

SCO₂ 布雷顿循环发电系统与性能的综合分析比较

姚佳成¹, 赵兵涛¹, 杨其国¹, 袁书生²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 合肥市太泽透平技术有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 基于布雷顿循环的原理与特点, 对典型循环结构的动力部件与换热部件布局的效率 and 功率性能进行了比较, 分析了运行参数对循环效率的影响规律, 同时进一步阐述了关键循环动力部件(叶轮机械包括压缩机与透平)与换热部件(热交换器)的综合技术性能及部件选择的差异性。研究表明: 实验中循环操作参数取最低温度为 32 ℃、最高温度为 342 ℃、压比为 1.65 时, 循环效率可达 31.5%; 最低循环温度下降和最高循环温度升高有利于改善循环效率, 并且对于复杂循环一般存在最佳压比; 根据循环输出功率大小, 叶轮机械一般采用径流(<10 MW 时)或轴流结构(≥10 MW 时); 与常规换热器相比, 印刷电路板式换热器具有更为紧凑的结构和高效的换热性能。

关键词: 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 性能参数; 循环布局; 影响因素; 关键部件

中图分类号: TK474.8⁺11

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.021

[引用本文格式] 姚佳成, 赵兵涛, 杨其国, 等. SCO₂ 布雷顿循环发电系统与性能的综合分析比较[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 162-170. YAO Jia-cheng, ZHAO Bing-tao, YANG Qi-guo, et al. Comprehensive analysis and comparison of supercritical carbon dioxide brayton cycle power generation system and performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 162-170.

Comprehensive Analysis and Comparison of Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle Power Generation System and Performance

YAO Jia-cheng¹, ZHAO Bing-tao¹, YANG Qi-guo¹, YUAN Shu-sheng²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Hefei TurboTides Turbine Technology Co. Ltd., Hefei, China, Post Code: 230000)

Abstract: According to the principle and characteristics of Brayton cycle, the efficiency and power performance of the layout of power components and heat exchange componerots are compared, and the influence of operating parameters on cycle efficiency is analyzed. Also, the comprehensive technical performance and differences of key cyclic power components (impeller machinery including compressor and turbine) and heat exchange components (heat exchanger) are further explained. It was found that the cycle efficiency in the experiment can reach 31.5% when the minimum temperature is 32 ℃, the maximum temperature is 342 ℃, and the pressure ratio is 1.65. The decrease of the minimum cycle temperature and the increase of the maximum cycle temperature are conducive to improving cycle efficiency, and there is generally an optimal pressure ratio for complex cycles. According to the cycle output power, the impeller machinery generally adopts the radial flow (<10 MW) or axial flow structure (≥10 MW) and compared with the conventional heat exchanger, printed circuit board heat exchangers have a more compact structure and efficient heat exchange performance.

Key words: supercritical carbon dioxide, Brayton cycle, performance parameters, cycle layout, influence factor, key component

引 言

CO₂的临界点(7.38 MPa,31 ℃)比较适中,物性稳定。基于超临界二氧化碳(SCO₂)的布雷顿循环是新型热力发电循环方式,与氮、氦等其他惰性气体相比,具有能量密度大、传热快、高参数、高效率、结构紧凑及安全性高等特点^[1-2]。除此之外,SCO₂布雷顿循环成本较低,成本仅为蒸汽间接循环的三分之一^[3]。SCO₂布雷顿循环过程为闭式循环,做功工质 CO₂不受热源形式的影响,因而可应用于核能、聚光太阳能、化石燃料发电、舰船的动力系统以及废热回收^[4-6]等多种热源场景。

当前针对 SCO₂布雷顿循环系统的主要研究方向有:循环布置方式,运行参数优化和热力学分析,部件的设计制造方法、数值分析及实验研究,设备中金属腐蚀问题对循环运行稳定性的影响。

本文将近年来国内外关于 SCO₂布雷顿循环系统的运行原理研究成果与现有试验工况参数相结合,着重分析了循环中布局方式、操作参数、关键部件的性能以及金属腐蚀行为对循环性能的定量影响,并将分析结果进行了比较。最后,对该领域未来研究提出展望,以期对 SCO₂布雷顿循环系统与关键部件的研发提供研究思路和参考。

1 布雷顿循环系统介绍

1.1 循环运行原理

SCO₂布雷顿循环,其典型布置方式及循环温熵曲线如图 1 所示。工质 CO₂进入压缩机后绝热压缩(过程 1-2),增压后在回热器回热(过程 2-3),回热后在加热器中等压加热(过程 3-4),然后进入透平绝热膨胀做功进行发电(过程 4-5),之后进入回热器回热(5-6),最后进入预冷器等压冷却到循环初始状态点(6-1),再次进入压缩机完成闭式循环。

