

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.013

太阳能聚光光伏-余热碳捕集利用方式分析

Analysis of utilization modes combining concentrating photovoltaic power generation
and photovoltaic residual heat driving carbon capture

邢晨健, 钱煜, 周燃, 王瑞林*

XING Chenjian, QIAN Yu, ZHOU Ran, WANG Ruilin*

(南京师范大学 能源与机械工程学院, 南京 210046)

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

摘 要: 燃煤电站碳捕集是缓解全球温室效应的重要举措。燃煤电站燃烧后碳捕集技术的设备安装在电站尾部, 改造、集成较为方便, 但捕集过程能耗极高, 单纯依靠电厂自身供能严重影响发电效率。在砷化镓聚光光伏电池的转化过程中存在大量余热, 且余热温度大于钾基碳捕集热源温度, 具有驱动钾基碳捕集反应的潜力。本研究提出了聚光光伏-余热碳捕集的光伏光热综合利用方式, 建立聚光砷化镓-余热钾基碳捕集的能量转化模型, 分析了光伏发电温度及辐照度对光伏发电及碳捕集性能的影响规律。将其集成于某 600 MW 亚临界燃煤电站: 相较于单一燃煤碳捕集系统, 集成系统发电效率提升 6.56 个百分点, 总发电量提升约 50%; 相较于单一光伏发电系统, 集成系统的光伏发电效率降低 4.49 个百分点, 但额外增加碳捕集量 380.82 t/h。本研究提出的余热利用方式缩小了碳捕集能耗对燃煤电站发电效率的影响, 实现了太阳能在发电及碳减排上的双效利用, 为太阳能高效梯级利用提供了新思路。

关键词: 光伏发电; 钾基 CO_2 吸收剂; 光伏光热综合利用; 燃煤发电; 光伏余热; 碳捕集; 电站效率; 太阳能

中图分类号: TK 512

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)04-0084-05

Abstract: Carbon capture in coal-fired power stations is an important measure to alleviate the global greenhouse effect. The equipment for coal-fired power stations taking post-combustion carbon capture technology is generally placed at the tails of stations. It is conducive to the integration and transformation of existing power stations, but is of high energy consumption rate. Powering the carbon capture equipment solely by the coal-fired power stations will impact their power generation efficiencies. There is abundant residual heat in the conversion process of gallium arsenide (Ga-As) concentrated PV batteries, and the temperature is higher than that required as potassium-based carbon capture heat source, which shows potential in driving potassium-based carbon capture reaction. Therefore, this study proposes a comprehensive utilization method of concentrated photovoltaic power generation and carbon capture with residual heat, and explore the influence of PV operating temperature and irradiation on the performance of concentrated photovoltaic power generation and carbon capture, after establishing a model of energy conversion by Ga-As and one of carbon capture by potassium-based absorbent driven by residual heat. Applying it into a 600 MW subcritical coal-fired power station, compared it with a carbon capture system driven coal-fired power station, the power generation efficiency in the integrated system increased by 6.56 percentage points and its total power generation increased by 50% roughly. Compared it with a concentrated PV system, the efficiency of PV power generation is reduced by 4.49 percentage points, but the additional carbon capture per hour is increased by 380.82 t. The method proposed alleviates the impact of carbon capture energy consumption on the efficiency of coal-fired power stations, which realizes the solar energy dual usage of within power generation and carbon emission reduction, and provides a new idea for the efficient cascade utilization of solar energy.

Keywords: photovoltaic power generation; potassium-based CO_2 capture absorbent; comprehensive utilization of concentrated photovoltaic power and photovoltaic heat; coal-fired power generation; photovoltaic of residual heat; carbon capture; efficiency of coal-fired power station; solar power

0 引言

温室气体过量排放导致的全球变暖问题日益

突出, 2017 年全球平均气温较工业化前高出了约 1.1 $^{\circ}\text{C}$, 2013—2017 年全球平均温度达到了有记录以来的最高值^[1]。在各类温室气体对温升的贡献中, CO_2 的贡献度达到 60% 以上^[2]。中国燃烧化石燃料产生的 CO_2 排放量从 1973 年的 881 Mt 增长为

