气库气田嘉陵江组地层，岩性主要为石膏。为降低由于样品离散性给试验结果带来的误差，对来自深度相近的岩心进行钻取制样。同时，为了避免钻头高速运转与岩石摩擦产生的热应力对样品造成影响，采用湿式加工法钻取心。根据国际岩石力学学会 (ISRM) 对试验样品尺寸的建议，制备成高 50 mm，直径 25 mm 的标准圆柱试件，并保证试件上下端面不平整度不大于 0.2 mm。将制备好的标准岩样置于干燥箱烘干 24 h，以排除水分对试验的结果影响。

### 2.2 试验装置

本次试验所采用的设备为美国 GCTS 公司生产的 RTR-1500 型三轴岩石力学综合测试系统。该装置具有强大的测试功能，可完成岩石高温高压三轴和单轴试验、间接拉伸试验、渗透试验、水压致裂试验、高温高压超声波试验、声发射试验、DSA 差应变试验、CVA 径向超声波各向异性试验、脉冲衰减渗透试验、岩石真三轴试验等测试，实现煤及岩石物理力学测定，钻井工程、水力压裂、防砂等设计优化，储层可压性评价、水力压裂设计优化、防砂设计优化等工程需求。

### 2.3 试验步骤

本次试验采用单轴加卸载应力路径对试样进行加载，即保持围压恒为 0。值得注意的是，葛修润等<sup>[5, 14]</sup>通过对大量不同类型岩石进行循环加卸载试验，认为加载频率、加载波形和应力幅值对岩石疲劳损伤有重要影响，并指出岩石疲劳特性与疲劳门槛强度密切相关。若应力上限低于这一门槛值，无论荷载循环多少周期，岩石始终仅发生弹性变形而并不会出现疲劳破坏，如图 1 所示。因此，在开展单轴加卸载试验之前，需要先进行单轴压缩试验以获得岩样的单轴抗压强度  $\sigma_{uc}$ ，便于加卸载过程中上限应力和幅值的确定。对试样加卸载过程按照如下方式进行：在达到应力上限之前采用力控制，加载速率为 0.5 MPa/s。循环过程中的加载波为三角波，频率为 0.2 Hz。考虑到黄草峡储气库设计的使用寿命为 50 年，故在试验过程中设定循环次数为 50 次。循环加卸载结束后利用位移控制方式（速率 0.02 mm/s）加载直至试件发生完全破坏，记录整个过程中的应力应变数据。更换试件，重复上述操作步骤，进行下一个试样的试验。

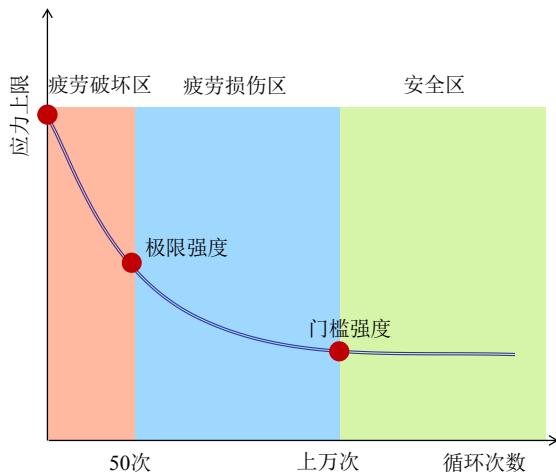


图 1 岩石在不同循环荷载下的疲劳特征

### 3 模型

#### 3.1 加载段本构模型

根据 Lemaitre 应变等价假说, 作用在无损材料上的有效应力引起的应变与发生损伤后的材料所受的名义应力引起的应变相等, 则岩石所受有效应力与名义应力之间的关系可表示为<sup>[15]</sup>:

$$\sigma'_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{1 - D} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{ij}'$  为名义应力, MPa;  $D$  为损伤变量。

