



压气储能隧道式储气库衬砌厚度配置力学响应与高压开裂研究

饶虎¹, 王刚², 庞明港¹, 王鹏举², 王伟龙¹, 杨为民³, 王瑞¹, 丁万涛³

(¹中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; ²福建理工大学土木工程学院, 福建 福州 350118; ³山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061)

摘要: 地下衬砌岩洞是压缩空气储能最具前景的储气方式之一, 但不同衬砌厚度配置下储气库力学响应规律及高内压衬砌裂缝演化规律仍缺乏系统研究。本文以花岗岩地层典型隧道式储气洞室为研究对象, 基于Abaqus建立隧道式储气库有限元模型, 并引入内聚区模型, 研究不同衬砌厚度组合及储气压力下衬砌-围岩体系的力学响应与开裂特征。研究结果表明: (1) 储气与放气阶段衬砌厚度效应显著。随着厚度增大, 拱腰水平变形由-3.95 mm减小至-2.54 mm, 放气阶段变化规律基本一致; (2) 随着衬砌厚度增大, 围岩最大塑性应变降幅超过50%, 在储气阶段由 $1.29 \times 10^3 \mu\epsilon$ 降至 $0.69 \times 10^3 \mu\epsilon$; (3) 初期支护和二次衬砌的最大主应力随厚度增大而降低, 其中二次衬砌厚度超过0.7 m后降幅趋缓; (4) 内聚区模型结果表明, 裂缝首先萌生于拱顶附近, 主要由洞内向洞外扩展; 放气后裂缝宽度随最大储气压力升高而增大; 当储气压力达17.5 MPa时, 拱顶衬砌裂缝贯通, 裂缝宽度骤增至28.84 mm。研究成果可为地下储气洞室衬砌优化设计及高压稳定性评价提供理论依据。

关键词: 压缩空气储能; 地下衬砌岩洞; 衬砌厚度; 开裂特征; 内聚区模型; 稳定性分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0460

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-13

Mechanical response and high-pressure cracking of lining thickness configurations in compressed air energy storage tunnel-type gas reservoirs

RAO Hu¹, WANG Gang², PANG Minggang¹, WANG Pengju², WANG Weilong¹, YANG Weimin³,
WANG Rui¹, DING Wangtao³

(¹Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, Shanxi, China; ²College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China; ³Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: Underground lined rock caverns represent one of the most promising methods for compressed air energy storage (CAES). However, systematic investigations into the mechanical behavior of gas reservoirs under varying lining thickness configurations and the evolution of lining cracks under high internal pressures remain limited. This study examines a

收稿日期: 2026-05-22; 修改稿日期: 2026-07-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52478390), 西安市关键核心技术攻关项目“压缩空气储能人工洞室储气库成库技术研究及工程应用”(2026JH-GJHCG-0381), 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科技项目“压缩空气储能人工洞室设计实用技术研究”(NW-RD034-2023), “压缩空气储能电站人工洞室储气库密封结构设计技术”(NW-RD001-2024)。

第一作者: 饶虎(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为压缩空气储能地下洞室勘察设计, E-mail: raohu@nwepdi.com; 通信作者: 王刚, 教授, 研究方向为地下工程与压缩空气储能, E-mail: wanggang1110@gmail.com。

引用本文: 饶虎, 王刚, 庞明港, 等. 压气储能隧道式储气库衬砌厚度配置力学响应与高压开裂研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-13.

Citation: RAO Hu, WANG Gang, PANG Minggang, et al. Mechanical response and high-pressure cracking of lining thickness configurations in compressed air energy storage tunnel-type gas reservoirs[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-13.

typical granite tunnel-type gas storage cavern. A finite element model of the tunnel-type gas storage reservoir was developed in Abaqus, incorporating a cohesive zone model to analyze the mechanical response and cracking behavior of the lining – surrounding rock system under different lining thicknesses and gas storage pressures. The results show that: (1) lining thickness has a pronounced influence during both the gas storage and gas release stages. As the lining thickness increases, the horizontal deformation at the arch waist decreases from -3.95 mm to -2.54 mm, and a similar trend is observed during the gas release stage; (2) the maximum plastic strain in the surrounding rock is reduced by more than 50% with increased lining thickness, from $1.29 \times 10^3 \mu\epsilon$ to $0.69 \times 10^3 \mu\epsilon$ during gas storage; (3) the maximum principal stress of the initial support and secondary lining declines with increasing thickness, and this reduction gradually levels off once the secondary lining thickness exceeds 0.7 m; (4) the cohesive zone model indicates that cracks first initiate near the crown and mainly propagate from the cavern interior outward; after gas release, the crack width increases with the maximum gas storage pressure; when the gas storage pressure reaches 17.5 MPa, through-cracking occurs in the crown lining, and the crack width increases sharply to 28.84 mm. These findings provide a theoretical basis for the optimal design of linings for underground gas storage caverns and for the evaluation of stability under high internal pressure.

Keywords: Compressed air energy storage; Lined rock cavern; Lining thickness; Cracking characteristics; Cohesive zone model; Stability analysis

随着全球能源结构加快向清洁低碳方向转型,压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)作为最具规模化应用潜力的物理储能技术之一,其战略价值日益凸显^[1-4]。地下衬砌岩洞(Lined Rock Cavern, LRC)因适用岩层广泛、便于规模化建设,被认为是最具商业化前景的储气方式之一^[5-7]。近年来,我国已在多地开展LRC地下储气库的工程建设与研究,并积累了较为丰富的工程实践经验^[8-10]。

LRC通常由围岩、支护体系和密封体系三部分组成^[11, 12]。其中,衬砌主要承担荷载传递及密封层保护作用,薄钢衬因具有较优气密性而被优先采用^[13]。CAES储气库的运行压力通常为5~20 MPa,在该压力条件下,围岩是承担内压荷载的主体结构^[14, 15]。

鉴于CAES储气洞室原位试验成本高、实施难度大,数值模拟已成为评估LRC力学行为的主要技术手段^[16, 17]。Zimmels等^[18]和Kim等^[19]分别采用FLAC和TOUGH-FLAC方法,研究了洞室参数及开挖损伤区对塑性区演化和围岩渗透性的影响;Zhou等^[20]建立了热-力耦合数值分析框架,指出运

行过程中衬砌与围岩均可能产生显著拉应力;蒋中明等^[21]通过数值模拟对比分析了不同洞型储气库的热力学响应;Zhao等^[22]揭示了裂隙网络对受压衬砌岩洞力学性能的影响。然而,现有研究多基于单一衬砌厚度工况展开,对不同衬砌厚度配置下储气洞室力学响应与稳定性影响的系统性、量化研究仍显不足。

密封性能是地下衬砌岩石储气库工程成败的关键^[23]。在洞室运行过程中,衬砌在高内压作用下不可避免地会产生裂缝^[10, 24]。裂缝扩展不仅会削弱衬砌承载能力,还可能诱发密封层失效,进而威胁储气库的长期安全运行。已有研究表明,裂缝宽度、内压水平及围岩质量是影响衬砌开裂的主要控制因素^[5, 25, 26],并提出了分段衬砌^[13]和预设裂缝主动引导^[27]等裂缝调控措施。然而,针对开裂位置、裂缝形态及扩展路径等特征的定量描述仍相对不足,不同内压水平下衬砌开裂的动态演化规律亦尚未得到系统揭示。

综上,衬砌作为连接围岩与密封体系的关键结构,其厚度设计及开裂特征直接关系到储气库的结构安全与气密性保障。然而,现有研究仍存在以下

两方面不足：其一，不同衬砌厚度配置对储气洞室力学响应与稳定性影响的系统性量化研究仍较缺乏；其二，高内压作用下衬砌裂缝的起裂位置、分布特征及演化规律尚不明确。为此，本文以花岗岩地层中的典型隧道式储气洞室为工程背景，基于Abaqus建立含初期支护、二次衬砌和钢衬密封层的三层复合结构有限元模型。在不同初期支护与二次衬砌厚度组合条件下，模拟支护施作、储气与放气全过程，系统评估各工况下围岩与支护结构的稳定性。并且引入内聚区模型，深入揭示内压作用下衬砌裂缝的起裂位置、扩展形态及演化规律。研究结果可为LRC衬砌结构优化设计提供理论依据。

