

DOI: 10.11779/CJGE20221165

# 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究

蒋中明<sup>1,2</sup>, 甘 露<sup>1</sup>, 张登祥<sup>1,3</sup>, 肖喆臻<sup>1</sup>, 廖峻慧<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;  
3. 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 地下储气库衬砌的主要作用是将内压传递给围岩, 且同时作为柔性密封层的附着基层。高内压作用下衬砌开裂可导致密封层出现反射型裂缝, 进而引起高压气体的泄漏。为深入认识地下储气库衬砌的开裂特征, 开发了基于 FLAC<sup>3D</sup> 平台的衬砌裂缝分析程序, 研究了衬砌配筋方式、配筋率、钢筋保护层厚度、围岩类别和温压循环荷载作用等因素对衬砌开裂演化特征的影响。研究成果表明: 对衬砌采取合理的配筋方式和改善围岩质量的措施可有效控制衬砌裂缝的宽度; 采用分区配筋的方式可有效控制圆形断面隧洞式储气库衬砌中的最大裂缝宽度, 同时降低衬砌的配筋量。空气压力和温度同步变化引起的热力耦合效应还有助于减小衬砌中出现的裂缝宽度。

**关键词:** 压气储能; 地下储气库; 钢筋混凝土衬砌; 衬砌开裂特征; 裂缝宽度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)01-0110-10

作者简介: 蒋中明(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事地下储气库建造技术方面的研究工作。E-mail: zzmmjiang@163.com。

## Distribution characteristics and evolution laws of liner cracks in underground caverns for compressed air energy storage

JIANG Zhongming<sup>1,2</sup>, GAN Lu<sup>1</sup>, ZHANG Dengxiang<sup>1,3</sup>, XIAO Zhezheng<sup>1</sup>, LIAO Junhui<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The liner of underground gas storage cavern is used to transfer the internal pressure to the surrounding rock, and at the same time serves as the base of flexible sealing layer. The excessively wide cracks due to the high internal pressure may lead to generation of reflective cracks in the sealing layer, thus causing the leakage of high-pressure gas. To deeply understand the characteristics of liner cracking in high-pressure underground gas storage cavern, a routine for cracking analysis of a liner based on the FLAC<sup>3D</sup> platform is developed, and the influences of reinforcement mode and ratio, concrete cover thickness, surrounding rock type and effect of temperature-pressure cyclic loading on cracking evolution characteristics are studied. The research results show that the crack width of the liner can be effectively controlled by reasonable reinforcement of concrete liner and improvement of the surrounding rock quality. For a circular cross-section tunnel gas storage cavern, it is possible to control the maximum crack opening in the liner by differentiated reinforcement mode, so as to reasonably reduce the reinforcement quantity in the liner. The thermo-mechanical coupling effects due to the simultaneous change of compressed air pressure and temperature are helpful to reduce the crack width in the liner.

**Key words:** compressed air energy storage; underground gas storage cavern; reinforced concrete liner; liner cracking characteristic; crack width

## 0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现国家碳达峰碳中和目标的根本途径之一。以风电和光伏为主导的新能源电力普遍具有不稳定性特点, 其大规模并网对电力系统的安全运行构成了严重挑战。为应对这种挑战, 人们提出了利用大规模电力储能技术来改善可再生能源电力的间歇性及不稳定性的举措, 进而

实现电网削峰填谷以及能源的高效利用<sup>[1-2]</sup>。大规模物理储能技术主要包括抽水蓄能和压缩空气储能 (compressed air energy storage, 简称 CAES) 两种, 其中压缩空气储能被认为是最有潜力的新型大规模储能技术之一。自 2021 年江苏金坛盐穴压缩空气储能电

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178381, 51778070)

收稿日期: 2022-09-20

站并网发电以来, 中国各大能源企业对大规模压缩空气储能技术的关注度越来越高, 并开始在国内布局压缩空气储能项目。在中国风光资源丰富的“三北”地区, 人工岩穴压缩空气储能技术因其选址上的良好适应性得到越来越多的电力能源开发企业的认同<sup>[3-4]</sup>。据不完全统计, 目前中国已经签约的 100MW/400MWh 岩穴压缩空气储能电站数量已经超过 10 个。建造人工岩穴储气库的关键是要确保储气库的高压气密性, 而高内压条件下混凝土衬砌开裂的必然性<sup>[5-9]</sup>不可避免地对密封层的耐久性产生严重影响, 并有可能导致混凝土衬砌和密封薄层材料之间的接触界面出现损伤破坏<sup>[10]</sup>, 进而导致密封层破坏而发生大量漏气的现象。研究成果<sup>[8-9]</sup>表明: 衬砌裂缝开度越大, 衬砌性能弱化程度越强, 密封层结构体系破坏的风险也越大。鉴于目前国内外还没有全面系统分析压缩空气储能地下储气库混凝土衬砌开裂特征及裂缝分布规律的研究成果, 以中国迫切需要衬砌密封结构设计方面的理论和方法作为储气库工程建设的技术支撑, 基于 FLAC<sup>3D</sup> 平台, 在二次开发混凝土裂缝数值分析程序基础上, 对压缩空气储能地下储气库的混凝土衬砌开裂特征进行全面的数值研究, 总结裂缝分布规律, 以期为地下储气库混凝土衬砌的结构设计提供理论支撑。

## 1 混凝土开裂理论及数值分析程序研制

对于结构几何形状和赋存环境复杂情况下的钢筋混凝土构件裂缝分析来说, 数值模拟法是一种可行和有效的分析手段<sup>[11]</sup>。学者们在混凝土裂缝的数值模拟技术研究方面做了大量工作, 取得丰富研究成果<sup>[12-14]</sup>, 并可实现裂纹扩展时应力重新分布的模拟以及裂缝数量、间距和宽度的统计。

混凝土裂缝特征分析的关键是需要合理地确定和使用混凝土开裂准则。目前, 可用于混凝土开裂分析的准则主要有应力准则、应变准则和基于能量的断裂韧度准则等类型<sup>[11-14]</sup>。其中, 应力准则中的 William-Warnker 准则因为能较好地反映混凝土在空间复杂应力状态下的实际破坏情况和较高的成熟度, 被广泛运用于各类钢筋混凝土有限元软件中的开裂分析模块。由于最终研究目标是从工程角度全面认识高压地下储气库工程衬砌裂缝分布特征, 因此, 在混凝土裂缝分析时也采用了 William-Warnker 五参数应力破坏准则来判断衬砌混凝土在受力过程是否会产生开裂现象。空间应力状态下的混凝土破坏准则为<sup>[15]</sup>

