

废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选

修雅馨¹ 刘钦节^{2,3} 付强¹ 杨卿干¹ 包兴芮¹ 邓卓越¹

- 安徽理工大学 安徽省关闭废弃矿井资源开发利用工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
- 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南 232001;
- 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽 合肥 230031)

[摘要] 为开展废弃矿井地下空间物理储能方式对比优选,在总结分析废弃矿井抽水蓄能、重力储能和压缩空气储能原理及发展现状的基础上,采用层次分析法选取6个一级指标(资源条件、技术方案、经济效益、环境影响、安全保障及能耗水平)、19个二级指标以及3种储能方案,建立了废弃矿井地下空间物理储能方式评价指标体系。以山西白家庄煤矿为例,基于专家打分法分析了各指标及方案层权重,获得一二级指标中的主控因素及影响程度,并基于此分析对比3种物理储能方式的优劣。结果表明,在一级指标中,安全保障权重占比最高,环境影响次之,之后依次是资源条件、经济效益、能耗水平和技术方案;在二级指标中,权重最高的3个指标分别是技术保障、自然生态、资金投入;在3种方案中,重力储能最具优势,其次是抽水蓄能,最后是压缩空气储能。研究结果可为废弃矿井地下空间物理储能方式的选择提供参考。

[关键词] 废弃矿井; 物理储能; 重力储能; 压缩空气储能; 抽水蓄能; 层次分析法; 评价体系

[中图分类号] TK02 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2024)02-0006-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002

0 前言

近年来,为了实现“碳达峰、碳中和”的宏伟目标,国家积极推动能源生产和消费的变革,努力构建

绿色、可持续、安全、高效的能源体系,并将新能源作为重点,建立一个完善的新型电力体系^[1]。随着技术的进步,中国的新型电力系统正在迅猛增长,但缺乏大型储能设备和先进储能技术^[2]。在现有储能技术中,抽水蓄能、重力储能、压缩空气储能等作为常见的大规模物理储能方式得到了广泛的发展,可

作为建设现代智能电网新型电力系统的重要支撑。目前,我国许多矿井都面临着关闭或废弃的问题,而这些矿井内都蕴藏着大量的资源,若不开发利用,将会造成巨大的能源浪费,甚至引发环境和安全问题,对这些资源进行二次开发利用,不仅可以变废为宝,还符合我国的可持续发展战略^[3-6]。废弃矿井中大量巷道硐室可为大规模物理储能提供潜在的储存空间。若将废弃矿井与物理储能相结合,不仅可以高效利用地下空间,更能为中国的电力系统发展作出贡献。

本文介绍了抽水蓄能、重力储能和压缩空气储能3种物理储能方式的原理及现状,利用层次分析法,建立了废弃矿井地下空间物理储能的评价指标体系,以山西白家庄矿实际条件为例,采用专家打分

[收稿日期] 2023-11-29

[基金项目] 合肥综合性国家科学中心能源研究院重大培育项目(21KZS215);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2021-016);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金项目(EC2021014);山西省科技厅揭榜招标项目(20191101016)。

[作者简介] 修雅馨(1999—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要从事废弃矿井资源开发与利用研究。

[通信作者] 刘钦节(1980—),山东临沂人,教授,博士,主要从事废弃矿井资源开发利用与深部岩石力学研究。

[引用格式] 修雅馨,刘钦节,付强,等.废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选[J].绿色矿冶,2024,40(2):6-13.

XIU Yaxin, LIU Qinjie, FU Qiang, et al. Comparison and optimization of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(2): 6-13.