1 数值模型

1.1 隧道式储气库模型

用于压缩空气储能的衬砌储气洞室通常采用隧道式布置。按横断面形状不同，隧道式洞室可分为圆形、马蹄形和城门形，其中圆形断面因受力条件较为明确，常用于相关应力分析。结合工程实践，本文建立的隧道式储气库模型洞室直径为15 m，埋深为63 m。主要设计变量为初期支护厚度和二次衬砌厚度。其中，初期支护厚度分别为0.1、0.2和0.3 m；二次衬砌厚度分别为0.3、0.5、0.7、0.9和1.0 m；钢衬密封层厚度取0.03 m。

1.2 屈服准则与材料参数

花岗岩采用满足Mohr - Coulomb屈服准则的理想弹塑性材料模型，其表达式为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \varphi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (1)$$

式中， σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； c 为岩体内聚力； φ 为内摩擦角。花岗岩的弹性参数与强度参数取自地质勘察报告，密度为2653 kg/m³，弹性模量为25 GPa，内聚力为1.2 MPa，内摩擦角为52.43°，泊松比为0.19。结合现行工程实践，岩石洞室储气库衬砌混凝土等级通常采用中等强度等级。初期支护与二次衬砌均采用C30混凝土。衬砌与钢衬均按弹性材料处理，其材料参数依据《水工隧洞设计规范》(NB/T 10391-2020)中的设计值选取。初期支护的密度为2410 kg/m³，弹性模量为30 GPa，泊松比为0.18。二次衬砌的密度为2500 kg/m³，弹性模量为32 GPa，泊松比为0.22。钢衬的密度为7850 kg/m³，弹性模量为200 GPa，泊松比为0.30。为兼顾计算精度与计算效

率，围岩、衬砌与密封层之间均采用无滑移接触条件。

1.3 模型尺寸与边界条件

采用Abaqus建立三维数值模型，如图1所示。隧道式洞室模型侧向边界及底部边界距洞室的距离均取洞室直径的5倍；模型顶部覆土厚度取实际埋深，以合理反映地表变形特征；纵向模型长度取1 m。模型采用六面体单元进行离散。边界条件设置如下：模型左、右、前、后侧面施加法向位移约束，底面施加全位移约束，顶面不施加位移约束。内压作用于密封层内表面，计算过程中同时考虑岩体自重效应。

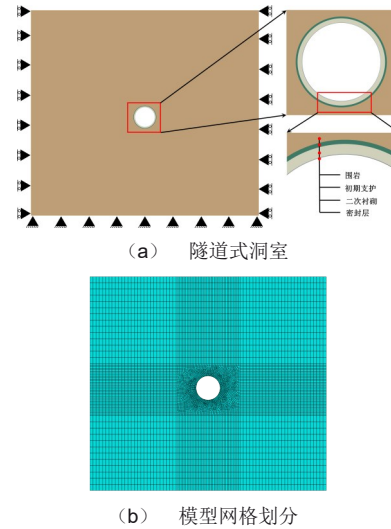


图1 隧道式储气库洞室数值模型及边界条件
Fig. 1 Numerical model of the tunnel-type CAES storage cavern and boundary conditions

1.4 计算步骤

为模拟CAES地下衬砌洞室的施工与运行过程，按照以下6个步骤进行数值分析：(1) 初始地应力平衡：建立原位应力场并实现初始平衡；(2) 开挖与初期支护施作：模拟洞室全断面开挖，并在开挖后立即施作初期支护；(3) 施作二次衬砌：在洞室内表面施加钢筋混凝土二次衬砌；(4) 安装密封层：二次衬砌完成后，在其内表面安装钢衬密封层；(5) 储气阶段：将高压空气等效为作用于密封层内表面的均布内压，并按预设加载路径逐步升压；(6) 放气阶段：通过逐步降低内压模拟放气过程。通常情况下，储气库运行压力维持在一定范围内，但在检修、停机等极端工况下，洞内气体可能

需排放至接近大气压水平。随着内压逐步卸除, 先前已产生损伤的围岩区域可能出现稳定性劣化, 从而影响储气库安全运行。基于此, 本文将最小内压取为 0.1 MPa [6, 28]。

2 隧道式储气库力学响应模拟结果与分析

2.1 围岩变形特征分析

图2给出了隧道式洞室在支护、储气和放气阶段

段围岩竖向与水平变形云图。由图2(a)可知, 在支护阶段, 围岩表现为拱顶下沉、仰拱隆起; 在储气阶段, 围岩变形方向与支护阶段相反, 表现为拱顶隆起、仰拱下沉; 在放气阶段, 围岩变形形态与支护阶段基本一致, 但变形幅值更大。水平变形云图同样表现出相似的阶段性变化规律。由图2(b)可见, 围岩整体呈向洞外方向变形的趋势, 其中储气阶段的水平变形最为显著。

