



压缩空气储能电站人工硐室储气库抗抬升稳定性分析

贺家新¹, 纪文栋¹, 安晓宇¹, 程少振²

(¹中能建深地技术(湖北)有限公司, 武汉 430061; ²中国能源建设集团有限公司工程研究院, 北京 100044)

摘要: 针对压缩空气储能人工硐室储气库抗抬升计算方法不统一、安全评价标准不完善的工程难题, 本文系统梳理了刚性锥、刚性锥-抗剪、刚性锥-抗拉、垂直-剪切四种极限平衡模型的计算原理与适用边界, 构建了包含超载系数、循环荷载系数、岩体完整性系数的分项式抗抬升安全系数框架。结合工程案例与数值模拟, 深入探究了不同计算模型下储气库抗抬升安全系数随埋深、运行压力的演变规律, 分析了不同埋深工况下储气库围岩的位移特征与塑性区分布规律。研究结果表明: 同等埋深条件下, 刚性锥-抗剪、刚性锥-抗拉模型的计算结果偏于激进, 刚性锥模型与垂直-剪切模型的计算结果相对较小; 在压缩空气储能电站日循环运行工况下, I~II类、III类、IV类及以下围岩对应的储气库抗抬升安全系数推荐值分别为 1.98、2.15、2.48; 随埋深增加, 储气库围岩位移量与塑性区范围均呈现先快速降低后逐渐稳定的特征; 当覆土厚度由 1 倍硐室内径提升至 7 倍硐室内径时, 围岩位移由 96.16 mm 降至 7.20 mm, 围岩塑性区体积占比由 40.3% 降低至 10.1%, 此时硐室群效应基本消散, 继续增大覆土厚度, 对抑制围岩变形、控制塑性区扩展的改善效果有限。

关键词: 压缩空气储能; 人工硐室储气库; 抗抬升稳定性; 理论计算; 数值分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0618

中图分类号: TU 9

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-10

Analysis of uplift stability of artificial chamber gas storage in compressed air energy storage power station

HE Jiaxin¹, JI Wendong¹, AN Xiaoyu¹, CHEN Shaozhen²

(¹China Energy Deep Underground Technology (Hubei) Co., Ltd., Wuhan 430061; ²Engineering Institute Of China Energy Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: To address the engineering challenges related to the lack of uniformity in the calculation methods for resisting uplift in compressed air energy storage chambers, as well as the inadequacy of safety evaluation standards, this paper systematically analyzes the calculation principles and applicable limits of four types of limit equilibrium models: rigid cone, rigid cone with shear resistance, rigid cone with tensile resistance, and vertical-shear model. It establishes a framework for calculating the safety factor against uplift, incorporating factors such as overload coefficient, cyclic load coefficient, and rock mass integrity coefficient. Through engineering cases and numerical simulations, the paper explores how the safety factor against uplift varies with depth and operating pressure under different calculation

收稿日期: 2026-07-15; 修改稿日期: 2026-08-18。

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目 (CEEC2024-KJZX-01)

第一作者: 贺家新 (1995—), 男, 博士, 工程师, 主要从事于压缩空气储能人工硐室储气库建造技术相关的工作, E-mail: jxhe0833@163.com

引用本文: 贺家新, 纪文栋, 安晓宇, 等. 压缩空气储能电站人工硐室储气库抗抬升稳定性分析[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-10.

Citation: HE Jiaxin, JI Wendong, AN Xiaoyu, et al. Analysis of uplift stability of artificial chamber gas storage in compressed air energy storage power station[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-10.

models, and it analyzes the displacement characteristics and distribution of plastic zones in the rock surrounding the storage chamber at various depths. The results show that, at the same depth, the calculation results obtained using the rigid cone with shear resistance and rigid cone with tensile resistance models are on the higher side, while those from the rigid cone model and the vertical-shear model are relatively lower. Under the daily cyclic operating conditions of power plants, the recommended safety factors against uplift for rock masses of categories I~II, III, IV, and below are 1.98, 2.15, and 2.48, respectively. As the depth increases, both the displacement of the rock surrounding the storage chamber and the size of the plastic zone decrease rapidly before stabilizing. When the thickness of the overburden increases from 1 time the inner diameter of the chamber to 7 times that diameter, the maximum vertical displacement of the rock drops from 96.16 mm to 7.20 mm; at this point, the effect of the chamber cluster essentially disappears, and further increasing the overburden thickness has only a limited impact on reducing rock deformation and controlling the expansion of plastic zones.

Keywords: Compressed air energy storage; artificial cavern gas storage; uplift stability; theoretical calculation; numerical analysis

0 引 言

近年来,我国积极推进能源结构转型,在风能、太阳能等可再生能源领域取得了显著进展^[1]。然而,新能源发电间歇性、波动性强的固有特点,给电力系统的稳定运行带来了极大的挑战,弃风、弃光现象时有发生,严重制约了新能源的高效利用^[2]。在此背景下,作为解决新能源消纳难题的关键手段,大规模长时储能技术成为能源领域的研究热点。压缩空气储能技术凭借其大容量、长寿命、低成本、环境友好等优势,被认为是未来储能系统的重要组成部分^[3,4]。其原理是将电力过剩时的电能通过压缩机转化为高压空气势能,并存储于地下储气库,在需要时释放压缩空气驱动发电设备,实现电力的时空转移,达到平抑新能源发电的波动、提高可再生能源消纳能力的目的^[5,6]。

