

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.261

废弃煤矿采空区抽水蓄能水库初步可行性研究

王 丽¹, 李宗泽², 陈 结^{2,3}, 姜德义², 杜俊生²

(1. 重庆商务职业学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
3. 中科院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要:近年来中国的风能太阳能发电取得了巨大的进步,装机容量跃居世界第一。由于相关配套储能设施的匮乏,造成了大量的弃风、弃光、弃电等现象。目前中国的电网储能主要依靠抽水蓄能电站。采用废弃煤矿建设抽水蓄能电站可以提高中国对风能太阳能的高效利用,同时实现废弃煤矿资源化和水资源保护。从采空区的可储空间和采空区的地下布置问题初步研究了废弃煤矿采空区抽水蓄能水库的可行性。研究发现:采空区的渗透系数越大,则越多的水可以被抽出或注入,其有效库容也越大。若是满足有效库容系数(有效库容与总库容的比值)大于 0.8,则采空区的渗透系数需大于 $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$,采空区上下水库间距越小,上水库水量的漏失量也越大。

关键词:煤矿;抽水蓄能;地下水库;采空区

中图分类号:TD325.3;TV743 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2020)04-047-08

Preliminary feasibility analysis of abandoned coal goafs as PHES reservoirs

WANG Li¹, LI Zongze², CHEN Jie^{2,3}, JIANG Deyi², DU Junsheng²

(1. Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, P. R. China; 2. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: Clean energy, such as wind power and solar power, has been greatly developed in China, whose installed capacity has ranked the first in the world. However, the shortage of the matched storage facilities causes a lot of wind, solar and electricity abandonment. Pumped-hydro energy storage (PHS) plants currently dominate the energy storage market in China. Utilizing abandoned coal mine goafs as PHS reservoirs can not only enhance the efficient utilization of clean energy, but also reuse the wastes and protect the underground water resources. This paper investigates the preliminary feasibility of goafs as PHS underground reservoirs in terms of storable space and safe distance. The results show that as the permeability of goaf increases, the effective capacity of reservoirs rises. With the permeability above $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, the effective coefficient(the ratio of effective capacity to total capacity) of underground goaf-reservoir can reach 0.8. A smaller horizontal distance between two reservoirs will lead to a larger leakage rate of the upper one and the acceptable distance for a typical coal mine geology is suggested. The results can provide a reference for the construction of coal mine PHES plants.

Keywords: coal mine; pumped-hydro energy storage; underground reservoir; goaf

收稿日期:2019-11-02

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-005)。

Supported by the National Science and Technology Major Project (2016ZX05045001-005).

作者简介:王丽(1983—),重庆商务职业学院讲师,主要从事安全科学方面的研究工作,(E-mail) Tianlizilizi@163.com。

中国经济的快速发展要求每年需要消耗大量的能源。2017 年中国能源消耗 44.9 亿吨标准煤,产生的碳排放达到 105 亿吨,能源消耗和碳排放均居世界第一。由此而造成的环境污染也已达社会能够承受的极限,这与中国经济环境的可持续发展目标相矛盾。按照中国 2015 年 12 月签订的《巴黎协定》约定,2050 年之前中国的碳排放要降到 35 亿吨以下,意味着中国不仅要提高传统化能源的高效清洁利用,同时更要大力发展清洁能源的使用,如风电、太阳能^[1]。

太阳能、风能作为新能源,其时间分布的不均衡性(如太阳能仅白天有),严重限制了它的发展。2017 年中国风电、太阳能的装机容量近 300 GW,达到全国电力能力的 17%。2008 至 2015 年,国家对新能源的投资每年保持 20% 以上的增长速度,但近年投资速度呈现下降趋势,主要是因为相关储能设施的缺乏,造成了大量的弃电现象^[2],其中尤其以“三北”地区最为严重。

目前常用的大规模储能,主要有抽水蓄能和压缩空气^[3-5]两种。大型压缩空气蓄能电站由于要求严格的地质条件,使其应用有限。1978 年至今 40 余年世界上仅有 2 座运行。抽水蓄能主要利用上下两个具有高差的水库储存电能转化而来的重力势能。由于中国水电技术相对成熟可靠,抽水蓄能电站近 20 年来大力发展,尤其以山地为主的南方与东部沿海地区,需求的蓄能水库相对容易选址,而北方多为高原平地,水库选址问题突出,难以找到合适的水库。