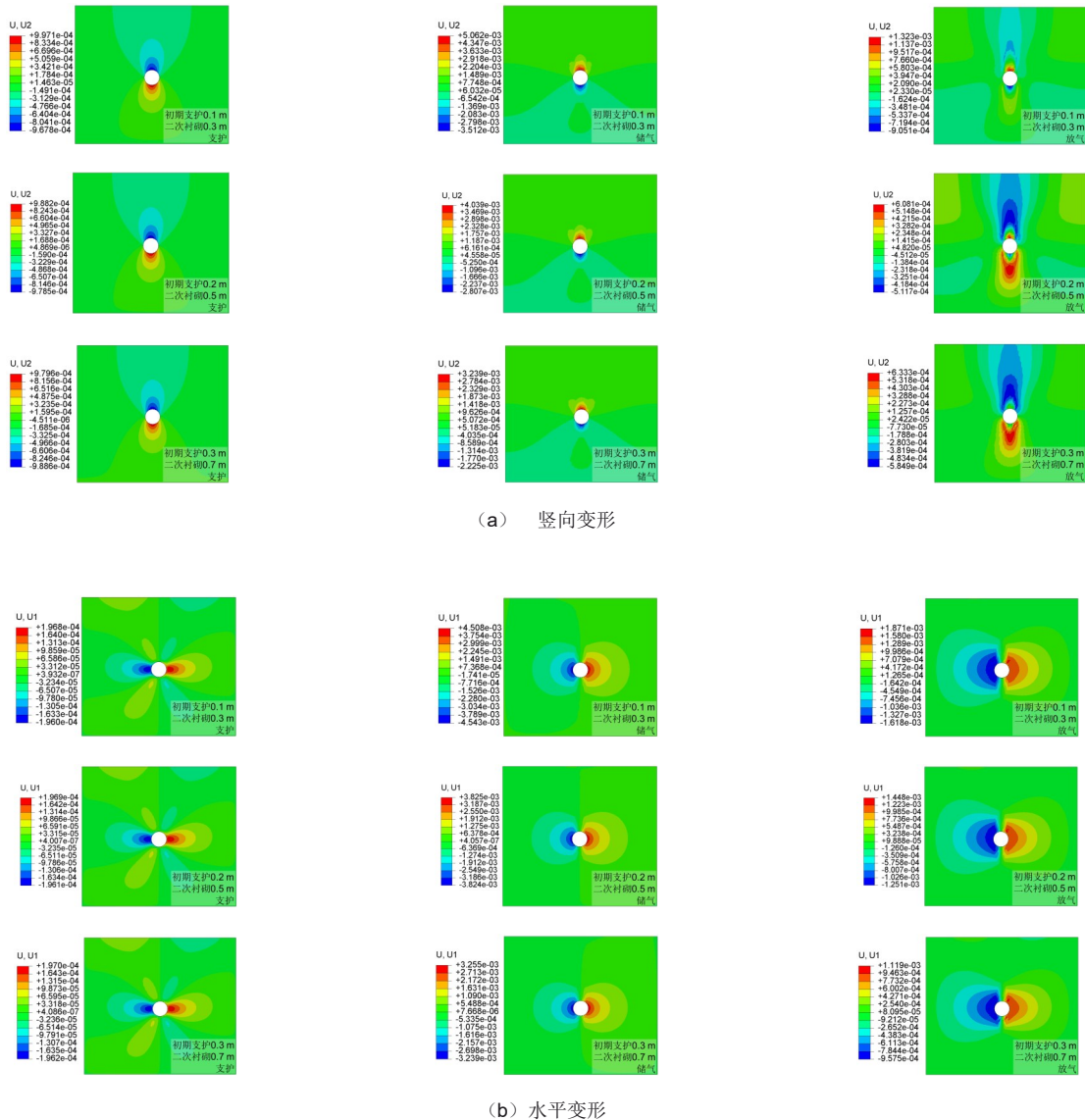


图2 隧道式洞室围岩变形云图

Fig. 2 Deformation contours of the surrounding rock in the tunnel-type cavern

随着初期支护厚度和二次衬砌厚度的增加, 围岩竖向变形与水平变形均明显减小。为进一步定量

分析围岩变形特征, 分别在拱顶和拱腰处设置监测点, 提取拱顶竖向变形和拱腰水平变形, 如图3所

示。在支护阶段，衬砌厚度对围岩变形的影响相对较小，拱顶竖向变形和拱腰水平变形分别为-0.87 mm和-0.19 mm，其中负值表示沉降或向洞外位移。在储气和放气阶段，衬砌厚度对围岩变形的影响显著增强。由图3(a)可知，随着初期支护厚度和二次衬砌厚度增大，拱顶隆起变形逐渐减小；当二次衬砌厚度大于0.9 m时，放气阶段拱顶变形由隆

起转为下沉。图3(b)表明，围岩水平变形随衬砌厚度增加而减小，其变化规律与竖向变形基本一致。当初期支护厚度为0.1 m、二次衬砌厚度为0.3 m时，储气阶段和放气阶段拱腰水平变形分别为-3.95 mm和-1.49 mm；当初期支护厚度增至0.3 m、二次衬砌厚度增至1.0 m时，变形分别减小至-2.54 mm和-0.76 mm。

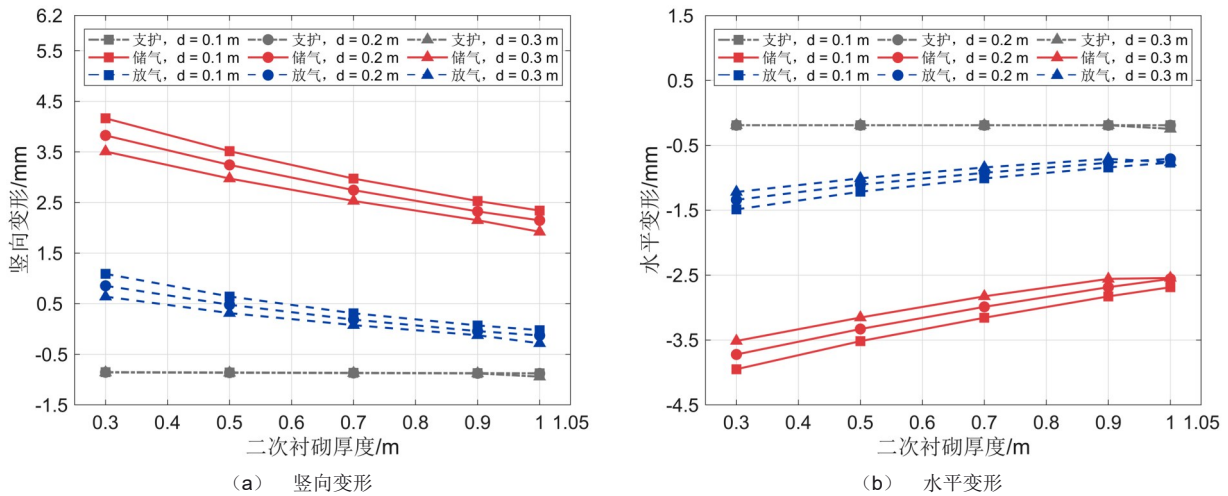


图3 围岩竖向与水平变形随支护厚度变化曲线 (d为初期支护厚度)

Fig. 3 Variations in vertical and horizontal deformation of the surrounding rock with support thickness (d = primary support thickness)

图4展示了各阶段围岩等效塑性应变云图。可以看出，在储气和放气阶段，围岩塑性区整体呈纺锤形分布，且主要集中于拱顶附近。图5给出了围岩最大等效塑性应变随支护厚度变化的规律。结果表明，在储气和放气阶段，随着衬砌厚度增加，围岩最大等效塑性应变均明显降低。当初期支护厚度为0.1 m、二次衬砌厚度为0.3 m时，储气阶段和放气阶段围岩最大等效塑性应变分别为 $1.29 \times 10^3 \mu\epsilon$ 和 $1.93 \times 10^3 \mu\epsilon$ ；当初期支护厚度为0.3 m、二次衬砌厚度为1.0 m时，上述数值分别降至 $0.69 \times 10^3 \mu\epsilon$ 和 $0.85 \times 10^3 \mu\epsilon$ 。

2.2 衬砌应力响应分析

图6给出了初期支护、二次衬砌最大主应力及钢衬最大 von Mises 等效应力随衬砌厚度变化的规律。由图6(a)和图6(b)可知，在支护阶段，随着衬砌厚度增加，初期支护和二次衬砌的最大主应力均略有增大，但增幅较小，变化范围分别为0.01~

0.03 MPa 和 0.01~0.02 MPa。在储气和放气阶段，初期支护与二次衬砌最大主应力均随衬砌厚度增加而降低，且当二次衬砌厚度超过0.7 m后，应力下降趋势明显趋缓。以初期支护厚度为0.2 m为例，当二次衬砌厚度分别为0.3、0.7和0.9 m时，储气阶段二次衬砌最大主应力分别为20.97、16.98和15.47 MPa。说明增大衬砌厚度能够有效改善衬砌受力状态，但二次衬砌增厚至一定程度后，其应力优化效果趋于减弱。进一步对比不同运行阶段可知，放气阶段衬砌应力虽低于储气阶段，但仍高于支护阶段，表明放气过程同样会对衬砌受力状态产生较明显影响。因此，在支护结构设计中，应同时考虑储气和放气两种工况，合理确定衬砌厚度参数，以有效控制运行过程中的应力波动，确保结构安全与稳定。