地下储气库是压气储能系统的核心部件,一般采用地下盐穴、硬岩人工硐室、废弃矿洞、枯竭油气藏及含水层等地质溶腔^[7,8]。硬岩人工硐室因其选址灵活,可依据地区地质条件及能源布局,精准规划建设位置,实现与风光发电基地的高效对接,是未来压缩空气储能技术发展的关键方向与重要支撑^[9,10]。然而在压缩空气储能电站运营中,储气库内腔高压气体产生的抬升力会影响硐室结构及上覆岩体的稳定性^[11,12]。储气库埋深太浅时,上覆岩体

可能无法抵抗高压气体产生的抬升力,导致储气库结构破坏,造成工程风险。但储气库埋深过大又会导致较长的交通洞长度,造成海量的工程浪费。因此,准确评估储气库上覆围岩的抗抬升性能,确定合理的储气库安全埋深,对于推动压缩空气储能技术的广泛应用具有重要的现实意义。

目前,学者们在压缩空气储能人工硐室储气库抗抬升稳定性研究方面已取得一定成果,如Tunsakul等^[12]和孙冠华等^[13]分别通过模型试验和理论计算分析了储气库上覆岩体的破裂形态。Perazzelli等^[14]通过分析储气库上覆岩体位移变化和裂纹区的发展,提出了维持储气库上覆岩体稳定的极限压力的确定方法。易琪等^[11]基于极限平衡理论和M-C强度准则,提出了任意形态破裂面下储气库抗抬升安全系数的求解方法。上述方法为人工硐室储气库的抗抬升安全计算提供一定的参考,但由于求解的过程较为复杂,在工程实践中应用受限。当前,理论直观、便于工程实践的计算模型主要有Kim等^[15]提出的垂直-剪切极限平衡模型(简称垂直-剪切模型)和Brandshaug等^[16]提出的刚性锥极限平衡模型(简称刚性锥模型)。此外,在刚性锥模型的基础上,考虑潜在滑裂面岩体的抗剪性能或抗拉性能,形成的刚性锥-抗剪极限平衡模型(简称刚性锥-抗剪模型)^[16]和刚性锥-抗拉极限平衡模型(简称刚性锥-抗拉模型),也是储气库抗抬升安

全计算的重要依据。然而，上述模型在计算原理和适用条件上存在显著差异，导致计算结果离散性较大，使得在实际工程中难以准确选择合适的计算模型。此外，由于缺乏实际工程案例的验证，现有研究成果在面对复杂地质条件和工程环境时，其可靠性和适用性有待进一步验证。

基于此，本文旨在综合运用理论计算、案例分析和数值模拟等方法，首先系统梳理刚性锥、刚性锥-抗剪、刚性锥-抗拉、垂直-剪切四种极限平衡模型的计算原理与适用边界，构建包含超载系数、循环荷载系数、岩体完整性系数的分项式抗抬升安全系数计算框架。结合工程案例与数值模拟，深入研究不同计算模型下储气库抗抬升安全系数随埋深、运行压力的演变规律，分析不同埋深工况下储气库围岩的位移特征与塑性区分布规律。以期为压缩空气储能人工硐室储气库的设计、建设和运营提供坚实理论依据和技术支持。

1 储气库抗抬升稳定性计算

1.1 刚性锥极限平衡模型

在高压气体抬升力的作用下，刚性锥极限平衡模型（简称刚性锥模型）假定储气库四周形成贯穿至地面的倾斜滑裂面，滑裂面与铅垂线的夹角为 θ ，滑裂面内岩体大致呈四棱台形（图1）。参考littlejohn等^[17]人的研究成果，滑裂面与铅垂线的夹角 θ 取 $35^\circ \sim 45^\circ$ 。该模型不考虑滑裂面处岩体的抗拉性能和抗剪性能，仅考虑上覆棱台形岩体重力来平衡储气库高压气体产生的抬升力，储气库的抗抬升安全系数 K 的计算表达式如下。

$$K = \frac{F_G}{F_{AIR}} \quad (1)$$

式中， F_G 为上覆棱台形岩体的重力，通过式(2)计算； F_{AIR} 为高压气体对储气库上覆围岩抬升力，通过式(3)计算。

$$F_G = \frac{1}{3} \gamma h (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}) \quad (2)$$

$$F_{AIR} = p A_1 \quad (3)$$

其中， γ 为硐室上覆岩体的平均重度，当上覆岩体分层较多，应分层计算上覆岩土体的重力； h 为硐室上覆岩土层的厚度； p 为硐室气体的最高压力； A_1 为硐室的水平投影面积； A_2 为四个滑裂面与地表面相交的矩形面积。 A_1 和 A_2 计算表达式如下：

$$\begin{cases} A_1 = dl \\ A_2 = (d + 2h \tan \theta)(l + 2h \tan \theta) \end{cases} \quad (4)$$

