

创刊十周年专刊



## 先进压缩空气储能系统全生命周期能耗及二氧化碳排放

耿晓倩<sup>1,2</sup>, 徐玉杰<sup>1,2</sup>, 黄景坚<sup>1,2</sup>, 凌浩恕<sup>1,2</sup>, 张雪辉<sup>1,2</sup>, 孙爽<sup>1</sup>, 陈海生<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 先进压缩空气储能系统是一种具有广泛应用前景的储能技术, 对其展开全生命周期能耗及二氧化碳排放研究, 对促进储能技术发展和政策制定有指导意义。本工作以 10 MW 先进压缩空气储能系统为研究对象, 建立了压缩空气储能系统的全生命周期模型, 基于实际机组、国家标准及相关文献等对生命周期各阶段进行清单分析, 获得了压缩空气储能系统的全生命周期能耗、能效及二氧化碳排放, 并进行了敏感性分析。研究结果表明, 系统全生命周期度电能耗和度电二氧化碳排放量分别为 5.653 MJ 和 36.73 g, 净能量效率为 63.68%; 运行阶段的能耗和二氧化碳排放占比最大, 分别为 99.16% 和 90.49%; 系统运行效率、系统寿命及发电时间都是全生命周期二氧化碳排放的重要影响因素, 而全生命周期能耗对系统运行效率的敏感性较大。

**关键词:** 压缩空气储能; 全生命周期; 能耗; 碳排放

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0129

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 09-2971-09

## Life cycle energy consumption and carbon emissions of advanced adiabatic compressed air energy storage

GENG Xiaoqian<sup>1,2</sup>, XU Yujie<sup>1,2</sup>, HUANG Jingjian<sup>1,2</sup>, LIN Haoshu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuehui<sup>1,2</sup>,  
SUN Shuang<sup>1</sup>, CHEN Haisheng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Advanced adiabatic compressed air energy storage technology has broad application prospects, as its life-cycle energy consumption and carbon dioxide emission research are of guiding significance for promoting energy storage technology development and policy formulation. A 10-MW advanced adiabatic compressed air energy storage system was the research object; a life cycle assessment model of the compressed air energy storage system was established; a life cycle inventory of each stage was conducted based on the actual unit, national standards, and reference literature; and the life-cycle energy consumption and carbon emissions of the system were analyzed. The research results showed that the life-cycle energy consumption and the life-cycle carbon emissions per kilowatt-hour of electricity generation were 5.65 MJ and 36.73 g, and the life-cycle net energy efficiency was 63.7%, from which energy consumption and carbon emissions accounted for the largest proportions in the operation phase, 99.2% and 90.5%, respectively; the heat storage, compression, and expansion systems accounted for a significantly high proportion of carbon emissions. Sensitivity analysis

收稿日期: 2022-03-10; 修改稿日期: 2022-04-14。

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (51925604), 中国科学院洁净能源先导科技专项 (XDA21070302, XDA21070200), 中国科学院国际合作局国际伙伴计划 (182211KYSB20170029), 内蒙古自治区科技重大专项 (2021ZD0030)。

第一作者: 耿晓倩 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为压缩空气储能生命周期评价, E-mail: gengxiaoqian@iet.cn; 通讯作者: 陈海生, 研究员, 研究方向为压缩空气储能、蓄冷蓄热等物理储能技术, E-mail: chen\_hs@iet.cn。

showed that system operating efficiency, system life, and gas storage time are important factors affecting life-cycle carbon emissions and that life-cycle energy consumption is more sensitive to system operation efficiency.

**Key words:** compressed air energy; life cycle assessment; environmental impact; carbon emission

构建以新能源为主体的新型电力系统,是我国实现“碳达峰、碳中和”目标的主要途径。波动性和不可预测性是风电、光伏等可再生能源规模利用的关键难题,而储能技术是解决这一难题的有效途径;因此,在以新能源为主的新型电力系统中,储能至关重要。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)系统具有规模大、寿命长、成本低等众多优点,具有广阔发展前景,已被国内外广泛研究和开发。

国际上已建成两座传统CAES商业电站(1978年建成的德国290 MW Huntorf 电站,1991年建成的美国110 MW McIntosh 电站),但存在依赖化石燃料、效率较低等问题,其推广应用受到了一定限制<sup>[1-2]</sup>。而新型压缩空气储能系统因其摆脱对化石能源的依赖及效率更高的优势被广泛地开发应用,加拿大Hydrostor公司研发并建成了1.75 MW 绝热CAES 电站<sup>[3]</sup>,并规划在美国加利福尼亚州建造400 MW 电站<sup>[4]</sup>;英国Highview公司研发并建成2 MWh 液态空气储能电站,正在建设50 MW 液态空气储能电站<sup>[5]</sup>;美国研发并建成了1.5 MW 等温CAES 电站<sup>[6]</sup>;中国科学院工程热物理研究所已研发并建成国际首套10 MW<sup>[7]</sup>和100 MW<sup>[8]</sup>先进CAES 商业示范电站。新型CAES 技术正在快速发展,逐步向产业化推广迈进。