1.2 SCO₂循环的特点

研究发现^[7],SCO₂布雷顿循环在当循环最高温度(即透平入口处温度)处于 450~650 ℃ 范围内时,循环效率处于较高的水准,效率随着温度的升高而升高。图 2 给出不同工质的布雷顿循环与蒸汽朗肯循环热效率对比以及不同动力循环系统相对于最高循环温度范围的热效率^[8]。SCO₂布雷顿循环是结合了蒸汽朗肯循环和燃气轮机系统优点的动力转

换系统,将流体在原本不可压缩的区域进行压缩以改善循环效率。SCO₂布雷顿循环可以利用更高的透平入口温度,同时避免了材料的变形问题。并且 CO₂临界温度和压力仅为 7.38 MPa 和 31 ℃,更易于达到临界点。当 SCO₂温度达到 550 ℃后,该发电系统的热效率开始高于其他循环系统(见图 2),可达到 45%。

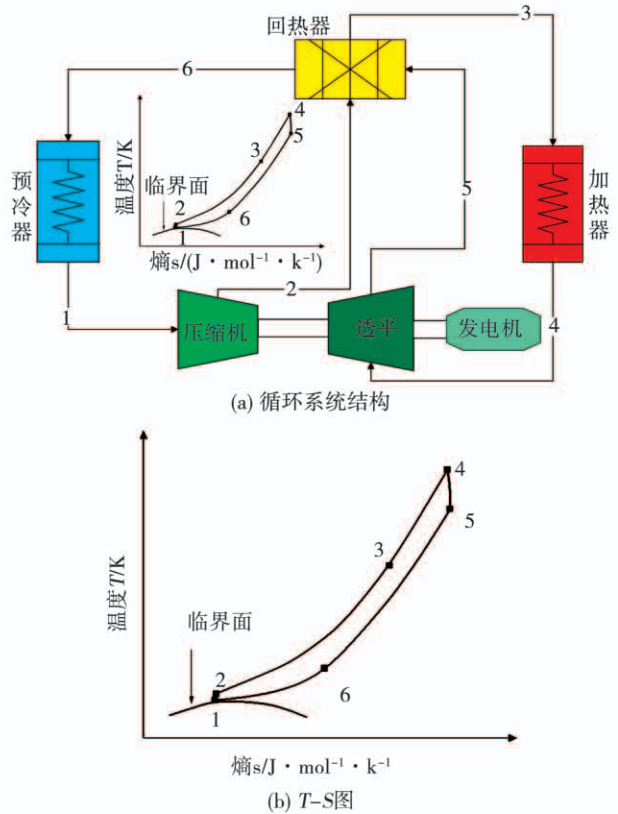


图 1 SCO₂简单回热布雷顿循环系统结构及温熵图
Fig. 1 SCO₂ Brayton simple recuperation cycle structure and temperature-entropy diagram

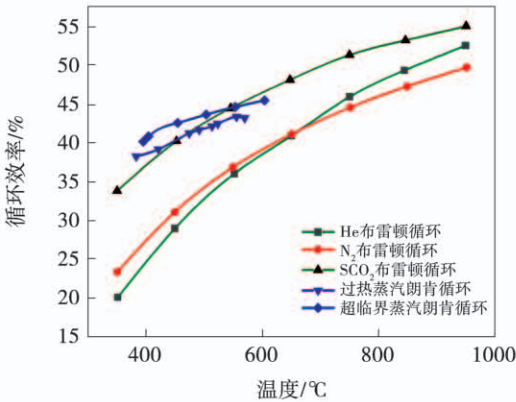


图 2 不同工质与不同循环效率对比引用
Fig. 2 Comparison of different working fluids and different cycle efficiency

1.3 布雷顿循环系统的操作参数与性能

研究如表 1 所示,主要包括:循环布置方式、运行参数以及循环中关键部件。

目前,关于布雷顿循环系统的操作参数与性能

表 1 SCO₂布雷顿循环系统实验研究主要参数

Tab. 1 The main parameters of the experimental studyfor SCO₂ Brayton cycle system

研究机构	布置方式	运行参数							性能参数	文献
		MCIP	MCIT	TIP	TIT	MFR	TRS	PR		
美国 Sandia 国家实验室	再压缩	7.68	32	13.84	342	2.7	—	1.65	热功率 0.78 MW;发电功率 0.24 MW;循环效率 31.5%;透平效率 86 ~ 87%,压缩机效率 66 ~ 67%	[9,10]
美国西南研究所	简单回热	—	—	25	700	—	—	1.65	功率 1 MW;	[11]
美国 Echogen	简单回热	—	—	—	275	—	30,000	—	发电功率 7 MW	[12]
Bechtel 公司及 Knolls&Bettis 实验室	简单回热	—	36	13.5	299	—	60,000	—	热功率 0.83 MW;发电功率 0.1 MW,循环效率 14.7%;透平效率 79.8%	[13]
东京工业大学	简单回热	—	—	—	277	1.4	69,000	1.4	发电功率 11.9 kW;透平效率 69%;热功率 0.16 MW;循环效率 7%	[14]
韩国技术研究院 KAIST	简单回热	—	—	20	500	—	83,000	—	热功率 1.3 MW;发电功率 0.3 MW;循环效率 19.6%;透平效率 85 %	[15]
韩国原子能研究所 KAERI	再压缩	7.78	33.2	20	500	—	—	—	发电容量 300 kW	[16]
华能热工院	分流再热	—	—	20	600	83.3	—	1.65	净功率 5 MW	[17]