其中， d 为硐室直径； l 为硐室长度。

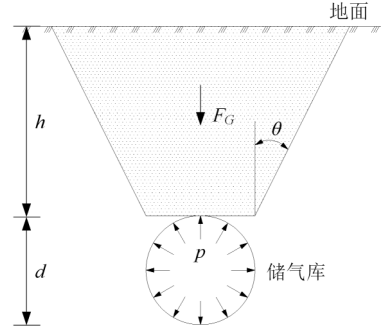


图1 刚性锥模型横断面示意图

Fig. 1 Schematic cross-sectional view of rigid cone model

1.2 刚性锥-抗剪极限平衡模型

刚性锥-抗剪极限平衡模型（简称刚性锥-抗剪模型）既考虑了上覆棱台形岩体的重力，又考虑了滑裂面位置的岩体抗剪性能，且假定极限平衡状态下滑裂面上岩体的抗剪性能得到充分发挥，但不考虑岩体的抗拉强度，模型受力分析示意如图2所示。此时，储气库的抗抬升安全系数 K 的计算表达式如下：

$$K = \frac{F_G + F_s \cos \theta}{F_{AIR}} \quad (5)$$

其中， F_s 为四个梯形滑裂面处岩体的极限抗剪性能。滑裂面上任意一点，若其竖直距离地面的高度为 x ，则该点的竖向土压力 σ_{zx} 和侧向土压力 σ_{xx} 的计算表达式如下：

$$\begin{cases} \sigma_{zx} = \gamma x \\ \sigma_{xx} = \lambda \gamma x \end{cases} \quad (6)$$

其中， λ 为侧压力系数。该点垂直于滑裂面的侧向土压力分量为 $\sigma_{xx} \cos \theta$ ，则四个梯形滑裂面处岩体的极限抗剪断力 F_s 可通过式(7)计算。

$$F_s = c A_3 + \int_0^h f \cdot \sigma_{xx} \cos \theta \left[2l + 2d + 8h \left(1 - \frac{x}{h} \right) \tan \theta \right] dx \quad (7)$$

式中， c 和 f 分别为岩体的粘聚力和抗剪断摩擦系数； A_3 为四个梯形滑裂面的总面积，计算表达式如下：

$$A_3 = \frac{2h}{\cos \theta} (d + l + 2h \tan \theta) \quad (8)$$

1.3 刚性锥-抗拉极限平衡模型

采用刚性锥-抗拉极限平衡模型（简称刚性锥-

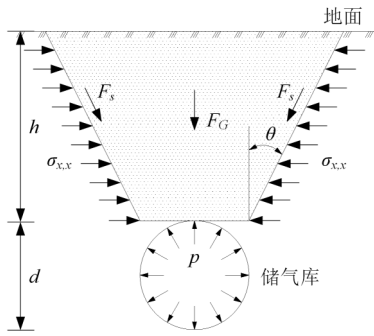


图2 刚性锥-抗剪模型横断面示意图

Fig. 2 Schematic cross-sectional view of rigid cone shear model

抗拉模型)时,同时考虑了硐室上覆棱台形岩体的重力和滑裂面处岩体的抗拉强度,并假定极限平衡状态下滑裂面上岩体的抗拉伸能力得到充分发挥,但不考虑岩体抗剪性能的作用,受力示意图如图3所示。此时,储气库的抗抬升安全系数 K 的计算表达式如下。

$$K = \frac{F_G + F_T \sin \theta}{F_{AIR}} \quad (9)$$

式中, F_T 为四个滑裂面位置岩体所能提供的极限拉力,通过式(10)计算。

$$F_T = \sigma_t A_3 \quad (10)$$

其中, σ_t 为岩体抗拉强度。

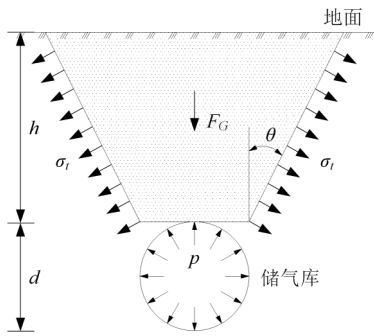


图3 刚性锥-抗拉模型横断面示意图

Fig. 3 Schematic cross-sectional view of rigid cone tensile model

1.4 垂直-剪切极限平衡模型

如图4所示,垂直-剪切极限平衡模型(简称垂直-剪切模型)考虑滑裂面与铅垂线的夹角为零,该模型同时考虑了硐室上覆立方体岩体的重力和滑裂面处岩体的抗剪性能,储气库的抗抬升安全系数 K 的计算表达式如下:

$$K = \frac{F'_G + F'_S}{F_{AIR}} \quad (11)$$

其中, F'_G 和 F'_S 分别为矩形立方体岩柱的重力和四个矩形滑裂面处岩体的抗剪断力, F'_G 和 F'_S 的计算表达如下:

$$\begin{cases} F'_G = \gamma d l h \\ F'_S = c A_4 + \int_0^h f \cdot \lambda \gamma x (2d + 2l) dx \end{cases} \quad (12)$$

式中, A_4 为四个矩形滑裂面的面积之和,等于 $2h(d + l)$ 。

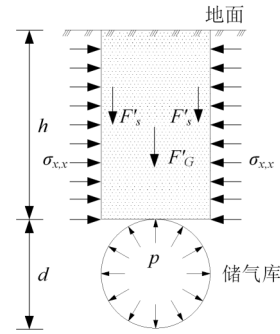


图4 垂直-剪切模型横断面示意图

Fig. 4 Schematic cross-sectional view of vertical-shear model

2 模型适用条件与建议性安全系数框架

2.1 模型适用条件分析

刚性锥模型、刚性锥-抗剪模型和刚性锥-抗拉模型均假定储气库上覆岩体滑裂面内的锥形岩体为刚体,因而这些模型一般适用于岩质坚硬且较完整的工况。然而,但刚性锥模型忽略了滑裂面处岩体的抗拉性能和抗剪性能,仅考虑上覆棱台形岩体重力来平衡储气库高压气体产生的抬升力,导致模型计算结果较为保守。因此,刚性锥模型主要适用于储气库存储气体具有更高安全等级,如氢气、天然气或有毒有害气体等,或上覆岩体潜在滑裂面附近存在断层破碎带、贯穿结构面或的工况。

