

高内压储气库围岩承载机理及承载分区方法研究

刘建友¹, 吕刚², 张郭鸿³, 许有俊⁴

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100032;
3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 4. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古包头 014010)

摘要:【目的】针对传统地下储气库过度依赖衬砌和密封系统承载高内压、围岩承载潜力无法充分发挥而限制运行压力与储能效率的现象。【方法】基于弹塑性厚壁圆筒理论与 Mohr-Coulomb 准则,【结果】提出围岩承载的空间效应、强度效应和围压效应三大效应框架,系统分析内压经衬砌向围岩传递、扩散与衰减的力学机制,构建以附加应力衰减率为指标的承载分区判据,并将分区结果用于缺陷检测范围划定、探测精度分级及差异化加固设计。【结论】空间效应决定围岩参与承载的空间范围,强度效应控制围岩承载上限,围压效应影响围岩裂隙闭合、抗剪和抗拉能力及局部失稳风险;依据附加应力衰减规律进行工程判定,可将围岩划分为主承载区、次承载区和原岩应力区,其中附加应力衰减不超过 50% 的区域为主承载区,衰减 50%~90% 的区域为次承载区,衰减超过 90% 的区域为原岩应力区;对于坚硬完整围岩,主承载区和次承载区外边界分别约为隧道半径的 1.4 倍和 3.2 倍。高内压储气库的受力本质并非衬砌结构单独承压,而是内压-结构-围岩-原位应力共同作用下的协同承载过程。所提出的三大效应机理揭示了围岩承载范围、承载水平与稳定状态的内在控制关系,分区判据为运行压力确定、围岩稳定性评价、检测布置及支护加固优化提供了量化依据,可为高内压储气库安全运行与经济设计提供理论支撑。

关键词: 高内压储气库; 空间效应; 厚壁圆筒理论; 强度效应; 围压效应; 工程判定

中图分类号: U25; TU45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202603180004

Study on Bearing Mechanism and Zoning Method of Surrounding Rock in Gas Storage Caverns under High Internal Pressure

LIU Jianyou¹, LYU Gang², ZHANG Guohong³, XU Youjun⁴

(1. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. China Energy Engineering Group Digital Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: [Objective] To address the issue that traditional underground gas storage facilities rely excessively on lining and sealing systems to bear high internal pressure, thereby limiting the operating pressure and energy storage efficiency due to the inability to fully utilize the bearing capacity of the surrounding rock. [Methods] This study was conducted based on the elastoplastic thick-walled cylinder theory and the Mohr-Coulomb criterion. [Results] A framework of three major effects governing surrounding rock bearing capacity was proposed: spatial effect, strength effect, and confining pressure effect. The mechanical mechanism of internal pressure transmission, diffusion, and attenuation into the surrounding rock through the lining was systematically analyzed. A bearing capacity zoning criterion with the attenuation rate of additional stress as an indicator was constructed, and the zoning results were used for defect detection range delineation, detection accuracy classification, and differentiated reinforcement design. [Conclusion] The spatial effect determines the spatial range of surrounding rock involved in load bearing, the strength effect controls the upper limit of the surrounding rock bearing capacity, and the confining pressure effect affects the closure of surrounding rock fissures,

收稿日期: 2026-03-18; 修回日期: 2026-05-08; 网络首发日期:

2026-05-12

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技开发计划重大课题(2023-ZD-10)

作者简介: 刘建友(1982—), 男, 正高级工程师, 2010年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 工学博士, 主要从事隧道及地下工程设计和研究工作, E-mail: 13522182378@163.com。

shear and tensile resistance, and the risk of local instability. Based on the law of additional stress attenuation, engineering assessment can be conducted to divide the surrounding rock into a primary load-bearing zone, a secondary load-bearing zone, and an in-situ stress zone. The area where the additional stress attenuation does not exceed 50% is the primary load-bearing zone, the area where the attenuation is 50%~90% is the secondary load-bearing zone, and the area where the attenuation exceeds 90% is the in-situ stress zone. For hard, intact surrounding rock, the outer boundaries of the primary and secondary load-bearing zones are approximately 1.4 times and 3.2 times the tunnel radius, respectively. The stress nature of a high-internal-pressure gas storage cavern is not solely borne by the lining structure, but rather a collaborative load-bearing process under the combined action of internal pressure, structure, surrounding rock, and in-situ stress. The proposed three major effect mechanisms reveal the intrinsic control relationship between the load-bearing range, load-bearing level, and stability state of the surrounding rock. The zoning criteria provide a quantitative basis for determining operating pressure, evaluating surrounding rock stability, inspection layout, and optimizing support reinforcement, and provide theoretical support for the safe operation and economic design of gas storage caverns under high internal pressure.

Key words: gas storage caverns under high internal pressure; spatial effect; thick-walled cylinder theory; strength effect; confining pressure effect; engineering assessment

引言

近年来,随着新能源规模持续增长,具备大容量、长寿命和调节能力的压缩空气储能技术受到广泛关注。与盐穴储气方式相比,人工开挖高内压储气库在选址条件、空间形态控制及工程重复利用方面更具灵活性。已有研究表明,地下内衬洞库的基本原理、分析方法和工程构型已逐步清晰,而围岩承载能力是制约该类储气库规模化应用的关键因素^[1-2]。MA 等^[3]提出的“极限利用”理论进一步说明,复杂地质条件下储气库的最大储气量、最大注采能力及最大利用效率,本质上均受围岩可利用承载能力控制。在盐穴储气研究中,相关成果已形成较完整的施工与评价技术体系,但微渗漏夹层仍会显著削弱储气库的长期稳定性^[4-5]。对于非盐穴高内压储气工程,WANG 等^[6]指出异质岩体中储气库周围应力重分布特征明显,廖伟等^[7]则通过微震监测表明,高地应力条件下地下洞室围岩稳定性具有显著的空间差异性和动态演化特征。上述研究说明,高内压储气库能否安全运行,关键不在于单纯提高衬砌承载能力,而在于能否正确认识并有效利用围岩的承载作用。

高内压储气库在运行过程中长期经历周期性注采,围岩不仅承受初始地应力与内压耦合作用,还持续受到循环荷载影响,其力学响应具有明显的疲劳损伤和时变演化特征。循环荷载试验表明,岩体结构面在反复受载条件下会发生刚度退化和力学性质劣化^[8];考虑应力-渗流耦合效应的研究进一步揭示循环应力条件下岩体损伤累积与松弛演化规律^[9];针对岩盐的

试验结果表明,变形和损伤会随循环等级与加载历程不断发展^[10]。对于地下储气工程围岩,蒋中明等^[11]采用数值模拟方法研究围岩累积损伤特性,揭示储气库围岩损伤演化过程及其空间分布规律。LIU 等^[12]进一步指出,岩脉等非均质结构会显著改变深部洞室围岩的破坏模式。此外,围岩失稳风险研究表明,单轴抗压强度、最大切向应力等指标能够较好表征地下洞室的破坏倾向^[13],Hoek-Brown 准则及其与莫尔-库伦理论参数间的转换关系则为工程条件下岩体强度评估提供重要基础^[14]。COSTIN 等^[15]的研究还表明,岩石在循环加载下的破坏具有明显时间依赖性,且受应力幅值、频率和循环次数共同控制。现有成果较好展示围岩在循环荷载作用下的损伤演化规律,但对损伤累积背景下围岩承载能力如何形成、如何衰减以及如何进行空间划分,仍缺乏面向高内压储气库的系统认识。