由于储能产业是战略性新兴产业,对各种储能技术方案的全生命周期分析尚处于起步阶段,为探究储能技术对产业布局和生态环境的长期影响,急需对储能系统的全生命周期评价进行深入研究。同时,有利于探索其有益于碳中和的发展方向,对实现“双碳目标”进程中的政策决策有很强的参考价值。目前,已有部分学者对一些储能系统进行了相关研究。Raugei等<sup>[9]</sup>对100 MW 光伏配套60 MW 锂电池系统进行全生命周期评价,结果表明配有锂电池的光伏发电系统相对传统火电在能源的清洁性方面优势依然明显。Sternberg等<sup>[10]</sup>提出了对比不同储能系统全生命周期表现的新方法,对物理储

能、化学储能等多种储能方式进行全生命周期环境影响评价,结果表明包括抽水蓄能、压缩空气储能等在内的储电系统的二氧化碳减排成本最低。Stougie等<sup>[11]</sup>对包括压缩空气储能系统在内的多种储能系统对比计算了全生命周期环境影响、经济性及总体烟损失,在这三方面表现最好的储能系统分别为抽水蓄能、浓度梯度流电池、锂离子电池。AlShafi等<sup>[12]</sup>对压缩空气储能、全矾液流电池、熔融盐储能系统进行全生命周期评价,得到压缩空气储能的全球气候变暖潜势居中。Kapila等<sup>[13]</sup>分析传统压缩空气储能、先进绝热压缩空气及抽水蓄能系统的全生命周期能量回报率和温室气体排放,发现全生命周期排放主要受运行阶段影响。但由于早期缺少实际建造且商业运行的先进压缩空气储能电站,目前对CAES 系统进行全生命周期评价研究多数基于传统补燃式CAES 系统<sup>[13-14]</sup>,少量针对先进CAES 系统进行全生命周期评价研究的文献中,运行参数常常参考传统CAES 系统,清单分析的数据来源主要是基于燃气轮机<sup>[13,15]</sup>、光热电站<sup>[16]</sup>、化工压缩机组<sup>[13]</sup>等其他同类型设备的数据,并进行简单的线性处理,准确性较差。

本工作以实际建造的某10 MW 先进CAES 电站为基础,结合相关文献资料,从材料及部件生产、建造、运行及维护、拆除及废弃处置四个阶段进行全生命周期清单分析,得到先进压缩空气储能系统的全生命周期能耗及二氧化碳排放量,并对其关键影响因素进行敏感性分析,本工作研究成果将对储能产业布局和CAES 系统的产业化发展具有重要意义。

## 1 研究方法

### 1.1 研究方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA),是指对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。生命周期评价是一种重要的环境管理工具,可用于评估产品或系统整个生命周期阶段的环境影响<sup>[17]</sup>。本工作使用生命周期

评价的方法，分析压缩空气储能系统的生命周期能耗及二氧化碳排放量。根据国际标准 ISO14040，生命周期评价方法包括目的及范围确定、清单分

析、影响评估和解释说明 4 个阶段<sup>[18]</sup>。本工作在生命周期评价方法的基础上，建立研究方法模型，具体研究方法及过程如图 1 所示。

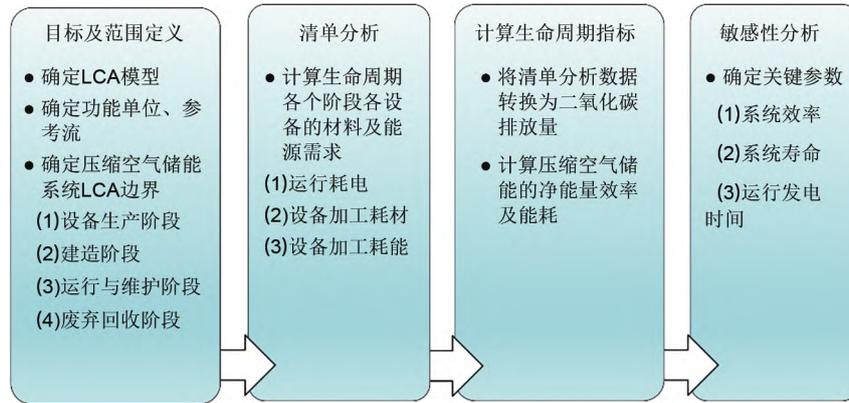


图 1 全生命周期评价过程框图

Fig. 1 Life cycle assessment process framework

### 1.2 评价指标

不同系统的环境影响与其系统规模及产生的收益有直接影响，为使不同研究对象的环境影响具有可比性，需要对压缩空气储能系统的环境影响定义一个合理的功能单位。储能系统作为电力系统中的部件，其产生的效益主要与其发电量有关，因此本工作采用 1 kWh 发电量作为功能单位。生命周期评价方法参考 ReCiPe2016 中间点法<sup>[19]</sup>。其中所包含主要评价指标如下所示。