刚性锥-抗剪模型和刚性锥-抗拉模型且均充分考虑了滑裂面位置的抗剪/抗拉力学性能,但实际工程中由于上覆岩体并非完全刚性,其滑裂面往往是从储气库逐步发展至地面的,因此,考虑整个滑裂面岩体的抗剪性能或抗拉性能得到充分发挥是相对冒险的,因而刚性锥-抗剪模型和刚性锥-抗拉模型的计算结果是相对激进的。

垂直-剪切模型考虑储气库上覆岩体滑裂面呈

竖直方向，一定程度上会轻视岩体的自重力的作用效果，尤其是围岩较为完整的工况。因此，垂直-剪切模型的计算结果相对较小，且主要适用于较为破碎或松软地层。

上述四种计算模型在计算原理和输出结果方面均存在显著差异。在实际工程实践中，储气库抗抬升计算模型的选择应紧扣工程安全需求和上覆岩体地质条件。

2.2 储气库抗抬升建议性安全系数框架

既有文献资料显示，刚性锥模型、刚性锥-抗剪模型和垂直-剪切模型的安全系数标准均为2.0，给出的理由是该标准是在边坡稳定性设计和隧道设计中常见的标准^[6]。由于人工硐室储气库高温高压循环交变的复杂环境，传统岩土工程的规范的适应性还有待进一步考察。

鉴于世界范围内尚无人工硐室型压气储能电站

建成案例，为充分保障储气库的抗抬升安全性，本文将四种模型安全系数的最小值作为储气库安全系数的下限值来参考。同时，考虑储气库超载、循环交变荷载作用和上覆岩体完整性等，提出了人工硐室储气库抗抬升安全系数建议值 K 的计算方法，具体表达式如下：

$$K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (13)$$

其中， k_1 为储气库超载系数，考虑储气库超压的可能性； k_2 为循环荷载系数，考虑循环交变荷载的影响； k_3 岩体完整性系数，考虑上覆岩体的完整性。 $k_1 \sim k_3$ 的取值及依据如表1所示。对于常规的压缩空气储能工程而言，循环荷载系数 k_2 取1.5，I~II类、III类、IV类及以下围岩条件下岩体完整性系数分别取1.2、1.3和1.5。通过计算，上述三种围岩条件下人工硐室储气库抗抬升安全系数建议值 K 分别为1.98、2.15和2.48。不同组合下储气库抗抬升安全系数建议值如表2所示。

表1 分项安全系数取值及依据

Table 1 Value and Basis of Sub-safety Factor

安全系数类型	取值	取值依据
超载系数 k_1	1.1	压缩空气储能电站加压过程中，储气库温度逐步提高，压力达到设计压力后热量传递至围岩，储气库温度逐步下降，压力同步降低。储气库压力不足会导致电站发电时长不足，造成经济损伤。为保障电站发电时长达标，需要对储气库进行超压注气。在我国西北某压缩空气储能电站工程中，根据储气库温度场原位试验与数值模拟分析结果，储气库超压约1.05~1.1倍时可保障电站发电时长充足，因此超载系数取值1.1。
循环荷载系数 k_2	1.1~1.5	当前国内压缩空气储能电站的设计寿命一般为30年，设计寿命期间内日循环、周循环、月循环工况下储气库充放气循环次数约为1万次、1500次和330次。在我国西北某压缩空气储能电站工程中，根据围岩原位取芯及室内循环加卸载试验（荷载与储气库设计运行压力一致）结果，推算岩石在下循环加卸载1万次、1500次和330次时岩石的强度下降约34%、25%和12%。因此，日循环、周循环、月循环工况下循环荷载系数分别取1.5、1.3和1.1。
岩体完整性系数 k_3	1.2~1.5	设置岩体完整性系数的目的是为了避开因上覆岩体条件的不确定性导致的岩体强度参数取值偏高问题，由于围岩等级越低，岩体强度的不确定性越大，I~II类、III类、IV类及以下围岩的完整性系数分别取1.2、1.3和1.5。

表2 不同组合下储气库抗抬升安全系数建议值

Table 2 Suggested uplift safety factor of gas storage under different combinations

围岩条件	安全系数建议值		
	日循环	周循环	月循环
I~II类围岩	1.98	1.72	1.45
III类围岩	2.15	1.86	1.56
IV类及以下围岩	2.48	2.15	1.82

表3 储气库尺寸参数和围岩参数

Table 3 Geometric parameters and surrounding rock parameters of gas storage

参数	数值
储气库洞径 (m)	15
储气库长度 (m)	100
岩体重度 (N/m ³)	26500
滑裂面与铅垂线夹角 (°)	35
内摩擦角 (°)	42
岩体抗剪断粘聚力 (MPa)	0.95
岩体抗拉强度 (MPa)	2.0
岩体抗剪断摩擦系数	0.9
岩体侧压力系数	1.00
储气库设计最高压力 (MPa)	18

