



## 注采热应力对盐穴压气储能储库稳定性影响研究

井文君<sup>1</sup>, 吴炜晔<sup>1</sup>, 马洪岭<sup>2,3</sup>, 刘法辉<sup>1</sup>, 李炳森<sup>1</sup>, 徐荣徽<sup>4</sup>, 孙晓萌<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; <sup>2</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>4</sup>中电建新能源集团股份有限公司山东分公司, 山东 济南 250000)

**摘要:** 为探究快速循环充放气引发的热应力对盐穴压气储能储库稳定性的影响, 以某盐穴压气储能电站项目为支撑, 基于 COMSOL Multiphysics 软件构建数值模型, 重点分析了不同注采速率及长期运行下腔内空气温度场的演化规律, 以及热应力作用下围岩的温度场、应力场与位移场响应特征。研究结果表明: 盐穴腔内温度演化呈现从热累积阶段向热平衡阶段过渡的阶段特征, 注采速率与腔内温差、峰值温度呈正相关, 高注采速率会显著加剧热扰动与热应力循环效应; 热应力会重构围岩应力状态, 使盐岩与夹层界面处应力集中, 压应力被显著抵消甚至转为拉应力, 显著增大界面拉张破坏风险, 且该风险随注采速率提高而上升; 热应力与内压应力叠加, 进一步加剧围岩变形, 四种注采速率下运行 30 年后围岩最大位移增幅达 7.79%~11.36%, 且位移增量及增幅均随注采速率提升而增加, 最大位移始终集中于腔顶区域。研究成果揭示了注采热应力作用下盐穴压气储能储库的稳定性演化机制, 可为储库的注采方案优化、长期安全运行与风险防控提供理论依据与工程参考。

**关键词:** 压气储能; 注采循环; 温度; 热应力; 稳定性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0130

中图分类号: TE 822

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

## Study on the Influence of Injection-Production Thermal Stress on the Stability of Salt Cavern Compressed Air Energy Storage Reservoirs

JING Wenjun<sup>1</sup>, WU Weiye<sup>1</sup>, MA Hongling<sup>2,3</sup>, LIU Fahui<sup>1</sup>, LI Bingsen<sup>1</sup>, XU Ronghui<sup>4</sup>, SUN Xiaomeng<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>China University of Petroleum (East China), College of Pipeline and Civil Engineering, Qingdao 266580, Shandong, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>4</sup>Power China Renewable Energy Co., Ltd. Shandong Branch, Jinan 250000.)

**Abstract:** To investigate the influence of thermal stress induced by rapid cyclic gas charging and discharging on the stability of compressed air energy storage (CAES) caverns in salt rock, a numerical model was established using COMSOL Multiphysics software based on the a Salt Rock CAES Power Station project in Shandong Province. The study focuses on

收稿日期: 2026-02-03; 修改稿日期: 2026-04-30。

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2024ME165)。

第一作者: 井文君 (1986—), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为压缩空气储能, E-mail: sdujwj@163.com; 通信作者: 井文君, 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为压缩空气储能, E-mail: sdujwj@163.com。

引用本文: 井文君, 吴炜晔, 马洪岭, 等. 注采热应力对盐穴压气储能储库稳定性影响研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.

**Citation:** JING Wenjun, WU Weiye, MA Hongling, et al. Study on the Influence of Injection-Production Thermal Stress on the Stability of Salt Cavern Compressed Air Energy Storage Reservoirs[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

analyzing the evolution law of the air temperature field inside the cavern under different injection-production rates and long-term operation, as well as the response characteristics of the temperature field, stress field and displacement field of the surrounding rock under the action of thermal stress. The results show that the temperature evolution inside the salt cavern presents a staged characteristic transitioning from a heat accumulation stage to a heat balance stage. The injection-production rate is positively correlated with the temperature difference and peak temperature inside the cavern, and a high injection-production rate significantly intensifies the thermal disturbance and cyclic thermal stress effect. Thermal stress reconstructs the stress state of the surrounding rock, leading to stress concentration at the interface between salt rock and interlayers. The compressive stress is significantly counteracted or even converted into tensile stress, which notably increases the risk of tensile failure at the interface, and this risk rises with the increase of injection-production rate. The superposition of thermal stress and internal pressure stress further aggravates the deformation of the surrounding rock. After 30 years of operation under four injection-production rates, the maximum displacement of the surrounding rock increases by 7.79% - 11.36%. Both the displacement increment and growth rate rise with the increase of injection-production rate, and the maximum displacement is always concentrated in the roof area of the cavern. The research findings reveal the stability evolution mechanism of salt rock CAES caverns under the action of injection-production thermal stress, which can provide a theoretical basis and engineering reference for the optimization of injection-production schemes, long-term safe operation and risk prevention and control of salt rock storage caverns.

**Keywords:** compressed air energy storage; injection-production cycle; temperature; thermal stress; stability

能源清洁化和低碳化是全球能源发展的不可逆趋势，中国作为能源消费大国，能源消费以煤炭为代表的化石能源为主，但能源清洁化已经成为国家能源发展重大的战略部署。根据预测，2030年我国清洁能源消费量占比将要达到30%以上<sup>[1]</sup>。太阳能和风能作为可再生清洁能源的代表，具有巨大的开发潜力。但太阳能、风能等清洁能源具有不能持续供给和地域性分布强等天然缺点，大规模并网将对电网的安全和稳定运行带来冲击。依托深部地下空间建设大型压气储能发电站具有储能规模大、经济性好和安全性高等优势，已经在行业内达成共识<sup>[2-4]</sup>。利用地下空间建设压气储能电站能够极大促进我国电力低碳转型进程，是我国能源领域的重要发展方向。

盐岩具有极低渗透率和孔隙度、良好塑性和损伤自愈特点，这使得盐岩开采后形成的洞室具备良好的密封性和稳定性，被视作是最适合压气储能的

地质结构<sup>[5-6]</sup>。盐岩作为我国地下储气库的主要介质，其力学特性直接关系到储气库的安全性和稳定性。温度对盐岩力学性质的影响近年来成为盐岩力学性质方面的研究热点，主要采用实验方法结合理论分析。翟松韬等<sup>[7]</sup>通过单轴压缩实验发现，高温处理后的盐岩承载能力显著降低，内部裂纹增多，结构整体变得较为脆弱。Li<sup>[8]</sup>、康燕飞<sup>[9]</sup>等学者研究发现损伤盐岩在一定的试验温度范围内，其恢复效果随着温度的上升而增强。Li等<sup>[10]</sup>针对盐穴因蠕变变形易发生的破坏问题，提出了热力耦合模型，该模型考虑了温度和压力的共同作用对盐岩力学特性的影响。杨玉良等<sup>[11]</sup>人通过分析不同蠕变过程中温度对盐岩变形的影响，揭示了渗透压和温度的主要作用机制，结果表明：渗透压越小、温度越高，蠕变应变越大。Liang<sup>[12]</sup>等通过盐岩高温三轴蠕变试验，观察到随着温度的上升，累积平均体积应变呈现增大的趋势。张胜利等<sup>[13]</sup>和邵保平等<sup>[14-15]</sup>人经过