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad . \quad (1)$$

式中:  $F$  为主应力状态 ( $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yp}$ ,  $\sigma_{zp}$ ) 的函数, 其

中  $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yp}$ ,  $\sigma_{zp}$  为各主方向的主应力, 虽然带有  $x$ ,  $y$ ,  $z$  下标, 但与  $x$ ,  $y$ ,  $z$  轴无直接关系;  $S$  为指破坏面, 由主应力和输入的 5 个参数确定;  $f_c$  为抗压强度。

由于混凝土产生裂缝后其刚度将出现“软化”现象, 因此在对混凝土进行裂缝数值分析时, 需要对出现裂缝的单元进行弱化处理以反映材料的软化特征。含裂缝混凝土的软化分析模型如下<sup>[16]</sup>:

$$E_d = E_0(1 - d_t) \quad . \quad (2)$$

式中:  $E_d$  为修正后的弹性模量;  $E_0$  为混凝土的初始弹性模量;  $d_t$  为弹性模量损伤因子,

$$d_t = 1 - \sqrt{\sigma_t / E_0 \varepsilon_t} \quad . \quad (3)$$

式中:  $d_t$  为弹性模量损伤因子;  $\sigma_t$  为单元等效拉应力;  $\varepsilon_t$  为单元等效拉应变; 混凝土受拉泊松比  $\nu_t$  取 0.2。

混凝土出现开裂后, 其裂缝宽度计算方法<sup>[17]</sup>如下:

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^e \quad , \quad (4)$$

$$w_m = \sum_{i=1}^{n'} \varepsilon_i^{ck} l_{cr} \quad (\varepsilon_i^{ck} \geq \varepsilon_{ur}) \quad . \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_t^{ck}$  为拉伸开裂应变;  $\varepsilon_{0t}^e$  为未受损伤的拉伸弹性应变;  $\varepsilon_t$  为等效拉应变;  $l_{cr}$  为单元尺寸 (m);  $n'$  为裂缝间距内宏观开裂的单元数,  $w_m$  为裂缝宽度 (m)。

$$\varepsilon_{ur} = \frac{2G_f}{f_t l_{cr}} \quad , \quad (6)$$

$$G_f = \alpha(0.1f_c)^{0.7} \quad . \quad (7)$$

式中:  $G_f$  为断裂能 (N/mm);  $l_{cr}$  为裂缝带的宽度, 一般取单元宽度 (mm);  $f_t$  为抗拉强度,  $f_c$ ,  $f_t$  单位为 MPa; 系数  $\alpha$  根据 CEB-FIPMC90<sup>[18]</sup> 中的建议取 0.058 mm。

为在 FLAC<sup>3D</sup> 平台上实现钢筋混凝土的裂缝分析功能, 基于上述裂缝开裂准则、材料软化模型以及裂缝开度计算方法, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 中 FISH 语言编写了钢筋混凝土裂缝分析的计算子程序。程序可以在计算分析过程中自动识别裂缝出现的位置, 并计算其裂缝宽度大小, 计算流程如图 1 所示。

上述计算流程中, 初始应力场计算和开挖计算时, 混凝土采用 FLAC<sup>3D</sup> 中自带的基于德鲁克普拉格屈服准则的弹塑性本构模型。当判断混凝土发生塑性破坏后, 进而采用 William-Warnker 五参数破坏准则判断混凝土的开裂状态; 其中, 定义破坏面需要 5 个强度参数, 也可仅用 2 个常数单轴受压强度  $f_c$  和单轴受拉强度  $f_t$  确定, 其余 3 个常数为  $f_{cb}$  双向受压强度, 以及在某一围压  $\sigma_h^a = \sqrt{3}f_c$  下的双向受压强度  $f_l$  和单向受压强度  $f_2$ , 计算方式如下:  $f_{cb} = 1.2f_c$ ,  $f_l = 1.45f_c$ ,  $f_2 = 1.725f_c$ ; 已知这 5 个参数, 通过多轴应力状态下的混凝土破坏准则  $F/f_c - S \geq 0$  判断混凝土是否发生

破坏。

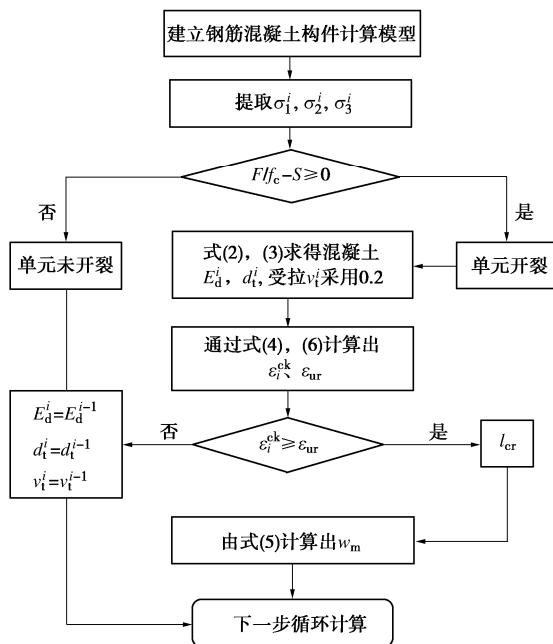


图 1 计算流程

Fig. 1 Flow chart of numerical calculation

为验证二次开发程序的正确性, 利用文献[19]中提供的钢衬钢筋混凝土管道物理模型试验成果, 对本文开发的程序进行验证。数值计算模型几何信息如图 2 所示, 其中混凝土管道强度等级为 C30, 抗压强度为 34.3 MPa, 管道内布置了两层直径为 6 mm 的钢筋, 屈服强度为 300 MPa; 管道模型内部为内径 400 mm 的钢衬, 厚度为 1 mm (如图 4 所示), 内衬钢板的抗拉强度为 215 MPa<sup>[19]</sup>。整个数值模型共有计算单元数量 76800 个, 节点数量 95200 个, 钢筋结构单元数量 4410 个。计算模型中混凝土网格最小尺寸约 1.5 mm, 钢衬网格的最小尺寸为 1 mm。数值计算边界条件及加载过程与文献[19]物理模型加载试验一致, 管道内侧作用的法向面力大小为 1.3 MPa; 模型下部水平边界为铅直位移约束边界, 其余为自由边界。

