

新型超临界 CO₂ 布雷顿循环发电系统性能分析

王 硕 李俊辉* 高 佼 侯瑞红 曲 优

青岛工学院机电工程学院 青岛 266300

摘 要: 本文提出了一种基于超临界二氧化碳布雷顿循环和有机朗肯循环耦合的新型太阳能热发电系统, 该系统利用有机朗肯循环对布雷顿循环的高温余热进行利用, 实现了能量的梯级利用。将高温熔融盐集热和相变蓄热相结合, 保证了发电的持续性和稳定性。对系统进行了热力学分析, 结果表明, 当 R141b 作为有机朗肯循环工质, 在 196℃ 蒸发时, 该系统的热发电效率最大为 42.78%, 循环效率可达 46.89%, 比大多数耦合循环的效率要高, 对实现太阳能的高效利用有着积极意义。

关键词: 太阳能发电; 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 有机朗肯循环

1 引言

随着世界经济的快速发展, 能源与环境问题也日益突出。为了践行国家“双碳”目标, 加强可再生能源开发利用, 减少温室气体排放, 太阳能热发电成为可再生能源领域的重要技术方向。超临界二氧化碳 (Supercritical CO₂, 以下简称 SCO₂) 布雷顿循环在高温热源的利用中展现出显著优势, 并在热能转化领域展现出巨大潜力, 可广泛应用于多种热能回收场景, 具有循环效率高、能源转换效能好、环境友好性强等优点。同时, 二氧化碳化学性质稳定、无毒、不可燃、环境友好性强, 符合可持续发展的能源战略需求。

张博源提出了一种超临界 CO₂ 再热再压缩布雷顿循环系统, 建立了系统热力学性能计算模型, 热力计算结果表明, 循环热效率可达到 41.16%, 循环净功率可达 1575 kW^[1]。张学镭设计了一种基于超临界 CO₂ 布雷顿循环的太阳能发电储能一体化系统, 通过数学模型发现, 系统夏至日和冬至日均发电效率分别提高了 1.8% 和 1.7%^[2]。李子扬对再压缩超临界 CO₂ 布雷顿循环进行性能分析及多目标优化, 建立了系统的热力学模型并进行优化, 优化后的系统循环热效率和比功分别提高了 5.1% 和 27.6%^[3]。

超临界二氧化碳布雷顿循环在应用过程中存在余热损失过大的问题, 而有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, 以下简称 ORC) 通过低沸点有机工质 (如 R245fa、戊烷) 可以高效利用余热发电, 在 100 - 300℃ 的中低温热源的利用中有着独特的优势。

张玮文基于 ORC 余热利用, 设计了一种双发路灯系统, 通过模拟计算表明整体发电效率可达 46.68%, 功率平均可

达 400W^[4]。黄靖将 LNG 冷能利用工艺与 ORC 相结合, 建立了优化模型, 系统热效率从 17.66% 上升至 35.60%^[5]。史科锐构建了一个耦合太阳能蓄热和 ORC 的储能系统, 并建立了热力学模型, 结果发现系统能量利用效率达 28.88%, 炯效率为 38.97%^[6]。

通过 SCO₂ 布雷顿循环与其他热力循环进行耦合可以提高能量利用率, 实现能量的梯级利用。宋显希设计了一种 SCO₂ 布雷顿循环耦合 ORC 的系统, 利用太阳能塔回收太阳能, 分析对比了简单布雷顿循环、再压缩布雷顿循环、再热再压缩布雷顿循环和预压缩布雷顿循环等四种结构与 ORC 的耦合, 系统优化结果表明, 当膨胀机进口温度高于 640℃ 时, 再压布雷顿的耦合循环系统效率最高^[7]。伍振东基于 SCO₂ 布雷顿循环设计了内燃机余热回收热力系统, 通过数值建模, 对余热回收系统进行数据分析, 发现当该系统处于最优工况时, 可产生 431.25 kW 的净功率, 系统炯效率为 67.1%^[8]。

