

褐煤抽气预干燥超临界二氧化碳循环发电系统性能分析

张旭伟, 白文刚, 高伟, 李红智, 姚明宇
(西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 为了提高褐煤发电系统能效,提出了一种基于抽气预干燥的褐煤超临界二氧化碳循环发电系统。首先以高温回热器热侧出口工质携带的高温热量为热源预热褐煤,使褐煤中的水分蒸发。其次预干燥褐煤抽气工质在干燥机中放热后,可以进入低温回热器加热冷侧低温工质,减少能量损失。基于热力学第一、第二定律,建立了新型超临界二氧化碳动力循环褐煤发电系统与褐煤预干燥系统高效耦合热力计算模型,并对直燃褐煤发电系统和褐煤抽气预干燥发电系统进行对比分析。以内蒙古锡林浩特胜利煤田原煤为例进行计算,结果表明:相比于直燃褐煤发电系统,褐煤抽气预干燥发电系统通过利用高温抽气干燥褐煤,可以使发电效率提高 1.50%,发电标准煤耗率降低 $8.41 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$;进一步焓分析结果显示,系统能效的提高主要得益于锅炉燃烧焓损的降低,预干燥褐煤使得锅炉燃烧焓损降低 4.47%,故系统焓效率提高 1.34%;干燥机效率和褐煤干燥程度越高,褐煤抽气预干燥发电系统节能潜力越大。

关键词: 超临界二氧化碳动力循环;褐煤;抽气预干燥;焓分析

中图分类号: TK11+4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202301008 **文章编号:** 0253-987X(2023)01-0078-09

Performance Analysis of Supercritical CO₂ Lignite-Fired Power Plant Integrated with Gas Extraction Pre-Drying System

ZHANG Xuwei, BAI Wengang, GAO Wei, LI Hongzhi, YAO Mingyu
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China)

Abstract: To improve the energy efficiency of the lignite-fired power plant, a supercritical CO₂ lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-drying system is proposed. Firstly, the high temperature heat carried by the working medium at the hot side outlet of the high temperature regenerator is used as the heat source to preheat the lignite to evaporate the water in the lignite. Secondly, the working fluid after releasing heat in the dryer enters the low temperature regenerator to heat the low temperature working fluid on the cold side to reduce energy loss. Based on the first and second laws of thermodynamics, the thermodynamic calculation model of a novel high-efficiency coupled system of supercritical CO₂ lignite-fired power plant and gas extraction pre-drying system are established, and a comparative analysis is made between the direct-fired lignite power plant and the lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-

收稿日期: 2022-08-04。 作者简介: 张旭伟(1993—),男,工程师;李红智(通信作者),男,研究员。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFF0218104)。

网络出版时间: 2022-10-06

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220929.2123.002.html>

drying system. Taking the lignite from the Shengli coalfield in Xilinhot, Inner Mongolia as an example, the calculation is carried out. Results show that the gas extraction pre-drying lignite can increase the power generation efficiency by 1.50% and reduce the standard coal consumption rate by $8.41 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$. Exergy analysis further shows that the gas extraction pre-drying lignite reduces the combustion exergy destruction of the boiler by 4.47%, which increases the exergy efficiency of the lignite-fired power plant by 1.34%. And the improvement of system exergy efficiency is mainly contributed to the reduction of the exergy destruction during the boiler combustion. The higher the dryer efficiency and the lignite drying degree, the greater the energy-saving potential of the lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-drying system.

Keywords: supercritical CO_2 power cycle; lignite; gas extraction pre-drying; exergy analysis

2021年,我国发电装机容量23.77亿千瓦,其中火电装机容量12.97亿千瓦,占比高达54.56%,火力发电仍然是我国的主要发电方式^[1]。同时,基于我国多煤、贫油、少气的能源结构特点,煤炭将长期作为我国火力发电的主体燃料。超临界二氧化碳动力循环作为当前学术界及工业界研究的热点,具有效率高、系统紧凑、灵活性高以及成本低等优势^[2-5],构建基于超临界二氧化碳动力循环原理的新型燃煤发电系统,可以显著提高燃煤发电效率,对我国节能减排及碳达峰、碳中和目标的实现具有重要意义。

国内外学者对超临界二氧化碳循环燃煤发电系统进行了大量研究。Mecheri等^[6]提出了基于再压缩超临界二氧化碳循环的燃煤发电系统。Bai等^[7]提出从再压缩机出口分流低温工质回收锅炉尾部中低温烟气热量更有利于提高发电效率。Park等^[8]研究表明超临界二氧化碳循环燃煤发电系统相比传统蒸汽朗肯循环发电机组具有更高的发电效率和更低的发电成本。Liu等^[9]对比分析了水蒸气和超临界二氧化碳工质的燃煤发电系统,揭示了超临界二氧化碳循环燃煤发电系统节能的本质。Liu等^[5]综合考虑了系统冷端和热端特性对超临界二氧化碳循环燃煤发电系统构型进行优化,结果显示一次再热和一次间冷对系统性能提升较为显著。冯雪佳等^[10]提出了一种基于煤富氧燃烧的超临界二氧化碳再压缩循环复合发电系统,可以提高机组热经济性。吴佐莲等^[11]提出了一种煤基超临界二氧化碳循环热电联产机组,结果表明该机组能量利用效率高达90.20%,并且能够实现热电完全解耦。白文刚等^[12]提出一种超临界二氧化碳循环燃煤发电系统的锅炉喷气减温方法,并对其调温特性进行了研究。张旭伟等^[13]提出对锅炉排烟余热和系统冷端余热进行回收,可以进一步提高系统发电效率。大量研究结果表明,超临界二氧化碳动力循环应用于

