

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208164

# 集成超临界二氧化碳储能循环燃煤发电 系统热力学分析

李晓莉, 曹丽华

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

**[摘要]** 为提升燃煤机组运行灵活性, 提出了燃煤发电集成超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)储能循环的热力系统, 并基于热力学焓分析方法, 研究了运行参数对系统不可逆损失的影响。研究结果表明: 该系统储能效率可达56.14%, S-CO<sub>2</sub>流量及S-CO<sub>2</sub>压缩机/透平压比对系统焓效率影响较大; 当S-CO<sub>2</sub>流量在50 kg/s至70 kg/s间增大, 系统焓效率从44.0%增大至61.0%; 当压缩机/透平压比在3.0至6.0间增大, 系统焓效率从27.5%增大至52.5%。本文提出的方法为提升燃煤机组运行灵活性提供了理论参考, 并为可再生能源大规模并网提供了思路。

**[关键词]** 燃煤机组; 灵活性; 超临界二氧化碳; 焓分析

**[引用本文格式]** 李晓莉, 曹丽华. 集成超临界二氧化碳储能循环燃煤发电系统热力学分析[J]. 热力发电, 2022, 52(6): 93-99.  
LI Xiaoli, CAO Lihua. Thermodynamic analysis of coal-fired power generation system integrating supercritical carbon dioxide energy storage cycle[J]. Thermal Power Generation, 2022, 52(6): 93-99.

## Thermodynamic analysis of coal-fired power generation system integrating supercritical carbon dioxide energy storage cycle

LI Xiaoli, CAO Lihua

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** In order to improve the operation flexibility of coal-fired power units, a thermal system of coal-fired power system coupled with supercritical carbon dioxide (S-CO<sub>2</sub>) energy storage cycle is proposed, and the effect of operation parameters on the system irreversible loss is investigated by thermodynamic exergy analysis. The results show that, the energy storage efficiency of the system can reach 56.14%, and the S-CO<sub>2</sub> flow rate and the S-CO<sub>2</sub> compressor/turbine pressure ratio have a greater influence on the system exergy efficiency. With the increase of S-CO<sub>2</sub> flow rate from 50 kg/s to 70 kg/s, the exergy efficiency of the system increases from 44.0% to 61.0%. With the increase of compressor/turbine pressure ratio from 3.0 to 6.0, the exergy efficiency of the system increases from 27.5% to 52.5%. The method proposed provides a theoretical reference for improving the coal-fired power unit operation flexibility, and provides ideas for large-scale grid connection of renewable energy.

**Key words:** coal-fired power unit; flexibility; supercritical carbon dioxide; exergy analysis

风电、光电等可再生能源发电系统已得到快速发展<sup>[1]</sup>。然而, 可再生能源具有强烈的时变性和不确定性<sup>[2]</sup>, 为保障电网安全运行, 需提升发电系统运行灵活性, 燃煤发电是我国调节电源的主体, 提高运行灵活性已成为燃煤发电面临的最为迫切的需求和最主要的技术方向之一。提升燃煤机组

运行灵活性的方案分为2类: 一是利用燃煤发电系统自身储能特性, 主要有凝结水节流<sup>[3-4]</sup>、抽汽节流<sup>[5]</sup>、给水旁路节流<sup>[6]</sup>等方案; 二是利用附加储能装置, 主要有附加储热罐<sup>[7]</sup>、燃料电池<sup>[8]</sup>、固体蓄热锅炉<sup>[9]</sup>等方案。上述方案虽然能够改善燃煤机组运行灵活性, 然而, 随着可再生能源的快速大规模发

收稿日期: 2022-08-12 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 吉林省教育厅科研项目(JJKH20220099KJ)

Supported by: Scientific Research Project of Jilin Provincial Department of Education (JJKH20220099KJ)

第一作者简介: 李晓莉(1990), 女, 博士研究生, 主要研究方向为热力系统集成与优化, lx119901201@163.com。

通信作者简介: 曹丽华(1973), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为热力系统集成与优化, clh320@126.com。

展, 现有技术难以进一步提升燃煤机组运行灵活性。

近年来, 压缩空气储能(CAES)因储存容量大、响应速度快及无污染等优点得到广泛研究, 且目前已实现示范<sup>[10]</sup>。随着对压缩气体储能工质物性的深入研究, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)因良好的物性受到了极大关注, 其具有较低的黏度、较大的扩散系数和密度以及较低的临界点等特点<sup>[11-12]</sup>。有研究者提出利用CO<sub>2</sub>替代空气作为压缩工质的技术路线。与CAES系统相比, 压缩CO<sub>2</sub>储能循环结构更加紧凑、循环效率更高<sup>[13-14]</sup>。