围绕储气库围岩与结构体系的协同作用,现有研究主要集中于内衬洞室稳定性、荷载分担机制及多场耦合损伤行为。YI 等^[16]的理论分析表明,内衬洞室上覆围岩稳定性可以通过结构-围岩共同受力关系进行评价;JIANG 等^[17]通过小尺度试验与数值分析证明内衬结构具备承担高压荷载的能力;LIU 等^[18]进一步指出,裂隙疲劳会持续影响内衬洞室围岩的长期稳定性。在荷载分担研究方面,ZHANG 等^[19]给出内衬储气库结构荷载分担的解析解,XIANG 等^[20]进一步揭示内衬与围岩之间的负荷共享特征及其控制规律。在复杂耦合条件下,WAN 等^[21]表明循环注采会导致围岩与内衬损伤协同演化;ZHAO 等^[22]指出,氢致脆化

与循环加压之间存在与应力重分布相互强化的反馈效应,从而显著削弱体系承载能力;DAMASCENO等^[23]则认为,围岩质量与衬砌厚度是控制临界压力和残余变形的关键因素。在此基础上,GENG等^[24]将岩体破坏模式引入可靠度设计,推动内衬储气库由定性分析向可靠性设计发展。在工程设计层面,已有研究分别从极限储存压力^[25]、运行压力区间^[26]、洞群布局优化^[27]、支护参数调整^[28]及卸荷路径影响^[29]等方面提出相应方法。总体而言,现有研究已较充分地说明内衬-围岩协同承载的基本事实,并为压力确定和结构设计提供理论依据,但研究重点仍主要停留在整体稳定性和均质条件下的荷载分担分析,对于非均质围岩局部承载差异、围岩主动承载范围及其分区控制问题,尚缺乏可直接用于检测与加固设计的定量方法。

基于此,本文围绕高内压储气库围岩主动承载这一核心问题,结合高内压作用下围岩实际受力特征,系统研究围岩承载的空间效应、强度效应与围压效应及其耦合作用机理,并在此基础上提出围岩承载分区方法,进一步将分区结果用于指导围岩缺陷检测范围划定与加固设计参数选取。本文的研究目的不仅在于阐明高内压储气库围岩承载的力学本质,而且在于建立可量化、可应用的承载分区标准,为高内压储气库的安全运行与经济设计提供理论依据。

1 围岩承载机理分析

1.1 核心设计理念

传统地下高内压储气库设计主要将高压空气荷载视为由衬砌结构和密封系统承担,围岩更多被视为受荷对象或稳定边界,从而限制围岩自承能力发挥,也制约储气库运行压力和储能效率的提升。实际上,高压空气荷载并不直接作用于围岩,而是首先作用于气密层和衬砌结构,再经结构-围岩界面以法向压力和剪应力的形式传递至洞周岩体。由此,高内压储气库的受力本质并非“结构单独承压”,而是“内压-结构-围岩-原位应力”共同作用下的协同承载问题。

本文基于高内压储气库围岩主动承载理念进一步提出储气库围岩承载机理的“三大效应”:空间效应表征内压经衬砌向洞周围岩传递并在空间上扩散、衰减的规律;强度效应表征围岩在既定应力路径下能够承受的荷载上限及其破坏条件;围压效应表征初始地应力对围岩承载的双重影响,即较高围压可闭合裂隙、提高抗剪抗拉能力,而较大的偏应力及不利应力方向也可能诱发洞壁应力集中、结构面滑移和局部失稳。三者共同决定高内压储气库围岩的承载范围、承载水平及其稳定状态。

1.2 围岩承载理论解析

在高内压储气库中,弹塑性力学中的厚壁圆筒理论被广泛用于分析储气隧道在内外压力作用下的应力分布^[30-32]。在此基础上,通过考虑高内压储气库隧道围岩在内外压力作用下的力学响应,推导出力平衡公式,分析模型见图1。

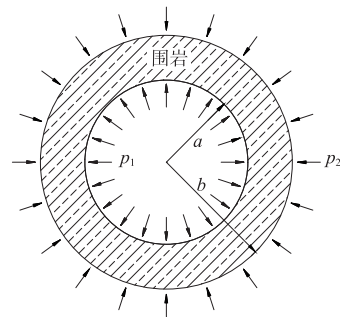


图1 厚壁圆筒模型

Fig. 1 Thick-walled cylinder model

假设储气隧道的半径为 a ,围岩外半径为 b ,空气内压为 p_1 ,围岩外压为 p_2 ,储气隧道围岩在受到高内压作用时,会产生屈服面面积 A_s 上的反作用力,屈服强度为 f_y 。通过内外压力平衡关系,得到以下公式

$$p_1 \cdot 2a = p_2 \cdot 2b + A_s f_y \quad (1)$$

基于本文提出的“三大效应”理念,针对高内压储气隧道,定义: p_2 代表围岩承载的围压效应, b 代表围岩承载的空间效应, f_y 代表围岩承载的强度效应,因此将式(1)转化为“三大效应”机理表达式如下

$$p_2 = \frac{p_1 r_0 - \sigma_n (R - r_0)}{R} \quad (2)$$

式中, r_0 为高内压储气隧道半径; R 为围岩承载时空效应的影响半径; σ_n 为围岩有效强度。

2 围岩承载三大效应

2.1 围岩承载空间效应

2.1.1 空间效应定义

空间效应是指储气库内部的高压空气荷载向围岩洞周空间扩散,形成一个由内向外、逐渐衰减的附加应力场。随着扩散半径的增大,高压空气荷载引起的围岩附加应力逐渐减小。该效应反映的不是地下工程中通常所指的开挖空间效应,而是内压荷载在“气体-结构-围岩”传力中的扩散路径、影响范围及衰减特征。空间效应决定哪些围岩参与承载以及不同部位的荷载分配程度,是建立围岩承载分区的基础。见图2。

2.1.2 力学原理解析

高压空气荷载并不直接施加于围岩,而是先作用于气密层和衬砌结构,再通过界面接触与变形协调传

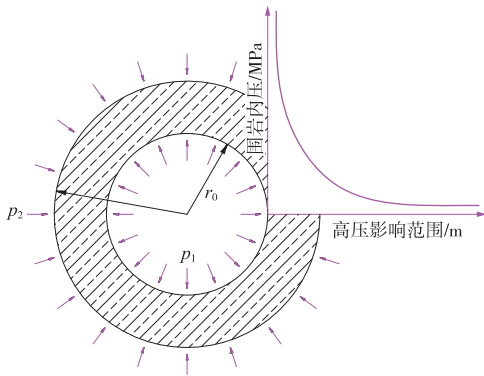


图 2 空间效应

Fig. 2 Spatial effect

递至围岩。因此,围岩所承受的是由结构传递并经空间扩散后的附加应力,而非未经转换的原始内压。根据式(2)关系式,取围岩有效强度为零,可得单纯空间效应的表达式如下

$$p_2 = \frac{p_1 r_0 - \sigma_n (R - r_0)}{R} = \frac{p_1 r_0}{R} \quad (3)$$

式(3)中 p_2 与 R 成反比关系,可知:随着高压影响范围的增大,围岩承载的空间效应逐渐衰弱,离洞壁越远,单位面积岩体所分担的附加内力越小。内压以法向面力的形式施加在洞壁后,围岩作为三维连续体必须同时满足静力平衡与变形相容,因而应力扰动不会停留在洞壁附近的“薄层”,而是沿径向、轴向及周向在更大体积内重新分配。