本文提出一种新型的太阳能热发电系统, 该系统将 SCO₂ 布雷顿循环与 ORC 进行耦合发电, SCO₂ 布雷顿循环作为系统的顶部循环, ORC 作为底部循环。利用 SCO₂ 的布雷顿 - ORC 复叠循环实现了太阳能的高效利用, 提高了能量利用率的同时实现了能量的梯级利用。相比于传统的蒸汽朗肯循环和单一 SCO₂ 布雷顿循环, 这种新型复叠循环会进一步提高热发电效率, 减少余热浪费, 在降低对传统化石能源依赖的同时, 对节能减排、实现碳中和碳达峰有着重要的作用。

2 系统介绍

所提出的基于 SCO_2 布雷顿循环 - ORC 的复叠循环太阳能热发电系统如图 1 所示。

太阳能场中采用高温熔融盐作为蓄热工质，将集热系统与双罐蓄热相结合，保证了发电的持续性和稳定性。系统采用集蓄热一体化，大大克服了太阳能热利用的间歇性和不稳定性，双罐蓄热可以使系统蓄热能力大幅提高，使发电量进一步提升。

在光照强度达到设计标准时，熔融盐在太阳能集热器中吸热，并在换热器对 CO_2 放热后被泵送回集热器。多余的高温熔融盐在高温罐中进行蓄热，在太阳能光照不足或者晚间继续在换热器中放热后进入低温罐，保证了发电的

持续性。

换热器出口的高温高压的超临界状态 CO_2 在膨胀机中做功，带动发电机发电；做功后的气体在回热器中放热，对被压缩机压缩后的气体进行加热；通过回热器出口 4 点的 CO_2 仍具有较高温度，通过在蒸发器中放热，驱动底部有机朗肯循环。放热后的 CO_2 在预冷器中被冷却水带走热量进行预冷，先后进入压缩机升压、回热器吸热后进入换热器与高温熔融盐进行换热。

底部循环的有机工质在蒸发器中吸热后变成饱和气态后进入膨胀机 2 中膨胀做功，并带动发电机发电。膨胀后的乏气在冷凝器中放热后变成饱和液态，经工质泵升压后到蒸发器中吸热，完成整个 ORC 的循环过程。

