

新型 LNG 冷能卡诺电池储能系统热力性能分析

邝子颜 李俊辉* 张国栋 高佼 张云飞

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工业余热和液化天然气的新型卡诺电池系统,通过双罐蓄热实现工业余热高效利用的同时保证了动力循环输出的稳定性。采用复叠有机朗肯循环作为动力循环。用液化天然气(LNG)代替了冷却水,实现了 LNG 冷能的利用,提高能源利用效率。绘制了基于工业余热与液化天然气的卡诺电池系统的工艺流程图,并对其进行了热力分析。结果表明,采用 R141b 作为顶部循环工质在 160℃蒸发, R32 作为中部循环工质在 1℃蒸发时,系统达到最佳工况,该工质下的净发电量达到 50.84MW,总效率为 57.17%,比大多数现有的大部分复叠循环效率要高。

关键词: 卡诺电池;有机朗肯循环;双罐系统;液化天然气

引言

随着社会的飞速发展,能源短缺和环境污染问题日益严峻,因此世界各国正在积极推广清洁能源利用技术。卡诺电池作为多种成熟电热转换和储存技术的集成,因其可扩展性和不受地理限制的优势,正受到越来越多的关注^[1]。新型 LNG 冷能卡诺电池储能系统由动力系统和蓄热系统两部分组成。卡诺电池结合了蓄热和动力循环,保证了发电的稳定性和持续性。卡诺电池采用双罐模式大大提高了蓄热能力,采用复叠式有机朗肯循环提高了动力循环效率,能够节省大量能源消耗。

由于卡诺效率的限制,单级有机朗肯循环发电效率不高,对高温热源利用率较低。采用复叠有机朗肯循环可以提高系统热功转化效率、实现能量的梯阶利用^[2]。李友荣团队用复叠式有机朗肯循环系统回收烟气余热,其中顶部有机朗肯循环采用跨临界循环,底部有机朗肯循环为亚临界循环。研究发现,复叠式有机朗肯循环系统可降低膨胀机的压比,使工质选择更灵活高效,且其性能优于单级有机朗肯循环系统,存在一个使发电成本最低的中间换热器温差^[3]。

液化天然气(LNG)技术。液化天然气不仅有很高的热值且清洁环保,燃烧后产生的二氧化碳及其他污染物排放量远低于煤炭和石油,所以能在发电、城市燃气、工业燃料及化工原料等多个领域被广泛应用。牟文彪^[4]研究小组提出了构建了以燃气轮机烟气为热源、LNG 气化热为冷源的超临界二氧化碳(sCO₂)朗肯循环与天然气直接膨胀耦合的余热发电系统。龚文政^[5]研究组为了生产可直接用于工业

制造及食品加工的高纯度 CO₂,提出了一种利用 LNG 冷能液化提纯 CO₂ 及发电的新工艺。

1 系统介绍

新型卡诺电池系统如图 1 所示。系统通过蓄热循环来实现对工业余热的高效回收。回收的能量在高温罐里存储,高温罐出口出口的高温流体在换热器 2 换热后回到低温罐。

顶部有机朗肯循环工质在换热器 2 吸热后变为有机饱和气体后进入膨胀机 1 做功,膨胀机驱动发电机转动,将机械能转化为电能输出。膨胀做功后的工质进入换热器 3 与中部循环的有机工质进行换热。降温后的工质由工质泵 1 加压后送入换热器 2 再次进行循环。中部循环的工作过程与顶部循环的工作过程基本一致。

2 工质选择

工质的选择是一个复杂的过程,需要从多个维度进行全面评估,确保其能够在特定应用中实现最佳性能与安全性。工质的热力学性能是选材过程中最为关键的因素之一。理想的工质应当具备化学惰性、无毒无害、不易燃烧爆炸等安全特性,以保证热交换过程中的高效能量传递和系统的稳定运行。工质的物理化学特性也需要考虑,尤其是在高温高压环境下的稳定性。工质应具备化学惰性,避免因化学反应导致设备腐蚀、堵塞或其他意外。从环保角度出发,选择工质时应优先考虑其对环境的影响,特别是对臭氧层和气候变化的潜在影响。理想的工质应当对臭氧层无损耗,避免因使用而加剧臭氧层的破坏,减少紫外线辐射对地球的危害。这一选择过程需平衡热效率、材料兼容性、运行安全性及环境友

