

超临界二氧化碳循环应用于火力发电的研究现状

郑开云

(上海发电设备成套设计研究院, 上海 200240)

摘要: 超临界二氧化碳动力循环($s\text{CO}_2$ 循环)系统简单、结构紧凑、效率高, 可与采用化石燃料燃烧方式的热源结合, 形成先进的火力发电系统。 $s\text{CO}_2$ 循环有间接加热和直燃加热两种方式, 前者可采用燃煤锅炉间接加热获得热能, 后者可采用燃气直接燃烧获得热能。基于对当前国内外的研究现状的文献调研, 可以得出结论: $s\text{CO}_2$ 循环可应用于火力发电, 并有望开发大型的清洁、高效火力发电系统, 突破传统火力发电技术发展瓶颈。

关键词: 超临界二氧化碳循环; 火力发电; 循环效率

中图分类号: F426.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0039-09

Current Status of Research on the Application of Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle in Fossil Fired Power Generation

ZHENG Kaiyun

(Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide power cycle ($s\text{CO}_2$ cycle) is characterized of its simple system, compact structure and high efficiency, and can be coupled with fossil fired heat source to form advanced fossil fired power generation system. The $s\text{CO}_2$ cycle has two types, i. e. indirectly heated and direct-fired cycle, and the former can use coal fired furnace as heat source, and the latter can use gas combustor as heat source. Based on the current status of research and development of $s\text{CO}_2$ cycle throughout the world, it is concluded that $s\text{CO}_2$ cycle can be applied to fossil fired power generation, and it is expected that large-scale clean and high-efficiency power generation system can be developed in the near future so as to overcome the development bottleneck of conventional fossil fired power generation technology.

Key words: supercritical carbon dioxide cycle; fossil fired power generation; cycle efficiency

火力发电利用可燃物燃烧产生热能, 并通过动力装置转换成电能。火力发电是全球范围内最为重要的电力来源, 主要包括燃煤和燃气发电, 前者采用的动力机械为蒸汽轮机, 后者采用燃气轮机。大型超超临界燃煤发电机组和重型燃气轮机发电机组是当前火力发电的主力, 并且行业内正在大力发展更高参数等级的技术, 如: $700\text{ }^\circ\text{C}$ 先进超超临界燃煤发电、H 级先进燃气轮机发电技术, 以进一步提

高发电效率、降低发电成本、减少污染物排放。但是, 随着传统火力发电技术不断成熟、发电效率不断趋于技术极限, 技术研究的热点开始转向新型动力循环系统以替代现有技术。

近年来, 超临界二氧化碳动力循环($s\text{CO}_2$ 循环)成为研究热点, 并且被认为具有诸多潜在优势, 有望突破现有动力循环技术发展的瓶颈。 $s\text{CO}_2$ 循环的研究始于 20 世纪 40 年代^[1], 在 60—70 年代取得阶段性研究成果^[2-3], 之后主要由于透平机械、紧凑式热交换器制造技术不成熟而中止, 直至本世纪初, $s\text{CO}_2$ 循环的研究再度兴起^[4]。由于 CO_2 化学性质稳定、密度高、低成本、循环系统简单、结构紧凑、效率高, $s\text{CO}_2$ 循环被认为在火力

收稿日期: 2017-02-22

作者简介: 郑开云(1980), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 博士, 主要从事动力工程技术研究工作(e-mail) zhengkaiyun@speri.com.cn。

发电、第四代核能发电(超临界水堆除外)、聚光型太阳能热发电(CSP)、余热发电、地热发电等领域具有良好的应用前景^[5]。

sCO₂ 循环可采用类似蒸汽轮机发电的方式,通过燃煤锅炉间接加热获得热能进行发电。理论证明,在透平入口温度高于 550 ℃ 时, sCO₂ 循环效率将高于蒸汽朗肯循环,且温度越高优势越明显;其次, CO₂ 的高温氧化性弱于水蒸汽,基于现有火电站高温材料, sCO₂ 循环可运行于 700 ℃ 或更高的温度;此外, sCO₂ 循环对于低温端冷却温度的敏感性较小,在空冷条件下仍能保持较高的效率,在缺水地区更具优势。

sCO₂ 循环也可采用燃气直接燃烧获得热能进行发电,即: Allam 循环^[6-7],但不同于传统的燃气轮机发电。首先, Allam 循环采用纯氧燃烧,可避免 NO_x 生成;其次,透平入口压力可高达 30 MPa,也就是说,燃气在高压燃烧室燃烧;此外,透平排气经回热器加热压缩机排气后冷却分离出水,多余的 CO₂ 以液态或高压超临界态形式直接回收,其余的 CO₂ 重回燃烧室。Allam 循环系统也不同于纯氧燃烧的燃气轮机系统^[8],前者是将透平排气中的水分离, CO₂ 再循环,后者是 CO₂ 分离,水再循环。

本文介绍了两种加热方式的 sCO₂ 循环(间接加热和直燃加热)、sCO₂ 循环应用于火力发电的系统设计,及其优势,并对发展趋势和前景作了分析,供同行参考。

1 sCO₂ 循环类型简介

sCO₂ 循环有两种加热方式:一是间接加热方式(闭式),二是直燃加热方式(半闭式)。这两种类型的 sCO₂ 循环回路和压力-比焓关系分别示于图 1 和图 2,图中对循环系统作了简化,仅给出主要的设备和工艺流程。

对于间接加热方式的 sCO₂ 循环,系统主要由压缩机(或泵)、透平、发电机、加热器、回热器、预冷器等组成,如图 1 所示,所示为分流再压缩循环,经学者广泛研究^[4],这种循环布置的效率最高,最有发展前途。当工质始终处于超临界态时,这种循环即为布雷顿循环,低温低压工质首先进入压缩机升压至高压,经回热器吸收透平排出工质的热量,再经加热器从热源吸收热量达到最高温度,然