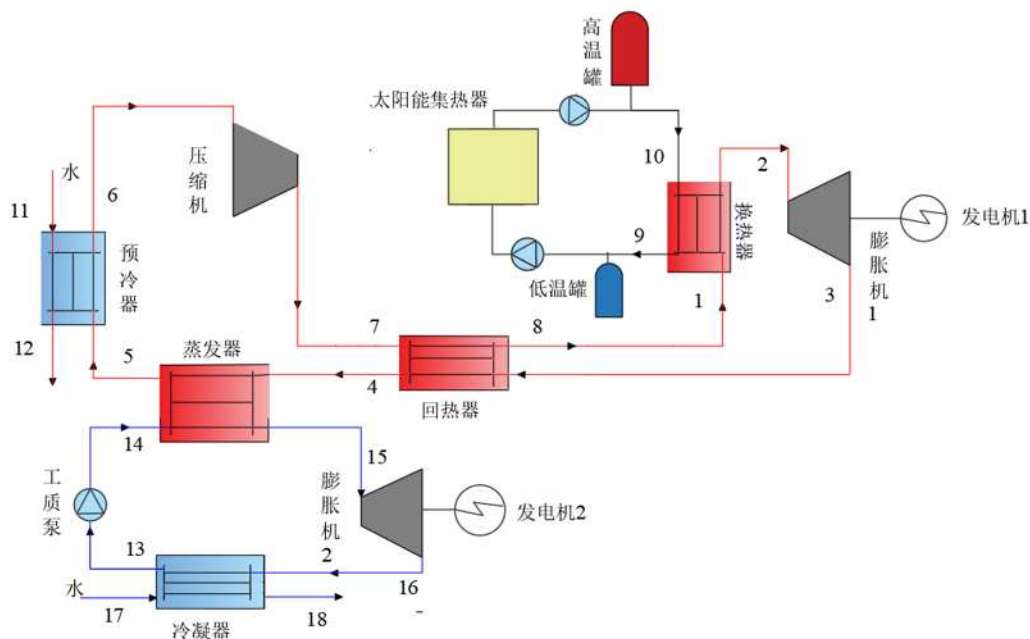


图 1 基于 SCO_2 布雷顿循环 - ORC 复叠循环的太阳能热发电系统工艺流程图

3 热力学模型

高温换热器、回热器、蒸发器根据热平衡公式 (1)~(3) 来计算：

$$m_1(h_2 - h_1) = m_0(h_0 - h_9) \quad (1)$$

$$h_3 - h_4 = h_8 - h_7 \quad (2)$$

$$m_1(h_4 - h_5) = m_2(h_5 - h_4) \quad (3)$$

式中， m_0, m_1, m_2 分别表示熔融盐的质量流量、 SCO_2 的

质量流量、有机工质的质量流量， kg/s 。

膨胀机的总装机容量：

$$W_e = (W_{\text{TOP}} + W_{\text{BOT}}) \varepsilon_g \quad (4)$$

式中， ε_g 表示发电机效率。

膨胀机 1 的输出功：

$$W_{\text{TOP}} = m_1(h_2 - h_3) \quad (5)$$

膨胀机 2 的输出功：

$$W_{\text{BOT}} = m_2(h_{15} - h_{16}) \quad (6)$$

泵和压缩机的耗功分别为:

$$W_{\text{P1}} = m_2(h_{14} - h_{13}) \quad (7)$$

$$W_{\text{com}} = m_1(h_7 - h_6) \quad (8)$$

顶部 SCO_2 循环热效率:

$$\eta_{\text{top}} = \frac{W_{\text{TOP}}\varepsilon_g - W_{\text{com}}}{m_1(h_2 - h_1)} \quad (9)$$

底部 ORC 热效率:

$$\eta_{\text{bot}} = \frac{W_{\text{BOT}}\varepsilon_g - W_{\text{P1}}}{m_2(h_{15} - h_{14})} \quad (10)$$

复叠循环整体热效率:

$$\eta = \frac{(W_{\text{TOP}} + W_{\text{BOT}})\varepsilon_g - (W_{\text{P1}} + W_{\text{com}})}{m_1(h_2 - h_1)} \quad (11)$$

4 结果与分析

4.1 系统设计参数及状态点的确定

本系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

参数	设计数值
装机容量 W_e	50 MW
膨胀机 1 等熵效率 ε_{TOP}	0.85
膨胀机 2 等熵效率 ε_{BOT}	0.85
工质泵等熵效率 ε_p	0.75
压缩机压缩比 ε_{com}	3
发电机效率 ε_g	0.95
膨胀机 1 进口温度 t_2	750 °C
膨胀机进口压力 p_2	22.5 MPa
最小换热温差 Δt_{min}	10 °C
ORC 冷凝温度 t_{16}	30 °C
环境温度 t_0	25 °C

对系统进行热力学分析, 当使用 R141b 作为 ORC 工质是, 在 196 °C 蒸发时, 系统各个参数点的具体计算数据如表 2 所示。分析过程中做出不考虑管道和换热器的能量损失的理想化假定。

表 2 最佳工况下系统各点的物性参数

状态点	温度 / °C	压力 / MPa	焓 / kJ · kg ⁻¹	熵 / kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹
1	350	22.5	785.46	2.3708
2	750	22.5	1286.2	2.9907
3	608.54	7.5	1116.03	3.0253
4	277.52	7.5	728.57	2.4761
5	33.633	7.5	387.78	1.6147
6	32	7.5	362.21	1.5310
7	93.201	22.5	398.00	1.5457
8	350	22.5	785.46	2.3708
13	30	0.094245	234.28	1.1189
14	32.087	3.7218	238.24	1.1221
15	196	3.7218	539.62	1.8659
16	30	0.094245	446.84	1.8200

4.2 系统性能分析

ORC 蒸发温度取 80 °C 到 204 °C, 按照 1 °C 为步长进行分析计算, 系统循环热效率和发电效率与 ORC 的蒸发温度之间的关系如图 2 所示。在所取温度范围内, 随着蒸发温度的提高, 系统循环效率与发电效率均增加, 尤其是在 ORC 蒸发温度大于 180 °C 后, 系统效率增幅显著变快。通过计算数据发现, 增加底部蒸发温度可以较好地提升系统整体热力学性能。当 ORC 蒸发温度大于 196 °C 时, 膨胀机 2 的比体积比开始大于 50, 工程上难以取得大于 0.8 的等熵效率^[9]。因此系统的最佳设计工况下的底部蒸发温度为 196 °C。系统在最佳设计工况的性能参数如表 3 所示。

