

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.015

燃气-超临界 CO₂ 联合循环发电系统

郑开云

(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

摘要: [目的]燃气轮机排气温度高,可增加底循环,利用排气的余热发电,从而提高燃料总的能量利用率。鉴于超临界 CO₂ 循环热效率高,并且具有系统简单、结构紧凑、运行灵活等潜在优势,可与燃气轮机组成新型的燃气-超临界 CO₂ 联合循环。[方法]为了充分利用燃气轮机排气余热,提出在简单回热超临界 CO₂ 循环的基础上,再嵌套一个简单回热循环的布置方式,并以 PG9351(FA)型燃气轮机为例,对其热效率进行了计算分析。同时,在系统中增加余热利用装置,可将剩余热量用于供热、转换为冷量或发电。[结果]结果表明:对于选定的燃气轮机,超临界 CO₂ 循环最高温度可达约 600 °C,循环发电效率约 32%,获得余热温度为 170 °C 以上,余热热量占燃气轮机排气热量 9%,联合循环发电效率约 54%。[结论]燃气-超临界 CO₂ 联合循环发电系统具有较高的热效率,并且保留部分较高品位的余热,可进一步用于电厂运行。

关键词: 燃气轮机; 联合循环; 超临界 CO₂ 循环; 热效率

中图分类号: TQ541; TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0087-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Gas-supercritical CO₂ Combined Cycle Power Generation System

ZHENG Kaiyun

(Shanghai Power Equipment Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: [Introduction] The high exhaust temperature of gas turbine can increase the bottom cycle and generate electricity by using the waste heat of exhaust gas, so as to improve the total energy utilization rate of fuel. In view of its high thermal efficiency, simple system, compact structure, flexible operation and other potential advantages, supercritical CO₂ cycle can be combined with gas turbine to form a new type of gas-supercritical CO₂ combined cycle. [Method] In order to make full use of the exhaust heat of the gas turbine, a simple regenerative supercritical CO₂ cycle was constructed on the basis of a simple regenerative supercritical CO₂ cycle, and the thermal efficiency of the PG9351 (FA) gas turbine was calculated and analyzed. At the same time, by adding waste heat utilization device in the system, the residual heat could be used for heating, converting into cold energy or generating electricity. [Result] The results show that for the selected gas turbine, the maximum temperature of supercritical CO₂ cycle can reach 600 °C, the cycle power generation efficiency is about 32%, the heat recovery temperature is above 170 °C, the heat recovery accounts for 9% of the exhaust heat of gas turbine, and the combined cycle power generation efficiency is about 54%. [Conclusion] The gas-supercritical CO₂ combined cycle power generation system has high thermal efficiency and retains some high-grade waste heat, which can be further used in power plant operation.

Key words: gas turbine; combined cycle; supercritical CO₂ cycle; thermal efficiency

燃气轮机是关系国家安全和国民经济发展的高

技术核心装备,是一个国家科技和工业整体实力的重要标志之一,被誉为动力机械装备领域“皇冠上的明珠”。燃气轮机发电系统广泛应用于电力调峰、分布式能源、整体煤气化联合循环等领域,对于调整优化能源结构、提高能源综合利用效率、保障国家能源安全具有重要意义。

收稿日期: 2019-07-05 修回日期: 2019-08-14

基金项目: 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司科技项目“基于超临界二氧化碳动力循环的分布式热电联供系统研究”(201808098J)

基于重型燃气轮机的大型联合循环发电系统效率高、经济性好、环保优势突出,在我国的发展前景十分广阔。目前,燃气-蒸汽联合循环是主流技术,发电效率普遍为55%~60%,最新技术可达到62%。但是,燃气轮机联合循环也面临着新的挑战,其中一个重要的因素是可再生能源的快速增长,影响了燃气轮机联合循环的利用小时数,由此带来更高的运行灵活性要求,包括快速启动和变负荷,以及提高部分负荷下的效率^[1]。

