

# 660 MW 超临界二氧化碳燃煤机组 锅炉设计及经济性分析

朱萌, 周敬, 陈磊, 李艾书, 苏胜, 江龙, 汪一, 胡松, 向军  
(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**[摘要]** 超临界二氧化碳(S-CO<sub>2</sub>)布雷顿循环发电技术被认为是可以替代蒸汽朗肯循环发电的新型发电技术。本文利用热力计算方法对660 MW级S-CO<sub>2</sub>燃煤锅炉进行了概念设计, 确定了各受热面工质参数、受热面面积和烟气温度等参数, 确保锅炉能适应整个S-CO<sub>2</sub>循环系统。同时基于加权质量法解决了S-CO<sub>2</sub>锅炉各受热面成本难以准确评估的问题, 获得了S-CO<sub>2</sub>锅炉的造价, 并利用平准化度电成本(LCOE)分析了整个S-CO<sub>2</sub>机组的经济性。结果表明: S-CO<sub>2</sub>机组的LCOE为0.540元/(kW·h), 比常规机组低11.3%, 具有很强的经济潜力; S-CO<sub>2</sub>机组中锅炉、回热器、预冷器的造价较高; S-CO<sub>2</sub>锅炉中/低温对流受热面平均材料等级的提升是导致锅炉造价提高的主要原因。因此, 仍需继续开展针对锅炉(尤其是中/低温对流受热面)、回热器和预冷器的优化研究, 以降低投资成本。

**[关键词]** 超临界二氧化碳; 660 MW; 锅炉; 概念设计; 经济性分析; LCOE

**[中图分类号]** TK122 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202004098

**[引用本文格式]** 朱萌, 周敬, 陈磊, 等. 660 MW超临界二氧化碳燃煤机组锅炉设计及经济性分析[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 136-143. ZHU Meng, ZHOU Jing, CHEN Lei, et al. Boiler design and economic analysis for 660 MW supercritical carbon dioxide coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 136-143.

## Boiler design and economic analysis for 660 MW supercritical carbon dioxide coal-fired unit

ZHU Meng, ZHOU Jing, CHEN Lei, LI Aishu, SU Sheng,  
JIANG Long, WANG Yi, HU Song, XIANG Jun

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Power generation technology of supercritical carbon dioxide (S-CO<sub>2</sub>) Brayton cycle is considered as a new generation technology that can replace steam Rankine cycle power generation. In this study, the concept design of 660 MW S-CO<sub>2</sub> coal-fired boiler was carried out by thermal calculation method, and the S-CO<sub>2</sub> parameters, area and flue gas temperature of each heating surfaces were determined to ensure that the boiler can adapt to the whole S-CO<sub>2</sub> cycle system. At the same time, the cost data of S-CO<sub>2</sub> boiler which is difficult to accurately evaluate were obtained based on the weighted mass method. Besides, the economy of the whole S-CO<sub>2</sub> unit was analyzed by means of levelized cost of energy (LCOE). The results show that, the LCOE of S-CO<sub>2</sub> coal-fired unit is 0.540 yuan/(kW·h), 11.3% lower than that of conventional unit, showing strong economic potential. The costs of boiler, recuperator and precooler in S-CO<sub>2</sub> unit are high. The main reason for the increase of boiler cost is the improvement of average material grade of medium/low temperature convection heating surfaces in S-CO<sub>2</sub> boiler. Therefore, the optimization of boiler (especially medium/low temperature convection heating surfaces), recuperator and precooler is still needed to reduce the capital cost.

**Key words:** supercritical carbon dioxide, 660 MW, boiler, concept design, economic analysis, LCOE

收稿日期: 2020-04-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0601802)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0601802)

第一作者简介: 朱萌(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超临界二氧化碳燃煤锅炉相关技术, c\_mengzhu@foxmail.com。

通信作者简介: 向军(1968), 男, 博士, 教授, xiangjun@hust.edu.cn。

超临界二氧化碳 (S-CO<sub>2</sub>) 动力循环的提出已有 50 多年的历史<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外学者针对该循环在太阳能、核能、燃气轮机发电等领域的应用均开展了相关研究<sup>[3-6]</sup>。中国目前的电力市场仍以燃煤发电为主<sup>[7]</sup>, 但由于材料的限制, 燃煤电厂蒸汽朗肯循环的效率很难进一步提高。S-CO<sub>2</sub> 布雷顿循环因其高效、系统简单和能量密度高等特点<sup>[1-3]</sup>被引入燃煤发电领域。