燃煤发电的方案具有较高的可行性,但是当前的研究主要集中在系统设计,而缺乏对煤种的考虑。

褐煤是一种煤质化程度较低的煤种,水分质量分数高达20%~50%,热值较低^[14]。我国褐煤已探明储量1300亿吨,占全国煤炭储量的13%^[15],主要分布在内蒙古东部和云南等地区^[16],因其储量丰富,价格低廉,逐渐成为我国火力发电的主要燃料,但是褐煤高水分导致直燃褐煤发电系统投资大、效率低。褐煤预干燥技术可以从系统抽取高温工质对褐煤进行加热,使其水分蒸发,降低水分含量,再将干燥后的褐煤送入炉膛燃烧发电,可以达到降低投资和提高发电效率的目的。

传统的蒸汽朗肯循环褐煤发电机组以汽轮机抽汽为热源干燥褐煤。严俊杰等^[17]利用等效热降法建立了回热抽汽预干燥褐煤发电系统的经济性分析模型。郭晓克等^[18-19]对某600 MW超临界机组进行热经济性分析,结果表明利用回热抽汽预干燥褐煤可以降低系统发电煤耗 $12 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,同时,在该系统基础上提出用干燥乏气携带的热量预热原煤和加热锅炉给水,进一步提高系统效率。张利等^[20]研究发现利用回热抽汽预干燥褐煤可以大幅提高机组热经济性。刘明等^[21]基于Aspen Plus平台建立褐煤抽汽预干燥发电系统变负荷模型,并仿真研究了机组变工况特性。周云龙等^[22]利用Ebsilon建立机组变工况仿真模型,并分析了褐煤预干燥发电机组的变负荷特性、热经济性及投资经济性。姚伟等^[23]利用褐煤预干燥发电系统干燥乏气携带的余热对外供热,以提高能量综合利用效率。

综上所述,褐煤预干燥技术的研究主要集中在传统的蒸汽朗肯循环褐煤发电机组,而新型超临界二氧化碳动力循环褐煤发电系统与褐煤预干燥系统高效耦合的研究较为匮乏。为此,本文提出了一种集成褐煤抽气预干燥的超临界二氧化碳循环发电系

统,基于热力学第一、第二定律建立了热力学计算模型,并对其热经济性进行了分析。

1 系统描述

图 1 所示为直燃褐煤超临界二氧化碳循环发电系统,采用一次再热和分流再压缩构型,并且从再压缩机出口分流低温工质进入锅炉省煤器,回收锅炉尾部低温烟气热量,以降低锅炉排烟温度,提高锅炉效率。

对于直燃褐煤发电系统,褐煤水分含量高、热值

低,直接送入锅炉燃烧一方面使得锅炉排烟温度较高,锅炉效率较低,同时,使得磨煤机电耗增加,厂用电率提高,从而导致发电系统效率低;另一方面锅炉烟气量大导致锅炉体积较大,投资成本较高。在褐煤燃烧之前进行预干燥,减少褐煤水分含量,则可以降低褐煤发电系统投资和发电效率。