假设岩石微元强度服从 Weibull 分布, 用于表征其强度特征的离散型, 则微元强度概率密度分布函数表达式为<sup>[16]</sup>:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left( \frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[ -\left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

式中:  $F$  为微元强度随机分布变量;  $m$  和  $F_0$  为随机分布参数。

岩石在外力作用下的变形破坏是一个连续渐进过程。假设在施加某一荷载后, 岩石内部发生破坏的微元数量为  $N_b$ , 则损伤变量可以按如下表达式进行定义:

$$D = \frac{N_b}{N} \quad (3)$$

式中:  $N$  为岩石所有微元体数目。

在应力持续加载过程中, 对于任意微小应力加载区间  $[F, F+dF]$ , 已发生破坏的微元体数目为  $NP(x)dx$ 。从而, 不难求得在应力水平  $F$  下所有发生破坏的微元体数目, 即:

$$N_b = N \int_0^F P(x) dx \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 化简得到岩石变形破坏过程中损伤演化方程:

$$D = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (5)$$

根据广义虎克定律, 得到岩石常规三轴压缩过程中加载段的本构模型

$$\sigma_1 = E \varepsilon_1 \exp \left[ -\left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (6)$$

式中:  $\sigma_1$  为轴压,  $\sigma_3$  为围压。

岩石损伤本构模型构建的关键一步即为选取合适的屈服准则, 以便后续确定分布参数  $m$  和  $F_0$ 。Drucker-Prager 准则不仅形式简洁, 而且还可以较好地描述岩石屈服过程。因此, 假设加载过程中岩石变形破坏服从 Drucker-Prager 准则<sup>[17]</sup>:

$$F = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 \quad (7)$$

式中:  $I_1$  为应力张量第一不变量;  $J_2$  为应力偏量第二不变量。

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[ (\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2 \right] \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}} \quad (10)$$

在全应力应变曲线的峰值点  $(\sigma_{lc}, \varepsilon_{lc})$  处, 曲线的斜率为 0。根据以上几何条件, 可得到方程(11)和(12):

$$\sigma_{lc} = E \varepsilon_{lc} \exp \left[ -\left( \frac{F_c}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \Big|_{\varepsilon_1=\varepsilon_{lc}} = 0 \quad (12)$$

整理化简方程(12), 可得

$$\frac{m}{F_0} \varepsilon_{lc} \left( \frac{F_c}{F_0} \right)^{m-1} \frac{F_c}{\varepsilon_{lc}} = 1 \quad (13)$$

联立方程(11)-(13), 可求解出  $m$  和  $F_0$

$$m = \frac{1}{\ln \frac{E \varepsilon_{lc}}{\sigma_{lc} - 2\nu \sigma_3}} \quad (14)$$

$$F_0 = \frac{\frac{(\sigma_{lc} - \sigma_3) E \varepsilon_{lc}}{\sqrt{3} (\sigma_{lc} - 2\nu \sigma_3)} + \alpha \frac{(\sigma_{lc} + 2\nu \sigma_3) E \varepsilon_{lc}}{\sigma_{lc} - 2\nu \sigma_3}}{\left( \ln \frac{E \varepsilon_{lc}}{\sigma_{lc} - 2\nu \sigma_3} \right)^{\frac{E \varepsilon_{lc}}{\sigma_{lc} - 2\nu \sigma_3}}} \quad (15)$$

#### 3.2 卸载段本构模型

在交变荷载作用下, 岩石将产生疲劳损伤。相应地, 弹性模量也会发生变化。考虑到每次循环加载卸载后, 岩石均会产生一定的残余轴向应变(不可恢复)。基于以上认识, 以残余轴向应变为内变量, 提出弹性模量的变化关系式<sup>[18]</sup>:

$$E = A \left( \overline{\sigma_{cr}} \right)^a \left( \varepsilon_{lr} \right)^b \quad (16)$$