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-04-02

2017年的9 294 Mt,占世界CO₂排放量的比重从5.7%增长为28.3%^[1]。在我国的碳排放结构中,燃煤电站排放的CO₂占全国排放总量的60%以上^[3],也是最集中的固定排放源。因此,对燃煤电站CO₂进行减排势在必行。

作为CO₂减排的有效手段,碳捕集的方式众多,可分为燃烧前捕集、富氧燃烧捕集和燃烧后捕集^[4]。燃烧后捕集技术包括吸收法、吸附法和膜分离法等,其设备安装在电站尾部,继承、改造较为方便。在吸收法中,碱金属基固体吸收剂在捕集CO₂时既具有物理吸附法的再生能耗低、对设备腐蚀性小等优点,也具有化学吸收法的吸收容量大、选择性高等优点,因而近年来有大量相关研究^[5]。

主流的碱金属基固体吸附剂有钙基、镁基、钠基、钾基吸附剂。钙和镁的反应温度较高,反应时易出现烧结等现象,导致碳捕集效率下降以及高温热量损失。钾和钠的工作温度较低,且吸附剂性能在多次循环中可保持稳定^[2]。与钠基吸附剂相比,钾基吸附剂在碳酸化速率及再生转化率等方面更具有优势^[2]。二氧化碳捕集最大的问题为再生过程能耗过高,即便采用再生能耗较低的钾基碳捕集,依靠电厂自身能量捕集CO₂,电站发电效率仍会因之降低约10%^[6]。借助光伏余热等其他形式能源满足电站碳捕集需求是较为可行的策略。

光伏发电在各类太阳能利用形式中发展最快,但受限于光谱与光伏材料带隙能的匹配性,大量太阳辐射未能被光伏电池转换为电力,而是以热量的形式耗散至环境^[7]。目前商用硅光伏电池效率为10%~20%^[8]。经过材料及结构的不断优化,聚光砷化镓光伏电池实验室最高效率已到达46%^[9]。即便如此,仍有超过一半的太阳能损失变为废热。聚光砷化镓电池工作温度较高,余热仍具有较高的利用潜力,众多学者在光伏光热化学^[10]、光伏余热有机朗肯发电^[11]及光伏余热制冷^[12]等方面取得了突破。

聚光砷化镓光伏电池的余热在量上具有满足钾基吸附剂再生能耗的潜力。光伏余热温度可达到200℃^[10],亦可满足钾基碳捕集对于能量品位的要求。目前常见的利用太阳能作为热源驱动碳捕集的过程是太阳能的集热利用。Zhao Y W^[13]提出了一种中温太阳能热与燃煤电站CO₂捕集的耦合系统,利用约300℃的太阳能热替代电厂的高质量抽汽来加热给水,再通过低压抽汽为胺基吸收剂再生提供能量,该系统捕集1个典型600 MW电站的全部碳排放约需要0.32 km²的镜场。Zhang X L^[14]研究了煤-太阳能联合驱动钙循环碳捕集系统的性能,

集成到某1 019 MW超超临界电站时的热效率为35.37%,整体效率损失9.63%,效率损失的原因有热回收效率低、聚光集热的高温热损失、CO₂的循环耗电量等。

本研究提出聚光光伏-余热碳捕集的光伏光热综合利用方式,建立光伏-碳捕集的能量转化模型,研究关键参数对光伏发电及碳捕集性能的影响规律,并将聚光光伏-余热碳捕集方式与燃煤电站相结合,验证该方式对系统性能的提升效果。

1 聚光光伏-余热碳捕集能量转化模型

1.1 模型介绍

本模型主要分为聚光光伏和碳捕集2部分。聚光光伏部分由三结砷化镓电池、菲涅尔透镜、光伏余热利用装置组成。碳捕集部分主要分为碳酸化及再生反应2个过程,具体流程如图1所示:烟气经尾气处理装置后,进入碳酸化反应器进行反应,而后产物(KHCO₃)进入再生反应器吸收光伏电池的余热进行再生反应,释放高纯度的CO₂,完成捕集;再生后的K₂CO₃再次进入碳酸化反应器捕集CO₂。