#### (1) 能源消耗

能源消耗指整个生命周期过程中的能源消耗总量，由下式进行计算

$$EU = \sum_i \sum_j EN_{ij} \quad (1)$$

其中， $EN_{ij}$  代表生命周期  $i$  阶段  $j$  类能源消耗量。本系统中运行阶段储存电能均来自于风电，故按照一次能源计算。

#### (2) 净能量效率

净能量效率是指在生命周期过程中产生的能量与消耗能量的比值，由下式进行计算

$$\eta = \frac{P_{发电} t_{运行}}{EU} \quad (2)$$

其中， $P_{发电}$  指系统发电功率； $t_{运行}$  指系统运行阶段发电的总时长。

#### (3) 全球气候变暖潜势

先进 CAES 系统的全生命周期碳排放用全球气候变暖潜势表征，先进压缩空气储能系统的全生命

周期全球气候变暖潜势指的是变暖物质增加地球热量的潜力，用每 kg 等效  $CO_2$  排放量来表示。计算公式如下所示

$$GWP = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (3)$$

其中， $GWP_i$  代表第  $i$  种排放物的全球变暖潜势因子； $m_i$  代表第  $i$  种排放物的质量。

## 2 研究对象及清单分析

### 2.1 研究目标及范围

#### 2.1.1 研究对象

本工作以 10 MW 先进 CAES 系统为研究对象，开展全生命周期的能耗和二氧化碳排放的研究。整个系统以实际建设的某 10 MW 先进压缩空气储能系统为基础，图 2 为系统示意图，其工作原理为：储能时，通过电动机带动六级压缩机将空气进行压缩，高压空气储存在储气室中，同时利用双罐式亚临界水储热技术，回收压缩机的间冷热并储存在热罐中；释能时，高压空气从储气室释放并到四级透平膨胀机中膨胀做功，同时利用储存的压缩热加热各级膨胀机进口空气，膨胀机带动发电机发电，将压力能和热能转换为电能。先进 CAES 系统主要包括压缩子系统、储气子系统、蓄热子系统和膨胀子系统。压缩子系统是利用电力将空气压缩至高压，实现电能到空气内能的转化，其主要部件包括电动机、六级压缩机、滑油站、压缩机间冷器和末级冷却器等；储气子系统是将高压空气进行

储存,实现电能的储存,本研究储气室采用废弃盐穴;储热子系统实现间冷热的存储,其主要设备包括冷罐、热罐、冷却水塔、热水泵和冷水泵等;膨胀子系统利用高压空气膨胀做功发电,实现空气内能到电能的转化,其主要部件包括四级透平膨胀机、

滑油站(与压缩机滑油站公用)、膨胀机再热器和发电机等。

系统各部件基本参数的设定参考实际系统,具体参数如表1所示,通过热力学计算得到系统效率为64.2%。

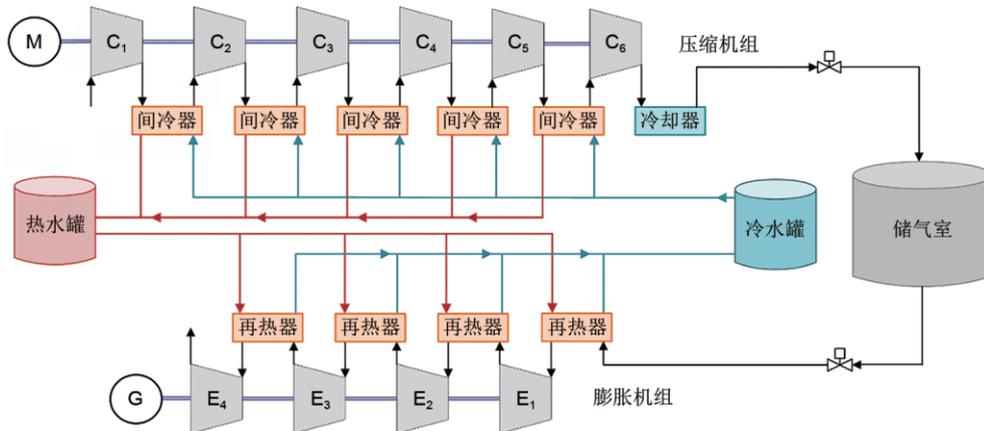


图2 先进CAES系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of advanced compressed air energy storage

表1 先进CAES系统主要参数

Table 1 System main parameters of advanced CAES

参数	系统储能功率/MW	系统释能功率/MW	压缩机设计效率	膨胀机设计效率	压缩机组级数	膨胀机组级数	换热器能效
数量	10	10	0.84	0.86	6	4	0.88

2.1.2 系统边界的确定

本研究以10 MW AA-CAES系统为对象,系统的范围限制于从电能的输入端到电能的输出端,设定系统工作年限为35年,定量计算其生命周期过程能耗、能效及碳排放。研究范围包括系统的生产

阶段(包括原材料的获取、部件生产及组装),建造阶段(包括部件及其他原料产地到系统建造地的运输、园区及厂房的建造及整个系统的组装),运行阶段和废弃处置阶段四个主要阶段,生命周期系统边界如图3所示。