试验, 获得了层状盐岩稳态蠕变率与温度的指数关系式, 建立了稳态蠕变率本构方程。Cheng等<sup>[16]</sup>在热-水-力耦合条件下进行了三轴压缩耦合渗透试验, 给出了不同温度下不纯盐岩的剪胀边界和破坏强度包络线。李浩然等<sup>[17]</sup>通过研究不同温度条件下盐岩蠕变变形特征, 发现随环境温度升高, 盐岩稳态蠕变率呈指数形式增大。Dong等<sup>[18]</sup>通过开展多级温度下盐岩三轴蠕变试验, 指出随着温度的上升, 瞬态蠕变的持续时间缩短, 而稳态蠕变速率则加快。李文婧等<sup>[19]</sup>人基于热固耦合模型, 分析了注采过程中热效应、速率和导热系数对储气库腔体稳定性的作用。Polański等<sup>[20]</sup>基于Huntorf发电机的实际参数, 通过数值模拟发现压缩空气的温度变化对CAES洞穴周围岩体的变形应力状态具有显著影响。Huang<sup>[21]</sup>等基于实际气体状态方程建立了井筒-储气腔热力耦合模型, 实现了对注采过程中压力、温度及速度分布的动态预测, 为盐穴储气系统热-流-固多场耦合分析提供了重要的理论工具。蔚立元<sup>[22]</sup>等建立了内衬式岩洞储氢的热-流-固耦合模型, 系统研究了洞室埋深、间距、注气温度及注采方式对洞室群稳定性的影响。研究表明, 洞室顶部在注气结束时出现最大拉应力, 是最容易出现拉伸破坏的位置。Zhou<sup>[23]</sup>等建立了内衬式储库的热力耦合模型, 通过数值模拟揭示了在一个完整运营周期内, 密封层和混凝土衬砌的温度呈现“升-降-降-升”的变化规律, 且温度波动主要集中于衬砌层和密封层, 围岩温度变化不明显。以上的现有研究大多集中在常规调峰储气库腔体中, 与常规调峰储库相比, 压气储能储库在充、放气频率上相差甚大, 常规调峰储库每年循环一次(有时达到20次/a), 而压气储能每天就进行一次循环<sup>[24]</sup>, 其充放频率及其引发的温度效应远大于常规调峰储库; 而针对地下盐穴压气储能储库的稳定性研究中也鲜有针对快速循环充放气引起的温度效应的研究。本文依托在建的某盐穴压气储能电站项目, 探究了注采热应力作用下盐穴压气储能储库稳定性演化规律。

本研究从快速循环充放气的盐穴压气储能储库腔内空气温度分布规律出发, 以某盐穴储库为工程背景, 基于COMSOL Multiphysics软件, 系统分析注采热应力作用下腔内温度分布规律以及注采热应力对围岩的影响范围, 通过对比有无热应力两种工况下腔周围岩应力场、位移场特征, 探讨了热应

力在对压气储能储库稳定性的影响。研究结果可为类似地质条件下压气储能储库的建设和安全运行提供一定的指导, 促进地下盐穴大规模储能发展。

## 1 研究背景与模型建立

### 1.1 工程背景与几何模型

以某盐矿地质资料及腔体数据为工程背景, 模型的具体几何参数参照某盐穴压气储能储库。根据高精度三维地震结果, 腔体最大跨度位于南北向, 约330 m, 东西方向跨151 m, 盐层顶部在-1155.20 m, 盐层底部在-1442.00 m, 腔顶位置-1275 m, 腔底-1382 m, 最大腔高约107 m。

为了便于开展针对性研究, 基于形状相似及等体积原则, 对实际工程模型进行适当简化, 利用COMSOL Multiphysics软件建立如图1所示的二维对称模型。该模型长为750 m, 总高度为500 m, 埋深为-1000 m至-1500 m, 其中包括155.2 m的上覆地层与58m的下覆地层。简化腔体形状由两个四分之一的椭圆和一个矩形组成, 最大腔高为107 m。岩盐层中间夹有四层夹层, 其中一层夹层与腔体连接, 该地区夹层的岩性为白云质泥灰岩、泥灰岩等。地应力梯度取23 kPa/m, 模型顶面施加23 MPa的上覆地层压力。初始温度由地表温度(25°C)和地温梯度(25.5°C/km)决定。腔壁受到空气压力, 并与空气进行热交换。整个几何体共生成10883个网格单元, 平均单元质量为0.8327, 最小单元质量为0.2412。其中在腔体边界和层间使用了更细的网格来减少误差。

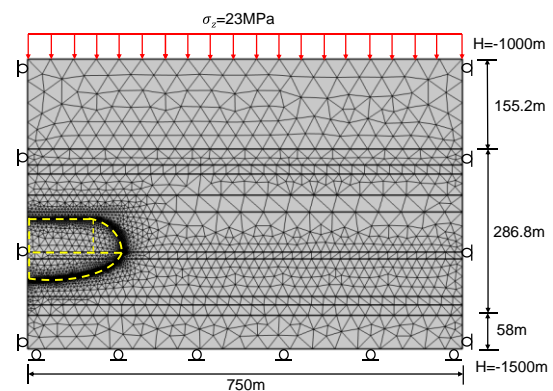


图1 数值模拟模型

Fig. 1 Numerical Simulation Model

## 1.2 数值模型与参数设置

在 COMSOL Multiphysics 软件中, 基于偏微分方程 (PDE) 求解器, 构建盐穴压气储能储库的非等温、流体流动以及岩土力学变形之间耦合的数值模型。

在固体力学模块中, 设定相应的蠕变本构关系、热膨胀效应、边界荷载形式及约束支撑条件等关键数值参数, 考虑了初始应力场、热膨胀和盐岩的蠕变, 从而得出围岩的本构方程:

$$\sigma = \sigma_0 + D:(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_{cr}) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_0$  是初始应力张量;  $D$  是弹性张量;  $\varepsilon_{th}$  和  $\varepsilon_{cr}$  是热应变张量和蠕变应变张量。

热应变是体积应变导致温度变化的原因, 其可通过线性热膨胀方程表达:

$$\varepsilon_{th} = \alpha_T(T - T_0) \quad (2)$$

其中,  $\alpha_T$  是围岩热膨胀系数;  $T$  是围岩温度;  $T_0$  是初始围岩温度。

蠕变应变  $\varepsilon_{cr}$  通常用诺顿模型来描述, 该模型考虑了有效应力和温度的影响:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{3}{2} A e^{-\frac{Q}{RT}} (\sqrt{3} J_2)^{n-1} \cdot \sigma_d \quad (3)$$

其中,  $Q$  是蠕变活化能;  $\sigma_d$  是偏差应力张量;  $J_2$  是偏差应力张量的第二不变量;  $A$  和  $n$  分别是蠕变速率系数和应力指数。

在固体传热模块内, 配置上下边界的温度边界条件与热通量边界条件, 进而对围岩的力学平衡方程、气体渗流方程及能量守恒方程展开耦合求解。围岩初始应力场通过固体力学模块的分段逐级加载方式生成, 计算过程中需选取足够小的时间步长, 该模型设置最小步长为 0.001 h, 最大步长为 1 h, 以规避数值计算不收敛及结果失真等问题。模型所采用的岩石力学参数, 均来源于目标区域地层岩芯的室内力学试验。岩石力学参数和热力参数、空气物性参数具体取值如表 1<sup>[25-26]</sup>、表 2 所示。