针对压缩CO<sub>2</sub>储能循环, 在系统构型、参数优化、性能分析等方面, 已经取得了丰富的研究成果。Morandin等人<sup>[13]</sup>结合储热技术, 构建了热-电储能循环。基于该循环构型设计思路, 结合压缩空气储能热力循环构型设计方法, 研究者分别提出了跨临界液态CO<sub>2</sub>储能<sup>[14]</sup>、超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)储能<sup>[15]</sup>、多级压缩跨临界CO<sub>2</sub>储能<sup>[16]</sup>以及具有回热系统的S-CO<sub>2</sub>储能<sup>[15]</sup>等多种循环构型。为了提高压缩CO<sub>2</sub>储能系统循环效率, Liu等人<sup>[17-18]</sup>采用先进焓分析方法, 开展了压缩CO<sub>2</sub>储能系统循环效率的优化研究。Hao等人<sup>[19-20]</sup>结合多目标优化算法开展了压缩CO<sub>2</sub>储能系统的高效优化, 并利用附加热泵循环系统回收压缩CO<sub>2</sub>热量。Cao等人<sup>[21]</sup>提出利用矿井封存压缩CO<sub>2</sub>储能工质。Liu等人<sup>[22]</sup>基于压缩CO<sub>2</sub>储能系统实现了冷-热-电三联产。

由于S-CO<sub>2</sub>储能循环系统具有密度稍低, 系统结构更加紧凑<sup>[15]</sup>等特点, 结合燃煤机组运行灵活性提升的技术需求, 本文提出燃煤发电机组耦合S-CO<sub>2</sub>储能循环系统, 旨在利用燃煤发电系统与S-CO<sub>2</sub>储

能循环各自优势, 构建一种集成S-CO<sub>2</sub>储能循环的燃煤发电热力系统。首先建立集成S-CO<sub>2</sub>储能循环燃煤发电系统热力学模型; 然后基于热力学理论, 开展热力学分析的研究, 获得不同参数对系统储能效率的影响; 最后采用热力学焓分析方法, 获得不同参数对于储能循环不可逆损失的影响规律。

## 1 系统描述

本文以某660 MW燃煤发电机组为研究对象, 锅炉为一次再热直流锅炉, 汽轮机额定负荷为660 MW。S-CO<sub>2</sub>储能循环引入可提升燃煤机组运行灵活性, 以往S-CO<sub>2</sub>储能循环的压缩机大部分采用电能直接转换为机械能的能量转换方式, 不利于提升系统整体循环效率。参考燃煤机组“弹性抽汽”的能量利用方法<sup>[5-6]</sup>, 将汽轮机抽汽的热能作为储能系统能量来源, 可减少能量二次转化过程中能量损失。

此外, S-CO<sub>2</sub>储能循环冷却系统, 可利用汽轮机回热循环系统的低温凝结水回收S-CO<sub>2</sub>透平出口的低品位能量, 将该部分能量回收再利用, 进而降低汽轮机抽汽流量。

按照上述思路, 本文设计得到如图1所示的集成S-CO<sub>2</sub>储能循环的燃煤发电热力系统构型, 通过储/释能过程, 完成机组运行灵活性的提升。具体工作原理如下: 当储能循环处于储能阶段, 汽轮机抽汽流量增大, S-CO<sub>2</sub>压缩机做功, 并利用储热罐和高压罐实现热能和压力能的存储; 当储能循环处于释能阶段, 储热流体释放热能, 同时, 高压S-CO<sub>2</sub>进入透平做功发电。

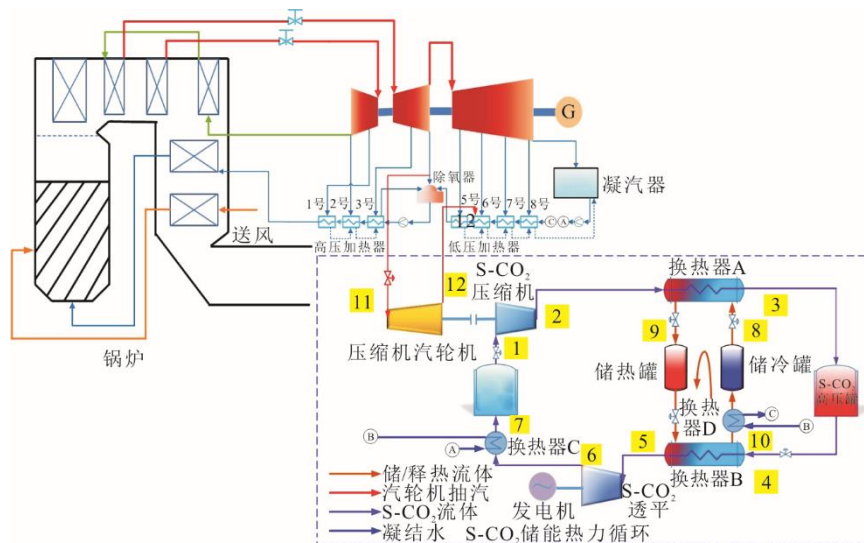


图1 耦合S-CO<sub>2</sub>储能循环燃煤发电热力系统结构

Fig.1 Structure of the coal-fired power generation system coupled with S-CO<sub>2</sub> energy storage cycle