同时中国北方水资源极其匮乏,地表年均水分蒸发量是降雨量的 4 倍。因此,诸多专家提出采用废弃煤矿作为抽水蓄能电站的上下水库,既能使废弃矿井资源化,提高可再生清洁能源的利用效率^[6],又能减少人力、物力,节省投资,一举多得。顾大钊等^[7-8]最初采用地下煤矿采空区建立地下水库,实现煤炭开采与水资源利用的有机结合。谢和平等^[9-10]进一步提出了煤矿地下水库、矿井水循环利用与抽水蓄能发电一体化的构想,充分利用煤炭开采过程中形成的巨大的地下空间,实现储水、蓄能发电、矿井水循环利用和新能源开发等多重目标。在国外,如德国、西班牙、南非等^[11-12]均提出利用煤矿地下空间建立抽水蓄能电站。

以上诸多研究为煤矿抽水蓄能电站构思了重要发展路线。然而其大多针对煤矿废弃巷道^[13-14],对废弃煤矿采空区鲜有涉及。笔者针对废弃煤矿采空区作为抽水蓄能水库在循环的注水放水过程中水库库容的变形与渗漏问题开展研究,为煤矿采空区抽水蓄能电站的建设评估提供参考。

1 理论与模型

1.1 煤矿地下水库模型

煤炭开采后形成的采空区在竖直与水平范围对岩层的力学特性均有影响。按照力学特性与破碎程度不同在被采煤层竖直方向存在“竖三带”,跨落带、裂隙带与下沉带^[15],如图 1 所示。

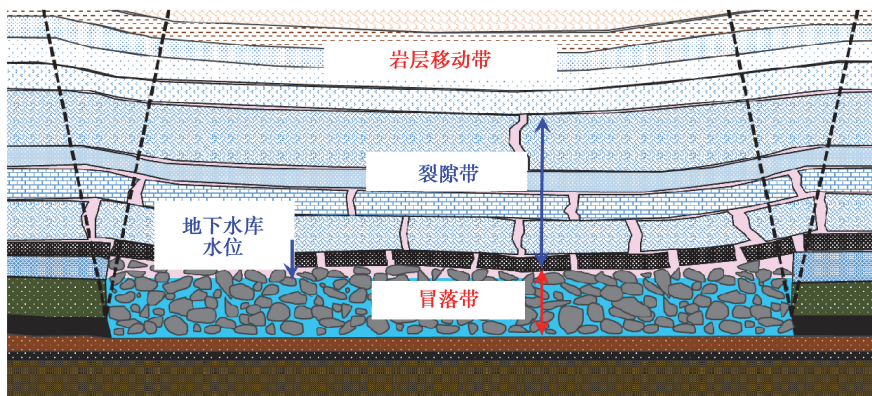


图 1 煤矿采空区“竖三带”

Fig. 1 “Vertical Three Zones” in coal mine goafs

各带的高度受煤厚、采深、围岩岩性及水文地质等因素的影响,较为复杂。为简便分析,常采用经验公式估算“三带”的高度位置(中硬岩性时)^[16]。

$$h_1 = \frac{100M}{2.1M + 16} + 2.5, \tag{1}$$

$$h_2 = \frac{100M}{1.6M + 3.6} + 5.6, \tag{2}$$

式中: M 为采高, h_1, h_2 分别为跨落带、裂隙带距离煤层底板的高度。煤层底板受开采活动影响,围岩容易形成应力集中,造成裂隙发育。其影响深度可以用公式(3)~(5)进行评估。

$$h = \frac{x_a \cos \varphi}{2 \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi}, \tag{3}$$

$$x_a = \frac{M \ln \frac{\zeta \gamma h_0 + C \cot \varphi_m}{\xi C \cot \varphi_m}}{2 \xi \tan \varphi_m}, \tag{4}$$

$$\xi = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}, \tag{5}$$

式中: C, φ 分别为底板围岩的黏聚力和摩擦角; M, φ_m 分别是煤层的厚度、摩擦角; ζ, γ 和 h_0 分别是应力集中系数、上覆岩层容重和煤层埋深, x_a 和 ξ 为中间参数。

