

引文:王敬奎, 刘杰, 王者超, 等. 非均匀岩层中高压储气库受力特征模拟[J]. 油气储运, 2025, 44(8): 912-920.

WANG Jingkui, LIU Jie, WANG Zhechao, et al. Numerical simulation of stress characteristics of high-pressure gas storage within heterogeneous rock formations[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(8): 912-920.

非均匀岩层中高压储气库受力特征模拟

王敬奎¹ 刘杰² 王者超³ 李嘉祥²

1. 中海油石化工程有限公司; 2. 东北大学资源与土木工程学院; 3. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室

摘要: 【目的】地下内衬岩石洞室(Lined Rock Cavern, LRC)储气库是一种新型的储气方式,其通过在地下岩层中人工挖掘洞室来建造天然气储气库,地下LRC储气库具备适用范围广、存储量大以及安全性高等特点,在解决现代能源安全与存储问题上具有独特优势。【方法】地下岩层性质复杂,大罐式储气库沿高度方向埋深变化大,岩层分布不均。依托现有地下储气库工程,参考工程中的地质条件,选择典型的围岩种类(I类、II类、III类、IV类),考虑上软下硬、上硬下软岩层条件以及不同岩层分界线高度情况,建立不均匀岩层中高压储气库数值模型,分析高内气压下大罐式储气库受力与变形情况。【结果】分析不同岩层条件下储气库中钢衬、钢筋、混凝土衬砌以及围岩受力状态发现,常见岩层条件下储气库中钢衬受力不会超过破坏强度,衬砌受力以拉应力为主,同时IV类围岩中储气库受力与变形较大,而I、II、III类围岩的储气库受力状态良好,其中围岩变形与塑性区大多出现在围岩软弱层中。【结论】一般非均匀岩层中储气库的钢衬与钢筋不会达到破坏强度,稳定性较好,而衬砌容易发生受拉破坏,需要关注衬砌开裂情况;储气库在上硬下软岩层中更为稳定;IV类围岩中储气库钢衬受力达屈服强度,且围岩变形较大,而II、III类围岩中的储气库稳定性较好,需要对软弱层部分多加关注;储气库在围岩软弱层中变形较大,且变形增加的幅度随着围岩性质变差而变大;随着岩层分界线高度提高,围岩中最大塑性应变呈现线性减小的趋势。(图13,表4,参28)

关键词: LRC 储气库; 非均匀岩层; 有限元; 围岩软弱层; 稳定性

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)08-0912-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.08.008

Numerical simulation of stress characteristics of high-pressure gas storage within heterogeneous rock formations

WANG Jingkui¹, LIU Jie², WANG Zhechao³, LI Jiexiang²

1. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd.; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University; 3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University

Abstract: [Objective] Gas storage using lined rock caverns (LRC) has emerged as an innovative method for underground gas storage. Naturally constructed within caverns manually excavated in underground rock formations, LRC gas storage exhibits several characteristics, including versatile applications, large storage capacities, and high safety levels. These unique advantages position LRC gas storage as an effective solution to challenges faced in modern energy security and storage. [Methods] Silo type LRC gas storage is situated within complex underground rock formations at significantly varying burial depths, where the distribution of rock strata is heterogeneous. This study developed a numerical model for medium- to high-pressure gas storage in such heterogeneous rock formations, based on an existing underground gas storage facility. Special attention was paid to the geological conditions of this facility, and typical surrounding rock types (Classes I, II, III, and IV) were selected for modeling. The model accounts for scenarios with both soft upper and hard lower strata, as well as hard upper and soft lower strata, incorporating varying boundary levels between rock layers. Utilizing this model, analyses were conducted to investigate the stress and deformation characteristics of Silo type LRC gas storage under elevated internal pressure. [Results] These analyses focused on the stress states affecting the steel lining, rebars, concrete lining, and surrounding rock of the gas storage under varying stratum conditions. The results indicated that, under typical stratum conditions, the stress on the steel lining remains below its failure strength, with

tensile stress being the predominant factor. Additionally, the stress and deformation in gas storage situated within Class IV surrounding rock are significant. In contrast, gas storage surrounded by Classes I, II, and III maintains healthy stress states, with rock deformation and plastic zones primarily developing in the weaker layers of the surrounding rock. **[Conclusion]** In general, the steel lining and rebars used in gas storage within heterogeneous rock formations rarely approach their failure strength, contributing to overall stability. However, given that lining is susceptible to tensile failure, special attention is required to address potential cracking. Gas storage demonstrates greater stability when situated in formations with hard upper and soft lower strata. In cases where gas storage is located within Class IV surrounding rock, the steel lining may experience stress that approaches its yield strength and is subject to significant deformation in the surrounding rock. Conversely, gas storage in the surrounding rock of Classes II and III exhibits improved stability, with more attention required for the weaker layers. Deformation in gas storage is significant within these weak layers, with deformation amplitudes increasing as the surrounding rock deteriorates. Additionally, the surrounding rock exhibits a linear decrease in the maximum plastic strain as the boundary level between rock layers rises. (13 Figures, 4 Tables, 28 References)

Key words: lined rock cavern (LRC) gas storage, heterogeneous rock formations, finite element, weak layer of surrounding rock, stability

中国是天然气消费大国,对天然气储备需求大,安全要求高。近年来,地下内衬岩石洞室(Lined Rock Cavern, LRC)储气库方式广受关注^[1-3]。地下 LRC 储气库储存压力高,且埋于地下受衬砌结构保护,因此其存储量大、安全性高。