后进入透平做功推动发电机工作,透平排出的工质经回热器释放部分热量,最后经预热器冷却后进入下一个循环过程。若工质经预冷器降温至液态,则可通过泵加压。笔者采用美国国家标准与技术研究所(NIST)发布的 REFPROP 物性数据库,对图 1 的分流再压缩循环的效率作了分析,给定透平入口温度 550 ℃ 和压力 20 MPa、压缩机入口温度 32 ℃,透平效率 0.9、压缩机效率 0.89、回热器效率 0.95 且最小温差 10 ℃、忽略压损,获得最佳循环效率约 46%,提高透平入口温度至 700 ℃,循环效率可提高至 50% 以上。

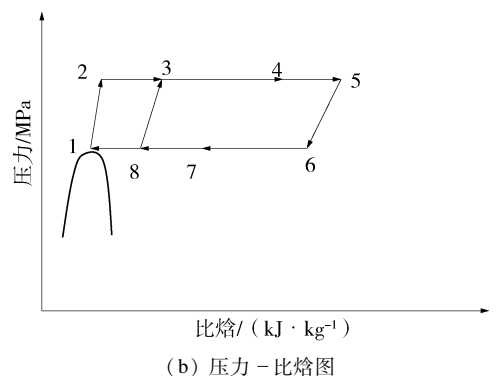
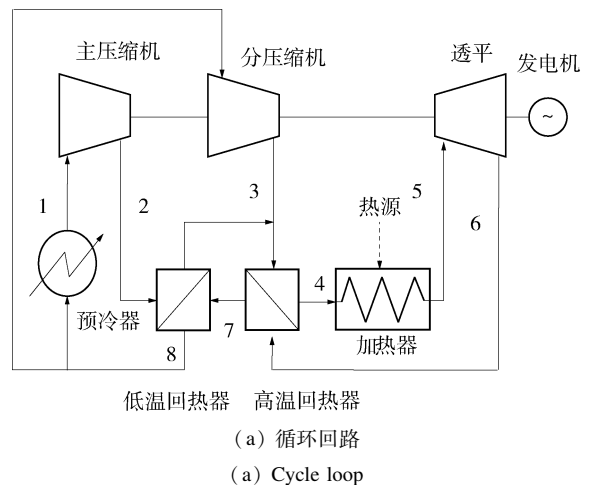


图 1 间接加热方式 sCO₂ 循环

Fig. 1 Indirectly heated sCO₂ cycle

对于直燃加热方式 sCO₂ 循环,系统主要由压缩机、泵、透平、发电机、燃烧器、回热器、冷却器、水分离器、预冷器、空分等组成,如图 2 所示。低温低压工质首先进入泵升至高压,经回热器吸收透平排出工质的热量,再经燃烧器吸收热量达到最高温度,并携带燃烧产物(CO₂ 和 H₂O),进入

透平膨胀做功推动发电机工作，透平排出的气态介质经回热器释放部分热量，并经进一步冷却后，使其中的水发生冷凝并从循环回路中分离出来，介质再由压缩机压缩至临界压力以上，最后经预热器冷却后进入下一个循环过程，燃烧产生的多余 CO₂ 可通过管路排出。直燃加热方式 sCO₂ 循环透平入口温度达 1 100 ℃ 以上，压力 20 MPa 以上，因此，循环的热效率可达 60% 以上。

由上述可见，sCO₂ 循环采用回热方法，以及临界点附近压缩以减少做功，这是其具有高循环效率的两个关键因素。

2 sCO₂ 循环应用于火力发电的系统设计

2.1 间接加热 sCO₂ 循环应用于空气燃烧发电系统

日本东京工业大学 (Tokyo Institute of Technology) 的 Y. Muto 等学者开展了 sCO₂ 循环应用于火力发电的研究，并完成了 300 MWe 电厂的系统设计及关键部件的初步设计^[9]。如图 3 所示，为基于 sCO₂ 循环的 300 MWe 火力发电厂系统图，热源为燃烧天然气或轻油的燃烧室，空气由送风机经省煤器 (空气预热器) 预热后供给燃烧室，燃烧室排出的高温气体携带燃烧产生的热能进入 CO₂ 加热器，经热交换后的低温气体输入至省煤器预热空气后排放。sCO₂ 循环工质最高温度为 650 ℃，最高压力 20.2 MPa，冷端温度 32 ℃，最低压力 5.5 MPa，循环设计为分流再压缩循环的基础上增加再热、中间冷却的工艺。考虑到加热器中传热管内外压差不能太大，在高温回热器与加热器之间设置高压透平，CO₂ 工质经高压透平膨胀做功后压力降为 8 MPa，再进入加热器升温后进入低压透平膨胀至 5.7 MPa。由于从高压透平出口进入加热器的 CO₂ 工质温度高，所以加热器出口气体的温度高达 400 ~ 500 ℃，这部分热量通过省煤器用于预热空气回收热量，减少了热效率的损失。压缩机分为高、低压两级压缩，采用中间冷却以减少做功。上述系统热效率是 43.4%，其中的 sCO₂ 循环热效率是 47.6%。Y. Muto 等学者的研究表明，sCO₂ 循环不但可用于核能、太阳能发电，也可以用于火力发电，通过省煤器，用加热器排气预热空气，以及采用高、低压两级膨胀是实现系统设计的关键。