为此,提出集成褐煤抽气预干燥的超临界二氧化碳循环燃煤发电系统(区别于水工质,针对超临界二氧化碳工质均写作“抽气”),如图 2 所示。

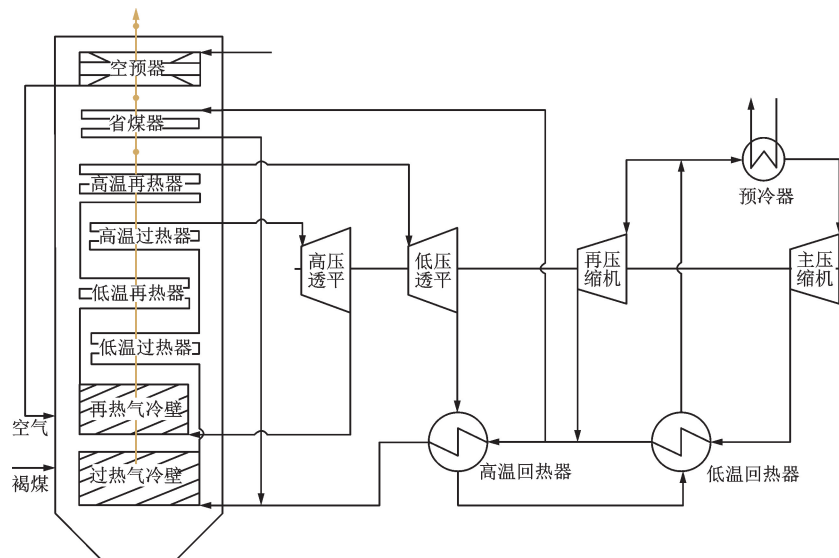


图 1 直燃褐煤超临界二氧化碳循环发电系统图

Fig. 1 Supercritical CO₂ direct-fired lignite power plant

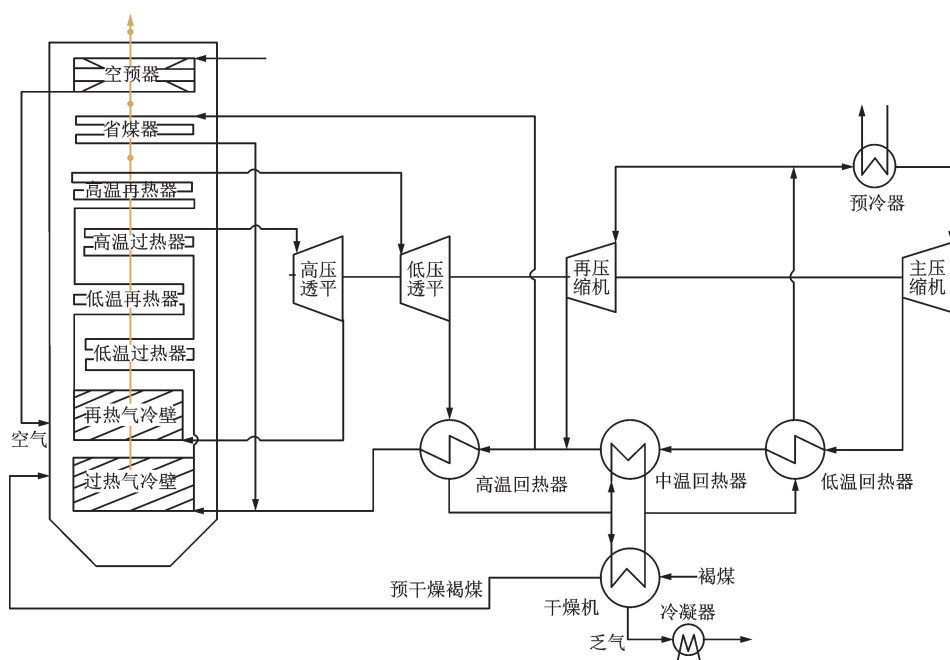


图 2 褐煤抽气预干燥超临界二氧化碳循环发电系统图

Fig. 2 Supercritical CO₂ lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-drying system

以高温回热器热侧出口工质携带的高温热量为热源预热褐煤,使褐煤中的水分蒸发,水蒸气乏气在冷凝器中液化排出,预干燥褐煤水分降低,经磨煤机研磨成粉后送入炉膛燃烧。预干燥褐煤抽气工质在干燥机中放热后,仍携带部分高品质热量,可以进入低温回热器加热冷侧低温工质,减少能量损失。褐煤干燥机选用滚筒式,如图3所示。

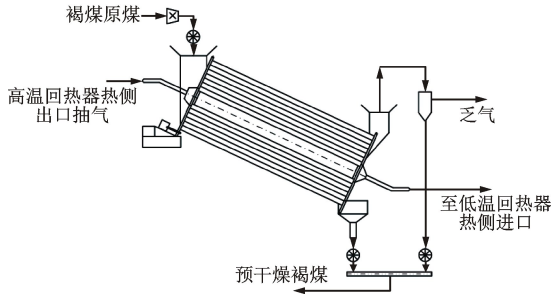


图3 滚筒式褐煤干燥机

Fig. 3 Rotary lignite dryer

2 理论计算模型

褐煤抽气预干燥发电系统主要包括超临界二氧化碳循环系统和褐煤抽气预干燥系统。

2.1 超临界二氧化碳动力循环计算模型

压缩机等熵效率为

$$\eta_{cs} = \frac{h_{outs} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (1)$$

式中: h_{in} 、 h_{out} 和 h_{outs} 分别为进口焓、出口焓和出口等熵焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

压缩机耗功用如下公式计算

$$W_{com} = m_{com}(h_{out} - h_{in}) \quad (2)$$

式中: m_{com} 为压缩机质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

透平等熵效率为

$$\eta_{ts} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{outs}} \quad (3)$$

透平做功用如下公式表示

$$W_{tur} = m_{tur}(h_{in} - h_{out}) \quad (4)$$

式中: m_{tur} 为透平质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

换热器换热量表示为

$$Q = m_h(h_{hin} - h_{hout}) = m_c(h_{cout} - h_{cin}) \quad (5)$$

式中: m_c 、 m_h 分别为冷流体和热流体质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; h_{hin} 、 h_{hout} 分别为热流体进出口焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_{cin} 、 h_{cout} 分别为冷流体进出口焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

循环效率表示超临界二氧化碳动力循环热力学性能,用如下公式计算

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{Q_0} = \frac{W_{tur} - W_{com}}{Q_0} \quad (6)$$

式中: W_{net} 为循环输出净功, kW ; Q_0 为循环吸热量, kW 。

2.2 预干燥系统计算模型

褐煤干燥程度是指 1 kg 褐煤原煤干燥出的水分的质量,用如下公式^[24]表示

$$\lambda = \frac{w(M_{ar0}) - w(M_{ar})}{100 - w(M_{ar})} \quad (7)$$

式中: λ 为干燥程度, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w(M_{ar0})$ 为褐煤原煤中水分的质量分数, %; $w(M_{ar})$ 为预干燥褐煤中水分的质量分数, %。