目前,国内外正在广泛开展超临界CO₂循环技术的研究^[2],可代替汽轮机用作燃气轮机联合循环的底循环。超临界CO₂循环效率高,并具有结构简单、结构紧凑、运行灵活等潜在优势,有利于联合循环机组的灵活性的提升。但是,超临界CO₂循环的一个重要特征是深度回热,工质从外部吸热的温度区间窄,而燃气轮机排气热量是温度区间较大的显热,这就会造成余热吸收的不充分,影响余热发电的效率。通常用于核反应堆、聚光太阳能热的高效率分流再压缩超临界CO₂循环布置方式不宜采用,需要对循环的布置方式重新进行调整和优化。Cao等学者提出了简单回热模式的超临界CO₂循环和跨临界CO₂循环级联的底循环,分别与Taurus 60、GE10-1、SGT-600和Trent 60四种燃气轮机结合,经热力学分析和优化,表明级联循环的余热回收效果显著高于常规的蒸汽朗肯循环^[3]。Kim等学者对比研究了9种用于燃气轮机底循环的超临界CO₂循环,结果表明虽然分流再压缩循环通常被称为最高效的超临界CO₂循环,但其吸热区间窄,只有一小部分排气热量可以回收,余热发电的效率并不高,不适合用于余热回收,相比之下,采用简单回热模式的部分加热循环具有较高的热效率,且布置简单,设备数量少,更适合作为燃气轮机底循环^[4]。Pierre Huck等提出一种基于简单回热模式的级联超临界CO₂循环,分别用作GE H级重型燃气轮机和GE LM2500轻型燃气轮机的底循环,热力学分析表明对于重型燃气轮机,超临界CO₂循环热效率接近三压再热蒸汽循环,对于轻型燃气轮机,超临界CO₂循环优于两压无再热蒸汽循环^[5]。由此可见,基于简单回热循环方式,并通过适当的改造和优化,有望获得满意的余热发电效率。

本文针对燃气轮机联合循环发电系统,提出在简单回热超临界CO₂循环的基础上,再嵌套一个简

单回热超临界CO₂循环的布置方式作为底循环,并在系统中增加余热利用装置,以便将未被超临界CO₂循环回收的热量再加以利用,例如:转换为冷量,可用于降低燃气轮机进气温度或超临界CO₂循环冷端温度,对上述超临界CO₂循环和联合循环的发电效率进行了计算分析。

1 燃气-超临界CO₂联合循环布置

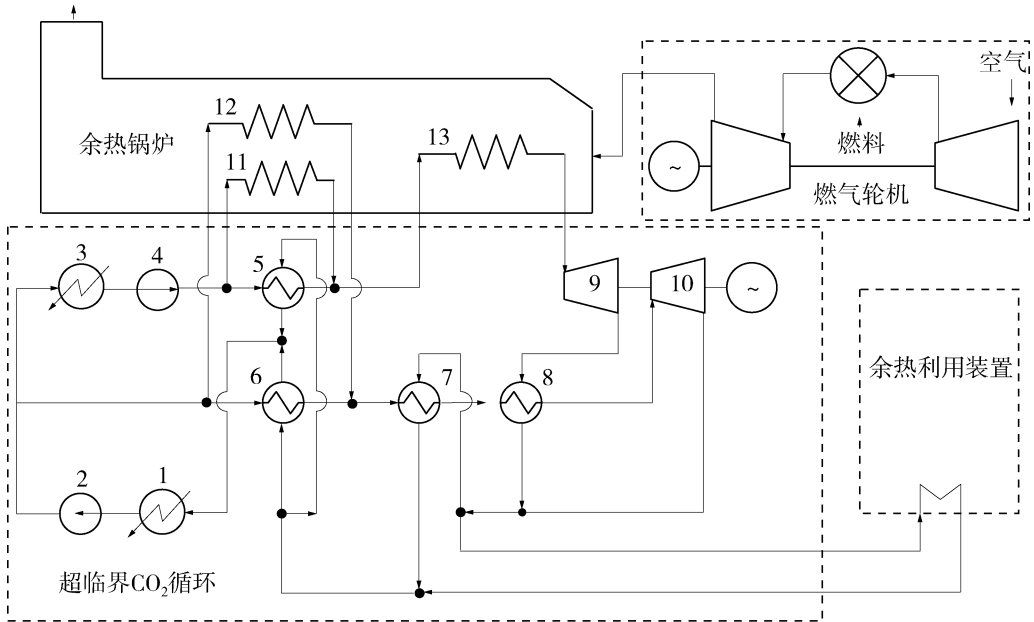
1.1 联合循环系统总体布置

燃气-超临界CO₂联合循环系统包括燃气轮机、余热锅炉和超临界CO₂循环,另外,配置余热利用装置,可用于供热、制冷或者也可以进一步进行余热发电。燃气-超临界CO₂联合循环系统如图1所示。系统总的运行过程为:燃气轮机运行发电,产生的高温排气进入余热锅炉,余热锅炉内布置三段加热器来加热超临界CO₂循环工质,超临界CO₂循环运行发电,并提供热量给余热利用装置。

