

燃煤电站与光伏余热辅助胺法脱碳系统集成

邢晨健,王瑞林,赵传文

(南京师范大学 能源与机械工程学院,江苏 南京 210046)

摘要:为应对全球变暖问题,对现有燃煤电站进行碳捕集改造以及大力发展清洁能源势在必行。化学吸收法在碳捕集技术中发展最为成熟,但其再生能耗极高严重影响了燃煤电站自身的发电效率,因此有学者提出通过清洁能源辅助碳捕集的利用方式,其中光热辅助碳捕集应用最为广泛,但该利用方式未发挥单一光热的利用潜力。通过利用聚光光伏发电过程中产生的大量低品位废热辅助碳捕集可以提高光伏系统效率同时对低品位废热进行了有效利用。基于此构思了聚光光伏-光伏余热直接辅助碳捕集的新系统,建立了聚光砷化镓-余热辅助胺法脱碳的能量转化模型,验证了聚光光伏余热在质和量上都具有直接辅助胺法脱碳的潜力,依据热耗灵敏度分析优化了胺法脱碳系统关键参数,其最低热耗可达 3.7 GJ/t,分析了电池工作温度及辐照强度对系统碳捕集性能以及光电效率的影响规律,确定了电池最优工作温度为 140 ℃。将新系统集成于典型 600 MW 燃煤电站,并与参比系统比较可得:相较于单一燃煤碳捕集,电站发电效率提升 6.01 个百分点,同时增加光伏发电 185.2 MW;相较于单一光伏发电,光伏发电量降低 15.79 MW,但占接收太阳能 60% 的余热得到了有效利用,可实现 CO₂ 捕集 461.75 t/h。新系统在典型日的光伏日均发电为 61.8 MW,日均碳捕集量为 155.6 t/h,为实现年碳捕集保证率达 80% 以上,需要约 4 km² 以上的聚光面积。新系统利用光伏余热代替了原本从电站低压缸抽汽,消除了碳捕集对电站的能源惩罚,同时将高品位的太阳能转化为电,并对低品位的光伏余热进行对口利用。系统最终实现了太阳能的高效利用以及化石能源的并行清洁利用。

关键词:胺法脱碳;太阳能辅助碳捕集;光伏发电;光伏余热利用;燃煤电站碳捕集

中图分类号:TK512 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2021)02-0170-10

Integration of coal-fired power station and photovoltaic waste heat assisted amine decarbonization system

XING Chenjian, WANG Ruilin, ZHAO Chuanwen

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to deal with the problem of global warming, it is imperative to transform the carbon capture of existing coal-fired power plants and vigorously develop clean energy. Chemical absorption method is the most mature in carbon capture technology, but its high energy consumption seriously affects the power generation efficiency of coal-fired power stations. Therefore, some scholars have proposed the use of clean energy-assisted carbon capture, in which photo-thermal-assisted carbon capture is the most widely used, but this use method does not play the potential of single photo-thermal utilization. By using a large amount of low-grade waste heat generated in the process of concentrating photovoltaic power generation to assist carbon capture, the efficiency of the photovoltaic system can be improved while the low-grade waste heat is effectively used. Based on this research, a new system of concentrating photovoltaics-photovoltaic waste heat directly assisted carbon capture was conceived, and an energy conversion model of concentrating gallium arsenide-waste heat assisted amine decarbonization was established to verify the potential of concentrated photovoltaic waste heat directly assisted amine decarbonization in quality and quantity. According to the sensitivity analysis of heat consumption, the key parameters of the amine decarbonization system were

收稿日期:2020-09-29;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS20092901

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1510129)

作者简介:邢晨健(1997—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事太阳能辅助碳捕集研究。E-mail:18021528597@163.com.

通讯作者:赵传文,教授,主要从事 CO₂ 捕集与利用研究。E-mail:cwzhao@nynu.edu.cn

引用格式:邢晨健,王瑞林,赵传文.燃煤电站与光伏余热辅助胺法脱碳系统集成[J].洁净煤技术,2021,27(2):170-179.

XING Chenjian, WANG Ruilin, ZHAO Chuanwen. Integration of coal-fired power station and photovoltaic waste heat assisted amine decarbonization system[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 170-179.



移动阅读

optimized. The minimum heat consumption could reach 3.7 GJ/t. The influence of battery working temperature and radiation intensity on the carbon capture performance and photoelectric efficiency of the system was analyzed, and the optimal working temperature of the battery was determined as 140 °C. By integrating the new system into a typical 600 MW coal-fired power station and comparing it with the reference system, it can be obtained that compared with a single coal-fired carbon capture, the power generation efficiency of the power station is increased by 6.01%, and the photovoltaic power generation is increased by 185.2 MW; compared with a single photovoltaic, the photovoltaic power generation is reduced by 15.79 MW, but the waste heat accounting for 60% of the received solar energy is effectively used, which can achieve 461.75 t/h CO₂ capture. The average daily photovoltaic power generation of the new system on a typical day is 61.8 MW, and the average daily carbon capture capacity is 155.6 t/h. In order to achieve an annual carbon capture guarantee rate of more than 80%, the Concentrating photovoltaic area above about 4 km² is required. The new system uses photovoltaic waste heat instead of the original low-pressure cylinder extraction steam from the power station, eliminating the energy penalty of carbon capture on the power station, while converting high-grade solar energy into electricity, and using photovoltaic waste heat in a grade-matched manner. The system finally realizes the efficient use of solar energy and the parallel clean use of fossil energy.