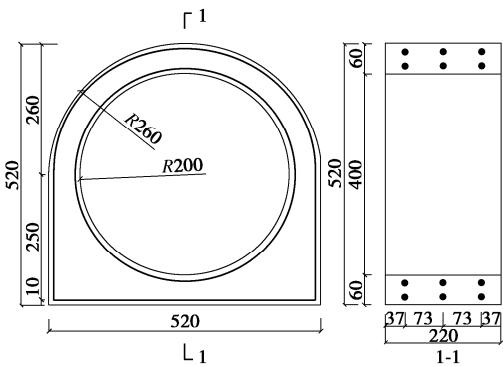


图 2 钢衬钢筋混凝土管道结构图

Fig. 2 Sketch of steel-lined reinforced concrete pipeline

图 3 为钢衬和钢筋第三主应力分布图, 钢衬第三

主应力最大值为 156.970 MPa, 最小值为 126.930 MPa; 可以发现, 内圈钢筋承受的拉应力大于外圈钢筋, 钢筋结构受到的拉应力最大值为 138.400 MPa, 最小值为 27.212 MPa。在物理试验结果中, 钢衬承受的力大于钢筋承受力, 内圈钢筋承受的力大于外圈钢筋, 钢衬应力最大值为 168.180 MPa, 内圈钢筋应力最大值为 144.590 MPa, 与数值计算结果较为一致。

图 4 为数值计算和模型试验得到混凝土裂缝空间分布图。由图 4 可知, 数值模拟得到的裂缝分布位置与物理模型试验得到的裂缝分布位置基本一致。同时数值模拟得到的最大裂缝宽度数值 (0.094 mm) 与物理模型试验得到的最大裂缝宽度数值 (0.087 mm)<sup>[19]</sup> 也十分接近, 两者之间相差约为 8%。但对比分析图 4 后发现, 尽管数值模拟可以较好地预测接缝分布出现的位置, 但计算得到的裂缝分布形态与实测结果之间还是存在较大的差异。这种差异性与物理模型中混凝土的材料非均匀以及数值计算模型采用损伤准则不一致有关。目前, 要做到裂缝模拟与实际情况完全一致还存在较大的困难。但工程应用的角度来看, 上述裂缝模拟方法基本可以用于分析高压地下储气库衬砌的裂缝分布特征。

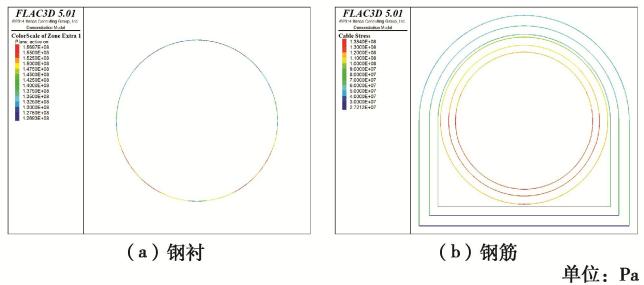


图 3 第三主应力云图

Fig. 3 Contours of third principal stress

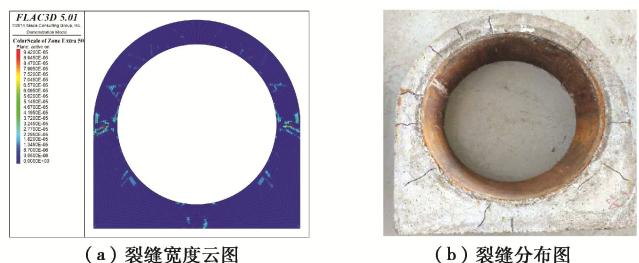


图 4 钢衬钢筋混凝土管道裂缝对比图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Comparison of cracks in steel liner-reinforced concrete pipeline<sup>[19]</sup>

## 2 储气库实例数值建模

西北某拟建压缩空气储能电站场地内揭露的地层主要为第四系覆盖层、第三系中新统汉诺坝组玄武岩。储气库拟建在中风化玄武岩地层中, 该地层岩体

表1 岩体计算参数

Table 1 Computational parameters of rock

计算参数	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	变形模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 $T/\text{MPa}$	热传导系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	线膨胀系数/ $(\text{K}^{-1})$	换热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$
围岩	26	18	0.200	1.50	50	2.00	3.00	771	$1\times 10^{-5}$	—
C30混凝土	25	30	0.167	3.08	55	2.01	1.74	800	$1\times 10^{-5}$	6

中节理裂隙不发育, 岩体完整性较好, 岩体质量以Ⅱ类为主。初始应力场以自重应力场为主。

储气库采用圆形断面, 设计埋深为 200 m, 内径为 15 m, 混凝土衬砌厚度 0.5 m, 强度等级为 C30。由于本工程采用了长径比大(超过 10)的隧洞式储气库, 故在利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行数值模拟时, 可以将储气库简化为准三维模型。在隧洞上下左右 4 个方向分别取延伸长度约为洞径的 4 倍左右进行数值建模, 即计算模型长 120 m, 高度为 120 m, 厚度为 0.6 m。数值模型共有计算单元数量 547200 个, 节点数量 638967 个, 其中衬砌混凝土单元 115200 个, 见图 5。为精细化建模分析混凝土衬砌的裂缝分布特征, 衬砌网格的最小尺度为 24 mm。衬砌中配置的钢筋采用 cable 结构单元进行模拟。

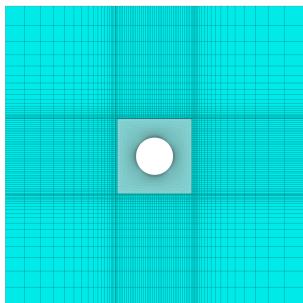


图 5 储气库数值网格

Fig. 5 Meshes for rock cavern

本构模型: 岩石和混凝土力学计算均采用基于德鲁克普拉格屈服准则的弹塑性本构模型; 钢筋采用线弹性模型。热传导分析采用各向同性热传导模型。

力学计算边界条件: 数值模型的铅直面施加水平位移约束, 底部水平面施加铅直位移约束, 模型顶部水平面上施加应力(3.98 MPa)边界以模拟上覆岩层压力的影响。模型内表面上施加面力为 10 MPa 的压力边界以反映储气库内的最高压力作用。

热力学分析边界: 模型外表面为绝热边界, 模型内表面为对流换热边界。

初始条件: 初始应力场按自重应力场处理; 初始温度场的温度值取 20℃。

数值计算所需的参数分别见表 1, 2。

研究表明: 衬砌的布筋方式、配筋率、保护层厚度以及围岩类别等因素对衬砌力学响应和裂缝形成与发展都有重要影响。为此, 针对上述影响因素, 在保持围岩、衬砌尺寸保持不变的前提下, 拟定敏感性分