由图6(c)可见，钢衬最大 von Mises 等效应力随衬砌厚度变化的总体趋势与衬砌最大主应力基本

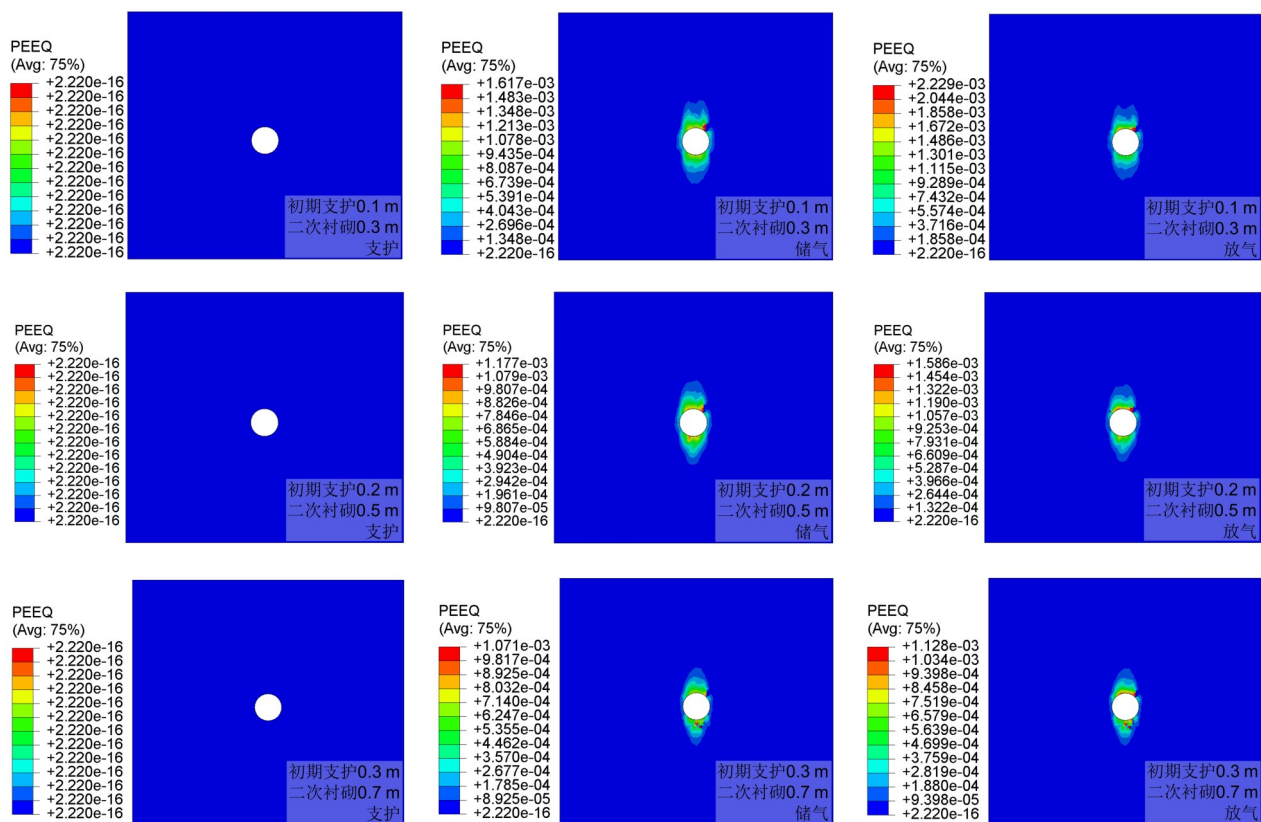


图4 围岩等效塑性应变云图

Fig. 4 Equivalent plastic strain contours of the surrounding rock

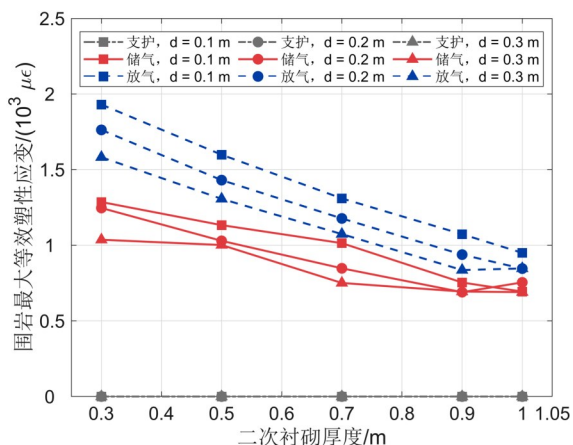


图5 围岩最大等效塑性应变随支护厚度变化曲线

Fig. 5 Variation in the maximum equivalent plastic strain of the surrounding rock with support thickness

一致。随着初期支护厚度和二次衬砌厚度增加,钢衬最大 von Mises 等效应力持续降低。当初期支护厚度为 0.1 m、二次衬砌厚度为 0.3 m 时,储气阶段和放气阶段钢衬最大 von Mises 等效应力分别为 164.98 MPa 和 67.48 MPa; 当初期支护厚度增至

0.3 m、二次衬砌厚度增至 1.0 m 时,上述应力分别降至 120.85 MPa 和 29.50 MPa。

3 衬砌开裂分析方法与结果

3.1 开裂模拟方法

为进一步分析不同内压条件下衬砌结构的裂缝特征,本文采用内聚区模型开展数值模拟。内聚区模型的核心在于将连续介质力学、接触力学与断裂力学相结合,以描述材料从连续变形到裂缝起裂、扩展直至失稳破坏的全过程。在该模型中,衬砌的连续变形由实体单元和未损伤内聚力单元共同承担,而裂缝萌生、扩展及宏观破坏则通过内聚力单元的损伤演化过程予以表征。图7给出了内聚区模型中的断裂过程区。内聚力单元完全失效前,裂缝尖端前方形成断裂过程区,该区域内受损材料仍具有一定承载能力;当内聚力单元承载能力完全退化后,界面发生断裂并形成裂缝。建模时,首先将衬砌离散为实体单元,再在相邻实体单元之间插入内聚力单元,以模拟潜在裂缝面的起裂与扩展。如图

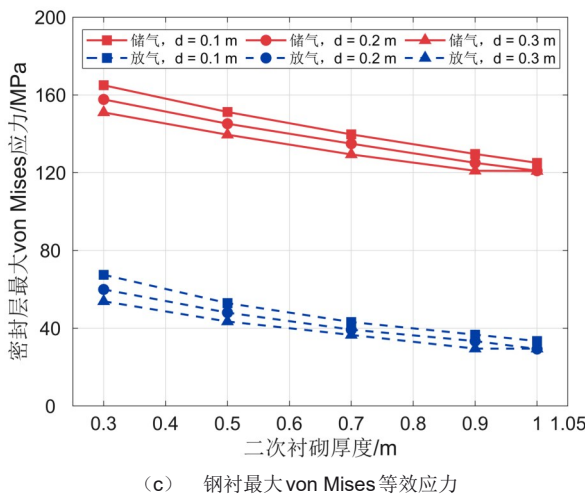
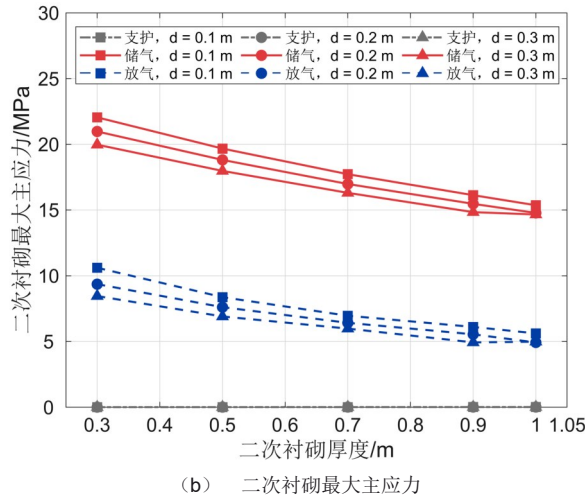
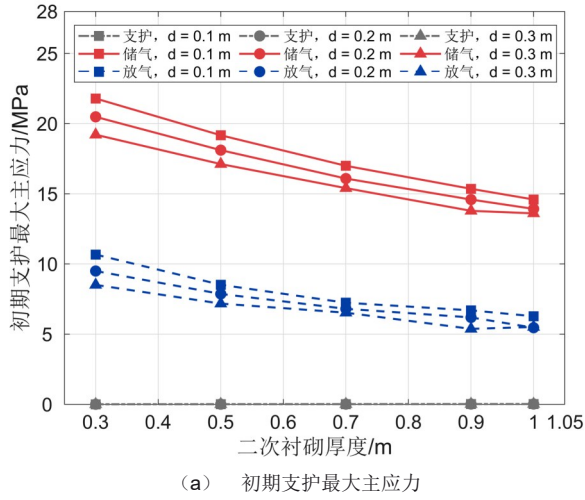


图6 衬砌最大主应力及钢衬最大 von Mises 等效应力随支护厚度的变化曲线

Fig. 6 Variations in the maximum principal stress of the lining and the maximum von Mises equivalent stress of the steel liner with support thickness