褐煤干燥是一个物理过程,其中水分吸热蒸发,而可燃质没有发生变化。所以,预干燥褐煤的高位发热量为^[24]

$$Q_{gr,ar} = \frac{100 - w(M_{ar})}{100 - w(M_{ar0})} Q_{gr,ar0} \quad (8)$$

式中: $Q_{gr,ar}$ 为预干燥褐煤高位发热量, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $Q_{gr,ar0}$ 为褐煤原煤高位发热量, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

可得预干燥褐煤的低位发热量^[14]为

$$Q_{net,ar} = Q_{gr,ar} - 225w(H_{ar}) - 25w(M_{ar}) \quad (9)$$

式中: $Q_{net,ar}$ 为预干燥褐煤低位发热量, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w(H_{ar})$ 为预干燥褐煤中氢的质量分数, %。

褐煤干燥所需的热量包括水分蒸发吸热和煤增加的显热,用如下公式^[25]表示

$$Q'_d = Q_d(1 - \varphi) = B[\lambda(h_{wd} - h_{w0}) + (1 - \lambda)c_{p,fd}(T_{fu,out} - T_0)] \quad (10)$$

式中: Q'_d 为褐煤预干燥吸热量, kW ; Q_d 为干燥机输入热量, kW ; φ 为干燥机效率; B 为燃料量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; h_{wd} 、 h_{w0} 为水蒸气乏气、原煤中水分焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $c_{p,fd}$ 为预干燥褐煤比定压热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; $T_{fu,out}$ 、 T_0 为预干燥褐煤温度和环境温度, K 。

预干燥褐煤比定压热容用下式计算^[25]

$$c_{p,fd} = c_{p,fd} \frac{100 - w(M_{ar})}{100} + 4.187 \frac{w(M_{ar})}{100} \quad (11)$$

式中: $c_{p,fd}$ 为干煤比定压热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

采用预干燥褐煤后,锅炉输入热量为^[25]

$$Q'_r = B[\lambda Q_{net,ar} + (1 - \lambda)c_{p,fd}(T_{fu,out} - T_0)] \quad (12)$$

式中: Q'_r 为锅炉输入热量, kW 。

2.3 锅炉计算模型

锅炉效率为

$$\eta_b = 1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (13)$$

式中: q_2 为锅炉排烟损失, %; q_3 为气体不完全燃烧

损失,%; q_4 为固体不完全燃烧损失,%; q_5 为散热损失,%; q_6 为灰渣物理热损失,%。假设 q_i ($i=3\sim 6$) 保持不变。

锅炉排烟损失为

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} = \frac{m_f(h_f - h_{air})}{BQ_{net,ar}} \quad (14)$$

式中: Q_2 为锅炉排烟热量,kW; Q_r 为锅炉输入热量,kW; m_f 为锅炉烟气质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; h_f 为锅炉排烟焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_{air} 为环境温度下的空气焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

锅炉有效利用热量为

$$Q_0 = \eta_b Q_r \quad (15)$$

2.4 热经济性计算模型

系统发电效率为

$$\eta_{cp} = \frac{W_e}{BQ_{net,ar}} \quad (16)$$

式中: W_e 为系统电功率,kW。

褐煤抽气预干燥发电系统的发电标准煤耗率为

$$b_{cp} = \frac{3\,600 \times 10^3}{q_{net} \eta_{cp}} = \frac{123}{\eta_{cp}} \quad (17)$$

式中: b_{cp} 为发电标准煤耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; q_{net} 为标准煤的低位发热量,通常为 $29\,270 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

发电标准煤耗率降低量表示褐煤抽气预干燥发电系统的节能潜力,计算方法如下

$$\Delta b_{cp} = b_{cp0} - b_{cp} \quad (18)$$

式中: b_{cp0} 为直燃褐煤发电系统的发电标准煤耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

2.5 焓分析模型

烟气焓和空气焓计算公式如下

$$E_{gas} = m_{gas}(h - h_0) \left(1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0} \right) \quad (19)$$

式中: m_{gas} 为气体质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; T 、 T_0 分别为气体实际温度和环境温度,K; h 、 h_0 分别为气体实际焓和在环境参数下的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

二氧化碳和水的焓为

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (20)$$

式中: h 、 h_0 分别为实际焓和在环境参数下的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; s 、 s_0 分别为实际熵和在环境参数下的熵, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

燃料的焓近似等于其化学焓^[24],计算公式为

$$E_{fu} = Q_{gr,ar} \quad (21)$$

设备焓损及焓效率分别为

$$I = \sum_{in} m_i e_{x,i} - \sum_{out} m_i e_{x,i} \quad (22)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{gain} m_i e_{x,i}}{\sum_{invest} m_i e_{x,i}} \quad (23)$$

式中: $\sum_{in} m_i e_{x,i}$ 、 $\sum_{out} m_i e_{x,i}$ 、 $\sum_{gain} m_i e_{x,i}$ 、 $\sum_{invest} m_i e_{x,i}$ 分别为设备的流入焓总和、流出焓总和、收益焓总和、投入焓总和,kW。本文环境压力取 0.1 MPa ,环境温度取 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 计算结果与分析