其中

$$\overline{\sigma_{cr}} = \frac{q_c - p_c \tan \beta}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta} \quad (17)$$

$$p_c = \frac{\sigma_{1c} + 2\sigma_3}{3} \quad (18)$$

$$q_c = \sigma_{1c} - \sigma_3 \quad (19)$$

式中:  $p_c$ 、 $q_c$  和  $\sigma_{cr}$  分别为峰值平均主应力、峰值偏应力和等效应力;  $\beta$  为等效应力线倾角。

对方程(16)两端同时取对数

$$\ln E = \ln A + a \ln \overline{\sigma_{cr}} + b \ln \varepsilon_{lr} \quad (20)$$

采用方程(20)对试验数据进行拟合, 即可获得拟合参数  $A$ 、 $a$  和  $b$  的数值。

结合方程(6)和方程(16), 建立模拟岩石在交变荷载作用下变形破坏全过程的损伤本构模型:

$$\sigma_1 = A \left( \overline{\sigma_{cr}} \right)^a \left( \varepsilon_{lr} \right)^b \varepsilon_i \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right] + 2\nu \sigma_3 \quad (21)$$

## 4 试验结果及模型验证

### 4.1 试验结果分析

通过对试验所获得的数据进行处理, 可以得到石膏试样在循环加卸载过程中的应力应变曲线, 如图2所示。分析图2不难发现: 试样在经历加载后再按原应力路径进行卸载, 最终所得到的应力应变曲线并不重合。卸载曲线存在明显的滞后性, 始终处于同一循环加载曲线的下方。此外, 上一循环卸载曲线与下一循环加载曲线之间通过应力滞回环连接。纵观整个循环加卸载过程, 应力滞回环的面积随循环次数的增加呈现出先增大后减小趋势, 在图像上表现为应力应变曲线呈“疏-密-疏”并且向轴向应变增大的方向演化。造成此现象的主要因为, 石膏试样在加卸载过程中的应力上限超过了其屈服应力, 其内部产生了一部分不可恢复的塑性变形, 由于塑性变形是不可逆的, 导致卸载时仅能恢复原有发生的弹性变形。张志镇和高峰<sup>[19]</sup>认为岩石的损伤破坏与能量耗散的结果。外界对试样所做的功产生的能量主要转化为弹性能和耗散能, 而由于发生损伤破坏所需的耗散能大小即为滞回环面积值<sup>[20]</sup>。换言之, 岩石损伤程度与滞回环的面积呈正相关, 这在本文的研究结果中得到了很好的印证。

对应力应变曲线进一步分析, 依据试样受力特征可将整个加卸载过程划分为三个阶段: 原始裂隙压密(I)、弹性变形(II)和裂纹扩展阶段(III)。在应力达到裂纹闭合应力之前的I阶段, 应力应变曲线表现出极强向下凹发展的非线性行为, 此为试样内部原始裂隙在应力作用下发生压密闭合所造成。在II阶段由于裂隙已被压密, 试样的弹性模量近似为定值, 进而应力应变曲线呈线性变化。当应力超过屈服强度随即进入III阶段, 试样内部开始出现不可恢复的塑性变