该数值模型中注采循环周期是基于该市电网负载特性与电站设计功率及储库容量综合确定的。如图 2 所示, 压气充电时间为夜间的用电低谷期, 即午夜 0 时至上午 8 时; 随后上午 8 时至 11 时, 开始放气释能 3 小时; 午间 11 时至 17 时维持压力 6 小时; 晚 17 时至 20 时放气 3 小时; 最后储库维持低压状态直至 24 时, 完成一天的循环。其中,  $q_{in}$  为注气速率,  $q_{out}$  为采气速率。

表 1 岩石力学参数和热力参数

Table 1 Rock Mechanics Parameters and Thermal Parameters

岩性	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	泊松比	导热系数 (W/(m·K))	恒压热容 (J/(kg·K))	热膨胀系数 (1/K)	蠕变参数 A (MPa <sup>-n</sup> ·h <sup>-1</sup> )	蠕变参数 n
盐岩	2160	4.36	0.24	4.8	840	5×10 <sup>-5</sup>	5.294×10 <sup>-9</sup>	2.967
夹层	2460	61.5	0.23	2.7	850	1×10 <sup>-4</sup>	7.371×10 <sup>-9</sup>	1.139
上覆地层	2460	61.5	0.23	5.62	850	1×10 <sup>-4</sup>	—	—
下覆地层	2460	61.5	0.23	5.62	850	1×10 <sup>-4</sup>	—	—

表 2 空气物性参数

Table 2 Air Physical Property Parameters

参数	数值
标况下密度(kg/m <sup>3</sup> )	1.225
气体常数(J/(kg·K))	287.05
恒压比热容(J/(kg·K))	1005
恒温比热容(J/(k·gK))	718
临界状态的气体压力(MPa)	3.77
临界状态的气体温度(K)	132.55

## 2 腔内空气的温度分布规律

对该模型做出如下基本假设:

(1) 盐穴腔内只充满单一组分单相流体, 即空

体, 它们被视为连续介质;

(2) 忽略洞室的壁面对气体流动产生的摩擦

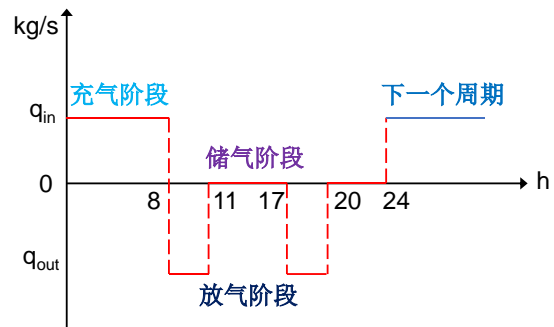


图 2 盐穴压气储能储库运行周期<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Operation Cycle of CAES<sup>[27]</sup>

阻力；

(3) 围岩渗透率很低，不考虑空气泄漏对储气洞室内温度和压力的影响；

(4) 热传导遵循傅里叶定律。

根据 AbuAisha 和 Rouabhi<sup>[20]</sup> 的研究，对于可压缩牛顿流体，流体力学的能量守恒方程为：

$$\rho \dot{u} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{v} \quad (4)$$

质量守恒方程为：

$$\dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5)$$

式中， $\boldsymbol{\sigma}$  是流体的应力张量， $u$  是比内能， $\boldsymbol{\psi}$  是流体的热通量， $\nabla \cdot \mathbf{v}$  是速度场的散度。

根据焓的定义，并对其求物质导数经过整理可以得到：

$$h = u + \frac{p_a}{\rho} \quad (6)$$

$$\dot{u} = \dot{h} + \frac{\dot{p}_a}{\rho} - \frac{p_a}{\rho^2} \dot{\rho} \quad (7)$$

式中， $h$  为流体的比焓， $p_a$  为腔内空气的压力。将式 (7) 代入式 (4) 能量守恒方程可以得到：

$$\rho \dot{h} - \dot{p}_a + \frac{p_a}{\rho} \dot{\rho} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{v} \quad (8)$$

对式 (5) 质量守恒方程进行变形，将密度变化率代替为速度场散度，得：

$$\frac{p_a}{\rho} \dot{\rho} = -p_a \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (9)$$

从而将质量守恒引入能量方程。

将应力张量分解为压力部分和粘性部分，可以得到：

$$\boldsymbol{\sigma} = -p_a \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \quad (10)$$

式中， $\boldsymbol{\tau}$  为粘性应力张量， $\mathbf{I}$  为单位张量。计算应力做功，将总应力做功分解为可逆的压力功和不可逆的粘性耗散两部分，可表示为：

$$\boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{v} = -p_a \nabla \cdot \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (8)，经过整理可以得到：

$$\rho \dot{h} - \dot{p}_a - p_a \nabla \cdot \mathbf{v} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi} - p_a \nabla \cdot \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (12)$$

将式 (12) 经过整理可以推导得到以焓表示的能量守恒方程：

$$\rho \dot{h} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi} + \frac{Dp_a}{Dt} + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (13)$$

引入焓的全微分形式，将焓与可测量的温度  $T_a$  和压力  $p_a$  联系起来<sup>[29]</sup>：

$$dh = C_p dT_a + \frac{1}{\rho} (1 - T_a \beta) dp_a \quad (14)$$

式中， $C_p$  是恒压热容， $\beta$  是体积膨胀系数。取其物质导数形式：

$$\dot{h} = C_p \dot{T}_a + \frac{1}{\rho} (1 - T_a \beta) \dot{p}_a \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (13)，经过整理化简可得到：

$$\rho C_p \dot{T}_a - T_a \beta \dot{p}_a = -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (16)$$

根据式 (17) 傅里叶定律，将其代入式 (13)，可以得到：

$$\boldsymbol{\psi} = -\Lambda \nabla T_a \quad (17)$$

$$\rho C_p \dot{T}_a - T_a \beta \dot{p}_a = \nabla \cdot (\Lambda \nabla T_a) + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (18)$$

将式 (18) 中的物质导数  $\dot{T}_a$  和  $\dot{p}_a$  展开为偏导数形式，得到最终的温度形式能量守恒方程：

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T_a}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T_a \right) = \nabla \cdot (\Lambda \nabla T_a) + \beta T_a \left( \frac{\partial p_a}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p_a \right) + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (19)$$

最终的温度形式的能量守恒方程反应了盐穴腔内的温度的变化规律，腔内温度主要考虑了三方面的影响：热传导过程，反映了热量通过腔周围岩及空气自身从高温区向低温区的传递，主导了腔内与腔周围岩之间的热交换过程；可压缩流体的压力热效应，反应了在注气压缩过程中，空气温度显著上升，在采气膨胀过程中，空气温度急剧下降；粘性耗散热效应，尽管在整体能量中占比通常较小，但压缩空气频繁快速的充气和放气具有不可忽视的影响。

空气与腔周围岩的热传导遵循傅里叶定律，即共轭传热边界条件，在共轭传热边界条件下，流体和固体在界面处的温度和热通量相等。传热系数的概念可以通过腔体表面流-固界面热量交换去定义：

$$\lambda_c = \frac{\boldsymbol{\psi}_s \cdot \mathbf{n}}{T - T_a} \quad (\text{W/m}^2/\text{K}) \quad (20)$$