3.1 基本参数

锅炉燃用褐煤为内蒙古锡林浩特胜利煤田原煤,水分的质量分数为 34.10% ,低位发热量为 $12.90 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,煤质具体参数如表 1 所示。直燃褐煤锅炉排烟温度为 $150.6 \text{ }^\circ\text{C}$,锅炉效率为 91.76% 。表 2 为超临界二氧化碳动力循环主要边界参数^[6,9]。根据文献[6,9]的研究结论,表 2 中主压缩机入口压力被优化,其他参数在取值范围的边界处最优,无须专门优化。假设工质再热后的温度与主气温度相同,即高压透平和低压透平入口工质温度相同。选取管道效率为 99% ,机械效率为 99% ,电机效率为 99% 。

表 1 褐煤原煤煤质参数

Table 1 Compositions and low heating value of the raw lignite

$w/\%$							$Q_{net,ar0} /$
M_{ar0}	A_{ar0}	C_{ar0}	H_{ar0}	N_{ar0}	O_{ar0}	S_{ar0}	$(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
34.10	15.58	34.83	2.89	0.71	10.79	1.10	12.90

注:ar0 表示原煤收到基。

表 2 超临界二氧化碳循环边界参数

Table 2 Boundary parameters of the supercritical power cycle

参数	数值
主压缩机入口温度/ $^\circ\text{C}$	32.00
高压透平入口温度/ $^\circ\text{C}$	600.00
主、再压缩机效率/ $\%$	90.00
回热器冷侧压损/MPa	0.15
预冷器压损/MPa	0.10
回热器端差/ $^\circ\text{C}$	6.00
主压缩机入口压力/MPa	7.73
高压透平入口压力/MPa	30.00
高、低压透平效率/ $\%$	93.00
回热器热侧压损/MPa	0.10
锅炉受热面压损/MPa	0.45
烟气和工质最小换热温差/ $^\circ\text{C}$	30.00

褐煤抽气预干燥系统的主要设备为干燥机,高温抽气在干燥机中加热褐煤,褐煤吸热水分蒸发,实现干燥目的。表3给出了干燥机的主要参数。干燥过程有部分能量损失,假设干燥机效率为98%。为了保证干燥机具有良好换热效果,假设干燥机换热温差不低于50℃。

表3 干燥机主要参数

Table 3 Main parameters of the dryer

参数	数值
干燥工作压力/MPa	0.101
干燥机最小换热温差/℃	50
水分蒸发温度/℃	100
干燥机效率/%	98

3.2 热力学性能计算结果

基于上述热力学计算模型和基本参数,利用Matlab软件编程并通过Rerprop9.1物性数据库调用工质物性,对直燃褐煤发电系统和褐煤抽气预干燥发电系统性能进行热力学计算及比较。表4给出了干燥后褐煤的煤质参数。表5为两个系统热力性能对比。

由表4可知,褐煤原煤干燥前后,其他成分质量不变,只有水分质量减少,所以水分的质量分数由34.10%降低到18.00%,其他成分的质量分数则有所提高,干燥后褐煤低位发热量由12.90 MJ·kg⁻¹提高到16.66 MJ·kg⁻¹。由于煤质中水分减少,烟气酸露点降低,锅炉排烟温度可以从150.6℃降低到128.72℃。

系统热力性能基于表2的优化参数计算得到,所以表5所列为优化后的数据。再压缩分流比由回热器端差计算得到,省煤器分流比由烟气侧放热量计算得到,干燥机分流比由褐煤量及干燥程度确定。由表5可得,直燃褐煤发电系统和褐煤抽气预干燥发电系统输出电功率均为660 MW,与直燃褐煤发电系统相比,褐煤抽气预干燥发电系统发电效率提高了1.50%,褐煤消耗量减少了3.50 kg·s⁻¹,发电标准煤耗率降低了8.41 g·(kW·h)⁻¹,节煤潜力较大。

表4 预干燥褐煤煤质参数

Table 4 Compositions and low heating value of the pre-drying lignite

$w/\%$								$Q_{\text{net,ar}}/$
M_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}		(MJ·kg ⁻¹)
18.00	19.39	43.34	3.40	0.88	13.43	1.37		16.66

注:ar表示预干燥煤收到基。

表5 发电系统热力学计算结果

Table 5 Thermodynamic calculation results of the power plants

参数	数值	
	直燃褐煤发电系统	褐煤抽气预干燥发电系统
煤耗量/(kg·s ⁻¹)	110.91	107.55
电功率/MW	660.00	660.00
再压缩分流比/%	33.03	40.49
省煤器分流比/%	9.33	8.72
干燥机分流比/%		14.40
锅炉效率/%	91.76	93.51
循环效率/%	51.81	50.16
发电效率/%	46.13	47.63
发电标准煤耗率/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	266.63	258.22

3.3 能流和焓流结果分析

基于热力学分析模型对直燃褐煤发电系统和褐煤抽气预干燥发电系统的能流过程进行分析。

3.3.1 能量分析

直燃褐煤发电系统的能量流动过程如图4所示。原煤输入能量的比例为100%,其他能流按照比例标注于图中。由图4可得,直燃褐煤锅炉效率为91.76%,通过超临界二氧化碳动力循环进行热电转换后,整个系统发电效率为46.13%。由于锅炉煤种为褐煤,水分含量较大,故烟气中水分含量也较高,导致烟气酸露点较高。锅炉排烟必须高于烟气酸露点温度,避免尾部低温受热面的腐蚀。所以,直燃褐煤锅炉排烟温度设计为150.6℃,较高的排烟温度造成较大的排烟损失,占比达6.98%,从而导致锅炉效率偏低。