## 2 热力系统建模

针对本文提出的集成热力系统,为开展其热力学分析,建立集成系统热力学参数化模型,模型分为2套子模型:一是燃煤机组蒸汽循环模型;二是S-CO<sub>2</sub>储能循环模型。燃煤机组热力学模型采用文献[23]建模方法。

### 2.1 S-CO<sub>2</sub> 储能循环热力学模型

为分析集成系统热力学特性,需建立S-CO<sub>2</sub>储能系统数学模型。基于热力学第一定律建立S-CO<sub>2</sub>储能循环各模块数学模型,典型的S-CO<sub>2</sub>储能循环主要包括S-CO<sub>2</sub>压缩机、透平和换热器等设备。

#### 2.1.1 压缩机热力学模型

S-CO<sub>2</sub>压缩机能量平衡方程为<sup>[11-12]</sup>:

$$m_{cd,com,in} h_{cd,com,in} + P_{cd,com} = m_{cd,com,out} h_{cd,com,out} \quad (1)$$

S-CO<sub>2</sub>压缩机等熵效率如式(2)所示:

$$\eta_{cd,com} = \frac{h_{cds,com,out} - h_{cd,com,in}}{h_{cd,com,out} - h_{cd,com,in}} \quad (2)$$

式中:  $m_{cd,com,in}$ 、 $m_{cd,com,out}$  分别为S-CO<sub>2</sub>压缩机进、出口工质流量, kg/s;  $h_{cd,com,in}$ 、 $h_{cd,com,out}$ 、 $h_{cds,com,out}$  分别为S-CO<sub>2</sub>压缩机进、出口、等熵出口焓值, kJ/kg;  $\eta_{cd,com}$  为S-CO<sub>2</sub>压缩机等熵效率, %;  $P_{cd,com}$  为S-CO<sub>2</sub>压缩机耗功, kW。

#### 2.1.2 换热器热力学模型

S-CO<sub>2</sub>储能循环系统包括不同换热器,换热器建模过程分为S-CO<sub>2</sub>和换热工质两侧,根据热力学第一定律,分别建立两侧热力学方程。其中,S-CO<sub>2</sub>侧能量平衡方程如式(3)所示<sup>[11-12]</sup>:

$$Q_{cd,heater} = m_{cd,heater,out} h_{cd,heater,out} - m_{cd,heater,in} h_{cd,heater,in} \quad (3)$$

换热工质侧能量平衡方程为:

$$m_{x,heater,in} h_{x,heater,in} = m_{x,heater,out} h_{x,heater,out} + Q_{cd,heater} \quad (4)$$

式中:  $m_{x,heater,in}$ 、 $m_{x,heater,out}$  分别为换热器换热工质  $x$  的进、出口流量, kg/s;  $h_{x,heater,in}$ 、 $h_{x,heater,out}$  分别为换热器换热工质进、出口焓值, kJ/kg;  $Q_{cd,heater}$  为换热器换热量, kW。

#### 2.1.3 透平热力学模型

S-CO<sub>2</sub>透平能量平衡方程<sup>[11-12]</sup>为:

$$P_{cd,tur} = m_{cd,tur,in} h_{cd,tur,in} - m_{cd,tur,out} h_{cd,tur,out} \quad (5)$$

透平等熵效率如式(6)所示:

$$\eta_{cd,tur} = \frac{h_{cd,tur,out} - h_{cds,tur,in}}{h_{cd,tur,in} - h_{cds,tur,in}} \quad (6)$$

式中:  $m_{cd,tur,in}$ 、 $m_{cd,tur,out}$  分别为S-CO<sub>2</sub>透平进、出口工

质流量, kg/s;  $h_{cd,tur,in}$ 、 $h_{cd,tur,out}$ 、 $h_{cds,tur,in}$  分别为S-CO<sub>2</sub>透平进、出口、等熵入口焓值, kJ/kg;  $\eta_{cd,tur}$  为S-CO<sub>2</sub>透平等熵效率, %;  $P_{cd,tur}$  为S-CO<sub>2</sub>透平做功, kW。