析的计算方案如表 3 所示。

表 2 钢筋计算参数

Table 2 Computational parameters for rebar

弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	剪切刚度/ GPa
200	400	10

表 3 计算方案表

Table 3 Computational schemes

影响因素	布置方式	钢筋直径/mm	钢筋间距/mm	保护层厚度/mm	围岩变形模量/GPa
基准方案	单层钢筋	22	250	50	18
对比方案	无钢筋、双层钢筋	16, 28, 32	125, 165	60, 70, 80, 90, 100	9, 12, 15, 30

### 3 计算成果及分析

#### 3.1 布筋方式对衬砌开裂特征的影响

图 6 给出了 3 种布筋方式下混凝土衬砌裂缝分布图。由图 6 可知, 在 10 MPa 内压作用下, 混凝土衬砌裂缝空间分布规律基本相同, 即裂缝主要集中在  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  以及  $315^\circ$  4 个方向(以衬砌右侧水平线为起点, 即  $0^\circ$ ; 逆时针方向为正, 下同。)。

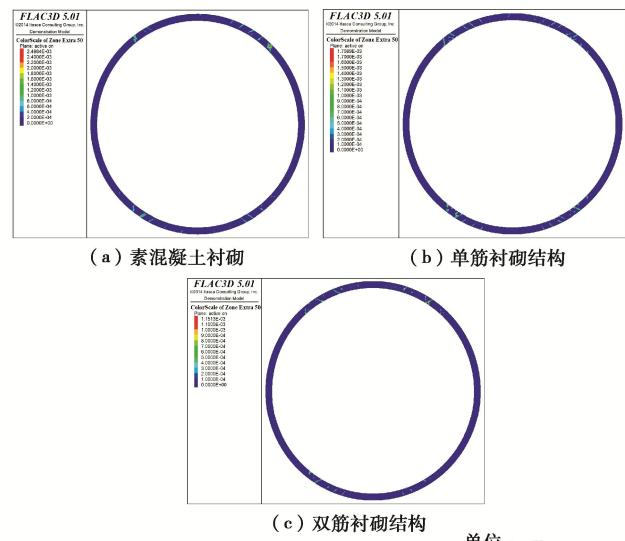


图 6 不同配筋方式下裂缝分布图

Fig. 6 Distribution of cracks under different reinforcement modes

在围岩变形模量为 18 GPa 条件下, 如衬砌采用素混凝土方案, 将产生 3 条较宽的宏观裂缝, 其最大裂缝宽度数值分别为 2.498, 1.407, 1.542 mm, 分布方位在  $45^\circ$ ,  $127^\circ$ ,  $238^\circ$ ; 衬砌中共出现了 23 条裂

表 4 配筋率与裂缝特征值关系表  
Table 4 Relationship between crack eigenvalue and percentage of reinforcement

钢筋直径/mm	钢筋间距/mm	配筋率/%		平均裂缝宽度/mm		最大裂缝宽度/mm		宏观裂缝条数	
		单筋	双筋	单筋	双筋	单筋	双筋	单筋	双筋
16	125	0.34	0.67	0.639	0.518	1.490	1.287	38	32
	165	0.27	0.54	0.637	0.534	1.623	1.189	39	33
	250	0.20	0.40	0.713	0.584	2.037	1.613	35	33
22	125	0.63	1.27	0.625	0.507	1.346	1.074	39	29
	165	0.51	1.01	0.624	0.512	1.425	1.171	41	31
	250	0.38	0.76	0.634	0.528	1.709	1.151	38	30
28	125	1.03	2.05	0.569	0.457	1.046	1.029	41	28
	165	0.82	1.64	0.573	0.490	1.131	1.066	42	30
	250	0.62	1.23	0.590	0.508	1.168	1.112	44	30
32	125	1.34	2.68	0.584	0.399	1.090	0.711	35	30
	165	1.07	2.14	0.600	0.418	1.096	0.844	38	31
	250	0.80	1.61	0.608	0.429	1.207	0.909	43	31

缝, 其中裂缝宽度在 1~0.8 mm 的有 7 条; 在 0.8~0.6 mm 的有 7 条; 在 0.6~0.3 mm 的有 9 条。

当衬砌采用单层或双层配筋方式时, 衬砌中的裂缝宽度数值显著减小, 但出现裂缝的数量明显增多。单筋衬砌结构的最大裂缝宽度出现在 239° 方位, 其宽度为 1.709 mm; 可观测到的宏观裂缝约为 38 条。双筋衬砌结构的最大裂缝宽度出现在 57° 的位置, 约为 1.151 mm, 与单筋情况相比, 裂缝宽度进一步减小; 可观测到的宏观裂缝共 30 条, 裂缝条数也有所减少。配置双筋情况下, 衬砌中的贯穿性裂缝数量减少。

### 3.2 配筋率对衬砌开裂特性的影响

表 4 给出了不同配筋率(钢筋间距)及配筋方式下的裂缝特征参数统计结果。由表 4 可知: 钢筋直径相同, 间距越大(配筋率越小)时, 衬砌中的裂缝宽度越大; 钢筋间距相同的情况下, 直径越小(配筋率越小)时, 衬砌中的裂缝宽度越大。当配筋率为 0.34% ( $d=16 \text{ mm}$ ,  $s=125 \text{ mm}$ ) 和配筋率为 0.38% ( $d=22 \text{ mm}$ ,  $s=250 \text{ mm}$ ) 时, 最大裂缝宽度数值分别为 1.490, 1.709 mm; 当配筋率为 1.03% ( $d=28 \text{ mm}$ ,  $s=125 \text{ mm}$ ) 和配筋率为 1.07% ( $d=32 \text{ mm}$ ,  $s=165 \text{ mm}$ ) 时, 衬砌中的最大裂缝宽度数值分别为 1.046, 1.096 mm。从这两组数据中可以发现, 配筋率接近(相同)时, 钢筋直径和间距小的配筋方式比钢筋直径和间距大的配筋方式限裂效果更好一些。因此, 对衬砌进行配筋设计时, 宜优先选择钢筋直径和间距都较小的配筋方式来限制衬砌开裂。

### 3.3 钢筋保护层厚度对衬砌开裂特性的影响

图 7 为双筋衬砌结构的保护层厚度变化对衬砌裂缝特征值的影响关系图。由图 7 可知, 相同荷载及配筋条件下, 衬砌中出现的最大和平均裂缝宽度都随着保护层厚度的增加, 呈现出先增后减的变化规律。总体上看, 保护层厚度越小, 最大裂缝宽度越小。当保护层