CO<sub>2</sub> 的超临界点较低 (7.38 MPa, 31 °C)<sup>[3]</sup>, 且 S-CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的整个流程均在超临界点之上运行。在此条件下, 锅炉中的 S-CO<sub>2</sub> 工质密度、黏度和导热系数变化不大, 物性稳定。同时, 由于采用 S-CO<sub>2</sub> 布雷顿循环可以在同等出口参数条件下实现较高的平均吸热温度, 而压缩功又因 S-CO<sub>2</sub> 的高密度特性而降低, 因此 S-CO<sub>2</sub> 循环具有较高的效率。此外, S-CO<sub>2</sub> 的高能量密度特性使得透平和压缩机的体积大大减小<sup>[8]</sup>, 极大地降低了上述设备的造价。最后, S-CO<sub>2</sub> 循环采用回热器实现压缩后工质与透平出口工质间的换热, 无抽汽设计, 管路复杂度降低, 成本进一步降低。

2013 年, 法国电力公司<sup>[9]</sup>首次提出 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电技术, 并设计了 1 台配备碳捕集装置的 S-CO<sub>2</sub> 塔式炉。国内华中科技大学、西安热工研究院有限公司、东南大学、安徽工业大学等多家研究机构<sup>[10-14]</sup>均开展了相关研究。在经济性评估方面, 目前针对 S-CO<sub>2</sub> 燃煤发电技术的研究相对较少。法国电力公司<sup>[9]</sup>的初步研究表明碳捕集 S-CO<sub>2</sub> 机组的发电成本可降低 15%。华北电力大学<sup>[7]</sup>对 1 000 MW 级 S-CO<sub>2</sub>

燃煤机组进行了全生命周期评估, 结果表明 S-CO<sub>2</sub> 燃煤机组更为环保高效。

然而, 上述文献对于锅炉造价的计算缺乏准确支撑, 直接依靠质量比得出 S-CO<sub>2</sub> 锅炉与常规锅炉之间的价格比而不考虑材料选择。对此, 本文在团队现有 S-CO<sub>2</sub> 锅炉创新构型设计<sup>[15]</sup>的基础上, 设计了 1 台 660 MW 级 S-CO<sub>2</sub> II 型锅炉。同时, 利用平准化度电成本 (LCOE) 评估 660 MW 级 S-CO<sub>2</sub> 燃煤机组在中国 2017 年价格水平下的经济性, 并基于加权质量法获得相对准确的锅炉成本数据, 最终给出关于 S-CO<sub>2</sub> 机组的发展建议。

## 1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉系统与计算模型

### 1.1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉系统及动力循环

图 1 为 S-CO<sub>2</sub> 锅炉及其动力循环的概念设计图, 整个动力循环采用三分流再压缩布雷顿循环<sup>[12,16-17]</sup>。从高温回热器出来的主流工质分为 2 路, 分别进入冷却壁 1 与冷却壁 2 吸热, 然后再分别通过过热器 1 (过热 1) 和过热器 2 (过热 2) 后汇合, 通往高压透平做功。从高压透平出来的再热流分为 2 路, 分别进入初级再热壁 (再热壁) 和初级再热器 (初再) 吸热, 然后分别通过末级再热器 1 (末再 1) 与末级再热器 2 (末再 2) 后汇合进入低压透平做功。低温回热器通往高温回热器进一步吸热的主流中会分出小部分流量进入旁路过热器 (旁过) 吸热, 然后与主流汇合进入冷却壁吸热。动力循环的主要参数见表 1。高压透平、低压透平、主压缩机、再压缩机的等熵效率设定为 94%、94%、89%、89%<sup>[9,16]</sup>。

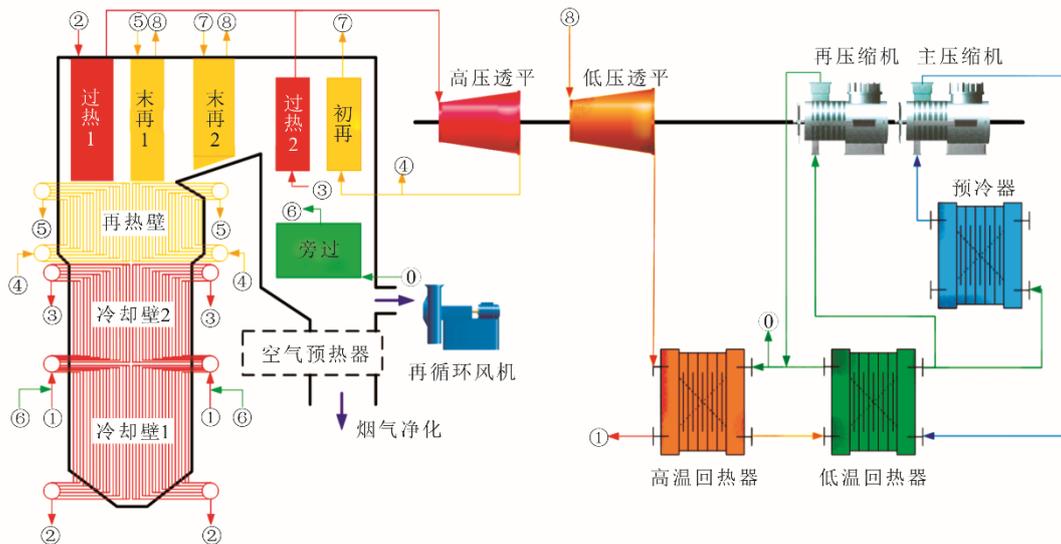


图 1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉及动力循环概念设计  
Fig.1 Concept design of the S-CO<sub>2</sub> boiler and power cycle