式中， $\lambda_c$  是传热系数， $\boldsymbol{\psi}$  是固体壁面上的热通量， $\mathbf{n}$  是洞室内法向矢量， $T_a$  是流经壁面的流体温度， $T$  是围岩的温度。

### 3 注采速率对腔内空气温度的影响

由类似条件下压气储能储库的注采速率，选取注气速率分别为 80 kg/s, 100 kg/s, 120 kg/s 和 140 kg/s 四种工况为实验组。采气速率和注气速率的比值与图 2 中运行周期中注气时间和采气时间的比值相同，比值为 4:3，以便达到腔内注采平衡。在其他条件一致的情况下进行数值模拟计算，分析不同注采速率下腔内空气温度的变化规律。模拟方案的具体参数设定值见表 3。

表3 运行参数

Table 3 Operation Parameters

组号	1	2	3	4
腔内初始温度 $T_0(^{\circ}\text{C})$	40	40	40	40
腔内初始压力 $P_0(\text{MPa})$	8.3	8.3	8.3	8.3
注入空气温度 $T_{in}(^{\circ}\text{C})$	40	40	40	40
注入空气压力 $P_{in}(\text{MPa})$	8.3	8.3	8.3	8.3
注气速率 $q_{in}(\text{kg/s})$	80	100	120	140
采气速率 $q_{out}(\text{kg/s})$	106.67	133.33	160	186.67

### 3.1 不同注采速率下的腔内温度分析

储库运行一年后，盐穴腔内气体温度表现出明显的循环波动，主要受注气和采气阶段压缩加热和膨胀冷却的动力学影响<sup>[30]</sup>。在一个注采循环周期中温度呈现出“升-降-降-升”的趋势，与Rutqvist<sup>[31]</sup>等数值模拟结果基本一致，且注气过程温度并非一直增大，而是呈开口向下的抛物线形状；采气过程中，最后还有小幅度的升温过程，与陈剑文<sup>[32]</sup>等的研究结果基本一致。在采气阶段结束，气体储存阶段腔内空气的温度轻微下降，这主要是由于采气过程中的气体膨胀使气体温度低于腔周围岩温度。一旦采气终止，热量逐渐从温度较高的围岩转移到温度较低的气体中，导致气体温度相应升高。较高的注气速度导致单位时间内更频繁的热交换，从而加剧了温度振荡。由于热的积累效应，随着注采循环

次数的增加，一个循环的平均空气温度随着循环次数的不断增加而略有增加。由图3定量分析显示，在运行一年后，四种速率下一个运行周期内，空气最高温度分别为70.2℃、80.8℃、88.5℃、94.0℃，最低温度分别为31.8℃、34.4℃、37.5℃、40.2℃，四种速率下周期内温差分别为38.4℃、46.4℃、51.0℃、53.6℃。此外，与注气速率80 kg/s时峰值温度为70.2℃相比，工况2至4的最高温度分别升高了15.11%、26.07%和33.90%。 $T_{max,1}$ 和 $T_{min,1}$ 分别表示不同注气速率下第一个注采循环周期下的最高和最低气体温度，由图可知，注气速率越大，运行一年后空气温度峰值与 $T_{max,1}$ 和 $T_{min,1}$ 的差值越大，即一个循环的平均空气温度增加量越大，四种速率下运行一年后30个循环周期（一个月）的平均空气温度增加量分别为1.2℃、1.5℃、1.8℃、2.1℃。

由上述定量分析可知，随着注气速率的升高，腔内气体的温差更大、峰值更高，导致更高频的热扰动，会诱发围岩的反复热膨胀和收缩，放大热应力循环，促进围岩微裂纹的萌生和扩展。这一现象强调了在压气储能储库频繁、快速充放气的过程中，考虑热应力影响的重要性，从而强调了考虑热应力对盐穴损伤演化和长期运行安全性的潜在影响的必要性。

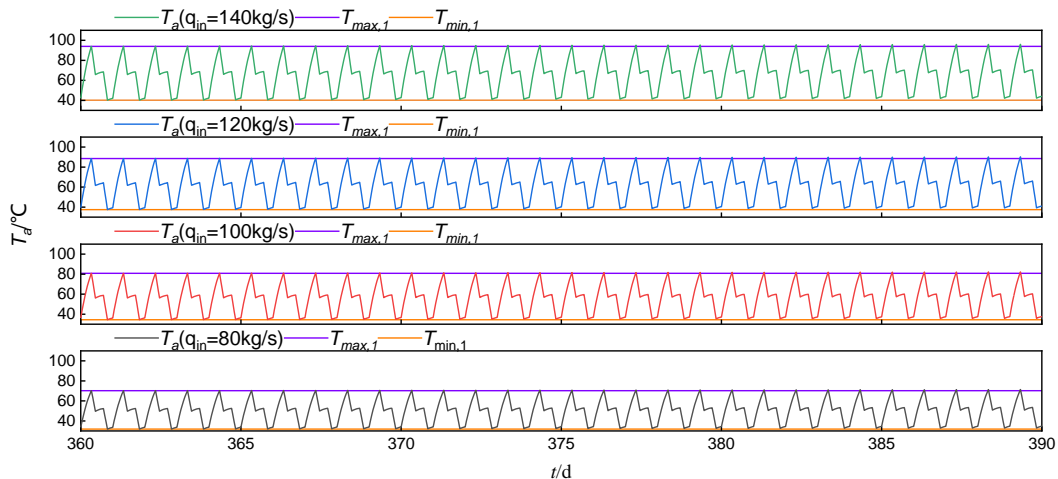


图3 运行1年后腔内温度变化

Fig. 3 Temperature Change in the Cavity After 1 Year of Operation

### 3.2 长期运行下的腔内温度分析

图4、图5展示了四种不同注采速率下，运行

10年和30年后一个月内盐穴腔内温度的演变规律。由图可知，第十年四种速率下的气体温度峰值较第

一年明显升高，而第三十年的气体温度峰值较第十年增加很少，且注采速率与温度上升幅度呈正相关。

由图4分析可知，运行第十年，经多年循环的持续热累积，盐岩壁面已被充分加热，与注入空气的热势差大幅缩小，盐岩热储存能力趋于饱和，地层导热的热散失速率随储库温度升高显著增强，压缩热净积累量大幅减少，温度上升速率骤降，因此四种注采速率下的最高温度较第一年虽仍有显著抬升，分别达78.5℃、90℃、98.7℃、105.5℃，但30个循环周期的平均空气温度增加量已大幅降至0.13℃、0.14℃、0.15℃、0.16℃，仅为第一年的约1/10，且不同注采速率下的增加量差值大幅收窄，体现出中期温度增速骤缓的特征；由图5分析可知，运行第三十年，储库已完全进入热输入与热输出的动态平衡状态，注气带入的压缩热与采气带走的热量、通过盐岩导热向地层深部散失的热量基本持平，压缩热净积累量趋近于0，温度失去上升的核心驱动力，因此四种注采速率下的最高温度较

第十年仅极小幅抬升，分别达78.8℃、90.6℃、99.4℃、106.4℃，涨幅均不足1℃，且30个循环周期的平均空气温度增加量已几乎不可测，标志着储库温度进入长期稳定的阶段，仅存在极微小的波动。