Key words: amine decarbonization; solar assisted carbon capture; photovoltaic power generation; photovoltaic residual heat utilization; carbon capture in coal-fired power plants

0 引言

温室气体过量排放导致的全球变暖问题日益突出, IEA在2019年世界能源展望^[1]中预测未来十几年煤炭依然是发展中国家的主要能源, 因此, 为应对全球变暖问题, 短期内需要对燃煤电站排放的CO₂进行捕集和封存, 长期的目标是大力发展新能源, 如核能、太阳能、风能等逐步代替火电。

碳捕集方式众多, 其中化学溶剂吸收法是最成熟的技术, 具有吸收容量大、选择性高、对已建和在建电站改动小等优势, 以胺法吸收为代表已在商业上得到应用^[2]。碳捕集对缓解气候变化的重要性已被认可, 但过高的再生能耗阻碍了其大规模发展。因此通过清洁能源辅助碳捕集的方式, 逐步增加新能源比重同时实现化石能源的清洁利用是目前可接受的方案之一。

一般来说, 太阳能辅助燃烧后碳捕集系统分为直接系统和间接系统^[3]。直接系统即对太阳能进行集热并直接为吸收剂再生供热。Zhai等^[4]通过Aspen Plus对太阳能塔式集热直接辅助钙循环脱碳进行了数值模拟, 并对碳酸化环节的放热进行热回收利用, 结果表明其热力性能达31.2%, 整体效率损失为13.44个百分点。

对于直接系统而言, 设计太阳能辅助碳捕集系统的关键因素是匹配碳捕集技术所需的热能与太阳能集热温度的能级对口。间接系统是将较高质量的太阳能集热量先用于电力模块如代替电站的部分高加抽汽, 然后从中低压缸抽取低品位的蒸汽为碳捕集供能, 从而间接降低碳捕集对电站的效率损耗。Zhai等^[5]对太阳能直接和间接辅助胺法脱碳系统集成于1 000 MW燃煤电站进行比较, 其中间接系

统的净输出功率比直接系统多18.2 MW, 脱碳成本低0.82 \$/t(以CO₂计)。由于电站热力循环的蒸汽参数范围广, 因此间接系统可以更充分利用太阳能集热器的集热潜力, 对热量进行了品位更对口地利用, 因此其效率要高于直接系统。但间接系统更为复杂, 太阳能的动态输入不利于电站的稳定运行。因此, 也有学者致力于直接辅助系统反应器的研究, Khalilpour等^[6]提出通过新型反应器可以实现太阳能直接加热胺基溶剂, 不借助其他传热流体, 从而取消昂贵的解析单元, 有效降低传热损失。

相较于单一的光热利用辅助碳捕集, 光伏发电作为发展更快的太阳能利用方式, 其发电占比正稳步上升^[1], 但存在太阳光谱与电池带隙能不匹配的问题, 因此有大量太阳辐射并未被电池转化为电, 而是以热的形式耗散。此外对于聚光电池而言, 高温工作环境会导致其发电效率降低、寿命减少。因此, 通过在聚光光伏电池背面加上集热装置(CPVT), 在保持电池工作温度稳定的同时, 吸收光伏余热进行热利用, 可以实现光伏光热综合利用。由于砷化镓电池可接受的工作温度较高, 可达170~200 °C^[7]。因此, 光伏余热在质和量上都具有满足吸收剂再生能耗的潜力, 为太阳能直接辅助碳捕集提供了新的思路。

因此, 本研究提出聚光光伏-余热辅助胺法脱碳的光伏光热综合利用方式, 相较于单一的光热利用, 该系统将太阳能转化为了更高品位的电, 同时对于余热进行了更品位对口地利用。并针对该系统建立了聚光光伏-余热辅助胺法脱碳的能量转化模型, 研究了关键参数对光伏发电及碳捕集性能的影响规律, 并针对典型改造案例, 分析了新系统的优劣。

1 聚光光伏-余热辅助胺法脱碳系统

1.1 新系统框架

聚光光伏-余热辅助胺法脱碳系统如图1所示。该系统主要由聚光光伏-余热和胺法脱碳两部分组成,聚光光伏-余热部分由聚光砷化镓电池、菲涅尔聚光装置、光伏余热收集装置组成。胺法脱碳部分的主要流程为:燃煤电站排烟,经预处理单元进入吸收塔,脱碳烟气经水洗排入大气,吸收饱和的溶剂经解吸塔再生,释放CO₂完成捕集,解吸塔再沸器所需的热量由光伏余热提供。

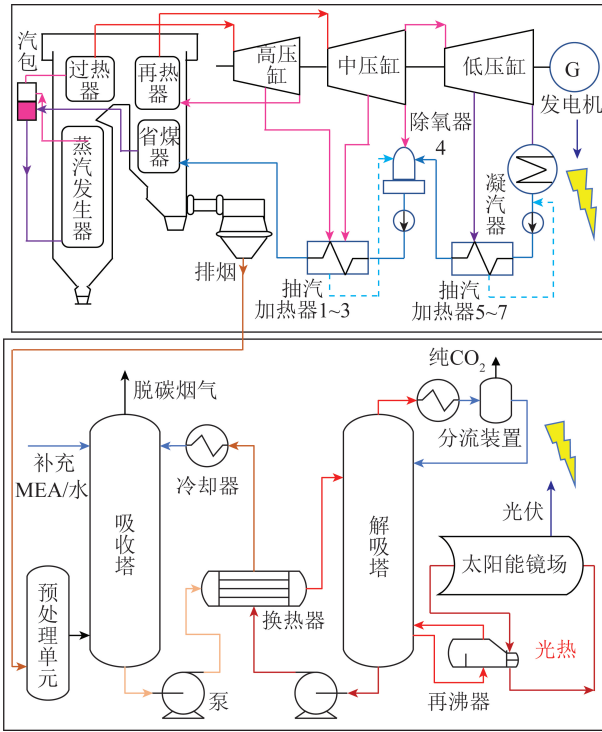


图1 聚光光伏-余热辅助胺法脱碳系统示意

Fig.1 Schematic diagram of concentrating photovoltaic-thermal assisted amine decarbonization system

1.2 聚光光伏-余热模型

1.2.1 聚光光伏模型

太阳光经聚光装置提升太阳能能流密度,再汇聚到砷化镓电池上,与电池带隙能匹配的波长范围的太阳光被转化为电能,其余转化为热。其能量平衡方程如下:

$$DNI \cdot A_{CPV} = E_{CPV} + Q_{optloss} + Q_{heatloss} + Q_{diss}, \quad (1)$$

其中,等式左边为系统接收到的总太阳能输入功率;DNI为单位面积的太阳直射辐照强度; A_{CPV} 为聚光集热面积; E_{CPV} 为聚光光伏产生的电能; $Q_{optloss}$ 为聚光光伏的光学损失; $Q_{heatloss}$ 为聚光光伏的热损耗; Q_{diss} 为聚光光伏余热。