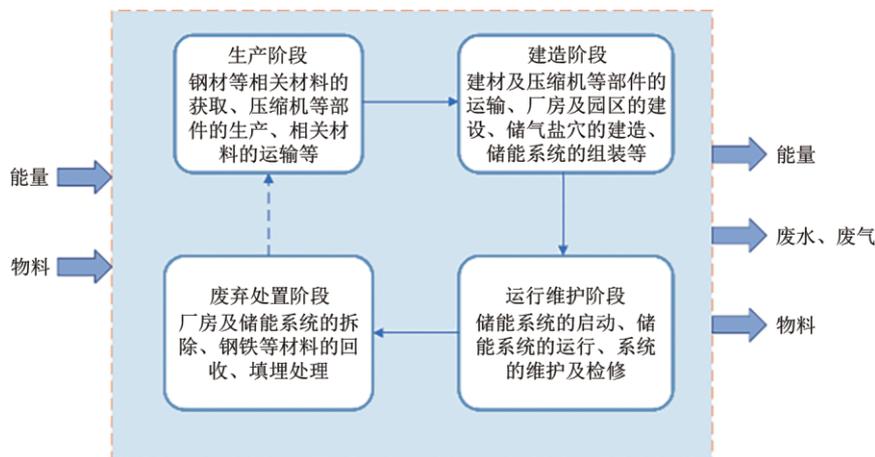


图3 压缩空气储能系统生命周期的系统边界

Fig. 3 System boundary of compressed air energy storage

## 2.2 清单分析

### 2.2.1 生产阶段

生产阶段主要涵盖范围为 10 MW 先进 CAES 系统所需压缩子系统、膨胀子系统、储热子系统及管路中各种部件、阀门、管道等的原材料获取、运输、生产和加工等过程。储气部分采用的是盐穴储气，因此这一部分放在建造阶段讨论。基于对某 10 MW 先进 CAES 示范电站、相关文献和数据库的调研分析，本研究获取了 10 MW 先进 CAES 系统的主要组成部分的耗材及耗能，具体如表 2 所示。

表 2 设备生产阶段的材料和能源消耗量  
Table 2 Material consumption and energy consumption of equipment production stage

材料	压缩子系统	膨胀子系统	管路部分	储热子系统
碳钢/kg	54182	29138	27738	313108
铸铁/kg	17000	17000	—	—
合金钢/kg	5902	5130	—	—
不锈钢/kg	35566	—	14527	—
铝合金/kg	25534	38225	—	—
钛合金/kg	962	456	—	—
铜/kg	4413	3030	—	—
岩棉/kg	—	—	3926	25654
塑料/kg	962	381	—	—
加工电耗/kWh	528511	384989	47593	187508

压缩空气储能系统所涉及设备较多，各设备生产差异大，设备加工的主要工艺包括铸造、锻造、热处理、焊接、机加工等。本研究各设备加工能耗参考 GB 50910—2013《机械工业工程节能设计规范》<sup>[20]</sup>、JB14—1986《机械工业节能设计技术规定》和 JBJ20—1990《通用机械节能设计技术规定》<sup>[21]</sup>中各行业及生产工艺能耗指标及文献<sup>[22]</sup>。

表 4 先进 CAES 运行参数

Table 4 Operation parameters of advanced CAES

参数	运行时间占比/%	每年检修时间/d	系统运行效率/%	年发电小时数/h	年储电小时数/h	年发电量总额/kWh	年耗电量总额/kWh
数量	70	7	64.2	2352	3662	23523160	36620840

### 2.2.4 废弃处置阶段

废弃处置阶段主要涵盖储能系统报废后的拆除过程及拆除后设备和材料的处置，如原材料的再利用、焚烧、填埋等。参照火力发电厂及普通建筑，拆除阶段能耗取建造阶段的 30%，不同材料的回收比例及回收耗能如表 5 所示，其余材料均以填埋方式处理。

### 2.2.2 建造阶段

建造阶段主要涵盖原材料及部件的运输、园区和厂房的建设、储气盐穴的建造及系统安装建设。园区建筑包括主厂房、辅房和水泵房等，园区建筑清单包括各建筑物的建筑面积、楼层、占地面积、建筑类型及建筑物建造过程所使用的建筑材料。本系统采用废弃盐穴作为储气装置，储气盐穴的建造清单包括采注井筒的建造耗能及耗材，参考 10 MW 先进 CAES 示范电站建设中废旧盐穴的改造过程，采注井筒采用 G55 钢。10 MW 系统建造阶段所需材料和耗能参数如表 3 所示。

表 3 建造阶段的材料和能源消耗量  
Table 3 Material consumption and energy consumption of plant construction stage

材料	园区建筑	储气子系统
建筑钢材/kg	44914.90	—
混凝土/m <sup>3</sup>	719.81	27.80
高合金钢/kg	—	82334.79
氮气/m <sup>3</sup>	—	—
水/kg	863777.69	—
柴油/kg	3901.00	65001.60
电耗/kWh	—	10703.52
焦炭/kg	—	11856.21

### 2.2.3 运行维护阶段

本系统设计运行寿命 35 年，系统效率 64.2%，具体运行参数如表 4 所示。假定运行阶段消耗的所有电能均来自风力发电，根据 Ecoinvent 数据库，风电的度电二氧化碳排放量为 21.1 g。运行阶段涵盖范围包括储能系统启动过程、系统运行过程、系统在长期运行过程中所需要的替换件及检修等部分。由于系统所用的水及润滑油均为闭路循环，其损耗忽略不计。