### 2.2 S-CO<sub>2</sub> 储能循环焓分析模型

焓损失表明实际过程的不可逆程度,用于衡量热力过程的完善程度,但焓损失是一种绝对量。因此,本文选择各部件的焓效率作为评价指标。根据热力学第二定律,可以建立储能循环热力系统各部件燃料焓和收益焓模型,见表1。S-CO<sub>2</sub>储能循环系统各部件的焓损失如式(7)所示,各部件焓效率计算方法如式(8)所示。为了综合评价储能循环系统不同工况下热力过程完善程度,定义储能循环系统焓效率如式(9)所示<sup>[12,15]</sup>。

表1 储能环节部件焓分析模型

Tab.1 Exergy analysis model of energy storage components

储能循环部件	$\dot{E}_{F,k}$	$\dot{E}_{P,k}$
压缩机	$P_{cd,com}$	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$
透平	$\dot{E}_5 - \dot{E}_6$	$P_{cd,tur}$
换热器A	$\dot{E}_2 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_9 - \dot{E}_8$
换热器B	$\dot{E}_9 - \dot{E}_{10}$	$\dot{E}_5 - \dot{E}_4$
换热器C	$\dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$\dot{E}_B - \dot{E}_A$
换热器D	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_8$	$\dot{E}_C - \dot{E}_B$
压缩机汽轮机	$\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12}$	$P_{ESST}$

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} \quad (7)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_{Ex} = \frac{P_{cd,tur}}{\dot{E}_{11} - \dot{E}_{12} + \dot{E}_A - \dot{E}_C} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $\dot{E}_i$  为第  $i$  节点工质焓, kW;  $\dot{E}_{F,k}$ 、 $\dot{E}_{P,k}$ 、 $\dot{E}_{D,k}$  分别为储能循环  $k$  部件燃料焓、收益焓、焓损失, kW;  $\varepsilon_k$  为储能循环  $k$  部件焓效率, %;  $\eta_{Ex}$  为储能循环系统焓效率, %。

## 3 热力学分析

储能效率是储能循环系统的重要指标,本文采用往返效率( $\eta_{RTE}$ )对储能效率进行评价,其表示储能过程中消耗的总能量与释能过程获得的总能量之比,如式(10)所示<sup>[12,15]</sup>。为了分析S-CO<sub>2</sub>储能循环热力学特性,本文设定储能循环系统主要运行参数见表2。通过仿真计算,在储/释能时间相同的情况下,本文提出的热力系统的储能负荷为4.480 MW, S-CO<sub>2</sub>储能循环的释能负荷为2.260 MW,释能阶段燃煤机组汽轮机负荷增加0.255 MW,系统 $\eta_{RTE}$ 为56.14%。

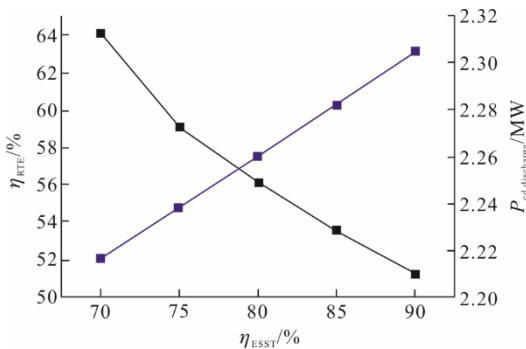
$$\eta_{RTE} = \frac{P_{cd,discharge} + \Delta P_{st,discharge}}{P_{discharge}} \quad (10)$$

式中： $P_{charge}$  为储能过程中获得的总负荷，kW； $P_{cd,discharge}$  为释能过程中 S-CO<sub>2</sub> 储能循环系统负荷变化，kW； $\Delta P_{st,discharge}$  为释能过程中燃煤发电机组负荷变化，kW。

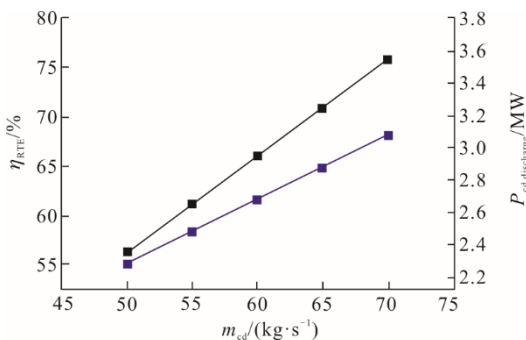
表 2 S-CO<sub>2</sub> 储能循环系统关键运行参数  
Tab.2 Key operating parameters of the S-CO<sub>2</sub> energy storage cycle system

项目	数值
S-CO <sub>2</sub> 流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	50
导热油流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	50
压缩机汽轮机抽汽流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	12
压缩机汽轮机效率/%	80
压缩机效率/%	90
透平效率/%	90
压缩机/透平压比	5
高压储气罐体积/m <sup>3</sup>	220
低压储气罐体积/m <sup>3</sup>	440
储冷罐温度/℃	50
储热罐温度/℃	123