本研究中,电池工作温度决定了余热的品位,同

时电池工作温度也会影响电池效率,因此在对电池模拟计算时,需要考虑温度的影响,聚光光伏产生的电能 E_{CPV} 计算公式为

$$E_{CPV} = DNI A_{CPV} \eta_{opt} \eta_{pv} \eta_{mod}, \quad (2)$$

式中, η_{opt} 为聚光装置的光学效率,一般菲涅尔聚光装置的光学效率取为85%^[8]; η_{pv} 为砷化镓电池的光电效率; η_{mod} 为电池模块效率,一般取90%^[9]。

光伏发电效率 η_{pv} 计算公式^[10]为

$$\eta_{pv} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{DNI \eta_{opt} C_{pv}}, \quad (3)$$

式中, J_{sc} 为短路电流; V_{oc} 为开路电压;FF为填充因子; C_{pv} 为聚光比。

$$J_{sc} = \int_{280}^{\infty} \frac{q \lambda EQE(T_{pv}) \eta_{opt} I(\lambda) C_{pv}}{hc} d\lambda, \quad (4)$$

式中, J_{sc} 为短路电流; q 为元电荷,取 1.6×10^{-19} C;EQE(T_{pv})为砷化镓电池的量子效率随光伏工作温度 T_{pv} 变化的函数; $I(\lambda)$ 为光谱辐照强度随波长的分布函数; h 为普朗特常数,取 6.63×10^{-34} J·s; c 为光速,取 3×10^8 m/s。

$$V_{oc} = \frac{nk_B T_{pv}}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right), \quad (5)$$

式中, V_{oc} 为开路电压; J_0 为反向饱和电流; n 为与电池材料相关的理想因子,为1~2; k_B 为玻尔兹曼常数,取 1.38×10^{-23} J/K。

$$J_0 = 1.5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g(T_{pv})}{nk_B T_{pv}}\right), \quad (6)$$

式中, $E_g(T_{pv})$ 为带隙能随温度 T_{pv} 变化的函数。

带隙能随温度的变化关系式^[11]为

$$E_g(T_{pv}) = E_g(0) - \frac{\alpha T_{pv}^2}{(T_{pv} + \beta)}, \quad (7)$$

其中, $E_g(0)$ 为砷化镓电池在温度为0 K时的带隙能; α 、 β 为与光伏电池材料有关的系数,对于砷化镓电池: $E_g(0) = 1.5216$ eV、 $\alpha = 8.871 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 572$ ^[11]。带隙能随温度的升高而降低,意味着光伏电池的EQE量子效率曲线随温度的升高向长波长区域扩展延伸^[12],更多的光子被吸收,导致 J_{sc} 增加。但温度过高时,EQE会急剧下降^[12]。尽管 J_{sc} 随温度的升高会增加,但 J_0 的增幅大于 J_{sc} ,所以 V_{oc} 会随温度的升高而降低。因此,温度对效率的影响主要是 J_{sc} 增加, V_{oc} 减少的权衡。

$$J_{dark} = J_0 \{ \exp[q(V + AJR_s)/nk_B T_{pv}] - 1 \}, \quad (8)$$

式中, J_{dark} 为暗电流^[13]; R_s 为串联寄生电阻; A 为单个光伏电池面积,取 0.9989 cm²; J 为电路中的电流。

$$J_{sh} = \frac{V + AJR_s}{AR_{sh}}, \quad (9)$$

其中, J_{sh} 为寄生电流; R_{sh} 为并联寄生电阻。对于砷化镓电池, 由光电效应引起的半导体电阻与光照强度的关系^[14]可表示为

$$R_s = 1.61 (\text{DNIC}_{pv} \eta_{opt})^{-1.07}, \quad (10)$$

$$R_{sh} = 12\,000 (\text{DNIC}_{pv} \eta_{opt})^{-0.8}, \quad (11)$$

$$J = J_{sc} - J_{dark} - J_{sh}, \quad (12)$$

其中, 电路中的电流等于短路电流减去暗电流和寄

生电流。通过式(1)~(12)对聚光光伏电池进行 Matlab 建模, 可得出电路中的电压最大值 V_{max} 、电流最大值 J_{max} , 填充因子 FF 表达式^[13]为

$$FF = \frac{V_{max} J_{max}}{V_{oc} J_{sc}}. \quad (13)$$

光伏电池在 AM1.5 光谱(1 000 W/m²)、温度 298 K 下的模拟结果与试验结果对比见表 1^[15]。关键参数误差均在 5% 以内, 验证了模型的准确性。

表 1 砷化镓电池模拟结果与试验结果对比

Table 1 Comparison between simulation results and experimental results of GaAs battery

项目	DNI/(W · m ⁻²)	$\eta_{pv}/\%$	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	FF/%
试验值	1 000	27.6 ± 0.8	1.107	29.6	84.1
模拟值	985	27.3	1.104	30.1	80.9
误差/%	1.50	1.08	0.27	1.69	3.80

1.2.2 光伏余热模型

光学损失 $Q_{optloss}$ 计算^[16]如下:

$$Q_{optloss} = \text{DNIA}_{CPV}(1 - \eta_{opt}). \quad (14)$$

热耗 $Q_{heatloss}$ 由对流和辐射散热损失组成, 其计算^[17]如下:

$$Q_{heatloss} = [h_{CPV}(T_{PV} - T_{amb}) + \varepsilon_{CPV}\sigma(T_{PV}^4 - T_{sky}^4)]A_{CPV}/C_{pv}, \quad (15)$$

其中, h_{CPV} 、 ε_{CPV} 分别为流换热系数和辐射换热系数^[17], $h_{CPV} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $\varepsilon_{CPV} = 0.9$; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{amb} 、 T_{sky} 分别为环境温度和天空温度, 天空温度取 $(T_{amb} - 8) \text{ } ^\circ\text{C}$ ^[18]; 联立式(15), 可得光伏余热 Q_{diss} 计算式为

$$Q_{diss} = \text{DNIA}_{CPV} - E_{CPV} - Q_{optloss} - Q_{heatloss}. \quad (16)$$

通过上述建模, 可得在 AM1.5 辐照强度下, 聚光光伏发电、光伏余热、其他损失 3 部分能量占比如图 2 所示。其中, 聚光光伏发电效率可达 30% 以上, 光伏余热约占太阳能的 60%, 太阳能的利用率可达 84% 以上。