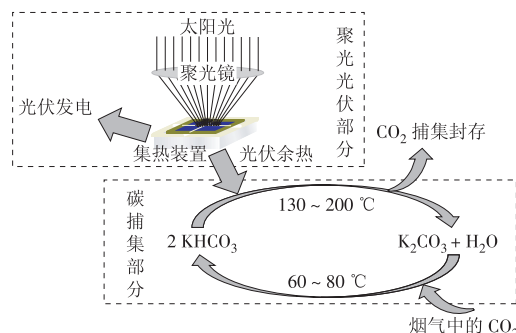


图1 光伏发电-光伏余热驱动钾基CO₂捕集示意

Fig. 1 Sketch of PV power generation and potassium-based CO₂ capture driven by PV residual heat

1.2 聚光光伏能量转化

太阳光经聚光后照射在三结砷化镓电池上,与带隙能匹配的波长范围内的太阳光被转换为电能,其余的光谱转变为余热,其能量平衡方程为

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

式中:等式左边为系统接收到的总太阳能输入功率; DNI 为单位面积的阳光直射辐照度; 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。

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

式中: η_{opt} 为聚光镜的光学效率,一般菲涅尔透镜的光学效率取为85%^[15]; η_{mod} 为聚光光伏电池模块的效率,一般取为90%^[16]; η_{cell} 为三结砷化镓(InP/

InGaAs/Ge) 光伏电池的光电效率。根据文献[16],

$$\eta_{\text{cell}} = 0.298 + 0.014 \ln C + (6.97 \times 10^{-5} \ln C - 0.000715)(T_{\text{CPV}} - 25) \quad (3)$$

式中: T_{CPV} 为光伏电池的工作温度; C 为聚光比, 此公式适用于 $C \leq 200$ 时, 此处取 $C = 200$ 。根据文献[17],

$$Q_{\text{optloss}} = DNI \times A_{\text{CPV}} (1 - \eta_{\text{opt}}) \quad (4)$$

式(1)中的 Q_{heatloss} 由对流和辐射散热损失组成, 根据文献[18], 其计算表达式为

$$Q_{\text{heatloss}} = \left[h_{\text{CPV}} (T_{\text{CPV}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_{\text{CPV}} \sigma (T_{\text{CPV}}^4 - T_{\text{sky}}^4) \right] A_{\text{CPV}} / C \quad (5)$$

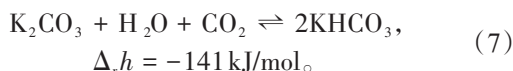
式中: $h_{\text{CPV}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\varepsilon_{\text{CPV}} = 0.9$, 分别为对流换热系数和辐射换热系数^[18]; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{amb} 和 T_{sky} 分别为环境温度和天空温度, T_{sky} 可以取值为 $(T_{\text{amb}} - 8)^\circ\text{C}$ ^[19]。

联立式(1)~(5)可得光伏余热的计算式

$$Q_{\text{diss}} = DNI \times A_{\text{CPV}} - E_{\text{CPV}} - Q_{\text{optloss}} - Q_{\text{heatloss}} \quad (6)$$

1.3 钾基 CO_2 捕集反应

钾基固体吸附剂捕集 CO_2 的化学反应式为,



$\Delta_r h$ 为钾基碳捕集反应的标准反应热, 反应条件为温度 298 K、1 个标准大气压。 K_2CO_3 的再生反应属于非催化非均相反应, 气体穿过 K_2CO_3 产物层, 从吸附剂颗粒向外扩散, 如果在非定温情况下定温试验中得出的动力学机理函数和阿伦尼乌斯方程同样适用, 可以得到转化率与对应反应温度的普适积分关系式^[2], 如式(8)。本研究利用再生反应的热物性参数以及式(8), 通过流程模拟系统软件 Aspen plus 进行了反应的模拟。

$$g(\eta_r) = \frac{A}{\beta} (T - T_0) \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (8)$$