3 案例计算与分析

以我国西北某压缩空气储能电站工程为例，地下人工硐室储气库建设在II类微风化花岗岩地层中，储气库具体计算参数如表3所示。

图5展示了四种计算模型下储气库计算抗抬升安全系数随覆土厚度的发展曲线。随着储气库埋深的增大,四种计算模型的计算抗抬升安全系数逐步增大,且增速也在逐步增大,该结果表明适当提高覆土厚度能够显著储气库提高抗抬升稳定性。同等埋深下,刚性锥-抗剪模型的计算抗抬升安全系数最大,其次为刚性锥-抗拉模型,刚性锥模型和垂直-剪切模型的计算抗抬升安全系数相对较小且较为接近。硐室埋深小于9D(D为硐室内径)时,刚性锥模型得到的计算抗抬升安全系数最小;硐室埋深超过9D后,由于垂直-剪切模型考虑硐室上覆岩体形成竖直滑裂面,严重低估了上覆岩体自重力的作用,其计算结果最为保守。基于上文提出的人工硐室储气库抗抬升安全系数建议值,储气库覆土厚度超过110m(约7.5D)后能够满足抗抬升安全需求。

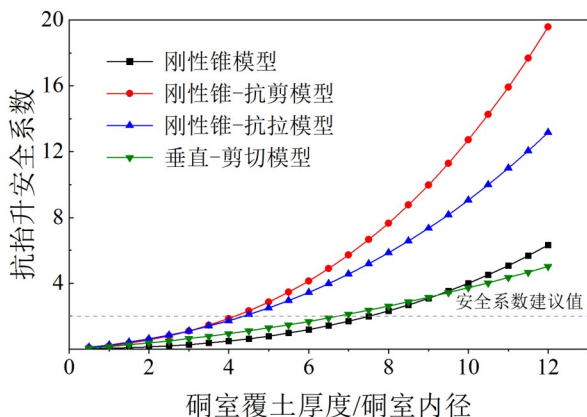


图5 抗抬升安全系数与埋深的关系

Fig. 5 Relationship between uplift safety factor and buried depth

图6展示了四种计算模型下的计算抗抬升安全系数与硐室最高压力的关系曲线(覆土厚度为110m)。四种计算模型的关系曲线均为反比例曲线,计算抗抬升安全系数随着硐室压力的增大而减小。四种模型的计算抗抬升安全系数由小到大顺序为刚性锥模型、垂直-剪切模型、刚性锥-抗剪模型和刚性锥-抗拉模型。

4 储气库安全埋深数值分析

4.1 数值模型与计算参数

4.1.1 三维数值模型

以我国西北某压缩空气储能电站工程为例,通

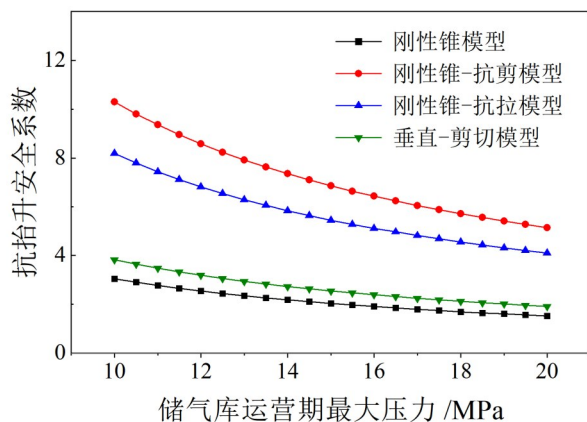


图6 抗抬升安全系数与运营压力的关系

Fig. 6 Relationship between uplift safety factor and operating pressure

过FLAC 3D有限差分程序建立图7所示三维数值模型。为简化数值模型,储气库封堵结构简化为实心混凝土圆柱。为消除边界效应,两侧硐室边界至模型边界的距离设置8倍的硐室半径,最终模型宽、长和高分别为366.4 m、220 m和181.6 m。地层、衬砌均采用六面体网格进行模拟,靠近硐室的网格尺寸较小,为1~2m,往外网格尺寸逐步增大。最终模型总计约24.7万个计算节点,23.6万个实体单元。模型四周设置法向约束,底部设置固定约束,顶部则设置为自由面。

4.1.2 计算参数

硐室围岩主要为II类的微风化花岗岩(GSI值取65),竖向距硐室拱顶20m以上位置主要为弱风化花岗岩(GSI值取55)。室内试验结果表明,岩块的单轴抗压强度 σ_{ci} 的平均值为133.37MPa,弹性模量 E_i 的平均值为47.55,泊松比 ν 为0.21~0.22。查阅文献,花岗岩岩块的材料常数 m_i 取32.4^[18]。由于储气库采用光面爆破施工,爆破振动对围岩损伤较小,扰动参数 D 取0。

岩体屈服准则采用Hoek-Brown强度准则和拉伸强度准则,根据Hoek-Brown强度准则参数拟合方法^[18],微风化和弱风化花岗岩地层计算参数如表1所示。储气库衬砌采用线弹性模型,衬砌内部的钢筋结构按其弹性模量和截面积等效折算至混凝土考虑,计算参数如表4所示。