注:MCIP 为主压缩机入口压力,MCIT 为压缩机入口温度,TIP 为透平入口压力,TIT 为透平入口温度,MFR 为质量流量,TRS 为透平转速,PR 为压比。

2 循环系统的布局改进与性能比较

布雷顿循环可按照部件组成和布置方式进行分类。其中中间冷却循环效率最高,其次是部分冷却循环,之后是再压缩循环^[18]。图 3 为各循环布置方式之间关系及改进过程。表 2 列出了各循环布置方式及性能参数及其比较。

最初的布雷顿循环由于大量能量作为废热被排放到环境中,因此效率低下。为避免该缺点,在原有基础上添加了回热器回收废热以提升循环效率,即简单回热循环。但该循环仅有一个换热器及压缩机,高低压侧流体热容量差距较大,会导致换热部分传热恶化产生夹点问题。

换热器换热量由质量流量、比定压热容以及进出口温差这 3 个因素决定。因此,可以通过增设分流装置、再压缩机和混合器等部件,减小一侧流量,从而降低冷热流体热容量差值,以消除换热器的夹点问题,提高循环效率。

预压缩布局是减小夹点问题影响、提高效率的另一种方法^[19]。其思路是将回热器分为高温回热

器和低温回热器,并在两回热器之间增加一个预压缩机通过增加低压部分工质的压力来增加比热容,以减小高低压侧流体间热容差。

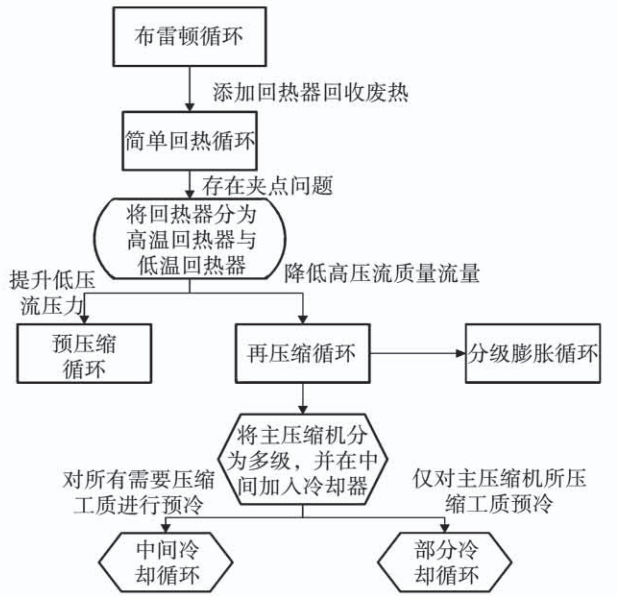


图 3 循环布置改进方式流程图^[18]

Fig. 3 Flowchart of cycle layout^[18]

表 2 典型 SCO₂布雷顿循环优缺点

Tab.2 The advantages and disadvantages of typical SCO₂ Brayton cycle system

循环名称	循环结构布置说明	性能参数 ^[18]		优点	缺点
		温度/℃	效率/%		
简单回热循环	工质先进入压缩机进行增压,而后进入回热器换热升温,再进入加热器加热后推动透平膨胀做功,之后工质进入回热器降温,最后进入预冷器冷却至初始温度,流入压缩机形成闭式循环	500	26.43	系统构型简单、设备少	循环效率低,存在夹点问题
		600	27.96		
		700	28.15		
		800	27.58		
预压缩循环	在简单回热基础上将回热器分为高低温两个,并在两回热器间设置预压缩机	500	27.29	热效率高,对回热器无“夹点”问题,对涡轮排气压力无要求,布局灵活	所有工质都需要经过冷却器,因而设备尺寸和负荷更大,设备设计较为复杂
		600	28.71		
		700	29.01		
		800	28.41		
再压缩循环	在简单回热循环基础上将回热器分为两个,并增加再压缩机,一部分回热器出口工质分流进入再压缩机	500	27.89	热效率高,对回热器冷侧流体分流以消除“夹点”问题	输出净功率低
		600	29.69		
		700	29.85		
		800	29.20		
再压缩分流循环	再压缩循环基础上,将透平分为高低压两个,加热器出口工质分别进入两个透平膨胀做功	500	27.62	降低透平热负荷,避免了材料约束,热效率高,系统结构紧凑	增加透平和分流器等设备,成本上升
		600	29.64		
		700	29.80		
		800	29.13		
中间冷却循环	在再压缩循环基础上,将主压缩机分为两个,低温回热器出口工质分流,一部分依次经过预冷器、主压缩机 1、主压缩机 2、低温回热器	500	29.61	换热器损失低,循环布局更加灵活	冷负荷增加,对换热器要求较高
		600	31.09		
		700	31.20		
		800	30.31		
部分冷却循环	与中间冷却布局类似,不同之处是低温回热器出口工质先进入预冷器和预压缩机后再分流	500	28.20	热效率高,可应用于跨临界	冷负荷较高,对换热器要求较高
		600	29.48		
		700	29.70		
		800	28.97		