地下储气库建设初期,学者通过试验与数值模拟对储气库稳定性开展研究。瑞典最早在斯德哥尔摩市修建了储气容量为 120 m³ 的试验洞室,研究地下内衬洞室的可行性^[3]。Lu^[4]采用三维有限元模拟验证了瑞典试验的地下 LRC 储气库变形情况,结果显示当储气压力达 52 MPa 时,围岩发生大规模破坏,模拟结果与试验相符。Okuno 等^[5]研究了一座埋深 400 m 的隧洞式试验洞室,在 IV 类围岩且 20 MPa 的最高储气压力下分析了钢衬、滑动层以及衬砌组合结构的气密性与受力特征,发现钢衬产生了塑性变形,但并未造成漏气现象。蒋中明等^[6]研究了平江蓄水电站厂房下埋深 110 m、储气压力为 10 MPa 的小型浅埋试验洞库,分析了温度变化、围岩、混凝土衬砌变形随储气压力的变化,结果表明该储气库在 II 类围岩中能满足结构安全性以及密封性要求。Rutqvist 等^[7]利用 TOUGH-FLAC 软件开展基于非等温多相流与地质力学场耦合的数值分析,研究了地下 LRC 储气库在运营过程中围岩的力学响应,并从空气泄漏与能源效率的角度讨论了建设地下储气库的可行性。地下 LRC 储气库的围岩是保持储气库稳定的关键因素,上述研究多采用小型洞室试验或对特定工况下围岩进行耦合分析的方式验证地下 LRC 储气库的可行性。

Perazzelli 等^[8]采用数值模拟方法,分析了最大储

气压力 20 MPa 下岩体的变形破坏与衬砌的完整性,得出多种岩土条件下隧洞式 LRC 储气库的埋深临界值。夏才初等^[9]采用 FLAC 建立了压气储能内衬洞室热力耦合数值模型,对不同埋深下的压气储能洞室进行受力变形分析,得到一个周期内围岩与衬砌应力在不同埋深下的变化特征。Zimmels 等^[10]利用 FLAC 针对侧压力系数 0.75、衬砌厚度 1 m 的压气储能圆形洞室的围岩塑性区进行计算,考虑不同储气压力、洞室间距等参数,得出埋深 35 m 下不同工况中内衬式压气储能洞室的塑性区分布与拉伸破坏情况。王其宽等^[11]采用 ABAQUS 数值模拟方法,以埋深、洞径及洞距 3 个因素设置正交试验,考虑围岩塑性区与衬砌主应力的变化趋势,给出洞库群的最优布局参数。夏才初等^[12]采用 ABAQUS 有限元软件,分析了高内气压下压气储能洞室中围岩的塑性区与洞周应变,同时考虑隧道式与大罐式两种洞室形式以及不同洞室尺寸的影响,结果表明大罐式洞型最优,且埋深越大,地下储气库的洞周应变越小。然而,上述研究只考虑了单一围岩的情况且围岩性质良好,忽略了围岩分层与部分围岩质量较差的情况。在实际工程中围岩大多是分层分布^[13],但目前对于围岩分层的研究大多集中在隧道与地下矿道中^[13-14]。同时,压缩空气储气库的储气压力大多低于 10 MPa,一般低于地下 LRC 天然气储库的内压。在此,建立非均匀岩层中 LRC 储气库模型,研究围岩上下分层状态下岩层参数变化对 LRC 储气库受力特征的影响,并对不同岩层分界线高度下 LRC 储气库的受力与变形进行分析,以期为非均匀岩层中储气库的建设提供参考。

1 模型建立

1.1 地下 LRC 储气库洞室方案

现有地下储气库主要包括隧洞式与大罐式两种结构。由于大罐式洞型更优，在此仅对其进行模拟分析。大罐式地下 LRC 储气库由一个或多个大罐式洞室组成(图 1)，储气库结构为圆形上封头、椭圆形下封头。参考瑞典在 Skallen 地区建立的世界第一座商用大罐式储气库^[14]结构形式，设置储气压力 15 MPa、埋深 150 m。以下主要分析钢衬、滑动层、混凝土、钢筋、喷射混凝土以及围岩 6 个主要部分，忽略排水系统的影响。

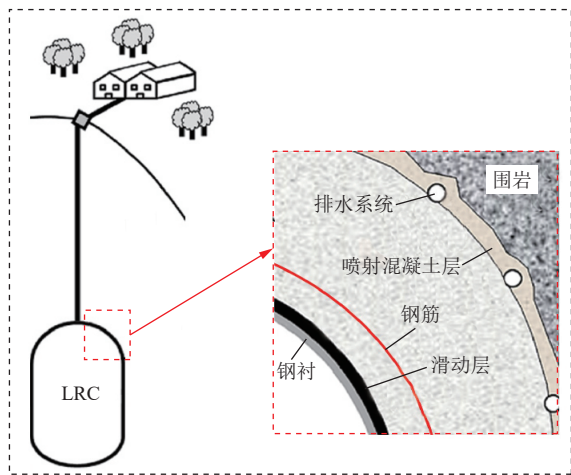


图 1 大罐式地下 LRC 储气库以及主要组件结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of underground silo type LRC gas storage and main components

1.2 本构模型及参数选取

在储气库数值模型中，钢筋型号选用 HRB400，直径为 20 mm；钢板型号为 Q420，厚度为 12 mm^[15]。两种钢材(表 1)的选择依据为 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》。钢材力学模型采用双折线弹塑性本构模型，屈服后弹性模型是屈服前的 1/10^[16]。

表 1 数值模型所用钢材物性参数表
Table 1 Physical property parameters of steel in the numerical model

钢材种类	屈服强度/ MPa	极限抗拉 强度/MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
钢筋 HRB400	400	540	200	0.3	7 800
钢板 Q420	420	520	210	0.3	7 800

LRC 储气库的滑动层通过调整钢衬与混凝土衬砌接触面的摩擦因数来设置，摩擦因数设为 0.1^[16]。混凝土型号为 C30(表 2)，厚度为 1 m；钢筋保护层厚度为 50 mm，采用 ABAQUS 中的塑性损伤本构模型^[17]