通常,围岩初始处于三向应力平衡状态,隧道开挖释放应力后靠近洞壁处岩体进入塑性状态,形成一定范围的塑性区。当储气库内部压力扰动施加时,围岩中的应力需满足平衡条件和边界条件的协调,从而保证力学平衡。

在塑性区内,岩体应力状态达到莫尔-库仑屈服准则,导致塑性剪切破坏发生。此时塑性区内的应力不再线性增长,而是受强度准则约束发生重分布:围岩局部应力达到屈服值,超出的荷载被传递到更外侧的弹性区。这种应力重分布机制意味着塑性区内原先高度集中的应力被释放并转移至周围弹性区。为满足变形协调条件,塑性区岩体将产生不可恢复的塑性应变,使周边弹性区的变形与之兼容,确保岩体连续介质的协调变形。

塑性应变的发展通常从洞壁附近开始,初始出现屈服的部位发生较大永久变形,进而随着内压和地应力的相互作用,塑性区向更远处扩展。随着塑性区扩大,在塑性区半径处,岩体应力逐渐接近强度极限,达到新平衡。理论分析表明,弹塑性分析需综合考虑上述力学平衡、屈服条件和变形协调:通过联立弹性解和

塑性解并满足应力和位移连续,可求得塑性区半径及应力分布。例如:对于圆形隧洞,满足莫尔-库仑准则的弹塑性解显示塑性区内径向与环向应力遵循幂函数分布,而弹性区内应力满足 Kirsch 解形式,并在界面应力相等。这一弹塑性解的结果揭示出空间效应的三维扩散规律:内部压力引起的附加应力自洞壁向外递减传播,近洞壁塑性区内应力水平受限并发生重新分配,远处弹性区则承担剩余的荷载,使整体应力场重新达到平衡。

对节理裂隙发育岩体,该传递过程还受结构面法向闭合、剪切滑移与嵌入咬合等微观机制的调控:洞周近场先形成高梯度应力区,后通过骨架受压与结构面接触刚度的共同作用向深部扩散,形成由内向外逐渐衰减的附加应力场。因扩散半径增加带来的受力体积增大,单位体积所承担的附加应力随距离快速降低,从而表现出典型的“影响域”特征。

工程实际中围岩往往存在非线性与不连续性:洞周可能出现一定厚度的屈服或损伤带,但外侧弹性围岩可提供约束,促使应力在更大范围内重分布,从而维持整体稳定。由此可见,空间效应并非“荷载消失”,而是通过三维扩散与重分配将峰值应力从洞壁近区转移到更大的围岩体中,实现更合理的受力路径分布。

2.1.3 工程意义

空间效应的意义在于,将高内压储气隧道的承载机制从“洞壁单点控制”转化为“围岩体共同承担”,为高压运行条件下的稳定性提供关键保证。

在该机制下,内衬主要承担密封与界面传力功能,围岩则承担主要承压作用,设计控制应更加关注洞周近场影响域内的强度、变形与渗流耦合行为,而非仅以洞壁局部应力进行极限判定。

同时,空间效应对支护结构的合理设计有重要指导意义。首先,高内压荷载在洞壁处产生最大的径向应力和环向应力,衬砌和密封层需要具有较高的抗压和抗拉能力。随着应力向外衰减,围岩逐渐承担起更多荷载,支护体系可以由强制约束过渡为利用围岩自承能力。设计中应通过数值分析或基于拉梅公式的解析法确定塑性区半径和应力衰减范围,以优化支护厚度、钢筋配置及锚杆长度,使支护结构在靠近洞壁处足以抵抗高内压,而在外部区域允许围岩承担大部分荷载。

其次,空间效应导致围岩内应力在半径方向上变化明显,支护结构应配置环向与纵向的约束设施,以控制位移并防止衬砌开裂。此外,衬砌施工和防渗措施宜集中在洞壁周边几倍洞径范围内,外部围岩因附加应力较小,可减少加固范围,从而提高经济性和施工效率。

2.2 围岩承载强度效应

2.2.1 强度效应定义

强度效应是指围岩的力学强度决定其能够安全承担多大附加应力的能力,围岩强度越高,其能够承担的高压空气荷载越大。见图3。

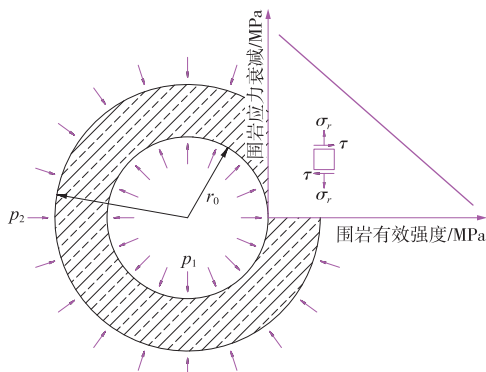


图3 强度效应

Fig. 3 Strength effect

2.2.2 力学原理解析

根据式(2)关系式进行变换,可得围岩承载强度效应表达式

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_0 - p_2 R}{R - r_0} \quad (4)$$

式(4)中 σ_r 与 p_2 成一次递减线性关系,可知:随着围岩有效强度增大,围岩应力呈线性下降趋势。当围岩有效强度接近零时,围岩应力接近最大值,而随着有效强度的增大,围岩应力逐渐减小,且降幅明显。该规律表明,高强度岩体包络线范围更广,能容纳的应力水平更高,因此允许施加更大内压。

此外,高压地下储气库运行时,围岩同时承受内部气体压力和原位地应力共同作用,围岩中呈现特有的径向和环向应力分布。靠近储气孔洞壁面的围岩,径向应力等于内压,而环向应力则由远场地应力与内压差异决定;当内压较低时,洞壁环向应力表现为压应力集中;随着内压增大,环向应力逐渐降低,甚至可能由压转拉。当环向拉应力超过岩石抗拉强度时,洞壁将发生拉裂破坏。另一方面,在纯弹性条件下,围岩应力服从 Kirsch 解等弹性解析分布规律:径向应力自洞壁向外递减,而环向应力在孔壁处达到极值。这种应力重分布在洞室附近形成明显的径向压应力与环向拉应力差值,当应力水平不足以引发屈服时,围岩保持弹性变形。

当内压与地应力叠加作用使围岩应力状态达到岩石强度极限,围岩将由弹性进入弹塑性阶段,塑性区自洞壁向外形成。判断围岩开始屈服可依据 Mohr-Coulomb 屈服准则