通过对比运行第一年、第十年、第三十年的腔内温度变化，可知长期运行的盐穴压气储能储库腔内温度变化体现出初期快速上升、中期增速骤缓、后期趋于稳定的趋势。从第一年到第三十年的温度变化，本质是储库从“热累积主导”向“热平衡主导”的不可逆转转变：第一年到第十年是热累积的核心阶段，峰值温度的显著升高是压缩热持续累积的直接结果；第十年到第三十年，储库已完成热累积，进入热平衡稳态，温度失去上升的核心驱动力，因此峰值温度基本保持稳定，这一特征也印证了盐穴储库温度变化“增速放缓后趋于稳定”的长期规律，且热平衡状态一旦形成，可长期维持，无明显温度波动。

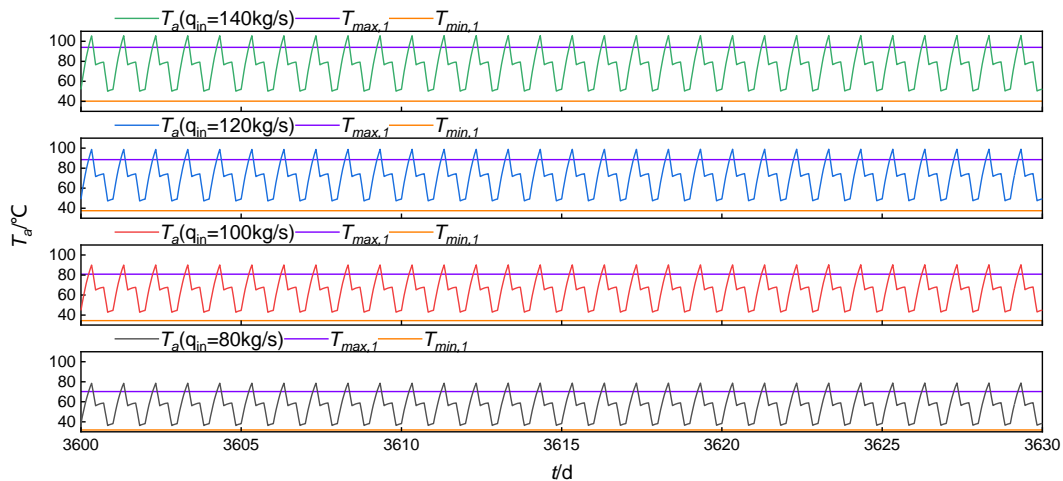


图4 运行10年后腔内温度变化

Fig. 4 Temperature Change in the Cavity After 10 Years of Operation

## 4 热应力对围岩稳定性的影响

### 4.1 影响范围

图6为运行30年后四种注采速率下注气阶段的围岩温度分布图。随着离腔体距离的增加，围岩温度显著降低，不同情况下的衰减率不同。值得注意的是，随着注采速率的增加，初始温度升高，围岩

热影响区逐渐扩大。这表明较高的注采速率抑制了有效的散热，导致腔体附近的热量持续积聚。

图7为运行30年后四种注采速率下储存阶段的围岩温度分布图。在储存阶段，围岩表现出明显的“热峰”结构。具体来说，在腔体附近，采气过程中快速冷却导致温度下降，而延迟热传导导致中间区域变暖。在此区域之外，随着深度的增加，温度

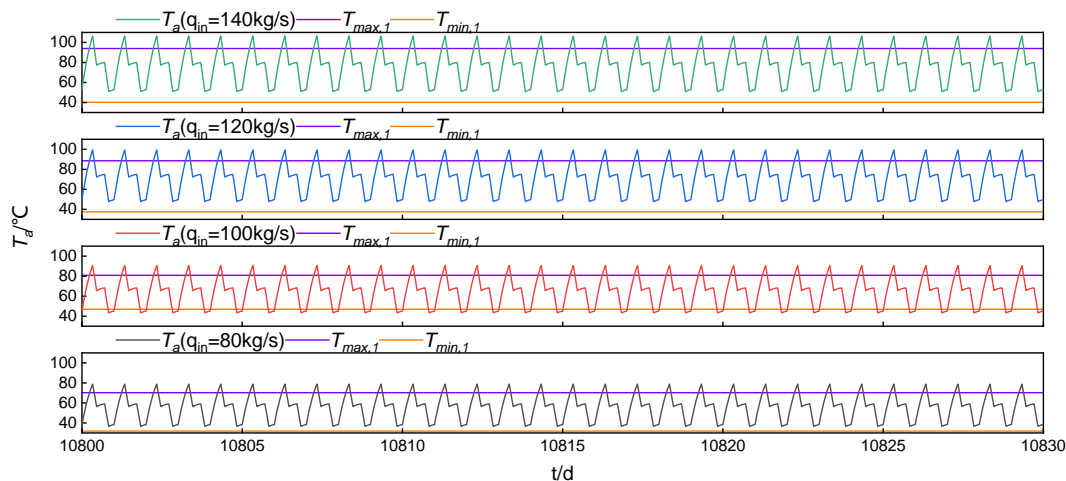


图5 运行30年后腔内温度变化

Fig. 5 Temperature Change in the Cavity After 30 Years of Operation

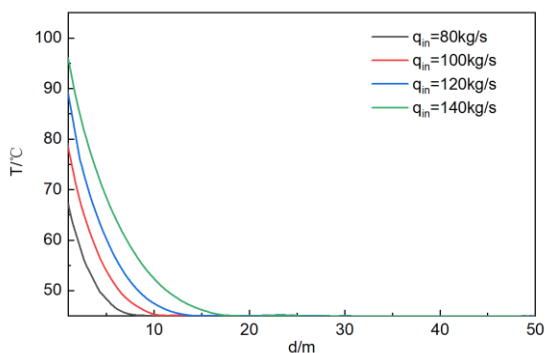


图6 注气阶段围岩温度分布

Fig. 6 Temperature Distribution in Surrounding Rock During Gas Injection Stage

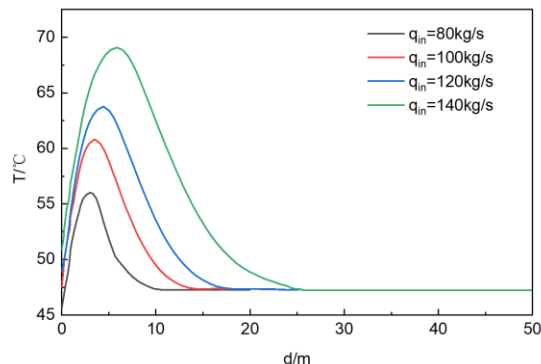


图7 储气阶段围岩温度分布

Fig. 7 Temperature Distribution in Surrounding Rock During Gas Storage Stage

逐渐向初始地热值衰减。重要的是，随着注采频率的增加，热峰高度增加，其位置移位更深。这一现象表明，高频循环引起了更广泛的热扰动，增强了向外传热。因此，在高频操作下，热能更容易在围岩中积累。

#### 4.2 围岩第一主应力

当盐岩受到压应力作用时是一种可塑性很好的材料，能够承受很大的变形。但当受到拉张应力作用时，盐岩却变得很脆，非常低的拉张强度即可使盐岩发生破碎。拉张损伤通过围岩所受第一主应力进行判断<sup>[33]</sup>。在 COMSOL Multiphysics 软件中，最大主应力为正值时表示拉应力，为负值时表示压应力，所受第一主应力小于 0 则说明没有发生拉张损伤。图 8 所示为是否考虑热应力作用下的四种注采速率下盐穴储库运行 30 年的第一主应力分布图。