数值计算的流程包括地应力平衡、硐室开挖与支护、逐步施加腔体气压力、应力平衡等。硐室开挖时,四个储气库采用全断面法同步循环施工,每

次循环进尺为2 m。

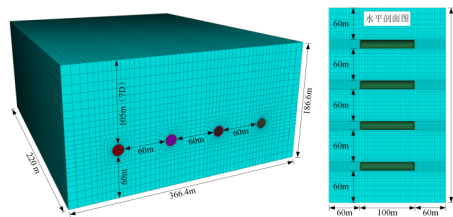


图7 三维数值模型
Fig. 7 Three-dimensional numerical model

4.1.3 计算工况

为分析不同埋深条件下硐室围岩的力学响应，设置13种不同工况（工况1~工况13），各工况硐室的覆土厚度分别1~10D、12D、15D和20D。硐室埋深示意如图8所示。13种工况的硐室施工方法、硐室间距、衬砌厚度和围岩条件等参数均保持一致。

4.2 计算结果分析

4.2.1 围岩位移

图9展示了埋深分别为3D、7D、10D和20D

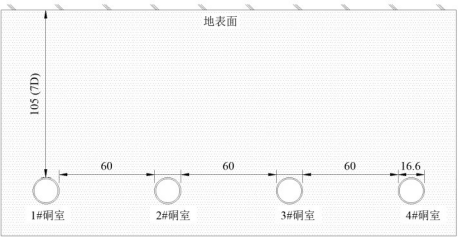


图8 储气库埋深示意图
Fig. 8 Schematic diagram of buried depth of gas storage

工况下围岩的竖向位移云图。四种工况下围岩竖向位移分布较为一致，最大围岩竖向位移集中在硐室拱顶位置，且中间硐室的拱顶位移大于两边硐室。当覆土厚度为3D时，中间两个硐室之间围岩位移均较大，且存在明显的围岩整体抬升现象，这说明储气库埋深较浅时，硐室群效应较为显著。覆土厚度提高至7D后，围岩整体抬升问题逐渐得到了改善，围岩竖向位移也限制在8 mm以内。覆土厚度进一步提高至10D、20D，围岩位移进一步减小，但减小的幅度有限。

表4 围岩和衬砌计算参数

Table 4 Calculation parameters of surrounding rock and lining

岩体类型	厚度(m)	重度(kN/m ³)	泊松比	弹模(GPa)	m_b	s	a
弱风化花岗岩	90	25.5	0.24	19.41	6.495	0.0067	0.504
微风化花岗岩	76.6	26	0.22	30.04	9.283	0.0205	0.502
衬砌	0.8	25	0.2	36.9	--	--	--

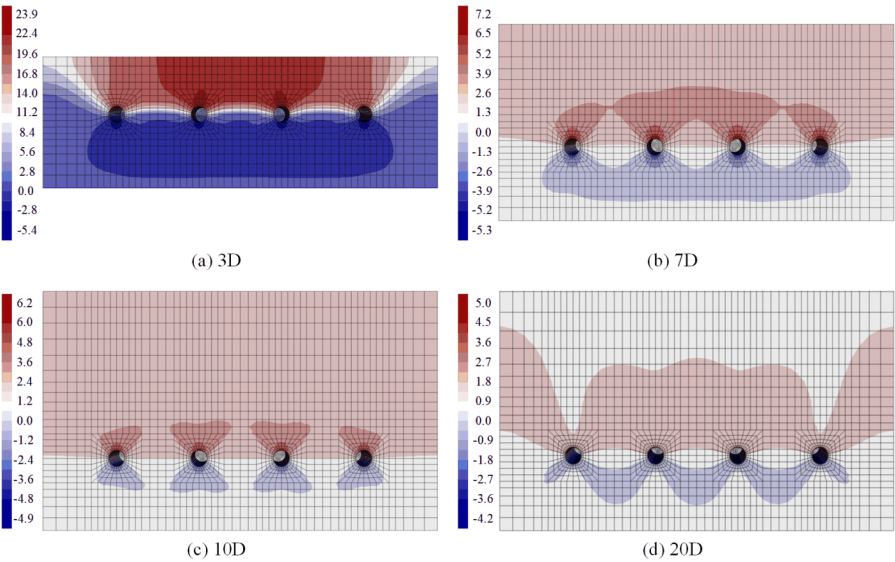


图9 不同埋深条件下储气库围岩竖向位移云图

Fig. 9 Nephogram of vertical displacement of surrounding rock of gas storage under different burial depths

图 10 展示了硐室围岩最大位移与硐室埋深的关系曲线。容易推断出, 硐室覆土厚度较小时, 围岩最大竖向位移和水平位移会随着硐室埋深的增大而迅速降低。覆土厚度由 1D 提高至 7D, 围岩最大竖向位移从 96.16 mm 急剧降低至 7.20 mm, 约降低了 92.5%; 围岩最大水平位移则从 15.72 mm 降低至 7.38 mm, 约降低了 53.1%。储气库覆土厚度增大至 20D, 围岩最大竖向位移和水平位移分别为 4.95 mm 和 6.49 mm, 相较于 7D 覆土厚度工况, 围岩位移相差很小, 这说明硐室覆土厚度达到 7D 后, 提高覆土厚度来减小围岩位移的效果大幅降低。