## 3 研究结果

### 3.1 先进 CAES 系统全生命周期的能耗

利用本研究的全生命周期分析方法和模型，通过对本工作中的 10 MW 先进 CAES 系统的全生命周期过程分析计算可得，10 MW 先进 CAES 系统

表5 金属废料回收数据<sup>[23]</sup>  
Table 5 Metal scrap recovery data<sup>[23]</sup>

材料种类	回收比例/%	回收能耗/(kWh/t)
钢材	85	600
铸铁	85	560
铜合金	70	390
钛合金	90	600
铝合金	60	976.92

全生命周期能源消耗为4654.4 TJ，系统分阶段能源消耗如图4所示。其中，运行阶段消耗能量4615.4 TJ，占比最大，达99.16%；生产阶段为43.4 TJ，占比0.93%；建造阶段为12.1 TJ，占比0.26%；废弃处置阶段为-16.5 TJ，占-0.36%。从计算结果可以看出，系统运行阶段占据绝大多数能量消耗，废弃阶段回收能源为生产与建设阶段能源消耗的1/3。

10 MW 先进 CAES 系统每发电 1 kWh 需要消耗能量为 5.653 MJ，由此可通过计算得到该系统的全生命周期净能量效率为 63.68%。其中，运行阶段输入的储能电量 5.606 MJ，占总耗电的

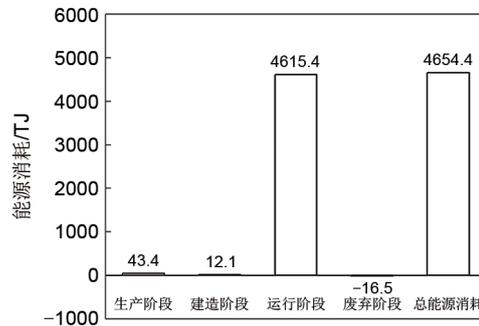


图4 能源消耗分阶段构成  
Fig. 4 Energy consumption of different stages

99.16%；其余部分为系统在生产、建造和废弃阶段的耗能，总计0.047 MJ，占0.83%。除运行阶段的耗能外，将系统其他阶段的耗能按不同子系统划分，结果如图5所示。其中，压缩子系统和膨胀子系统的耗能是最多的，分别为0.016 MJ和0.013 MJ，分别占总耗电的0.29%和0.22%；储热子系统和储气子系统的耗能分别为0.008 MJ和0.006 MJ，占总耗电的0.14%和0.10%；管路系统及园区建设部分的耗能在总能耗中占比较小，总计0.08%。

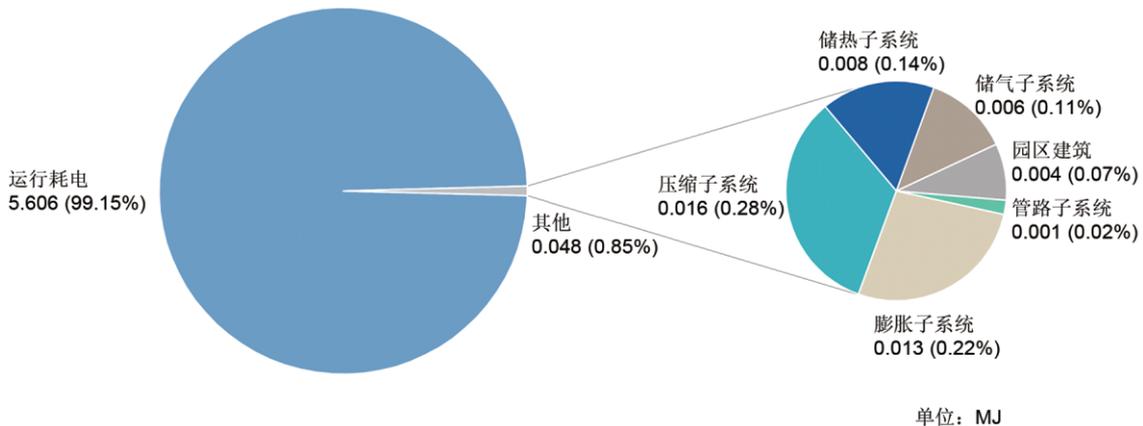


图5 度电能源消耗分部件构成  
Fig. 5 Energy consumption component composition of per kilowatt hour electricity

### 3.2 先进CAES系统全生命周期二氧化碳排放

计算分析可得，该10 MW先进CAES系统全生命周期的二氧化碳排放总量为30.24 kt，各阶段二氧化碳排放如图6所示。运行阶段的二氧化碳排放总量最多，为27.36 kt，占比达90.49%；生产阶段全生命周期二氧化碳排放量为3.16 kt，占比10.44%；建造阶段为0.96 kt，占比3.19%；废弃处置阶段二氧化碳排放为-1.25 kt，占比-4.12%。

该10 MW先进CAES系统发电1 kWh的度电二氧化碳排放量为36.73 g。图7为系统各阶段的度电二氧化碳排放，运行阶段二氧化碳排放量为33.23 g/kWh，占比达90.49%；但相比运行阶段能耗，二氧化碳排放占比减少了8.67%，这是因为运行阶段能量来源为风电，而生产、建造、废弃处置阶段主要消耗的是化石能源。生产、建造和废弃阶段二氧化碳排放总量为3.50 g，占比