表 1 S-CO<sub>2</sub> 动力循环设计参数  
Tab.1 Design parameters of the S-CO<sub>2</sub> power cycle

循环参数	数值
主压缩机入口温度/℃	32.0
主压缩机入口压力/MPa	7.60
主压缩机出口压力/MPa	32.00
再压缩机入口温度/℃	93.4
再压缩机入口压力/MPa	7.70
再压缩机出口压力/MPa	31.90
高压透平等熵效率/%	94.0
低压透平等熵效率/%	94.0
主压缩机等熵效率/%	89.0
再压缩机等熵效率/%	89.0
冷却壁 1 流量/(t·h <sup>-1</sup> )	8 435.05
冷却壁 2 流量/(t·h <sup>-1</sup> )	8 435.05
再热壁流量/(t·h <sup>-1</sup> )	8 435.05
初再流量/(t·h <sup>-1</sup> )	8 435.05
旁过流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 090.20
冷却壁入口温度/℃	509.9
冷却壁入口压力/MPa	31.80
过热器出口温度/℃	605.0
过热器出口压力/MPa	30.80
末再出口温度/℃	603.0
末再出口压力/MPa	14.90

## 1.2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉热力计算模型

本文采用团队已有研究的 S-CO<sub>2</sub> 锅炉热力计算

方法进行设计计算, 针对 S-CO<sub>2</sub> 锅炉进行适应性修正。参考常规锅炉, S-CO<sub>2</sub> 锅炉的机械未完全燃烧热损失、化学未完全燃烧热损失、散热损失以及灰渣物理热损失设定为 1.00%、0%、0.20%、0.06%。为保证煤粉充分燃烧以符合假定的未完全燃烧热损失条件, 锅炉过量空气系数设定为 1.2, 进入空气预热器(空预器)的一次风量为 360 t/h, 一次风率为 19%。环境温度、空预器入口一次风温以及空预器入口二次风温设定为 20 ℃、26 ℃和 23 ℃。

以中国某 600 MW 级常规锅炉和 300 MW 级 S-CO<sub>2</sub> 锅炉<sup>[17]</sup>为例进行校核计算, 验证热力计算模型的准确性。计算时采用的锅炉设计布置方案与原始设计完全相同, 得到的对比结果如表 2 所示。根据表 2 数据, 各项关键参数的误差均在合理范围内, 模型计算结果较为准确。

## 1.3 S-CO<sub>2</sub> 机组经济评估模型

平准化度电成本(LCOE)<sup>[18]</sup>主要包括资本成本(LCC)、运维成本(LOM)、燃料成本(LFP)以及额外成本(XC)。由于中国火力发电厂中除 CO<sub>2</sub> 排放外, 其余污染物都要通过净化设备, 同时也有相应的排放标准, 因此本文认为 S-CO<sub>2</sub> 锅炉和常规锅炉执行同样的排放标准, 即假定除 CO<sub>2</sub> 外其余污染物的排放量相同(排放成本相同)。

表 2 热力计算模型结果与实际设计值对比  
Tab.2 The model calculation results and the actual unit design specifications

参数	600 MW 常规锅炉			300 MW S-CO <sub>2</sub> 锅炉		
	计算值	设计值	误差/%	计算值	设计值	误差/%
炉膛出口烟温/℃	1 042.9	—	—	1 030.7	1 025.0	0.56
排烟温度/℃	129.7	127.2	1.97	114.2	110.0	3.82
煤耗量/(t·h <sup>-1</sup> )	228.3	227.3	0.44	97.5	98.8	-1.32
主流出口温度/℃	570.9	571.0	-0.02	601.0	602.0	-0.17
主流出口压力/MPa	25.39	25.40	-0.04	32.15	32.00	0.47
再热出口温度/℃	567.2	569.0	-0.32	622.2	622.0	0.03
再热出口压力/℃	4.17	4.21	-0.95	17.98	17.80	1.01

根据以上假设, 仅将 CO<sub>2</sub> 排放成本纳入额外成本, 而对其余污染物不进行计算, 以简化模型。S-CO<sub>2</sub> 机组经济评估模型的计算公式为

$$C_{LCOE} = C_{LCC} + C_{LOM} + C_{LFP} + C_{XC}(CO_2) \quad (1)$$

LCOE 中各成本的计算借鉴文献[18]中的方法。表 3 列出了 LCOE 计算的经济假设参数<sup>[18-20]</sup>, 该假设依据中国目前的经济情况, LCOE 计算基准年为 2017 年, 货币选择为人民币。