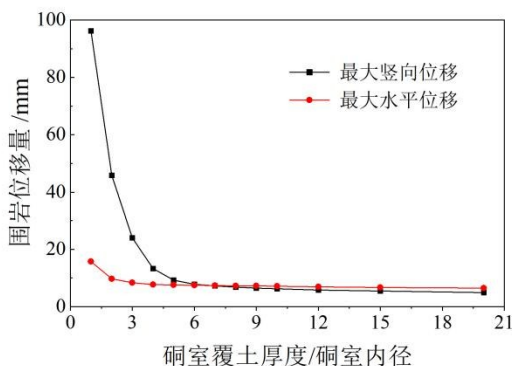


图 10 围岩位移与硐室埋深的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between displacement of surrounding rock and buried depth of chamber

4.2.2 围岩塑性区分析

图 11 展示了不同埋深条件下围岩塑性区的分布云图。当覆土厚度为 1~5D 时, 四个储气库的围岩塑性区相互贯通连接, 且围岩塑性区直接贯通至地面, 这对储气库的安全是极为不利的。储气库覆土厚度提高至 6D 时, 四个硐室的塑性区范围开始相互疏离, 水平方向上已经不再相互连接, 但塑性区仍然贯穿发育至地面, 仍然不利于储气库的抗抬升稳定性。硐室覆土厚度提高至 7D 后, 四个储气库的塑性区已经不再连接, 且围岩塑性区也不再贯穿至地面了, 该情况下储气库围岩塑性区的分布范围已经较为合理。当覆土厚度进一步提高至 10~20D, 围岩塑性区进一步减小, 塑性区范围主要集中在拱顶以上和仰拱以下位置, 两侧墙腰位置的塑性区范围很小。

如图 12 所示, 随着储气库覆土厚度的增大, 整个模型围岩塑性区单元体积的占比呈现出先增大

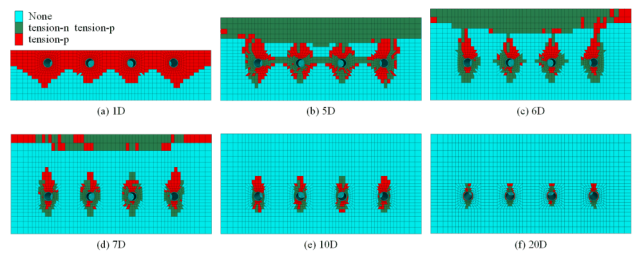


图 11 不同埋深条件下储气库围岩塑性区云图

Fig. 11 Nephogram of plastic zone of surrounding rock of gas storage under different burial depths

后减小的趋势。当覆土厚度小于 4D 时, 硐室上覆土层的自重和潜在滑裂面阻力无法抵抗储气库内的气体压力, 储气库上覆围岩拉伸破坏进入塑性区, 该情况下增大覆土厚度, 增加的围岩单元基本会进入拉伸屈服状态, 导致塑性区单元体积占比提高。覆土厚度大于 4D 后, 硐室上覆土层的自重及潜在滑裂面阻力达到了一定的规模, 此时增加覆土厚度, 围岩塑性区单元体积占比逐步降低。当覆土厚度超过 8D 后, 塑性区单元体积占比曲线趋于平缓, 此时增大覆土厚度来降低围岩塑性区的效果大幅降低。

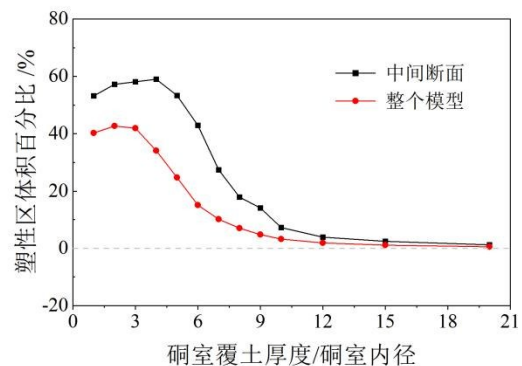


图 12 围岩塑性区百分比与硐室埋深的关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between percentage of plastic zone of surrounding rock and buried depth of chamber

4.3 理论计算方法与数值分析方法的对比

(1) 储气库抗抬升理论计算方法与数值分析方法的评价指标不同, 前者为安全系数, 后者为位移和塑性区。理论计算的储气库的合理覆土厚度为 7.5 倍硐室内径, 这与数值模拟的 7~8 倍硐室内径十分契合, 二者相互印证, 说明本文所提的储气库抗抬升安全系数标准较为合理。

(2) 在工程实践中, 理论计算方法具备操作简

便、计算高效,结合地层参数、储气库尺寸、运行压力等基础数据即可快速完成储气库埋深范围估算与整体抗抬升承载力校核,适用于工程前期方案比选、参数初筛及快速安全核验等初步研究工作。但该方法计算模型多假定岩体均质、边界条件简化,忽略了围岩非均质特性、硐室群叠加效应以及开挖施工的动态力学影响,仅能实现整体稳定性的宏观判定,计算精度存在一定的限制。

(3) 数值分析方法是精细化研究储气库抗抬升稳定性的重要手段,该方法以围岩位移变形、塑性区分布与演化规律为评价依据,能够完整模拟开挖卸荷、支护施作、循环内压加载等全过程,精准捕捉围岩局部力学响应特征,充分考虑各类复杂地质与工程干扰因素的影响,可为储气库最优埋深选取、支护方案优化、运行工况调控提供详实的数据支撑。其局限性在于本文构建的数值模型尚未直接考虑循环荷载作用、热-力耦合、流-固耦合以及结构损伤效应,模拟结果难以表征储气库长期运营阶段产生的累积变形与疲劳损伤;此外,数值模型具有工程针对性,单一工程的计算结论不宜直接推广作为通用设计参数。因此该方法难以实现大批量方案的快速比选与初步校核,更适用于工程方案基本确定后的深化分析、稳定机理揭示以及支护结构优化验证。