表 2 C30 混凝土物理力学参数表
Table 2 Physical and mechanical parameters of C30 concrete

抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)
2.01	20.1	30	0.2	2 500

进行模拟。在高压储气库中，混凝土衬砌必然会发生塑性开裂^[18]，而该本构模型能够较好地反映混凝土受压、受拉状态。

假设围岩材料为理想弹塑性，故选用摩尔库伦本构模型。现有地下储气库工程大多建立在 I 类、II 类围岩中^[14, 19-24]，围岩质量较好，为扩大 LRC 储气库建设选址范围，在此考虑 I 类、II 类、III 类以及 IV 类围岩，围岩模型参数(表 3)参考 GB/T 50218—2014《工程岩体分级标准》。此外，衬砌与围岩之间的喷射混凝土层也通过摩擦因数为 1.4^[15]进行表征。

表 3 围岩力学模型参数表
Table 3 Parameters of mechanical model for surrounding rock

围岩等级	弹性模量/ GPa	重度/ (kN·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	泊松比
I	33	28.0	62	2.4	0.20
II	25	26.5	56	1.5	0.25
III	16	24.5	44	0.7	0.30
IV	6	22.5	27	0.2	0.35

1.3 模型尺寸与边界条件

LRC 储气库模型边长均为 400 m，横向大于 10 倍洞径，以减小边界效应，洞室上方取实际埋深(图 2)。洞室上封头取半径为 17.5 m 的圆形，中间竖筒段高度为 80 m；下封头设为椭圆形，长半轴为 17.5 m，短半轴为 12.5 m。钢筋网横向、竖向钢筋间距均为 0.2 m。模型左右面边界为对称约束，顶面为自由约束，其余面为法向位移约束。围岩分层部分在储气库竖筒段的中间位置，上下部分为不同性质的围岩。沿储

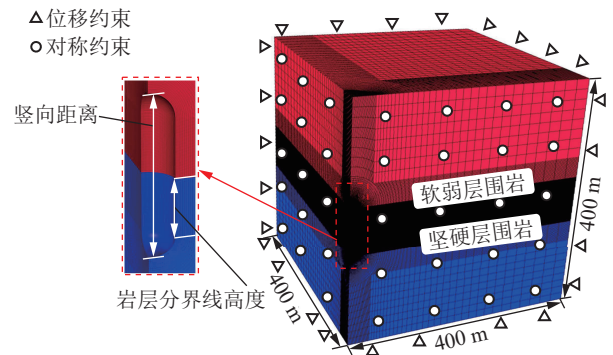


图 2 大罐式地下 LRC 储气库围岩分层模型图
Fig. 2 Model illustration of surrounding rock layering for underground silo type LRC gas storage

气库洞室边界, 由上到下定义为竖向距离, 洞室顶部设置竖向距离为 0 的位置。设置竖筒段与下封头连接处的位置为 0, 沿此处向上至分界线的高度为分界线高度。

模型中的钢衬、混凝土及围岩网格划分均采用 C3D8R 单元, 而钢筋则采用 T3D2 单元。围岩的网格最小尺寸、最大尺寸分别为 0.5 m、20.0 m, 其余部分的网格尺寸均为 0.5 m。最终的网格数量分别为钢衬 12 069 个、混凝土 48 256 个、围岩 741 658 个、钢筋 12 069 个。工程中岩层性质复杂, 常呈现两层甚至多层的分布状态, 软硬岩层分布多样^[13-14]。在此, 主要研究上软下硬、上硬下软岩层分布下储气库的受力特征, 共设置不同围岩性质组合的 6 个模拟工况(表 4), 工况参数取值与表 3 模型参数取值相同。

表 4 不同岩层状态下的模拟工况表

Table 4 Simulation conditions under different rock formation scenarios

工况序号	工况分类	围岩性质
1		上 II 下 I
2	上软下硬	上 III 下 II
3		上 IV 下 III
4		上 I 下 II
5	上硬下软	上 II 下 III
6		上 III 下 IV

2 非均匀岩层受力分析

2.1 典型工况

由于上软下硬的岩层分布与 II 类、III 类围岩较为常见, 将工况 2 作为典型工况进行分析。在上软下硬岩层条件下, 储气库钢衬的上封头段受力明显较大, 而竖筒段与下封头连接处的受力较小, 其中最大应力为 209.4 MPa, 远低于钢衬抗拉强度, 表明钢衬的密封性与稳定性良好(图 3a)。根据钢筋网受力情况(图 3b)可知, 上下封头的钢筋与竖筒段的横向钢筋受力较大, 最大应力为 184.2 MPa, 尚未达到钢筋的破坏强度, 不会发生受拉破坏。竖筒段的竖向钢筋受力较小, 拉应力大部分小于 100 MPa。由此可知, 大罐式储气库封头段的钢筋以及竖筒段钢筋网中的横向钢筋为主要受力对象。根据衬砌受力情况(图 3c)可见, 混凝土衬砌的受力大多表现为拉应力, 在上下封头处表现出部分压应力, 说明竖筒段衬砌易发生受拉破坏, 而封头段衬砌会出现受拉与受压两种破坏形式。图 3c 中混凝土

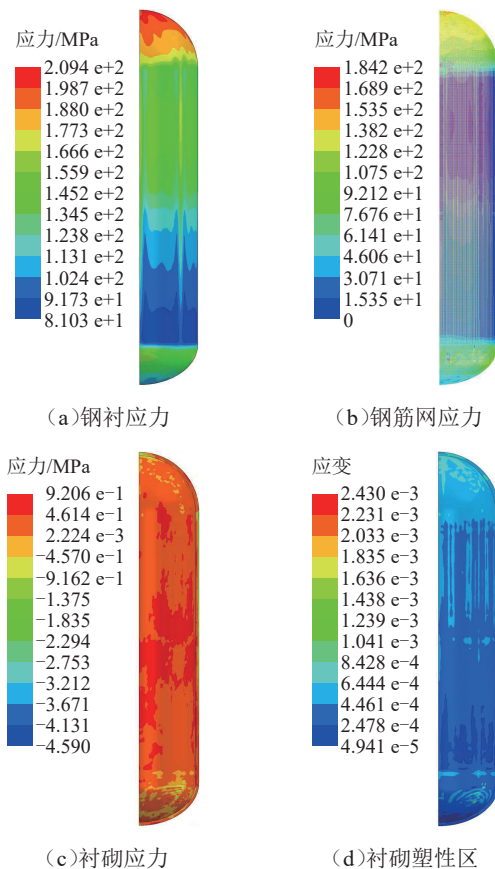


图 3 典型工况下大罐式地下 LRC 储气库部分组件受力云图
Fig. 3 Stress nephograms of partial components of underground silo type LRC gas storage under typical conditions