厚超过 80 mm 后, 最大裂缝变化幅度减小。保护层厚度的增加对平均裂缝宽度和宏观裂缝数量的影响都较小。从裂缝宽度限制的角度考虑, 在满足构造要求的前提下, 衬砌中钢筋尽量选取较小的保护层厚度。但在实际工程中, 保护层越厚, 越能起到阻绝腐蚀性环境的作用, 对钢筋的保护作用更好, 故在具体工程中还应结合当地客观环境, 选取合适的钢筋保护层厚度。

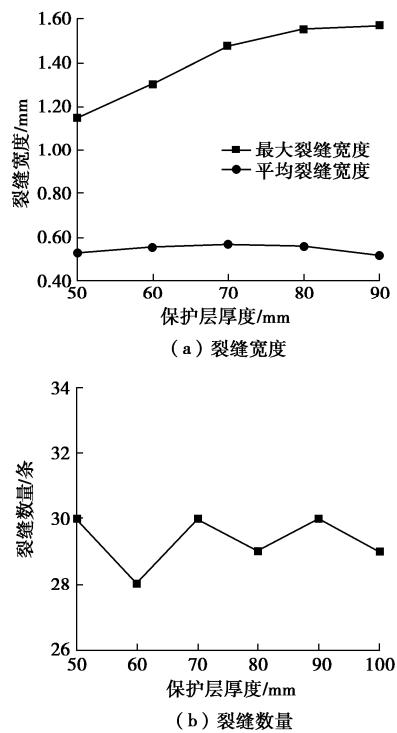


图 7 保护层厚度与双筋衬砌结构裂缝特征关系

Fig. 7 Relationship between cracking characteristics of concrete liner with double-layer rebar and thickness of protective layer

### 3.4 围岩变形模量对衬砌开裂特性的影响

压缩空气储能电站地下储气库的基本设计理念是围岩作为主要承载体, 钢筋混凝土衬砌是次要承载

结构或不承载。正常情况下, 储气库围岩与钢筋混凝土衬砌共同分担压缩空气的内压作用。图8给出了衬砌配筋条件相同(双层配筋方式, 钢筋直径为22 mm, 间距为125 mm, 保护层厚度取50 mm), 但围岩变形模量分别为30, 15, 9 GPa时的裂缝空间分布图。由图8可知: 随着围岩变形模量的降低, 衬砌中出现的裂缝数量明显变多。当围岩变形模量较高(30 GPa)时, 衬砌仅在顶部和底部出现了少量裂缝。当围岩变形模量在15 GPa时, 裂缝主要分布在 $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ 和 $315^\circ$ 4个方位。当围岩变形模量为9 GPa时, 衬砌中出现裂缝的位置和数量大幅度增加, 沿洞周都出现了大量裂缝。

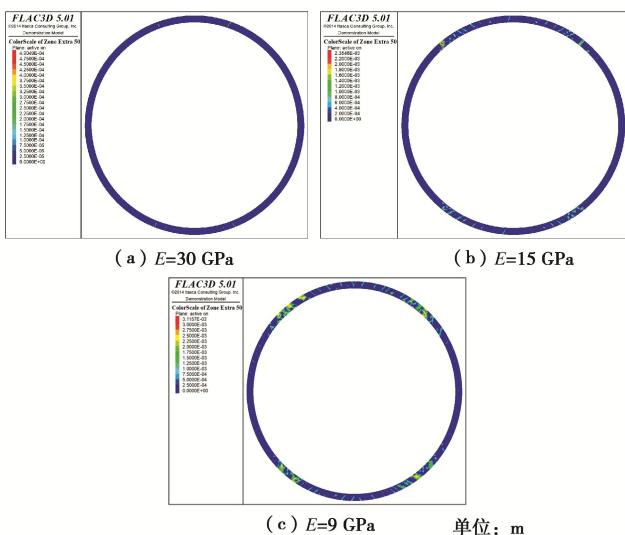


图8 不同围岩变形模量条件下衬砌裂缝宽度云图

Fig. 8 Contours of liner crack width under different rock deformation moduli

图9表明裂缝宽度和裂缝条数的数值均随围岩变形参数的增加而减小。当围岩变形模量从9 GPa增加到30 GPa时, 最大裂缝宽度从3.116 mm大幅度减少到0.490 mm, 裂缝条数从90条减少到只有7条。由此可见, 与改变衬砌配筋率和配筋方式等裂缝控制措施相比, 选择围岩质量更好的地层中建库对控制衬砌开裂更加有效。

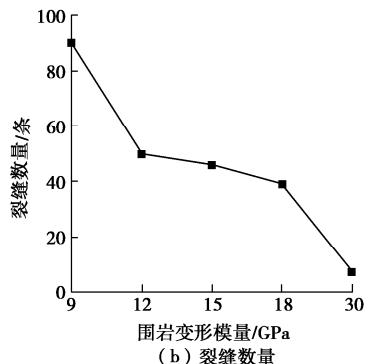
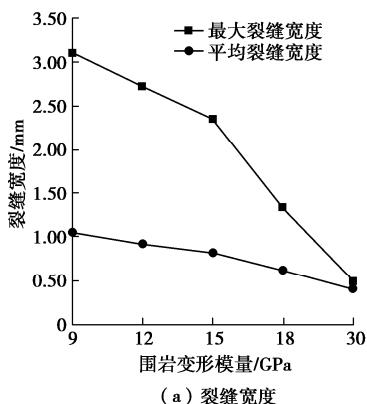


图9 围岩变形模量对衬砌裂缝的影响

Fig. 9 Influences of rock deformation modulus on crack of concrete liner

### 3.5 变温及压力循环共同作用对衬砌开裂特征的影响

压缩空气储能电站地下储气库一般采用一日一充一放的运行方式。地下储气库在运行过程中, 作用在储气库内表面的压力和温度都将产生有规律的循环变化<sup>[3-4]</sup>。围岩和衬砌在变温和压力循环作用下将产生显著热力耦合效应。目前, 人们对这种耦合效应对衬砌开裂特征的影响规律还不清楚。为研究衬砌在充放气循环条件下的开裂变化特性, 针对相同配筋率条件下的双筋衬砌结构进行了30个热力循环耦合作用下的裂缝计算与分析。本节的计算模型中采用直径为22 mm、间距250 mm的HRB400双层配筋方式, 钢筋保护层厚度均取50 mm。数值计算网格与第2节中所述的模型基本一致, 计算参数见表1, 2。