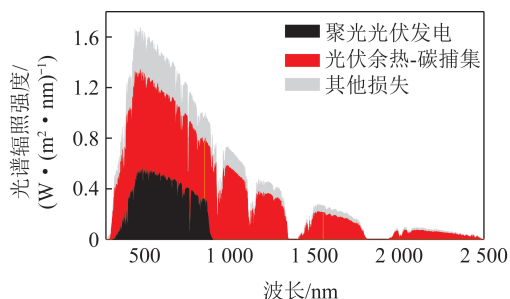


图 2 太阳能直接辅助脱碳能量分配示意

Fig.2 Schematic diagram of energy distribution of direct assisted decarbonization by solar energy

1.3 胺法脱碳模型

1.3.1 流程模型的建立

本研究中, 使用 Aspen Plus 软件对胺法脱碳进行模拟分析, 采用 ELECNRTL 物性方程模拟电解质溶液, 气相物性数据通过 Redlich-Kwong 静态方程计算, 采用 RateFrac 单元操作模型模拟气液传热传质, 是一个基于流率的非平衡模型, 不仅涉及平衡反应同时涉及动力学反应过程, 比传统平衡模型 (RadFrac) 更准确。反应塔选择填料式, 相较于板式塔具有流体阻力小、设备结构简单、易实现防腐措施等优点。单元操作块规格具体参数参考奥斯汀德克萨斯大学奥斯汀分校 2006 年试验工厂^[19]的运行数据, 脱碳系统框架如图 3 所示。

1.3.2 预处理单元

MEA 分离 CO₂ 的标准捕获流程^[20]一般为: 在脱碳前, 为防止其他酸性气体与 MEA 发生竞争反应, 需对烟气进行预处理, 脱除烟气中的 SO₂、NO_x。同时脱除飞灰颗粒物防止其在吸收塔内起泡, 影响吸收剂的再生性能。此外, 由于 CO₂ 的吸收反应是放热反应, 适当降低烟气温度可以提高 CO₂ 的吸收效果。本研究针对典型 600 MW 燃煤电站的排烟展开, 预处理后的烟气成分见表 2 (烟气总流率 24 kmol/s)。

表 2 燃煤电站烟气成分

Table 2 Flue gas composition of coal-fired power plant

成分	摩尔分数/%
CO ₂	14.29
H ₂ O	9.02
N ₂	73.44
O ₂	3.25

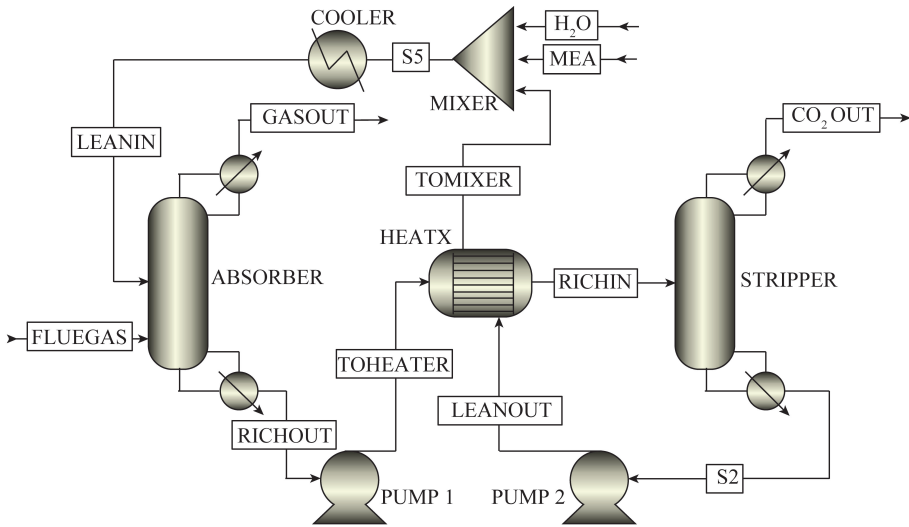


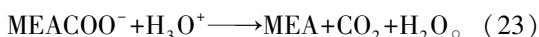
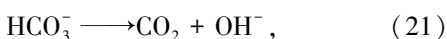
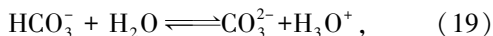
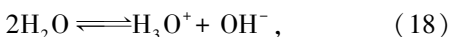
图3 Aspen Plus 胺法脱碳系统框架

Fig.3 Frame diagram of Aspen Plus amine decarbonization system

在模拟中作如下假设:预处理后的烟气仅包含上述成分,烟气中 CO_2 、 N_2 、 O_2 满足亨利定律,由于添加剂的作用,MEA 不与 O_2 发生反应。

1.3.3 CO_2 分离单元

在 CO_2 分离单元中,经过预处理后的 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 左右烟气从吸收塔底部进入,与吸收塔顶部喷淋的单乙醇胺水溶液逆向接触,溶剂与 CO_2 迅速发生反应生成较稳定的氨基甲酸盐,使 CO_2 脱除,脱除 CO_2 后的烟气经水洗后排入大气。富含氨基甲酸盐的溶剂(富液)通过富液泵进入解吸塔顶部,在 $100\sim 130\text{ }^\circ\text{C}$ 逆流再沸解吸塔中进行再生。塔顶的 CO_2 和大量蒸汽通过凝汽器冷却后进入分流装置,冷凝水回流至解吸塔,纯度 98% 的 CO_2 产品压缩封存用于其他用途。贫液从塔底流出,通过热交换器将进入解吸塔前的富液进行预热,同时降低自身的温度,再通过冷却器进一步降温回到吸收塔塔顶进行再次循环。另外,补充物流是弥补循环过程中损失的 MEA 和 H_2O 。模拟过程中,MEA- H_2O - CO_2 体系内发生的化学反应^[21] 主要为



Aspen Plus 可通过标准吉布斯自由能计算出平衡反应的平衡常数,动力学反应通过幂定律确定反应速率,简化的幂定律表达式为

$$r = kT^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \prod_{i=1}^N C_i^{a_i}, \quad (24)$$

其中, r 为反应速率; k 为指前因子; T 为绝对温度; m 为温度指数; E_a 为活化能; R 为气体常数; N 为反应中组分的数量; C_i 为 i 组分浓度; a_i 为反应方程中 i 组分的化学计量系数。其中因子 $m = 0$, k 、 E_a 取值见表 3^[22-23]。