8所示, 具体过程包括: 提取实体单元节点信息、识别共享面、复制共享节点并重新编号, 最终在共享界面处插入内聚力单元节点。由此建立包含实体单元和内聚力单元的离散模型。

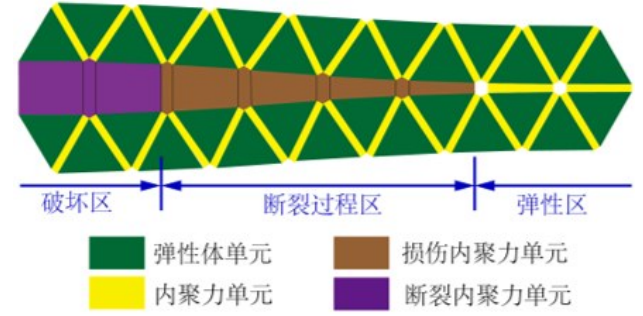


图7 内聚区模型中的断裂过程区

Fig. 7 Fracture process zone in the cohesive zone model

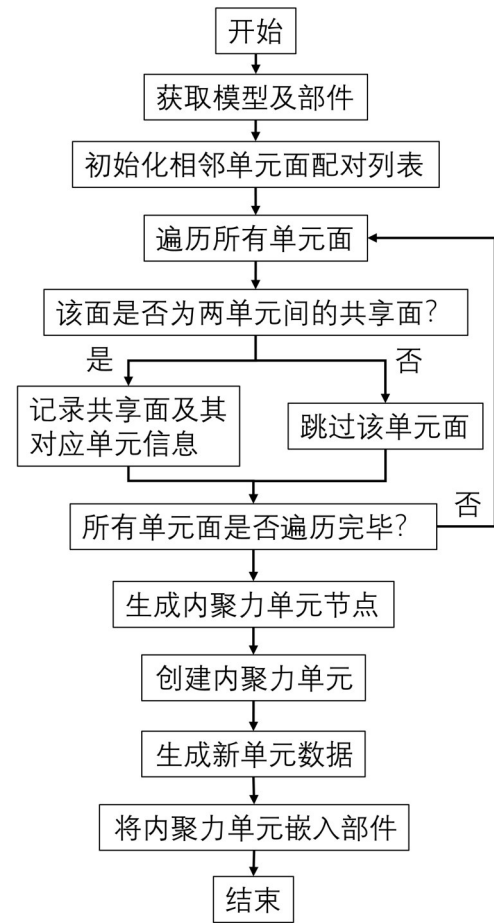


图8 内聚力单元建模流程

Fig. 8 Workflow for cohesive element modeling

3.2 本构方程与断裂准则

内聚力单元的本构响应采用牵引-分离定律描

述。本文选用双线性牵引-分离模型模拟衬砌断裂过程,如图9所示。该模型包括弹性阶段、软化阶段和完全断裂阶段。在损伤发生前,界面牵引应力与分离位移呈线性关系,其本构表达式为:

$$\mathbf{t} = (1 - D) \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} - D \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \delta_n \rangle \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{t}$ 为名义牵引应力矢量; K_n , K_s , K_t 分别为法向和两个切向方向的刚度, δ_n , δ_s , δ_t 分别为对应方向的分离位移; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macaulay 括号, 表示压缩状态不引起损伤; D 为损伤变量, 其取值范围为 $0 \sim 1$ 。当 $D=1$ 时, 内聚力单元完全失效, 并从模型中删除。结合前文结果可知, 衬砌破坏以拉伸破坏为主, 因此采用最大名义应力准则判定损伤起始。当单元任一方向上的名义应力达到峰值时, 认为损伤开始, 其判据为:

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (3)$$

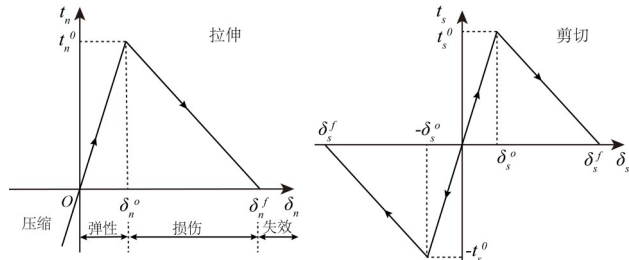


图9 内聚力单元的双线性牵引-分离本构模型
Fig. 9 Bilinear traction-separation constitutive model of cohesive elements

3.3 裂缝演化特征

根据前述分析结果, 隧道式储气库支护方案取初期支护厚度 0.2 m、二次衬砌厚度 0.7 m。本文选取的最大储气压力分别为 10.0、12.5、15.0 和 17.5 MPa。图 10 给出了不同最大储气压力条件下, 储气结束与放气完成后衬砌的位移云图及裂缝分布。由图 10(a) 可见, 当洞内储气压力达到 10 MPa 时, 裂缝首先出现在拱顶左侧, 且主要由洞内向洞外扩展; 衬砌较大变形主要集中于两侧拱肩部位。当压力降至 0.1 MPa 后, 未见新裂缝产生, 储气阶段形成的裂缝宽度有所减小。由图 10(b) 可知, 当最大储气压力增至 12.5 MPa 时, 衬砌最大变形增大至 0.015 m, 裂缝数量明显增加, 且主要分布于拱顶附近。同时, 局部区域开始出现少量由洞外向

洞内扩展的裂缝。当最大储气压力进一步提高至 15 MPa 时, 衬砌最大变形增至 0.018 m, 且高变形区范围进一步扩大。如图 10(c) 所示, 裂缝数量继续增加, 其中靠近拱顶区域的裂缝主要由洞内向洞外扩展, 而远离拱顶区域的部分裂缝则表现为由洞外向洞内扩展; 此外, 拱肩部位亦出现由洞内向洞外扩展的裂缝。

当最大储气压力达到 17.5 MPa 时, 衬砌裂缝数量显著增多, 裂缝分布范围进一步扩大。如图 10(d) 所示, 拱顶和拱肩部位均出现大量裂缝, 且由洞内向洞外和由洞外向洞内两种扩展形式同时存在。其中, 拱顶处裂缝宽度明显大于拱肩处。当洞内压力降至 0.1 MPa 时, 拱顶衬砌出现明显的不连续位移。这表明该处裂缝已发生贯通, 衬砌局部基本丧失承载能力。图 11 给出了最大储气压力为 17.5 MPa 时储气结束与放气完成后衬砌与密封层的相对位置关系。结果表明, 在该压力条件下, 衬砌与密封层之间已出现较大的相对位移, 说明高压作用下衬砌开裂会显著影响密封层受力与变形协调性, 从而增大储气库气密性失效风险。

通过编写 Python 脚本, 提取了储气与放气过程中衬砌裂缝的数量、宽度和体积。图 12 给出了不同最大储气压力条件下, 衬砌裂缝数量、宽度及体积随洞内压力变化的演化规律。当最大储气压力为 10 MPa 时, 随着洞内压力升高, 衬砌初始阶段未出现裂缝; 当压力达到 8 MPa 时, 衬砌开始产生裂缝, 但裂缝数量较少。在放气阶段, 衬砌中未出现新生裂缝, 裂缝宽度和体积整体呈减小趋势。当洞内压力降至 0.1 MPa 时, 裂缝宽度和体积仍保持一定数值。这表明随着内压卸除, 部分裂缝逐渐闭合, 但仍有相当一部分裂缝处于开放状态。当最大储气压力为 12.5 MPa 时, 裂缝数量呈阶梯式增长。当洞内压力达到 11.81 MPa 时, 裂缝数量迅速增加。裂缝宽度和体积的变化趋势与裂缝数量基本一致。进入放气阶段后, 裂缝数量保持不变, 而裂缝宽度和体积整体呈减小趋势。

当最大储气压力为 15 MPa 时, 裂缝数量、宽度和体积的演化规律与前述工况总体相似。当洞内压力达到 13.62 MPa 时, 衬砌中裂缝数量明显增加。当最大储气压力提高至 17.5 MPa 时, 衬砌在储气和放气阶段均会产生新生裂缝。在储气阶段, 裂缝数量呈阶梯式增加, 并在洞内压力达到 14.51