中间冷却循环的布置方式是将 1 台主压缩机分成 2 台,并在两级压缩机之间引入了中间冷却器,通过减少压缩机的压缩功以提高效率。

预压缩和中间冷却两种布置方式都能够将主压缩机入口压力与透平出口压力相分离,使循环的布置优化、运行更灵活。

部分冷却循环是指有预冷的再压缩循环,这是将中间冷却引入再压缩循环的另一种方式。该循环将主压缩机分为 2 台,并在中间增加了中间冷却器。此布局与中间冷却循环非常相似,不同之处在于部分冷却循环对所有工质进行预冷与预压缩后进行分流,并可用于跨临界循环,同时部分冷却循环存在最优循环压比,使循环效率最大^[18]。

当工质流量过大时,对透平设计要求较高,此时

会削弱循环系统紧凑性。因而采用透平分流循环,在再压缩循环的基础上增加透平和分流器等部件,工质在加热器加热后进入透平和分流器进行分流,而后经过混合进入回热器完成整个循环的工作流程。该布置方式还可以降低循环中透平热负荷,存在材料约束的情况下较为有效。

3 操作参数对性能的影响

3.1 循环最低温度

对于简单布雷顿循环,循环的最低温度出现在主压缩机之前的预冷器出口,即压缩机入口温度,从图 4 中可以看出,当循环最低温度升高时,循环效率在不断下降,表明循环最低温度在影响循环效率方面起重要作用。这是因为循环最低温度升高,压气

机耗功增加,因而循环效率处于不断下降的趋势。

3.2 循环最高温度

透平入口温度即为循环最高温度,由图 4 可知,系统效率随着循环最高温度的增加而不断增加。这主要是因为散热损失减小,循环输出净功率增大。在相同的条件下对比,随着透平入口温度的增加,循环效率逐渐提高,同时透平做功能力也在增大,在输入热量不变的条件下,循环中压缩机耗功降低,因而循环输出净功率增大,循环效率在逐渐上升。

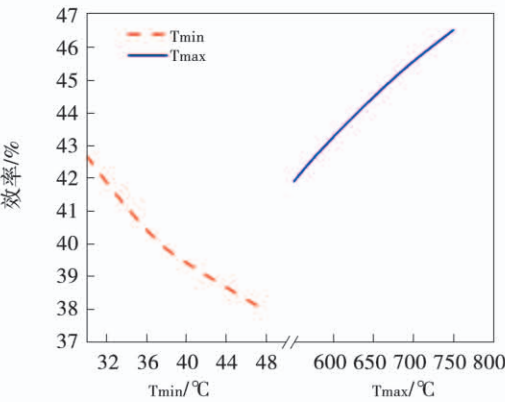


图 4 循环最低、最高温度对效率的影响
Fig.4 The influence of minimum and maximum temperature of cycle on efficiency

3.3 循环压比

Dostal 等人^[20]基于 SCO_2 布雷顿循环特性,研究压比对循环效率的影响,研究表明存在最佳循环压比可使循环获得最优效率。

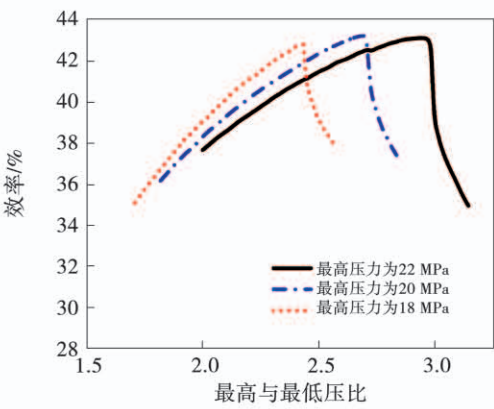


图 5 循环压比对效率的影响^[20]
Fig.5 The influence of cycle pressure ratio on efficiency^[20]

同时,在最低压力处于临界点附近时取得最高循环效率,当最高压力超过最佳压比对应最高压力时,循环效率随最高压力的升高而降低。

4 循环关键部件的性能

4.1 叶轮机机械

SCO_2 布雷顿循环系统中工质的最低压力(7.38 MPa),高于任何现有的蒸汽朗肯循环($<10\text{ kPa}$)或其他气体布雷顿循环的最低压力($<100\text{ kPa}$),因此循环所需压缩功更小。