式中: $g(\eta_r)$ 为动力学机理函数的积分形式; η_r 为反应率; A 为指前因子; β 为加热速率; E_a 为表观活化能; R_g 为普适气体常量; T 为反应温度; T_0 为反应的起始温度。

2 关键参数对光伏发电及碳捕集的影响

2.1 关键参数计算

光伏电池工作温度既影响其发电效率, 也作用于碳捕集过程中吸附剂再生反应率。基于上节内容, 利用 Aspen Plus 对采用吉布斯自由能反应器 (RGibbs Reactor) 的钾基吸附剂再生反应过程进行模拟, 并采用气固反应中较多的 PR-BM 方法进行计

算求解^[20]。在 Matlab 软件内构建聚光跟踪、光电转换及余热传递模型。并基于热量、温度等参数的传递连接将 2 个软件内的模型相连, 并对光伏电池工作温度与光电效率、再生反应率间的影响关系进行探究, 结果如图 2 所示。

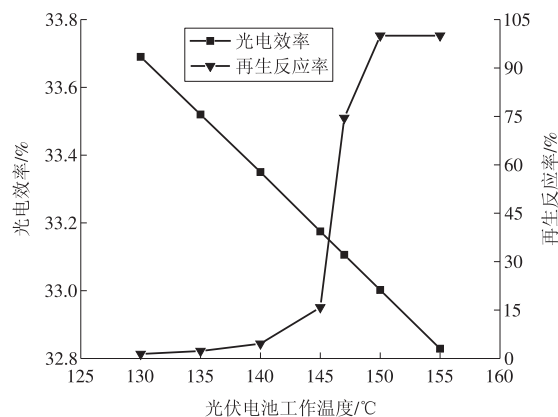


图 2 再生反应率和光电效率随电池工作温度的变化

Fig. 2 Regenerating rate and photoelectric efficiency varying with photovoltaic cell working temperature

光伏电池工作温度越高, 光电效率越低, 再生反应率越高, 当光伏电池工作温度在 150 °C 以上时, 再生反应器转化率达 100%, 此时光电效率为 33.0%。其再生转化率越高, 单位质量的 CO_2 捕集能耗越低。为减少碳捕集能耗, 保证再生反应率, 光伏电池工作温度应大于 150 °C。

选取 $800 \text{ W}/\text{m}^2$ 为设计辐照度, 当辐照度降低时, 光伏余热量会降低, 集热器内的传热介质温升减小, 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发生改变, 与此同时反应器的温度也会变化, 通过计算, 可以得到光电效率及再生反应率随辐照度变化结果 (如图 3 所示)。当光伏电池设计温度为 150 °C, 辐照强度低于 $800 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 其再生反应率会有所降低。为保证再生反应率保持在 100%, 光伏电池设计温度的选择应高于 150 °C, 但光伏电池工作温度越高光电效率会降低, 因此光伏电池工作温度选取在 155 °C 较为合适。

赵文文^[21]通过试验得到, 反应温度大于 120 °C 后反应速率已足够快, 在 15 min 内即可实现 80% 以上的再生反应率。因而, 本文将光伏电池工作温度选定为 155 °C 在动力学上亦有一定的合理性。

2.2 集成系统案例分析

本研究选取了某典型 600 MW 的亚临界燃煤电站^[13], 将聚光光伏-余热碳捕集技术与该电站相集成, 计算该集成系统碳捕集及发电性能变化。据文献[13]的数据, 典型 600 MW 亚临界燃煤电站的 CO_2

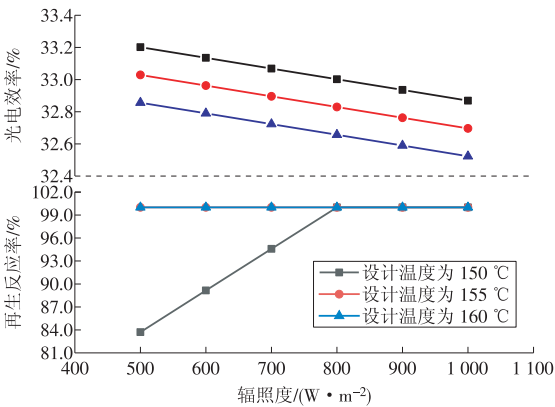


图3 辐照强度对再生反应率及光电效率的影响规律
Fig.3 The influence of irradiation intensity on regeneration rate and photoelectric efficiency