土第一主应力最大为 0.92 MPa, 最小为 -4.59 MPa, 且混凝土主应力分布不均匀。这是由于混凝土抗拉性能较差, 可认为混凝土衬砌已出现受拉破坏, 发生开裂。根据衬砌塑性区受力情况(图 3d)可见, 混凝土衬砌的上封头塑性较大, 而竖筒段下半部分塑性较小, 其中混凝土衬砌的最大塑性应变为 2.43×10^{-3} , 表明混凝土已出现受拉开裂现象。

模拟得到典型工况下地下 LRC 储气库的围岩受力特征(图 4)。根据围岩主应力云图(图 4a), 储气库周围的围岩大多表现为压应力, 仅在储气库下封头部分表现出拉应力, 表明在典型工况下围岩受力以压应力为主。围岩最大拉应力为 0.17 MPa, 在围岩性质较好时需要注意围岩的抗拉破坏; 最大压应力为 10 MPa, 与地应力相一致。由围岩径向位移(图 4b)可知, 在上软下硬岩层条件下, 大罐式储气库径向位移在竖筒段中上部明显较大, 随着埋深增加以及围岩质量提高, 径向位移显著降低, 其中最大径向位移为 14.45 mm。这与王其宽等^[11]的模拟结果较为吻合, 与 Jiang 等^[25]的试验结果也相近, 表明在 II 类、III 类围岩中储气库不

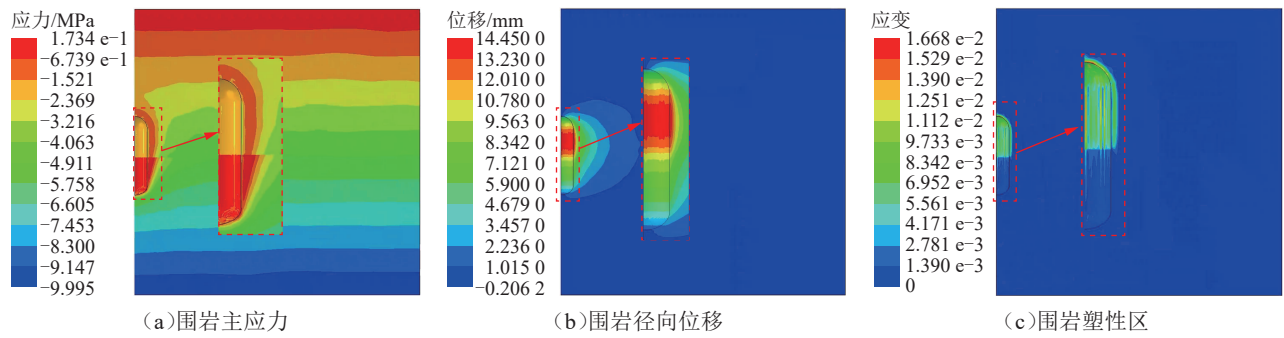


图4 典型工况下大罐式地下LRC储气库围岩受力特征云图

Fig. 4 Stress characteristics nephograms of surrounding rock in underground silo type LRC gas storage under typical conditions

会发生较大变形, 洞室的稳定性较好。由围岩塑性区(图4c)可知, 上软下硬岩层中储气库最大塑性应变出现在上封头, 这与夏才初等^[12]的模拟结果一致; 最大等效塑性应变为 16.68×10^{-3} , 略大于夏才初等^[26]的研究结果。这是由于该储气库洞径大且埋深浅, 同时储气压力也较大, 均会造成应变偏大的问题^[12]。围岩上部岩层中的塑性明显大于下部, 是因为上部岩层性质较差, 且上半部分岩层地应力较低, 表明在上软下硬的岩层中, 储气库稳定性受上半部分岩层影响较大。

2.2 上软下硬岩层工况

上软下硬岩层为工程中常见的围岩条件。根据该岩层中钢衬应力与围岩关系(图5)可知, 钢衬应力较大的位置在上封头处, 钢衬竖筒段中下部分的应力较小。随着围岩性质变差, 钢衬各处的应力均变大, 其中最大应力由 200.2 MPa 增至 434.8 MPa, 此时钢衬竖筒段中上部分与上封头处应力相当, 且超过 420.0 MPa, 进入屈服阶段, 最小应力由 98.6 MPa 增至 280.6 MPa, 钢衬竖筒段中下部分与下封头处受力状态良好。

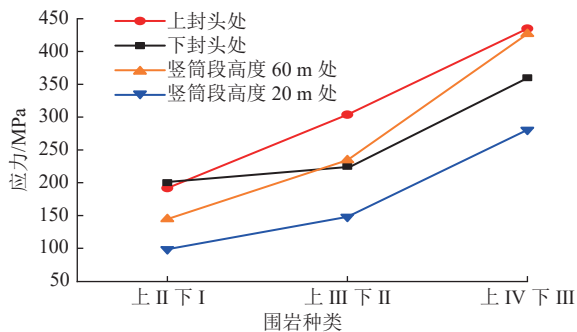


图5 上软下硬岩层中钢衬应力与围岩类型的关系图
Fig. 5 Relationship between stress in steel lining and surrounding rock type in soft upper and hard lower strata