法国 EDF 公司的 Moullec 提出了 sCO₂ 循环用于粉煤燃烧火力发电的概念电厂，并可结合 CO₂ 捕集 (燃烧后胺基二氧化碳捕集工艺或纯氧燃烧工艺)^[10-11]，如图 4 所示，为基于 sCO₂ 循环的粉煤燃烧火力发电厂示意图，其中动力循环部分也是在分流再压缩的 sCO₂ 循环基础上的改进，锅炉部分与现有燃煤锅炉相似。锅炉内粉煤燃烧产生的温度约为 1 400 ℃，sCO₂ 循环工质最高温度为 620 ℃，并采用两次再热，那么锅炉排烟温度可达 500 ℃ 以上，且有相当大的一部分排烟热量无法被 sCO₂ 循环或空气预热器利用，因此采取烟气分流措施，即烟气进入空气预热器前分流一部分到另一并联的

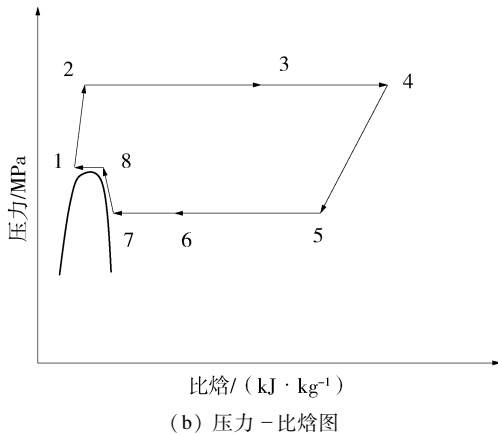
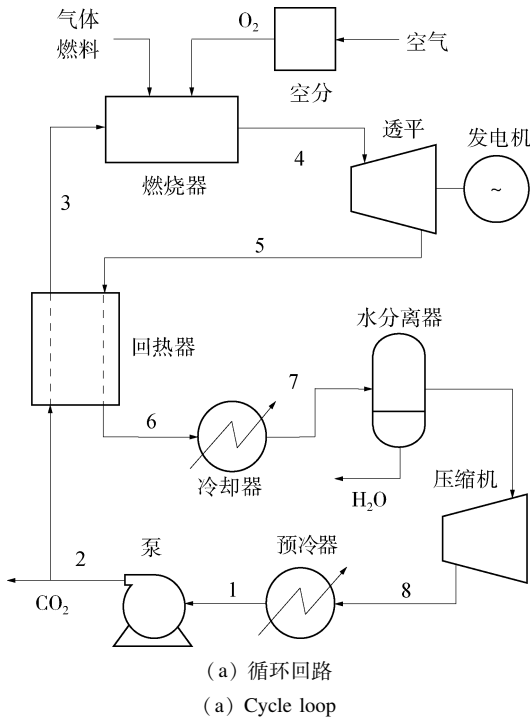
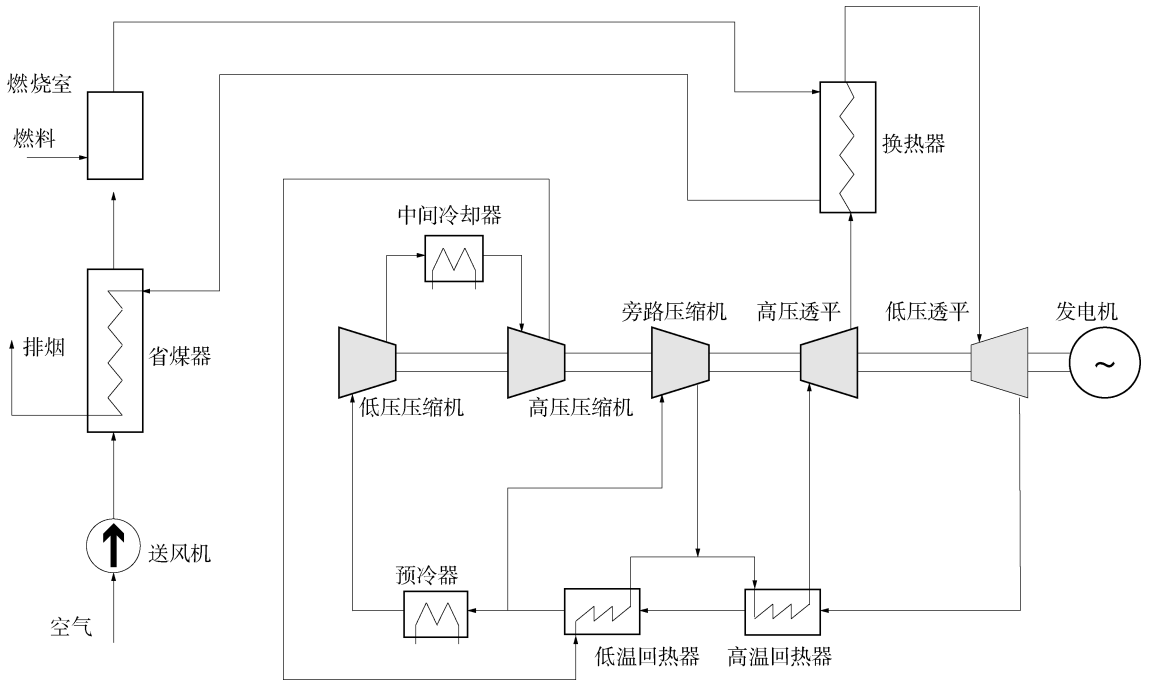
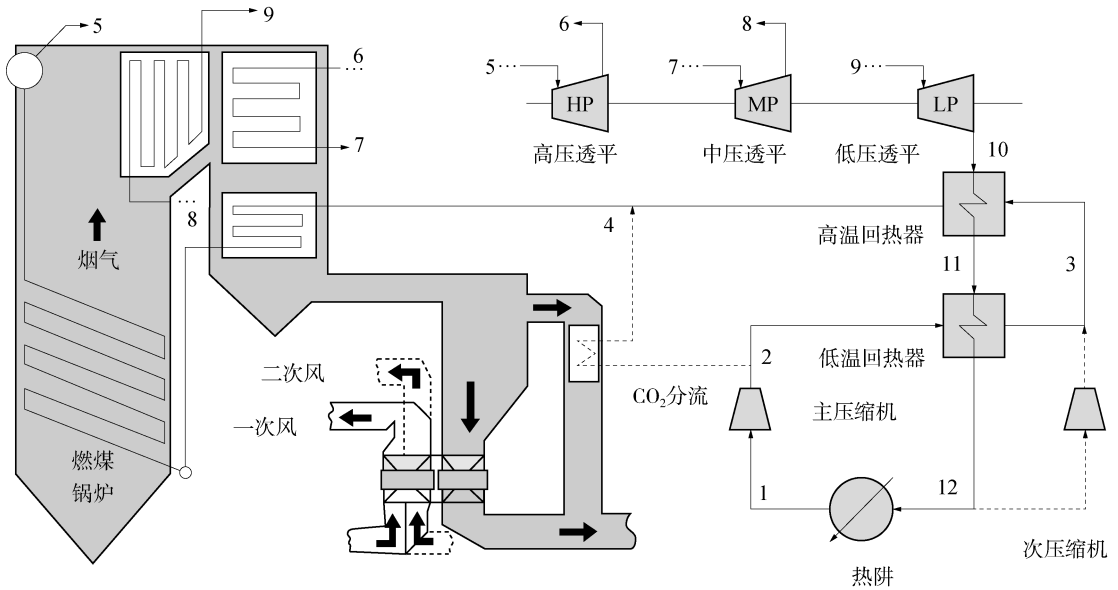