### 1.3.1 资本成本(LCC)

资本成本中总费用成本(TASC)的计算采用 NETL 算法<sup>[21-22]</sup>。本文所用的常规火电机组造价选自电力规划设计总院(EPPEI)提供的火电工程限额设计参考造价指标(2017年水平)<sup>[19]</sup>。在其提供的的数据中, 设备购置费用、建筑工程费用以及安装工程费用之和等于 NETL 算法中的厂总成本(TPC)。EPPEI 数据的其他费用并未计算 15.0% TPC 的其他

所有者成本和 2.7%TPC 的金融成本, 计算总过夜成本 (TOC) 时需考虑。最后, 通过 TOC 乘以 TASC/TOC 系数得到 TASC。LCC 的计算公式为:

$$C_{LCC} = \frac{\alpha_{FCR} \times C_{TASC}}{\alpha_{HY} \times \alpha_{CF}} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_{FCR}$  与  $\alpha_{CF}$  可在表 3 中获取,  $\alpha_{HY}$  表示 1 年的小时数。

表 3 LCOE 计算的经济假设参数  
Tab.3 The economic assumption values for LCOE calculation

假设参数	数值
美元兑人民币/(元·美元 <sup>-1</sup> )	7.0
贴现率/%	6
固定费率 (FCR) /%	12
运维成本增长率/%	2
燃料成本增长率/%	2
煤价/(元·t <sup>-1</sup> )	682
机组利用率 (CF) /%	85
运行周期/a	30
建造周期/a	3

在计算 S-CO<sub>2</sub> 机组的设备购置费用时, 最重要的是得到 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的造价数据。目前, 国内外尚无针对 S-CO<sub>2</sub> 锅炉造价的准确计算方法, 同时锅炉管材的价格随时间和市场供需影响时刻变化, 本文采用相对成熟可靠的对比分析方法, 即加权质量法<sup>[23]</sup>, 并结合常规锅炉造价计算 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的参考造价, 如式(3)所示。

$$C_{S-CO_2\text{-boiler}} = C_{con\text{-boiler}} \times \frac{\sum M_{i,S-CO_2} X_{i,S-CO_2}}{\sum M_{j,con} X_{j,con}} \quad (3)$$

表 4 设计煤种煤质分析  
Tab.4 The designed coal quality analysis

元素分析 w <sub>ar</sub> /%					工业分析 w/%			Q <sub>net,ar</sub> /(kJ·kg <sup>-1</sup> )
C	H	O	N	S	V <sub>daf</sub>	M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	
61.70	3.67	8.56	1.12	0.60	34.73	15.55	8.80	23 442

### 1.3.4 额外成本 (XC)

额外成本的计算公式为

$$C_{XC}(CO_2) = c(CO_2) \times \alpha_{EF}(CO_2) \times \alpha_{HR} \quad (5)$$

式中:  $c(CO_2)$  是单位质量污染物的破坏成本, 元/t, 选取文献值 184.8 元/t<sup>[18]</sup>进行计算;  $\alpha_{EF}(CO_2)$  是二氧化碳的排放因子, t/kJ, 其值主要取决于发电技术和所用燃料的化学成分。本文中, S-CO<sub>2</sub> 机组与常规机组均采用火力发电技术, 且燃用煤种相同, 因此该值相同, 选取文献值  $8.81 \times 10^{-8}$  t/kJ<sup>[18]</sup>。

式中:  $M_i$  表示锅炉第  $i$  受热面质量, t;  $x_i$  表示锅炉第  $i$  受热面所用管材的质量加权系数, 取值参考 Wang 等人<sup>[23]</sup>数据; con 表示常规锅炉, S-CO<sub>2</sub> 表示 S-CO<sub>2</sub> 锅炉。

透平与压缩机成本按照 Dostal 等人<sup>[5]</sup>给出的 S-CO<sub>2</sub> 涡轮机械/蒸汽涡轮机械造价系数乘以 EPPEI 数据得到; 高温回热器、低温回热器以及预冷器则参考 NETL<sup>[24]</sup>数据。其余 S-CO<sub>2</sub> 机组辅机设备成本参考 Dostal 等人<sup>[5]</sup>数据, 取比例系数为 0.8。

### 1.3.2 运维成本 (LOM)

运维成本包括耗材成本、机组维护成本、员工薪酬以及其他成本等。常规机组的 LOM 取 Phillips 等人<sup>[25]</sup>的数据, 由于其计算基准年为 2007 年, 因此还需要考虑运维成本增长率。在前文假定 S-CO<sub>2</sub> 锅炉除 CO<sub>2</sub> 外其余污染物的排放量与常规锅炉相同的条件下, 由于 S-CO<sub>2</sub> 机组发电效率提升, 煤耗量下降, 实际污染物生成量下降, 所需净化设备的运行成本下降。综合各种因素, 本文参考 Moullec 等人<sup>[9]</sup>的数据, 取 S-CO<sub>2</sub> 机组的 LOM 为常规锅炉的 90%。