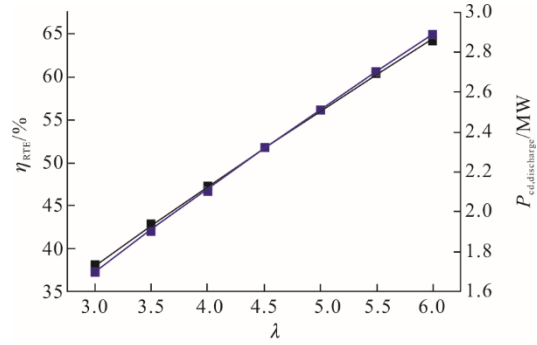
为了获得不同因素对系统储能效率的影响，本文计算了在储释能时间相同的情况下，压缩机汽轮机效率 ( $\eta_{ESST}$ )、压缩机汽轮机抽汽流量 ( $m_{ESST}$ )、S-CO<sub>2</sub> 工质流量 ( $m_{cd}$ )、压缩机/透平压比 ( $\lambda$ ) 对系统  $\eta_{RTE}$  的影响，具体如图 2 所示。



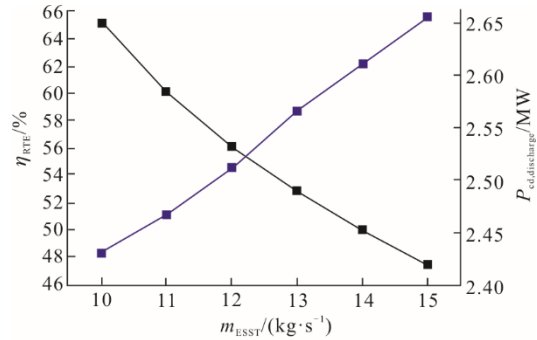
a) 压缩机汽轮机效率对系统  $\eta_{RTE}$  影响规律



b) S-CO<sub>2</sub> 流量对系统  $\eta_{RTE}$  影响规律



c) 压比对系统  $\eta_{RTE}$  影响规律



d) 压缩机汽轮机抽汽流量对系统  $\eta_{RTE}$  影响规律

图 2 不同参数对储能循环系统  $\eta_{RTE}$  的影响  
Fig.2 Influence of different parameters on  $\eta_{RTE}$  of the energy storage cycle system

随着压缩机汽轮机效率的增大，系统  $\eta_{RTE}$  下降 (图 2a)。主要原因在于，随着压缩机汽轮机效率增大，压缩机耗功增大，虽然 S-CO<sub>2</sub> 释能负荷从 2.2 MW 升高至 2.3 MW，但在 S-CO<sub>2</sub> 负荷压比一定的情况下，压缩机出口 S-CO<sub>2</sub> 工质温度提升，导致系统换热损失增高。因此，随着压缩机汽轮机效率的增大，系统  $\eta_{RTE}$  降低。S-CO<sub>2</sub> 工质流量每提高 5 kg/s，系统  $\eta_{RTE}$  升高 5 个百分点左右，释能负荷从 2.2 MW 线性增大至 3.1 MW (图 2b)。主要原因在于，随着 S-CO<sub>2</sub> 流量增大，耗功不变的情况下，压缩机出口温度降低，使得换热过程损失减小。随着压缩机/透平压比的增大， $\eta_{RTE}$  也随之升高，压比提高 1.0，系统  $\eta_{RTE}$  升高 10 个百分点左右，释能负荷升高 0.4 MW (图 2c)。随着压缩机汽轮机抽汽增大，系统  $\eta_{RTE}$  降低，在 10~15 kg/s 范围内，系统  $\eta_{RTE}$  随抽汽流量的增大，下降幅度逐渐变小，释能负荷升高将近 0.25 MW (图 2d)。

针对 S-CO<sub>2</sub> 储能循环，为了获得不同参数对系统焓效率及各部件不可逆损失分布的影响规律，本文分析了不同参数对系统热力学焓效率及各部件焓效率的影响。

压缩机汽轮机效率对系统及各部件焓效率影

响如图 3 所示。随着压缩机汽轮机效率的增大，系统焓效率降低（图 3a），压缩机汽轮机焓损失降低；同时可以发现，压缩机焓损失明显增大，其焓效率降低，导致系统焓效率降低（图 3b），随着压缩机汽轮机效率在 70%~90% 增大，系统焓效率下降幅度为 1.4 百分点。由此可见，虽然压缩机汽轮机效率增大会造成储能循环焓效率下降，但影响并不明显。