图 2 直燃加热方式 sCO₂ 循环
Fig. 2 Direct-fired sCO₂ cycle

图3 基于 $s\text{CO}_2$ 循环的火力发电系统^[9]Fig. 3 Fossil fired power generation system based on $s\text{CO}_2$ cycle^[9]图4 基于 $s\text{CO}_2$ 循环的粉煤燃烧火力发电厂^[11]Fig. 4 Coal powder fired power plant based on $s\text{CO}_2$ cycle^[11]

支路,同时额外增加了一个加热器用于加热主压缩机分的一部分 CO_2 工质。文献[11]的分析计算结果表明,对于1 000 MWe等级的电厂,假设 $s\text{CO}_2$ 循环最高温度为 $620\text{ }^\circ\text{C}$,最高压力 30 MPa ,则全厂净效率是 47.8% (LHV),其中的 $s\text{CO}_2$ 循环热效率

是 52.4% 。上述基于 $s\text{CO}_2$ 循环的燃煤电厂的效率显著高于参考超超临界燃煤电厂 ($30\text{ MPa}/600\text{ }^\circ\text{C}/620\text{ }^\circ\text{C}$) 的效率 (45.4%),可见 $s\text{CO}_2$ 循环的效率优势。

西安热工研究院的学者也针对火力发电的应用

开展了对 $s\text{CO}_2$ 循环的研究, 建立了分流再压缩和一次再热的 $s\text{CO}_2$ 循环火力发电系统的数学模型, 深入分析计算了分流系数、主压缩机出口压力、主压缩机入口压力、透平入口温度等关键参数对循环效率的影响^[12], 为未来建设大型煤基 $s\text{CO}_2$ 循环火力发电系统提供重要的参考。同时, 西安热工研究院正在建设 5 MWe 的整体试验装置, 并配套燃油锅炉, $s\text{CO}_2$ 循环透平入口压力 20 MPa, 温度 600 °C, 主压缩机入口压力 7.6 MPa, 温度 32 °C, 再热压力 12.69 MPa, 温度 600 °C。

美国电力研究院 (EPRI) 和 Babcock & Wilcox 公司的学者基于 700 °C 先进超超临界锅炉, 提出了基于分流再压缩 $s\text{CO}_2$ 循环的 750 MWe 电厂的初步设计^[13]。由于 CO_2 进入炉膛的温度高达 530 °C, 与 CO_2 热交换后烟气的温度达 565 °C 以上, 为此再串联一个 $s\text{CO}_2$ 循环以回收一部分排烟热量, 降温至 370 °C 的烟气通过常规的空气预热器回收余热。与相同容量等级的基准 700 °C 先进超超临界蒸汽循环相比, $s\text{CO}_2$ 循环的工质质量流量是前者的 12 倍, 体积流量是前者的 10 倍, 工质在锅炉管内流动时压损非常大, 即使锅炉管面积增大 8 倍也会产生 0.66 MPa 的压损, 难以满足设计要求。此外, $s\text{CO}_2$ 循环配套的锅炉设计还存在诸多其它的技术挑战。

2.2 间接加热 $s\text{CO}_2$ 循环应用于纯氧燃烧发电系统

ZEPSTM 概念电厂中采用增压流化床纯氧燃烧含碳固体燃料, 产生主要成分为 CO_2 和 H_2O 的气体排放, 其可选的动力循环为 $s\text{CO}_2$ 循环作为顶循环配合蒸汽朗肯循环作为底循环^[14-15]。如图 5 为 550 MWe 燃煤 ZEPSTM 概念电厂的示意图, 其中 $s\text{CO}_2$ 循环为分流再压缩方式, 蒸汽朗肯循环用于低温烟气余热回收 (包括水的凝结热)。流化床排气经余热回收、凝结水分离后, 一部分 CO_2 再循环返回流化床以降低火焰温度, 另一部分封存, 燃烧所需氧气由空分设备提供。在过滤器后设有烟气回热器, 用于再循环 CO_2 吸收排烟热量。当透平入口温度 704 °C, 压力 20.7 MPa, 冷端温度 32 °C, 循环效率 50.4%, 电厂净效率 37.3% (HHV)。