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中, τ 为剪应力; σ 为法向正应力。

当洞壁环向应力在径向约束下达到岩石抗剪强度包络线时,围岩开始进入塑性屈服状态。这一屈服判断综合考虑岩石抗剪强度参数和抗拉强度,对不同应力组合给出围岩由弹性转入塑性的临界条件。

在围岩塑性区内部,岩体已经屈服,其变形行为由弹性阶段的可恢复形变转变为不可恢复的塑性流动或局部破裂。此过程中主要包含两种力学破坏机制:一是剪切滑移,二是拉伸破裂。

(1) 剪切滑移机制:当储气库洞周围岩满足 Mohr-Coulomb 屈服准则后,意味着岩体某些弱面上的剪应力达到抗剪强度极限,发生沿该面剪切滑移的破坏形式^[33]。围岩在塑性区内会形成与最大剪应变方向一致的滑移带,其取向大致与最大主应力方向成约 $45^\circ + \varphi/2$ 角,这是摩尔应力圆破坏包络线决定的破裂面倾角。

因此,围绕储气库洞室,塑性区岩体可能出现环形分布的剪切带或滑移面。岩石沿这些潜在破裂面产生滑移和剪胀,微裂隙在剪切作用下不断发育,最终形成剪切破坏带。特别在深埋高地应力环境下,洞壁附近常出现剪切破坏区,表现为围岩块体沿剪切带滑移,造成洞室周围一定厚度岩体强度降低。随着剪切滑移累计,塑性区岩体刚度劣化,进一步促进应力向外传递并可能诱发更深处岩体依次进入屈服。

(2) 拉伸破裂机制:当内压较高导致洞壁附近环向应力由压转为拉,且拉应力超过岩石抗拉强度时,围岩会出现张裂破坏。这种破坏形式常表现为岩石在孔壁产生朝向洞内的径向裂缝或剥落。由于大多数脆性岩石抗拉强度远低于抗压强度,环向拉应力一旦达到岩石劈裂强度,岩体将沿垂直于最大拉应力方向开裂。

具体而言,洞壁拉应力沿环向分布均匀时,可能形成沿洞壁环向开裂、径向延伸的裂纹带,即岩片由平行于最大主压应力的方向从围岩主体剥落。在无支护条件下的深埋洞室,初始围岩破坏往往即为指向洞内的环向拉伸破裂,形成贴近洞壁的第一个破裂区。该拉裂区一经形成,等效于洞室半径短时间内突然增大一次,致使应力向深部重新分布并与剪切塑性区并存。

因此,高内压环境下拉伸破裂是塑性区演化的重要一环:拉裂导致孔壁岩体强度显著降低并出现裂隙通道,若不加控制可能向深部和上覆地层扩展,危及储气密闭性。需要强调的是,实际围岩破坏常是剪切滑移与拉伸破裂的综合作用。例如,孔壁附近可能先发生拉裂剥落,暴露出的新岩面随即在更高应力下发生剪切屈服;或者剪切带的发展诱导局部应力状态转为张应力,引发张裂。

总之,剪切滑移和拉伸破裂两种机制交互影响,塑性区内部的破坏模式往往表现为以剪切破坏为主、拉伸破坏为辅的混合型破坏。应分别考虑两者:前者关系到围岩承载力退化和变形协调,后者关系到储气库密封性和稳定性的突然失效。通过合理的支护和运行控制,可以抑制剪切滑移累积和张裂扩展,从而提高围岩塑性区的稳定性。

2.2.3 工程意义

储气库的选址和设计中,强度效应是确保其稳定性与安全性的基础。根据岩石力学理论,围岩的强度参数直接决定储气库可承受的内压水平和塑性区范围。强度高、完整性好的岩层能够显著减小塑性区半径,提高围岩对内压的承载能力;反之,强度弱或节理裂隙发育的围岩在高内压下易过早屈服,形成大范围破碎带。因此,在选址和围岩岩性选型阶段,应优先考虑强度储备大的致密岩层作为库室围岩。如不可避免遇到较弱围岩,则需通过注浆加固、预应力锚杆等手段提升等效强度,使围岩达到弹性设计的要求。围岩强度效应还意味着,在围岩强度难以精确量化时,应采取保守设计,限制内压不超过围岩预计强度的安全裕度,避免由于强度低估引发结构失稳。

从厚壁圆筒理论看,内压作用下围岩的径向应力为压缩,环向应力为拉伸,两者在洞壁达到极值,其中环向拉应力可能远大于内压本身^[34]。若洞壁环向应力超过岩体抗拉强度,围岩会沿洞壁产生张裂,削弱支护层与围岩的协同承载能力;此时应根据围岩强度和塑性区计算结果来确定衬砌的厚度和强度等级,并合理控制运行内压,使围岩处于压应力状态。强度效应还提示应重视衬砌的抗拉抗裂性能,可通过配置钢筋网或钢衬等方式增强衬砌韧性,防止环向拉应力引起的衬砌开裂泄漏。

此外,工程设计中应控制孔径比(洞室跨度与埋深的比值)在合理范围。一方面,确保足够的岩层覆盖厚度:覆盖层越厚,围岩约束越强,塑性区越不易贯通地表,从而提高结构安全性。另一方面,洞室跨度不可过分增大,否则即使围岩强度高,也可能因为跨度效应导致顶板出现塑性区。综上,围岩强度效应的分析为支护结构的尺寸、材料和布置提供定量依据,支护设计应综合考虑拉剪破坏准则以及内压与地应力的耦合作用,确保储气库长期稳定运行。

2.3 围岩承载围压效应

2.3.1 围压效应定义

围压效应是指储气库围岩所处初始地应力场对承载行为的综合影响。其作用并非单纯表现为“应力越大越有利”,而是具有明显双重性:当最小主应力较高

且应力场分布相对均匀时,围压可通过提高围压水平、闭合裂隙和抑制剪胀来增强围岩承载能力;当主应力差较大、方向组合不利或开挖卸荷后发生显著应力重分布时,围压又可能成为诱发局部拉裂、剪切滑移和变形集中的重要因素。见图 4。

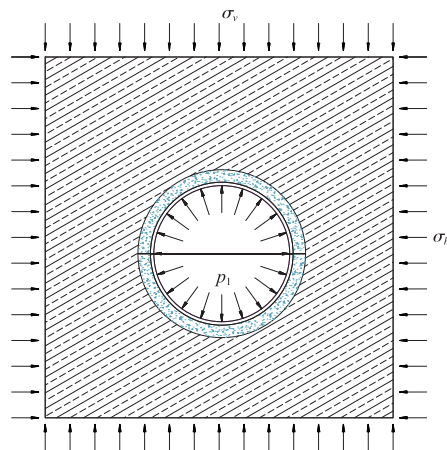


图 4 围压效应

Fig. 4 Confining pressure effect

2.3.2 力学原理解析

在水平地应力 σ_h 和竖直地应力 σ_v 作用下,初始地应力的围压效应在储气库洞壁形成的环向压应力 σ_{rp} 为

$$\sigma_{rp} = \sigma_h + \sigma_v - 2(\sigma_h - \sigma_v) \cos(2\theta) \quad (6)$$