根据上软下硬岩层中围岩径向位移与竖向距离的关系(图6)可见, 上部岩层径向位移变化较大, 且最大径向位移也出现在上部岩层中, 而中下部岩层径向位移较为均匀。当围岩性质较差时, 围岩径向位移在分

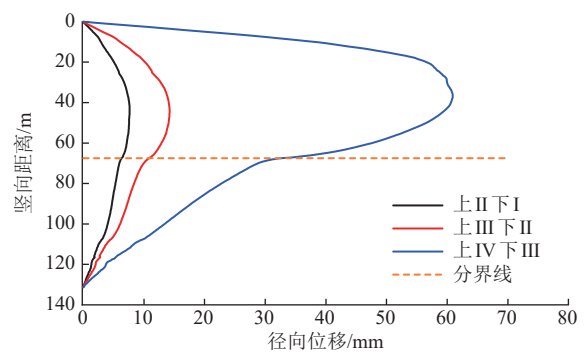


图6 上软下硬岩层中围岩径向位移与竖向距离的关系图
Fig. 6 Relationship between radial displacement of surrounding rock and vertical distance in soft upper and hard lower strata

界线处会发生突变; 同时, 随着围岩性质变差, 围岩径向位移由 7.65 mm 增至 14.23 mm, 再到上 IV 下 III 岩层中的 60.91 mm, 径向位移显著增大。

2.3 上硬下软岩层工况

在上硬下软岩层中, 钢衬下封头处应力最大, 钢衬竖筒段中上部分与上封头处应力较小。随着围岩性质变差, 钢衬最大应力由 206.3 MPa 增至 422.8 MPa, 钢衬下半部分均进入屈服阶段, 但并未达到钢衬的破坏强度, 最小应力由 109.7 MPa 增至 331.5 MPa, 此时钢衬上半部分状态较为稳定(图7)。

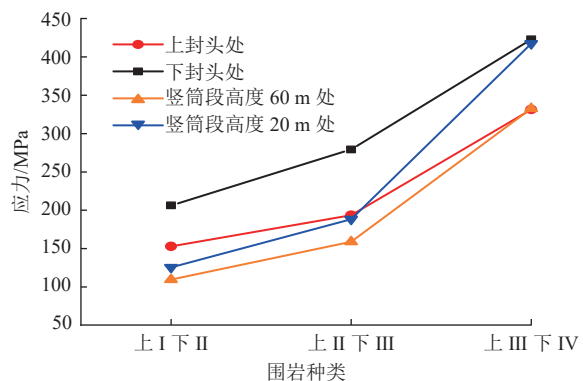


图7 上硬下软岩层中钢衬应力与围岩类型的关系图
Fig. 7 Relationship between stress in steel lining and surrounding rock type in hard upper and soft lower strata

在上硬下软岩层中, 下部岩层径向位移较大, 这是由于下部岩层性质较差, 围岩更容易发生变形。随着围岩性质逐渐变差, 径向位移变大, 其中上 I 下 II 岩层中最大径向位移为 6.37 mm, 增至上 III 下 IV 岩层中的 38.54 mm(图 8)。

在上硬下软岩层中, 围岩主应力与上软下硬岩层中相同, 大多表现为压应力, 但在上 I 下 II 岩层与上 II 下 III 岩层中出现部分拉应力, 且拉应力位置在围岩的上部围岩坚硬层中, 而围岩软弱层中主应力仍是压应力。随着围岩性质变好, 围岩中最大拉应力也逐渐变大, 由 0.17 MPa 增至 0.63 MPa(图 9)。

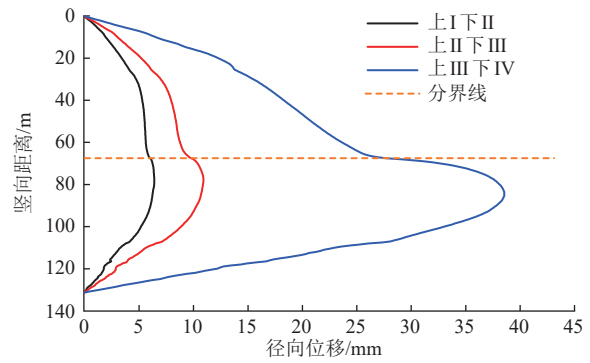


图 8 上硬下软岩层中围岩径向位移与竖向距离关系图
Fig. 8 Relationship between radial displacement of surrounding rock and vertical distance in hard upper and soft lower strata

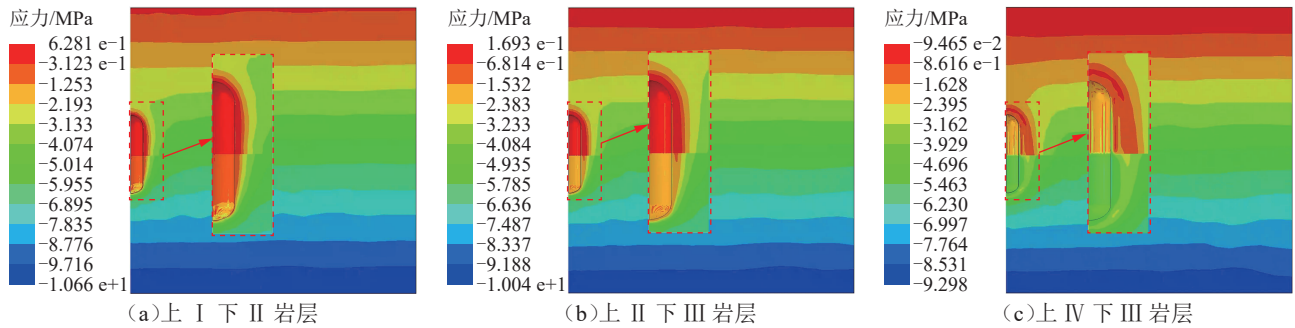


图 9 上硬下软岩层中围岩主应力云图
Fig. 9 Principal stress diagram for surrounding rock in hard upper and soft lower strata