运行 30 年后，不同工况下第一主应力的最大值均出现在盐岩与夹层界面处，说明该位置是拉张破坏的高风险区域，而热应力的叠加及注采速率的提升，会显著改变该界面处的第一主应力幅值，甚至引发拉应力主导的力学状态。运行 30 年后储库已形成稳态高温场，盐岩与夹层的热膨胀系数、导热系数存在显著差异，受热后产生非协调热变形，且二者力学特性，如弹性模量、泊松比的不同进一步放大了变形约束效应，使应力在界面处高度集中，成为第一主应力最大值的出现位置，也让该位置成为拉张破坏的薄弱区域；不考虑热应力时，围岩应力仅由注采压力与原始地应力主导，盐岩与夹层界面处的应力分布相对平稳，四种注采速率下的最大第一主应力差值很小且均小于 0，表现为压应力主

导的力学状态，无拉张破坏风险。考虑热应力后，盐岩受热膨胀产生的热应力会与原始地应力、注采压力应力叠加，对围岩应力场形成重构，使盐岩与夹层界面处的压应力被显著抵消，第一主应力向拉应力方向偏移，四种注采速率下的最大第一主应力依次为-5.78 MPa、-3.35 MPa、0.24 MPa、2.46 MPa，压应力逐步向拉应力转变；同时注采速率越

大，储库稳态温度越高，盐岩与夹层的非协调热变形越显著，产生的热应力幅值越高，对界面处压应力的抵消作用越强，当注采速率提升至 140 kg/s 时，热应力的叠加效应完全抵消了原有压应力，使界面处最大第一主应力达大于 0，呈现出拉应力主导的力学状态，此时该位置将面临显著的拉张破坏风险。

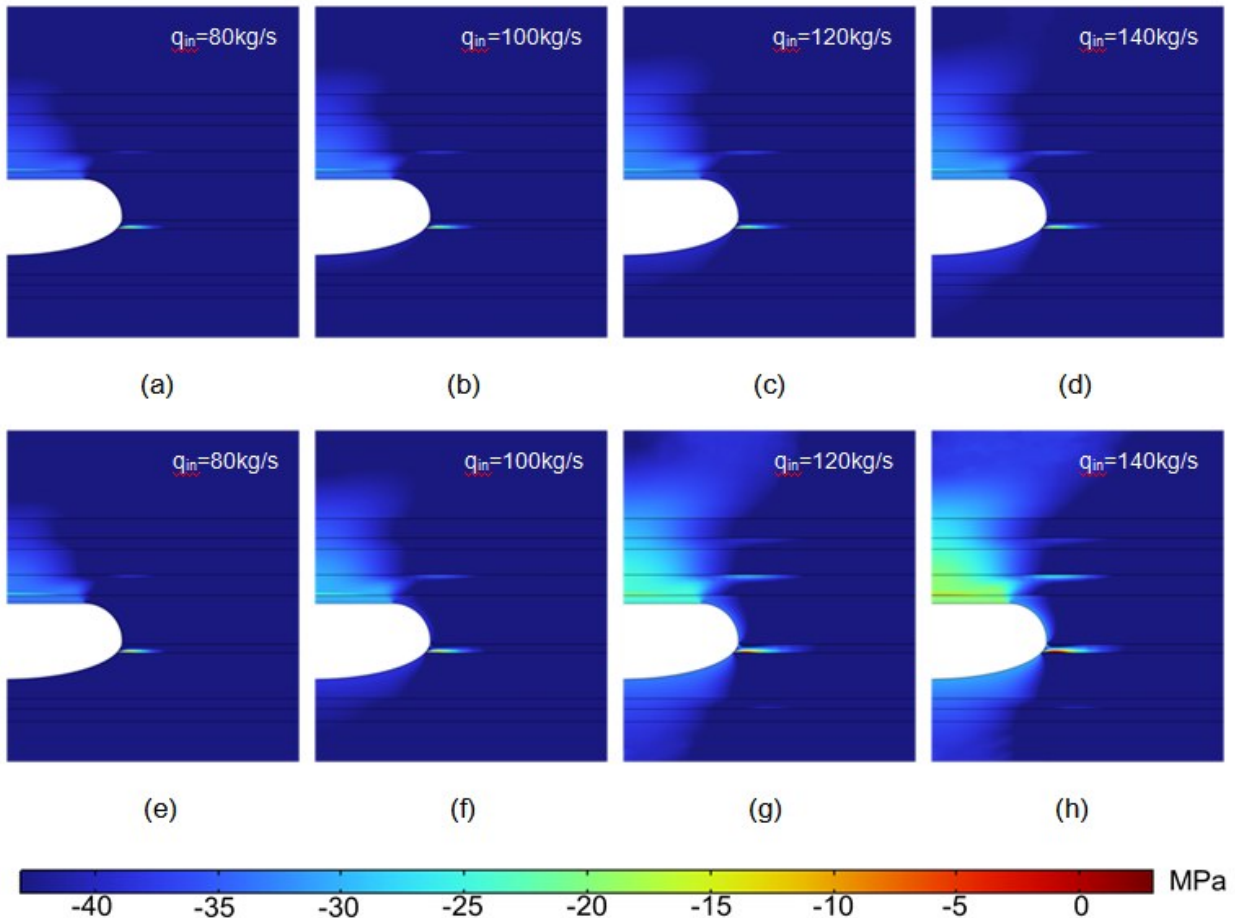


图8 运行30后围岩第一主应力分布：(a)~(d)不考虑热应力(e)~(h)考虑热应力

Fig. 8 First Principal Stress Distribution in Surrounding Rock After 30 Years of Operation:(a)~(d) Without Considering Thermal Stress(e)~(h) Considering Thermal Stress

### 4.3 围岩位移

如图9所示为是否考虑热应力作用下的四种注采速率下盐穴储库运行30年的位移分布图。随着注采速率的增加腔体的变形范围逐渐增大，夹层附近的位移小于盐岩的位移，说明夹层对腔体变形有显著影响，这是由于夹层的力学强度高于盐岩，且变形模量较大，其起到了类似“骨架”的支撑作用，夹层对周围盐岩的变形具有较强的约束效应，提高了腔体周围盐岩的稳定性。运行30年后储库

已进入热平衡状态，腔内温度趋于稳定并形成稳态高温场，使靠近腔体处的围岩长期处于高温状态，盐岩受热膨胀受到深部低温围岩的约束，产生显著的热应力，该热应力与注采循环内压变化引发的压力应力在围岩内部形成叠加效应，促使盐岩弹塑性变形与蠕变变形进一步加剧，因此考虑热应力时的最大位移较不考虑热应力时均出现明显增长，四种注采速率下分别从 2.44 m、3.07 m、4.68 m、6.16 m 增至 2.63 m、3.34 m、5.14 m、6.86 m，

增幅依次为7.79%、8.79%、9.83%、11.36%。同时注采速率越大，单位时间内注入的压缩热越多，储库长期热平衡后的稳态温度越高，靠近腔体处围岩的温度梯度也越大，由此产生的热应力幅值越高，与压力应力的叠加效应越显著，热应力对围岩变形的驱动作用越强，因此热应力引发的位移增幅随注采速率提升呈持续上升趋势。而平卧式储库横