1.2 裂隙渗流模型

地下水在煤岩裂隙中的渗流速度相对较慢,一般认为服从达西定律,即

$$v = \frac{k}{\mu_w} \frac{dp}{dr}, \tag{6}$$

式中: v, k 分别代表流体的渗流速度和介质的渗流系数; $\frac{dp}{dr}$ 表示压力梯度; μ_w 为水的黏滞系数。

1.3 物理计算模型

神东矿区大柳塔煤矿是中国第一个采用采空区储水的煤矿地下水库,地下库容达 710.5 m³,包含 3 个地下水库,分别为四盘区、老六盘区及新六盘区水库。经过地下采空区储备和净化的水能够为矿井生产、生态及生活用水提供充足的水源。由此,本计算模型以大柳塔煤矿为基本背景。大柳塔煤矿地处陕西省神木县大柳塔镇乌兰木伦河畔,核定生产能力 2.17×10⁷ t,煤矿存在多层可采煤层,可以利用上下煤层采空区储水发电。建立二维平面模型如图 2 所示开展分析。图 2 左侧数值为岩层厚度,右侧数值为各个岩层序列编号,初始渗透系数取值如表 1 所示。 α 为岩层移动角,取 15°。采空区长度为 2 000 m。由于地下隔水坝体强度要求,水位最大高度假设为 20 m。模型的左右和下部边界均设置为不透透边界,上部为自由边界,接通大气。流体仅受重力作用发生渗流,流动本构模型为达西定律,如式(6)所示。

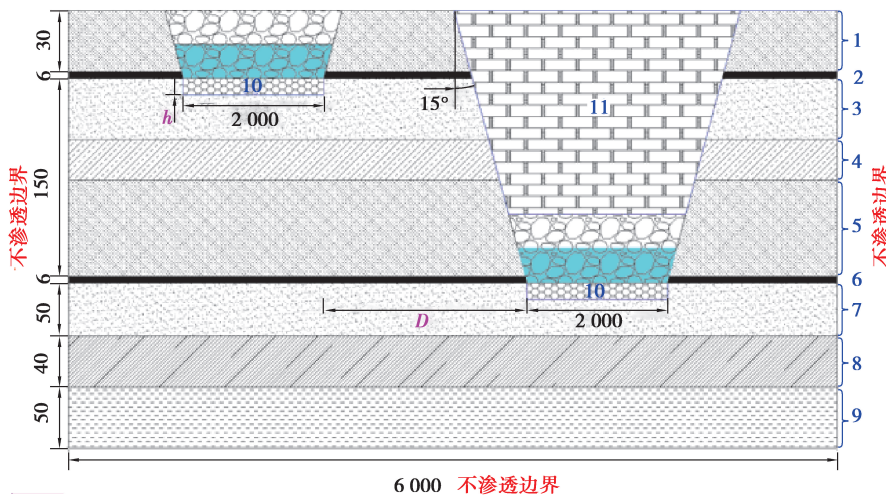


图 2 煤矿地下水库物理模型

Fig. 2 Physical model for the underground goaf reservoir

表 1 不同岩层的厚度与渗透系数

Table 1 Taking values of the thickness and permeability for rocks

序号	厚度/m	渗透系数/ m^2
1	30	1×10^{-15}
2	6	1×10^{-16}
3	40	1×10^{-15}
4	30	3×10^{-16}
5	80	1×10^{-15}
6	6	1×10^{-16}
7	30	1×10^{-15}
8	25	3×10^{-17}
9	30	1×10^{-17}
10	式(3)~(5)计算所得	1×10^{-13}
11	式(1)(2)计算所得	3×10^{-13}

采用有限元方法软件 COMSOL Multiphysics 5.3a 计算,计算分析主要分为 2 个问题:1)单一采空区水库的抽放水问题,即在设定抽水、注水速度下水库内的渗流场问题;2)上下两水库间水量的静态流失,即上水库储存的水在一天内向下水库渗流的问题。分析过程均采用稳态分析方法。

2 结果与分析

常规抽水蓄能电站所用的地面露天水库液面由于蓄水、放水的需要呈现周期性变化。地下采空区水库由碎散煤体与岩块组成,孔隙裂隙间水的流动需要一定的压差驱动,因此液面为非水平液面。采空区水库需要设置、开挖集水井实现抽放水,假定集水井位置设置在采空区边界某一边,初始直径为 4 m,最大流速为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,采空区初始渗透率为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ 。