在上硬下软岩层中, LRC 储气库最大等效塑性应变出现在围岩的下部软弱层岩层中(图 10), 表明当岩层出现明显的软弱层时, 围岩最大塑性应变会出现在

软弱层位置。随着围岩等级提高, 最大塑性应变由 1.610×10^{-3} 增至 1.403×10^{-2} , 再到 1.320×10^{-1} , 变化显著, 但较上软下硬岩层中的等效塑性应变变化幅度小。

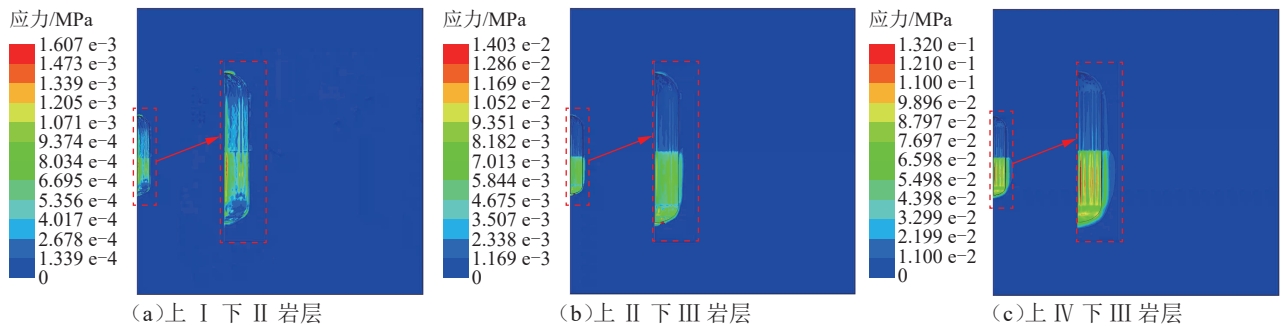


图 10 上硬下软岩层中 LRC 储气库塑性区云图
Fig. 10 Plastic zone nephograms for LRC gas storage in hard upper and soft lower strata

2.4 不同分界线高度

在上软下硬、上 III 下 II 岩层中, 随着岩层分界线高度(0、20 m、40 m、60 m、80 m)增大, 钢衬最大应力由 309.2 MPa 降至 281.2 MPa, 钢衬中应力较小部分占比逐渐变大。这是因为围岩中性质较好岩层占比逐渐增多, 围岩性质整体变好, LRC 储气库更稳定(图 11)。

随着分界线高度增加, 围岩最大径向位移减小, 最大径向位移位置逐渐上移, 且径向位移的突变更加集

中(图 12)。同时, 围岩最大径向位移由 15.3 mm 减至 9.2 mm, 且在竖向距离小于 5 m 或大于 120 m 的位置, 各工况下围岩径向位移几乎一致。在同一竖向距离下, 分界线高度越高, 围岩径向位移越小, 表明在上软下硬围岩中岩层分界线高度增大, 增强储气库稳定性增强。

随着分界线高度增加, 围岩最大等效塑性应变呈近似线性趋势由 17.93×10^{-3} 减至 14.06×10^{-3} (图 13), 表明岩层分界线对储气库的塑性应变有一定影响。

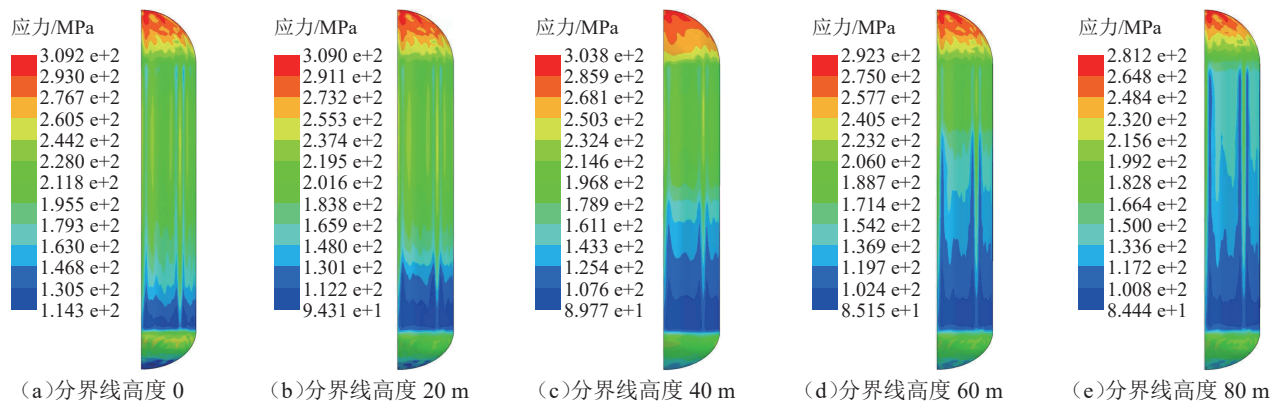


图 11 不同岩层分界线高度下 LRC 储气库钢衬受力云图
Fig. 11 Stress nephograms of steel lining in LRC gas storage with varying boundary levels between rock layers

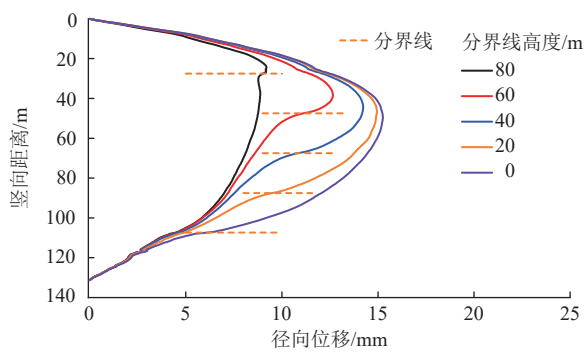


图 12 不同分界线高度下围岩径向位移与竖向距离的关系图
Fig. 12 Relationship between radial displacement of surrounding rock and vertical distance with varying boundary levels between rock layers