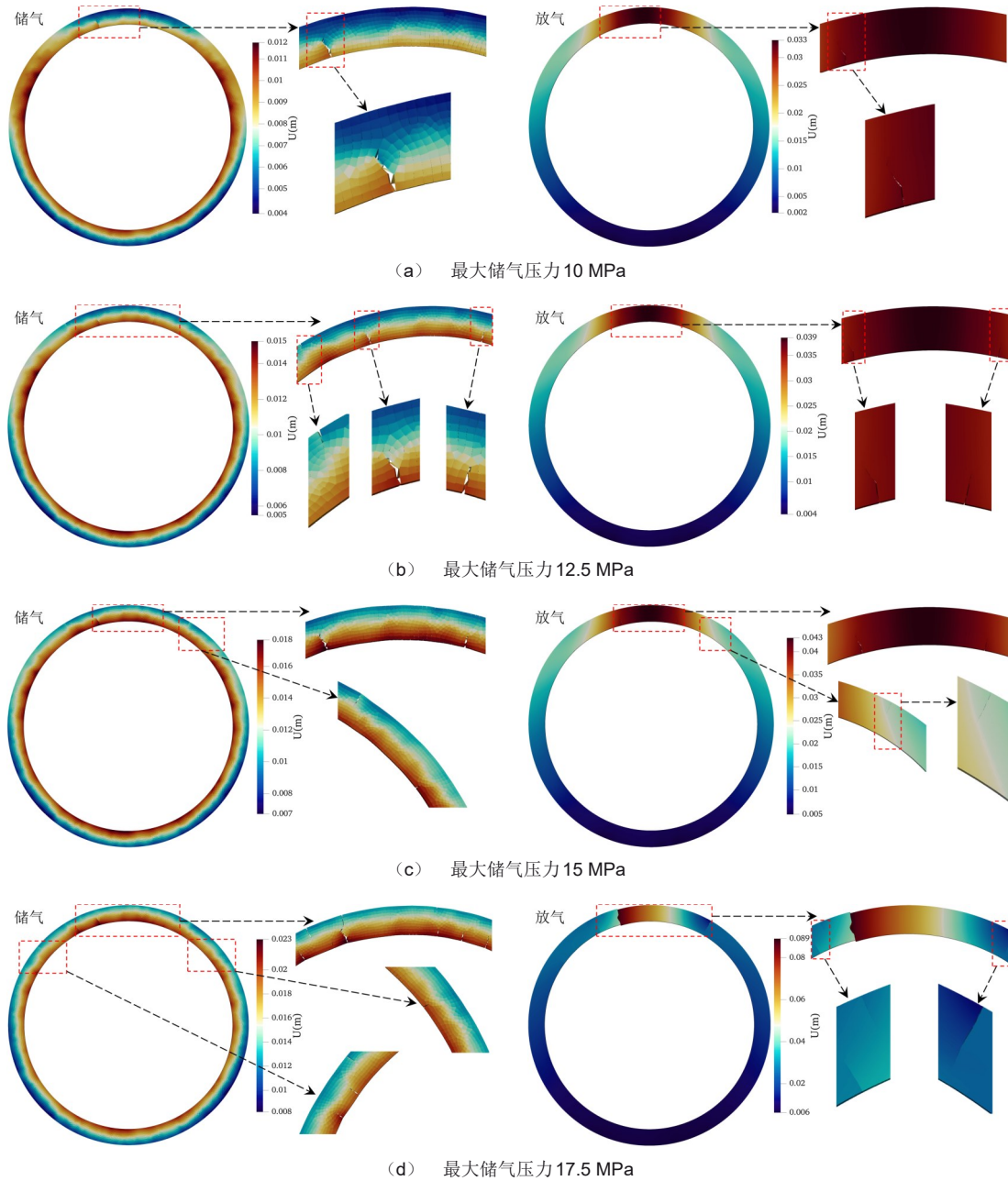


图 10 不同最大储气压力下衬砌位移场及裂缝分布

Fig. 10 Lining displacement contours and crack distribution under different maximum storage pressures

MPa时出现跳跃式增长；裂缝体积的变化趋势与裂缝数量基本一致，而裂缝宽度整体表现为相对平缓的增长趋势。在放气阶段初期，衬砌中未产生明显新裂缝，随着压力降低，部分裂缝发生闭合，表现为裂缝宽度和体积略有减小。随着洞内压力进一步降低，衬砌中开始出现少量新生裂缝，裂缝宽度和体积随之出现一定波动；至放气后期，裂缝增长速率有所提高，裂缝宽度和体积均呈快速增大趋势，

其中裂缝宽度增长更为显著。

将不同最大储气压力条件下储气结束与放气完成后的裂缝数量、宽度和体积进行提取分析，结果如图 13 所示。由图 13(a)可知，随着最大储气压力升高，衬砌中的裂缝数量总体呈增加趋势；当最大储气压力超过 15 MPa 后，裂缝数量明显加速增长。当最大储气压力低于 15 MPa 时，放气阶段未产生新生裂缝；而当最大储气压力达到 17.5 MPa 时，

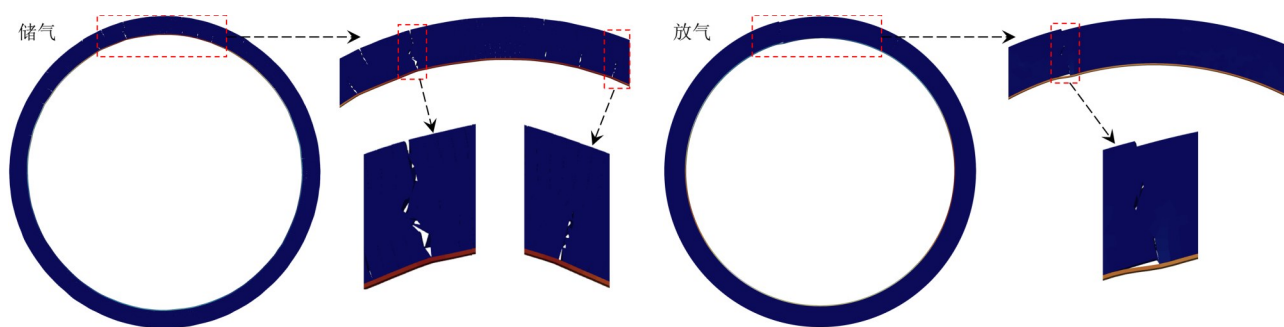


图 11 最大储气压力 17.5 MPa 下衬砌与密封层相对位置及等效力分布

Fig. 11 Relative positions of the lining and sealing layer and equivalent stress distribution under a maximum storage pressure of 17.5 MPa