表3 反应动力学参数

Table 3 Reaction kinetic parameters

反应序号	k	$E_a/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$
4	4.32×10^{13}	55 645.8
5	2.38×10^{17}	123 694.2
6	9.77×10^{10}	41 394.36
7	3.23×10^{19}	65 751

1.3.4 再生热耗分析

富液再生需要的热量 Q_{reb} 包含 3 部分^[24]: 解析 CO_2 反应所吸收的热量 Q_{rea} , 富液升温时所需的显热 Q_{sen} , 解吸塔再生气带走的热量即出水蒸汽的潜热 Q_{str} 。利用软件对胺法脱碳的模拟计算主要是针对解吸塔的热耗,通过工况参数对热耗影响的灵敏度分析,从而确定合适的工况条件。

$$Q_{\text{reb}} = Q_{\text{rea}} + Q_{\text{sen}} + Q_{\text{str}}. \quad (25)$$

在研究工况条件对热耗的影响前,引入化学吸收法常见的 2 个定义: CO_2 脱除率定义为烟气中被吸收的 CO_2 与未脱除前烟气中 CO_2 的摩尔比,即

$$\eta_{\text{removal}} = 1 - \frac{n_{\text{gasout}}(\text{CO}_2)}{n_{\text{fluegas}}(\text{CO}_2)}, \quad (26)$$

式中, $n_{\text{fluegas}}(\text{CO}_2)$ 、 $n_{\text{gasout}}(\text{CO}_2)$ 分别为烟气脱碳前后 CO_2 的摩尔流率。

CO₂贫液负载率定义为贫液中CO₂与MEA的摩尔浓度比,即

$$\eta_{\text{load}} = \frac{n(\text{CO}_2) + n_{\text{MEA}\text{COO}^-} + n(\text{HCO}_3^-) + n(\text{CO}_3^{2-})}{n_{\text{MEA}} + n_{\text{MEA}^+} + n_{\text{MEA}\text{COO}^-}}, \quad (27)$$

式中, $n(\text{CO}_2)$ 、 $n_{\text{MEA}\text{COO}^-}$ 、 $n(\text{HCO}_3^-)$ 、 $n(\text{CO}_3^{2-})$ 、 n_{MEA} 、 n_{MEA^+} 分别为对应物质的摩尔流率。

热耗随解吸塔压力的变化规律如图4所示,可知解吸塔压力从150 kPa增加到200 kPa时,热耗降低了约6%。因为再生反应为吸热反应,解吸塔压力越高,对应的沸点越高,而适当升温有利于反应的进行。不过,温度过高还会导致反应物的降级和腐蚀。一般压力在200 kPa左右^[25]。

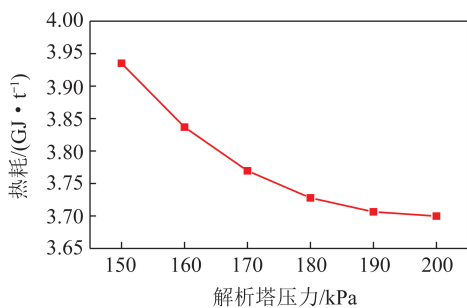


图4 热耗随解吸塔压力的变化规律

Fig.4 Variation of heat consumption with pressure of analytical tower

热耗随MEA质量分数的变化规律如图5所示,可知在保证贫液负载率、脱除率不变的情况下,MEA质量分数越高,溶液的循环量减少,反应吸收热及再生气所携带出的热量不变,而显热逐渐降低,从而导致再生所需能耗降低,但质量分数增加到35%以上,增幅趋于平缓,过高的质量分数会加重设备腐蚀,一般上限为30%^[26]。

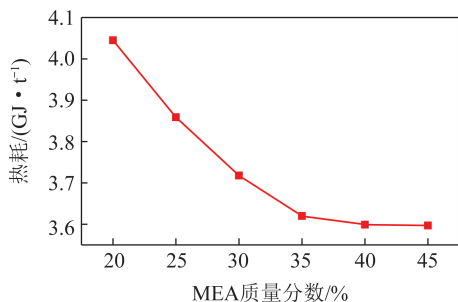


图5 热耗随MEA质量分数的变化规律

Fig.5 Variation of heat consumption with MEA mass fraction

热耗随脱除率的变化规律如图6所示,可知贫液负载率一定时,提高CO₂脱除率,一方面需要更多的溶剂循环流量,另一方面意味着从富液中尽可能多地解析出CO₂,其显热和反应吸收热均会增加,从而导致热耗显著上升。脱除率从70%增加到90%

时,热耗提高了约12.6%,且增幅逐渐增大,为满足工艺需求,一般脱除率不低于80%。脱除率为90%,热耗约为3.98 GJ/t,与Esbjerg试验项目^[27]脱除率89%时能耗4 GJ/t相近,验证了模型的准确性。

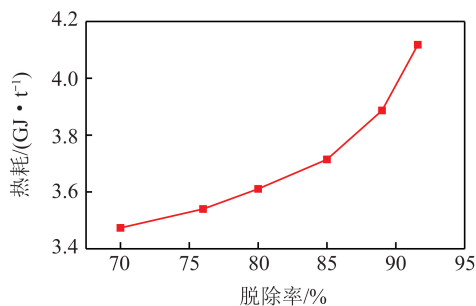


图6 热耗随脱除率的变化规律

Fig.6 Variation of heat consumption with the removal rate

热耗随贫液负载率的变化规律如图7所示,可知CO₂脱除率为85%时,贫液负载率越高,意味着再生程度越低,所需贫液循环流量越高,显热增加。但负载率过低时,需将富液中CO₂尽可能解析,再生能耗也会上升。因此,随着贫液负载率的提高,热耗先降低后增加,通过模拟可得,最佳贫液负载率(CO₂/MEA)在0.23 mol/mol附近,此时达到热耗最低为3.7 GJ/t,与Zhao等^[28]最佳负载率0.24 mol/mol对应的最低热耗3.72 GJ/t相近。

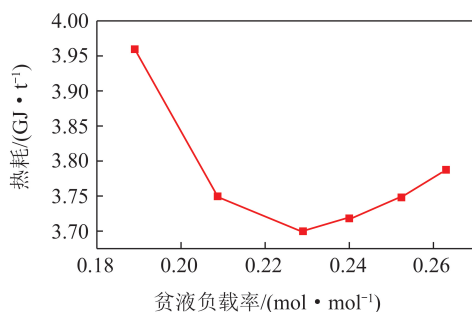


图7 热耗随贫液负载率的变化规律

Fig.7 Variation of heat consumption with the load rate of lean liquid

根据热耗的灵敏度分析确定脱碳流程的主要参数及结果见表4。

2 关键参数对光伏发电及碳捕集性能的影响

2.1 系统关键参数计算

光伏电池工作温度作为新系统的关键参数,既影响光伏电池的发电效率,也决定了碳捕集系统的捕集性能。其中,光伏发电量与碳捕集所需余热是不同品位的能量,为对其进行同维度比较,引入余热焓 $E_{q,\text{diss}}$ 的概念。

表4 MEA脱碳流程主要参数及结果
Table 4 Main parameters and results of MEA decarbonization process

流程	参数	数值
吸收塔 (填料塔)	进口烟气温度/℃	40
	进口贫液温度/℃	40
	塔顶压力/kPa	101
	MEA质量分数/%	30
	脱除率/%	85
解析塔 (填料塔)	贫液出口温度/℃	122
	CO ₂ 出口温度/℃	25
	塔顶压力/kPa	200
	贫液负载率/(mol·mol ⁻¹)	0.23
	热耗/(GJ·t ⁻¹)	3.7
热交换器 (逆流)	温差(热进口与冷出口)/℃	10

$$E_{q_{diss}} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_r}\right) Q_{diss} \eta_{ta}, \quad (28)$$

$$E_{sum} = E_{q_{diss}} + E_{cpv}, \quad (29)$$

其中, T_{amb} 为环境温度, 取 298 K; T_r 为再沸器传热介质温度, 取 $(T_{pv} - 10)$; η_{ta} 为集热器的热效率, 取 0.8; E_{sum} 为余热焓与光伏发电量之和, 其变化规律如图 8 所示。选取设计辐照为 800 W/m^2 、聚光比为 200, 当光伏电池工作温度从 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $185 \text{ }^\circ\text{C}$, 余热焓与光伏发电量之和呈上升趋势, 但增幅不断减小, 发电效率降低约 3 个百分点, 且工作温度越高对电池的其他影响诸如迁移率、寿命等尚未考虑在内。因此, 即使是聚光砷化镓电池, 其工作温度也不宜过高。一般解吸塔再沸器中传热介质与富液换热的最小节点温差为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[28], 根据 Aspen Plus 模拟结果, 再沸器出口贫液温度为 $122 \text{ }^\circ\text{C}$, 按照传热温差为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 计算, 传热介质侧温度为 $127 \text{ }^\circ\text{C}$ 。光伏余热集热器的进出口温度分别规定为 122 、 $132 \text{ }^\circ\text{C}$, 由此光伏电池工作温度在 $137 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右为宜。

辐照强度降低时, 余热量减少, 集热器内的传热介质升温减小, 介质平均温度降低, 与光伏电池的传热温差减小, 光伏电池的温度随之改变, 与此同时反应器温度也会变化, 通过计算得到设计辐照 800 W/m^2 下, 电池设计工作温度分别为 137 、 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 传热介质温度随辐照的变化结果, 如图 9 所示。通过计算可得, 辐照强度从 800 W/m^2 降至 500 W/m^2 时, 介质温度降低约 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。如果严格按照再沸器的传热温差, 将无法再满足再生热耗的品位需求, 因此, 为保证再生反应率, 设计温度应适当提高以应对辐

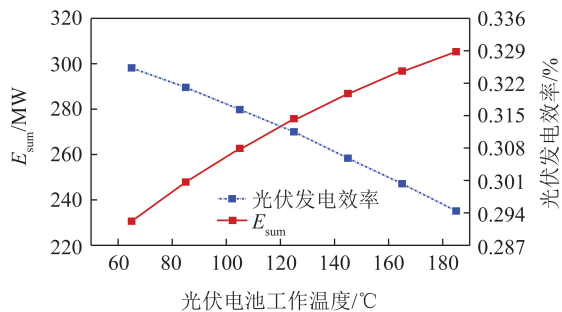


图8 出功及光电效率随光伏电池工作温度的变化规律
Fig.8 Variation of power output and photovoltaic efficiency with operating temperature of photovoltaic cells

照波动情况, 当设计温度为 $140 \text{ }^\circ\text{C}$, 根据计算可以满足要求。

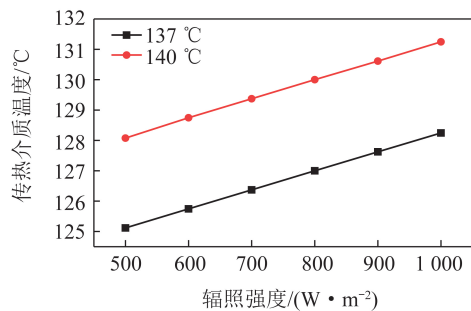


图9 传热介质温度随辐照强度的变化规律
Fig.9 Variation of heat transfer medium temperature with irradiation intensity

2.2 集成系统案例分析

本研究选取典型 600 MW 亚临界燃煤电站作为改造对象, 集成聚光光伏-余热辅助胺法脱碳系统, 计算新系统的发电性能及碳捕集性能的变化。与单一燃煤碳捕集以及单一聚光光伏电站进行比较。由碳捕集单元可知, 电站碳排放量为 543.24 t/h , 所需热耗为: 单位捕集热耗 (3.7 GJ/t) \times 电站碳排放量 (543.24 t/h) \times 脱除率 (85%) = 捕集总热耗 (474.58 MW)。此外辅助脱碳系统若包括压缩液化其电力成本高达 217 kWh/t ^[29], 经计算为满足新系统碳捕集需求, 电耗达 100 MW 。依据 2.1 节分析, 设计辐照为 800 W/m^2 , 聚光比为 200, 电池设计工作温度为 $140 \text{ }^\circ\text{C}$, 如果捕集电站的全部碳排放, 所需聚光集热面积为 0.985 km^2 。新系统与参比系统的对比结果见表 5。需说明的是, 为保证单一光伏发电系统性能最优, 电池工作温度为环境温度。单一燃煤碳捕集通过电站低压缸抽汽供能, 其对电站出功的影响依据弗留格尔公式以及汽轮机相对内效率-流量关系进行计算^[30]。

由表 5 可知, 与参比系统对比, 集成系统总发电

表5 系统主要参数及性能对比

Table 5 Comparison of main parameters and performance of the system

项目	单一燃煤碳捕集	单一光伏	新系统
辐照强度/($W \cdot m^{-2}$)	—	800	800
聚光集热面积/ km^2	—	0.985	0.985
聚光比	—	200	200
光伏电池接收的能量/MW	—	669.85	669.85
光伏电池工作温度/ $^{\circ}C$	—	25	140
捕集总热耗/MW	474.58	—	474.58
捕集电耗/MW	100	—	100
燃煤电站发电效率/%	34.96	—	40.97
光伏发电效率/%	—	33.34	30.72
光伏发电量/MW	—	200.99	185.20
系统总发电量/MW	411.98	200.99	685.20
碳捕集率/%	85	—	85
CO_2 捕集量/($t \cdot h^{-1}$)	461.75	—	461.75

量可达 685.2 MW,相较于单一燃煤碳捕集,在保证电站效率稳定的同时,增加光伏发电 185.2 MW,同时可借助光伏发电量满足新系统脱碳电耗,进一步降低了对电站出功的影响。相较于单一光伏系统,由于电池负温度效应^[13],电池温度越高光电效率越低,光伏发电量尽管降低了 15.79 MW,但占接收太阳能 60%的余热得到了品位对口地利用,新系统可以实现 CO_2 捕集 461.75 t/h。新系统的制约因素之一是占地面积过大,因此新系统更适合选址开阔的在建电站、坑口电站以及对现有光电-煤互补电站改造等。

在实际运行中,由于辐照强度的波动性,对新系统在典型日的性能进行评估,地区选址为宁夏银川,经度为 $38.48^{\circ}N$,纬度为 $106.22^{\circ}E$,海拔为 1 111.4 m,典型日选取为 7 月 19 日,气象数据来源于美国 NREL 实验室开发的 SAM 软件数据库,如图 10 所示。可知仅在 7:00~19:00 辐照强度大于 0,其峰值为 $902 W/m^2$,日辐照平均值为 $271.4 W/m^2$,典型日的系统光伏发电功率、碳捕集量变化与辐照强度变化同步。新系统的光伏日平均发电量为 61.8 MW,日平均碳捕集量为 155.6 t/h。为保证系统在夜间正常运行,需配备相应的储能系统。

如碳捕集系统全天运行,为保证系统的碳捕集量,需增加新系统的聚光面积。新系统碳捕集保证率随聚光面积的变化规律如图 11 所示。根据宁夏银川典型气象年资料,可得年平均辐照强度为 $162.8 W/m^2$,规定碳捕集保证率为实际碳捕集量与设计工况即 461.75 t/h 的比值,可以看到聚光面

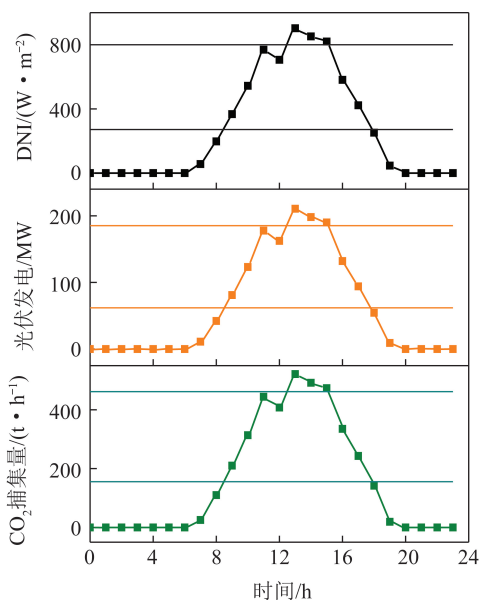


图 10 新系统在典型日的性能变化规律

Fig.10 Performance of the new system on a typical day

积每增加 $1 km^2$,碳捕集保证率上升 19.6 个百分点,如需实现碳捕集保证率达 80% 以上,需要约 $4 km^2$ 以上的聚光面积。此外,为保证系统在无太阳辐射期间捕集电站约 80% 的碳排放,需配备较大的储罐容量,因此 Mokhtar 等^[31]提出基于工程收益的开关切换方案,即夜间辐射不足时,通过汽轮机中低压缸抽汽供能。

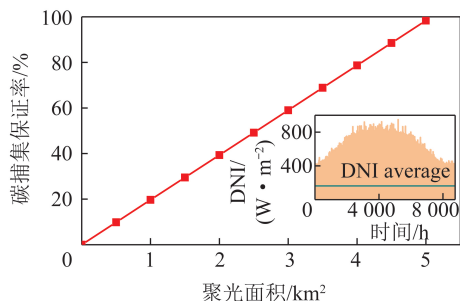


图 11 新系统碳捕集保证率随聚光面积的变化规律

Fig.11 Changes in the carbon capture guarantee rate of the new system with the concentration area

新系统为光煤互补电站开拓了新思路,通过辅助碳捕集的方式间接提高了电站效率。从燃煤侧考虑,通过利用光伏余热代替电站抽汽,消除了碳捕集对电站的能源惩罚。从太阳能侧考虑,将高品质的太阳能转化为电,并对低品位的光伏余热进行对口利用。相较于传统光煤互补电站,新系统实现了太阳能的高效利用以及化石能源的并行清洁利用。

3 结 论

本研究以太阳能直接辅助碳捕集利用方式为对象,建立了聚光光伏-余热辅助胺法脱碳的新系统,

通过对其能量转化模型的建立和分析,验证了聚光光伏余热在质和量上都具有辅助胺法脱碳的潜力,并探究了光伏电池工作温度及辐照强度对碳捕集性能以及光电效率的影响规律。通过对典型 600 MW 亚临界燃煤电站进行改造,与参比系统比较阐释了新系统的优越性,并对新系统在典型日及全年的运行性能进行了评估,具体结论如下:

1) 通过对新系统脱碳流程进行运行参数热耗灵敏度分析得出理想的运行参数,其对应的最低再生热耗为 3.7 GJ/t。

2) 综合考虑辐照变动以及对光伏发电、碳捕集性能的影响,确定聚光光伏-余热辅助胺法脱碳系统的电池最优工作温度为 140 °C。

3) 新系统相较于单一燃煤碳捕集系统,电站发电效率提升 6.01 个百分点,同时增加光伏发电 185.2 MW;与单一光伏发电系统比较,光伏发电量虽降低 15.79 MW,但可实现 CO₂ 捕集 461.75 t/h。

4) 新系统在典型日的光伏日均发电为 61.8 MW,日均碳捕集量为 155.6 t/h,为实现年碳捕集保证率达 80% 以上,需要约 4 km² 以上的聚光面积。

参考文献 (References):

[1] EA I. World energy outlook 2019. [2020-09-29]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.

[2] HUANG B, XU S S, GAO S W, et al. Industrial test and techno-economic analysis of CO₂ capture in Huaneng Beijing coal-fired power station [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(11): 3347-3354.

[3] SAGHAFIFAR M, GABRA S. A critical overview of solar assisted carbon capture systems; Is solar always the solution? [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 92: 21.

[4] ZHAI R R, LI C, QI J W, et al. Thermodynamic analysis of CO₂ capture by calcium looping process driven by coal and concentrated solar power [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 251-263.

[5] ZHAI R R, QI J W, ZHU Y, et al. Novel system integrations of 1 000 MW coal-fired power plant retrofitted with solar energy and CO₂ capture system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 1133-1145.

[6] KHALILPOUR R, MILANI D, QADIR A, et al. A novel process for direct solvent regeneration via solar thermal energy for carbon capture [J]. *Renewable Energy*, 2017, 104: 60-75.

[7] WIDYOLAR B K, ABDELHAMID M, JIANG L, et al. Design, simulation and experimental characterization of a novel parabolic trough hybrid solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector [J]. *Renewable Energy*, 2017, 101: 1379-1389.

[8] BUONOMANO A, CALISE F, PALOMBO A. Solar heating and cooling systems by CPVT and ET solar collectors: A novel transient simulation model [J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 588-606.

[9] FADHEL M I, SOPIAN K, DAUD W R W, et al. Review on advanced of solar assisted chemical heat pump dryer for agriculture produce [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2): 1152-1168.

[10] GREEN M A. 太阳能电池工作原理, 工艺和系统的应用 [M]. 李秀文译. 北京: 电子工业出版社, 1987: 263.

GREEN M A. Solar cell working principle, process and system application [M]. LI Xiuwen Translate. Beijing: Electronic Industry Press, 1987: 263.

[11] SINGH P, RAVINDRA N M. Temperature dependence of solar cell performance - an analysis [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 101: 36-45.

[12] MAROS A, GANGAM S, FANG Y, et al. Hightemperature characterization of GaAs single junction solar cells [C] // 2015 Ieee 42nd Photovoltaic Specialist Conference, New York: IEEE, 2015.

[13] 珍妮纳尔逊. 太阳能电池物理 [M]. 高扬译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.

JENNY Nelson. The physics of solar cells [M]. GAO Yang Translate. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011.

[14] SHEN K, LI Q, WANG D, et al. CdTe solar cell performance under low-intensity light irradiance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 472-480.

[15] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 37) [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2011, 19(1): 84-92.

[16] LI W J, HAO Y. Efficient solar power generation combining photovoltaics and mid-/low-temperature methanol thermochemistry [J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 377-385.

[17] LI W J, HAO Y. Explore the performance limit of a solar PV - thermochemical power generation system [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 843-850.

[18] 赵雅文. 中低温太阳能与煤炭热互补机理及系统集成 [D]. 北京 中国科学院大学, 2012.

ZHAO Yawen, Thermodynamics investigation on integrating mid-temperature solar thermal energy and coal-fired power system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.

[19] DUGAS R E. Pilot plant study of carbon dioxide capture by aqueous monoethanolamine [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2006.

[20] FREGUIA S, ROCHELLE G T. Modeling of CO₂ capture by aqueous monoethanolamine [J]. *Aiche Journal*, 2003, 49(7): 1676-1686.

[21] LI B H, ZHANG N, SMITH R. Rate-based modelling of CO₂ capture process by reactive absorption with MEA [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, 39: 13-18.

[22] PINSENT B, PEARSON L, ROUGHTON F. The kinetics of combination of carbon dioxide with hydroxide ions [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1956, 52: 1512-1520.

[23] HIKITA H, ASAI S, ISHIKAWA H, et al. The kinetics of reactions of carbon dioxide with monoethanolamine, diethanolamine and triethanolamine by a rapid mixing method [J]. *The Chemical Engineering Journal*, 1977, 13(1): 7-12.

[24] LI K, LEIGH W, FERON P, et al. Systematic study of aqueous

- ous monoethanolamine (MEA) - based CO₂ capture process: Techno-economic assessment of the MEA process and its improvements[J]. Applied energy, 2016, 165: 648-659.
- [25] ABU-ZAHRA M R, SCHNEIDERS L H, NIEDERER J P, et al. CO₂ capture from power plants. Part I: A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine[J]. International Journal of Greenhouse gas control, 2007, 1(1): 37-46.
- [26] JASSIM M S, ROCHELLE G T. Innovative absorber/stripper configurations for CO₂ capture by aqueous monoethanolamine[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8): 2465-2472.
- [27] TOBIESEN A, MEJDELL T, SVENDSEN H F. A comparative study of experimental and modeling performance results from the CASTOR Esbjerg pilot plant[C]//8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Trondheim, Norway: [s. n.], 2006.
- [28] ZHAO Y W, HONG H, ZHANG X S, et al. Integrating mid-temperature solar heat and post-combustion CO₂-capture in a coal-fired power plant[J]. Solar Energy, 2012, 86(11): 3196-3204.
- [29] PEETERS A N M, FAAIJ A P C, TURKENBURG W C. Techno-economic analysis of natural gas combined cycles with post-combustion CO₂ absorption, including a detailed evaluation of the development potential[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1(4): 396-417.
- [30] 王瑞林. 光煤互补系统评价方法与变辐照聚光集热主动调控机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
WANG Ruilin, The evaluation of solar-aided coal-fired power generation system and the active-regulation mechanism of the solar concentrating and conversion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [31] MOKHTAR M, ALI M T, KHALILPOUR R, et al. Solar-assisted-post-combustion carbon capture feasibility study[J]. Applied Energy, 2012, 92: 668-676.