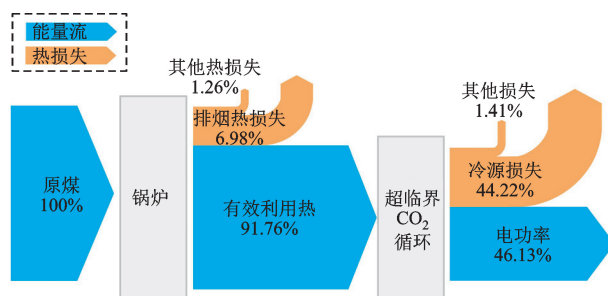


图4 直燃褐煤超临界二氧化碳循环发电系统能流图

Fig. 4 Energy flows of the supercritical CO₂ direct-fired lignite power plant

褐煤抽气预干燥发电系统的能量流动过程如图5所示。由图4和图5对比可得,褐煤抽气预干燥发电系统将部分高温抽气工质的热量转移到褐煤干燥系统,对褐煤进行干燥。由于水分降低,干燥后的

褐煤烟气水分也降低,烟气酸露点也可以降低,所以锅炉排烟温度也可以从 150.6°C 降低到 128.72°C ,排烟损失则可以由 6.98% 降低到 5.48% ,锅炉效率从 91.76% 提高到 93.51% ,从而将整个发电系统的发电效率由 46.13% 提高到 47.63% 。褐煤抽气预干燥发电系统节能是因为抽气干燥褐煤优化了燃煤发电过程能量分布,降低了系统能量损失。

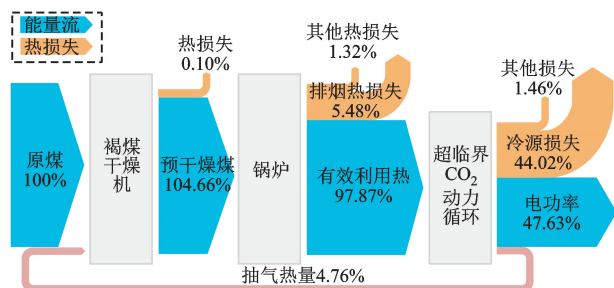


图5 褐煤抽气预干燥超临界二氧化碳循环发电系统能流图
Fig. 5 Energy flows of the supercritical CO_2 lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-drying system

3.3.2 烟分析

图 6 和图 7 分别给出了直燃褐煤发电系统和褐煤抽气预干燥发电系统的烟流情况。由图 6 和图 7 对比可得,与直燃褐煤锅炉相比,褐煤抽气预干燥发电系统锅炉的燃烧烟损由 34.24% 降低到 29.77% ,降低了 4.47% 。这是因为褐煤发电系统通过高温抽气携带的热量对褐煤进行干燥,降低褐煤水分含量,增加褐煤热值,提高褐煤燃烧温度,从而大幅降低锅炉燃烧烟损,进而使整个发电系统烟效率从 41.32% 提高到 42.66% 。所以,褐煤发电系统通过耦合抽气预干燥系统使得锅炉燃烧烟损大幅降低是系统节能的主要原因。

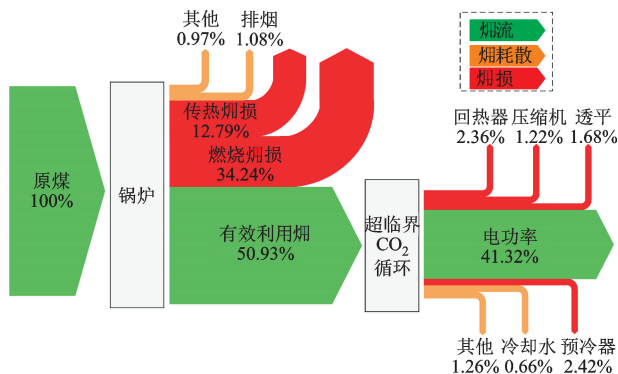


图 6 直燃褐煤超临界二氧化碳循环发电系统烟流图
Fig. 6 Exergy flows of the supercritical CO_2 direct-fired lignite power plant

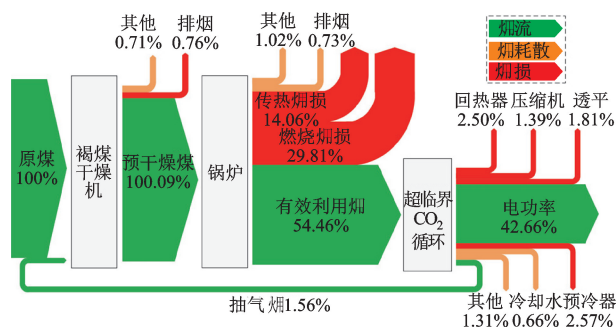


图 7 褐煤抽气预干燥超临界二氧化碳循环发电系统烟流图
Fig. 7 Exergy flows of the supercritical CO_2 lignite-fired power plant integrated with gas extraction pre-drying system