形并伴随损伤的出现, 裂纹逐渐扩展并延伸, 应力应变曲线表现出一定的硬化特征。

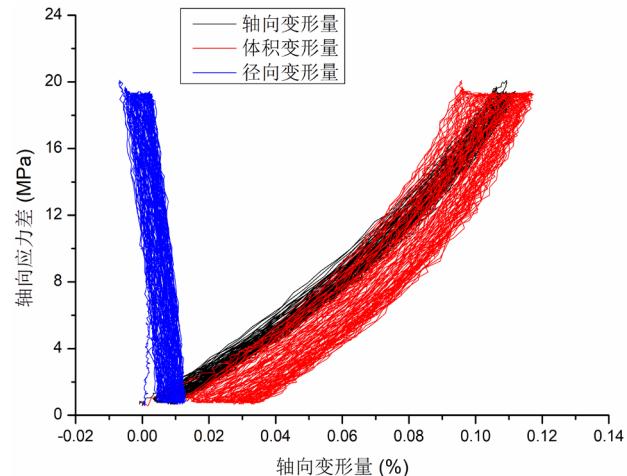


图2 循环荷载下石膏应力应变曲线关系图

岩石的变形模量能够反映出其抵抗外部荷载作用的变形能力强弱, 探究循环荷载下岩石变形模量的演化规律对深入了解岩石力学和变形特征具有重要意义。根据前面的试验结果可知, 循环加卸载过程中试样的卸载曲线并不按加载路径返回, 这也将导致试样存在两种不同的变形模量, 即加载模量  $EL$  和卸载模量  $EUL$ <sup>[21]</sup>。 $EL$  和  $EUL$  计算方式如下:

$$E_L = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{L,min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{L,min}} \quad (22)$$

$$E_{UL} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{UL,min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{UL,min}} \quad (23)$$

表1为根据试验结果计算得到的  $EL$  和  $EUL$  随循环次数变化的结果。由表1可知, 在每个循环中  $EUL$  始终大于  $EL$ , 并且随着循环次数增加,  $EUL$  和  $EL$  逐渐趋于稳定。定义卸载模量  $EUL$  与加载模量  $EL$  之差为模量变化差值  $\Delta E$ , 用于进一步描述循环荷载下试样模量变化规律。结合表1, 可以发现  $\Delta E$  随循环次数增加逐渐降低, 并趋于某一常数。分析认为: 在应力加载初期, 试样内部原始孔裂隙结构被压密, 抵抗变形能力也逐渐增强。当应力超过屈服强度时, 试样内部开始出现塑性变形。即使撤去外部荷载, 原有被压密的裂隙也无法重新打开恢复至初始弹性状态, 从而使得卸载模量比加载模量大。随着循环加卸载的不断进行, 试样经历的疲劳损伤愈加严重, 模量变化差值对外部荷载变化的敏感性逐渐降低。

表1 循环加卸载条件下试样变形模量与循环次数之间关系

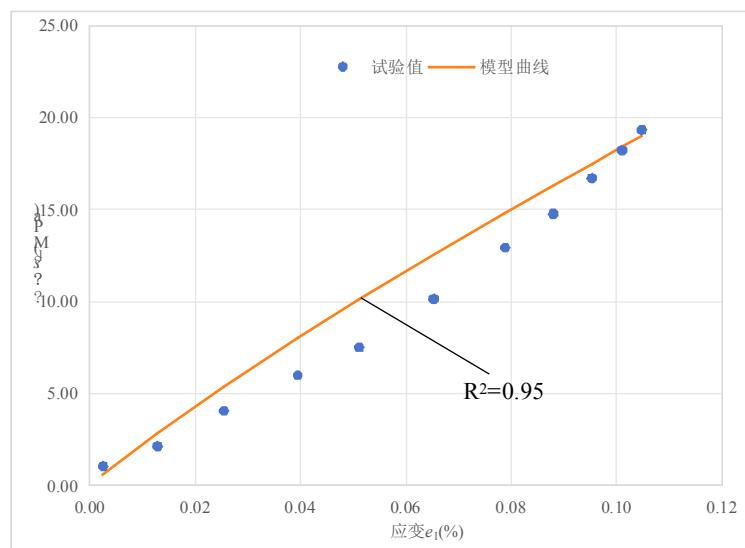
循环次数 n	加载模量 $EL(MPa)$	卸载模量 $EL(MPa)$	变化量 $\Delta E(MPa)$
1	17901	18989	1088
30	18543	19518	975
50	18846	19818	971