1.2 超临界CO₂循环布置

根据图1,超临界CO₂循环采用两个简单回热循环嵌套的结构。其中一个简单回热循环的温度和压力参数较高,从加热器Ⅲ出来的工质经高压透平膨胀做功,高压透平排气先经回热器Ⅳ将热量传递给另一个低参数简单回热循环的工质,再与低压透平膨胀做功后的排气汇合,再分两路,一路通过回热器Ⅲ将热量传递给低参数简单回热循环的工质,另一路传递给余热利用装置,工质汇合后再分两路通过回热器Ⅰ和回热器Ⅱ传递给两个循环的压缩机出口工质。由于超临界CO₂在临界温度附近存在大比热区,所以分别与回热器Ⅰ和回热器Ⅱ并联地抽取一股工质进入余热锅炉的加热器Ⅰ和加热器Ⅱ吸收低温段的热量^[6-7]。为了减少高压压缩机的压缩功,高压压缩机进口之前设置间冷器来冷却工质。

如前文所述,超临界CO₂循环采取了深度回热的方法以提高热效率,燃气轮机排气热量难以通过超临界CO₂循环充分吸收转化。在循环布置的设计过程中,一方面使透平进口温度尽量高,另一方面使余热锅炉出口烟气温度尽量低,在两个嵌套的简单回热循环内部最大限度地分配热量,并使剩余热量有较高的品位。余热利用装置可以用剩余热量作为供热热源,直接供热或驱动吸收式热泵供热,也



注：1-预冷器；2-低压缩压缩机；3-间冷器；4-高压压缩机；5-回热器 I；6-回热器 II；7-回热器 III；8-回热器 IV；9-高压透平；10-低压透平；11-加热器 I；12-加热器 II；13-加热器 III。

图1 燃气-超临界 CO₂ 联合循环布置

Fig. 1 Gas-supercritical CO₂ combined cycle layout

可以驱动溴化锂双效吸收式制冷机产生冷量，用于燃气轮机进气冷却或超临界 CO₂ 循环冷端的冷却，还可以通过其他方式继续发电，如：有机工质循环发电。这样的布置设计不以追求热效率极值为目标，而是在确保高效率 and 保持系统简化的同时，获得一部分可灵活使用的热量，这对于实际电厂的来说是很有用的^[8]。

2 余热发电效率

采用 Epsilon 热力平衡计算软件，获得图 1 所示的超临界 CO₂ 循环的热力学平衡状态，对燃气轮机排气余热发电效率进行计算分析。考虑到重型燃气轮机排气温度可达 600 °C 以上，如：PG9351 (FA) 型燃气轮机排气温度为 609.4 °C^[9]。本文给定燃气轮机排气进入余热锅炉的温度为 610 °C，余热锅炉出口烟气温度约为 70 °C，余热锅炉加热超临界 CO₂ 工质，高压透平进口温度为 600 °C，高压透平排气回热给低压透平进气，使低压透平进气温度约为 400 °C。超临界 CO₂ 循环的给定参数以及根据相关文献选取的主设备性能参数如表 1 所示^[10-12]。通过调整工质的流量分配，可使超临界 CO₂ 循环达到满足给定参数的热力学平衡状态，获

得热效率计算所需参数的值。循环热力分析采用美国国家标准与技术研究所 (NIST) 发布的 REFPROP 物性数据库。

表 1 超临界 CO₂ 循环参数

Tab. 1 Parameters for supercritical CO₂ cycle

参 数	取值
高压透平入口温度/ °C	600
高压透平入口压力/MPa	30
低压透平入口压力/MPa	15
预冷器出口压力/MPa	6
预冷器出口温度/ °C	20
间冷器出口温度/ °C	20
高压压缩机、低压压缩机等熵效率/%	80
高压透平、低压透平等熵效率/%	90
透平和压缩机机械效率/%	99
发电机效率/%	98.5
回热器及余热锅炉加热器最小温差/ °C	10
余热利用装置出口 CO ₂ 温度/ °C	170
回热器及余热锅炉加热器压损/MPa	0.1
预冷器压损/MPa	0.1
间冷器压损/MPa	0.1
管道压损、散热、漏气及其它可能的损失率/%	0.2
余热发电辅助设备用电率/%	0.5
余热锅炉入口烟气温度/ °C	610
余热锅炉效率/%	90%