目前,关于 SCO_2 布雷顿循环系统压缩机的设计研究发现,压缩机内的压力是普通涡轮机的 80 倍左右,因此其叶轮机机械大小远小于蒸汽朗肯循环的叶轮机机械。对于相同功率级别的循环系统,采用 SCO_2 为工质的叶轮机机械尺寸要紧凑得多。一般输出功率小于 1 MW 的离心式压缩机叶轮直径小于 100 mm。某台 10 kW 规模等级布雷顿循环中叶轮仅为 35 mm^[21](图 6),总占用空间仅为蒸汽朗肯循环的 5%~10%^[22]。

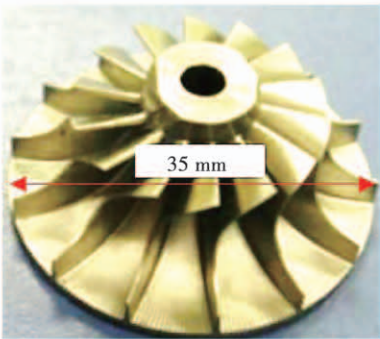


图 6 SCO_2 布雷顿循环压缩机实物图^[21]
Fig.6 Physical diagram of SCO_2 Brayton cycle compressor^[21]

常用离心式压缩机和透平参数及实验结果主要参数如表 3 与表 4 所示^[21,23-29]。当 SCO_2 布雷顿循环输出功率小于 10 MW 时,叶轮机机械建议采用单级径流式结构;当输出功率大于 10 MW 时,叶轮机机械建议采用多级径流式或者多级轴流式结构^[28]。 SCO_2 压缩机在临界点附近工作,压缩性小,能够有效降低压缩功耗,可使系统获得较高的效率。然而临界点附近 CO_2 物性变化剧烈,压缩机的稳定性和性能都在降低。在临界点附近压缩机的结构设计受

温度、压力变化影响十分明显,理想气体的典型关系式不再适用,因而对压缩机设计提出较高要求。

表 5^[21]为基于不同参数的叶轮机械设计改进策略。

表 3 SCO₂布雷顿循环压缩机参数

Tab.3 SCO₂ Brayton cycle compressor parameters

研究机构	入口压	入口温	流量/	转速/(r·min ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	叶轮尺	效率/%	效率/%
	力/MPa	度/℃	(kg·s ⁻¹)	设计值	实测值	寸/mm	设计值	实测值
美国 Sandia	7.69	31.85	3.5	75,000	64,000	37.3	68	66
美国 Bechtel	9.2	35.85	5.35	75,000	60,000	57.2	60	—
韩国 KAIST	7.78	33.05	6.4	70,000	30,000	—	65	—
韩国 KAERI	7.70	35	1.69	—	—	—	65	51
日本 TIT	8.23	34.85	1.2	100,000	70,000	35	—	48
中国华能热工院	7.9	35	85	8,500	—	65	72	—

表 4 SCO₂布雷顿循环透平参数

Tab.4 SCO₂ Brayton cycle turbine parameters

研究机构	入口压力/MPa	入口温度/℃	流量/(kg·s ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	叶轮尺寸/mm	功率/kW	设计效率/%
美国 Sandia	13.50	537	3.15	75,000	68.3	92.0	87
美国 Bechtel	16.45	300	5.35	37,600	—	217.1	80
韩国 KAIST	12.50	435	5.05	80,000	48.6	82.4	84
韩国 KAERI	13.5	200	1.56	45,000	—	25	51
日本 TIT	11.90	277	1.20	100,000	35.0	10(发电量)	75
中国华能热工院	20	600	80.60	9,000	14.6	3,020	77

表 5 透平选择标准图

Tab.5 Diagram of selection criteria for turbines

功率	轴配置	轴速/ (r·min ⁻¹)	尺寸/ cm	形式	级数
0.3	双/多轴	75,000	5	单级	径流
1.0	双/多轴	75,000	5	单级	径流
3.0	双/多轴	30,000	14	单级	径流
10	双/多轴	30,000	14	单/多级	轴/径流
30	单轴	10,000	40	单/多级	轴/径流
100	单轴	10,000	40	多级	轴流
300	单轴	3,600	14	多级	轴流

在 SCO₂布雷顿循环系统中,叶轮机械的压力都较大(>7.5 MPa),同时工作转速也很高(>30 000 r/min⁻¹),这将导致较大的摩擦损失、鼓风损失及泄漏损失。因而选择合理的密封结构与材料对 SCO₂布雷顿循环系统中叶轮机械的研发至关重要。

4.2 换热器

SCO₂布雷顿循环系统的换热器包含高、低温回热器、冷却器及中间换热器等。换热器成本占循环系统成本的 50% 以上^[30]。由于循环运行于超临界区,工质的温度和压力水平较高,一般采用印刷电路板式换热器(PCHE)作为高效换热设备。其具有以下优点:换热器传热系数高,热效率可达 98%;比表面积大,可达 2 500 m²/m³;结构紧凑,相同热负荷下体积仅为管壳式换热器的 1/4 ~ 1/6;可承受 900 ℃ 的高温 and 60 MPa 的高压;形式多样,可分为直通道、之字形和 S 型等类型;可与其他部件灵活匹配,降低压力损失。