当水平地应力 σ_h 大于竖直地应力 σ_v 时,隧道两侧洞壁的环向压应力最小,在高压空气荷载作用下最先开裂,隧道两侧洞壁环向压应力 σ_{rmin} 为

$$\sigma_{rmin} = 3\sigma_h - \sigma_v \quad (7)$$

式(7)即为高内压储气库围岩承载机理的围压效应。当储气库高压空气荷载 p_i 超过地应力围压效应提供的环向压应力,储气库洞壁开始出现拉应力,当拉应力超过洞壁围岩的抗拉强度时,洞壁开始出现开裂,如果洞壁围岩不允许出现开裂,此时储气库允许的最大空气荷载 p_{imax} 为

$$p_{imax} = 3\sigma_h - \sigma_v + \sigma_{tc} \quad (8)$$

式(8)即为高内压储气库围岩承载机理的围压效应和强度效应的叠加。 σ_{tc} 为围岩的抗拉强度,为储气库围岩的强度效应。

此外,大量三轴试验与本构和强度准则研究均表明^[35-38],岩体的峰值强度与变形能力随围压升高显著提高,Hoek-Brown 等准则正是以“围压增强强度”为基本出发点来描述岩体强度的非线性增长规律。在微观层面,初始地应力促使微裂隙与节理面逐步闭合,颗粒间接触应力与摩擦阻力得以充分发挥,裂隙张开与扩展受到抑制,剪胀倾向减弱,围岩由“结构松散、可

压缩”向“致密、抗剪-抗拉更稳定”的状态演化。这种由地应力长期“预压密实约束裂隙”的效应,是高内压储气隧道能够依赖围岩承担高压而不发生贯通破坏的力学基础。

同时,围压的不利效应亦不可忽视。地下洞室失稳并非均由围压不足引起,在较高围压条件下,偏应力集中及应力方向失配往往是诱发围岩破坏的重要因素。当地应力各向异性显著时,最大与最小主应力差异将导致洞周应力分布明显不均,局部区域易出现切向应力集中,并率先进入屈服状态。若围岩中有与主应力组合关系不利的节理裂隙、层理或软弱夹层,围压不仅难以发挥增稳作用,反而可能通过沿结构面的剪应力分量促使其发生错动与滑移,使围岩破坏由连续介质控制下的整体屈服转变为受不连续结构面控制的局部失稳。

此外,开挖卸荷会削弱洞壁近区的径向约束,导致围压重新分配并形成局部高偏应力区;当运行内压进一步叠加时,洞周应力路径可能跨越抗拉破坏或剪切屈服边界,从而引发拉裂剥落、片帮及剪切扩容等失稳现象。因此,围压并非静态背景荷载,而是与开挖扰动、支护条件及运行内压共同控制围岩应力演化与破坏模式的关键因素。

从应力来源看,围压由自重应力和构造应力共同组成。岩体在自重作用下除垂直压缩,还会因泊松效应产生横向膨胀。当周围介质限制横向变形时,岩体内部形成水平应力。根据经典弹性理论,在假设岩石为各向同性、弹性体并且“土层在沉积过程中横向无应变”条件下,水平应力 σ_h 与垂直应力 σ_v 满足^[39]。

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v \quad (9)$$

式中, K_0 为侧压力系数,可由泊松比 μ 表示为 $K_0 = \mu/(1+\mu)$ 。深部岩体中实际水平应力可能高于该预测值,这部分差异由构造应力引起。

相比之下,构造应力的影响更为复杂。构造应力来自板块运动、区域活动或历史构造残余,应力方向多为水平,其具有空间不均一、方向性强和动态演化的特点,不同构造单元的应力状态差异显著。初始地应力可以视为自重应力 σ_0 与构造应力 σ_t 的叠加^[40]。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_t \quad (10)$$

在大多数工程区域中,自重应力易于计算,而构造应力通过反演分析确定,表现为区域性、方向性显著的应力场,构造运动常在地壳中引起水平压缩或伸展,使最大主应力可能呈水平分布,表现为水平应力明显大于垂直自重应力。表示水平应力两个主值分别为最大水平主应力 σ_{Hmax} 和最小水平主应力 σ_{Hmin} 。构造应力可分解为平均部分 $(\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin})/2$ 和偏差部分

$(\sigma_{Hmax} - \sigma_{Hmin})/2$ 。差值越大,围岩受不均匀三轴压缩越强,易诱发断裂。

因此,从力学本质上看,围压效应可以概括为“围压增稳-偏应力致损”的统一体。最小主应力决定围岩能否维持压缩约束和裂隙闭合,是围岩承载潜力得以发挥的基础;主应力差及其方向性则决定洞周应力是否均匀、结构面是否稳定以及局部失稳是否容易发生。对高内压储气库而言,评价围压效应不能仅考察地应力大小,而应综合分析最小主应力水平、主应力差、主应力方向与洞室轴线关系,以及结构面产状与应力场之间的匹配程度。只有当围压提供的围压约束足以抵消内压诱发的张裂趋势,同时偏应力水平又未达到触发局部剪切破坏的程度时,围岩的主动承载作用才能得到稳定发挥。

2.3.3 工程意义

围压效应的工程意义在于,它直接决定高内压储气库运行压力上限的形成机制,也决定围岩承载能否由理论认识转化为可利用的工程能力。对于选址与埋深确定而言,原位应力不是单纯越大越好,而应追求“具有足够最小主应力约束、同时避免过高偏应力集中”的合理应力环境。

对于洞室布置而言,应尽量协调洞轴线方向与区域主应力方向关系,避开不利结构面组合,降低两帮和拱肩等敏感部位的应力集中程度;对于运行控制而言,允许内压的确定不能仅以衬砌承压能力为依据,还应同时满足洞周不起裂、不发生控制性剪切滑移及不形成贯通渗流通道等要求。换言之,围压效应既是高内压储气库赖以实现围岩承载的前提条件,也是决定其稳定边界和失稳模式的关键约束,必须作为围岩承载分析、分区判定和加固设计中的核心参数加以综合评价。

在此基础上,空间效应所形成的附加应力衰减场与强度效应所表征的材料极限共同参与,但围压效应提供的近场约束与围压增益决定了体系能否在高内压下保持“不开裂、不断渗、可循环”的工程目标,是高内压储气隧道从概念走向可验证设计的关键支撑。

3 围岩承载分区方法

3.1 分区标准

本文以附加应力相对于洞壁最大附加应力的归一化比值作为分区指标。设洞周附加应力为 $\sigma_{a,(r)}$,洞壁处最大附加应力为 $\sigma_{a,max}$,则定义附加应力系数 $\eta = \sigma_{a,(r)} / \sigma_{a,max}$ 。