超临界 CO₂ 循环的发电效率 (η_{co_2}) 定义为净输出电功率与余热锅炉净输入热量之比, 即:

$$\eta_{\text{co}_2} = \frac{W_i - W_c}{Q_b} \cdot \eta_{\text{gen}} \cdot (1 - \xi_{\text{other}}) \quad (1)$$

式中: W_i 为透平轴功率; W_c 为压缩机轴功率; Q_b 为余热锅炉净输入热功率; η_{gen} 为发电机效率; ξ_{other} 为其他各种损失率。

超临界 CO₂ 循环和余热锅炉组合系统的净发电效率 (η_{bot}) 还要考虑余热锅炉效率和辅助设备用电率, 系统的净发电效率为:

$$\eta_{\text{bot}} = \eta_{\text{co}_2} \cdot \eta_b \cdot (1 - \xi_a) \quad (2)$$

式中: η_b 为余热锅炉效率; ξ_a 为辅助设备用电率。

联合循环的净发电效率 (η_c) 为:

$$\eta_c = \eta_{\text{gt}} \cdot \eta_{\text{Mgt}} \cdot \eta_{\text{Ggt}} + (1 - \eta_{\text{gt}}) \cdot \eta_{\text{bot}} \quad (3)$$

式中: η_{gt} 为燃气轮机热效率; PG9351 (FA) 燃气轮机取 37%^[9,13]; η_{Mgt} 为燃气轮机机械效率, 取 99%; η_{Ggt} 为发电机效率, 取 98.5%。在式(3)中, 燃气轮机辅助设备用电及其他的功率损失忽略不计。

余热利用装置获得高于 170 °C 的热量 (Q_w)。这一品位的热量可驱动溴化锂双效吸收式制冷机, 用于有机工质循环也可获得可观的发电量。本文不展开对制冷和发电效率的分析, 仅用这部分热量占燃气轮机排气热量的比例来表示, 即余热利用率 (η_w):

$$\eta_w = \frac{Q_w}{Q_b} \cdot \eta_b \quad (4)$$

超临界 CO₂ 循环热力平衡状态下各设备进出口工质的温度、压力和流量比例如表 2 所示。超临界 CO₂ 循环效率分析结果如表 3 所示。根据这一结果可进一步估算联合循环的发电效率。以 PG9351 (FA) 型燃气轮机为例, 单机热效率约 37%, 结合三压再热蒸汽循环的燃气-蒸汽联合循环净效率约 54%~56%^[13], 若 PG9351 (FA) 型燃气轮机搭配超临界 CO₂ 循环, 其燃气-超临界 CO₂ 联合循环净发电效率与前者相当。

3 结论

本文提出了一种用于燃气轮机联合循环的嵌套式的简单回热超临界 CO₂ 循环, 并在系统中增加余热利用装置, 对效率进行了分析和研究, 主要结论如下:

表 2 超临界 CO₂ 循环热力平衡状态下各设备进出口参数
Tab. 2 Inlets and outlets parameters of the equipments of supercritical CO₂ cycle at thermodynamic equilibrium state

设备	进口		出口		
	温度/°C	压力/MPa	温度/°C	压力/MPa	流量/%
预冷器	43.7	5.9	20.0	5.8	100
低压压缩机	20.0	5.8	33.9	15.0	100
间冷器	33.9	15.0	20.0	14.9	51
高压压缩机	20.0	14.9	33.4	30.0	51
回热器 I 高压侧	33.4	30.0	112.3	29.9	39
回热器 I 低压侧	142.8	6.0	43.4	5.9	50
回热器 II 高压侧	33.9	15.0	82.3	14.9	41
回热器 II 低压侧	142.8	6.0	43.9	5.9	50
回热器 III 高压侧	86.5	14.9	298.2	14.8	49
回热器 III 低压侧	308.2	6.1	135.2	6.0	78
回热器 IV 高压侧	298.2	14.8	400.5	14.7	49
回热器 IV 低压侧	412.0	6.2	308.2	6.1	51
高压透平	600.0	29.8	412.0	6.2	51
低压透平	400.5	14.7	308.2	6.1	49
加热器 I	33.4	30.0	113.5	29.9	12
加热器 II	33.9	15.0	113.5	14.9	8
加热器 III	112.6	29.9	600.0	29.8	51