关于 PCHE 的理论研究主要集中在换热的性能分析和高效优化设计中。常用的 PCHE 换热器性能与结构如表 6 所示。Kruizenga 等人^[31]实验研究 PCHE 在冷却条件下的换热和压降特性,发现沿程摩擦系数对压降的影响占总压降的 80%,而在拟临

界点附近由热加速效应造成的压降占总压降的 10%。直通道 PCHE 中,压降随着进口压力升高而减小,而换热器平均传热系数却是增加的。当进口压力相同时,总压降会随着温度的增加而增加,而传热系数却不断减小^[32]。

以减小冷通道摩擦因子加大换热效率为目的进行多目标遗传算法优化发现,当效率升高 1.48% 时压降也升高 30.7% 当效率降低 21.1% 时压降降低

90.9%^[33]。之字形通道的阻力系数大于直通道的阻力系数;当两侧流体入口温度不变时,传热效率和热侧通道阻力系数随着两侧质量流量的增加而减小;当两侧流量及冷侧入口温度不变时,传热效率及阻力系数随热侧入口温度的增大而增大。当之字形 PCHE 换热器拐角为 15° 时,换热器的效率、紧凑性以及压降的综合指标最优。同时,之字形的压降系数是 S 形的 4~5 倍^[34]。

表 6 换热器结构及参数
Tab. 6 Heat exchanger structure and parameters

研究机构	压力/MPa	温度/℃	流量/kg·s ⁻¹	等级规模	结构	参考文献
美国 Sandia 实验室	20	180	0.33	17.5 kW	1 个水冷却回路,1 个 CO ₂ 回路	[9]
东京工业大学	13	300	0.02	3 kW	单 CO ₂ 换热回路	[29]
韩国 KAIST	10	50	2.8	17.2 kW	1 个水冷却回路, 1 个 CO ₂ 回路	[16]
中国华能热工院	15	100	0.33	3 kW	1 个水冷却回路, 1 个 CO ₂ 回路	[17]
中国科学院工程热物理研究所	31	600	0.60	200 kW	2 个水冷却回路(其中 1 个为两分支),2 个 CO ₂ 回路	[35]

5 工质 CO₂对循环中金属材料的影响

在布雷顿动力循环系统中,设备材料通常处于高温(>400℃)、高压(>10MPa)的超临界 CO₂ 环境中,承受高温氧化和较高的机械力,还面临渗碳、硫化等叠加腐蚀问题。对于关键部件来说,合金的腐蚀行为是决定系统安全和寿命的重要因素^[36]。

奥氏体钢具有良好的抗腐蚀和力学性能^[37],马氏体钢蠕变抗力高、辐射抗力高、导热系数高且膨胀系数低^[38];这两种材料都是布雷顿循环中设备的候选材料。在高温高压的 SCO₂ 环境中,含有铬、镍和铝等元素的合金会生成较稳定的氧化膜,从而产生优异的抗腐蚀性能。奥氏体和马氏体由于其不同组织状态会对氧化膜产生影响^[39]。因为铬在马氏体中的扩散系数大,因而可以形成富铬保护层而减缓腐蚀;而奥氏体因其热膨胀系数大,且材料基层和氧化膜表面存在较大生长应力,使得氧化膜容易脱落,从而加剧腐蚀。

温度会对循环中金属材料的腐蚀产生较大影响。在 400~600℃ 和 10~20MPa 运行参数下对 12Cr 钢和纯度为 99.995% 的 316 不锈钢进行研究发现,工质温度越高腐蚀速率越快,而压力的影响并

不显著^[40]。
布雷顿循环系统中最有可能出现的掺杂气体便是水蒸气^[41]。由于工质 CO₂ 粘度低、压力扩散性高的特点,因而一旦水蒸气在温度低的部件液化形成液态水时便会溶解大量 CO₂,降低水的 pH 值,对钢铁材料的腐蚀十分严重。
当前有关 CO₂ 超临界状态下对金属的腐蚀研究基本都源于实验室测试,数据获取时间远小于实际工业电厂运行时长,并且循环系统中的腐蚀是十分多样的,既有 CO₂ 自身的腐蚀,也有与掺杂气体的交互腐蚀。对腐蚀机理、协同腐蚀效应以及抗腐蚀技术方法,需要进一步研究。

6 结 论

- (1) 在各个布雷顿循环布局结构中,中间冷却循环效率相对较高。
- (2) 循环效率随着循环最高温度升高而不断升高,但随着循环最低温度升高而降低。并且最低温度越靠近临界点循环效率越高。循环压比存在一个最优值,循环效率随最高压力升高而升高,并且当最低压力处于临界点附近时效率最高。
- (3) 循环中叶轮机械的级数、发电机形式和轴