围岩承载分区并非依据岩体是否达到破坏状态进行划分,而是依据不同区域对内压附加荷载的贡献程

度进行工程判定:当 $\eta \geq 0.5$ 时,该区域仍承担洞壁峰值附加应力的一半以上,是内压向围岩传递的核心承载区,围岩缺陷对承载能力和密封稳定性最为敏感,故定义为主承载区;当 $0.1 \leq \eta < 0.5$ 时,附加应力虽已明显衰减,但仍对近场受力重分布和主承载区外部约束具有实质影响,故定义为次承载区;当 $\eta < 0.1$ 时,附加应力相对于围压水平及工程参数离散性已可近似忽略,岩体力学状态可视为逐渐恢复至原岩应力场,故定义为原岩应力区。由此,以应力衰减率表示时,主承载区对应附加应力衰减不超过 50%,次承载区对应衰减 50%~90%,原岩应力区对应衰减超过 90%。分区标准如下。

主承载区:指归一化附加应力系数 $\eta < 0.50$ 的区域,即附加应力衰减率 $\geq 50\%$ 的区域。该区为平衡内压荷载的核心范围,对围岩完整性、变形控制和密封稳定性最为敏感。

次承载区:指 $0.1 \leq \eta < 0.5$ 的区域,即附加应力衰减率为 50%~90% 的区域。该区主要起荷载扩散、外部约束和承载过渡作用。

原岩应力区:指 $\eta < 0.1$ 的区域,即附加应力衰减率大于 90% 的区域。该区受内压扰动较弱,工程上可近似视为围压控制区。

对于坚硬完整围岩,在高压空气荷载作用围岩处于弹性变形范围内,承载分区时附加应力沿径向衰减计算可按式计算

$$\eta = (r_0/r)^2 \quad (11)$$

因此,坚硬完整围岩主承载区的范围 r 为 $\sqrt{2}r_0$,约为隧道半径的 1.4 倍;次承载区的范围 r 为 $\sqrt{10}r_0$,约为隧道半径的 3.2 倍。

对于软弱破碎围岩,在高压空气荷载作用下洞周一定范围内将出现塑性区,承载分区时附加应力可按式计算

$$\eta = \frac{(p_1 + c \cdot \text{ctg}\varphi) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - c \cdot \text{ctg}\varphi - p_2}{\sigma_{a,\max}} \quad (12)$$

基于上述分区标准,坚硬完整围岩承载分区示意如图 5 所示。

3.2 承载分区工程应用

3.2.1 围岩承载分区的工程意义

围岩承载分区在于将高内压储气隧道“开挖扰动-衬砌约束-运行期内压循环加载”共同作用下的近场响应,用可量化的空间范围表达出来。依据围岩-支护相互作用理论,围岩变形释放与支护反力并非可分离的外荷载与内力问题,而是共同决定近场应力重

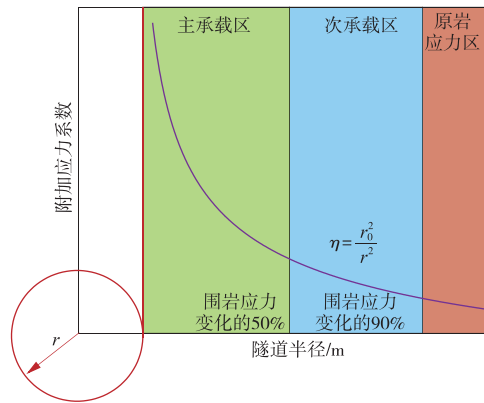


图 5 围岩承载分区

Fig. 5 Load-bearing zoning of surrounding rock

分布与变形发展;收敛-约束法对这一耦合过程给出清晰的力学解释与工程化描述。另一方面,开挖导致的损伤带(EDZ)会引起岩体力学与水力学性质的不可逆劣化,而内压加载可能进一步改变近场应力路径与裂隙开闭状态,影响承载与密封性能的长期保持。

3.2.2 缺陷检测范围与精度分级

主承载区处于衬砌-围岩荷载传递与损伤演化的敏感位置,既控制围岩承载贡献,也决定气密性风险的主要来源;因此探查应采取高精度、高分辨率的全覆盖策略,重点识别细尺度结构面、软弱夹层、张裂隙及其充填状态,并获取其几何参数与工程分类指标,以支撑后续强度-渗透性一体化评价。该策略与 EDZ“性质改变显著、梯度变化强”的特征相一致^[41]。

次承载区作为主承载区向远场传递内压作用与限制近场变形的关键过渡带,其探查宜以中等精度的综合物探与验证性钻探相结合为主,重点查明对整体稳定性具有控制作用的中大型断层、破碎带及连续性不良区,并对其空间展布与贯通性进行判定。

原岩应力区以近似弹性响应为主,工程控制重点转向区域构造格局、地应力场与地下水地质条件等边界因素的掌握,可采用区域性地质勘察与必要的原位测试,为埋深、洞群布置及运行压力上限等参数论证提供依据;对于浅埋或覆盖层条件复杂的场址,还需关注内压诱发的上覆岩体上拱失稳机制,对安全埋深与顶拱稳定进行专门校核^[42]。

3.2.3 差异加固与密封措施

主承载区应作为加固与密封的重点区,目标不是“局部补强”,而是构建能够显著提升整体性、承载刚度并降低等效渗透性的近场加固圈,使内压作用下的应变水平与损伤扩展受到有效约束。针对该区识别出的缺陷,可优先采用深孔高压注浆或帷幕注浆等主动措施,以实现裂隙充填、软弱夹层改性与渗流通道切

断;必要时配置长预应力锚索或跨结构面锚固体体系,增强围岩侧向约束与抗剪承载,配合更高等级、更密集的衬砌与支护参数,形成“围岩加固体-衬砌结构”协同受力格局^[43-44]。

次承载区的加固目标侧重于维持连续性与完整性,避免控制性不连续面在内压循环中发生渐进贯通与强度退化;工程上可对大型缺陷实施定向注浆封堵或局部帷幕处理,并以系统锚杆等相对被动的支护手段稳定块体与限制变形,从而为主承载区提供稳定的外部约束条件。

对于主、次承载区内经检测评估为危岩或具有贯通潜力的断层或破碎带,应开展专项阻裂与强化;在力学上通过跨断层锚索、加腋、补强带等抑制剪滑与张开;在水力上通过分区分级注浆与封闭措施降低贯通渗透风险,实现承载与密封的双重控制。该类“控制性结构面-内压耦合”问题已被高内压衬砌洞库研究反复指出,是运行安全与耐久性的关键约束条件之一。

4 结论与建议

本文针对传统地下储气库设计的不足,提出一种新的围岩承载设计理念,并对围岩承载进行分区,并给出工程应用方法。主要结论如下。

(1)高内压储气库的受力本质并非衬砌结构单独承压,而是内压经衬砌传递后,由围岩与支护体系共同参与的协同承载过程;围岩承载主要受空间效应、强度效应和围压效应共同控制,其中空间效应决定承载范围,强度效应决定承载上限,围压效应影响围岩稳定性及承载潜力的发挥。

(2)基于附加应力在围岩中的衰减规律,可将围岩承载范围划分为主承载区、次承载区和原岩应力区,其中附加应力衰减不超过50%的区域为主承载区,衰减50%~90%的区域为次承载区,衰减超过90%的区域视为原岩应力区;对于坚硬完整围岩,主承载区和次承载区外边界分别约为隧道半径的1.4倍和3.2倍。