法,对比分析3种储能方式的优缺点,为废弃矿井地下空间物理储能方式选择提供借鉴。

1 废弃矿井物理储能发展现状

物理储能作为电力系统常见的能源储存转化技术,相比于其他储能方式,具有应用规模大、成本低、使用寿命长、对环境友好等优点,适合电网调峰和实现电能昼夜转移,具有广阔的应用空间和巨大的发展潜力^[7-8]。以电力系统运行的实际情况为依据,选择一种合理、切实可行的物理储能技术,可降低系统耗能压力,提高能源利用率^[9]。将物理储能与废弃矿井相结合,不仅能有效缓解储能电站建设选址压力,也能够有效实现废弃矿井遗留地下空间资源的合理利用,助力相关能源企业与地区的转型发展。

1.1 废弃矿井抽水蓄能

废弃矿井抽水蓄能是传统抽水蓄能方式的进一步延伸和发展,在一定程度上缓解了传统抽水蓄能电站选址困难的问题,废弃矿井为抽水蓄能电站的建立提供了巨大的地下空间、矿井水资源以及天然的高度差。废弃矿井抽水蓄能的原理:地表塌陷区作为上水库,井下硐室作为下水库。在用电高峰期,将水从上水库放出,实现能量由势能向电能的转化,从而实现发电;在夜晚或者用电低峰期,利用水泵水轮机将下水库的水抽至上水库,完成储能。

20世纪六七十年代,西方国家就提出了利用废弃矿井建设水电站的构想,但由于多种原因该方案一直未能得到真正的实施^[10]。美国的新泽西州曾计划建设一个2 000 MW半地下抽水蓄能电站,最终以1 000 MW容量代替^[11];德国的Prosper-Haniel废弃煤矿是全球第一个被用于抽水蓄能发电的废弃煤矿^[12];西班牙计划在Asturian煤矿建造一个半地下抽水蓄能电站^[13]。目前我国对于废弃矿井的研究较少,抽水蓄能还没有成功案例,但已进入实践探索阶段。顾大钊^[14]对矿井地下蓄水池的设计、建造和运行进行了系统的研究;卞正富等^[15]对黄河九省废弃煤炭资源利用的发展潜力进行了量化评价;谢和平等^[16]还提出了矿井地下水库、矿井水循环利用和抽水蓄能发电集成的技术概念。

抽水蓄能电站占地面积大,在矿井内建立水库,不仅减少了地面土地占用面积,还可以减少水分的蒸发^[17];将废弃矿井改造成抽水蓄能电站,可以显著减少前期的建设投资成本;有助于缓解因矿区开采而产生的地面塌陷问题;由于水库位于地下,也可

最大限度地保留地表植被不被大面积破坏。因此,利用废弃矿井建设抽水蓄能电站具有多种天然的优势,对我国社会、环境、经济均有重要战略意义。

1.2 废弃矿井重力储能

重力储能的原理与抽水蓄能类似,只是将储能介质由水换成了重力块,即储存电能时,利用电动机将重力块提升至一定的高度,实现电能到势能的转换;需要用电时,放下重力块,利用发电机实现势能到机械能的转换,最后转化为电能^[18]。

2018年,以重力储能技术为基础的瑞士储能系统制造商Energy Vault公司计划为印度塔塔电力公司建设可提供35 MWh的重力储能系统,该塔式起重式储能系统的储能效率可以达到90%左右^[19];英国的Gravitricity公司计划利用现有的废弃竖井改造建设一个深井重力储能系统^[20],采用钻机作为重物,通过在钻井中重复吊起与放下钻机,实现储能和发电。2022年3月,中国天楹重力储能项目落户江苏,研究利用塑料、工程渣土、固废等工业垃圾为原材料制备重力块^[21];夏焱等^[18]提出可利用建筑垃圾作为储能媒介,该方法具有环保性和经济性;肖立业等^[22]提出在地下竖井(或斜井)中建造储能塔的方案,并列举了竖井和斜井各自的适用场景。

重力储能不再单一地依赖储水量储能,降低了对地理区位的要求,同时其原理简单、门槛较低,对井下结构的要求也大幅降低;重力储能系统性能基本保持稳定不变,不会因周期性工作而降低,系统效率最高可达90%^[23],井上、井下设备条件简单,建设成本和度电成本都低于抽水蓄能,因此重力储能具有很大的应用前景。

1.3 废弃矿井压缩空气储能

废弃煤矿的永久性巷道和硐室进行耐压封闭后,可作为压缩空气储存空间,在用电低谷期,利用电网中的剩余电力,带动空气压缩机将能量储存到硐室中;在用电高峰期,将硐室内的压缩空气释放出来驱动发电机发电^[24]。