表 3 联合循环效率分析结果

Tab. 3 Efficiency analysis results of combined cycle

循环效率参数	计算结果
超临界 CO ₂ 循环发电效率/%	32.1
余热系统净发电效率/%	28.8
余热利用率/%	8.8
联合循环净发电效率/%	54.2

1) 超临界 CO₂ 循环采用深度回热方式提高循环热效率, 使循环吸收余热的温度区间变窄, 燃气轮机排气热量难以全部回收, 较为有利的措施是合理调整用于余热发电和余热利用的热量分配。

2) 采用上述超临界 CO₂ 循环的燃气-超临界 CO₂ 联合循环的发电效率与燃气-蒸汽联合循环相当, 并可额外获得高品位的热量。

3) 嵌套式的简单回热超临界 CO₂ 循环系统结构比较简单, 设备数量较少, 这方面相比蒸汽循环有一定的优越性。

参考文献:

- [1] SUNAO A. Efficient combined cycle power generation system [C]// China Energy Investment Corporation Limited. 2019 In-

- ternational Forum on Clean Power Technology and Engineering & CHN ENERGY International Forum on Clean Energy, Beijing, May 16-17, 2019. Beijing: China Energy Investment Corporation Limited, 2019.
- [2] 郑开云. 超临界二氧化碳循环应用于火力发电的研究现状 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 39-47.
ZHENG K Y. Current status of research on the application of supercritical carbon dioxide power cycle in fossil fired power generation [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 39-47.
- [3] CAO Y, REN J, SANG Y, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a gas turbine and cascade CO₂, combined cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2017(144): 193-204.
- [4] KIM M S, AHN Y, KIM B, et al. Study on the supercritical CO₂ power cycles for landfill gas firing gas turbine bottoming cycle [J]. Energy, 2016(111): 893-909.
- [5] PIERRE H, SEBASTIAN F, MATTHEW L, et al. Performance comparison of supercritical CO₂ versus steam bottoming cycles for gas turbine combined cycle applications [C]//Southwest Research Institute. In: Proceedings of Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, San Antonio, Mar. 28-31, 2016. San Antonio: Southwest Research Institute, 2016: 1-14.
- [6] 郑开云, 黄志强. 基于超临界 CO₂ 循环的地热与太阳能混合系统研究 [J]. 新能源进展, 2018, 6(1): 62-68.
ZHENG K Y, HUANG Z Q. Study on hybrid geothermal-solar energy system with supercritical carbon dioxide cycle [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2018, 6(1): 62-68.
- [7] 郑开云. 集成小型堆和可再生能源的超临界 CO₂ 循环发电系统 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 29-33.
ZHENG K Y. Supercritical CO₂ cycle power system integrated with small modular reactor and renewable energy source [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 29-33.
- [8] 张高强, 付忠广, 王树成, 等. 燃气-蒸汽联合循环进气冷却系统对机组性能影响研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(12): 36-41.
ZHANG G Q, FU Z G, WANG S C, et al. Research on the impacts of gas-steam combined cycle air-inlet cooling system on unit performance [J]. Electric Power, 2018, 51(12): 36-41.
- [9] 王路放. PG9351 (FA) 型燃气轮机简介 [J]. 发电设备, 2004, 18(6): 391-394.
WANG L F. A concise introduction to PG9351 (FA) type gas turbines [J]. Power Equipment, 2004, 18(6): 391-394.
- [10] DOSTAL V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors [D]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [11] WEILAND N, THIMSEN D. A practical look at assumptions and constraints for steady state modeling of sCO₂ Brayton power cycles [C]//Southwest Research Institute. Proceedings of Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, San Antonio, Mar. 28-31, 2016. San Antonio: Southwest Research Institute, 2016: 1-14.
- [12] 郑开云. 超临界二氧化碳布雷顿循环效率分析 [J]. 发电设备, 2017, 31(5): 305-309.
ZHENG K Y. Efficiency analysis of supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. Power Equipment, 2017, 31(5): 305-309.
- [13] 李勤道, 刘志真. 热力发电厂热经济性计算分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LI Q D, LIU Z Z. Thermal economy calculation and analysis of thermal power plant [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

作者简介:



ZHENG K Y

郑开云(通信作者)

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.

(责任编辑 郑文棠)

广 告

- 数据中心综合能源解决方案及“三站合一”模式 封二
- 华润南沙储能辅助调频试运行——混合储能方案是未来趋势 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 封四