### 1.3.3 燃料成本 (LFP)

燃料成本的计算公式为

$$C_{LFP} = \alpha_{LF} \times c_{FC} \times \alpha_{HR} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{LF}$  为归一化系数, 能够体现货币的时间价值;  $c_{FC}$  表示燃料单位热值的价格, 元/kJ, FC 的计算需要用到煤种的热值, 本文所用设计煤种的煤质分析见表 4, 煤价已在表 3 中给出; 热耗率  $\alpha_{HR}$  表示每向厂外供应 1 kW·h 电能所消耗的燃料热量, kJ/(kW·h)。

## 2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉设计

S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面进出口工质温度与吸热量数据见表 5。

S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面的出口烟气温见图 2。由图 2 可见: 炉膛出口烟气温为 993.5 °C, 比设计煤种软化温度 (ST) 低 156.5 °C, 不易产生受热面结焦结渣; 旁过出口烟气温为 373.1 °C, 处于 SCR 最佳反应区间 (350~400 °C)<sup>[17]</sup>; 空预器出口烟气温为 113.3 °C, 保证了较高的锅炉效率。

表 5 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面进出口工质温度与吸热量  
Tab.5 The working fluid temperature and heat absorption of various heating surfaces of the S-CO<sub>2</sub> boiler

受热面	工质进口温度/℃	工质出口温度/℃	工质温升/℃	吸热量/MW
冷却壁 1	509.9	560.0	50.1	149.6
冷却壁 2	509.9	560.0	50.1	149.6
再热壁	513.0	563.9	50.9	146.9
过热 1	560.0	605.0	45.0	134.7
末再 1	563.9	603.0	39.1	113.6
末再 2	564.2	603.0	38.8	112.9
过热 2	560.0	605.0	45.0	134.7
初再	513.0	564.2	51.2	147.6
旁过	236.1	478.1	242.0	181.1

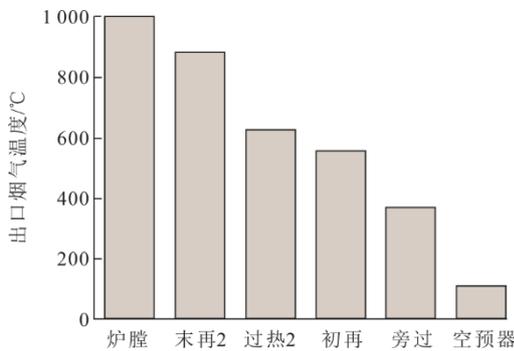


图 2 S-CO<sub>2</sub> 锅炉出口烟气温度

Fig.2 The temperature of flue gas at the S-CO<sub>2</sub> boiler outlet

S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面面积如图 3 所示，锅炉总

受热面积为 66 496.7 m<sup>2</sup>。

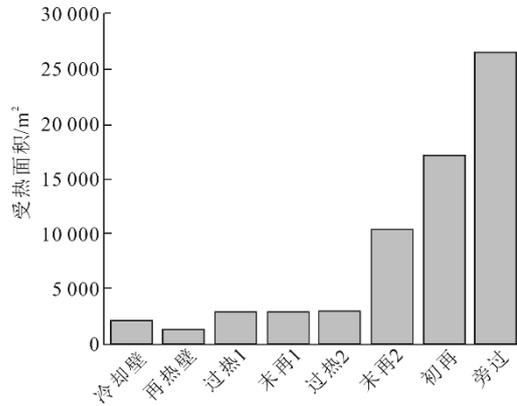


图 3 S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面面积

Fig.3 The areas of heating surfaces in the S-CO<sub>2</sub> boiler

### 3 S-CO<sub>2</sub> 机组经济性分析

#### 3.1 S-CO<sub>2</sub> 锅炉及其他主要设备造价

S-CO<sub>2</sub> 机组设备种类和价格与常规蒸汽机组（常规机组）相比均有较大差异，有必要进行设备造价计算。表 6 给出了常规蒸汽锅炉（常规锅炉）和 S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面的质量、加权质量以及材料选择。平均质量加权系数定义为各受热面加权质量和除以各受热面质量和，该系数可以体现锅炉的平均材料等级。

表 6 常规锅炉与 S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面的质量、相对质量以及管道材料

Tab.6 The mass, weighted mass and materials of heating surfaces of the conventional boiler and S-CO<sub>2</sub> boiler