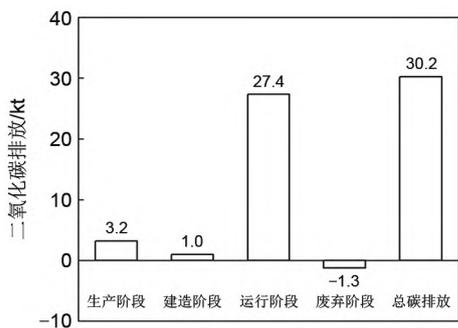


图6 碳排放分阶段构成

Fig. 6 Life cycle greenhouse gas emissions of different stages

9.51%，其中压缩子系统、膨胀子系统和储热子系统的二氧化碳排放量占比分别为2.58%、1.99%和2.52%。

此外，为更全面地探究先进CAES系统生命周期碳排放结果，对运行过程中来自光伏发电及火力发电储存的电能进行计算，10 MW先进CAES系统储能来源不同时生命周期度电二氧化碳排放如图8所示。10 MW先进CAES系统在这两种情况下的生命周期度电二氧化碳排放分别为125.50 g和1988.37 g，均比采用风电作为储能来源的情况高。这主要因为风电、光伏发电、火力发电的碳排依次增加，先进CAES系统的寿命较长，其生命周期碳排放主要来源于运行阶段，因此当储存的电能来源发生变化时，虽然生产、建造及废弃处置阶段的碳排不变，系统的生命周期碳排放结果变化依然很大。同时可以看出，建造储能电站本身所带来的碳排放并不高。

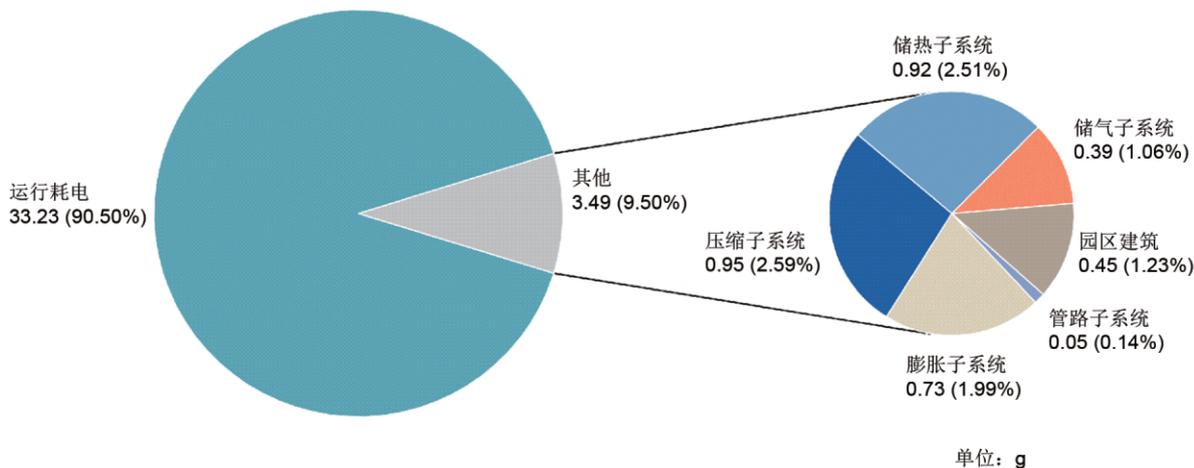


图7 度电二氧化碳排放构成

Fig. 7 Greenhouse gas emission component composition of per kilowatt hour electricity

## 4 敏感性分析

敏感性分析是评估研究中解决不确定性问题的一种系统分析方法。为评估压缩空气储能系统性能对全生命周期能耗及二氧化碳排放的影响，本研究选择系统运行效率、系统寿命、发电时间这3个因素进行敏感性分析。

### 4.1 系统运行效率

随着先进CAES系统运行效率的提高，系统的度电能耗及运行过程中的度电损耗势必减少，且运行效率主要影响的是储能系统的运行阶段，而由前文分析可知运行阶段贡献了主要的能耗和二氧化碳碳排放。图9为系统效率对先进CAES系统全生命周期能耗及二氧化碳排放的影响，当其他因素不变时，系统效率每提高1%，全生命周期度电能耗降低0.0919 MJ，全生命周期度电二氧化碳排放减少0.57 g。可见，系统运行效率是影响系统能耗和二氧化碳排放的关键因素。

### 4.2 系统寿命

对于大规模储能技术来说，提高系统寿命对于发挥其优势意义重大，而系统工作寿命也是影响全生命周期能耗及二氧化碳排放的关键因素。为了定量研究其对能耗和二氧化碳排放的影响，保持其他因素不变，仅改变机组的工作寿命，敏感性分析结果如图10所示。系统寿命每增加1年，度电能耗减少0.001 MJ，度电二氧化碳排放减少约0.089 g。由此可见，系统寿命是影响系统二氧化碳排放的关键因素。

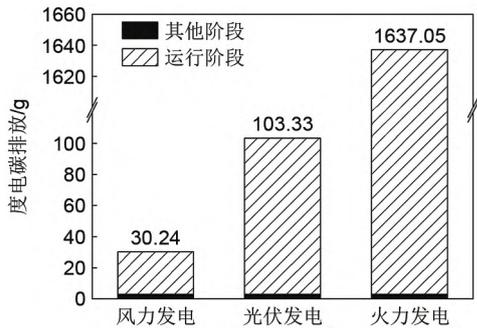


图8 不同电能来源的先进CAES系统生命周期度电二氧化碳排放

Fig. 8 Gas emission of per kilowatt hour electricity for advanced CAES systems with different power sources greenhouse