1978年,储气库位于地下600 m废弃矿洞中的德国Huntorf压缩空气电站正式投入商业运行^[25];1991年,美国压缩空气蓄能电厂的储气洞在地下450 m建成投产^[26]。目前俄罗斯、日本、意大利、瑞士、法国等国家也积极加入开发压缩空气储能电站的队伍中。我国压缩空气储能仍处于起步阶段,绝热压缩空气储能电站已完成示范电站的建设。2017

年,江苏金坛盐穴压缩空气储能发电系统获批立项,这是我国第一座先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)国家示范电站^[27]。2021年9月,江苏金坛盐穴60 MW压缩空气储能国家试验示范项目一期工程送电成功^[28]。2022年9月28日,全球最大规模350 MW盐穴压缩空气储能项目——山东泰安2×300 MW级压缩空气储能创新示范工程开工^[29],目前已落地投产。

目前,压缩空气储能处于科研示范向商业化示范过渡阶段,系统储能效率低、单机容量有待提高、大型系统需要特定地理条件等问题制约着压缩空气储能发展。

2 废弃矿井物理储能评价的层次分析模型

2.1 层次分析法介绍

层次分析法是一种主观赋值评价方法,主要依据决策者的经验分析判定各指标的重要性,是一种定性与定量相结合的决策分析方法,可使一种抽象现象或问题变得简单起来,有利于直观地对复杂问题进行判断,流程图如图1所示。

2.2 工程背景介绍

白家庄煤矿位于太原市西南万柏林区西铭乡白家庄村,于1934年8月创建,是西山矿区最早的生产矿井。为响应“供给侧结构性改革要求”,2016年10月南坑永久性关闭,二号井关停。

白家庄矿地理位置优越,离太原市中心约20 km,矿区内有公路与太原市相通。矿区周边有高速公路和运煤铁路专线直达,交通便利。井田呈一北宽南窄和不规则多边形,面积约为16 km²,位于太原西山煤田东北隅,属中低山地区,地势为西南高、东北低。

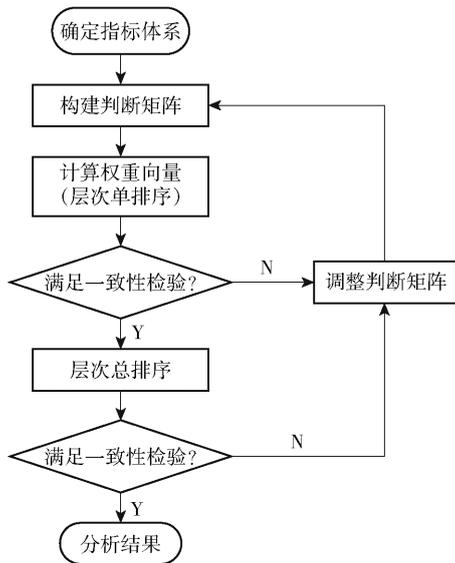


图1 层次分析法流程图

2.3 物理储能评价指标体系构建

在对有关废弃矿山和物理储能的相关文献进行查阅分析,并听取行业专家意见的基础上,确定指标并进行指标体系构建。将废弃矿山地下空间的精准利用方式作为目标层,建立了6个一级指标,再针对一级指标细化出19个二级指标,并制订了3个方案层,分别为抽水蓄能、压缩空气储能和重力储能,层次结构模型如图2所示。

2.4 指标权重的确定

为有效确定各指标权重,将各指标重要程度分为9个等级,采用9标度法表示,即取值为整数1~9及其倒数^[30]。

在评价指标的重要程度时,确保指标权重的客观性和合理性是非常必要的。以山西省白家庄煤矿为例,采用发放调查表的方法,对来自安徽理工大学、中国矿业大学(北京)、中国矿业大学等多所高等院校的50位废矿项目骨干进行了调研,调查对象