受热面 <sup>①</sup>	常规超临界锅炉 <sup>②</sup>			S-CO <sub>2</sub> 锅炉		
	质量/t	加权质量/t	材料	质量/t	加权质量/t	材料
冷却壁（水冷壁）	317.5	317.5	T12	244.4	635.4	TP347HFG TP310HCbN
再热壁（—）	—	—	—	160.2	352.5	TP347H
过热 1（分隔屏）	78.7	118.0	T91	189.9	569.8	SUPER304H
末再 1（后屏）	61.5	135.3	TP347H	149.3	328.4	TP347H
末再 2（未过）	87.0	217.5	TP347HFG	120.9	265.9	TP347H
—（末再）	141.9	283.7	TP304H	—	—	—
立式过热 2（立式初再）	59.6	59.6	T12	146.7	440.2	SUPER304H
水平过热 2（水平初再）	448.8	448.8	T12	426.0	1064.9	TP347HFG
立式初再（立式初过）	85.0	76.5	TP316L	156.6	344.5	TP347H
水平初再（水平初过）	871.3	871.3	T12	454.2	681.3	T91
旁过（省煤器）	284.5	227.6	SA210C	1 022.7	1 534.0	T91
—（其他）	176.1	176.1	T12	—	—	—
总计	2 611.8	2 931.9	—	3 070.8	6 216.9	—
平均质量加权系数	1.12			2.02		

注：①该列括号中项目代表常规锅炉对应位置的受热面名称，“—”表示无；②常规超临界锅炉参数为 25.4 MPa/571 ℃/569 ℃，仅用于 S-CO<sub>2</sub> 锅炉造价计算，后续经济性分析采用超超临界 660 MW 机组锅炉。

表 6 可知, S-CO<sub>2</sub> 锅炉的平均质量加权系数为常规锅炉的 1.80 倍, 即 S-CO<sub>2</sub> 锅炉的平均材料等级有极大程度的提升。对于常规超超临界锅炉而言, 屏区和水平烟道受热面的材料一般选择 SUPER304H 或 TP310HCbN, 这与 S-CO<sub>2</sub> 锅炉一致, 因此 S-CO<sub>2</sub> 锅炉在所用最高等级材料方面与常规锅炉基本相同。平均材料等级的提升主要源于原本常规锅炉中采用较低等级材料的炉膛和尾部烟道部分在 S-CO<sub>2</sub> 锅炉中却采用了较高等级材料。而这又主要源自锅炉入口温度的提升。此外, S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面总质量

是常规锅炉的 1.18 倍。

图 4 给出了常规锅炉和 S-CO<sub>2</sub> 锅炉各受热面的成本占比。其中: 辐射受热面指炉膛半灰斗到屏底区域, 半辐射受热面指屏区, 高温对流受热面指水平烟道区域, 中温对流受热面指将水平烟道和尾部烟道相连接的转向室区域, 低温对流受热面指尾部烟道区域。S-CO<sub>2</sub> 锅炉的辐射、半辐射、中/低温对流受热面成本均有上涨, 而中/低温对流受热面成本上涨金额最高。S-CO<sub>2</sub> 锅炉造价是常规超超临界锅炉的 1.71 倍。

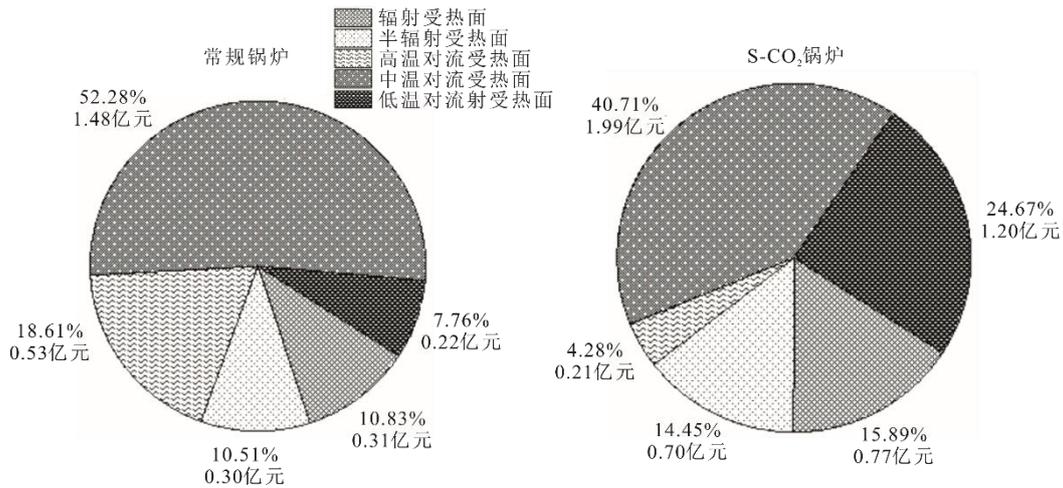


图 4 常规锅炉和 S-CO<sub>2</sub> 锅炉受热面成本占比  
Fig.4 The cost share percentage of conventional boiler and S-CO<sub>2</sub> boiler

综上, 材料平均等级提升是造成 S-CO<sub>2</sub> 锅炉造价增加的主要原因, 受热面质量增加是次要原因。而中/低温对流受热面材料等级提升又是导致整个锅炉平均材料等级提升的主要原因。因此, 中/低温对流受热面将成为以后 S-CO<sub>2</sub> 锅炉优化的重点。对此, 本文给出 S-CO<sub>2</sub> 锅炉发展的 2 点建议:

- 1) 优化中/低温对流受热面结构和设计强化传热方法, 提高受热面换热性能;
- 2) 尽量保证 S-CO<sub>2</sub> 锅炉炉膛的高效换热能力, 例如研发新型强化传热管, 以减小中/低温对流受热面的面积。

图 5 为常规机组和 S-CO<sub>2</sub> 机组主要设备成本占比。

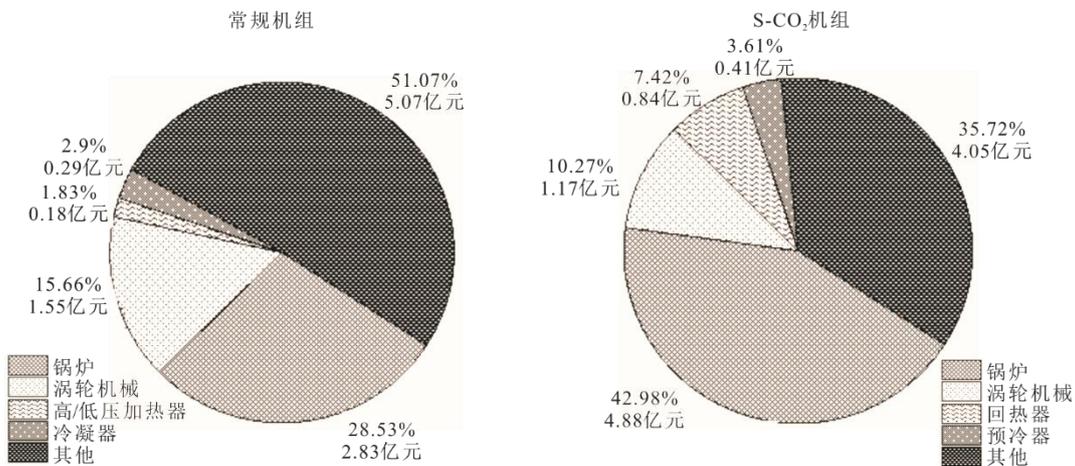


图 5 常规机组和 S-CO<sub>2</sub> 机组主要设备成本占比  
Fig.5 The cost share percentage of equipment of the conventional unit and S-CO<sub>2</sub> unit

由图5可以看出, S-CO<sub>2</sub>机组的锅炉、预冷器、回热器成本大幅上升, 而涡轮机械成本则大幅下降。在常规机组中, 涡轮机械包括汽轮机、给水泵和凝结水泵; 在 S-CO<sub>2</sub>机组中, 涡轮机械包括透平、主压缩机和再压缩机。目前, S-CO<sub>2</sub>机组的设备总购置成本略高于常规机组(1.14倍)。因此有必要对锅炉、预冷器和回热器3大部件继续深入研究, 以降低设备成本。

### 3.2 平准化度电成本(LCOE)

表7给出了常规机组和 S-CO<sub>2</sub>机组的主要性能参数。可以看出, S-CO<sub>2</sub>机组具有更低的厂用电率和更高的净效率, 机组热耗率  $\alpha_{HR}$  是常规机组的86.9%。据此性能参数计算出2台机组的LCOE数据如表8所示。

表7 常规机组与 S-CO<sub>2</sub>机组主要性能参数  
Tab.7 Main performance parameters of the conventional unit and S-CO<sub>2</sub> unit

参数	常规机组	S-CO <sub>2</sub> 机组
厂用电/MW	27.85	24.68
发电量/MW	660.00	660.00
净发电量/MW	632.15	635.32
厂用电率/%	4.22	3.74
循环效率/%	45.39	51.82
锅炉效率/%	94.18	94.46
净效率 <sup>①</sup> /%	40.94	47.12
热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	8 793.36	7 640.68

注: ①  $\eta_{net}=(100-R_{house})\eta_{cycle}\eta_{boiler}$

表8 常规机组与 S-CO<sub>2</sub>机组的LCOE  
Tab.8 The LCOE of the conventional unit and S-CO<sub>2</sub> unit

参数	常规机组	S-CO <sub>2</sub> 机组
资本成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.071	0.071
燃料成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.324	0.282
运维成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.070	0.063
额外成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.143	0.124
LCOE/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.609	0.540

由表8可以看出, S-CO<sub>2</sub>机组的资本成本与常规机组基本相同, 燃料成本、运维成本、额外成本分别低13.0%、10.0%、13.3%。在Moulllec等人<sup>[9]</sup>的数据中, S-CO<sub>2</sub>机组的资本成本和燃料成本分别降低了15.3%、12.2%, 其资本成本降低的主要原因在于没有考虑材料平均等级提升对锅炉造价的影响, 燃料成本的降低比例则与本文数据基本相同。S-CO<sub>2</sub>机组LCOE则比常规机组低11.3%, 体现了S-CO<sub>2</sub>燃煤发电技术的强大经济潜力。