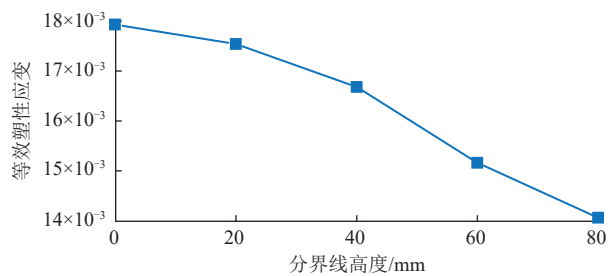


图 13 分界线高度与围岩最大等效塑性应变关系图
Fig. 13 Relationship between boundary level and maximum equivalent plastic strain in surrounding rock

综上,对于地下 LRC 大罐式储气库,钢衬应力一般不会达到破坏强度,需要注意衬砌产生的裂缝可能导致钢衬局部破坏^[27],以及工程应用中可能出现的疲劳破坏问题。此外,上软下硬岩层条件更有利于储气库的稳定性,同时需要关注储气库软弱层的受力状态^[28],对软弱层进行加固以提高储气库稳定性。

3 结论

通过建立不同岩层条件下大罐式 LRC 储气库数值模型,分析了埋深 150 m、储气压力 15 MPa 下大罐

式储气库在上软下硬岩层与上硬下软岩层中的受力变化,并探究了岩层分界线高度变化对储库稳定性的影响,得到以下主要结论:

1)非均匀岩层条件下的大罐式储气库,钢衬受力最大位置多出现在封头段,其中出现 IV 类围岩时,位于围岩软弱层中的钢衬均会进入屈服阶段,但不会发生破坏。然而,混凝土衬砌受力不均,易出现受拉破坏,需要关注衬砌开裂情况。

2)LRC 储气库在 I 类、II 类、III 类围岩中均具较好的稳定性,考虑建设成本与选址自由度时可将储气库建设在 II 类、III 类围岩中。此外,大罐式储气库在上硬下软岩层中受力较小,表明上硬下软岩层更适于大罐式储气库建设。

3)围岩变形与塑性应变最大位置均出现在围岩软弱层中,表明围岩性质对储气库影响较大。因此,在工程建设中应多关注围岩软弱层,当岩层质量较差时可考虑对软弱层进行加固。

4)岩层分界线高度变化对 LRC 储气库受力有一定影响。随着分界线高度增加,储气库最大径向位移减小,最大位移位置增高,并且塑性应变呈线性减小的变化趋势。

参考文献:

[1] 丁国生,丁一宸,李洋,唐立根,武志德,颜祺琪,等. 碳中和战略下的中国地下储气库发展前景[J]. 油气储运, 2022, 41(1): 1-9. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.01.001.
DING G S, DING Y C, LI Y, TANG L G, WU Z D, WANYAN Q Q, et al. Prospects of underground gas storage in China under the strategy of carbon neutrality[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(1): 1-9.

- [2] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, CHOI B H, SUNWOO C, SONG W K. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: A modeling study of air tightness and energy balance[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 653–667. DOI: [10.1016/j.apenergy.2011.07.013](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.013).
- [3] DAMASCENO D R, SPROSS J, JOHANSSON F. Effect of rock joints on lined rock caverns subjected to high internal gas pressure[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(7): 1625–1635. DOI: [10.1016/j.jrmge.2022.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.011).
- [4] LU M. Finite element analysis of a pilot gas storage in rock cavern under high pressure[J]. *Engineering Geology*, 1998, 49(3/4): 353–361. DOI: [10.1016/S0013-7952\(97\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00067-7).
- [5] OKUNO T, WAKABAYASHI N, NIIMI K, KURIHARA Y, IWANO M. Advanced natural gas storage system and verification tests of lined rock cavern-ANGAS project in Japan[J]. *International Journal of the JCRM*, 2009, 5(2): 95–102. DOI: [10.11187/ijjcrm.5.95](https://doi.org/10.11187/ijjcrm.5.95).
- [6] 蒋中明, 李鹏, 赵海斌, 冯树荣, 唐栋. 压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(1): 235–241, 252. DOI: [10.16285/j.rsm.2018.2175](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.2175).
- JIANG Z M, LI P, ZHAO H B, FENG S R, TANG D. Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(1): 235–241, 252.
- [7] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, SYNN J H, SONG W K. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 71–81. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.010).
- [8] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Design issues for compressed air energy storage in sealed underground cavities[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(3): 314–328. DOI: [10.1016/j.jrmge.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.09.006).
- [9] 夏才初, 赵海斌, 梅松华, 周舒威, 张平阳, 周瑜. 埋深对压气储能内衬洞室稳定性影响的定量分析[J]. *绍兴文理学院学报*, 2016, 36(9): 1–7. DOI: [10.16169/j.issn.1008-293x.k.2016.09.01](https://doi.org/10.16169/j.issn.1008-293x.k.2016.09.01).
- XIA C C, ZHAO H B, MEI S H, ZHOU S W, ZHANG P Y, ZHOU Y. Quantitative analysis of impact of cover depth on stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage[J]. *Journal of Shaoxing University*, 2016, 36(9): 1–7.
- [10] ZIMMELS Y, KIRZHNER F, KRASOVITSKI B. Design criteria for compressed air storage in hard rock[J]. *Energy & Environment*, 2002, 13(6): 851–872. DOI: [10.1260/095830502762231313](https://doi.org/10.1260/095830502762231313).
- [11] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 李玉涛, 胡振法, 郎保华. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1123–1131. DOI: [10.13544/j.cnki.jeg.2020-305](https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-305).
- WANG Q K, ZHANG B, WANG H X, LI Y T, HU Z F, LANG B H. Optimization and stability analysis of layout parameters of lined high-pressure gas storage caverns[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1123–1131.
- [12] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 周瑜, 王蕊. 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](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2014.05.013).
- XIA C C, ZHANG P Y, ZHOU S W, ZHOU Y, WANG R. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(5): 1391–1398.
- [13] ZHANG Y H, HU Z P, LI S, HE P Y, HU J Y, WANG B Y, et al. A field study to measure the surrounding stress of rock and supporting structure of a steep tunnel with a combination of hard and Soft rock layers under plate compression[J]. *Buildings*, 2024, 14(3): 618. DOI: [10.3390/buildings14030618](https://doi.org/10.3390/buildings14030618).
- [14] 黄惟. 上软下硬复合地层隧道施工稳定机理及风险评估研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- HUANG W. Study on stability mechanism and risk assessment of tunnel construction in upper soft and lower hard composite strata[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [15] GLAMHEDEN R, CURTIS P. Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(1): 56–67. DOI: [10.1016/j.tust.2005.06.002](https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.002).
- [16] DAMASCENO D R, SPROSS J, JOHANSSON F. Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 119–129. DOI: [10.1016/j.jrmge.2022.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.006).
- [17] WANG W M, LI H N, TIAN L. Progressive collapse analysis of transmission tower-line system under earthquake[J]. *Advanced Steel Construction*, 2013, 9(2): 161–172. DOI: [10.18057/IJASC.2013.9.2.5](https://doi.org/10.18057/IJASC.2013.9.2.5).
- [18] ZHANG S, CHENG M, WANG J, WU J Y. Modeling the