5 结 论

(1) 随着埋深的增大,刚性锥模型、刚性锥-抗剪模型、刚性锥-抗拉模型和垂直-剪切模型的安全系数迅速提高,同等埋深条件下,刚性锥-抗剪模型和刚性锥-抗拉模型考虑储气库上覆岩体潜在滑裂面的抗剪/抗拉性能得到充分发挥,其安全系数计算结果较为激进。刚性锥模型完全忽略了滑裂面的抗剪/抗拉性能,垂直-剪切模型低估了上覆岩体自重的作用效果,导致二者模型的计算结果相对较小。

(2) 以四种储气库抗抬升安全系数理论计算模型的最小包络线为标准,考虑储气库超载、循环交变荷载作用和上覆岩体完整性等分项系数,提出了人工硐室储气库抗抬升建议安全系数框架。在压缩空气储能电站日循环运行工况下,I~II类、III类、IV类及以下围岩对应的储气库抗抬升安全系数推荐值分别为1.98、2.15、2.48。

(3) 随着埋深的增大,储气库围岩位移和塑性区范围均呈现出先迅速降低后趋于平缓的趋势。储气库埋深由1倍硐室内径提高到7倍硐室内径,围岩位移由96.2 mm迅速降低至7.2 mm,围岩塑性区体积占比由40.3%降低至10.1%。储气库埋深超过7倍洞径后,围岩位移基本维持在6~8 mm,围岩塑性区分布模式也较为合理,四个硐室的围岩塑性区范围相互独立且不再贯穿发育至地面。继续增大覆土厚度,对抑制围岩变形、控制塑性区扩展的改善效果有限。

参 考 文 献

- [1] 刘园园. 国家能源局:我国风电光伏发电装机规模超过煤电[N]. 北京: 科技日报, 2024-08-01.
Liu Yuanyuan. National Energy Administration: The installed scale of wind power photovoltaic power generation in China exceeds that of coal power generation[N]. Beijing: Science and Technology Daily, 2024-08-01.
- [2] 林伯强, 杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(05): 1-10.
Lin Boqiang, Yang Mengqi. China's power system research in the context of carbon neutrality: current status, challenges, and development direction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2022, 42(05): 1-10.
- [3] 孙冠华, 朱开源, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站地下硐库的基本概念、设计理念与方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(01): 14-23.
Sun Guanhua, Zhu Kaiyuan, Ji Wendong, et al. Basic concepts, design principles, and methods of compressed air energy storage underground caverns[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(01): 14-23.
- [4] 蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等. 压气储能内衬硐室储气关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3491-3509.
JIANG Zhong-ming, LIU Yu-ting, LU Xi, et al. Review on key scientific and design issues of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12): 3491-3509.
- [5] Nabil I, Dawood M K, Nabil T. Review of energy storage technologies for compressed-air energy storage[J]. Am. J. Mod. Energy, 2021, 4(4): 51-60.
- [6] Bazdar E, Sameti M, Nasiri F, et al. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112701.
- [7] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47.
Liu Xiaochi, Mei Shengwei, Ding Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47.

- [8] 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(04): 54-64.
Yang Xuwen 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(04): 54-64.
- [9] 金维平, 彭益成. 硬岩地区压缩空气储能工程地下储气洞室选址方法研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(01): 63-67.
JIN Weiping, PENG Yi cheng. Underground gas storage cavern location method for compressed air energy storage engineering in hard rock area[J]. Power & Energy, 2017, 38(01): 63-67.
- [10] 彭威, 商浩亮, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站人工洞室选址关键流程[J]. 电力勘测设计, 2023, 2023(06): 46-49.
Peng Wei, Shang Haoliang, Ji Wendong, et al. The key process of artificial chamber location of compressed air energy storage power station[J]. Electric Power Survey & Design, 2023, 2023(06): 46-49.
- [11] 易琪, 孙冠华, 姚院峰, 等. 压缩空气储能地下内衬洞库上覆岩体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3523-3532.
Yi Qi, Sun Guanhua, Yao Yuanfeng, 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.
- [12] Tunsakul J, Jongpradist P, Soparat P, et al. Analysis of fracture propagation in a rock mass surrounding a tunnel under high internal pressure by the element-free Galerkin method[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 78-90.
- [13] 孙冠华, 易琪, 姚院峰, 等. 压缩空气储能电站隧道式地下洞库潜在失稳模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(01): 41-49.
Sun Guanhua, Yi Qil, Yao Yuanfeng, et al. Study on the potential instability patterns of tunnel type underground caverns for compressed air energy storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(01): 41-49.
- [14] 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.
- [15] Kim H, Park D, Ryu D, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns[J]. Engineering geology, 2012, 135: 60-65.
- [16] Brandshaug T C M D B. Technical review of the lined rock cavern concept and design methodology: mechanical response of rock mass[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc., 2001.
- [17] Littlejohn G S, Bruce D A. Rock anchors-state of the art. Part 1: design[J]. Ground Engineering, 1975, 8(3): 148.
Hoek E, Brown E T. The Hoek - Brown failure criterion and GSI - 2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445-463