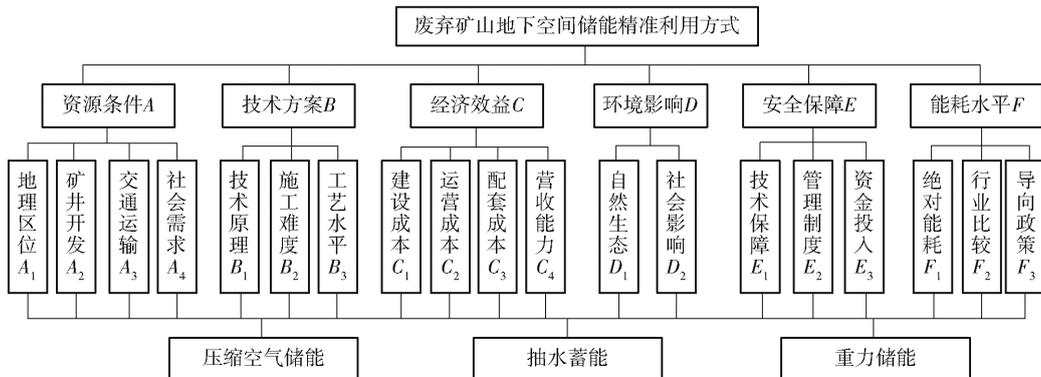


图2 废弃矿井地下空间物理储能层次结构模型

信息统计见表1。

表1 参与调查人员的统计信息

统计项目	统计类别	数量(百分比)
年龄	30岁及以下	6(12%)
	31~40岁	13(26%)
	41~50岁	20(40%)
	51岁及以上	11(22%)
职称	正高级	16(32%)
	副高级	15(30%)
	其他	19(38%)
职业	高校教师	36(72%)
	企业人员	10(20%)
	高校学生	4(8%)
熟悉程度	非常熟悉	25(50%)
	较为熟悉	12(24%)
	一般熟悉	10(20%)
	有点熟悉	3(6%)

对收回得到的46份问卷进行一致性检验,最终获得了32份具有代表性的问卷。按照公式^[30],计算出初步的权重,并查阅文献,对权重结果展开了分析。

依据前述的层次结构模型,可构造准则层相对目标层的矩阵(表2)。由于模型的影响因素较多,为保证结果的可靠性,必须对系统进行一致性检验。一致性指标计算公式见式(1)、(2)。

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中:CI为一致性指标;RI为平均随机一致性指标,见表3;CR为一致性比例;n为元素个数; λ 为矩阵的最大特征值。

表2 准则层相对目标层的判断矩阵

准则层指标	A	B	C	D	E	F	权重
A	1	2	2	1/2	1/3	4	0.177 9
B	1/2	1	1/2	1/2	1/3	1/2	0.077 4
C	1/2	2	1	1/2	1/2	3	0.142 0
D	3	3	2	2	1	3	0.202 1
E	1/4	2	1/3	1/2	1/3	1	0.312 4
F	2	2	2	1	1/2	2	0.088 1

当 $CR < 0.1$ 时,即认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵。经计算,该模型中CR值为0.065 7,小于0.1,校验合格。通过计算,得

到各级指标权重结果见表4。

表3 不同阶数平均随机一致性指标

阶数n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

表4 各级指标权重计算结果

一级指标	权重	二级指标	权重
A	0.177 9	A ₁	0.029 4
		A ₂	0.015 4
		A ₃	0.053 1
		A ₄	0.080 0
B	0.077 4	B ₁	0.043 1
		B ₂	0.009 5
		B ₃	0.024 8
C	0.142 0	C ₁	0.026 4
		C ₂	0.035 7
		C ₃	0.014 1
		C ₄	0.065 8
D	0.202 1	D ₁	0.134 7
		D ₂	0.067 4
E	0.312 4	E ₁	0.174 1
		E ₂	0.038 3
		E ₃	0.100 1
F	0.088 1	F ₁	0.029 4
		F ₂	0.012 5
		F ₃	0.046 2