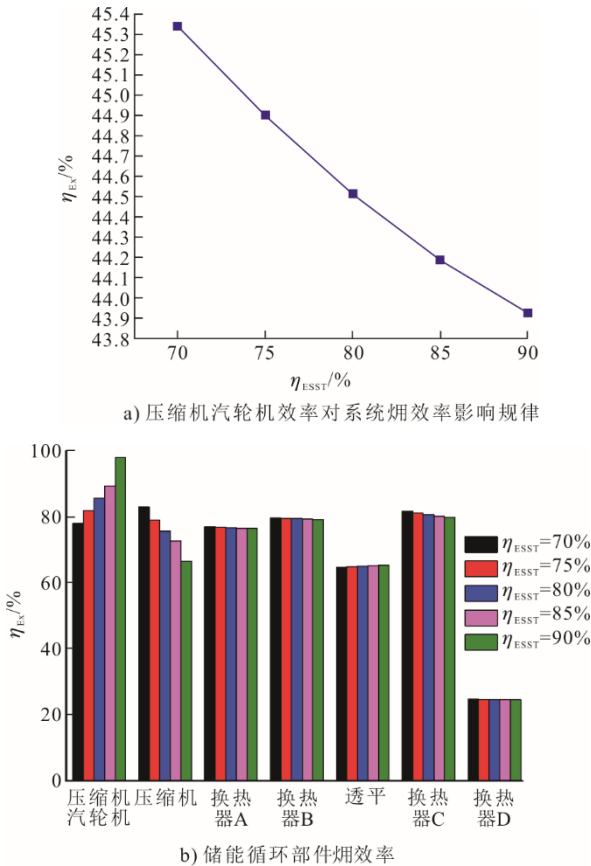
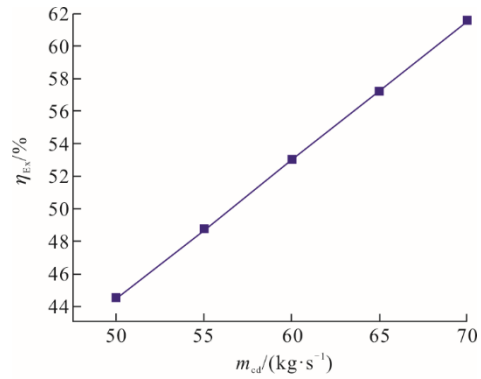


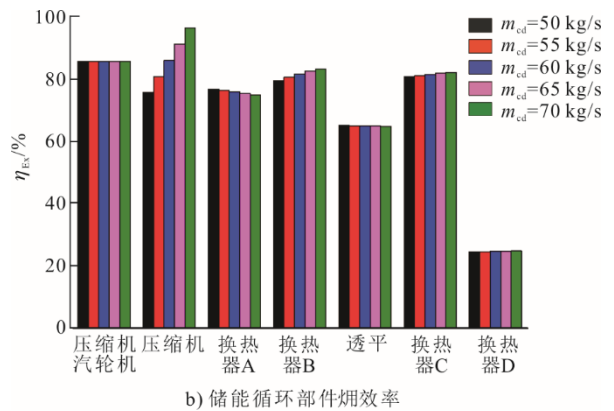
图 3 压缩机汽轮机效率对系统及部件焓效率的影响  
Fig.3 Effects of compressor turbine efficiency on exergy efficiency of the system and components

S-CO<sub>2</sub> 流量对系统及各部件焓效率影响如图 4 所示。S-CO<sub>2</sub> 流量对系统焓效率影响较大（图 4a）；随着 S-CO<sub>2</sub> 流量增大，储能循环压缩机焓效率升高，其他部件焓效率变化不大（图 4b）。随着 S-CO<sub>2</sub> 流量由 50 kg/s 增大至 70 kg/s，系统焓效率从 44.0% 增大至 61.0%，S-CO<sub>2</sub> 流量每增大 5 kg/s，系统焓效率会增大 4.2 百分点。主要原因在于，随着 S-CO<sub>2</sub> 流量增大，压缩机耗功不变的情况下，压缩机出口温度降低，在储热流体温度不变的情况下，换热系统换热温差降低。此外，压缩机焓损失降低，进而使得系统不可逆损失降低。