(3)围岩承载分区可为储气库检测与加固设计提供直接依据,其中主承载区应作为重点检测和重点加固区域,次承载区应重点控制结构面连续性和外围约束条件,原岩应力区则主要关注区域地应力及水文地质边界影响。

(4)所提出的围岩承载分析思路和分区判据可为高内压储气库运行压力确定、围岩稳定性评价及支护优化设计提供理论参考,但在复杂地质条件下仍需结合数值分析、模型试验和工程监测进一步修正与验证。

在选址阶段重点考虑围岩强度、完整性、围压条件

及结构面发育特征,在运行压力确定中综合分析围岩承载能力与洞周稳定性;在勘察与检测阶段宜依据承载分区实施差异化布置,对主承载区开展高精度重点探测,对次承载区重点识别控制性结构面和软弱带,对原岩应力区重点查明区域地应力和水文地质边界;在支护与加固阶段宜实行分区控制,主承载区以提高整体性、承载能力和抗渗能力为主,次承载区以维持外围约束和控制结构面贯通为主;对于复杂地质条件下的工程应用,尚需结合数值模拟、模型试验和现场监测进一步修正承载边界及分区参数,以提高方法的适用性和工程可靠性。

利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献/Authors' Contributions:

刘建友参与了概念定义和研究设计,吕刚参与了资料收集和研究设计,张郭鸿参与了初稿撰写,许有俊参与了论文修改。

参考文献:

- [1] 孙冠华,王娇,于显杨,等.压缩空气储能电站地下内衬砌库基本原理与分析方法研究进展[J].岩土力学,2025,46(1):1-25.
SUN Guanhua, WANG Jiao, YU Xianyang, et al. Research Progress on Basic Principles and Analysis Methods of Lined Rock Caverns for Compressed Air Energy Storage Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 1-25.
- [2] 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.
YANG Xuewen, REN Hao, LIAO Zeqiu, 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.
- [3] MA X H, ZHENG D W, DING G S, et al. "Extreme Utilization" Theory and Practice in Gas Storages with Complex Geological Conditions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 419-432.
- [4] WANYAN Q, DING G S, ZHAO Y, et al. Key Technologies for Salt-cavern Underground Gas Storage Construction and Evaluation and Their Application[J]. Natural Gas Industry B, 2018, 5(6): 623-630.
- [5] YIN H W, YANG C H, MA H L, et al. Stability Evaluation of Underground Gas Storage Salt Caverns with Micro-leakage Interlayer in Bedded Rock Salt of Jintan, China[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(3): 549-563.
- [6] WANG J K, LIU J, WANG Z C, et al. Numerical Simulation of Stress Characteristics of High-pressure Gas Storage within Heterogeneous Rock Formations[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2025, 44(8): 912-920.
- [7] 廖伟,张海龙.高地应力条件下地下洞室微震监测及围岩稳定性评价[J].水电站设计,2023,39(2):12-16,38.
LIAO Wei, ZHANG Hailong. Microseismic Monitoring of Underground Cavern and Stability Evaluation of Surrounding Rock under

- High Ground Stress [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2023, 39 (2): 12-16, 38.
- [8] 宋亮, 方晶, 邓星, 等. 循环荷载作用下岩体结构面的力学特性 [J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43 (6): 103-107, 116.
SONG Liang, FANG Jing, DENG Xing, et al. Mechanical Properties of Rock Mass Structural Plane under Cyclic Loading [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2024, 43 (6): 103-107, 116.
- [9] BAI Z Y, SHI T Y, WANG J, et al. Damage Characteristics and Model of Rock Triaxial Cyclic Stress and Relaxation under Stress-seepage Coupling [J]. Heliyon, 2025, 11 (2): 41568.
- [10] ZHAO K, MA H L, LI Y P, et al. Deformation and Damage Evolution of Rock Salt under Multilevel Cyclic Loading with Constant Stress Intervals [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 260: 108191.
- [11] 蒋中明, 秦双专, 唐栋. 压气储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (2): 230-238.
JIANG Zhongming, QIN Shuangzhuan, TANG Dong. Numerical Study on Accumulative Damage Characteristics of Underground Rock Caverns for Compressed Air Energy Storage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (2): 230-238.
- [12] LIU X Y, XU D P, JIANG Q, et al. Failure Mechanisms of Granite in Deep Underground Caverns Influenced by Rock Veins: Insights from DEM-FDM Cross-scale Coupling and Moment Tensor Analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 186: 107412.
- [13] WANG X, SHI K B, SHI Q, et al. Prediction of Rock Burst Risk in Underground Openings Based on Intuitionistic Fuzzy Set [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 21028.
- [14] HOEK E, BROWN E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (8): 1165-1186.
- [15] COSTIN L S, HOLCOMB D J. Time-dependent Failure of Rock under Cyclic Loading [J]. Tectonophysics, 1981, 79 (3/4): 279-296.
- [16] YI Q, SUN G H, YAO Y F, et al. Stability Analysis of Overlying Rock Mass of Lined Rock Caverns for Compressed Air Energy Storage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (12): 3523-3532.
- [17] JIANG Z M, 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 (6): 2671-2683.
- [18] LIU S H, ZHANG D X. Study on Long-term Stability of Lined Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage [J]. Energies, 2024, 17 (23): 5908.
- [19] ZHANG G H, XIANG Y, WANG X J, et al. Analytical Solution for Load Sharing in the Structure of an Underground Lined Rock Cavern for Compressed air Energy Storage and Analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (S2): 3633-3650.
- [20] XIANG Y, ZHANG G H, WANG X J, et al. Load-sharing Characteristics of Lined Rock Caverns of Compressed Air Energy Storage System: a Theoretical Analysis [J]. Applied Energy, 2025, 388: 125626.
- [21] WAN F, JIANG Z M, TIAN X, et al. A Thermo-hydro-mechanical Damage Model for Lined Rock Cavern for Compressed Air Energy Storage [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 78: 110186.
- [22] ZHAO C X, YU H Y, ZHANG Z X, et al. Modelling Lined Rock Caverns Subject to Hydrogen Embrittlement and Cyclic Pressurisation in Fractured Rock Masses [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 152: 150027.
- [23] 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.
- [24] GENG X, SUN G H, YU X Y, et al. Reliability Design of Compressed Air Energy Storage in Lined Rock Caverns: a Study Based on Rock Mass Failure Modes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 165: 106840.
- [25] 王者超, 贾文杰, 冯夏庭, 等. 隧洞式内衬储气库极限储存压力解析解 [J]. 力学学报, 2023, 55 (3): 710-718.
WANG Zhechao, JIA Wenjie, FENG Xiating, et al. Analytical Solution of Limit Storage Pressures for Tunnel Type Lined Gas Storage Caverns [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55 (3): 710-718.
- [26] 张国华, 王薪锦, 柯洪, 等. 压气储能地下内衬储气库运行压力区间确定方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (12): 2874-2891.
ZHANG Guohua, WANG Xinjin, KE Hong, et al. A Method to Determine the Operating Pressure Range of Lined Underground Gas Storage Facility in a Compressed Air Energy Storage System [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (12): 2874-2891.
- [27] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 等. 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.
WANG Qikuan, ZHANG Bin, WANG Hanxun, et al. Optimization and Stability Analysis of Layout Parameters of Lined high-pressure Gas Storage Caverns [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28 (5): 1123-1131.
- [28] 刘宁, 陈平志, 陈涛. 深埋隧洞围岩破坏机制分析与支护优化 [J]. 科技通报, 2020, 36 (9): 20-25.
LIU Ning, CHEN Pingzhi, CHEN Tao. Failure Mechanism Analysis and Support Optimization of Surrounding Rock in Deep Buried Tunnel [J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36 (9): 20-25.
- [29] ZHAO R, TAO M, ZHAO H T, et al. Theoretical Study on Dynamic Stress Redistribution around Circular Tunnel with Different Unloading Paths [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 163: 105737.
- [30] 李智慧, 李玉龙, 汤安民. 受内压厚壁圆筒的塑性变形条件与脆断分析 [J]. 应用力学学报, 2020, 37 (4): 1515-1520.
LI Zhihui, LI Yulong, TANG Anmin. Investigation of Plastic Deformation and Brittle Fracture in a Thick-walled Cylinder Subjected to Internal Pressure [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37 (4): 1515-1520.
- [31] 刘小宁, 刘岑, 刘兵, 等. 单层厚壁内压圆筒设计公式改进效果的可靠性研究 [J]. 机械强度, 2016, 38 (2): 276-283.
LIU Xiaoning, LIU Cen, LIU Bing, et al. Improvement Effect Reliability Research on Single Layer thick-walled Internal Pressure Cylinder Design Formulas [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38 (2): 276-283.
- [32] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 145-150.