3 模型结果分析

3.1 准则层的各指标权重分析

准则层6个指标的权重及占比如图3所示。

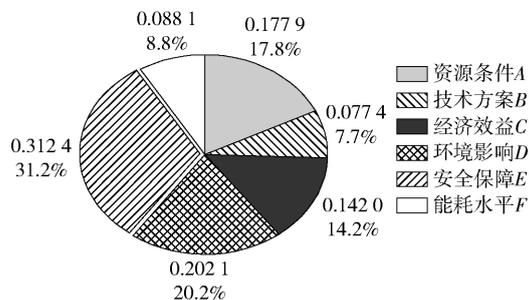


图3 准则层权重系数

1)安全保障E权重为0.312 4,位居第一位,包括技术保障、管理制度、资金投入。矿井位于地下数百米深,不确定性因数高,危险系数大,所以安全保障尤为重要,安全是进行一切开发利用活动的基础,是整个过程中最重要的影响因素。

2)环境影响D权重为0.202 1,位居第二位,包

括自然生态、社会影响。环境是人类生存和发展的前提,且环境破坏在一定程度上是“不可逆的”;在社会层面,废弃矿井的开发利用也可以带动当地的经济的发展,改善民生,提高生活水平。

3)资源条件 A 权重为 0.177 9,位居第三位,包括废弃矿井的地理区位、矿井开采、交通运输、社会需求,这些都是废弃矿井资源开发所要考虑的因素。废弃矿井的开发利用离不开资源条件的支撑,资源条件是开发的基础。

4)经济效益 C 的权重为 0.142 0,位居第四位,包括建设成本、运营成本、配套成本和营收能力。废弃矿井建设物理储能不仅要重视环境影响,也要考虑经济效益。建设储能电站时,不论是电网公司,还是电力用户,储能电站所带来的经济效益都是值得关注的问题。

5)能耗水平 F 权重为 0.088 1,排在第五位,即反映国家经济活动中能源的利用程度,包括绝对能耗、行业比较和导向政策。能耗水平对发电效益有着直接的影响。

6)技术方案 B 权重为 0.077 4,排在第六位,包括技术原理、施工难度、工艺水平,这些指标与废弃

矿井开发的进度有密切联系。同时,技术方案影响整个工程的质量,好的技术方案可以保证系统安全性,提高整体效率。

3.2 指标层的指标权重分析

二级指标层的各指标权重值如图 4 所示。在所有二级指标中,排名前三的指标分别为技术保障 E_1 、自然生态 D_1 和资金投入 E_3 。

1)技术保障 E_1 的权重最高,为 0.174 1。在废弃矿井地下空间资源开发过程中,安全至关重要,而技术保障是安全层面中最受重视的指标,技术越成熟越可靠,开发可行性越高,对矿井地下空间开发影响越大。

2)自然生态 D_1 的权重值排第二,为 0.134 7。自然生态环境是人类生活和生存的基础。开发废弃矿井时,要重视对自然生态的影响,同时通过对矿区进行改造,可以有效控制矿山开采引起的污染,这也是一项重要的生态保护措施。

3)资金投入 E_3 的权重为 0.100 1,排名第三。前期资金投入在一定程度上反映了项目的可靠性和运作效率,也侧面反应了整个项目的质量,是评价一个项目的重要指标。