## 4.2 本构模型验证

为了验证所提出的循环加卸载作用下石膏本构模型的合理性, 将试验数据代入式(21)进行匹配。首先, 通过峰值点应力应变数据代入式(14)和(15)计算得到 Weibull 分布  $m$  和  $F_0$  的值。然后将  $m$  和  $F_0$  代入式(21)得到应力的理论值。最后将所得的理论值与试验值进行匹配, 绘制出循环加卸载作用下石膏本构模型曲线, 如图 3 和图 4 所示。表 2 为循环荷载下试样本构模型相关计算参数。需要指出的是, 由于整个加卸载过程进行了 50 次循环, 单个循环内的应变应变曲线变化趋势较为相似, 因此, 本文选取了 3 组代表性 (循环 1 次、30 次和 50 次) 的试验数据进行验证。表 2 列出了每组循环内试样本构模型验证的相关计算参数。由图 3 与图 4

可知, 由模型计算得到的理论值与试验数据有着较好的匹配度, 表明本文构建的循环荷载下岩石本构模型可以较好地模拟储气库运行过程中石膏的变形行为, 并且每组数据的拟合优度 ( $R^2$ ) 均大于 0.85, 从而验证了本文所构建本构模型的合理性与可靠性。

值得注意的是, 由于石膏属于典型的双重孔隙介质, 其内部存在大量随机分布的孔隙和裂隙等微缺陷。这些微缺陷对应力极度敏感, 使得应力应变曲线在峰前存在明显的非线性特征, 尤其是在应力加载前期。在未来的研究中, 可考虑石膏的非线性变形特征, 对循环荷载下的本构模型进行一步改进, 从而提高模型的计算精度和拓宽模型的运用范围。