- WU Qian, LI Yufei, LIN Hao, et al. Research on Resilience of Safety System of Reinforced Concrete Old Industrial Building Reconstruction[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(8): 2615-2623.
- [18] 刘辉,程振超,王丹. 城市消防韧性评价指标体系研究[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 25-30.
- LIU Hui, CHENG Zhenchao, WANG Dan. Study on Evaluation Index System of Urban Fire Resilience[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(2): 25-30.
- [19] 汤青慧,刘硕,刘文杰. 基于改进变权物元可拓模型的地铁车站火灾安全韧性评价[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1346-1355.
- TANG Qinghui, LIU Shuo, LIU Wenjie. Evaluation of Fire Safety Resilience of Metro Station Based on Improved Matter-element Extension Model with Variable Weight[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1346-1355.
- [20] 莫俊文,滕仓国,李甲,等. 基于熵权—二维云模型的高铁建设工程系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 26-33.
- MO Junwen, TENG Cangguo, LI Jia, et al. Resilience Evaluation of High-speed Railway Construction Engineering System Based on Entropy Weight-two Dimensional Cloud Model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(1): 26-33.
- [21] 刘敬严,郑文文,赵莉琴,等. 地铁工程施工三元空间安全韧性评价[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(5): 111-117.
- LIU Jingyan, ZHENG Wenwen, ZHAO Liqin, et al. Ternary Space Safety Resilience Evaluation of Subway Engineering Construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(5): 111-117.
- [22] 王连成. 工程—工程系统—工程系统论与工程科学体系[J]. 中国工程科学, 2001, 3(6): 15-18.
- WANG Liancheng. Engineering, Engineering System, Engineering System Theory, and System of Engineering Science[J]. Engineering Science, 2001, 3(6): 15-18.
- [23] 美国项目管理协会. 项目组合、项目集和项目风险管理标准[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023: 27-39.
- [24] 胡文发,常永霞,何新华. 建筑工程项目工期的影响因素与预测模型[J]. 土木工程学报, 2018, 51(2): 103-112.
- HU Wenfa, CHANG Yongxia, HE Xinhua. Impact Factors and Prediction Models of Building Construction Duration[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(2): 103-112.
- [25] 田志勇. 建设工程系统韧性及影响因素分析[J]. 城市住宅, 2021, 28(5): 215-217.
- TIAN Zhiyong. Analysis of the Resilience and Influencing Factors of Construction Engineering System[J]. City and House, 2021, 28(5): 215-217.
- [26] 吴砚,赵景峰. 工程领域中工匠精神对工作奉献影响的实证研究[J]. 工程管理科技前沿, 2023, 42(4): 66-72.
- WU Yan, ZHAO Jingfeng. An Empirical Study on the Influence of Craftsman Spirit on Work Dedication in Engineering Field[J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2023, 42(4): 66-72.

(编辑:王婷)

(上接第10页)

- [33] 梁金平,李小瑞,荆浩勇,等. 厚壁圆筒围岩试件的屈服机制及卸荷变形破坏特征[J]. 岩土力学, 2025, 46(9): 2676-2686, 2702.
- LIANG Jinping, LI Xiaorui, JING Haoyong, et al. Yield Mechanism and Unloading Deformation Failure Characteristics of Thick-walled Cylindrical Surrounding Rock Specimens, 2025, 46(9): 2676-2686, 2702.
- [34] 周喻,吴庆良,杜晓伟,等. 岩石厚壁圆筒试验破坏的细观力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1854-1863.
- ZHOU Yu, WU Qingliang, DU Xiaowei, et al. Meso Mechanical Mechanisms of Thick-walled Hollow Rock Cylinder during Failure Process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1854-1863.
- [35] XU X L, GAO F, ZHANG Z Z. Influence of Confining Pressure on Deformation and Strength Properties of Granite After High Temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2246-2252.
- [36] MENG Q B, LIU J F, REN L, et al. Experimental Study on Rock Strength and Deformation Characteristics under Triaxial Cyclic Loading and Unloading Conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(2): 777-797.
- [37] LIU Z B, WANG H Y, LI Y P, et al. Triaxial Compressive Strength, Failure, and Rockburst Potential of Granite under High-stress and Ground-temperature Coupled Conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 911-932.
- [38] WANG C P, LIU J F, LIU J, et al. Influences of Confining Pressure and Fracture Inclination on Mechanical Behavior of Granite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(3): 578-586.
- [39] EFREIMIDIS G T, AIFANTIS E C. The Coefficient of Geostatic Stress: Gradient Elasticity vs. Classical Elasticity[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2007, 18(1): 43-54.
- [40] GUO M W, YIN S D, LI C G, et al. 3D In Situ Stress Estimation by Inverse Analysis of Tectonic Strains[J]. Applied Sciences, 2021, 11(11): 5284.
- [41] YOON J, MIN K, KWON S, et al. A Review of Excavation Damaged Zone for Rock Mechanics and Rock Engineering[J]. International Journal of the JSRM, 2024, 40(12): 3491-3509.
- [42] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Upper Bound Limit Analysis of Uplift Failure in Pressurized Sealed Rock Tunnels[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(5): 719-735.
- [43] LIU L P, WANG X G, PI J, et al. Rock Mass Behavior during High Pressure Grouting: an In-situ Experimental Investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(2): 2531-2547.
- [44] JIANG Z M, LIU Y T, LU X, et al. Review on Key Scientific and Design Issues of Lined Rock Caverns for Compressed Air E44nergy Storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12): 3491-3509.

(编辑:王婷)