- hysteretic responses of RC shear walls under cyclic loading by an energy-based plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2019, 29(1): 184–200. DOI: [10.1177/1056789519889103](https://doi.org/10.1177/1056789519889103).
- [19] 蒋中明, 甘露, 张登祥, 肖喆臻, 廖峻慧. 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](https://doi.org/10.11779/CJGE20221165).
JIANG Z M, GAN L, ZHANG D X, XIAO Z Z, LIAO J H. Distribution characteristics and evolution laws of liner cracks in underground caverns for compressed air energy storage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(1): 110–119.
- [20] 王者超, 李嘉祥, 郝薛将, 李明辉, 张武, 刘杰. 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](https://doi.org/10.19952/j.cnki.2096-5052.2024.01.01).
WANG Z C, LI J X, HAO X J, LI M H, ZHANG W, LIU J. 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.
- [21] YARVEISY R, KHAN F, ABBASSI R. Data-driven model to predict burst pressure in the presence of interacting corrosion pits[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(1): 100146. DOI: [10.1016/j.jpse.2023.100146](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100146).
- [22] 肖国华, 王玲玲, 邱贻旺, 徐安, 马艳. 储气库特深井高温封堵工艺技术研究及应用[J]. *石油机械*, 2023, 51(12): 106–111, 119.
XIAO G H, WANG L L, QIU Y W, XU A, MA Y. Research and application of high-temperature sealing technology for ultra-deep wells in gas storage[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(12): 106–111, 119.
- [23] GE Y Q, HUANG W Q, LI X F, YAO J, YANG Q, ZHANG C, et al. Numerical investigation on oil leakage and migration from the accidental hole of tank wall in oil terminal of pipeline transportation system[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(2): 100175. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100175](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100175).
- [24] 胡彩云, 李聪, 杨智斌, 贾倩, 孙彦春, 李超锋, 等. 气顶砂岩油藏型储气库运行上限压力和库容量定量评价研究[J]. *地质力学学报*, 2024, 30(3): 419–426. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023075](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023075).
HU C Y, LI C, YANG Z B, JIA Q, SUN Y C, LI C F, et al. Quantitative evaluation of maximum operating pressure and storage capacity for gas-top sandstone reservoir-type gas storage[J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(3): 419–426.
- [25] JIANG Z M, LI P, TANG D, ZHAO H B, LI Y. 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(6): 2671–2683. DOI: [10.1007/s00603-019-02009-x](https://doi.org/10.1007/s00603-019-02009-x).
- [26] 夏才初, 周舒威, 周瑜, 张平阳. 压缩空气储能的地下岩石内衬洞室关键技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2021: 13–24.
XIA C C, ZHOU S W, ZHOU Y, ZHANG P Y. Key technology of underground rock-lined cavern for compressed air energy storage[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2021: 13–24.
- [27] 马新华, 郑得文, 申瑞臣, 王春燕, 罗金恒, 孙军昌. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 489–499.
MA X H, ZHENG D W, SHEN R C, WANG C Y, LUO J H, SUN J C. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 489–499.
- [28] 赵昱超, 罗瑜, 李隆新, 周源, 李力民, 王霞. 地下储气库地应力模拟研究与地质完整性评估: 以相国寺为例[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(4): 523–536. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2021138](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2021138).
ZHAO Y C, LUO Y, LI L X, ZHOU Y, LI L M, WANG X. In-situ stress simulation and integrity evaluation of underground gas storage: A case study of the Xiangguosi underground gas storage, Sichuan, SW China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(4): 523–536.

(编辑: 刘朝阳)

基金项目: 沈阳市科技计划项目“地下衬砌洞室压缩空气储能关键技术研究”, 22322317。

作者简介: 王敬奎, 男, 1972年生, 教授级高工, 1994年毕业于西安建筑科技大学建筑工程专业, 现主要从事地下储能工程、地下高压储气等研究。地址: 山东省济南市历下区经十路9999号, 250014。电话: 13605325543。Email: wangjk3@cnooc.com.cn

通信作者: 王者超, 男, 1980年生, 教授, 2010年博士毕业于卡尔加里大学土木工程专业, 现主要从事岩土力学与工程专业方向相关研究。地址: 辽宁省沈阳市和平区文化路三巷11号, 110819。电话: 13032433698。Email: wangzhechao@mail.neu.edu.cn

• Received: 2025-02-25

• Revised: 2025-04-02

• Online: 2025-05-27