承密封等的选择标准受发电功率影响。循环输出功率小于 10 MW 时叶轮机采用单级径流式结构,大于 10 MW 时采用多级径流式或者多级轴流式结构可获得较高效率。

(4) 采用 PCHE 换热器,可降低循环系统成本,提高系统紧凑性和循环效率。一般而言,之字形 PCHE 换热器拐角为 15°时,换热器的效率、紧凑性以及压降的综合指标最优。

(5) 奥氏体钢和马氏体钢是系统设备制造的关键材料,温度对金属材料的腐蚀有显著影响,温度越高腐蚀速率越快,循环工质中掺杂水分会加剧金属材料的腐蚀。

参考文献:

- [1] ANTON M, JAMES J, SIENICKI. Investigation of alternative layouts for the supercritical carbon dioxide Brayton cycle for a sodium-cooled fast reactor[J]. Nuclear engineering and design, 2009, 239(7): 1180 – 1185.
- [2] YOONHAN AHN, JEONG IK LEE. Study of various Brayton cycle designs for small modular sodium-cooled fast reactor[J]. Nuclear engineering and design, 2014, 276(9): 128 – 141.
- [3] HEJZLAR P, DOSTAL V, DRISCOLL M J, et al. Assessment of gas cooled fast reactor with indirect supercritical CO₂ cycle[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2006, 38(2): 109 – 118.
- [4] L. CACHON, CH. BISCARRAT, F. MORIN, et al. Innovative power conversion system for the French SFR prototype, ASTRID[C]. // International congress on advances in nuclear power plants. American Nuclear Society, 2012; 538 – 552.
- [5] YOONHAN A, JEONG L, YACINE A, et al. Potential advantages of coupling supercritical CO₂ Brayton cycle to water cooled small and medium size reactor[J]. Nuclear engineering and design, 2012, 245(4): 223 – 232.
- [6] JEKYOUNG LEE, JEONG IK LEE, HO JOON YOON, et al. Supercritical Carbon Dioxide turbomachinery design for water-cooled Small Modular Reactor application[J]. Nuclear engineering and design, 2014, 270(4): 76 – 89.
- [7] BEJAN A, LORENTE S, YILBAS B S, et al. The effect of size on efficiency: Power plants and vascular designs[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2011, 54(7 – 8): 1475 – 1481.
- [8] 付 静. 超临界二氧化碳布雷顿循环热力系统优化研究[D]. 华北电力大学, 2019.
- FU Jing. Optimization and Research of a Closed Brayton Cycle Using Supercritical Carbon Dioxide[D]. North China Electric Power University, 2019.
- [9] PASCH J, CONBOY TM, FLEMING DD, ROCHAU G. Supercritical CO₂ recompression Brayton cycle: completed assembly description[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2012, 2012 – 9546.
- [10] T. CONBOY, J. PASCH, D. FLEING. Control of a supercritical CO₂ recompression Brayton cycle demonstration loop [C]// ASME Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013; V008T34A00.
- [11] JEFF M, KLAUS B, NEAL E. Development of 1 MWe supercritical CO₂ test loop [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition June 15 – 19, Montréal; 2015.
- [12] TIMOTHY J H. Initial test results of a megawatt-class supercritical CO₂ heat engine [C]// The 4th International symposium supercritical CO₂ power cycles. Pennsylvania: Southwest research institute, 2014.
- [13] ERIC M, Clementoni, Timothy I. COX, Christopher P. Sprague. Startup and operation of a supercritical carbon dioxide Brayton cycle [C]// ASME Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013; V008T34A00.
- [14] UTAMURA M, HASUIKE H, OGAWA K, et al. Demonstration of supercritical CO₂ closed regenerative Brayton cycle in a bench scale experiment [C]// ASME Turbo Expo. ASME, 2012; 155 – 164.
- [15] CHA JAE EUN, BAE SEONG WON, LEE JEKYOUNG, et al. Operation results of a closed supercritical CO₂ simple brayton cycle [C]// In: The 5th international symposium-Supercritical CO₂ power cycles, March 28 – 31; 2016. San Antonio, Texas.
- [16] CHO JUNHYUN, SHIN HYUNGKI, CHO JONGJAE, et al. Preliminary power generating operation of the supercritical carbon dioxide power cycle experimental test loop with a turbo-generator [C]// In: The 6th international symposium-supercritical CO₂ power cycles, March 27 – 29; 2018. Pittsburgh, Pennsylvania.
- [17] LI Hong-zhi, ZHANG Yi-fan, YAO Ming-yu, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop[J]. Energy, 2019, 174(May 1): 792 – 804.
- [18] WANG Kun, HE Ya-ling, ZHU Han-hui. Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: A review and a comprehensive comparison of different cycle layouts[J]. Applied Energy, 2017, 195(1): 819 – 836.
- [19] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production. [J] EngPower 1968, 90(3): 287 – 295.
- [20] DOSTAL V, DRISCOLL M J, HEJZLAR P, et al. A Supercritical CO₂ Gas Turbine Power Cycle for Next-Generation Nuclear Reactors [C]// 10th International Conference on Nuclear Engineer-