3.4 干燥参数对系统性能的影响

干燥机效率和褐煤干燥程度是影响褐煤抽气预干燥发电系统节能潜力的两个重要参数。干燥机在干燥过程中具有一定的热量损失,干燥机效率表示干燥过程中褐煤吸热量与抽气放热量的比值。图 8 给出了褐煤抽气预干燥发电系统能耗随干燥机效率的变化情况。由图 8 可知,随着干燥机效率的提高,发电标准煤耗率的降低量不断提高,即节煤潜力不断增大。这是因为干燥机效率越高,干燥机散热损失越小,即整个系统能量损失越少,发电效率越高。干燥机效率为 98% 时,发电标准煤耗率降低了 $8.41 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。当干燥机效率过低时(小于 51%),因干燥机散热损失过大,抽气携带的热量被大量浪费,褐煤抽气预干燥发电系统的发电标准煤耗率高于直燃褐煤发电系统的发电标准煤耗率,即不具有节能潜力。

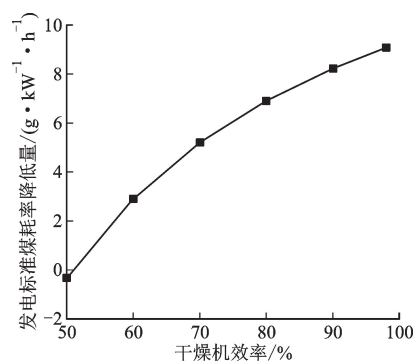


图 8 干燥机效率对褐煤抽气预干燥发电系统能耗的影响
Fig. 8 Influence of dryer efficiency on energy consumption of the pre-drying lignite-fired power plant

在其他参数不变的情况下,计算得到褐煤抽气预干燥发电系统能耗随褐煤干燥程度的变化情况,如图9所示。发电标准煤耗率的降低量和锅炉效率随褐煤干燥程度的不断增加而提高。褐煤干燥程度越高,水分含量越少,则烟气水分含量也越少,排烟温度越低,锅炉效率越高,电负荷不变的情况下,煤耗量越少,节能效果越好。当干燥程度为 $0.196\ 3\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,锅炉效率提高到 93.51% ,发电标准煤耗率的降低量达到 $8.41\ \text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

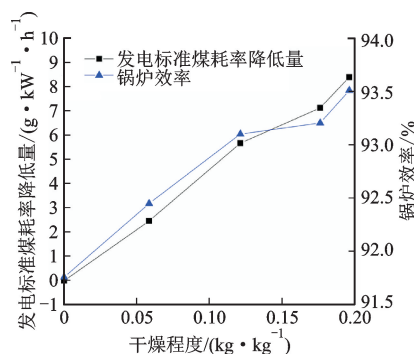


图9 干燥程度对褐煤抽气预干燥发电系统能耗的影响

Fig. 9 Influence of drying degree on energy consumption of the pre-drying lignite-fired power plant

4 结 论

褐煤水分含量高、热值低,造成直燃褐煤超临界二氧化碳循环发电系统投资大、效率低。为此,对集成褐煤抽气预干燥系统的超临界二氧化碳燃煤发电系统开展研究,并基于热力学第一、第二定律进行分析,得到如下结论。

(1) 褐煤发电系统通过耦合褐煤抽气预干燥系统可以使锅炉效率提高 1.75% ,从而使系统发电效率提高 1.50% ,发电标准煤耗率降低 $8.41\ \text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(2) 系统焓分析结果表明,褐煤抽气预干燥技术优化锅炉内部焓损分布,使得锅炉燃烧焓损降低 4.47% ,进而使系统焓效率提高 1.34% 。锅炉燃烧焓损有效降低是系统节能的主要原因。

(3) 干燥参数分析结果表明,干燥机效率和褐煤干燥程度越高,褐煤抽气预干燥发电系统的发电煤耗量降低值越大,节能潜力越大。

参考文献:

[1] 国家能源局. 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2022-01-26)[2022-07-06]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.

[2] 吴毅,王佳莹,王明坤,等. 基于超临界 CO_2 布雷顿循环的塔式太阳能集热发电系统 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 108-113.
WU Yi, WANG Jiaying, WANG Mingkun, et al. A towered solar thermal power plant based on supercritical CO_2 Brayton cycle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(5): 108-113.

[3] ZHANG Yifan, LI Hongzhi, HAN Wanlong, et al. Improved design of supercritical CO_2 Brayton cycle for coal-fired power plant [J]. Energy, 2018, 155: 1-14.

[4] 张旭伟,白文刚,吴家荣,等. 采用超临界二氧化碳动力循环回收燃气轮机排气余热的系统优化研究 [J]. 热力发电, 2021, 50(5): 43-50.
ZHANG Xuwei, BAI Wengang, WU Jiarong, et al. Optimization of system using supercritical carbon dioxide power cycle to recover waste heat from gas turbine exhaust [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 43-50.

[5] LIU Ming, ZHANG Xuwei, YANG Kaixuan, et al. Optimization and comparison on supercritical CO_2 power cycles integrated within coal-fired power plants considering the hot and cold end characteristics [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 854-865.

[6] MECHERI M, LE MOULLEC Y. Supercritical CO_2 Brayton cycles for coal-fired power plants [J]. Energy, 2016, 103: 758-771.

[7] BAI Wengang, ZHANG Yifan, YANG Yu, et al. 300 MW boiler design study for coal-fired supercritical CO_2 Brayton cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 66-73.