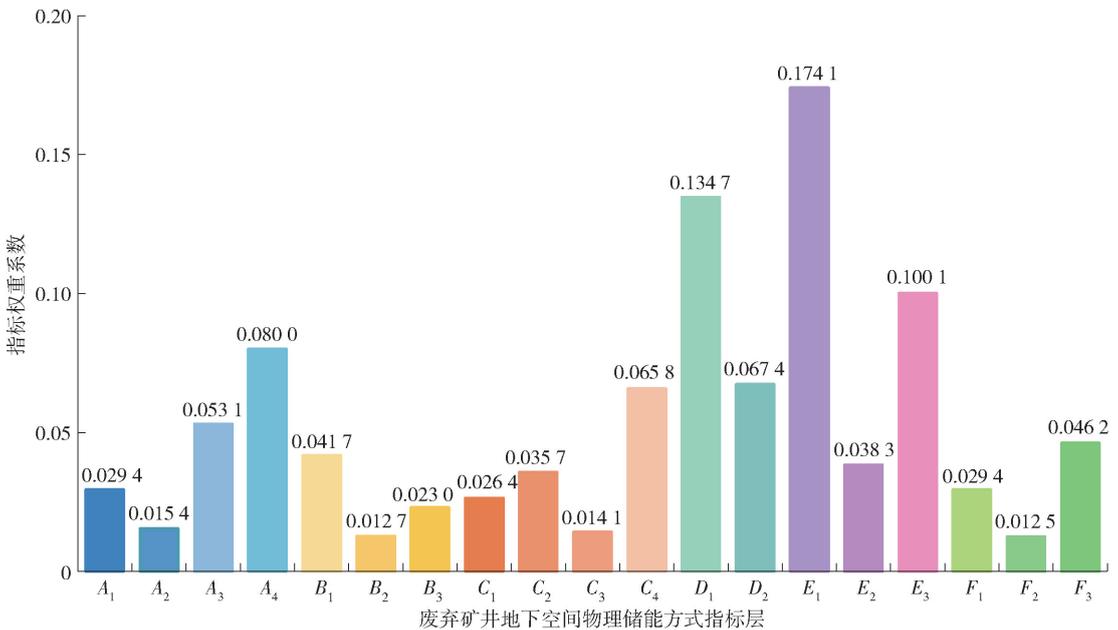


图 4 废弃矿井地下空间物理储能方式指标层

4 废弃矿井大规模物理储能方式优选

在方案层 3 个方案权重分布中,压缩空气储能、抽水蓄能和重力储能 3 个方案按照权重大小排序为:重力储能 > 抽水蓄能 > 压缩空气储能,如图 5 所

示。由此可见,对废弃矿井地下空间储能而言,重力储能更具优势。

方案层相对于准则层的权重如图 6 所示。从图 6 中可以看出,在 6 个准则层指标中,重力储能在环境影响方面的优势最明显,抽水蓄能在能耗水平

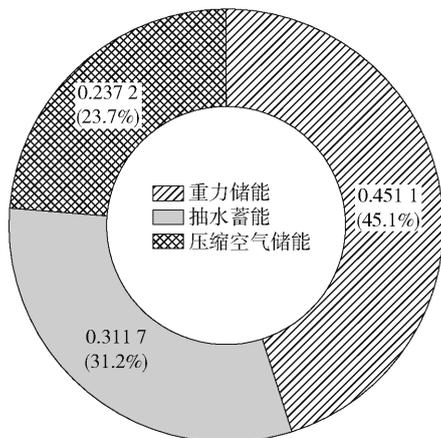


图5 方案层权重

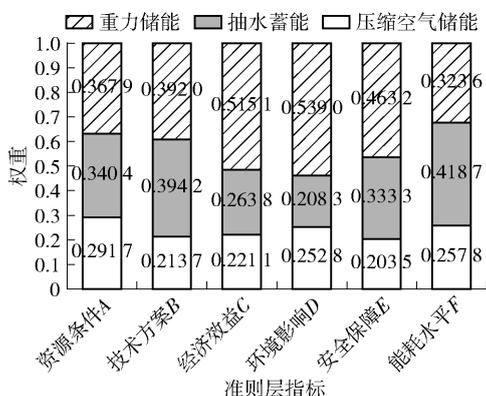


图6 方案层相对于准则层的权重

方面更具优势,而压缩空气储能的资源条件权重最高。

1)在环境影响方面,重力储能是3种储能方式中公认的最环保的方式,系统原则上可持续性极高,不排放温室气体,同时重物可就地取材或利用建筑垃圾等材料,且不会分解;压缩空气储能使用天然气或石油等燃料加热压缩空气,产生的气体会对环境有影响;而抽水蓄能频繁的泄水和抽水会破坏河床、地貌和生物的生活环境。