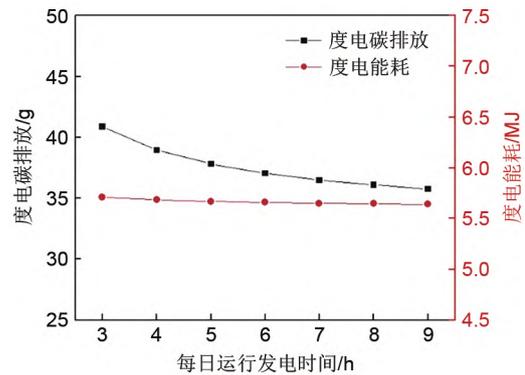


图11 发电时间对全生命周期性能的影响

Fig. 11 Impact of discharging time on life cycle performance

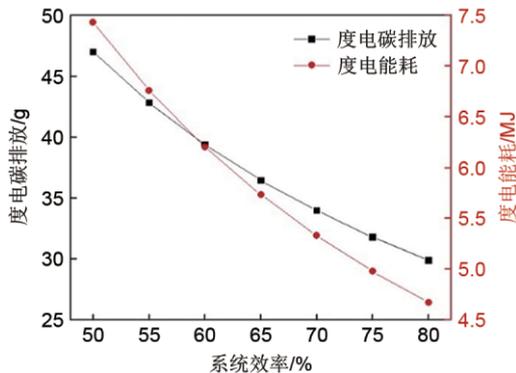


图9 系统效率对全生命周期性能的影响

Fig. 9 Impact of system efficiency on life cycle performance

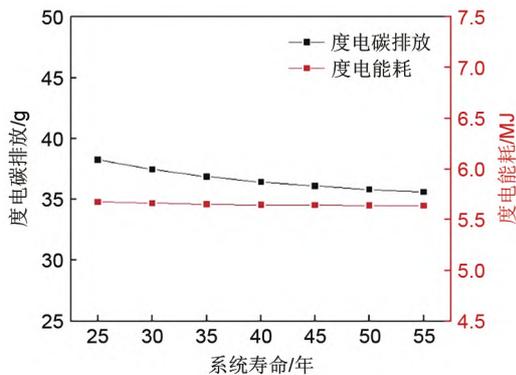


图10 系统寿命对全生命周期性能的影响

Fig. 10 Impact of system life on life cycle performance

### 4.3 发电时间

发电时间主要影响系统的生命周期总耗电量和发电量，从而对能耗和二氧化碳排放产生影响。图11为系统的日运行发电时间对全生命周期性能的影响，当其他因素不变情况下，系统日运行发电时间每增加

1 h，其度电能耗增加0.012 MJ，度电二氧化碳排放增加0.85 g，可见，发电时间对系统生命周期能耗的影响很小，而对生命周期二氧化碳排放影响较大。

通过上述敏感性分析可知，系统运行效率、系统寿命和发电时间都是影响先进CAES系统二氧化碳排放的关键因素，而系统能耗主要受系统运行效率影响。因此，在系统设计和建造过程中，在考虑经济性和实际应用的前提下，合理地提高系统效率、提高工作寿命和加长系统发电时间，对降低先进CAES系统的全生命二氧化碳排放具有重要意义。

## 5 结论

本工作基于实际先进压缩空气储能电站相关数据，开展了全生命周期清单分析，并进行了全生命周期评价及敏感性分析，得到如下主要结论：

(1) 10 MW先进CAES系统的全生命周期总能耗为4654.4 TJ，全生命周期度电能耗为5.653 MJ，全生命周期净能量效率为63.68%。先进CAES系统的工作寿命长，在全生命周期范围内，运行阶段能耗占总能耗的99.16%，而生产阶段能耗占比极小，因此提高CAES系统运行效率是降低能耗的最有效途径。

(2) 10 MW先进CAES系统的全生命周期总二氧化碳排放量为30.24 kt，系统全生命周期的度电二氧化碳排放量为36.73 g。运行阶段排放二氧化碳占总量的90.49%，生产阶段排放二氧化碳占总量的10.44%，废弃阶段负排放二氧化碳占总量的4.12%，因此运行阶段采用清洁能源可有效降低二氧化碳排放。

(3) 敏感性分析结果表明，系统运行效率是先

进CAES系统全生命周期能耗的主要影响因素,系统效率每提高1%,全生命周期度电能耗降低0.092 MJ;系统效率、系统寿命和储气时间对先进CAES的二氧化碳排放均有明显的影响。