向尺寸大、纵向尺寸小的几何特征，使围岩热膨胀的约束效应与应力叠加效应更突出，且腔顶要承担上覆岩层的自重应力，纵向小尺寸的特征又使其缺乏足够的变形缓冲空间，最终导致无论是否考虑热应力，最大位移均集中于腔顶，且热应力的叠加效应在腔顶被极致放大，成为热应力位移增量的核心集中区域。

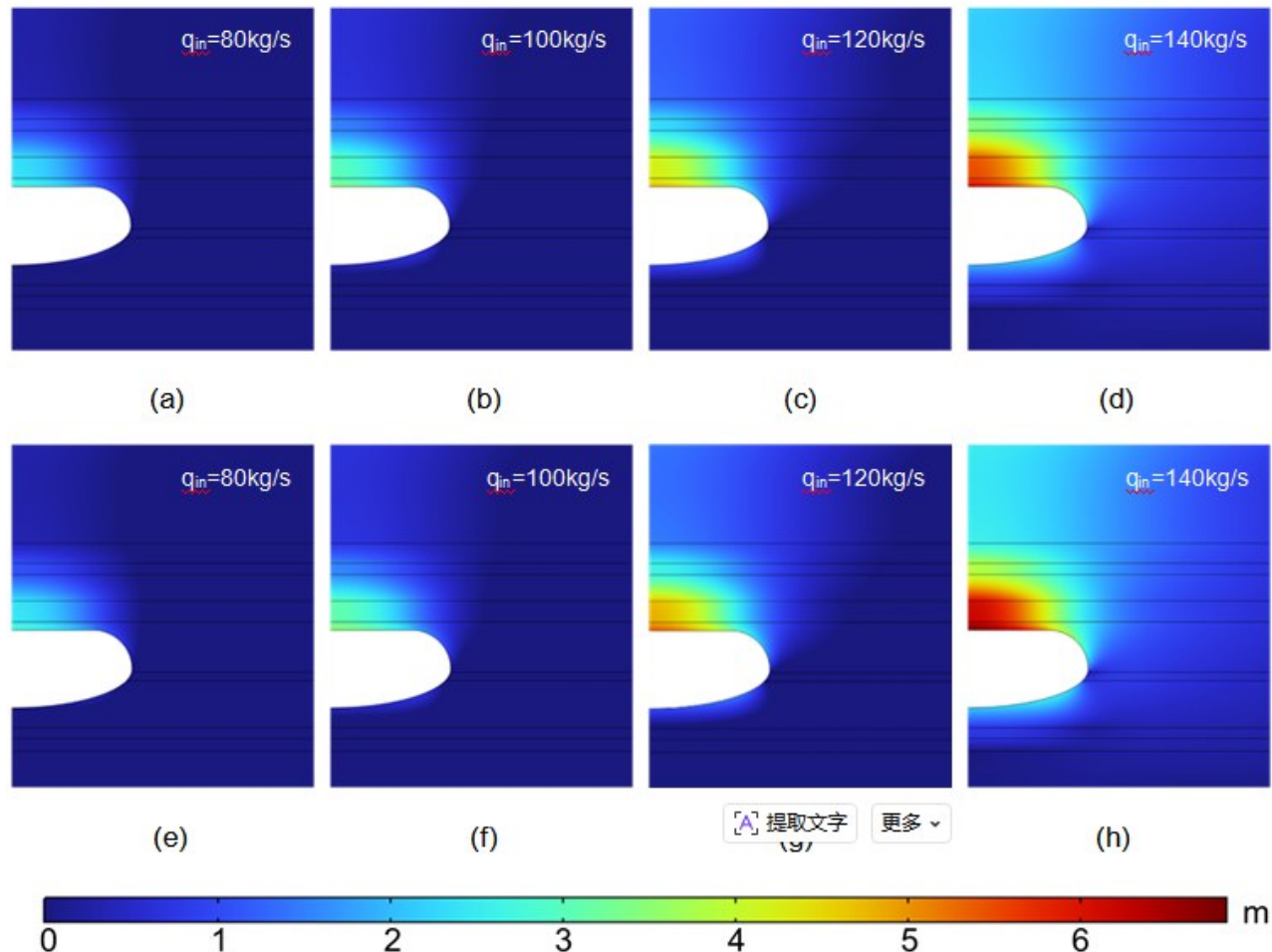


图9 运行30后围岩位移分布:(a)~(d)不考虑热应力(e)~(h)考虑热应力

Fig. 9 Displacement Distribution in Surrounding Rock After 30 Years of Operation:(a)~(d) Without Considering Thermal Stress(e)~(h) Considering Thermal Stress

## 5 结论

本文通过理论分析和数值模拟相结合的方式，对盐穴压气储能储库在不同注采速率下腔内空气温度的变化和注采热应力对腔周围岩稳定性的影响进行了深入研究，主要结论如下：

1)盐穴压气储能储库腔内温度演化具有阶段性特征，从热累积阶段向热平衡阶段过渡，温度逐渐

维持稳定且波动减小。注采速率对腔内温度场影响显著，注采速率越大，腔内气体的温差越大、峰值温度越高，热扰动频率越高，会诱发围岩反复热膨胀与收缩，放大热应力循环效应。

2)热应力影响围岩的应力状态，盐岩与夹层因热物理参数和力学特性差异，受热后产生非协调热变形，导致应力在界面处高度集中，成为拉张破坏

高风险区域。考虑热应力后，界面处压应力被显著抵消，随注采速率提升逐步向拉应力转变，呈现拉应力主导状态，增大拉张破坏风险。

3)热应力显著加剧围岩位移变形，热应力与压力应力叠加后，促使盐岩弹塑性变形与蠕变变形进一步发展，四种注采速率下的围岩最大位移增幅介于7.79%-11.36%，且增幅随注采速率提升而增大。受储库几何特征与上覆岩层压力影响，最大位移始终集中于腔顶，成为热应力位移增量的核心集中区域