美国能源部的 NETL (National Energy Techno-

logy Laboratory) 的 Walter 等学者研究了纯氧燃煤循环流化床结合 $s\text{CO}_2$ 循环和碳捕集的发电系统^[16], 并与纯氧燃煤循环流化床结合超临界蒸汽循环 (参数 24.1 MPa/593 °C/593 °C) 的参考电厂作了对比分析。如图 6 所示, 为基于 $s\text{CO}_2$ 循环的纯氧燃烧火力发电系统, 其中 $s\text{CO}_2$ 循环为分流再压缩方式, 主压缩机出口分流一个支路用于回收低温烟气的热量, 纯氧燃煤循环流化床的尾部烟道布置的烟气回热器和烟气冷却器可大量回收排烟显热从而免去底循环。流化床排烟经回热器、冷却器冷却, 产生的冷凝水分离出去, 最后烟气的主要成分为 CO_2 , 其中一部分再循环返回流化床, 另一部分由 CO_2 提纯单元处理后变成 CO_2 产品。以不带再热和中间冷却的 $s\text{CO}_2$ 循环作为基准循环, 透平入口温度 620 °C, 压力 34.5 MPa, 冷端温度 35 °C, 电厂净效率 33.2% (HHV), 同时, 文中分析了再热、中间冷却以及将透平入口温度提高至 760 °C 的情况对提高循环效率的作用。

2.3 直燃加热 $s\text{CO}_2$ 循环发电系统

对于直燃加热 $s\text{CO}_2$ 循环发电系统, 8Rivers 公司发明了专利技术 Allam 循环发电系统^[6-7,17-18]。Allam 循环系统中的动力转换部分同图 2 所示相近, 针对不同燃料, 开发了两种技术类型: 天然气和煤气化 Allam 循环系统, 如图 7 所示。Allam 循环系统主要优点有: 零排放、100% CO_2 捕集; 发电效率高 (Allam 循环目标效率见表 1)、成本低; 占地面积小; 电厂选址不受地理环境影响; 可采用空气冷却或水冷却。Rivers 公司与 CB&I 公司、Exelon 公司联合投资成立 Net Power 公司, 作为实现 Allam 循环系统商业化的平台。目前, Net Power 公司正在建造 50 MW 的天然气循环示范电厂, 投资 1.4 亿美元, Toshiba 公司已为其提供最关键的部件: 燃烧器和透平, Heatric 公司提供了印刷电路板换热器 (PCHE), 电厂预计于 2017 年投运, 500 MW 的天然气循环商业电厂已完成预前端工程设计 (pre-FEED)。同时, 8Rivers 公司正在研发煤气化循环及示范电厂建设。煤气化 Allam 循环, 除了煤气化系统和燃烧器需要重新设计, 煤气化 Allam 循环可沿用天然气 Allam 循环的技术。

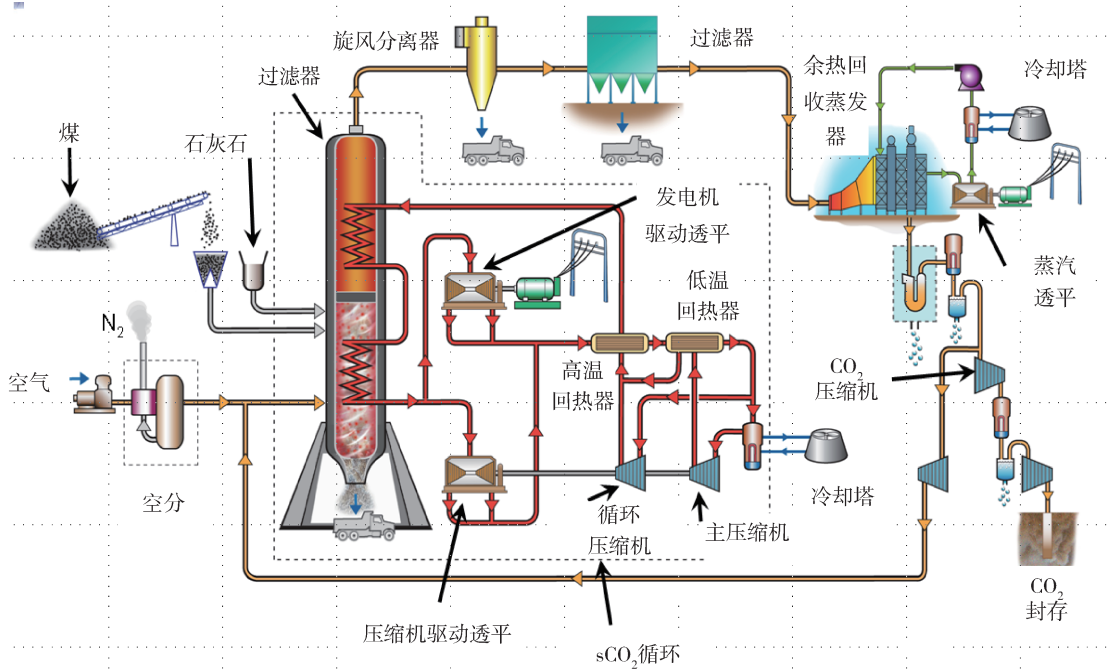


图 5 基于 $s\text{CO}_2$ 循环的燃煤 ZEPS™ 概念电厂^[14]

Fig. 5 Coal fired ZEPS™ concept power plant based on $s\text{CO}_2$ cycle^[14]