### 参考文献

- [1] CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [2] GUO C B, PAN L H, ZHANG K N, et al. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and Caverns based on the Huntorf CAES plant[J]. Applied Energy, 2016, 181: 342-356.
- [3] HYDROSTOR. Hydrostor and NRStor announce completion of world's first commercial advanced-CAES facility[EB/OL]. [2022-02-21]. <https://www.hydrostor.ca/news-press-1/>.
- [4] HYDROSTOR. Hydrostor files application for certification for 400 MW x 8 hour (3,200 MWh) pecho energy storage center[EB/OL]. [2022-02-21]. <https://www.hydrostor.ca/hydrostor-files-application-for-certification-for-400-mw-x-8-hour-3200-mwh-pecho-energy-storage-center/>.
- [5] HIGHVIEW. Highview enlaza developing 50 MW/500 MWh liquid air energy storage facility in the atacama region of chile[EB/OL]. [2022-02-21]. [https://highviewpower.com/news\\_announcement/highview-enlaza-developing-50-mw-500-mwh-liquid-air-energy-storage-facility-in-the-atacama-region-of-chile/](https://highviewpower.com/news_announcement/highview-enlaza-developing-50-mw-500-mwh-liquid-air-energy-storage-facility-in-the-atacama-region-of-chile/).
- [6] BOLLINGER B. Demonstration of isothermal compressed air energy storage to support renewable energy production[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2015.
- [7] 中国科学院工程热物理研究所. 山东肥城国际首套盐穴先进压缩空气储能国家示范电站正式并网发电[EB/OL]. [2022-02-21]. [http://www.iet.cas.cn/news/zh/202109/t20210923\\_6214054.html](http://www.iet.cas.cn/news/zh/202109/t20210923_6214054.html). Institute of Engineering Thermophysics of Chinese Academy of Sciences. National demonstration salt cavern advanced compressed air storage power plant is officially connected to the grid at Shandong Feicheng. [EB/OL]. [2022-02-21]. [http://www.iet.cas.cn/news/zh/202109/t20210923\\_6214054.html](http://www.iet.cas.cn/news/zh/202109/t20210923_6214054.html).
- [8] 中国科学院工程热物理研究所. 国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网[EB/OL]. [2022-02-21]. [https://www.cas.cn/syky/202201/t20220102\\_4820551.shtml](https://www.cas.cn/syky/202201/t20220102_4820551.shtml). Institute of Engineering Thermophysics of Chinese Academy of Sciences. The first hundred-megawatt advanced compressed air energy storage national demonstration project was successfully connected to the grid [EB/OL]. [2022-02-21]. [https://www.cas.cn/syky/202201/t20220102\\_4820551.shtml](https://www.cas.cn/syky/202201/t20220102_4820551.shtml).
- [9] RAUGEI M, LECCISI E, FTHENAKIS V M. What are the energy and environmental impacts of adding battery storage to photovoltaics? A generalized life cycle assessment[J]. Energy Technology, 2020, 8(11): doi:10.1002/ente.201901146.[LinkOut]
- [10] STERNBERG A, BARDOW A. Power-to-What? —Environmental assessment of energy storage systems[J]. Energy & Environmental Science, 2015, 8(2): 389-400.
- [11] STOUIGIE L, DEL SANTO G, INNOCENTI G, et al. Multi-dimensional life cycle assessment of decentralised energy storage systems[J]. Energy, 2019, 182: 535-543.
- [12] ALSHAFI M, BICER Y. Life cycle assessment of compressed air, vanadium redox flow battery, and molten salt systems for renewable energy storage[J]. Energy Reports, 2021, 7: 7090-7105.
- [13] KAPILA S, ONI A O, GEMECHU E D, et al. Development of net energy ratios and life cycle greenhouse gas emissions of large-scale mechanical energy storage systems[J]. Energy, 2019, 170: 592-603.
- [14] DENHOLM P, KULCINSKI G L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(13/14): 2153-2172.
- [15] BOUMAN E A, OBERG M M, HERTWICH E G. Environmental impacts of balancing offshore wind power with compressed air energy storage (CAES)[J]. Energy, 2016, 95: 91-98.
- [16] LI R X, ZHANG H R, CHEN H, et al. Hybrid techno-economic and environmental assessment of adiabatic compressed air energy storage system in China-Situation[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116443.
- [17] 杨东, 刘晶茹, 杨建新, 等. 基于生命周期评价的风力发电机碳足迹分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(3): 927-934. YANG D, LIU J R, YANG J X, et al. Carbon footprint of wind turbine by life cycle assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 927-934.
- [18] ARVANITTOYANNIS I S. ISO 14040: life cycle assessment (LCA)—principles and guidelines[M]//Waste Management for the Food Industries. Amsterdam: Elsevier, 2008: 97-132.
- [19] Huibregts M, Steinmann Z, Elshout P, et al. A Harmonized Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level[J]. National Institute for Public Health and the Environment, 2016:doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 机械工业工程节能设计规范: GB 50910—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of energy conservation of mechanical industrial engineering: GB 50910—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [21] 机械电子工业部第二设计研究院. 通用机械节能设计技术规定: JBJ 20—1990[S]. 北京:机械工业出版社,1991. Second Design and Research Institute of Ministry of Mechatronics Industry. Technical provisions for energy-saving design of general machinery: JBJ 20-1990[S]. Beijing:China Machine Press,1991.
- [22] 王亮. 基于多种清单分析方法的压缩机转子生命周期评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2017. WANG L. Life cycle assessment of compressor rotors based on multiple inventory analysis methods[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [23] SHI J L, LI T, ZHANG H C, et al. Energy consumption and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(7): 947-956.