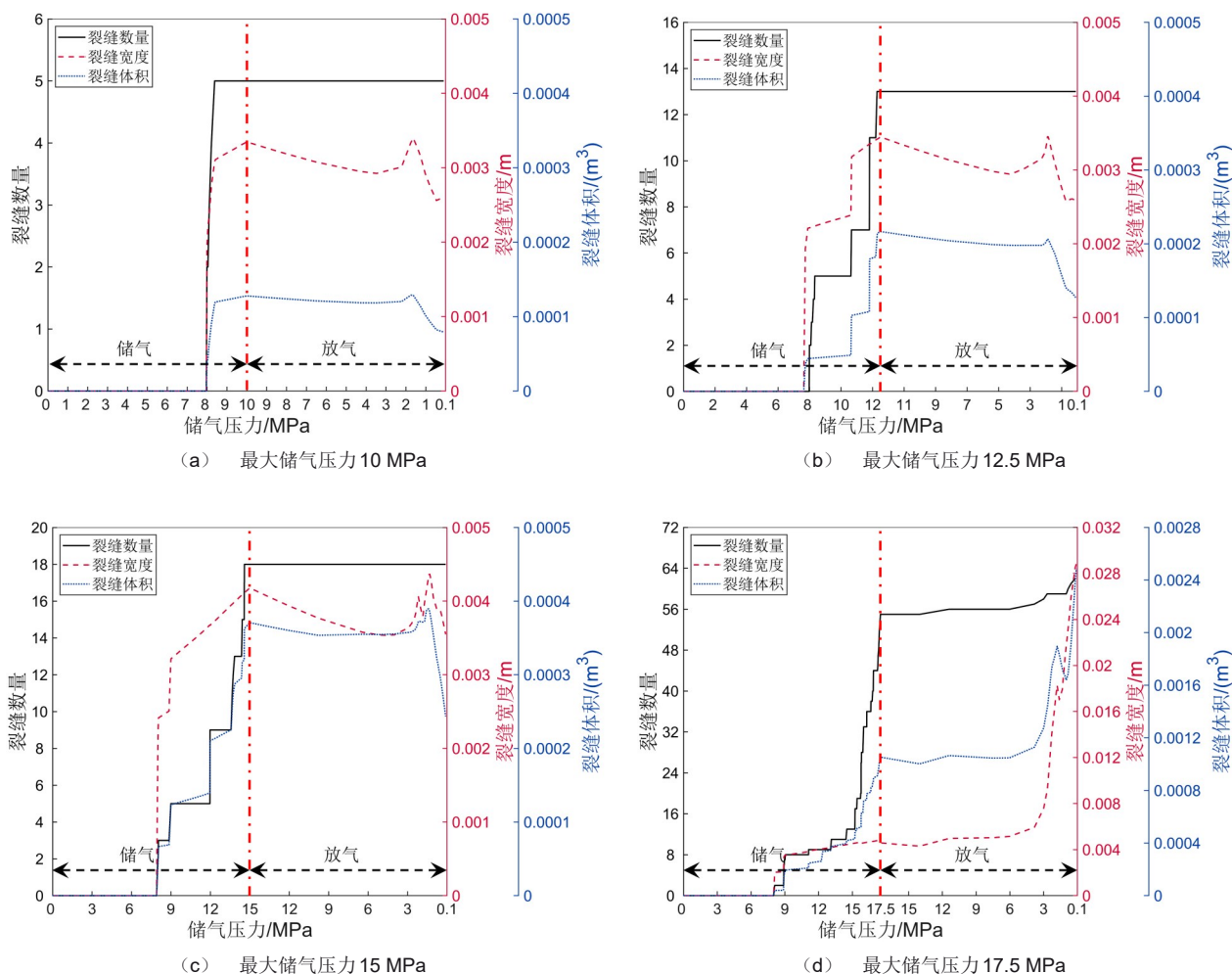


图 12 衬砌裂缝数量、宽度及体积随储气压力的演化曲线

Fig. 12 Variations in the number, width, and volume of lining cracks with storage pressure

放气完成后的裂缝数量而高于储气结束时。图 13 (b)给出了储气结束与放气完成后裂缝宽度随最大储气压力的变化规律。储气结束后，裂缝宽度随最

大储气压力升高仅呈小幅增加。当最大储气压力由 10 MPa 增至 17.5 MPa 时，裂缝宽度由 3.35 mm 增至 4.59 mm。相比之下，放气完成后裂缝宽度对

最大储气压力更为敏感，并随压力升高而明显增大。当最大储气压力达到 17.5 MPa 时，裂缝宽度出现跳跃式增长。结合图 10(d) 可知，这是由于拱顶衬砌裂缝发生贯通，导致裂缝张开量显著增大。最大储气压力为 10、12.5、15 和 17.5 MPa 时，放气完成后的裂缝宽度分别为 2.59、2.58、3.55 和 28.84 mm。由图 13(c) 可见，随着最大储气压力升高，储气结束与放气完成后的裂缝体积均逐渐增大，并在 17.5 MPa 时出现显著跃增。在 10-15 MPa 范围内，储气结束时的裂缝宽度和裂缝体积均高于放气完成时；而在 17.5 MPa 时，储气结束时的裂缝宽度和裂缝体积反而低于放气完成时。该结果表明，当储气压力达到较高水平后，放气过程不再仅表现为已有裂缝的闭合，反而可能促进裂缝进一步扩展甚至贯通，从而导致衬砌损伤显著加剧。

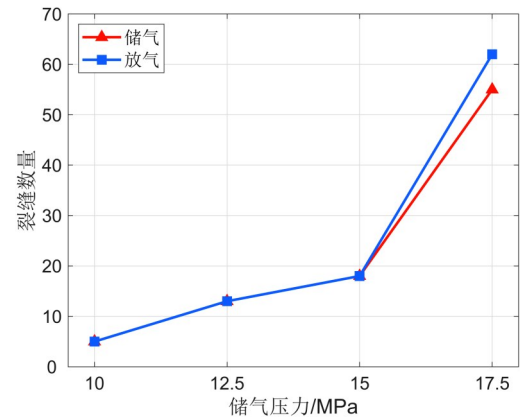
4 结 论

本文基于 Abaqus 建立隧道式储气库有限元模型，并结合内聚区模型，系统研究了花岗岩地层中典型隧道式压缩空气储能洞室在不同衬砌厚度组合及储气压力条件下的力学响应与开裂特征。主要结论如下：

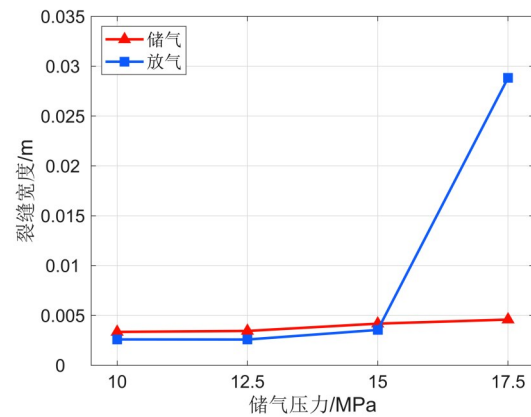
(1) 在储气与放气阶段，衬砌厚度效应均较为显著，围岩变形随衬砌厚度增大而明显减小。以拱腰水平变形为例，当支护结构由最薄组合（初期支护厚度 0.1 m、二次衬砌厚度 0.3 m）增至最厚组合（初期支护厚度 0.3 m、二次衬砌厚度 1.0 m）时，储气阶段拱腰水平变形由 -3.95 mm 减小至 -2.54 mm。围岩等效塑性应变亦随衬砌厚度增加而显著降低，其中储气阶段由最薄组合到最厚组合的降幅超过 50%。

(2) 衬砌各层应力随厚度增大而降低。当二次衬砌厚度超过 0.7 m 后，应力降幅明显趋缓，表明继续增厚二次衬砌对应力改善的边际效应减弱。综合结构受力性能与工程经济性，0.7 m 可作为二次衬砌厚度设计的合理临界值。尽管放气阶段衬砌应力低于储气阶段，但仍明显高于支护阶段，因此支护参数设计应同时兼顾储气与放气两种控制工况。

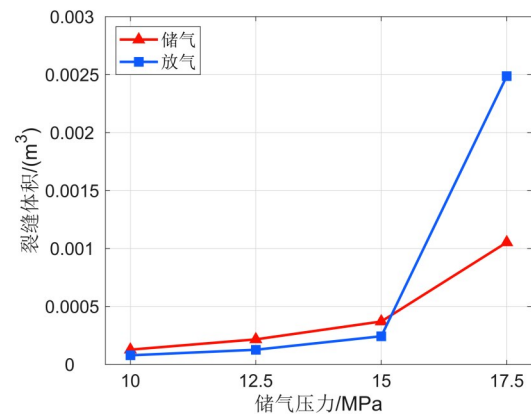
(3) 基于内聚区模型的开裂分析表明，衬砌裂缝首先萌生于拱顶附近，并主要由洞内向洞外扩展；随着储气压力升高，裂缝逐步由拱顶向拱肩区域扩展。当储气压力达到 17.5 MPa 时，拱顶衬砌