- ing. American Society of Mechanical Engineers, 2002; 567 – 574.
- [21] 吕国川. 超临界二氧化碳向心涡轮优化设计及分析[D]. 大连理工大学, 2020.
- LYU Guo-chuan. Optimized Design and Analysis of Supercritical Carbon Dioxide Radial Inflow Turbine[D]. Dalian University of Technology, 2020.
- [22] FLEMING D D, HOLSCHUH T V, CONBOY T M, et al. Scaling considerations for a multi-megawatt class supercritical CO₂ Brayton cycle and commercialization. [J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2013.
- [23] CHO J, CHOI M, BAIK Y J, et al. Development of the turbomachinery for the supercritical carbon dioxide power cycle[J]. International Journal of Energy Research, 2016, 40(5): 587 – 599.
- [24] CRESPI F, GAVAGNIN G, SANCHEZ D, et al. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: A review[J]. Applied Energy, 2017, 195: 152 – 183.
- [25] UTAMURA M, HASUIKE H, Y AMAMOTO. Demonstration test plant of closed cycle gas turbine with supercritical CO₂ as working fluid[J]. Strojarsstvo, 2010, 52(4): 459 – 465.
- [26] UTAMURA M, FUKUDA T, ARITOMI M. Aerodynamic characteristics of a centrifugal compressor working in supercritical carbon dioxide[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1149 – 1155.
- [27] 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 Yong-hui, W ANG Yu-qi, 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.
- [28] GRANT M, AARON M R, JASON C W. Fundamentals of supercritical CO₂ [R]. Dusseldorf: Technical report, 2014.
- [29] KONSTANTIN N, YASUYOSHI K, LAM N. Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO₂ experimental loop[J]. International Journal of Refrigeration, 2006(29): 807 – 814.
- [30] 王绩德, 冯 岩, 韩东江. 超临界二氧化碳动力循环在钠冷快堆中的应用综述[J]. 核科学与工程, 2019, 39(2): 119 – 127.
- WANG Ji-de, FENG Yan, HAN Dong-jiang. Review on Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle Application in Sodium Cooled Fast Reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, 39(2): 119 – 127.
- [31] Kruienza A, Anderson M, Fatima R, Corradini M, Towne A, Ranjan D, et al. Heat Transfer of supercritical carbon dioxide in printed circuit heat exchanger geometries[C]//New York: Amer Soc Mechanical Engineers, 2010.
- [32] ZHAO Z C, ZHANG X, ZHAO K, et al. Numerical investigation on heat transfer and flow characteristics of supercritical nitrogen in a straight channel of printed circuit heat exchanger. Applied Thermal Energy, 2017, 126: 717 – 729.
- [33] LEE S M, KIM K Y. Optimization of zigzag flow channels of a printed circuit heat exchanger for nuclear power plant application [J]. Nuclear Science Technology. 2012; 49(3): 343 – 351.
- [34] Bartel N, Chen M, Utgikar VP, Sun X, Kim IH, Christensen R, et al. Comparative analysis of compact heat exchangers for application as the intermediate heat exchanger for advanced nuclear reactors. Annals of Nuclear Energy. 2015, 81: 143 – 149.
- [35] 张虎忠. 超临界 CO₂ 印刷电路板换热器性能研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2020.
- ZHANG Hu-zhong. Study on the thermal-hydraulic performance of printed circuit heat exchanger with supercritical carbon dioxide [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermo-physics Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [36] THODLA R, AYELLO F, SRIDHAR N. Materials performance in supercritical CO₂ environments[C]//CORROSION 2009. Atlanta, Georgia: NACE, 2009.
- [37] KIM Y J, JANG Ho, OH Y J. High temperature low cycle fatigue properties of a HF30-type cast austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 526(1 – 2): 244 – 249.
- [38] GUZONAS D, NOVOTNY R, PENTTILÄ S, et al. Materials and water chemistry for supercritical water-cooled reactors [M]. Duxford: Woodhead Publishing, 2017.
- [39] CHEN Hongsheng, KIM S H, KIM C, et al. Corrosion behaviors of four stainless steels with similar chromium content in supercritical carbon dioxide environment at 650 °C [J]. Corrosion Science, 2019, 156(1): 16 – 31.
- [40] FURUKAWA T, INAGAKI Y, ARITOMI M. Corrosion behavior of FBR structural materials in high temperature supercritical CO₂ [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering. Brussels, Belgium: ASME, 2009: 307 – 312.
- [41] SEIERSTEN M, KONGSHAUG K O. Materials selection for capture, compression, transport and injection of CO₂ [M]//Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, Volume 2. London: Elsevier, 2005: 937 – 953.

(金圣迪 编辑)