好性等关键要素，确保工质在整个系统生命周期内具有可靠性和可持续性。甲苯、环己烷、R141b、R113、R32、R125等工质具有良好的综合特性，常用来作为中低温热源 ORC 系统的循环工质。这几种有机工质的物性参数如表 1 所示，

ODP 表示工质对臭氧层的破坏能力，GWP 衡量温室气体对全球变暖影响的相对指标，这两个数值越大表示工质对环境的影响能力越大。

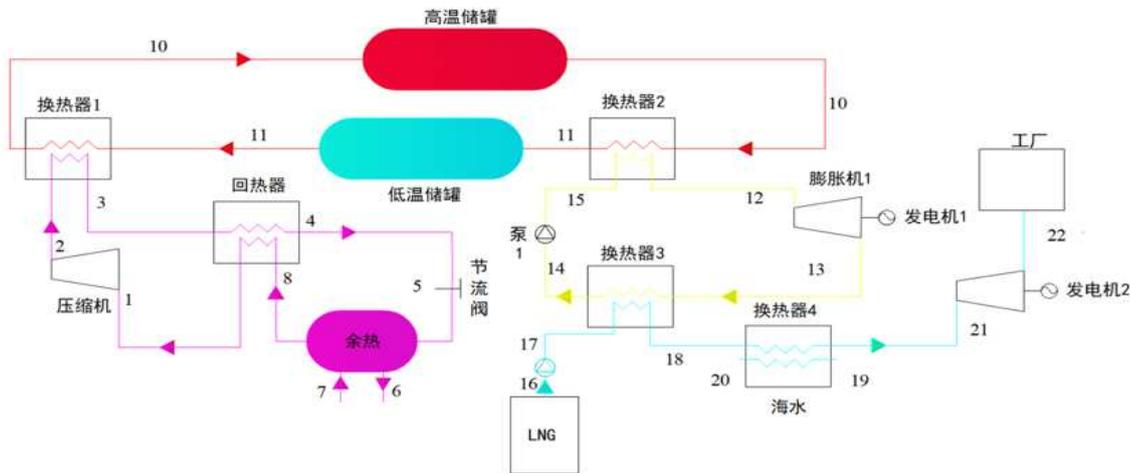


图 1 新型冷能卡诺电池系统工艺流程图

表 1 有机朗肯循环有机工质的物性参数

工质	临界温度 /K	临界压力 /MPa	分子质量	ODP	GWP
甲苯	591.75	4.1263	92.14	0	很低
环己烷	553.60	4.0805	84.16	0	很低
R141b	477.50	4.2120	116.95	0.234	较低
R113	487.21	3.3922	187.38	0.8	高
R32	351.26	5.7820	52.02	0	较高
苯	288.87	4.9073	78.11	0	很低
戊烷	196.55	3.3700	72.15	0	很低
R134a	374.21	4.0590	10.20	0	很低
R116	292.85	2.9700	138.01	0	较高
R115	353.15	3.1200	154.47	0.18	很低
R143a	345.86	3.7610	84.04	0	很低
R152a	386.41	4.5200	66.05	0	很低
R125	339.17	3.6177	120.02	0	较高

在系统设计中，甲苯、环己烷、R141b 和 R113 被选为顶部循环的工质。通过分析表 3-1 中的工质参数数据可以发现，R113 和 R32 这两种制冷剂在热力学特性和安全性方面表现突出，非常适合作为中部朗肯循环的工质。

具体来看，R113 的临界温度为 214.06℃，最低适用温度为 -36.22℃，最高适用温度达 251.85℃；而 R32 的临界温度更高，达到 351.26℃，其适用温度范围从 -135.81℃延伸至 161.85℃。这样宽广的温度适用范围，完全覆盖了系统设计的蒸发温度需求。同时，这两种工质的临界压力都在系

统设计的安全范围内，不会对设备造成过大的压力负荷。在安全性方面，R113 和 R32 的毒性明显低于其他候选工质，这大大降低了系统运行过程中的安全隐患。从热力学性能来看，这两种工质的选择能够使中部朗肯循环维持在一个较为理想的蒸发温度区间，这对提升整个系统的热效率具有重要作用。

3 系统性能分析

系统设计参数如表 2 所示。

表 2 系统设计参数

参数	值
环境温度	298K
LNG 蒸发压力	3MPa
天然气进入城市管网的压力	0.4MPa
LNG 质量流量	100kg/s
太阳辐射强度	1kW/m ²
夹点温差	10K
工质泵的等熵效率	0.75
水泵效率	0.75
膨胀机等熵效率	0.85
发电机效率	0.95
水的比热容	4.2kJ/ kg·K

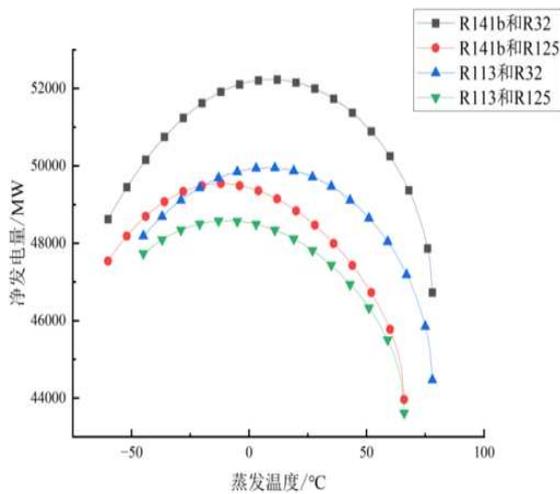


图 2 净发电量随蒸发温度的变化关系图

如图 2 所示，当顶部循环分别采用 R141b 和 R113 作为工质，且 R32 和 R125 作为中部循环工质时，系统总效率随中部循环蒸发温度的变化表现出先增大后减小的趋势。随中部循环蒸发温度的升高，顶部循环效率逐步降低，随中部循环蒸发温度的升高，中部循环效率逐渐升高，最终总效率呈现先升高后渐低的趋势。

4 最佳工况下系统的性能分析计算

表 3 是以 R141b 为顶部循环工质，R32 为中部循环工质时最佳工况的各点的物性参数，其顶部循环的蒸发温度为 160℃，系统顶部效率为 20.82%，中部效率为 22.11%，总效率为 57.17%，系统的净发电量为 50.84kW。

表 3 以 R141b 为顶部循环、R125 为中部循环时最佳工况下各点的物性参数

状态点	温度 /℃	压力 /MPa
1	150.00	1.8013
2	28.29	0.0351
3	5.00	0.0351
4	5.90	1.8013
5	-5.00	0.5707
6	-85.88	0.0101
7	-85.88	0.0101
8	-85.65	0.5707
9	-161.64	0.1000
10	-160.23	3.0000
11	-95.88	3.0000
12	15.00	3.0000
13	-85.15	0.4000

5 总结

本文提出了一种基于工业余热和液化天然气的新型卡诺电池系统。该系统将双罐储热模式与复叠式有机朗肯循环相结合，实现了能量的高效利用。建立了系统的热力学模型，对该系统进行了热力分析；通过对循环工质进行优化筛选，对比了不同工质的性能，并对各循环蒸发温度对系统参数的影响进行了分析，主要结论如下：

采用 R141b 和 R113 作为顶部循环工质，配合 R125 与 R32 作为中部循环工质的组合方案，能显著提升系统循环性能。该工质组合在热力参数匹配性和系统运行效率方面均表现出优越特性。

分析了中部循环的蒸发温度对系统性能的影响，发现系统的净发电量随中部循环蒸发温度的升高呈现先升高后降低的趋势。

通过计算最终明确最佳工况，即采用 R141b 作为顶部循环工质在 160℃蒸发、R32 作为中部循环工质在 1℃蒸发，该工况下的净发电量达到 50.84MW，总效率为 57%。

参考文献：

- [1] 封官斌, 李跃林. 高温卡诺电池关键技术及应用现状[J], 工程科技 II 辑, 2024, 53(12): 1-9.
- [2] 李俊辉. 以合成油为工质的复叠式有机朗肯循环发电系统性能分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- [3] 李友荣, 王晓琼, 李春春, 吴双应, 刘朝. 耦合跨临界与亚临界有机朗肯循环性能分析[J], 工程热物理学报, 2015, 36(06): 1176-1181.
- [4] 牟文彪, 基于燃机余热和 LNG 冷能的 sCO₂ 朗肯循环系统构建[J], 动力工程学报, 2023, 43(12): 1599-1606.
- [5] 龚文政, 基于 LNG 冷能的 CO₂ 液化提纯及发电工艺设计与优化[J], 化学工程, 2025, 54 (01) : 38-44.

通讯作者：李俊辉（1996-），男，硕士研究生，主要从事新型热力循环、太阳能热发电等领域的研究。