为了研究围岩和衬砌在热力耦合作用下的力学响应特征, 需要首先合理确定储气库内压缩空气的温度和压力变化过程。储气库内的压力和温度同步变化过程可用解析解求得<sup>[2]</sup>, 根据压缩空气储能电站的常规运行方式, 利用解析法得到的压力和温度同步变化过程详见图10。数值计算时, 将该压力和温度变化值按瞬态面力和对流换热边界施加到储气库内表面上以分析热力耦合循环作用对围岩和衬砌力学响应的影响。

图11给出了天然开挖状态下和第30个充气循环结束时的衬砌、围岩的第三主应力分布云图。由图11可知, 经过30个充放气循环作用后并保持低压储气状态时, 衬砌中的第三主应力最大值约1.565 MPa(表现为拉应力), 拉应力主要分布在衬砌顶部和底部; 衬砌其它位置的第三主应力均为压应力, 压应力最大值为-5.225 MPa。第三主应力沿衬砌环向(圆周)呈现拉压交替分布的特征, 表明衬砌开裂后, 裂缝之间的混凝土由原来的受拉状态转化成受压状态。这种现象产生的原因是衬砌混凝土在损伤弱化效应作用下, 结构中出现了应力重分布现象。

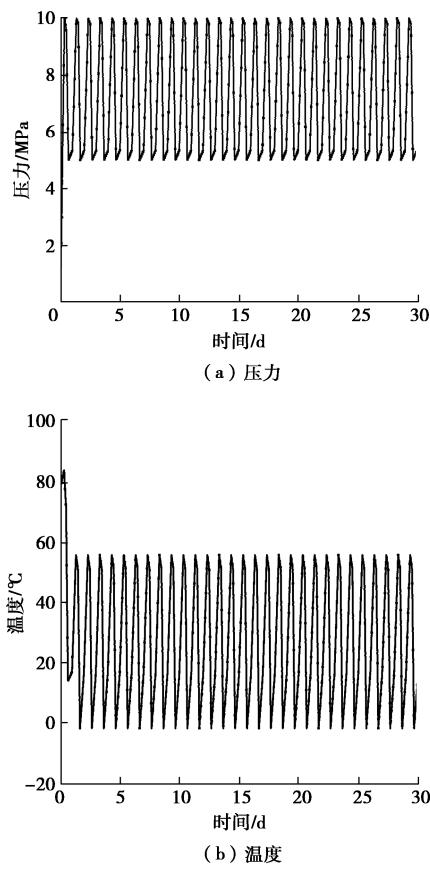


图 10 压力和温度变化过程

Fig. 10 Change process of pressure and temperature

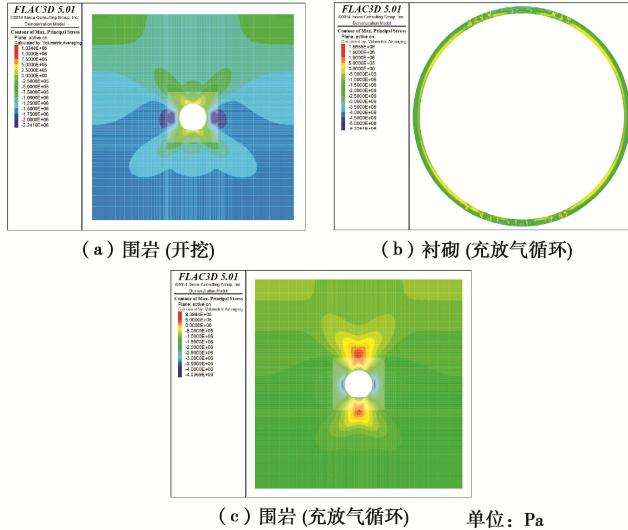


图 11 第三主应力云图

Fig. 11 Contour of third principal stress

由图 11(a)可发现围岩第三主应力最大值为 1.035 MPa (表现为拉应力)，主要集中在围岩顶部和底部，其它位置的第三主应力均为压应力，压应力最大值为 -2.241 MPa；图 11(c)揭示了靠近洞壁上方和下方的围岩第三主应力均表现为拉应力，其最大值为 0.840 MPa，小于围岩抗拉强度；洞壁腰部的围岩第三主应

力表现为压应力，其最大值为 -4.037 MPa；洞室围岩的第三主应力基本上呈对称分布。与天然开挖状态相比，充放气循环使得围岩顶部和底部的拉应力减小，使洞周的压应力值增大。

图 12 为 30 个充气循环结束时储气库位移分布图。由图 12 可知，衬砌顶部的最大径向位移达到 8.520 mm，衬砌底部最大径向位移约为 7.000 mm。储气库洞顶岩石径向位移最大值为 8.128 mm，洞底围岩最大径向位移为 6.620 mm。围岩和衬砌之间的变形协调性较好，开挖状态下，塑性区产生在洞室两侧向上延伸，但在变温及高内压的循环作用下，岩石和混凝土衬砌中的损伤区（如图 13 所示）不断积累，其变形量也越来越大。

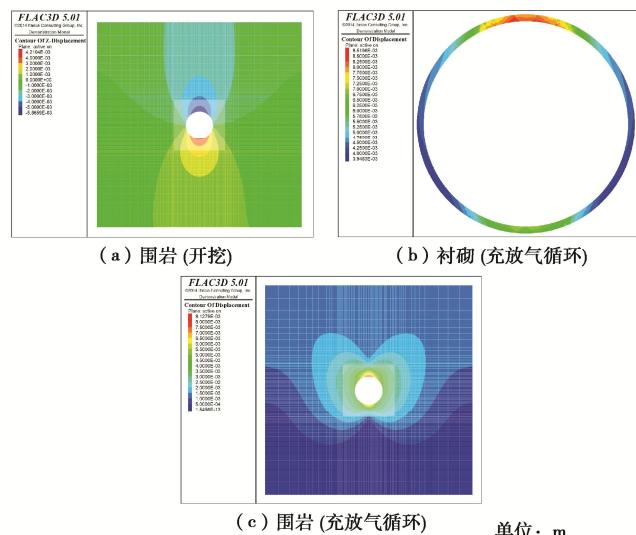


图 12 径向位移分布图

Fig. 12 Contours of radial displacement

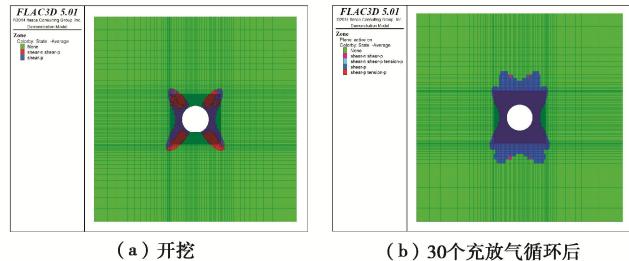


图 13 塑性区分布图

Fig. 13 Distribution of plastic zone

图 14 为第 30 个循环中充气结束时的钢筋受力分布图。由图 14 可见，衬砌内的钢筋均承担拉应力，且顶部和底部位置处的钢筋受到的拉应力最大，腰部钢筋受到拉应力较小。钢筋受到的最大拉应力为 311.25 MPa。由于衬砌裂缝处混凝土单元产生损伤弱化，承担的拉应力大幅度减小，甚至退出受拉状态，使得开裂单元处的钢筋分担了更多的拉应力，因此在裂缝附