排放量为 117.54 kg/s。假设捕集率(碳捕集装置实际完成的碳捕集量/接收的电站碳排放量)为 90%^[22],据 Aspen Plus 计算,再生反应能耗为 150.85 kJ/mol CO₂,即每释放 1 mol CO₂需要消耗 150.85 kJ 的能量,通过公式:单位捕集能耗(150.85 kJ/mol)×捕集率(90%)×二氧化碳排放质量(117.54 kg/s)/二氧化碳摩尔质量(44 g/mol)=捕集总能耗(362.67 MW),可得完成 1 个 600 MW 燃煤电站碳捕集的总能耗。依据 2.1 节中的分析确定光伏工作温度为 155℃,集热器进出口温度分别为 140,150℃,设计辐照度为 800 W/m²。典型 600 MW 电站碳捕集需要消耗的能量为 362.67 MW,在工作温度为 155℃,聚光比为 200 条件下,单位聚光集热面积产生的光伏余热量为 467 W/m²的情况下,所需的聚光集热面积为 0.78 km²。

由计算得到的聚光光伏参数及燃煤电站参数可得到集成系统性能,并与单一光伏及单一燃煤碳捕集系统进行比较。设计参数及计算结果见表 1。需要说明的是,为保证单一光伏发电系统性能最优,设置其工作温度为环境温度。

单一燃煤碳捕集借助汽轮机低压缸抽汽为碳捕集供能,会导致汽轮机出功的减少。计算过程基于典型 600 MW 燃煤电站参数,根据弗留格尔公式和汽轮机相对内效率-流量关系进行计算^[23],得出电站效率降低了 6.56 百分点。当设计辐照度为 800 W/m²,光伏电池工作温度为 155℃时,聚光光伏与燃煤电站集成系统的总发功率可达 755.99 MW,相较于采用抽汽作为单一能源驱动碳捕集装置的燃煤电站发电量增加了 50%,相较于单一光伏发电系统,光伏发电量减少 21.35 MW。尽管光伏发电量有所降低,但是占光伏电池接收能量 69%的光伏余热得到了高效利用,其集成系统可捕集封存 CO₂ 约 380.82 t/h。

表 1 系统主要参数及效果对比			
Tab.1 Comparison results of main parameters of the system			
项目	单一-燃煤 碳捕集	单一 光伏	集成系统
辐照度/(W·m ⁻²)	—	800.00	800.00
聚光集热面积/km ²	—	0.78	0.78
聚光比	—	200.00	200.00
光伏电池每秒接收的能量/MW	—	527.93	527.93
光伏电池工作温度/℃	—	25	155
集热器进/出口温度/℃	140/150	—	140/150
再生反应器温度/℃	130	—	135
燃煤电站发电效率/%	34.41	—	40.97
光伏发电效率/%	—	37.32	32.83
光伏发电功率/MW	—	177.34	155.99
系统总发电功率/MW	503.86	177.34	755.99
碳捕集率/%	90	—	90
CO ₂ 捕集量/(t·h ⁻¹)	380.82	—	380.82

根据光伏发电-光伏余热驱动钾基 CO₂ 捕集集成系统在燃煤系统的利用情况,从燃煤侧考虑,利用太阳能光伏余热代替燃煤电站的抽汽,消除了碳捕集对燃煤电站效率的影响,维持了燃煤发电性能;从太阳能侧考虑,光伏余热提供了二氧化碳捕集所需反应热,实现了太阳能在发电及碳减排上的双效利用,为太阳能高效梯级利用提供了新的思路。