第 1 次循环

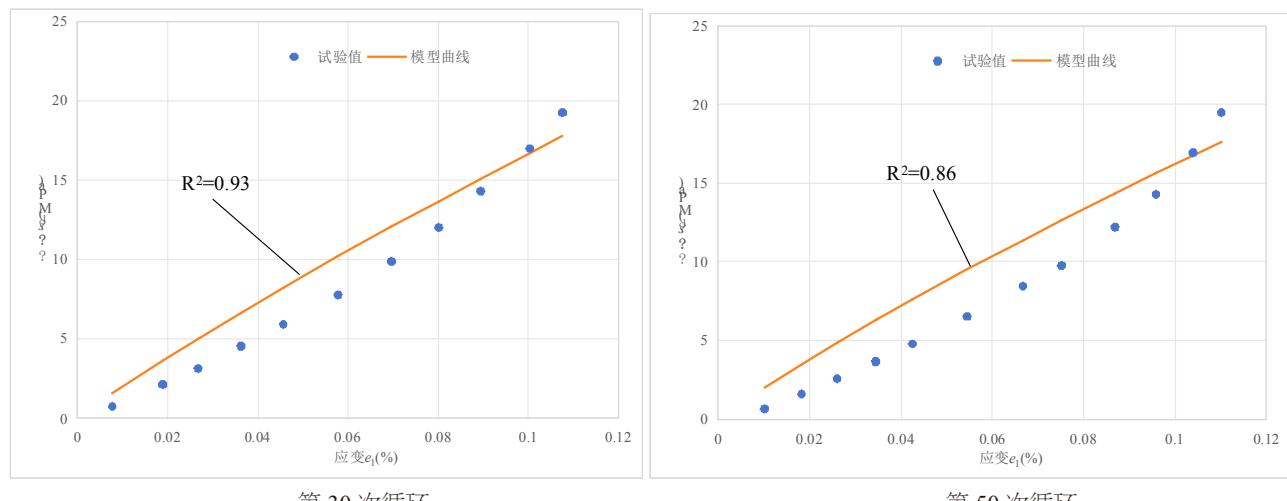


图 3 应力加载段模型曲线与试验数据对比

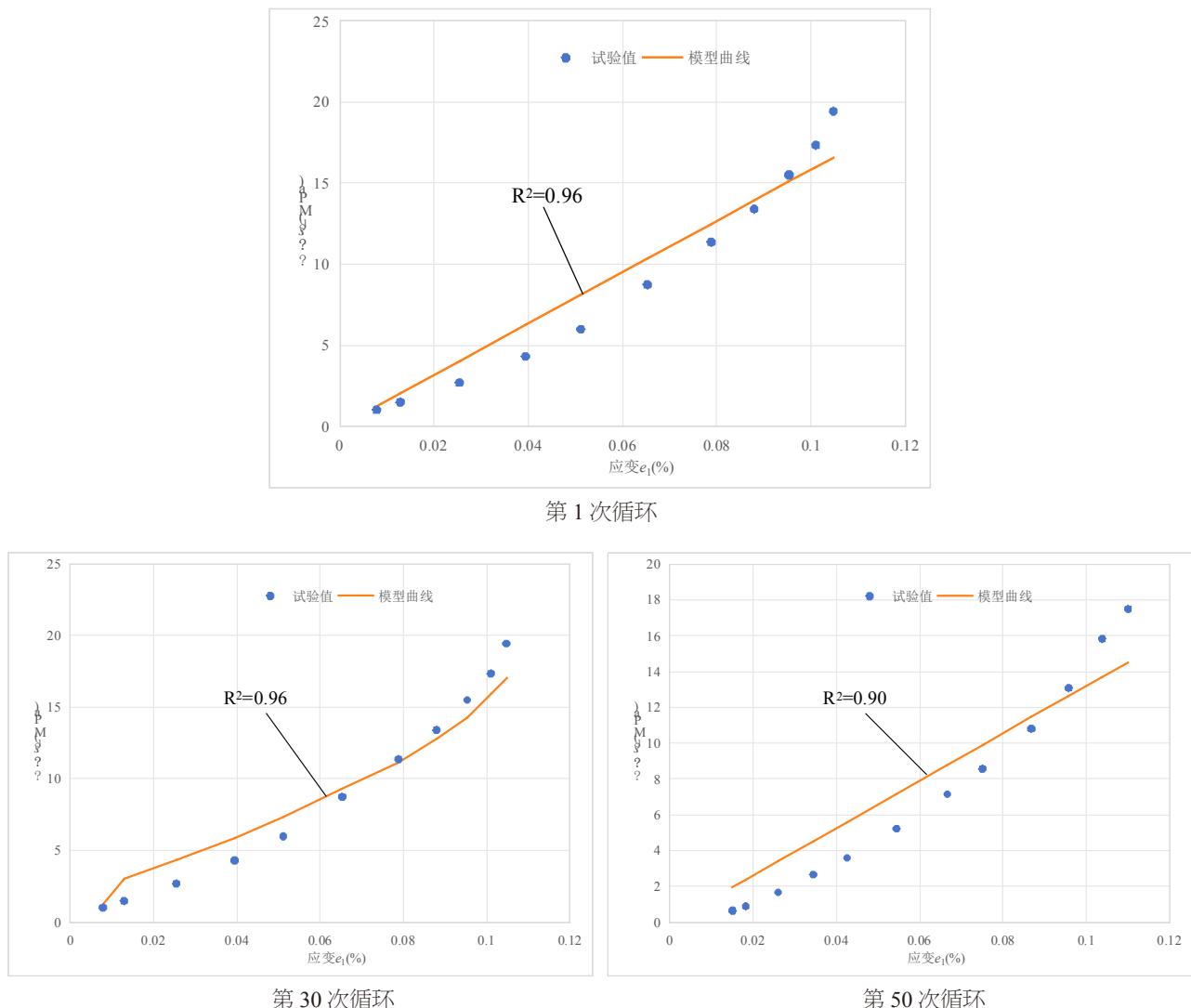


图4 应力卸载段模型曲线与试验数据对比

表2 循环加卸载下本构模型相关参数

模型参数	第1次循环		第30次循环		第50次循环	
	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载
$m$	0.39	1.69	0.34	1.33	0.4152	2.31
$F_0$	422.07	436.21	442.83	427.62	241.8831	297
$A$	/	0.65	/	0.94	/	0.36
$a$	/	2.69	/	1.85	/	1.61
$b$	/	-0.29	/	-1.04	/	-1.22