## 4 结 论

1) S-CO<sub>2</sub>机组的平准化度电成本为0.540元/(kW·h), 比常规机组低11.3%, 具有很强的经济优势, 但机组中锅炉、回热器、预冷器的造价较高, 还需要进一步降低成本, 扩大优势。

2) S-CO<sub>2</sub>锅炉中/低温对流受热面材料等级的提升导致其成本占锅炉总成本的比例增加, 需要进一步优化以降低成本。

### [参 考 文 献]

- [1] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production[J]. Journal of Engineering for Power, 1968, 90(3): 287-295.
- [2] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle[J]. Energy Conversion, 1968, 8(2): 85-90.
- [3] LI M, ZHU H, GUO J, et al. The development technology and applications of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle in nuclear energy, solar energy and other energy industries[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 255-275.
- [4] MA Y, MOROZYUK T, LIU M, et al. Optimal integration of recompression supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle with main compression intercooling in solar power tower system based on exergoeconomic approach[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1134-1154.
- [5] DOSTAL V, HEJZLAR P, DRISCOLL M J. The supercritical carbon dioxide power cycle: comparison to other advanced power cycles[J]. Nuclear Technology, 2006, 154(3): 283-301.
- [6] ALLAM R, MARTIN S, FORREST B, et al. Demonstration of the Allam cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 5948-5966.
- [7] 王鸽. 超高参数二氧化碳燃煤发电系统全生命周期评价[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 42-45.  
WANG Ge. Life cycle assessment of supercritical carbon dioxide coal-fired power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 42-45.
- [8] SCHMITT J, WILLIS R, AMOS D, et al. Study of a supercritical CO<sub>2</sub> turbine with tit of 1350 K for Brayton cycle with 100 MW class output: aerodynamic analysis of stage 1 vane[C]. International Gas Turbine Institute. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. ASME Paper No. GT2014-27214.
- [9] MOULLEC Y L. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO<sub>2</sub> capture using a supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. Energy, 2013, 49(1): 32-46.
- [10] 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.  
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.
- [11] LIU X, ZHONG W, LI P, et al. Design and performance analysis of coal-fired fluidized bed for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle[J]. Energy, 2019, 176: 468-478.
- [12] ZHOU J, ZHANG C, SU S, et al. Exergy analysis of a 1 000 MW single reheat supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Manage-

- ment, 2018, 173: 348-358.
- [13] WANG J M, DONG F L, CHEN X, et al. Numerical simulation of flow and heat transfer between supercritical CO<sub>2</sub> tube and flue gas[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2019, 14(2): 2295.
- [14] ZHOU J, ZHU M, XU K, et al. Key issues and innovative double-tangential circular boiler configurations for the 1 000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant[J]. *Energy*, 2020, 199: 117474.
- [15] ZHOU J, XIANG J, SU S, et al. Key issues and practical design for cooling wall of supercritical carbon dioxide coal-fired boiler[J]. *Energy*, 2019, 186: 115834.
- [16] ZHOU J, LING P, SU S, et al. Exergy analysis of a 1 000 MW single reheat advanced supercritical carbon dioxide coal-fired partial flow power plant[J]. *Fuel*, 2019, 255: 115777.
- [17] BAI W G, ZHANG Y F, YANG Y, et al. 300 MW boiler design study for coal-fired supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 66-73.
- [18] ROTH I. Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing [J]. *Energy*, 2004, 29: 2125-2144.
- [19] 火电工程限额设计参考造价指标(2017 年水平)[R]. 北京: 电力规划设计总院, 2018: 71-137.
- Reference cost index of thermal power project quota design (Level 2017)[R]. Beijing: China Electric Power Planning & Engineering Institute, 2018: 71-137.
- [20] Coal Price[Z/OL]. [2020-04-01]. <http://www.sxcoal.com/price/index/en>.
- [21] JAMES R Z A K D. Cost and performance baseline for fossil energy plants volume 1: bituminous coal and natural gas to electricity[R]. NETL, 2019: 420-469.
- [22] THEIS J. Quality guidelines for energy systems studies: cost estimation methodology for NETL assessments of power plant performance[R]. NETL, 2019: 9-23.
- [23] WANG L, YANG Y, DONG C, et al. Exergoeconomic evaluation of a modern ultra-supercritical power plant[J]. *Energies*, 2012, 5(9): 3381-3397.
- [24] WEILAND N. Techno-economics and cost modeling for state-of-the-art sCO<sub>2</sub> components[R]. NETL, 2019: 6-8.
- [25] PHILLIPS J N, WHEELDON J M. Economic analysis of advanced ultra-supercritical pulverized coal power plants: a cost-effective CO<sub>2</sub> emission reduction option?[C]// Proceedings from the Sixth International Conference. August 31–September 3, 2010, Santa Fe, New Mexico, USA.

(责任编辑 李园)