(a) 裂缝数量



(b) 裂缝宽度



(c) 裂缝体积

图 13 不同最大储气压力下储气结束与放气完成时衬砌裂缝特征随储气压力变化曲线

Fig. 13 Variations in lining crack characteristics with storage pressure at the end of storage and discharge under different maximum storage pressures

裂缝发生贯通并基本丧失承载能力，放气完成后裂缝宽度骤增至 28.84 mm，衬砌与密封层之间出现

显著相对位移, 储气库面临较高的气密性失效风险。

参 考 文 献

- [1] 李仲奎, 马芳平, 刘辉. 压气蓄能电站的地下工程问题及应用前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增1): 2121-2126.
LI Z K, MA F P, LIU H. Underground engineering problems in compressed air energy storage and its developing future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Supp.1): 2121-2126.
- [2] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 291-312. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014
- [3] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (9): 1729-1759. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829
YANG C H, WANG T T. Advance in deep underground energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41 (9): 1729-1759. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0829
- [4] 甘雨, 姜玥, 周辉, 等. 我国压缩空气储能电站适建性分区研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2305-2315. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1147
GAN Y, JIANG Y, ZHOU H, et al. Suitability assessment and zoning for the construction of compressed air energy storage plants in China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2305-2315. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1147
- [5] 蒋中明, 甘露, 张登祥, 等. 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (1): 110-119. DOI: 10.11779/CJGE20221165
JIANG Z M, GAN L, ZHANG D X, et al. Research on fracture distribution characteristics and evolution law of underground gas storage with compressed gas storage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (1): 110-119. DOI: 10.11779/CJGE20221165
- [6] 张国华, 王薪锦, 相月, 等. 压缩空气硬岩储库关键问题研究进展: 气密性能、热力过程与稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (11): 2601-2626. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2024.0030
ZHANG G H, WANG X J, XIANG Y, et al. Compressed air energy storage in hard rock cavern: Airtight performance, thermomechanical behavior, and stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (11): 2601-2626. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2024.0030
- [7] XIANG Y, ZHANG G, WANG X, et al. Load-sharing characteristics of lined rock caverns of compressed air energy storage system: A theoretical analysis[J]. Applied Energy, 2025, 388: 125626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.125626
- [8] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35 (5): 1391-1398. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.05.013
XIA C C, ZHANG P Y, ZHOU S W, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (5): 1391-1398. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.05.013
- [9] TONG Z, CHENG Z, TONG S. A review on the development of compressed air energy storage in China: Technical and economic challenges to commercialization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110178. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110178
- [10] 王者超, 李嘉祥, 郝薛将, 等. 压气储能地下内衬洞室建设中若干关键问题研究进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6 (1): 1-13. DOI: 10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.01.01
WANG Z C, LI J X, HAO X J, et al. A review of several issues for compressed gas energy storage in lined rock cavern[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6 (1): 1-13. DOI: 10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.01.01
- [11] CARRANZA-TORRES C, FOSNACHT D, HUDAK G. Geomechanical analysis of the stability conditions of shallow cavities for compressed air energy storage (CAES) applications[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2017, 3: 131-174. DOI: 10.1007/s40948-017-0049-3
- [12] 杨雪雯, 任灏, 廖泽球, 等. 压缩空气储能地下人工洞室研究现状与展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11 (4): 54-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06
YANG X W, REN H, LIAO Z Q, et al. Research status and prospect of underground artificial rock caverns for compressed air energy storage[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11 (4): 54-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.06
- [13] XU C, ZHANG G, XIA C, et al. Mechanical behavior of a new segmented lining for underground rock caverns with high internal pressure[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 167: 106100. DOI: 10.1016/j.compgeo.2024.106100
- [14] LI P, KANG H, ZHU Q, et al. Numerical and experimental investigations of concrete lined compressed air energy storage system[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 390: 136153. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136153
- [15] 孙冠华, 易琪, 姚院峰, 等. 压缩空气储能电站隧道式地下硐库潜在失稳模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (1): 41-49. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0199
SUN G H, YI Q, YAO Y F, et al. Study on potential instability mode of underground tunnel storage in compressed air energy storage power station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (1): 41-49. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0199
- [16] TAHERI M, BARROS J A O., SALEHIAN H, et al. Numerical assessment of the potential of fibre reinforced shotcrete for structural strengthening of underground masonry tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104677. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104677
- [17] 胡炜, 谭珍芝, 张安政, 等. 压气储能地下储气库衬砌开裂影响因素研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2025, 22 (4): 137-150. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20250402003
HU W, TAN Z Z, ZHANG A Z, et al. Study on influencing factors of lining cracking in compressed air energy storage underground

- gas storage reservoir[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 22 (4): 137-150. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20250402003
- [18] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design criteria for compressed air storage in hard rock[J]. Energy and Environment, 2002, 13: 851-872. DOI: 10.1260/095830502762231313
- [19] KIM H, RUTQVIST J, KIM H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 573-584. DOI: 10.1007/s00603-015-0761-7
- [20] ZHOU S, XIA C, ZHAO H, et al. Numerical simulation for the coupled thermo-mechanical performance of a lined rock cavern for underground compressed air energy storage[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14: 1382-1398. DOI: 10.1088/1742-2140/aa7bd9
- [21] 蒋中明, 欧阳钰榕, 韩克武, 等. 地下储气库压缩空气温度时空分布与温控方法[J]. 工程热物理学报, 2023, 44 (12): 3433-3444. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385
- JIANG Z M, OUYANG Y R, HAN K W, et al. Study on temporal and spatial distribution and temperature control methods of the compressed air in underground cavern[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44 (12): 3433-3444. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385
- [22] ZHAO C, LEI Q, ZHANG Z. Impact of fracture networks on the structural deformation of lined rock caverns under high internal gas pressure[J]. Underground Space, 2025, 21: 252-269. DOI: 10.1016/j.undsp.2024.03.009
- [23] 夏才初, 徐英俊, 王辰霖, 等. 基于非稳态渗流过程的压气储能洞室空气渗漏率计算[J]. 岩土力学, 2021, 42 (7): 1765-1773. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385
- XIA C C, XU Y J, WANG C L, et al. Calculation of air leakage rate in lined cavern for compressed air energy storage based on unsteady seepage process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (7): 1765-1773. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385
- [24] JIANG Z, LI P, TANG D, et al. Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 2671-2683. DOI: 10.1007/s00603-019-02009-x
- [25] 苏凯, 王博士, 王文超, 等. 水-温作用下水工隧洞钢筋混凝土衬砌开裂特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48 (12): 114-120. DOI: 10.13245/j.hust.201220
- SU K, WANG B S, WANG W C, et al. Study on cracks of reinforced concrete lining of hydraulic tunnel under the combined action of water pressure and temperature load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48 (12): 114-120. DOI: 10.13245/j.hust.201220
- [26] 张国华, 徐宇, 任兴伟, 等. 压气储能地下内衬储气库的开裂与屈服特性研究[J]. 岩土力学, 2026, 47 (6): 1-18. DOI: 10.16285/j.rsm.2025.0828
- ZHANG G H, XU Y, REN X W, et al. Study on cracking and yielding characteristics of underground lined storage reservoirs for compressed air energy storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2026, 47 (6): 1-18. DOI: 10.16285/j.rsm.2025.0828
- [27] 张格诚, 徐晨, 夏才初. 考虑剪切变形的高压储气洞室复合式预设缝衬砌力学特性[J]. 岩土力学, 2024, 45 (12): 3533-3544. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0682
- ZHANG G C, XU C, XIA C C. Mechanical properties of composite segmented lining for high-pressure gas storage cavern considering shear deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (12): 3533-3544. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0682
- [28] 蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等. 压气储能内衬洞室储气关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45 (12): 3491-3509. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0523
- JIANG Z M, LIU Y T, LU X, et al. Comments on key problems and design points of pressurized gas storage lining chamber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (12): 3491-3509. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0523