## 5 结论

(1) 基于统计损伤力学理论,建立加载条件下石膏的本构模型。引入材料内变量用于描述石膏在循环加卸载作用下发生的疲劳损伤变形,进一步构建模拟石膏在整个循环加卸载过程中变形破坏特征的损伤本构模型。

(2) 进行了循环加卸载下的石膏疲劳变形试验,观察到加载曲线与卸载曲线并不重合,而是存在一个明显的应力滞回环,并且单个循环内的卸载模量始终大于加载模量。随着循环次数增加,滞回环呈现出“疏-密-疏”的变化特征。

(3) 通过试验所得到的应力应变数据对提出的循环加卸载下石膏本构方程进行验证,发现所建立的本构模型能够较为准确地模拟石膏在加卸载条件下的变形行为,从而验证了模型的合理性与准确性。

## 参考文献

- [1] 邹才能,赵群,陈建军,等.中国天然气发展态势及战略预判[J].天然气工业,2018,38(04):1-11.
- [2] 冯朕辉,姜婷婷,尚修瑞,等.基于应变软化模型的地下储气库井筒水泥环完整性研究[J].安全与环境工程,2023,30(05):66-75.
- [3] 孙军昌,胥洪成,王皆明,等.气藏型地下储气库建库注采机理与评价关键技术[J].天然气工业,2018,38(04):138-144.
- [4] 周家文,杨兴国,符文熹,等.脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(06):1172-1183.
- [5] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003(10):1581-1585.
- [6] 张媛,许江,杨红伟,等.循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规

- 律的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(02):320-326.
- [7] 王天佐,王春力,薛飞,等.不同循环加载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S1):2881-2891.
- [8] Yu HD, Chen WZ, Gong Z, et al. Loading-unloading behavior of a clayey rock under thermo-hydro-mechanical conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 148: 104966.
- [9] Meng QB, Liu JF, Pu H, et al. Effects of cyclic loading and unloading rates on the energy evolution of rocks with different lithology[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 34: 100455.
- [10] 曹文贵,赵明华,刘成学.岩石损伤统计强度理论研究[J].岩土工程学报,2004(06):820-823.
- [11] 周宏伟,侯魏,张龙丹,等.循环加载条件下考虑温度的媒体本构模型[J].煤炭学报,2024,49(01):442-453.
- [12] Ren CH, Yu J, Liu XY, et al. Cyclic constitutive equations of rock with coupled damage induced by compaction and cracking[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 1153-1165.
- [13] Liu XS, Ning JG, Tan YL, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85: 27-32.
- [14] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩石疲劳损伤扩展规律CT细观分析初探[J].岩土工程学报,2001(02):191-195.
- [15] 刘树新,刘长武,韩小刚,等.基于损伤多重分形特征的岩石强度Weibull参数研究[J].岩土工程学报,2011,33(11):1786-1791.
- [16] Wu LY, Wang ZF, Zhang JW, et al. A Continuous Damage Statistical Constitutive Model for Sandstone and Mudstone Based on Triaxial Compression Tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55:4963-4978.
- [17] Chen ZH, Sha S, Xu LD, et al. Damage Evaluation and Statistic Constitutive Model of HighTemperature Granites Subjected to Liquid Nitrogen Cold Shock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 2299-2321.
- [18] 王者超,赵建纲,李术才,等.循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J].岩石力学与工程学报,2012,31(09):1888-1900.
- [19] 张志镇,高峰.单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(06):1198-1207.
- [20] 李晓彤,周跃进,王明宇.循环载荷下滞回环与石膏损伤破坏性能的关系[J].实验力学,2018,33(02):194-200.
- [21] Zhao Y, Liu J, Zhang C, et al. Mechanical behavior of sandstone during post-peak cyclic loading and unloading under hydromechanical coupling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(8): 927-947.