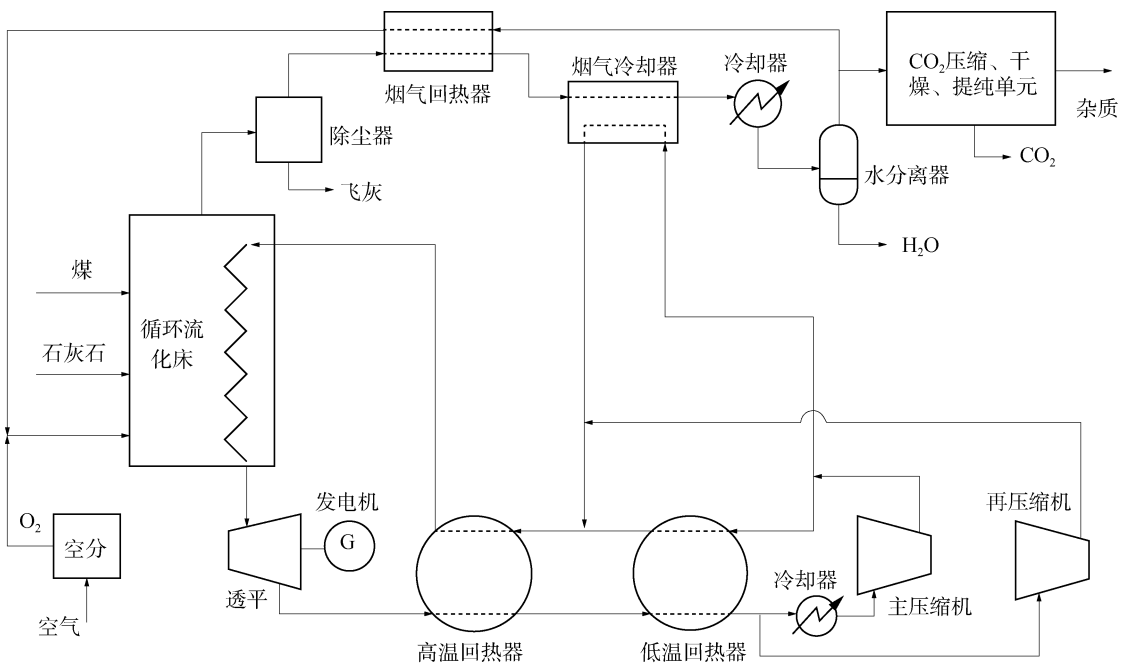
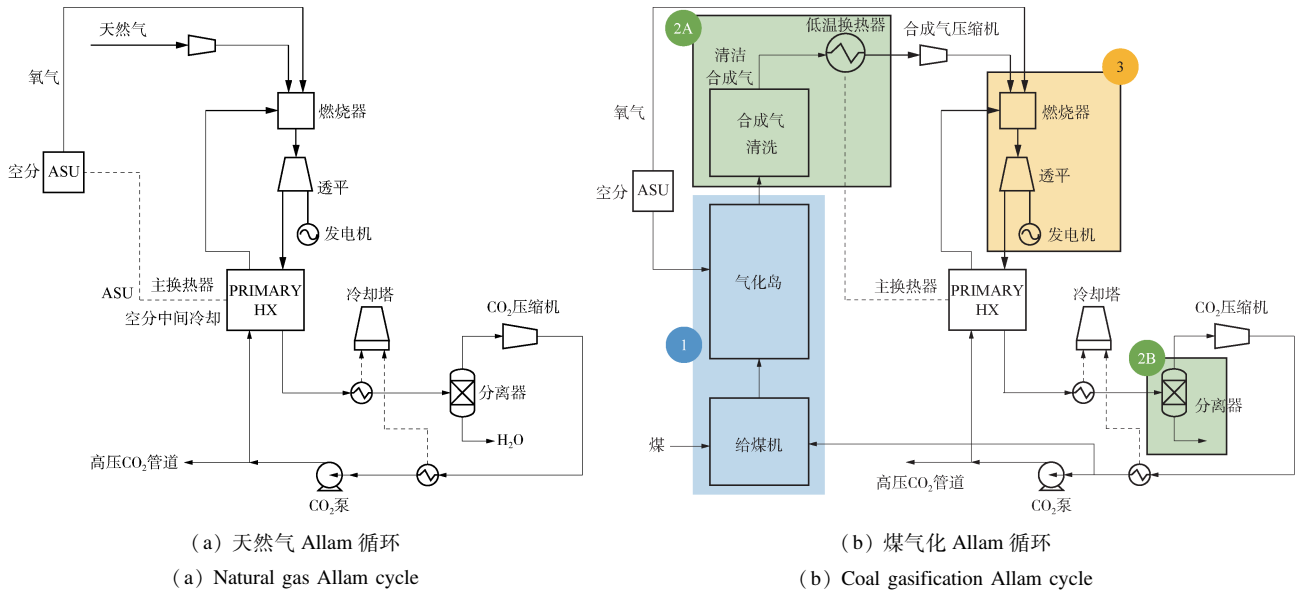


图 6 纯氧燃煤循环流化床结合 $s\text{CO}_2$ 循环和碳捕集的发电系统^[16]

Fig. 6 Power generation system with oxy-coal fired circulating fluid bed combined with $s\text{CO}_2$ cycle and CCS^[16]

图7 天然气和煤气化 Allam 循环系统^[17]Fig. 7 Natural gas and coal gasification Allam cycle system^[17]表1 Allam 循环目标效率(100% CO₂ 捕集)^[6]Tab. 1 Target efficiency of Allam cycle (100% carbon capture)^[6]

类型	HHV/%	LHV/%
天然气循环	53.17	58.90
煤气化循环	48.88	51.44

注：透平入口 1 150 °C/300 bar、出口 30 bar。

Allam 循环高效率来自两个方面：一是透平入口工质的温度和压力高，二是将空分设备的余热整合至 sCO₂ 循环。Allam 循环的效率优势成为国际上研究热点，多家研究机构对循环效率作了分析。