2)在经济效益方面,3种储能方式的平准化储能成本(即储能全生命周期成本)由高到低分别是压缩空气储能、抽水蓄能、重力储能。压缩空气储能机械设备占比较高,在产业链、供应链形成规模后,单位静态投资有较大下降空间;抽水蓄能技术已趋成熟,但其应用范围有限,且选址和发展困难,平均成本上升;重力储能的工程难度低,可以长期持续生产能源。

3)在安全保障方面,相比于抽水蓄能和压缩空气储能,重力储能的维修保养需求更少,系统运行的稳定性更高;压缩空气储能地下空间存储高压气体

维护难度较高;抽水蓄能是3种方式中最成熟、应用规模最大的,所以其管理制度也是最完善的。

4)在技术方案方面,重力储能与抽水蓄能的技术原理相似,将储能介质由水换成了重力块,增大了能量密度,在相同势能的情况下,可以降低建设高度,重力储能对塔式起重机的精度要求较高;抽水蓄能则对地形要求高,选址困难;压缩空气储能施工时要做好围岩的防渗工作。目前为止,就工艺水平而言,抽水蓄能无疑是最好的。

5)在资源条件方面,重力储能对于地理区位的要求最低,基本没有特殊要求,而抽水蓄能和压缩空气储能对于地理区位都有不同的要求;同样对于矿井开采条件,重力储能也是要求最低。由于抽水蓄能目前是技术最成熟的,所以社会需求方面可能相对更高一点,其次是压缩空气储能,最后是重力储能。

6)在能耗水平方面,抽水蓄能电站拥有非常高的储能效率,可高达80%;压缩空气储能的效率低于抽水蓄能;重力储能能量密度低,建造的高塔平均都超过了100 m,而其输出功率仅相当于一个同等高度的风力发电机,所以更适合“分布式”储能。

5 结论

本文在系统调研废弃矿井地下空间物理储能方式的基础上,以山西省白家庄煤矿为研究背景,利用层次分析法建立了废弃矿山地下空间储能精准利用方式评价指标体系,并根据专家打分法获得指标权重,最后提出了相应的建议,以期对废弃矿山的资源开发与利用具有一定的指导意义。

分别从资源条件、技术方案、经济效益、环境影响、安全保障及能耗水平等方面进行对比分析,结果表明:安全保障权重占比最高,环境影响次之,之后依次是资源条件、经济效益、能耗水平,最后是技术方案。

对废弃矿山地下空间储能精准利用方式评价指标进行综合权重分析,可发现方案层的3个方案中重力储能的权重占比最高,其次是抽水蓄能,最后是压缩空气储能。

虽然当前抽水蓄能的技术已经成熟,短时间内抽水蓄能还将处于领先地位,而重力储能还处于理论探索阶段,但从本文分析结果看,重力储能的优势明显,发展前景广阔,将来很有可能媲美甚至超过抽水蓄能。

[参考文献]