2.1 注水时采空区水库浸润线

通过达西定律计算发现,当注水速度为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,注水处(即集水井)水位达到最高水位时,液面呈现如图 3 所示形态。横轴为零对应的数值即集水井的水位。图中越远离集水井的位置,液面越低,表明注入的水并未能及时流动到远离集水井的位置。虽然理论上远离集水井的位置仍有大量的可以储水的空间,但是由于集水井已达到最高水位,无法继续注水。因此,剩余的大量空间体积可以认为是无效体积。随着采空区渗透系数的增大,液面越趋向于平缓,表明采空区水库的有效库容(即能够实际用于发电、蓄水的水库容量)越大,其可注采性也就越好。

当注水速度不同时,可以发现注水速度越快,液面越趋向于陡峭(见图 4),表明集水井中水位由于快速注水很快达到了最高水位,但是由于没有足够的时间使水向外围流动,导致有大量的剩余空间未能储水,降低了采空区水库的有效库容,因此控制采空区水库的注水速度对于保障采空区的有效库容十分重要。

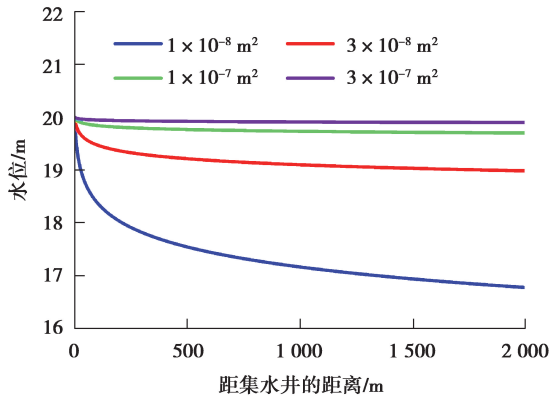


图 3 不同渗透率下采空区注水时最高浸润线

Fig. 3 Highest saturation line of the goaf reservoir during water injection with different permeability

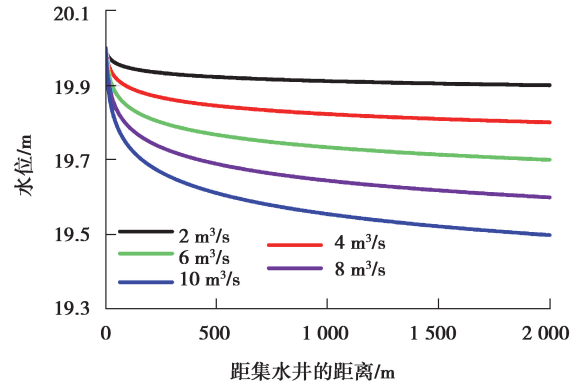


图 4 不同流量时采空区注水时最高浸润线

Fig. 4 Highest saturation line of the goaf reservoir during injection with various water flow

2.2 放水时采空区水库浸润线

当水库处于抽水/放水时,同样地可以发现当放水速度恒定($6 \text{ m}^3/\text{s}$)时,液面随着渗透系数增大而趋近平缓(如图 5 所示)。当放水速度变小时,液面也趋近平缓(如图 6 所示),表明放水时能够有更多的水被抽出,从而提高水库的可抽水性,增大其有效库容。

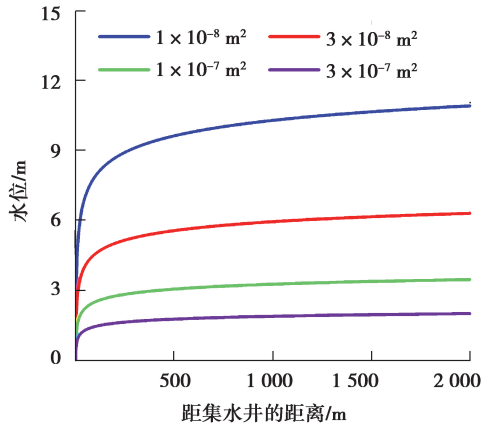


图 5 不同渗透率下采空区放水时最低浸润线

Fig. 5 Lowest saturation line of the goaf reservoir during waterreleasing with different permeability