压缩机/透平压比对系统及各部件焓效率影响如图 5 所示。

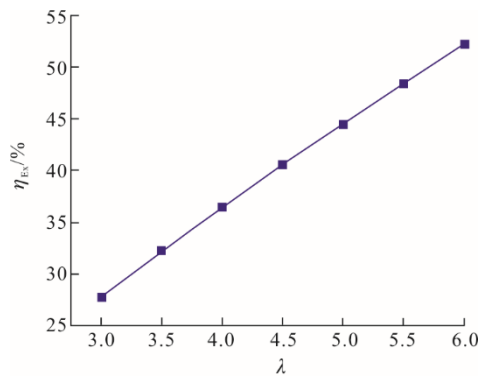


a) S-CO<sub>2</sub> 流量对系统焓效率的影响

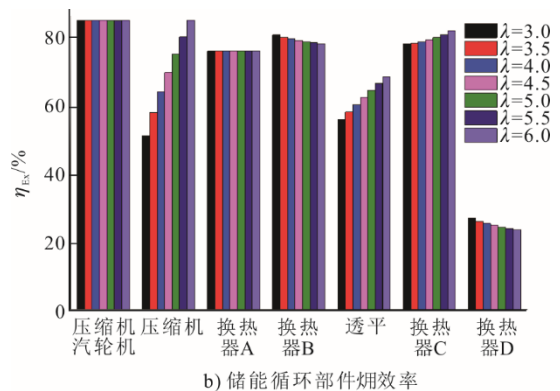


b) 储能循环部件焓效率

图 4 S-CO<sub>2</sub> 流量对系统及部件焓效率的影响  
Fig.4 Effect of S-CO<sub>2</sub> flow rate on exergy efficiency of the system and components



a) 压比对系统焓效率的影响

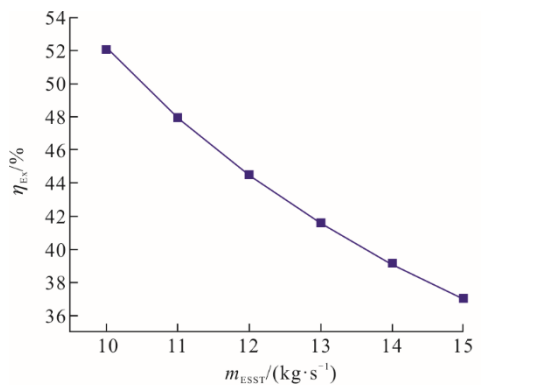


b) 储能循环部件焓效率

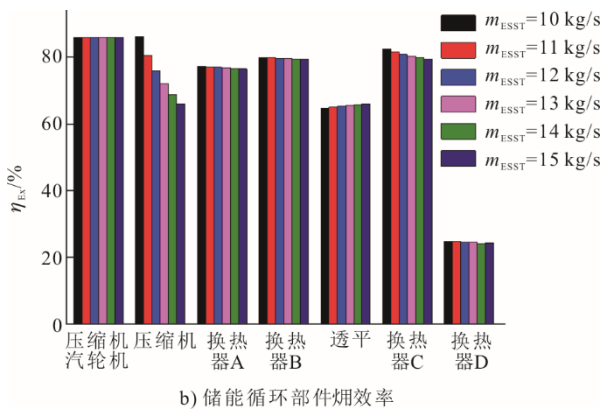
图 5 压缩机/透平压比对系统及部件焓效率的影响  
Fig.5 Effects of compressor/turbine pressure ratio on exergy efficiency of the system and components

压比对于系统炯效率的影响较大,压比在 3.0 至 6.0 间增大过程中,系统炯效率从 27.5% 增大至 52.5%,压比每增大 0.5,系统炯效率升高近 4.0 百分点(图 5a)。随着压比增大,压缩机、透平、换热器 C 炯效率增大,换热器 B 及换热器 D 炯效率会下降(图 5b)。

压缩机汽轮机抽汽流量对系统及各部件炯效率影响如图 6 所示。由图 6 可见,随着压缩机汽轮机抽汽流量增大,对于系统炯效率影响比较明显,在 10 kg/s 至 15 kg/s 间,系统炯效率呈指数下降,从 52.0% 降低了 15.0 百分点。主要原因在于,由于压缩机汽轮机抽汽流量的增大,系统输入炯增大,但是,压缩机汽轮机及压缩机炯损失增大,压缩机炯效率明显降低,导致系统炯效率降低。



a) 压缩机汽轮机效率对系统炯效率影响规律



b) 储能循环部件炯效率

图 6 压缩机汽轮机抽汽流量对系统炯效率的影响

Fig.6 Influence of extraction steam flow rate of compressor turbine on system exergy efficiency

## 4 结 论

本文提出一种燃煤发电机组集成 S-CO<sub>2</sub> 储能循环的系统,并对其开展热力学性能分析,研究得到如下结论。

1) 本文提出的燃煤发电机组集成 S-CO<sub>2</sub> 储能

循环系统能够具有较高的储能效率,额定工况下,系统  $\eta_{\text{RTE}}$  在 56% 以上。

2) 储能循环的 S-CO<sub>2</sub> 流量、压缩机/透平压比、压缩机汽轮机抽汽流量 3 个参数对系统炯效率影响较大。随着 S-CO<sub>2</sub> 流量由 50 kg/s 增大至 70 kg/s 时,系统炯效率从 44.0% 增大至 61.0%,且 S-CO<sub>2</sub> 流量每增大 5 kg/s,系统炯效率会增大 4.2 百分点;压比在 3.0 至 6.0 间增大时,系统炯效率从 27.5% 增大至 52.5%,压缩机/透平压比每增大 0.5,系统炯效率升高近 4.0 百分点;压缩机汽轮机抽汽流量由 10 kg/s 增大至 15 kg/s 时,储能循环系统炯效率呈指数降低了 15.0 百分点。