- [1] 袁亮,张通,张庆贺,等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6):2131-2139.
- [2] 陈云良,刘旻,凡家异,等. 重力储能发电现状、技术构想及关键问题[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 97-105.
- [3] 谢和平,高明忠,刘见中,等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1487-1503.
- [4] 卞正富,周跃进,曾春林,等. 废弃矿井抽水蓄能地下水水库构建的基础问题探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10):3308-3318.
- [5] 浦海,许军策,卞正富,等. 关闭/废弃矿井地热能开发利用研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2243-2269.
- [6] 刘钦节,杨卿干,杨科,等. 废弃矿井抽水蓄能电站多能互补利用模式及案例分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3):578-586.
- [7] 赫文豪,李懂文,杨东杰,等. 新型重力储能技术研究现状与发展趋势[J]. 大学物理实验, 2022, 35(5):1-7.
- [8] 陈海生,凌浩恕,徐玉杰. 能源革命中的物理储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4):450-459.
- [9] 李彦荣,王康民. 新能源电力系统中的储能技术探究[J]. 应用能源技术, 2022(5):54-56.
- [10] 叶鹏. 废弃矿井抽水蓄能电站流体动力学分析与结构优化设计[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [11] BLAKERS A, LU B, STOCKS M. 100% renewable electricity in Australia[J]. Energy, 2017, 133: 471-482.
- [12] ANDRE N. Proposed underground pumped hydro storage power plant at prosper-haniel colliery in bottrop-state of play and prospects[J]. Mining Report Gluckauf, 2018, 154(3):214-223.
- [13] JAVIER M, JORGE L. Use of Coal Mines Facilities in Northern Spain for the Production of Sustainable Energy[J]. International Journal of Environmental Science, 2017, 2: 324-328.
- [14] 顾大钊. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2):239-246.
- [15] 卞正富,朱超斌,周跃进,等. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12):51-64.
- [16] 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.
- [17] 杨科,付强,袁亮,等. 关闭/废弃矿井地下空间抽水蓄能发展战略研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 283-292.
- [18] 夏焱,万继方,李景翠,等. 重力储能技术研究进展[J]. 新能源进展, 2022, 10(3):258-264.
- [19] BOTH A C D, KAMPER M J. Capability study of dry gravity energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 159-174.
- [20] Projects: Our 250kW Edinburgh Demonstrator [EB/OL]. [2021-10-15].
- [21] 王柄根. 中国天楹:重力储能将打开新成长空间[J]. 股市动态分析, 2022, (19):44-45.
- [22] 肖立业,张京业,聂子攀,等. 地下储能工程[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(2):1-9.
- [23] 王玉莹,杨晓斌,陈君青,等. 新型重力储能的原理效率及其选材选址分析[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(3):193-203.
- [24] 何秋德,陈宁,罗萍嘉. 基于压缩空气蓄能技术的煤矿废弃巷道再利用研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4):37-39,65.
- [25] 张新敬,陈海生,刘金超,等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1):26-40.
- [26] LI L, LIANG W G, LIAN H J, et al. Compressed air energy storage: characteristics, basic principles, and geological considerations[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2018, 2(2):135-147.
- [27] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术, 2017, 41(10):3392-3399.
- [28] 梅生伟,张通,张学林,等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5):1-8,14.
- [29] 吴全,孙春良,郭海涛,等. 压缩气体储能技术经济特点和发展方向探析[J]. 油气与新能源, 2023(6): 90-98.
- [30] 王佳慧,高迪,陈江峰. 基于层次分析法的煤层顶板稳定性评价[J]. 煤炭技术, 2022, 41(8):20-23.

Comparison and Optimization of Physical Energy Storage Methods in Underground Space of Abandoned Mines

XIU Yaxin¹, LIU Qinjie^{2,3}, FU Qiang¹, YANG Qinggan¹, BAO Xingrui¹, DENG Zhuoyue¹

(1. Anhui University of Science and Technology, Anhui Engineering Research Center of Exploitation and Utilization of Closed/Abandoned Mine Resources, Huainan 232001, China;

2. Anhui University of Science and Technology, Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Huainan 232001, China;

3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to carry out the comparison and optimization of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines, on the basis of summarizing and analyzing the principles and development status of pumped storage, gravity energy storage and compressed air energy storage in abandoned mines, the analytic hierarchy process was used to select 6 first-level indicators, 19 second-level indicators and 3 energy storage schemes, and the evaluation index system of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines was established. Taking Baijiazhuang Coal Mine in Shanxi Province as an example, based on the expert scoring method, the weights of each index and scheme layer are analyzed, and the main control factors and influence degree of the primary and secondary indicators in the evaluation system are obtained. Based on this analysis, the advantages and disadvantages of three physical energy storage methods are compared. The results show that among the first-level indicators, the weight of safety and security is the highest, followed by environmental impact, and then resource conditions, economic benefits, energy consumption level, and finally technical solutions. Among the secondary indicators, the three indicators with the highest weight are technical support, natural ecology and capital investment; among the three schemes, gravity energy storage has the most advantages, followed by pumped storage, and finally compressed air energy storage. The research results can provide reference for the selection of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines.

Key words: abandoned mines; physical energy storage; gravity energy storage; compressed air energy storage; pumped storage; analytic hierarchy process; evaluation system