近的钢筋拉应力都出现了较大幅度的增加。

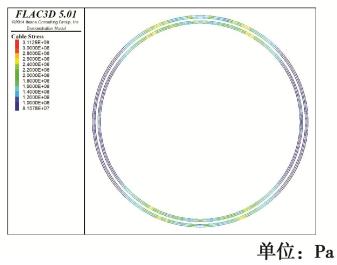


图 14 钢筋受力图

Fig. 14 Stresses of rebar in concrete liner

图 15 给出了经过 1, 5, 10 和 30 次充放气循环后衬砌中的裂缝分布对比图。由图 15 可知, 混凝土衬砌在初次充放气结束后就出现了开裂的现象, 初次充气后衬砌裂缝最大宽度约为 0.086 mm。经过 5 个充放气循环后, 裂缝数量增加迅速; 在第 5~10 个充放气循环过程中, 衬砌裂缝数量和裂缝宽度的增加速度开始变缓; 进入第 10~30 个充放气循环过程后, 衬砌中出现的裂缝数量及分布位置基本稳定。

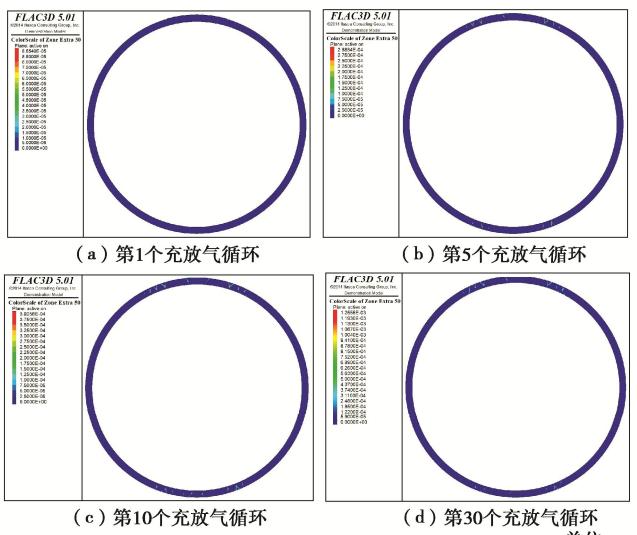


图 15 循环充放气作用下衬砌裂缝宽度云图

Fig. 15 Contours of liner crack width under action of charge and discharge operation cycles

图 16 记录了衬砌中出现的第一条裂缝 (方位 73°) 的宽度在 30 个充放气循环过程中的变化过程线。由图 16 可知, 随着循环次数的增加, 裂缝宽度数值逐渐增大。在前 4 个循环过程中, 裂缝宽度变化过程较为剧烈, 从初裂时的 0.086 mm 大幅度增加到 0.273 mm; 从第 5 个循环开始到第 30 个循环结束, 裂缝宽度从 0.273 mm 增加到 0.473 mm, 裂缝累计增加了 0.2 mm, 也就是说, 在前 4 个充放气循环过程中, 充气结束时的裂缝宽度增加数值大于后 26 个循环阶段中的裂缝宽度增加数值。由此可见, 衬砌在前期充放气过程中裂缝宽度变化幅度大, 后期裂缝宽度变化

幅度小。

图 16 还表明: 衬砌中的裂缝宽度变化与储气库充放气压力的变化规律一致。在充气阶段, 随着储气库压力的逐渐增大, 衬砌中的裂缝宽度也增大。在放气阶段, 随着储气库压力的逐渐减小, 衬砌中的裂缝宽度出现一定程度的减小, 但减小幅度不大。

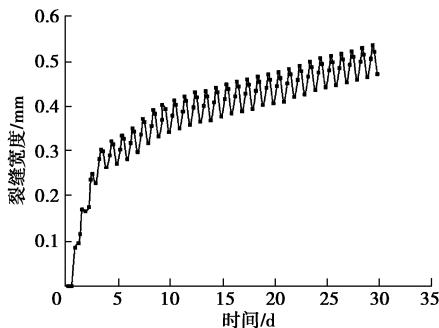


图 16 衬砌裂缝宽度变化过程线

Fig. 16 Variation of crack width with time

## 4 讨 论

影响地下储气库混凝土衬砌开裂特征的因素主要有两类: ①与衬砌结构自身性能相关的内在因素, 例如衬砌是否配筋、配筋方式、配筋率和钢筋保护层厚度等; ②外部环境因素, 例如围岩变形特性、温度及荷载性质与大小等。

通过计算表明: 即使在储气库围岩质量较好 (变形模量为 18 GPa) 和有配筋情况下, 混凝土衬砌在 10 MPa 内压作用下出现的裂缝宽度也达到 1 mm 左右量级, 远大于现有钢筋混凝土在正常使用极限状态下的裂缝宽度限值 0.3~0.4 mm。当采用素混凝土衬砌结构时, 最大裂缝宽度甚至达到了 2 mm 左右量级。虽然在高压地下储气库结构体系中, 衬砌主要作用不是承载, 但裂缝过宽可能导致喷涂式密封膜在巨大的内压作用下被压入裂缝中, 从而使密封膜开裂破坏, 此外, 循环充放气作用下裂缝的不断开合还可导致密封层与衬砌之间的界面发生开裂, 从而影响密封层的长期黏结性能。对于压缩空气储能地下储气库来说, 正确分析其裂缝开裂特征对保证储气库密封功能的正常发挥是至关重要的。因此, 通过配置钢筋来限制衬砌裂缝宽度是必要的, 也是地下储气库结构设计的重中之重。目前还没有关于高压地下储气库衬砌裂缝宽度的控制标准研究成果, 因此, 在中国人工岩穴压气储能电站建设需求越来越旺盛的情况下, 开展衬砌裂缝宽度控制标准的相关研究显得十分迫切。