国际能源署 (IEA) 的报告中，分析了天然气 Allam 循环的效率，给定透平入口 1 150 °C/300 bar、出口 34 bar 的情况，净效率为 55.1% (LHV)^[19]。类似地，意大利米兰理工大学 (Politecnico di Milano) 的 Scaccabarozzi 等学者也开展了对天然气 Allam 循环的热力学分析，选取的主要参数与 IEA 报告相同，得到净效率为 54.58% (LHV)^[20]。德国柏林工业大学 (Technische Universität Berlin) 的 Penkuhn 等学者根据已公开的 Allam 循环的参数，采用 Aspen Plus 软件，对天然气 Allam 循环作了热力学分析和焓分析，并对影响循环热效率和焓效率的各种因素作了敏感性分析。给定透平入口 1 150 °C/300 bar、出口 30 bar 的情

况，净效率为 53.4% (LHV)^[21]。尽管上述文献报道的计算值低于表 1 中 58.9% 的效率值，但是也足以说明 Allam 循环效率高。

NETL 的 Weihand 等学者对煤气化直燃加热 sCO₂ 循环的电厂的性能基准进行了理论评价，基准循环透平入口 1 149 °C/300 bar、出口 30 bar，电厂效率 37.7% (HHV)，98.1% CO₂ (99.4% 纯度) 捕集，其性能优于 IGCC 参考电厂的 31.2% 效率，90.1% CO₂ (99.99% 纯度) 捕集^[22]。需要注意的是，NETL 煤气化直接燃烧循环基准电厂的效率显著低于 Allam 循环电厂的目标效率，主要是由于两者的煤气化工艺不同。

3 sCO₂ 循环应用于火力发电的潜在优势

sCO₂ 循环的内在优势主要有：(1) 可与多种热源结合，循环效率高；(2) 系统简单、设备紧凑、占地面积小；(3) CO₂ 化学性质稳定、密度高、成本低；(4) 可以空冷、适用地区广。这些优势使得 sCO₂ 循环在火力发电领域也具有很大的应用潜力。

对于间接加热的 sCO₂ 循环，其应用于火力发电的优势可通过与蒸汽循环的比较来体现。研究表明，sCO₂ 循环电厂在相同等级的运行参数下，其循环效率可比超超临界蒸汽循环电厂高 5%^[10]，并且这种优势随着温度等级向 700 °C 以上发展时更趋

明显。另一方面,相比水蒸气,CO₂对金属材料的氧化作用较小^[23],所以在sCO₂循环中高温氧化对材料许用温度的限制较小。由此可见,在效率方面,sCO₂循环具有优于蒸汽循环的潜质。在设备成本方面,由于sCO₂循环的最高压力在35 MPa以内,最低压力在临界压力附近,压比非常小,所以CO₂透平尺寸小(约为蒸汽透平的1/10),透平制造成本势必成倍下降。此外,sCO₂循环的系统布置非常简单、结构紧凑、辅助设备少、维护工作量小,也有利于提高电厂的综合效益。因此,sCO₂循环具有替代蒸汽循环的潜在优势。

对于直燃加热的sCO₂循环,即Allam循环,其用于火力发电,可与F级及更先进的燃气轮机—蒸汽轮机联合循环带碳捕捉(CCS)装置的电厂相媲美,也就是说,可替代IGCC和NGCC,并实现高发电效率和零排放。Allam循环技术,包括天然气Allam循环和煤气化Allam循环,均采用纯氧直燃加热的技术,使其在本质上具备清洁和高效两方面特性,sCO₂循环还具有整合低品位热量的天然优势,可将空分设备的排热回收用于CO₂工质在低温区(200℃以内的大比热区)的加热,大幅节省了空分的能耗。类似地,Allam循环也兼具sCO₂循环所共有的系统简单、结构紧凑、维护方便等优势。

由此可见,sCO₂循环可应用于发展先进的大型火力发电系统,有望在清洁、高效和更低成本的技术方向上取得突破。需要指出的是,透平、压缩机、回热器、换热器、燃烧器等关键部件的技术成熟度仍然较低,仍须开展进一步的技术研发。

4 结论

sCO₂循环具有高效率的内在优势,可以采用间接加热或直燃加热方式,前者可替代蒸汽轮机动力循环用于燃煤发电,后者可替代燃气轮机—蒸汽轮机联合循环用于燃气发电。目前,传统的蒸汽轮机和燃气轮机发电技术的发展都已呈现不同程度的技术瓶颈,将sCO₂循环技术应用到火力发电是一条具有广阔前景的新途径。国际上,sCO₂循环技术蓬勃发展,特别是美国对这一技术的研发遥遥领先。在美国能源部资助下,10 MWe间接加热的sCO₂循环试验装置建设已启动,Net Power公司自主建设的50 MWth天然气Allam循环已接近竣工,

在可预见的未来,美国将实现商业示范电厂的建设和运行。我国的能源结构以煤为主,天然气资源比较短缺,发展基于燃煤和煤气化的火力发电技术更加适合我国的能源国情,所以间接加热的sCO₂循环宜结合燃煤锅炉开展研发,而直燃加热的sCO₂循环宜结合煤气化系统开展研发。基于燃煤锅炉和sCO₂循环的发电系统的开发可利用现有的超超临界及开发中的先进超超临界发电技术,特别是新型高温材料,可大量减少研发投入,缩短研发周期,相对而言,关键部件的研制难度也较小,近期阶段可优先开展这一技术的攻关。

参考文献:

- [1] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle [J]. *Energy Conversion*, 1968, 8(2): 85-90.
- [2] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production [J]. *Transaction ASME Journal of Engineering and Power*, 1968(7): 287-295.
- [3] COMBS O V. An investigation of the supercritical CO₂ cycle (Feher cycle) for shipboard application [D]. U. S. A.: MIT, 1977.
- [4] DOSTAL V, DRISCOLL M J, HEJZLAR P. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors: Advanced Nuclear Power Technology Program, MIT-ANP-TR-100 [R]. U. S. A.: MIT, 2004.
- [5] AHN Y H, SEONG J B, KIM M, et al. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, 47(6): 647-661.
- [6] ALLAM R J, PALMER M R, BROWN J, et al. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide [J]. *Energy Procedia*, 2013(37): 1135-1149.
- [7] ALLAM R J, FETVEDT J E, FORREST B A, et al. The oxy-fuel, supercritical CO₂ Allam cycle: new cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions [C]//International Gas Turbine Institute. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014; Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany, Jun. 16-20, 2014. U. S. A.: ASME, 2014.
- [8] ANDERSON R E, MACADAM S, VITERI F, et al. Adapting gas turbines to zero emission oxy-fuel power plants [C]//ASME. Proceedings of ASME Turbo Expo 2008; Power for Land, Sea and Air, Berlin, Germany, Jun. 9-13, 2008. U. S. A.: ASME, 2008.
- [9] MUTO Y, ISHIYAMA S, KATO Y, et al. Application of supercritical CO₂ gas turbine for the fossil fired thermal plant [J]. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2010, 4(9): 7-15.

- [10] MOULLEC Y L. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle [J]. Energy, 2013, 49(1): 32-46.
- [11] MECHERI M, MOULLEC Y L. Supercritical CO₂ Brayton cycles for coal-fired power plants [J]. Energy, 2016(103): 758-771.
- [12] ZHANG Y F, WANG S P, LIU W J, et al. Study on key parameters of a supercritical fossil-fired power system with recompression and reheat cycles [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-852.
- [13] DAVID T, PAUL W. Challenges in designing fuel-fired sCO₂ heaters for closed sCO₂ Brayton cycle power plants [C]//ASME. The 5th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, Texas, U. S. A., Mar. 28-31, 2016. U. S. A.: ASME, 2016.
- [14] GREGORY A J, M W M, GEORGE M O, et al. Supercritical CO₂ cycle development at Pratt & Whitney Rocketdyne [C]//ASTM. Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, Jun. 11-15, 2012. U. S. A.: ASME, 2012.
- [15] CHANDRASHEKHAR S, DAVID H, TONY E, et al. Supercritical CO₂ turbomachinery configuration and controls for a zero emission coal fired power plant: system off design & control of system transients [C]//ASME. The 4th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, Pittsburg, Pennsylvania, Sep. 9-10, 2014. U. S. A.: ASME, 2014.
- [16] WALTER W S, NATHAN W, CHARLES W, et al. Oxy-coal-fire circulating fluid bed combustion with a commercial utility-size supercritical CO₂ power cycle [C]//ASME. The 5th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, Texas, U. S. A., Mar. 28-31, 2016. U. S. A.: ASME, 2016.
- [17] LU X J, FORREST B, MARTIN S, et al. Integration and optimization of coal gasification systems with a near-zero emissions supercritical carbon dioxide power cycle [C]//ASME. ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Coex, Seoul, Korea, Jun. 13-17, 2016. U. S. A.: ASME, 2016.
- [18] ALLAM R J, BROWN G W, PALMER M R. System and method for high efficiency power generation using a carbon dioxide circulating working fluid; US20160215693A1 [P]. US Patent, 2016-07-28.
- [19] IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). Oxy-combustion turbine power plants [R]. U. S. A.: IEA, 2015.
- [20] SCACCABAROZZI R, GATTI M, MARTELLI E. Thermodynamic analysis and numerical optimization of the NET Power oxy-combustion cycle [J]. Applied Energy, 2016 (178): 505-526.
- [21] PENKUHN M, TSATSARONIS G. Energy analysis of the Allam cycle [C]//ASME. The 5th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, Texas, U. S. A., Mar. 28-31, 2016. U. S. A.: ASME, 2016.
- [22] WEILAND N, SHELTON W, WHITE C, et al. Performance baseline for direct-fired sCO₂ cycles [C]//ASME. The 5th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, Texas, U. S. A., Mar. 28-31, 2016. U. S. A.: ASME, 2016.
- [23] STRAKEY P A, DOGAN O N, HOLCOMB G R, et al. Technology needs for fossil fuel supercritical CO₂ power systems [C]//ASME. The 4th International Symposium—Supercritical CO₂ Power Cycles, Pittsburg, Pennsylvania, Sep. 9-10, 2014. U. S. A.: ASME, 2014.

(责任编辑 郑文棠)

广东国粤韶关综合利用发电新建项目1号机组顺利 通过168 h满负荷试运行

2017年7月20日凌晨1时30分,中国能建广东院勘察设计的2×350 MW超临界循环流化床(CFB)大型火力发电工程——广东国粤韶关综合利用发电新建项目1号机组顺利通过168 h满负荷试运行,这标志着中国能建广东院在大型超临界循环流化床发电工程领域再获重要突破。

国粤韶关2×350 MW超临界循环流化床发电工程位于广东省韶关市浈江区犁市镇,以浈江区现存煤矸石为主要燃料,新建2台350 MW超临界凝汽式汽轮机组,配置2台1164 t/h超临界循环流化床锅炉,同步建设脱硫、脱硝、除尘、除灰渣和二次循环冷却系统,配套建设厂外运煤专用线、汽车卸煤槽及煤场、茶山灰场、供排水系统等公用辅助工程。该工程建成后,每年能处理煤矸石150万t,年发电量为3.85 TWh,为韶关市作为中国优秀旅游城市和广东省文明城市提供进一步的能源支撑,对当地的资源综合利用及环境保护也将发挥重要作用。

(中国能建广东院)