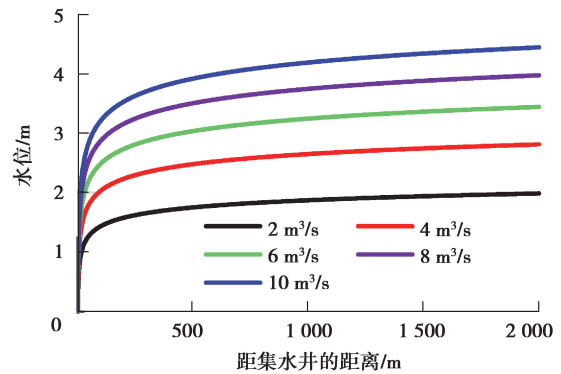


图 6 不同流量时采空区放水时最低浸润线

Fig. 6 Lowest saturation line of the goaf reservoir during releasing with various water flow

由于发电功率的需要,水库的流速通常要满足一定的流量需求。假设最大流量为 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,通过注水时最高液面与放水时最低液面相减可以获得水库的最大可抽水、注水量,即水库的有效库容。如图 7 所示,采空区的渗透系数越大,其有效库容也越大。若是满足有效库容系数大于 0.8(即有效库容与总库容的比值),则采空区的渗透系数需大于 $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。

2.3 采空区水库渗漏

图 8 展示了抽水蓄能上下两水库,在自然水力梯度作用下的渗流场与压力场情况,其中云图颜色表征水压的大小,红色箭头表征水流方向,其大小表明水的流量大小。计算结果发现上下水库间的渗流主要以水流通

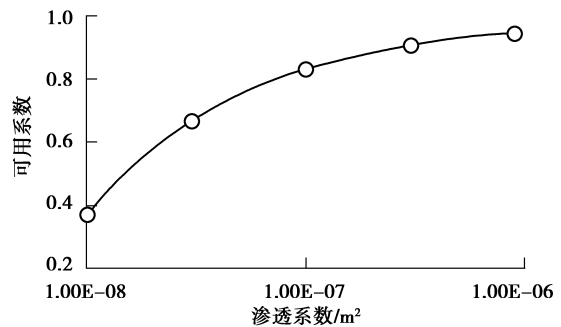


图 7 不同渗透率时采空区水库库容可用系数

Fig. 7 Usability coefficient of the goaf reservoir with different permeability

过采空区顶部的岩移带和裂隙带为主,同时底部破碎带的流量也相对较大。随着两水库间距逐渐减小,渗流量逐渐增大。通过对流量在水库边界上积分可以获得水库的渗漏总量,从而获得渗漏率。图 9 展示了渗漏率与水库间距的关系,发现水库间距越近,渗漏率越大。通常容许渗漏率不超过 1%,因此,可以反演获得水库的最小间距为 245 m。

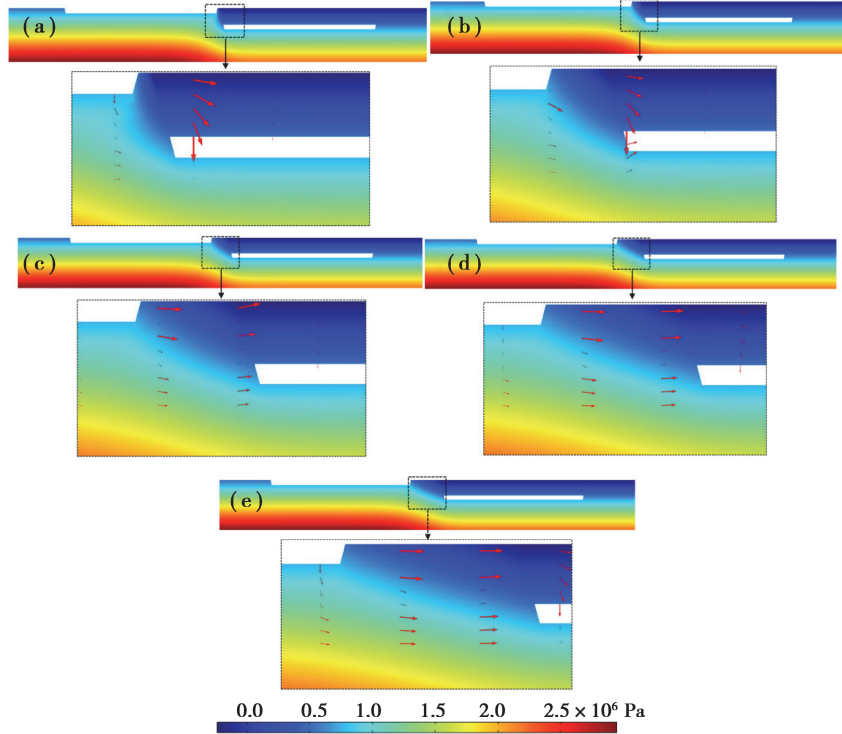


图 8 不同水库间距时水库渗流变化

Fig. 8 Seepage of the goaf reservoir with different distance between different reservoirs

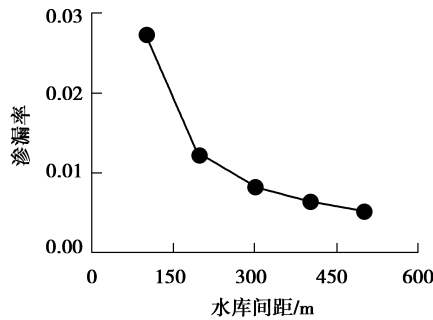


图 9 不同水库间距时水库渗漏率

Fig. 9 Leakage rate of the goaf reservoir with different distance between different reservoirs

3 讨 论

煤矿采空区抽水蓄能水库的良好运行不仅涉及地下采空区渗漏率与可储空间问题,还包括地下抽水蓄能水库的整体安全性。现有的地下水库是由煤柱坝体和人工坝体围成的一个封闭的采空区空间,在塌陷后的破碎岩层缝隙储存水资源。其安全性主要涉及保护煤柱的安全性、人工坝体的稳定性以及采空区破碎岩体的理化特性等。目前建成的地下水库(大柳塔煤矿地下水库)保护煤柱的最小宽度为 30 m,煤体的抗压强度 14.5~19.5 MPa,能够满足水库建设的安全性需求^[17]。人工坝体主要是在工作面巷道口采用混凝土等材

料进行封闭,施工采用“T”字型人工坝体进行,最大水位承载能力达到 60 m 以上,完全能够满足目前最大水位 20 m 的安全要求^[18-19]。采空区破碎岩体在长期或反复浸水作用下的物理化学性质的演化同样可能影响地下采空区水库的可储性。从现有的大柳塔地下水库运行经验来看,通过选择避免使水接触水化性质强烈的岩石(如泥岩、页岩等),可以保证采空区破碎岩体长期的储水能力^[20]。但是反复注排水作用下破碎岩体的性质还鲜有报道,仍需进一步研究。另一方面,采空区遗煤中的含硫量对煤矿地下水质的影响巨大。含硫成分可以通过与水中溶解氧发生反应,造成地下水库水质的酸化,从而影响周边水文生态环境与地下坝体的安全^[21-22]。

因此针对地下抽水蓄能水库的选址,需要从水文、地质、环境等多方面入手,才能保证地下抽水蓄能水库的长期安全稳定运行。

4 结 论

通过采空区空间可用体积与采空区渗漏流量的模拟估算,对采空区作为地下抽水蓄能电站水库的可行性进行了初步评估,得到的主要结论有:

1)注采水速度越慢,液面越趋向于平缓,表明水库在达到最高水位时,可以储存更多的水,或水库水位达到最低时可以有更多的水被采出,从而提高采空区水库的有效库容。采空区的渗透系数越大,则越多的水可以被抽出或注入,其有效库容也越大。若满足有效库容系数大于 0.8,则采空区的渗透系数需大于 $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。

2)采空区上下水库间距越小,则上水库水量的漏失量也越大。以北方某煤矿地质条件作为计算初始参数,容许渗漏率不超过 1%时,水库的最小水平间距为 245 m。

参考文献:

- [1] 周焕濠. 试析试析《巴黎协定》中的国家自主贡献模式及中国的承诺[J]. 现代农业研究, 2019(1): 119-121.
ZHOU Huanhao. A analysis of the model of independent contribution of the state in the Paris agreement and China's commitment[J]. Modern Agriculture Research, 2019(1): 119-121. (in Chinese)
- [2] 李娜娜, 谢国辉, 李琼慧, 等. 我国新能源消纳预警分析研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(17): 69-74.
LI Nana, XIE Guohui, LI Qionghui, et al. Research on early warning analysis of new energy accommodation in China[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(17): 69-74. (in Chinese)
- [3] Wong I H. An underground pumped storage scheme in the Bukit Timah Granite of Singapore[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(4): 485-489.
- [4] Fan J Y, Jiang D Y, Chen J, et al. Fatigue performance of ordinary concrete under discontinuous cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 974-981.
- [5] Fan J Y, Liu W, Jiang D Y, et al. Thermodynamic and applicability analysis of a hybrid CAES system using abandoned coal mine in China[J]. Energy, 2018, 157: 31-44.
- [6] 毕忠伟, 丁德馨, 张新华. 地下采空区合理利用综述[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(S1): 1080-1083.
BI Zhongwei, DING Dexin, ZHANG Xinhua. A review of the utilization of mined area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(S1): 1080-1083. (in Chinese)
- [7] 李庭, 顾大钊, 李井峰, 等. 基于废弃煤矿采空区的矿井水抽水蓄能调峰系统构建[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 93-98.
LI Ting, GU Dazhao, LI Jingfeng, et al. Construction of pumped storage peak shaving system for mine water based on abandoned coal mine goaf[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 93-98. (in Chinese)
- [8] 顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1589-1597.
GU Dazhao, YAN Yongguo, ZHANG Yong, et al. Experimental study and numerical simulation for dynamic response of coal pillars in coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1589-1597. (in Chinese)
- [9] 谢和平, 高明忠, 高峰, 等. 关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1355-1365.
XIE Heping, GAO Mingzhong, GAO Feng, et al. Strategic conceptualization and key technology for the transformation

- and upgrading of shut-down coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1355-1365. (in Chinese)
- [10] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 965-972.
XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: principles, present situation and future[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 965-972. (in Chinese)
- [11] Winde F, Kaiser F, Erasmus E. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 668-682.
- [12] Alday J G, Zaldívar P, Torroba-Balmori P, et al. Natural forest expansion on reclaimed coal mines in Northern Spain; the role of native shrubs as suitable microsities [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (14): 13606-13616.
- [13] 罗魁, 石文辉, 曹飞, 等. 利用废弃矿洞建设抽水蓄能电站初探[J]. *中国能源*, 2018, 40(10): 42-47.
LUO Kui, SHI Wenhui, CAO Fei, et al. Preliminary study on construction of pumped storage power station by using abandoned mines[J]. *Energy of China*, 2018, 40(10): 42-47. (in Chinese)
- [14] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(1): 195-200.
WANG Tingting, CAO Fei, TANG Xiubo, et al. Technical feasibility analysis of utilizing mine to construct pumped storage plant[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(1): 195-200. (in Chinese)
- [15] 黄素果, 魏艳敏. 采空区覆岩破坏规律及区带划分数值模拟研究[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(5): 32-34.
HUANG Suguo, WEI Yanmin. Numerical simulation research of goaf upper rock stratum failure law and zone divide[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(5): 32-34. (in Chinese)
- [16] 黄学满. 煤矿采场“竖三带”的确定方法及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(S2): 48-50.
HUANG Xueman. Application and determination method of vertical three regions of working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(S2): 48-50. (in Chinese)
- [17] 陈苏社, 黄庆享, 薛刚, 等. 大柳塔煤矿地下水库建设与水资源利用技术[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(8): 21-28.
CHEN Sushe, HUANG Qingxiang, XUE Gang, et al. Technology of underground reservoir construction and water resource utilization in Daliuta coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 21-28. (in Chinese)
- [18] 龙卿吉, 张福斌. 挡水墙设计及施工应注意的几个问题[J]. *煤矿安全*, 2001, 32(9): 13-14, 36.
LONG Qingji, ZHANG Fubin. Several issues should be noticed in the design and construction of retaining walls [J]. *Safety in Coal Mines*, 2001, 32(9): 13-14, 36. (in Chinese)
- [19] 齐蓬勃. 煤层中挡水墙施工工艺[J]. *煤矿开采*, 2008, 13(4): 92-93.
QI Pengbo. Construction technique of water-retaining wall in coal seam[J]. *Coal Mining Technology*, 2008, 13(4): 92-93. (in Chinese)
- [20] 陈苏社, 鞠金峰. 大柳塔煤矿矿井水资源化利用技术[J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(2): 125-128.
CHEN Sushe, JU Jinfeng. Utilization technology of mine water resources in daliutamine[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(2): 125-128. (in Chinese)
- [21] Pujades E, Willems T, Bodeux S, et al. Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(6): 1531-1546.
- [22] Pujades E, Jurado A, Orban P, et al. Parametric assessment of hydrochemical changes associated to underground pumped hydropower storage[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 599-611.

(编辑 张 苹)