地下储气库围岩质量对衬砌裂缝的空间分布位置和裂缝宽度大小也存在显著影响。研究成果表明: 围岩质量越好, 变形模量越高, 衬砌结构分担的内压越

少, 衬砌中出现的裂缝数量越少, 最大裂缝宽度也越小。因此, 当工程需要在围岩质量一般的地层中建库时, 可以通过固结灌浆等措施来实现限制衬砌裂缝开度过大的目的。

当考虑储气库内温度和压力同步变化对衬砌的应力和变形影响时, 热力耦合循环作用下衬砌的裂缝宽度最大值量级在 0.5 mm 左右(如图 16 所示), 与不考虑热力耦合作用时得到的结果(1mm 量级)相比, 出现了大幅度降低。其原因是衬砌随着压缩空气温度上升将产生环向膨胀变形, 抵消了部分内压作用引起的环向拉应力, 从而使得衬砌的裂缝宽度出现较大幅度的降低。

计算成果还表明: 对于圆形隧洞式储气库来说, 由于衬砌裂缝分布的空间规律性较好, 因此, 可以采用分区配筋的方式(即裂缝密集处采取较高配筋率, 而裂缝少的部位采用较小的配筋率)来控制裂缝集中区的混凝土开裂宽度, 从而实现裂缝宽度控制和工程造价控制相结合的目标。

## 5 结 论

基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件和钢筋混凝土裂缝分析理论, 开发并验证了可用于压缩空气储能地下储气库应力和变形分析的计算子程序, 进而全面研究了衬砌配筋形式、配筋率、钢筋保护层厚度、围岩类别和循环热力耦合荷载等因素对地下储气库衬砌开裂演化规律的影响, 得到以下 4 点结论。

(1) 在极限运行压力条件下, 衬砌的配筋率越低, 出现的贯穿性裂缝就越多, 裂缝宽度越大, 裂缝数量越少。配筋率相同时, 采用钢筋直径和间距小的配筋方式更容易达到衬砌限裂目标。

(2) 围岩质量越好, 变形模量越高, 其分担的内力越多, 衬砌分担的内力越小, 衬砌中的裂缝宽度越小, 裂缝数量越少。选择围岩质量好的地层建设地下储气库可以大幅度降低衬砌中出现的裂缝数量和减小裂缝开裂宽度。

(3) 考虑温度和压力同步作用时, 可以降低衬砌中的环向拉应力, 计算得到的衬砌裂缝宽度最大值显著低于不考虑温度影响情况下的计算成果。因此, 储气库升压过程引起的温度升高对降低衬砌中裂缝宽度是有利的。

(4) 对圆形隧洞式储气库衬砌结构采用分区配筋的方式可以减少工程的总体配筋率, 从而降低工程造价。

## 参 考 文 献:

[1] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关

- 问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, **30**(25): 1-9. (ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, **30**(25): 1-9. (in Chinese))
- [2] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, et al. 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.
- [3] 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. (XIA Caichu, ZHANG Pingyang, ZHOU Shuwei, 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. (in Chinese))
- [4] 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 Shuangzhan, 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. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] 蒋中明, 李 鹏, 赵海斌, 等. 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. (JIANG Zhongming, LI Peng, ZHAO Haibin, et al. Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(1): 235-241, 252. (in Chinese))
- [7] 邓 建, 肖 明, 陈俊涛. 高压引水隧洞运行期复杂承载过程数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(5): 1261-1267. (DENG Jian, XIAO Ming, CHEN Juntao. Numerical analysis for complex bearing process of high pressure diversion tunnel at runtime[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(5): 1261-1267. (in Chinese))
- [8] 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. (SU Kai, WANG Boshi, WANG Wenchoao, 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. (in Chinese))
- [9] 韩峰, 徐磊, 金永苗. 输水隧洞内压作用下衬砌结构破坏分析[J]. 人民长江, 2020, **51**(增刊1): 149-152. (HAN Feng, XU Lei, JIN Yongmiao. Failure analysis on water diversion tunnel lining under internal pressure[J]. Yangtze River, 2020, **51**(S1): 149-152. (in Chinese))
- [10] 张广权, 曾大乾, 范照伟, 等. 利用地应力评价地下储气库断层密封性方法及应用[J]. 天然气地球科学, 2021, **32**(6): 923-930. (ZHANG Guangquan, ZENG Daqian, FAN Zhaowei, et al. Method and application of in situ stress field to evaluate fault sealing of underground gas storage traps[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, **32**(6): 923-930. (in Chinese))
- [11] 张娟霞, 唐春安, 周秀艳, 等. 基于高性能计算的钢筋混凝土构件等间距裂缝形成过程研究[J]. 工程力学, 2009, **26**(3): 161-167. (ZHANG Juanxia, TANG Chun'an, ZHOU Xiuyan, et al. Study on fracture spacing formation process of reinforced concrete specimen based on high performance calculation[J]. Engineering Mechanics, 2009, **26**(3): 161-167. (in Chinese))
- [12] 任晓丹, 李杰. 基于损伤理论的钢筋混凝土结构裂缝分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, **43**(8): 1129-1134. (REN Xiaodan, LI Jie. Damage theory based analysis of crack opening width for RC structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, **43**(8): 1129-1134. (in Chinese))
- [13] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (LU Xinzhen. Studies on FRP-Concrete Interface[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese))
- [14] MA F J, KWAN A K H. Crack width analysis of reinforced concrete members under flexure by finite element method and crack queuing algorithm[J]. Engineering Structures, 2015, **105**: 209-219.
- [15] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (WANG Xinmin, LI Yiqiang, XU Hongwei. ANSYS Structural Analysis Unit and its Application[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [16] 张飞, 马建勋, 南燕. 混凝土塑性损伤模型参数的选取与验证计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(1): 7-11, 29. (ZHANG Fei, MA Jianxun, NAN Yan. Parameters selection and verification calculation of concrete plastic damage model[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(1): 7-11, 29. (in Chinese))
- [17] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 130-146. (KANG Qingliang. RC Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996: 130-146. (in Chinese))
- [18] KOUSKSOU T, ARID A, JAMIL A, et al. Thermal behavior of building material containing microencapsulated PCM[J]. Thermochimica Acta, 2012, **550**: 42-47.
- [19] 杨侗伟. 钢衬钢筋混凝土压力管道裂缝宽度计算模型研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020. (YANG Dongwei. Research on Calculation Model of Crack Width of Steel Lined Reinforced Concrete Popenstocks[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese))