

1 000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统 热力学性能分析

赵世飞, 王为术, 刘 军

(华北水利水电大学电力学院, 河南 郑州 450045)

[摘 要] 超临界二氧化碳循环在燃煤发电领域具有广阔的应用前景。本文采用 EBSILON Professional 软件对某 1 000 MW 超临界二氧化碳 (S-CO₂) 燃煤发电系统进行建模, 并在此基础上分析了系统能流和焓损分布等热力学特性, 讨论了关键参数包括透平入口温度、压缩机分流比等对系统热力学性能的影响。结果表明: 在给定的参数下, 该 1 000 MW 燃煤 S-CO₂ 发电系统的发电效率和焓效率分别可达到 47.32% 和 46.11%, 较典型朗肯循环分别可提高 1.21% 和 1.17%; 系统的焓损中锅炉占比 74.55%, 其设备焓效率为 59.83%; 透平入口温度由 500 °C 提高到 660 °C, 可使系统发电效率提高 7.98%, 发电标准煤耗率降低 43.03 g/(kW·h); 压缩机分流比的增大会使系统总发电量和压缩机整体耗功增加, 因此其存在最佳分流比, 在该 1 000 MW 燃煤 S-CO₂ 发电系统中, 当分流比为 28% 时, 系统发电效率最高, 为 47.65%。

[关 键 词] 燃煤; 超临界二氧化碳; EBSILON 软件; 建模; 热力学分析; 发电效率; 分流比

[中图分类号] TK114 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfid.202003044

[引用本文格式] 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.

Thermodynamic performance analysis for a 1 000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant

ZHAO Shifei, WANG Weishu, LIU Jun

(School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (S-CO₂) cycle has great potential when applied to coal-fired power generation industry. By EBSILON Professional software, the model of a 1 000 MW coal-fired S-CO₂ power plant was established. On this basis, thermodynamic performances of the system, such as the energy flow and exergy characters, were analyzed. The influence of key parameters including the temperatures at the turbine inlet and the mass flow ratio of the compressor on thermodynamic performance of the system were also discussed. The results show that, under the given condition, the power generation efficiency and exergy efficiency of the S-CO₂ system can reach 47.32% and 46.11%, which are 1.21% and 1.17% higher than that of the typical Rankine cycle, respectively. Among all the exergy losses, the losses of the boiler contributes the largest, which is 74.55%, and the exergy efficiency of the boiler is 59.83%. When the input temperature of the turbine raises from 500 °C to 660 °C, the power generation efficiency of the system increases by 7.98%, and the standard coal consumption rate decreases by 43.03 g/(kW·h). The increment of mass flow ratio of the compressor can lead to an increase in both the gross generation power and the power consumption of the compressors. Therefore, there exists an optimal mass flow ratio of the compressor. When the mass flow ratio of the compressor is 28%, the gross power generation efficiency reaches 47.65%, which is the highest.

Key words: coal for firing, supercritical carbon dioxide, EBSILON software, modeling, thermodynamic analysis, power generation efficiency, mass flow ratio

收稿日期: 2020-03-04

基金项目: 河南省高校科技创新团队项目(16IRTSTHN7)

Supported by: Science and Technology Innovation Team Program of Henan (16IRTSTHN7)

第一作者简介: 赵世飞(1991), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为燃煤机组节能优化, zhaoshifei@ncwu.edu.cn.

煤炭作为火力发电的常用燃料,在我国电力行业中占据重要地位^[1]。近年来,随着我国能源结构转型的推进,燃煤发电机组的比重已有所下降。而截至2018年底,燃煤机组的装机容量占比仍超过58%,发电量更是达到了68.3%^[2]。在未来的几年内,清洁高效的燃煤发电技术仍是我国能源行业发展的重点。

传统燃煤发电机组以水蒸气作为介质推动汽轮机发电,并通过不断提高蒸汽参数,增加再热等手段提高发电效率。最先进的技术可将燃煤机组的发电效率提高至47%。然而,通过提高蒸汽参数以提高循环效率的方式对材料提出了较高的要求,现有的技术水平已达到瓶颈。因为,有诸多学者开始将目光转向新的循环工质,其中利用超临界二氧化碳(S-CO₂)的布雷顿循环得到了越来越多的关注^[3-7]。相较于传统的以水蒸气为介质的循环,S-CO₂循环在同样的主气温度下可以达到更高的效率^[8]。同时CO₂腐蚀率较低,即使在高温环境也不易与金属管壁发生化学反应,因而较水蒸气更容易突破高温材料的技术瓶颈^[9]。并且其透平和压缩机体积也较蒸汽系统小。同时,CO₂作为一种相对廉价的工质,其获取途径也较为广泛。综合来看,S-CO₂循环在燃煤发电系统中有较好的应用前景^[10]。

对此,诸多学者从不同角度展开了研究。Park等人^[11]对多种典型燃煤S-CO₂发电系统进行了热力学性能和技术经济性的比较,解释了燃煤S-CO₂发电系统的经济优势。Liu等人^[4]对燃煤S-CO₂冷端和热端优化进行了总结与比较,为系统优化设计提供了思路。张一帆等^[12]对600 MW燃煤S-CO₂发电

系统中的高温回热器、低温回热器和预冷器进行了概念设计。Z. Mohammadi等^[13]应用不同的焓分析方法对S-CO₂发电系统进行分析,指出了循环中焓损分布特性和节能潜力。Bai等人^[14]对300 MW燃煤S-CO₂发电系统的锅炉系统进行了重新设计,使其能在设计工况和变工况时都具有较优的性能。赵新宝等^[15]对S-CO₂系统中关键高温部件的腐蚀特性和力学性能进行了阐述。Ma等人^[16]针对燃煤S-CO₂发电系统中印刷电路板换热器的动态响应特性开展了研究。陈渝楠等^[17]利用Aspen Plus软件对600 MW燃煤S-CO₂发电系统的常规、二次再热和多级压缩系统进行建模,得到了影响效率的关键因素。吴佐莲等^[18]从供能灵活性的角度,基于Fortran语言开发的计算程序,分析了燃煤S-CO₂热电联产系统的调峰能力。有关燃煤S-CO₂发电系统的研究仍处在初参数设计与优化的阶段,挖掘系统可靠的建模方法以及热力学性能分析对进一步完善研究体系具有重要意义。

鉴于此,本文利用EBSILON Professional软件对经典的S-CO₂分流再压缩布雷顿循环系统进行建模,并在此基础上开展基于热力学第一和第二定律的热力学性能分析,得到了关键参数对系统性能的影响规律。

1 案例机组介绍

本文选取的案例机组为1 000 MW燃煤S-CO₂布雷顿循环分流再压缩发电系统,其系统示意图1所示^[19]。

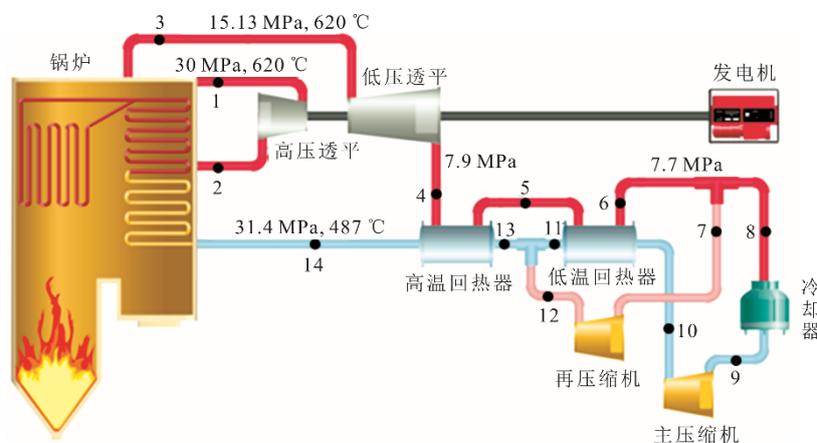


图1 1 000 MW 燃煤 S-CO₂ 发电系统示意
Fig.1 Schematic diagram of the 1 000 MW coal-fired S-CO₂ power plant

燃煤锅炉产生的高温高压气体经高压透平和低压透平做功后，依次进入高温回热器和低温回热器加热入炉气体，并在低温回热器后进行分流。分流后部分 CO₂ 通过再压缩的方式使分流的气体与低温回热器出口的气体有较好的温度匹配；其余工质进入冷却器冷却后，经过主压缩机升压并经低温回热器加热后与再压缩机出口气体混合，之后经高温回热器进一步升温进入燃煤锅炉。分流再压缩过程可有效减少通过冷却器的 CO₂ 流量从而减少乏气损失，同时使该循环换热过程温度能级更为匹配。该发电流程也被认为是 S-CO₂ 发电系统较为理想的基础形态^[20]。该系统关键热力学参数和煤种煤质分析分别见表 1 和表 2。其中，旁路分流比指再压缩机流量占低温回热器热段出口工质流量比例。

表 1 1 000 MW 燃煤 S-CO₂ 系统关键热力学参数

Tab.1 Key parameters of the 1 000 MW coal-fired S-CO₂ system

项目	数值
主气流量/(t·h ⁻¹)	25 299
主气温度/°C	620
主气压力/MPa	30
再热气体温度/°C	620
再热气体压力/MPa	15.13
低压透平出口压力/MPa	7.9
低压透平等熵效率/%	93
主压缩机效率/%	89
旁路分流比/%	30

表 2 选用煤种煤质分析
Tab.2 Quality analysis for the selected coal

项目	数值
w _{ar} (C)/%	73.69
w _{ar} (H)/%	4.29
w _{ar} (O)/%	2.51
w _{ar} (N)/%	2.45
w _{ar} (S)/%	1.05
w _{ar} (A)/%	6.26
w _{ar} (M)/%	9.75
w _{daf} (V) _{daf} /%	23.98
低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	29 686

2 系统建模与评价指标

2.1 系统建模

本文采用 EBSILON Professional 软件对系统进行建模。该软件是一款热力学建模软件，多用于发电系统的设计、优化和改造评价。其建模对象涵盖燃煤、燃气、核电、太阳能光伏与光热等多种应用领域，可用于朗肯、卡琳娜、布雷顿、有机朗肯等多种循环，经诸多学者验证为一种可靠的热力学建模工具^[21-22]。

利用该软件建立燃煤 S-CO₂ 发电系统模型，如图 2 所示。该模型主要分为燃煤锅炉侧与 S-CO₂ 循环侧 2 部分。

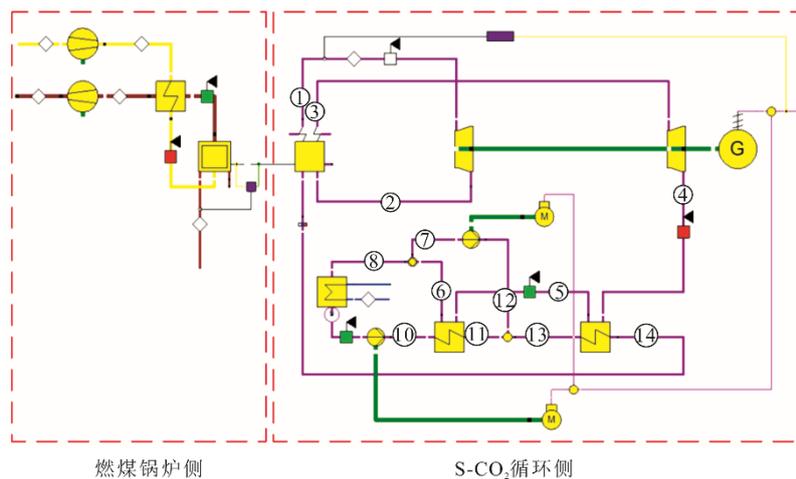


图 2 燃煤 S-CO₂ 发电系统模型

Fig.2 Schematic diagram of the coal-fired S-CO₂ power generation system (in EBSILON Professional)

建模时，首先应将实际系统中的组件（包括各换热设备、压缩膨胀设备等）标准化，即找到建模软件中对应的元件；之后根据系统流程添加这些元件并选用合适的工质（包括水、空气、烟气和 CO₂

等）将元件进行连接；最后根据系统参数选择元件参数给定方法，并设置相应的建模参数。本文建模主要组件换热器、膨胀压缩装置、锅炉、发电机等，主要组件参数设置见表 3。

表3 本模型中所用主要组件及参数
Tab.3 Main components and parameters in the model

组件	组件编号	建模参数
锅炉 (透平侧)	5	主气温度 620 °C
		再热气体温度 620 °C
		主气压力 30 MPa
		主气管道压损 1.4 MPa
		再热气体管道压损 0.26 MPa
锅炉 (燃料侧)	21	过量空气系数 1.17
		不完全燃烧损失 2%
		灰渣温度 500 °C
空气预热器	25	出口温度 130 °C
		出口压力 0.098 MPa
透平	122	等熵膨胀效率 93% 机械效率 99.8%
发电机	11	发电机效率 99%
冷却器	26	出口温度 32 °C
分流器	18	分流比 30%
回热器	26	下端差 10 °C
压缩机	8	压缩机效率 89%
送风机 (引风机)	24	风机效率 85%

2.2 热力学性能评价指标

2.2.1 基于热力学第一定律的评价指标

发电效率和发电标准煤耗率是电厂最常用的性能评价指标,表征了系统能源转化的效率与煤耗特性。发电效率 η_e 为

$$\eta_e = \frac{P}{m \times Q_{LHV} \times 3600} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为净发电量, MW; m 为锅炉燃煤量, t/h; Q_{LHV} 为燃煤的低位发热量, kJ/kg。

发电标准煤耗率 b_e 为

$$b_e = \frac{122.8}{\eta_e} \quad (2)$$

2.2.2 基于热力学第二定律的评价指标

除了上述指标外,本文还对系统进行了基于热力学第二定律的评价,包括总焓效率 $\eta_{e,ex}$,设备焓损 $\Delta E_{i,ex}$ 和设备焓效率 $\eta_{i,ex}$ 。

总焓效率 $\eta_{e,ex}$ 为

$$\eta_{e,ex} = \frac{P}{m \times \xi \times Q_{LHV}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 ξ 为燃煤比焓与低位发热量的比值,可由式(4)计算^[23],

$$\xi = 1.009 + \frac{0.131w_{ar}(O) + 0.16w_{ar}(M)}{1 - [w_{ar}(A) + w_{ar}(M)]} \quad (4)$$

式中 $w_{ar}(O)$ 、 $w_{ar}(M)$ 和 $w_{ar}(A)$ 分别为燃煤收到基的氧、水和灰分百分数, %。

设备焓损 $\Delta E_{i,ex}$ 为

$$\Delta E_{i,ex} = E_{in,i,ex} - E_{out,i,ex} \quad (5)$$

式中 $E_{in,i,ex}$ 和 $E_{out,i,ex}$ 分别为设备 i 的输入和输出焓, MW。

设备焓效率 $\eta_{i,ex}$ ^[24]为

$$\eta_{i,ex} = \left(1 - \frac{\Delta E_{i,ex}}{E_{in,i,ex}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 设计工况热力学性能分析

图3和表4分别给出模型中各节点的热力学参数和系统的温-熵图,其中编号已在图2中标出具体位置。由图3和表4可以看出,系统均运行在超临界的状态。

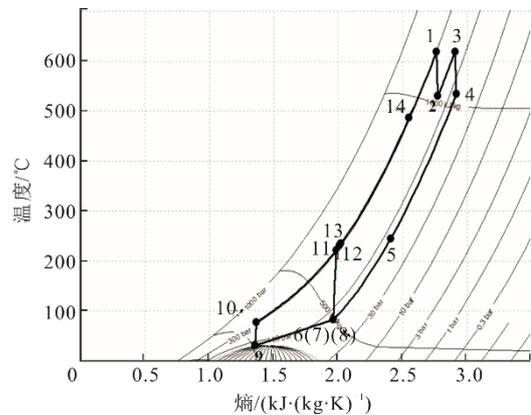


图3 系统温-熵图

Fig.3 The T-s diagram of the system

表4 系统各节点热力学参数

Tab.4 Thermodynamic parameters of each node in the system

编号	流量/ (t·h ⁻¹)	压力/ MPa	温度/ °C	焓/ (kJ·kg ⁻¹)	熵/ (kJ·(kg·K) ⁻¹)	焓/ (kJ·kg ⁻¹)
1	25 299	30.00	620.00	1 118	2.76	607.33
2	25 299	15.39	530.51	1 015	2.77	501.56
3	25 299	15.13	620.00	1 125	2.90	575.54
4	25 299	7.90	534.97	1 027	2.91	474.59
5	25 299	7.80	245.60	692	2.40	278.84
6	25 299	7.70	83.04	499	1.95	208.02
7	7 590	7.70	83.04	499	1.95	208.02
8	17 709	7.70	83.04	499	1.95	208.02
9	17 709	7.70	32.00	306	1.35	181.13
10	17 709	31.60	77.75	344	1.36	215.72
11	17 709	31.50	235.60	620	2.01	311.85
12	7 590	31.50	222.23	600	1.98	303.02
13	25 299	31.50	231.56	614	2.00	309.17
14	25 299	31.40	487.33	949	2.54	496.67

本文选取某典型超超临界 1 000 MW 燃煤机组为参照,比较燃煤 S-CO₂ 系统与以水蒸气为工质的传统朗肯循环的差异,其关键热力学参数见表 5。2 种发电系统的能流如图 4 所示。

表 5 典型超超临界 1 000 MW 燃煤机组关键热力学参数
Tab.5 Key thermodynamic parameters of the ultra-supercritical 1 000 MW coal-fired power plant

项目	数值
燃煤流量/(t·h ⁻¹)	262.99
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	2 688
主蒸汽温度/℃	600
主蒸汽压力/MPa	26.99
再热蒸汽温度/℃	620
再热蒸汽压力/MPa	5.3
透平出口压力/kPa	4.89
回热级数	9

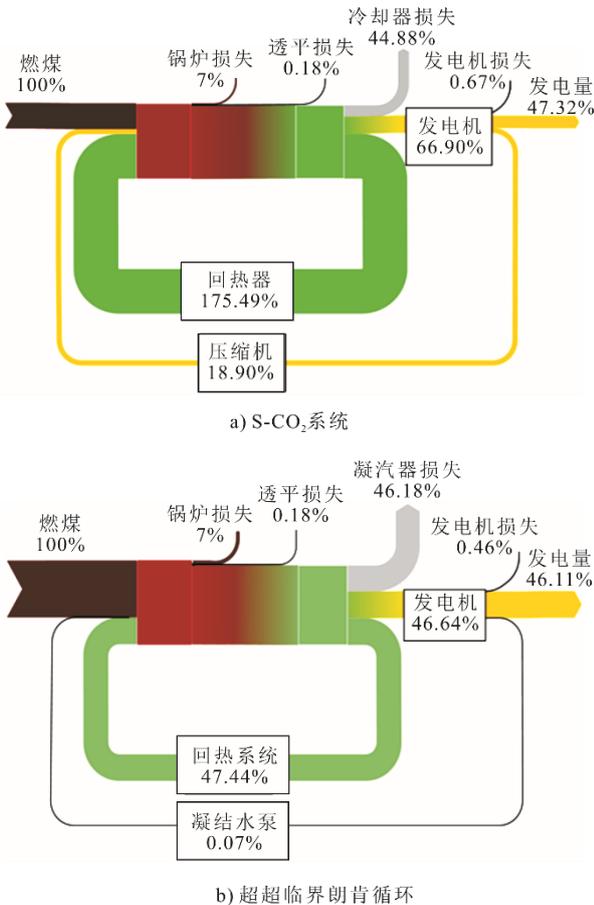


图 4 发电系统能流

Fig.4 The energy flow diagram of the power generation system

由表 5 和图 4 可见：与传统超超临界朗肯循环类似，S-CO₂ 系统的损失主要来源于冷却器和锅炉，分别占比 44.88% 和 7%；然而 S-CO₂ 系统压缩机耗电大幅增加，占总发电量的 28.54%。这是由于压缩过程 CO₂ 为气态，耗电较大。由图 4 还可看出，S-CO₂ 系统回热过程的热量占比较高，这主要是为了利用回热提高锅炉内平均吸热温度，从而使换热过程能级更匹配。

表 6 给出了 S-CO₂ 发电系统的热力学性能指

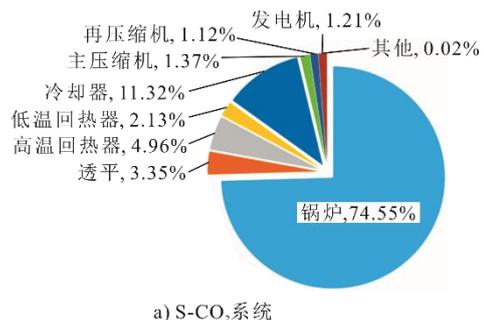
标。由表 6 可以看出：当 S-CO₂ 发电系统净发电量为 1 000 MW 时，系统煤耗量为 256.25 t/h，较朗肯循环减少 6.74 t/h；S-CO₂ 发电系统总发电量为 1 399.47 MW，其中 213.33 MW 被用于驱动再压缩机，186.14 MW 被用于主压缩机。综合来看，该 S-CO₂ 系统的发电效率和发电焓效率可达到 47.32% 和 46.11%，较朗肯循环可分别提高 1.21% 和 1.17%，相应的发电标准煤耗率较朗肯循环降低 6.83 g/(kW·h)，为 259.49 g/(kW·h)。

表 6 系统热力学性能指标

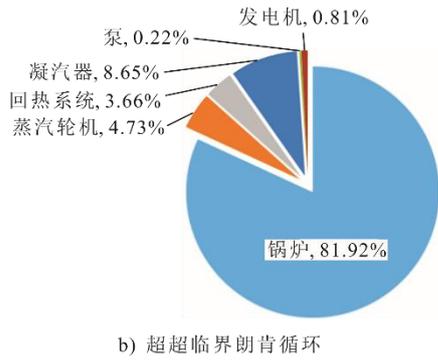
Tab.6 The thermodynamic performance indexes of the systems

项目	S-CO ₂	朗肯循环	差值
燃煤流量/(t·h ⁻¹)	256.25	262.99	-6.74
燃煤焓系数	1.026	1.026	
燃煤比焓/(kJ·kg ⁻¹)	30 464	30 464	
燃煤热量/MW	2 113.14	2 168.73	-55.59
燃煤焓/MW	2 168.84	2 225.11	-56.27
回热热量/MW	3 708.36	1 028.84	2 679.52
总发电量/MW	1 399.47	1 001.58	397.89
压缩机耗功/MW	399.47	397.89	1.58
净发电量/MW	1 000	1 000	
总焓效率/%	46.11	44.94	1.17
发电效率/%	47.32	46.11	1.21
发电标准煤耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	259.49	266.32	-6.83

依据热力学第二定律焓分析方法，图 5 给出了 2 个系统的焓损占比。由图 5 可见，S-CO₂ 系统的焓损总量为 1 168.84 MW，其中锅炉部分焓损最高（871.24 MW），占比 74.55%，其次为冷却器（11.32%），其他设备焓损较低，依次为高温回热器、透平、低温回热器、主压缩机、发电机、再压缩机，分别占比 4.96%、3.35%、2.13%、1.37%、1.21%、1.12%，其余焓损由再压缩机出口与低温回热器冷端出口混合时产生。与超超临界朗肯循环相比，S-CO₂ 系统总焓损降低 57.27 MW，其中锅炉部分焓损降低 132.40 MW，冷却器和回热系统焓损分别提高 26.22 MW 和 37.99 MW。



a) S-CO₂ 系统



b) 超超临界朗肯循环

图 5 2 种系统焓损占比

Fig.5 The proportions of exergy losses in the S-CO₂ system and the ultra-supercritical Rankine cycle system

2 种发电系统各设备的焓效率如图 6 所示。由图 6 可见：S-CO₂ 系统中除锅炉焓效率（59.83%）较低外，其他设备的焓效率均高于 90%，设备焓效率由高到低依次为发电机、透平、低温回热器、再压缩机、高温回热器与主压缩机；S-CO₂ 系统锅炉焓效率较朗肯循环高 4.94%，回热系统焓效率高 3.32%。这与图 5 中焓损占比有明显差异。

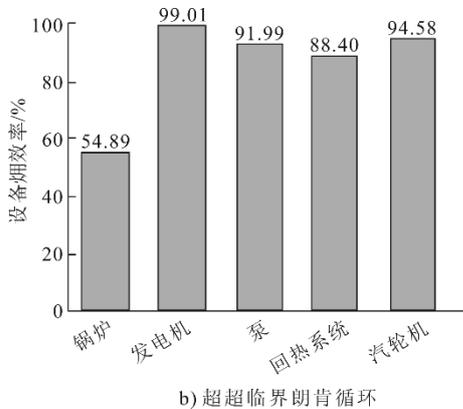
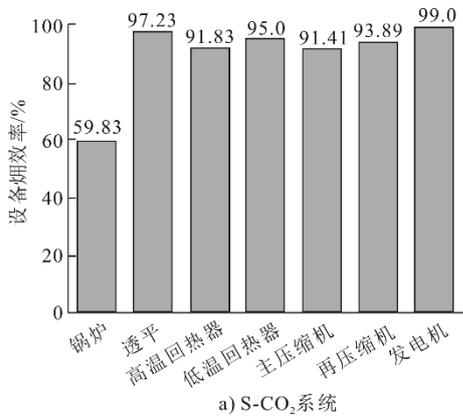


图 6 2 个系统各设备焓效率

Fig.6 The exergy efficiencies of each component of the S-CO₂ system and the ultra-supercritical Rankine cycle system

3.2 关键参数透平入口温度、旁路分流比影响

关键参数包括透平入口温度、旁路分流比（简称分流比）。本节透平入口温度包括高压透平入口温度和再热后的低压透平入口温度。假设这 2 个温度相等，得到透平入口温度对发电效率和发电标准煤耗率的影响如图 7 所示。由图 7 可见，透平入口温度的提高可以显著提高循环发电效率。当透平入口温度由 500 °C 提高到 660 °C 时，系统的发电效率由 40.58% 提高到 48.56%，提高 7.98 个百分点，发电标准煤耗率也随之降低 43.03 g/(kW·h)。可见，每提高透平入口温度 10 °C，发电效率提升约 0.5%，且随着温度的升高，发电效率的提高趋势有所降低。

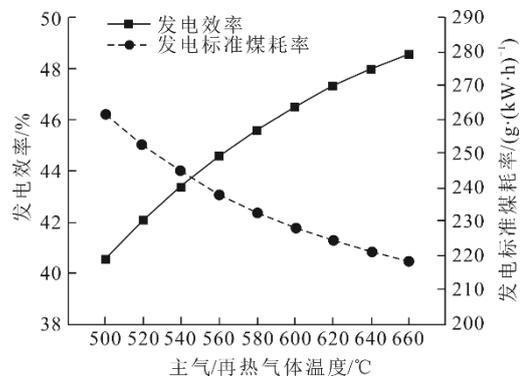


图 7 透平入口温度对发电效率和发电标准煤耗率的影响
Fig.7 The influence of turbine inlet temperature on power generation efficiency and standard coal consumption rate

分流比对系统性能也会产生较大的影响，主要表现在分流比的提高不仅会增加系统总发电量，还会引起压缩机系统耗功的变化。图 8 给出了分流比对压缩机耗功的影响。

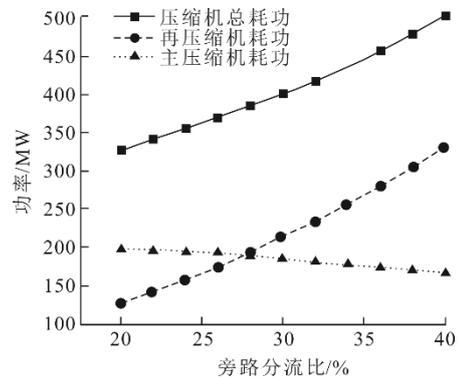


图 8 分流比对压缩机耗功的影响
Fig.8 The influence of mass flow ratio on power consumption of the compressor

由图 8 可见，随着分流比的提高，主压缩机的耗功降低，再压缩机的耗功增加，压缩机系统总耗功

增加。当分流比由 20% 提高至 40% 时, 主压缩机耗功降低 30.69 MW, 再压缩机耗功增加 204.10 MW, 压缩机总耗功由 326.93 MW 提高至 500.34 MW, 提高了 173.41 MW。

图 9 和图 10 分别给出了分流比对发电功率、发电效率和发电标准煤耗率的影响。由图 9 和图 10 可见, 在工质流量不变的情况下, 分流比的提高会提高系统总发电功率, 但由于压缩机系统耗功的影响, 净发电功率先升后降。当分流比由 20% 提高至 40% 时, 总发电功率由 1 318.46 MW 提高至 1 486.04 MW。净发电量在分流比为 28% 时达到最大为 1 006.94 MW, 此时发电效率和发电标准煤耗率也最优, 分别为 47.65% 和 257.71 g/(kW·h), 比设计工况的发电效率高 0.33%, 发电标准煤耗率降低 1.8 g/(kW·h)。

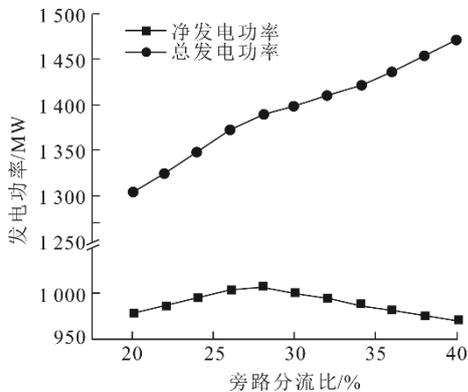


图 9 分流比对发电功率的影响

Fig.9 The influence of mass flow ratio on generation power

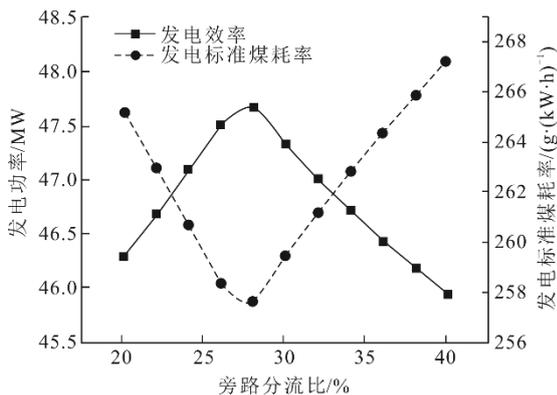


图 10 分流比对发电效率和发电标准煤耗率的影响

Fig.10 The influence of mass flow ratio on power generation efficiency and standard coal consumption rate

4 结 论

1) 燃煤 S-CO₂ 系统的损失主要来源于冷却器和锅炉。与传统燃煤机组相比, 压缩机的耗电大幅增加, 且回热过程的热量占比较高, 远超过锅炉的

放热量。

2) 燃煤 S-CO₂ 系统锅炉焓损最大且设备焓效率较低, 因此提高锅炉能量转换过程意义重大。同时, 回热器部分也存在较大的焓损和较低的焓效率, 可通过温度匹配进行系统优化。

3) 该 1 000 MW 燃煤 S-CO₂ 系统透平入口温度提高 10 °C, 发电效率可提升约 0.5%, 且随着温度的升高发电效率的提高趋势有所降低。分流比的增大会使系统总发电量和压缩机耗功均增大, 根据不同的参数配置, 存在最优分流比。

[参 考 文 献]

- [1] 杨志平, 杨勇平. 1 000 MW 燃煤机组能耗及其分布[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(1): 79-83.
YANG Zhiping, YANG Yongping. Energy consumption and distribution of 1 000 MW coal-fired power generating unit[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2012, 39(1): 79-83.
- [2] 能源情报研究中心. 中国能源大数据报告(2019)[R]. 北京: 中国电力传媒集团公司, 2019: 1-3.
Energy Information Research Center. Big data report of Energy in China (2019)[R]. Beijing: China Power Media Group Co., Ltd., 2019: 1-3.
- [3] ZHOU J, ZHANG C, SU S, et al. Exergy analysis of a 1 000 MW single reheat supercritical CO₂ Brayton cycle coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 173: 348-358.
- [4] LIU M, ZHANG X, YANG K, et al. Optimization and comparison on supercritical CO₂ power cycles integrated within coal-fired power plants considering the hot and cold end characteristics[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 854-865.
- [5] 晋文超, 葛宋. 国外超临界二氧化碳循环发电技术发展及应用前景[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(11): 6-9.
JIN Wenchao, GE Song. The international development of supercritical carbon dioxide Brayton cycle power generation technology and its application[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(11): 6-9.
- [6] 何欣欣, 薛志恒, 陈会勇, 等. 间接式超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统仿真优化[J]. 热力发电, 2019, 48(7): 53-58.
HE Xinxin, XUE Zhiheng, CHEN Huiyong, et al. Simulation and optimization of solar thermal tower power system with indirect-heated supercritical CO₂ Brayton cycles[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7): 53-58.
- [7] 韩万龙, 王月明, 丰镇平, 等. 超临界二氧化碳涡轮叶栅端壁附面层分层流动现象研究[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 16-22.
HAN Wanlong, WANG Yueming, FENG Zhenping, et al. Stratified flow phenomena of the endwall boundary layer in supercritical CO₂ turbine cascades[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 16-22.
- [8] 赵煜, 董自春, 张羽, 等. 超临界二氧化碳发电系统研究进展[J]. 热能动力工程, 2019, 34(1): 11-16.
ZHAO Yu, DONG Zichun, ZHANG Yu, et al. Research progress of supercritical carbon dioxide power generation system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(1): 11-16.

- [9] 谢永慧, 王雨琦, 张荻, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环系统及透平机械研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7276-7286.
XIE Yonghui, WANG Yuqi, ZHANG Di, et al. Review on research of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and turbomachinery[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7276-7286.
- [10] 孙嘉. 超临界二氧化碳循环发电系统动态特性及控制应用分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 2-10.
SUN Jia. Characteristic simulation and control of supercritical carbon dioxide cycle power generation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 2-10.
- [11] SUNGHO P, JOONYOUNG K, MUNKYU Y, et al. Thermodynamic and economic investigation of coal-fired power plant combined with various supercritical CO₂ Brayton power cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 611-623.
- [12] 张一帆, 李红智, 姚明宇, 等. 600 MW 煤基超临界二氧化碳发电系统回热器和预冷器的概念设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 160-166.
ZHANG Yifan, LI Hongzhi, YAO Mingyu, et al. Conceptual design of the recuperator and pre-cooler for a 600 MW fossil-based supercritical CO₂ power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 160-166.
- [13] MOHAMMADI Z, FALLAH M, MAHMOUDI S. Advanced exergy analysis of recompression supercritical CO₂ cycle[J]. Energy, 2019, 178: 631-643.
- [14] BAI W, ZHANG Y, YANG Y, et al. 300 MW boiler design study for coal-fired supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 66-73.
- [15] 赵新宝, 鲁金涛, 袁勇, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电机组中的应用和关键热端部件选材分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 154-162.
ZHAO Xinbao, LU Jintao, YUAN Yong, et al. Analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle and candidate materials of key hot components for power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 154-162.
- [16] MA T, LI M, XU J, et al. Thermodynamic analysis and performance prediction on dynamic response characteristic of PCHE in 1 000 MW S-CO₂ coal fired power plant[J]. Energy, 2019, 175: 123-138.
- [17] 陈渝楠, 张纯, 蒋世希, 等. 超临界二氧化碳火力发电系统比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2071-2080.
CHEN Yunan, ZHANG Chun, JIANG Shixi, et al. Comparative study of supercritical carbon dioxide thermal power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2071-2080.
- [18] 吴佐莲, 张一帆, 张纯, 等. 煤基超临界二氧化碳热电联产机组调峰能力研究[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 29-34.
WU Zuolian, ZHANG Yifan, ZHANG Chun, et al. Study on peak regulation capacity of a coal-fired supercritical carbon dioxide cogeneration unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 29-34.
- [19] 吴闯, 王顺森, 王兵兵, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环燃煤发电系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 168-174.
WU Chuang, WANG Shunsen, WANG Bingbing, et al. Simulation research on coal-fired power generation system using a supercritical carbon dioxide Brayton cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 168-174.
- [20] 陈渝楠, 张一帆, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳火力发电系统模拟研究[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 22-27.
CHEN Yunan, ZHANG Yifan, LIU Wenjuan, et al. Simulation study on supercritical carbon dioxide thermal power system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 22-27.
- [21] SERRANO-SANCHEZ C, OLMEDA-DELGADO M, PETRAKOPOULOU F. Exergy and economic evaluation of a hybrid power plant coupling coal with solar energy[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 850.
- [22] XUE Y, GE Z, YANG L, et al. Peak shaving performance of coal-fired power generating unit integrated with multi-effect distillation seawater desalination[J]. Applied Energy, 2019, 250: 175-184.
- [23] STEPANOV V. Chemical energies and exergies of fuels[J]. Energy, 1995, 20(3): 235-242.
- [24] 侯宏娟, 王梦娇, 杨勇平. 太阳能辅助燃煤发电系统性能的焓方法分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 121-127.
HOU Hongjuan, WANG Mengjiao, YANG Yongping, et al. Exergy evaluation of solar aided coal-fired power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 121-127.

(责任编辑 杨嘉蕾)