[8] PARK S H, KIM J Y, YOON M K, et al. Thermodynamic and economic investigation of coal-fired power plant combined with various supercritical CO_2 Brayton power cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 611-623.

[9] LIU Ming, ZHANG Xuwei, YANG Kaixuan, et al. Comparison and sensitivity analysis of the efficiency enhancements of coal-fired power plants integrated with supercritical CO_2 Brayton cycle and steam Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111918.

[10] 冯雪佳,王顺森. 在煤富氧燃烧下的超临界 CO_2 再压缩循环的热力学分析 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 100-105.
FENG Xuejia, WANG Shunsun. Thermodynamic analysis of the supercritical CO_2 recompression cycle in oxygen-enriched combustion of coal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 100-105.

[11] 吴佐莲,张一帆,张纯,等. 煤基超临界二氧化碳碳热

- 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.
- [12] 白文刚, 李红智, 张磊, 等. 一种改进的超临界二氧化碳燃煤发电系统及其焓分析 [J]. 热力发电, 2020, 49(10): 114-119.
- BAI Wengang, LI Hongzhi, ZHANG Lei, et al. Exergy analysis for an improved recompression supercritical carbon dioxide cycle for coal-fired power plant [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 114-119.
- [13] 张旭伟, 李红智, 乔永强, 等. 集成余热回收的超临界二氧化碳燃煤发电系统研究 [J]. 热力发电, 2020, 49(12): 17-21, 70.
- ZHANG Xuwei, LI Hongzhi, QIAO Yongqiang, et al. Study on supercritical carbon dioxide coal-fired power generation system integrated with waste heat recovery [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(12): 17-21, 70.
- [14] 丁立新, 王金枝, 程新华, 等. 电厂锅炉原理 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [15] 白向飞. 中国褐煤及低阶烟煤利用与提质技术开发 [J]. 煤质技术, 2010(6): 9-11.
- BAI Xiangfei. Discussion on utilization and development of improving quality technology of lignite and low rank bituminous coal China [J]. Coal Quality Technology, 2010(6): 9-11.
- [16] 赵振新, 朱书全, 马名杰, 等. 中国褐煤的综合优化利用 [J]. 洁净煤技术, 2008, 14(1): 28-31.
- ZHAO Zhenxin, ZHU Shuquan, MA Mingjie, et al. Comprehensive and optimal utilization of lignite in China [J]. Clean Coal Technology, 2008, 14(1): 28-31.
- [17] 严俊杰, 刘明, 种道彤, 等. 预干燥燃煤褐煤发电系统理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 1-5, 58.
- YAN Junjie, LIU Ming, CHONG Daotong, et al. Theoretical study on pre-dried lignite-fired power generation system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 1-5, 58.
- [18] 郭晓克, 肖峰, 严俊杰, 等. 高效褐煤发电系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 23-31.
- GUO Xiaoke, XIAO Feng, YAN Junjie, et al. Study on efficient lignite-fired power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 23-31.
- [19] 郭晓克, 刘明, 肖峰, 等. 带废热回收的预干燥燃煤褐煤发电系统理论研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 44-49.
- GUO Xiaoke, LIU Ming, XIAO Feng, et al. Theoretical study on a pre-dried lignite-fired power system with waste heat recovery [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 44-49.
- [20] 张利, 张义江. 600 MW 直接空冷机组抽汽预干燥褐煤的热经济性分析 [J]. 华电技术, 2016, 38(9): 48-51, 54.
- ZHANG Li, ZHANG Yijiang. Thermo-economic analysis of steam extraction pre-dried lignite for 600 MW direct air-cooled generating unit [J]. Huadian Technology, 2016, 38(9): 48-51, 54.
- [21] 刘明, 秦远智, 翟梦旭, 等. 褐煤抽汽预干燥发电系统变负荷特性仿真研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 6-10.
- LIU Ming, QIN Yuanzhi, ZHAI Mengxu, et al. Simulation study on the part-load performance of steam pre-dried lignite-fired power system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(1): 6-10.
- [22] 周云龙, 姚灏, 王迪, 等. 发电机组燃用预干燥褐煤的变负荷仿真 对比及投资经济性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 171-179.
- ZHOU Yunlong, YAO Hao, WANG Di, et al. Simulation comparison and investment economy analysis of power generation units burning pre-dried lignites under variable load condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 171-179.
- [23] 姚伟, 王志超, 屠竞毅, 等. 褐煤预干燥-乏气回收热电联产系统设计与理论分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3795-3801.
- YAO Wei, WANG Zhichao, TU Jingyi, et al. System design and theoretical analysis of lignite-fired CHP based on lignite pre-drying and waste heat recovery from dryer exhaust [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3795-3801.
- [24] 刘明, 付豪, 苗国耀, 等. 集成热泵干燥的褐煤发电系统理论研究 [J]. 工程热物理学报, 2016, 37(5): 929-934.
- LIU Ming, FU Hao, MIAO Guoyao, et al. Theoretical study of lignite-fired power system integrated with heat pump drying [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(5): 929-934.
- [25] 许宏宇, 许诚. 燃用低阶煤电站烟气余热利用方式热经济性比较 [J]. 热力发电, 2020, 49(2): 17-23.
- XU Hongyu, XU Cheng. Comparison of thermal economy of waste heat utilization approaches of low-rank coal-fired power plant [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 17-23.

(编辑 武红江 亢列梅)