DOI: 10.3901/JME.2014.20.151

有机朗肯循环太阳能热发电辅助燃煤电厂 CO₂ 捕集系统技术经济性分析*

谭雨亭 赵力 鲍军江 邓帅

(天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室 天津 300072)

摘要: 提出一种有机朗肯循环太阳能热发电辅助燃煤电厂碳捕集系统, 该系统利用聚焦式太阳能驱动有机朗肯循环(Organic rankine cycle, ORC)发电系统, ORC 系统高温冷凝热为燃煤电厂醇胺法 CO₂ 捕集系统提供热量, ORC 热利用效率理论上达到 100%。该系统避免了传统碳捕集系统汽轮机抽汽, 保证了燃煤电厂的稳定运行和经济效益。对新型碳捕集系统的热力学性能参数进行设计匹配, 筛选适用于高温 ORC 太阳能热发电系统的有机工质, 备选工质为甲苯、辛烷、硅油 MDM 及环乙烷。对新型碳捕集系统及抽汽式碳捕集系统进行经济性分析与比较, 计算均化成本、碳捕获成本和净现值。结果显示: 在碳捕获率小于 90% 时, 新型碳捕集系统均化成本更高; 新型碳捕集系统较之抽汽式系统碳捕获成本更高, 约为抽汽式系统碳捕获成本的 2 倍; 当太阳能热发电补贴电价超过 1.18 元/(kW·h) 时, 新型碳捕集系统具有更高的经济性, 当太阳能热发电补贴电价低于 0.82 元/(kW·h) 时, 抽汽式碳捕集系统具备更高的经济性, 当太阳能热发电补贴电价处于两者之间时, 新型碳捕集系统与抽汽式碳捕集系统的经济性高低取决于燃煤电厂的碳捕获率。

关键词: 燃煤电厂; 碳捕集; 太阳能; 有机朗肯循环; 可行性

中图分类号: TM615

Techno-economic Study of Carbon Capture from Coal-fired Power Plant Using MEA Assisted by Solar Organic Rankine Cycle for Power Generation

TAN Yuting ZHAO Li BAO Junjiang DENG Shuai

(Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: A carbon capture system applied in coal-fired power plant assisted by solar organic rankine cycle (ORC) for power generation is studied; the ORC system is driven by concentrated solar energy for power generation, the heat of condensation is for carbon capture system using MEA applied in coal-fired power plant, which makes thermal efficiency of ORC 100% theoretically. The system guarantees stable operation and high benefit of the coal-fired power plants via avoiding steam extraction from steam turbine. ORC working fluid candidates are selected based on thermodynamic analysis and parameter design of the system. Toluene, octane, silicone oil MDM and cyclohex are four candidate ORC working fluid. Economic analysis and comparison between different carbon capture systems are conducted based on levelized cost of electricity (LCOE), cost of carbon (COC) and net present value (NPV). When carbon capture rate is less than 90%, LCOE of proposed system is higher than that of traditional carbon capture based on steam extraction. COC of new system is higher than that of traditional one, approximately twice. The new system has higher NPV than that of normal one when subsidy electricity price for concentrated solar power (CSP) is higher than 1.18 CNY/(kW·h), otherwise, if subsidy electricity price for (CSP) is lower than 0.82 CNY/(kW·h), traditional system has higher NPV, and it depends on carbon capture rate to decide which system has better economy when subsidy electricity price is between them.

Key words: coal-fired power plant; carbon capture; solar energy; organic rankine cycle; feasibility

0 前言

温室气体过度排放导致全球气温升高, 各国共

同致力于 2050 年气温上升低于 2 °C 的目标, 加紧碳减排技术的开发, 这其中 CO₂ 捕获与封存技术、新能源技术成为碳减排技术中极具潜力的两项技术^[1]。

我国 CO₂ 最大排放源为电力行业, 排放量占全国 CO₂ 排放量的 40%, 主要来自与燃煤电厂。应用于燃煤电厂的碳捕集技术包括富氧燃烧技术及燃烧

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2012AA051103)。20131126 收到初稿, 20140412 收到修改稿

后捕集技术,目前醇胺法燃烧后碳捕集技术由于其技术成熟性高成为燃煤电厂的首选^[2]。众多学者对醇胺法碳捕集技术进行了大量研究,研究发现,醇胺法碳捕集系统解析塔内解析反应过程需要消耗大量的热量,捕获每吨 CO_2 需要消耗 3~4 GJ 能量;传统燃煤电厂碳捕集系统通过汽轮机低压抽汽的方式为解析过程提供热量,导致燃煤电厂系统热经济性下降,燃煤电厂热效率降低 17%^[3-5]。

为了解决醇胺法碳捕集系统的高运行成本问题,一些学者提出利用低运行费用的太阳能能为碳捕集系统提供热量^[6-7],如利用聚焦式太阳能集热器为碳捕集系统及燃煤电厂提供热量以降低运行成本,而解析过程需要 110~130 °C 热量^[3],这与聚焦式太阳能热量品位并不匹配,利用槽式等聚焦式集热器,最高集热温度保持 250~350 °C 时集热效率较高。如何利用聚焦式太阳能高品位能量辅助燃煤电厂 CO_2 捕集系统成为亟待解决的问题。

本文提出一种利用有机朗肯循环(Organic rankine cycle, ORC)太阳能热发电技术辅助燃煤电厂 CO_2 捕集系统,利用高品位聚焦式太阳能驱动高温 ORC 系统发电,利用工质高温冷凝热完成对 CO_2 捕集系统解析过程的热量供应。本文对新型碳捕集系统进行技术和经济可行性分析,给出系统的设计参数,评估其热力学性能,通过对均化成本、净现值和碳捕获成本的考核,分析了该系统的经济性。

1 系统的提出

1.1 燃煤电厂碳捕集系统

图 1 所示为燃煤电厂 CO_2 捕集系统流程图,如图 1 所示,燃煤电厂 CO_2 捕集系统采用乙醇胺吸收烟气中的 CO_2 。燃煤发电系统锅炉废气经碳捕捉前处理后从底部进入吸收塔,与从塔顶进入的喷射溶液逆向接触反应,废气中的 CO_2 气体与乙醇胺溶液发生化学反应, CO_2 被乙醇胺溶液吸收,去除 CO_2 的废气从吸收塔顶部流出排入大气。吸收 CO_2 的溶液经溶液泵加压后从顶部进入解析塔,与底部上升的蒸汽进行逆向换热反应, CO_2 从吸收溶液中解析并从解析塔塔顶排出,经冷凝后进入压气机进行压缩以便于运输和存储。释放 CO_2 的溶液进入解析塔底部,经再沸器提供解析塔所需水蒸气后,经溶液泵与解析塔进口溶液换热后进入吸收塔循环使用。

在醇胺法捕集 CO_2 系统中,乙醇胺溶液在解析塔中解析出 CO_2 是整个流程耗能最大的反应,从经济性分析出发,醇胺溶液的再生是行之有效的办法,如何保持解析塔内 110~130 °C 环境和热量供给成

为整个系统的关键,解析塔内能量供给由再沸器提供,解析每吨 CO_2 需要消耗能量 3.7 GJ^[3],目前国际上现行的办法是利用汽轮机低压抽汽的方式为解析过程提供能量,而抽汽直接影响燃煤电厂的运行和经济效益;另一方面,醇胺法碳捕集系统中动力设备如贫液泵、富液泵及压气机等需大量电力供应。所以,如何同时寻找到温度匹配的热量供给和负荷满足的电量供给成为了燃煤电厂碳捕捉系统大规模推广的关键。

图 1 燃煤电厂 CO_2 捕集系统流程

1.2 有机朗肯循环太阳能热发电系统

图 2 所示为 ORC 太阳能热发电系统流程图,如图 2 所示,在太阳直射辐射条件较好时,槽式太阳能集热器将太阳能热转换为导热油的热能,从真空管流出的高温导热油进入有机工质蒸汽发生器与液态有机工质进行换热,蒸汽发生器出口的低温导热油流入导热油罐,经导热油泵进入太阳能集热器完成太阳能集热过程;有机工质在蒸汽发生器中与高温导热油完成换热,由液态有机工质吸热转为高温高压的过热蒸汽,随即进入有机工质汽轮机做功发电。

高温 ORC 太阳能热发电系统利用聚焦式太阳能集热器,导热油集热温度较高(250 °C 以上),有机朗肯循环中选用的有机工质蒸发温度为 250~280 °C^[8],经过有机工质膨胀机做功,一般具备较高的冷凝温度,大量冷凝热的浪费导致太阳能热利用的综合效率降低。

通过对上述两套系统的分析发现,ORC 太阳能热电系统能够提供 130 °C 以上的冷凝热量及电量,为燃煤电厂 CO_2 捕集系统解析塔提供 110~130 °C 低压蒸汽,并能利用部分电量驱动碳捕集系统的动力设备,两套系统的结合为 CO_2 捕集提供了可能。

图 2 有机朗肯循环太阳能热发电系统流程

2 技术性分析

2.1 新系统的提出

图 3 所示为 ORC 太阳能热发电辅助燃煤电厂 CO₂ 捕集系统流程图，如图 3 所示，通过聚焦式太阳能集热系统，高位热能推动高温 ORC 发电，大量有机工质低位冷凝热为醇胺法碳捕集系统再沸器提供 110 ℃ 以上的低压蒸汽，蒸汽热量保证解析塔内 CO₂ 的解析，从而实现燃煤电厂碳捕集。

图 3 有机朗肯循环太阳能热发电辅助燃煤电厂 CO₂ 捕集系统流程

新型碳捕集系统具备以下特点。

- (1) 利用聚焦式太阳能满足燃煤电厂醇胺法 CO₂ 捕集系统的热量需求，避免汽轮机抽汽，降低系统运行成本，保证燃煤电厂的稳定运行和经济效益。
- (2) 太阳能热利用综合效率提高，通过高温有机朗肯循环发电和冷凝热供给，实现太阳能梯级利用。
- (3) 实现高温 ORC 冷凝热有效利用，循环热利用理论效率达到 100%。

2.2 ORC 工质筛选

太阳能 ORC 发电系统工质的冷凝温度要求在 130 ℃ 以上，这样冷凝器可以提供 110~130 ℃ 低压蒸汽用以再沸器能量供给，ORC 其他工况要求详见表 1。本文利用 REFPROP 9.0 软件，对有机工质进行筛选，提出四种适用于该系统的备选工质，分别是甲苯、辛烷、硅油 MDM 及环乙烯，备选工质热力学参数如冷凝温度、热效率等详见表 2。

表 1 有机朗肯循环系统工况

参数名称	数值
集热温度/℃	330
蒸发温度/℃	300
膨胀机膨胀比	10
膨胀机内效率(%)	75
工质泵效率(%)	70

表 2 备选有机工质

热力参数	备选工质			
	甲苯	辛烷	硅油 MDM	环乙烯
蒸发压力/MPa	2.88	1.73	1.20	3.57
冷凝压力/MPa	0.29	0.17	0.12	0.36
冷凝温度/℃	152.00	146.04	159.15	130.43
热效率(%)	15.42	15.49	14.72	17.34

2.3 系统性能参数

系统的规模，包括醇胺法 CO₂ 捕集系统、聚焦式太阳能集热器、ORC 发电系统等均与燃煤电厂的规模及 CO₂ 捕获率相关，表 3 给出 300 MW 燃煤电厂在 CO₂ 捕获率 20% 工况下系统主要设计参数。

表 3 系统主要性能参数

参数名称	数值
电厂发电量/MW	300
电厂热效率(%)	44 ^[9]
CO ₂ 排放量/(t/h)	256.9 ^[9]
CO ₂ 捕捉率(%)	20
解析塔温度/℃	110~120
解析热量(GJ/t)	3.7
太阳能直射辐射/[(kW·h/m ²)/年]	2 080
集热器面积/m ²	320 000
有机朗肯循环发电量/MW	43.1

3 经济性分析

3.1 经济模型

表 4 列出新型碳捕集系统主要经济性参数，为经济性评估提供依据。

3.2 评价方法

本文通过考察各经济性评估方法及参数^[16]，采用均化成本、净现值(Net present value, NPV)及碳

表 4 系统主要经济性参数

子系统	项目	数值
燃煤电厂 ^[10-11]	运行时间/(h/年)	5 500
	初投资/(万元/kW)	0.50
	运行费用/[元/(kW·h)]	0.245
碳捕集系统 ^[12]	CO ₂ 捕获率(%)	90
	初投资/(万元/MW)	450.43
	运行费用/(万元/MW)	43.24
集热器 ^[13]	集热效率(%)	40~60
	初投资/(万元/MW)	1.456
	运行费用/(万元/MW)	0.030
ORC 发电系统 ^[15]	运行时间/(h/年)	3 200
	初投资/(万元/kW)	1.377
	运行费用/[万元/(MW·h)]	0.018

捕捉成本(Cost of carbon, COC)对抽汽碳捕集系统和新型碳捕集系统的经济性进行评估。

3.2.1 均化成本

均化成本用以表征系统发电成本,计算方法见式(1), Y 取 25。本文通过计算均化成本,可以得到抽汽式碳捕集系统和新型碳捕集系统的发电成本

$$L = \frac{C + \sum_{j=1}^Y \frac{O_j}{(1+i_c)^j}}{\sum_{j=1}^Y \frac{E_j}{(1+i_c)^j}} \quad (1)$$

式中 L ——均化成本;

C ——初投资;

O ——运行费用;

E ——发电量;

i_c ——基准折现率;

Y ——运行年限;

j ——运行年份。

3.2.2 净现值

净现值是指投资方案所产生的现金净流量以资金成本为贴现率折现之后与原始投资额现值的差额,表征项目的经济可行性。净现值计算方法如式(2)所示,本文 $i_c=6\%$ 。通过工程生命周期净现值的计算,可以对传统碳捕集系统与新型碳捕集系统的经济可行性进行比较。

$$NPV = \sum_{j=1}^Y \frac{P_j - O_j}{(1+i_c)^j} - C \quad (2)$$

式中, P_j 为收益。

3.2.3 碳捕获成本

碳捕获成本指的是碳捕捉系统捕获 CO₂ 的成本,其表征系统引进碳捕捉部件进行 CO₂ 捕集付出的额外代价。碳捕获成本计算方法如式(3)所示,其中下标 cap 表示增设碳捕集部件的系统,ref 为未增设碳捕集部件的系统。

$$COC = \frac{(L_{cap} - L_{ref}) \times E_{cap}}{Q_{cap}} \quad (3)$$

式中 Q ——碳捕获量。

3.3 结果与讨论

图 4 为不同碳捕获率下各系统均化成本及比较情况,本文分别计算了普通燃煤电厂、抽汽式碳捕集燃煤电厂和新型碳捕集燃煤电厂的均化成本。其中普通燃煤电厂均化成本最低,为 0.354 元/(kW·h)。抽汽式碳捕集燃煤电厂和新型碳捕集系统的均化成本均随碳捕获率的增加而上升,分别从 0.389 元/(kW·h)和 0.418 元/(kW·h)上升到 0.856 元/(kW·h)和 0.826 元/(kW·h),这是因为碳捕集系统消耗了大量的热能,增加了运行成本并减少了收益,导致均化成本升高。另外,在碳捕获率小于 90%时,相较于抽汽式系统,新型碳捕集系统的均化成本更高;当碳捕获率超过 90%时,新型碳捕集系统的均化成本相对传统的抽汽式系统更低。

图 4 不同碳捕获率下系统均化成本及比较

通过图 4 还可以发现,新型碳捕集系统在碳捕获率超过 25%、抽汽式系统在碳捕获率超过 40%时均化成本均超过现行电价 0.5 元/(kW·h),这说明只有在此碳捕获率范围下进行电厂碳捕集补贴,燃煤电厂才能盈利,否则将亏损。本文计算的各系统均化成本为碳捕集补贴电价提供了依据。

图 5 为不同碳捕获率和太阳能热发电补贴电价下新型碳捕集系统较于抽汽式碳捕集燃煤电厂的净现值情况。根据计算所得的均化成本,通过设置不同碳捕获率下的补贴电价,使得抽汽式碳捕集燃煤电厂的净现值为 0,并计算再此补贴电价下,新型碳捕集系统在不同太阳能热发电补贴电价下的净现值,以比较两套系统的经济可行性,若 $NPV>0$ 即新型碳捕集系统较之抽汽式碳捕集系统有更好的投资回报,反之若 $NPV<0$,新型碳捕集系统在投资回报上并无优势。

根据中国太阳能热发电产业政策研究报告^[13]现行太阳能补贴电价为 1.38 元/(kW·h),本文计算

了太阳能补贴电价小于 1.38 元/(kW·h)时新型碳捕集系统的净现值。

图5 不同碳捕获率下系统净现值及比较

结果发现, 当太阳能热发电补贴电价超过 1.18 元/(kW·h)时, 在任何碳捕获率下, 新型碳捕集系统具有更大的经济性, 净现值随着太阳能热发电补贴电价的提高而增大, 增幅随着碳捕获率的提高而增大。在补贴电价超过 1.18 元/(kW·h)时, 利用新型碳捕集系统进行大规模碳捕集具备更高的经济效益。

当太阳能热发电补贴电价低于 0.82 元/(kW·h)时, 在任何碳捕获率条件下, 抽汽式碳捕集系统具备更高的经济性。净现值随碳捕获率的提高呈先减小后增加的趋势。在此补贴电价条件下, 建议采用抽汽式碳捕集系统。

当太阳能热发电补贴电价在 0.82~1.18 元/(kW·h)时, 新型碳捕集系统与抽汽式碳捕集系统的经济性评估取决于燃煤电厂的碳捕获率。如图 5 所示, 当补贴电价为 0.78 元/(kW·h)时, 新型碳捕集系统的净现值随碳捕获率的增加呈先减小后增加的趋势, 在碳捕获率小于 0.6 时其净现值较抽汽式系统更小, 当碳捕获率大于 0.6 时, 新型碳捕集系统净现值更大。所以当补贴电价在 0.82~1.18 元/(kW·h)时, 燃煤电厂的捕获率应大于临界捕获率, 原因可能是当超过临界捕获率后, 抽汽式燃煤电厂热效率下降导致发电收益的降低对整个系统经济性的影响更大。

图 6 为不同碳捕获率下系统碳捕获成本, 如图所示, 两套系统的碳捕获成本随碳捕获率的增加变化很小, 抽汽式系统和新型碳捕集系统的碳捕获成本分别维持在 418 元/t 和 815 元/t 左右, 这是由于随着碳捕获率的增加, 系统的初投资和运行费用基本呈线性增长, 所以碳捕获成本基本保持不变, 而新型碳捕集系统的碳捕获成本为抽汽式系统捕获成本的 2 倍左右。

图6 不同碳捕获率下系统碳捕获成本及比较

4 结论

(1) 本文提出一种有机朗肯循环太阳能热发电辅助燃煤电厂碳捕集系统, 该系统利用聚焦式太阳能驱动有机朗肯循环发电系统, 高温冷凝热为燃煤电厂乙醇胺法 CO₂ 捕集系统提供热量, 实现太阳能梯级利用, 有机朗肯循环热利用效率理论上达到 100%, 可避免汽轮机抽汽, 保证了燃煤电厂的稳定运行和经济效益。

(2) 本文对新型碳捕集系统的热力学性能参数进行设计匹配, 筛选适用于高温有机朗肯循环太阳能热发电系统的有机工质, 分别为甲苯、辛烷、硅油 MDM 及环乙烯。

(3) 本文对新型碳捕集系统及抽汽式碳捕集系统进行均化成本分析与比较: 在碳捕获率小于 90% 时, 新型碳捕集系统均化成本更高。

(4) 本文对新型碳捕集系统及抽汽式系统进行碳捕获成本分析与比较: 新型碳捕集系统较之抽汽式系统碳捕获成本更高, 约为抽汽式系统碳捕获成本的 2 倍。

(5) 本文对新型碳捕集系统及抽汽式系统进行净现值分析与比较: 当太阳能热发电补贴电价超过 1.18 元/(kW·h)时, 在任何碳捕获率下, 有机朗肯循环太阳能热发电辅助燃煤电厂碳捕集系统具有更大的经济性; 当太阳能热发电补贴电价低于 0.82 元/(kW·h)时, 在任何碳捕获率条件下, 传统抽汽式碳捕集系统具备更高的经济性; 当太阳能热发电补贴电价在 0.82~1.18 元/(kW·h)时, 新型碳捕集系统与抽汽式碳捕集系统的经济性评估取决于燃煤电厂的碳捕获率。

参 考 文 献

- [1] IPCC. IPCC special report on carbon capture and storage[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [2] WANG M, LAVAL A, STEPHENSON P, et al.

- Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-art review [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89: 1609-1624.
- [3] TOBIAS J, RUEDIGER S, HELMUT R. Development of an economic post-combustion carbon capture process [J]. Energy Procedia, 2009, 1: 1043-1050.
- [4] ALIE C, BACKHAM L, CROISSET E, et al. Simulation of CO₂ capture using MEA scrubbing: A flowsheet decomposition method [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 475-487.
- [5] DUAN Liqiang, ZHAO Mingde, YANG Yongping. Integration and optimization study on the coal-fired power plant with CO₂ capture using MEA [J]. Energy, 2012, 45: 107-116.
- [6] MARWAN M, MUHAMMAD T A, RAJAB K. Solar-assisted post-combustion carbon capture feasibility [J]. Applied Energy, 2012, 92: 668-676.
- [7] LI Hailong, YAN Jinyue, CAMPANA P E. Feasibility of integrating solar energy into a power plant with amine-based chemical absorption for CO₂ capture [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9: 272-280.
- [8] LAI N A, WENDLAND M, FISCHER J. Working fluid for high-temperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2011, 36: 199-211.
- [9] 李京茂. 燃烧后碳捕捉火电厂的运行热经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Jingmao. Research on operation thermal economy in power plant of carbon capture after combustion [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [10] RUBIN E S, CHEN Chao, RAO A B. Cost and performance of fossil fuel power plants with CO₂ capture and storage [J]. Energy Policy, 2007, 35: 4444-4454.
- [11] 王运民, 李录平, 潘维加. 燃煤电厂运行经济性综合评价指标的研究[J]. 长沙理工大学学报, 2006, 3(1): 47-51.
- WANG Yunmin, LI Luping, PAN Weijia. Comprehensive evaluation index of economical operation in coal-fired power plant [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2006, 3(1): 47-51.
- [12] SINGH D, CROISSET E, DOUGLAS P L. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 3073-3091.
- [13] 王志峰. 中国太阳能热发电产业政策研究报告 [R]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2013.
- WANG Zhifeng. Research report on policy of solar thermal power generation in China [R]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, 2013.
- [14] DUDLEY V E, KOLB G J, SLOAN M, et al. Test results SEGS LS-2 solar collector [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1994.
- [15] HEDMAN B A. Waste energy recovery opportunities for interstate natural gas pipelines [R]. INGAA, 2008-02, 2008.
- [16] 李荐明. 我国制造业成本设计的理论和方法研究综述 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 11-18.
- LI Jianming. General depiction on the manufacture industry cost design theory and its method in China [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 11-18.

作者简介: 谭雨亭, 男, 1989 年出生。主要研究方向为 CO₂ 捕集。

E-mail: tyttju1209@sina.com

赵力(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为太阳能热发电。

E-mail: jons@tju.edu.cn