3) 压缩机汽轮机效率对系统炯效率影响不大,随着压缩机汽轮机效率在 70%~90% 间增大,系统炯效率仅下降 1.4 百分点。

## [参 考 文 献]

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [2] 帅永,赵斌,蒋东方,等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 1-10.  
SHUAI Yong, ZHAO Bin, JIANG Dongfang, et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 1-10.
- [3] 刘吉臻,王耀函,曾德良,等. 基于凝结水节流的火电机组 AGC 控制优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6918-6925.  
LIU Jizhen, WANG Yaohan, ZENG Deliang, et al. An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6918-6925.
- [4] HU Y, ZENG D L, LIU J Z, et al. Dynamic model for controller design of condensate throttling systems[J]. ISA Transactions, 2015, 58: 622-628.
- [5] ZHAO Y L, WANG C Y, LIU M, et al. Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: a dynamic simulation[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1295-1309.
- [6] WANG D, LIU D Y, WANG C N, et al. Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage[J]. Energy, 2022, 239: 122301.
- [7] MARCEL R, GERD O, KLAUS G. Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2019, 236: 607-621.
- [8] YUAN R, YE J, LEI J, et al. Integrated combined heat and power system dispatch considering electrical and thermal

- energy storage[J]. *Energies*, 2016, 9: 474.
- [9] SAMANATA S, GHOSH S. A thermo-economic analysis of repowering of a 250 MW coal fired power plant through integration of molten carbonate fuel cell with carbon capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 51: 48-55.
- [10] 陈海生, 刘畅, 徐玉杰, 等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1477-1485.  
CHEN Haisheng, LIU Chang, XU Yujie, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1477-1485.
- [11] 杨建道, 陈来杰, 沈昕. 超临界二氧化碳压缩测试系统动态模型[J]. *热力发电*, 2022, 51(2): 117-124.  
YANG Jiandao, CHEN Laijie, SHEN Xin. Dynamic model of supercritical carbon dioxide compression testing system[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(2): 117-124.
- [12] 赵世飞, 王为术, 刘军. 1 000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析[J]. *热力发电*, 2020, 49(12): 9-16.  
ZHAO Shifei, WANG Weishu, LIU Jun. Thermodynamic performance analysis for a 1 000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(12): 9-16.
- [13] MORANDIN M, MERCANGÖZ M, HEMERLE J, et al. Thermo-economic design optimization of a thermo-electric energy storage system based on transcritical CO<sub>2</sub> cycles[J]. *Energy*, 2013, 58: 571-587.
- [14] WANG M K, ZHAO P, WU Y, et al. Performance analysis of a novel energy storage system based on liquid carbon dioxide[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 812-823.
- [15] HE Q, LIU H, HAO Y P, et al. Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis[J]. *Renewable Energy*, 2018, 127: 835-849.
- [16] LIU H, HE Q, BORGIA A, et al. Thermodynamic analysis of a compressed carbon dioxide energy storage system using two saline aquifers at different depths as storage reservoirs[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 127: 149-159.
- [17] LIU Z, YANG X Q, JIA W G, et al. Justification of CO<sub>2</sub> as the working fluid for a compressed gas energy storage system: a thermodynamic and economic study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101132.
- [18] LIU Z, LIU Z H, YANG X Q, et al. Advanced exergy and exergoeconomic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112391.
- [19] HAO Y P, HE Q, ZHOU Q, et al. Modeling and techno-economic analysis of a novel trans-critical carbon dioxide energy storage system based on life cycle cost method[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101273.
- [20] HAO Y P, HE Q, DU D M. A trans-critical carbon dioxide energy storage system with heat pump to recover stored heat of compression[J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 1099-1108.
- [21] CAO Z, DENG J Q, ZHOU S H, et al. Research on the feasibility of compressed carbon dioxide energy storage system with underground sequestration in antiquated mine goal[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 211: 112788.
- [22] LIU Z, CAO F, GUO J Z, et al. Performance analysis of a novel combined cooling, heating and power system based on carbon dioxide energy storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 188: 151-161.
- [23] WANG D, XIE X Y, WANG C N, et al. Thermo-economic analysis on an improved coal-fired power system integrated with S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. *Energy*, 2021, 220: 119654.

(责任编辑 邓玲惠)