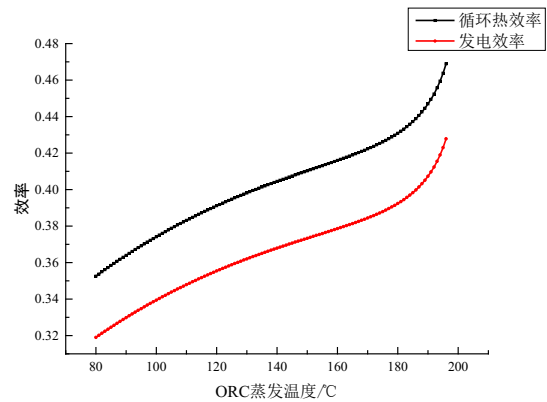


图 2 循环效率和发电效率与 ORC 蒸发温度关系图

表 3 系统最佳工况下的性能参数表

参数	计算结果
布雷顿循环 CO_2 质量流量 m_1	221.09 kg · s ⁻¹
底循环质量流量 m_2	250.00 kg · s ⁻¹
膨胀机 1 做功 W_{TOP}	37623.37 kW
膨胀机 2 做功 W_{BOT}	23194.12 kW
压缩机耗功 W_{com}	7912.52 kW
底部工质泵耗功 W_{P1}	990.00 kW
系统净发电量 W_{net}	47.36 MW
循环热效率 η_{ORC}	46.89 %
系统发电效率 η_e	42.78 %

5 结论

本文提出了一种基于 SCO_2 布雷顿循环和 ORC 耦合循环的太阳能热发电系统, 利用 ORC 充分利用了布雷顿循环的放热量, 实现了能量的梯级利用。将太阳能的高温集热和双罐蓄热相结合, 保证了发电的持续性和稳定性。建立了系统的热力学模型, 并对系统运行工况进行优化计算, 主要结论如下:

采用 R141b 作为 ORC 工质, 蒸发温度在 80°C 到 204°C 之间时, 系统整体循环效率和发电效率随着底部 ORC 蒸发温度的升高而升高。

通过对运行工况计算分析, 结果表明, R141b 在 196°C 时蒸发, 系统循环热效率最大, 可达 46.89%, 同时热发电效率为 42.87%。

在最佳运行工况下系统的净发电量为 47.36MW, 该系统具有较好的热力性能, 并能保证较高的发电量, 具有较为广泛地应用的前景。

参考文献:

- [1] 张博源, 杨康, 方振昌, 等. 超临界二氧化碳再热再压缩循环系统优化 [J/OL]. 武汉科技大学学报, 1-9[2025-04-24].
- [2] 张学镭, 梁建雄, 王普, 等. 基于 S-CO_2 布雷顿循环的太阳能发电储能一体化系统性能分析 [J]. 动力工程学报,

2024,44(08):1205-1215.

- [3] 李子扬, 郑楠, 方嘉宾, 等. 再压缩 S-CO_2 布雷顿循环性能分析及多目标优化 [J]. 化工学报, 2024,75(06):2143-2156.

- [4] 张祎文, 刘嘉欣. 基于有机朗肯循环余热利用的双发电路灯系统设计 [J]. 电气开关, 2025,63(01):19-24+31.

- [5] 黄靖. LNG 冷能与太阳能耦合利用技术研究 [J]. 石油石化节能与计量, 2025,15(04):79-84.

- [6] 史科锐, 莫春兰, 党玉荣, 等. 基于太阳能和双有机朗肯循环的液态空气储能系统特性研究 [J]. 可再生能源, 2024,42(05):601-611.

- [7] 宋昱希. 基于太阳能塔的 SCO_2 布雷顿循环耦合 ORC 的分析和优化 [D]. 南昌大学, 2023.

- [8] 伍振东. 基于超临界 CO_2 布雷顿循环的内燃机余热回收热力系统分析与优化 [D]. 广西大学, 2024.

- [9] Li P.C., Cao Q., Li J.. Effect of regenerator on the direct steam generation solar power system characterized by prolonged thermal storage and stable power conversion [J]. Renewable Energy, 2020, 159(10): 1099-1116.

通讯作者: 李俊辉 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事新型热力循环、太阳能热发电等方面研究, E-mail: 1924547515@qq.com