### 参考文献

- [1] 杨春和,王同涛. 我国深地储能机遇、挑战与发展建议[J]. 科学通报, 2023, 68(36): 4887-4894.  
YANG C H, WANG T T. Opportunities, challenges, and development suggestions for deep underground energy storage in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(36): 4887-4894
- [2] YANG C H, WANG T T, CHEN H S. Theoretical and technological challenges of deep underground energy storage in China[J]. Engineering, 2023, 25: 168-181.
- [3] 中国科学院武汉文献情报中心学科情报团队,中国科学院武汉岩土力学研究所油气地下储备与开发研究中心团队,李娜娜,等. 趋势观察:国际盐穴储能战略与科技发展态势分析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10):1248-1252.  
The subject intelligence team of the wuhan library, Chinese Academy of Sciences, The oil and gas underground storage and development research center team of the wuhan institute of rock and soil mechanics, Chinese Academy of Sciences, LI N N, et al. Trends observation: strategy and development of international salt cavern energy storage research[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021,36(10): 1248-1252.
- [4] 葛鑫博,黄俊,赵同彬,等. 基于知识图谱的地下压缩空气储能研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(04):80-103.  
GE X B, HUANG J, ZHAO T B, et al. Research progress on underground compressed air energy storage based on knowledge graph[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 80-103.
- [5] 贾超,张强勇,刘家涛,等. 不同储气内压下盐岩地下储气库可靠性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2):276-280.  
JIA C, ZHANG Q Y, LIU J T, et al. Reliability Analysis for Underground Salt rock Gas Storage under Different Gas Pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2):276-280.
- [6] 付兴,夏焱,徐孜俊,等. 盐穴压缩空气储能腔体稳定性数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 930-934+957.  
FU X, XIA Y, XU Z J, et al. Numerical Simulation Study on the Stability of Compressed Air Energy Storage Cavity[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 930-934+957.
- [7] 翟松韬,吴刚,张渊,等. 单轴压缩下高温盐岩的力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(01):105-111.  
ZHAI S T, WU G, ZHANG Y, et al. Mechanical characteristics of salt rock subjected to uniaxial compression and high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(01):105-111.
- [8] LI L, YANG C H, JIANG D Y, et al. Self-Healing Characteristics of Damaged Rock Salt under Different Healing Conditions[J]. Materials, 2013, 6(8):3438-3450.
- [9] 康燕飞,陈结,姜德义,等. 不同温度条件下盐岩卤水浸泡后损伤自恢复特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(2):601-609.  
KANG Y F, CHEN J, JIANG D Y, et al. Damage self-healing property of salt rock after brine immersion under different temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 601-609.
- [10] LI W J, MIAO X X, YANG C H. Failure analysis for gas storage salt cavern by thermo-mechanical modelling considering rock salt creep[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32102004.
- [11] 杨玉良,梁卫国,杨晓琴,等. 钙芒硝盐岩多场耦合作用下蠕变的温度效应研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(03):1070-1080.  
YANG Y L, LIANG W G, YANG X Q, et al. Temperature effect on creep of glauberite salt rock under multi field coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(03):1070-1080.
- [12] LIANG C, LIU J F, CHEN Z W, et al. Study on salt rock creep characteristics of wellbore under high temperature and high pressure [J]. Journal of Porous Media, 2021, 25(3):51-69.
- [13] 张胜利,梁卫国,肖宁,等. 考虑温度的盐岩分数阶黏弹塑性蠕变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2):3198-3209.  
ZHANG S L, LIANG W G, XIAO N, et al. A fractional viscoelastic-plastic creep damage model for salt rock considering temperature effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2):3198-3209.
- [14] 邵保平,赵阳升,赵金昌,等. 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, (01):90-96.  
XI B P, ZHAO Y S, ZHAO J C, et al. Study on coupled thermo-mechanical creep properties of bedded rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, (01):90-96.
- [15] LI P, DENG C J, ZHAO L W, et al. An Experimental Study on Creep Characteristics of Salt Rock and Gypsum-salt Rock in Puguang Gas Field[J]. Petroleum Science and Technology, 2012, 30(16):1715-1724.
- [16] CHENG L, LIU J F, YI R, et al. Mechanical characteristics and permeability evolution of salt rock under thermal-hydro-mechanical (THM) coupling condition[J]. Engineering Geology, 2022,302
- [17] 李浩然,徐壮,魏群,等. 盐岩高温三轴蠕变损伤破裂机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(12):2945-2956.  
LI H R, XU Z, WEI Q, et al. Experimental study on salt rock creep damage rupture mechanism in high temperature triaxial conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(12):2945-2956.
- [18] DONG Z K, LI Y P, LI H R, et al. Experimental study on the influence of temperature on rock salt creep. Rock Mechanics and

- Rock Engineering. 2023 May;56(5): 3499-3518.
- [19] 李文婧,姜源,单保东,等. 盐穴储气库注采运行时温效应对腔体稳定性的影响[J]. 石油学报, 2020, 41(06):762-776.
- LI W J, JIANG Y, SHAN B D, YU X S, WANG C. Time-temperature effect on cavity stability during gas injection and production in gas storage with salt caves [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(6): 762-776.
- [20] POLAŃSKI K. Influence of the variability of compressed air temperature on selected parameters of the deformation-stress state of the rock mass around a CAES salt cavern. Energies. 2021 Sep 28;14(19):6197.
- [21] HUANG J, GE X B, MA H L, et al. Thermal-fluid-solid coupling model for dynamic injection and production processes in salt cavern compressed air energy storage[J]. Energy, 2025, 319: 135093.
- [22] 蔚立元, 郭宪震, 胡波文, 等. 内衬式岩洞储氢三维热-流-固耦合模型及洞群运营稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1099-1116.
- Yu, L. Y., Mi, X. Z., Hu, B. W., Li, S. C., Liu, R. C., & Ye, J. H. (2024). Three-dimensional thermal-fluid-structure coupling model and stability analysis of hydrogen storage operation in underground lined rock cavern group. *Journal of China University of Mining & Technology*, 53(6), 1099-1116.
- [23] ZHOU S W, XIA C C, DU S G, et al. Thermo-mechanical modeling of a lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(6): 1382-1397.
- [24] 周舒威,夏才初,张平阳,等. 地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11):2025-2035.
- ZHOU S W, XIA C C, ZHANG P Y, et al. Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(11):2025-2035.
- [25] 马洪岭,梁孝鹏,赵凯,等. 山东泰安盐穴储气库地质可行性分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022,4(02):19-27.
- MA H L, LIANG X P, ZHAO K, et al. Geological feasibility analysis of Tai'an salt cavern gas storage in Shandong Province[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(2):19-27.
- [26] LIANG X P, DING X L, HU W R, MA H L, HUANG S L, SHI X L, CAI R, ZENG Z, WANG X, A novel numerical analysis method for the stability of sediment void-type energy storage salt cavern and its application in Tai'an, China, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 167,2026,107085,ISSN 0886-7798.
- [27] HUANG J, GE X B, MA H L, SHI X L, LI Y P and YANG C H. (2025) 'Exploration of thermo-fluid-heat transfer evolution in salt cavern compressed air energy storage system under high-frequency injection and production conditions', Tunnelling and Underground Space Technology, 162, 106688.
- [28] ABUAISHA M, ROUABHI A. On the validity of the uniform thermodynamic state approach for underground caverns during fast and slow cycling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 142:118424.
- [29] BOURGEOIS T, AMMOURI F, WEBER M et al. Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(35): 11748-11755.
- [30] LYU, C Zhao K, CAI W Q, ZHANG X, DENG T, XIONG Y J, Mo Z G, A coupled thermo-hydro-mechanical-damage model for salt cavern gas storage under long-term injection-withdrawal operations, Energy, Volume 335, 2025, 137863, ISSN 0360-5442.
- [31] JONNY RUTQVIST, HYUNG-MOK KIM, DONG-WOO RYU, JOONG-HO SYNN, WON-KYONG SONG, Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 52, 2012, Pages 71-81, ISSN 1365-1609.
- [32] 陈剑文,蒋卫东,杨春和,等. 储气库注、采气过程热工分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,(S1):2887-2893.
- CHEN J W, JIANG W D, YANG C H, et al. Thermal Analysis Study on Gas Injection and Production Process in Gas Storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, (S1): 2887-2893.
- [33] 李建君,敖海兵,巴金红,等. 热应力对盐穴储气库稳定性的影响[J]. 油气储运, 2017, 36(09):1007-1012+1018.
- LI J J, AO H B, BA J H, et al. Influence of thermal stress on the stability of salt-cavern gas storage[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017, 36(09):1007-1012+1018.