3 结论

本研究以聚光光伏-余热碳捕集光伏光热综合利用方式为对象,建立聚光砷化镓-余热钾基碳捕集能量转化模型,验证碳捕集与聚光光伏互补利用的可行性,分析了光伏工作温度及辐照度对光伏及碳捕集性能的影响规律。将聚光光伏-余热碳捕集技术集成于 600 MW 亚临界燃煤电站,通过与参比系统比较阐释了聚光光伏-余热碳捕集对系统综合性能的提升。本文的具体结论如下。

- (1)综合考虑辐照变动对光伏发电及碳捕集性能的影响,确立聚光砷化镓光伏电池-余热驱动碳捕集中光伏电池的最优工作温度为 155℃。
- (2)相较于单一使用抽汽驱动碳捕集系统的燃煤发电站,太阳能聚光光伏-余热碳捕集技术与燃煤电站的集成系统使电站的发电效率提升 6.56 百分点,总发电量提升约 50%。
- (3)太阳能聚光光伏-余热碳捕集技术与燃煤电站的集成系统较于单一光伏发电系统,光伏发电效率降低 4.49 百分点,但每小时额外碳捕集量提升 380.82 t。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. Statement on the state of the global climate in 2018[R]. 2018.
- [2] 赵传文. 钾基固体吸收剂脱除 CO₂ 特性及机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.
- [3] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳排放数据核算[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(7): 878-887.
LIU Z, GUAN D B, WEI W. Carbon emission accounting in China (in Chinese)[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(7): 878-887.
- [4] KANNICHE M, GROS-BONNIVARD R, JAUD P, et al. Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(1): 53-62.
- [5] SUN J, LIANG C, TONG X L, et al. Evaluation of high-temperature CO₂ capture performance of cellulose-templated CaO-based pellets[J]. Fuel, 2019, 239: 1046-1054.
- [6] NELSON T, GREEN D, BOX P, et al. Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents[R]. Research Triangle Institute, 2007.
- [7] 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.
- [8] KABIR E, KUMAR P, KUMAR S, et al. Solar energy: Potential and future prospects[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 894-900.
- [9] 李文甲. 光伏-光热-热化学互补的太阳能利用理论-方法与系统[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- [10] 魏鑫, 李文甲, 裴刚, 郝勇等. 基于光谱分频的太阳能光伏-甲烷重整互补发电系统[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(3): 497-504.
WEI X, LI W J, PEI G, Hao Yet al, Hybrid solar power generation system integrating concentrating photovoltaics and methane reforming with spectral splitting[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(3): 497-504.
- [11] TOURKOV K, SCHAEFER L. Performance evaluation of a PVT/ORC (photovoltaic thermal/organic Rankine cycle) system with optimization of the ORC and evaluation of several PV (photovoltaic) materials[J]. Energy, 2015, 82: 839-849.
- [12] MITTELMAN G, KRIBUS A, DAYAN A. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(9): 2481-2490.
- [13] 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.
- [14] ZHANG X L, LIU Y G. Performance assessment of CO₂ capture with calcination carbonation reaction process driven by coal and concentrated solar power[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 13-24.
- [15] 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(3): 588-606.
- [16] 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.
- [17] LI W J, HAO Y. Efficient solar power generation combining photovoltaics and mid-/low-temperature methanol thermochemistry[J]. Applied Energy, 2017, 202: 377-385.
- [18] LI W J, HAO Y. Explore the performance limit of a solar PV-thermochemical power generation system[J]. Applied Energy, 2017, 206: 843-850.
- [19] 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.
- [20] WANG R L, HONG H, Sun J, et al. A solar hybrid system integrating concentrating photovoltaic direct steam generation by chemical heat pump[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 856-865.
- [21] 赵文文. 钾基 CO₂ 吸收剂催化再生反应特性及机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [22] KNUUTILA H, SVENDSEN H F, ANTILA M. CO₂ capture from coal-fired power plants based on sodium carbonate slurry; a systems feasibility and sensitivity study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(2): 143-151.
- [23] 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.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

邢晨健(1997—), 男, 江苏南京人, 在读硕士研究生, 从事太阳能综合利用方面的研究工作(E-mail: 18021528597@163.com)。

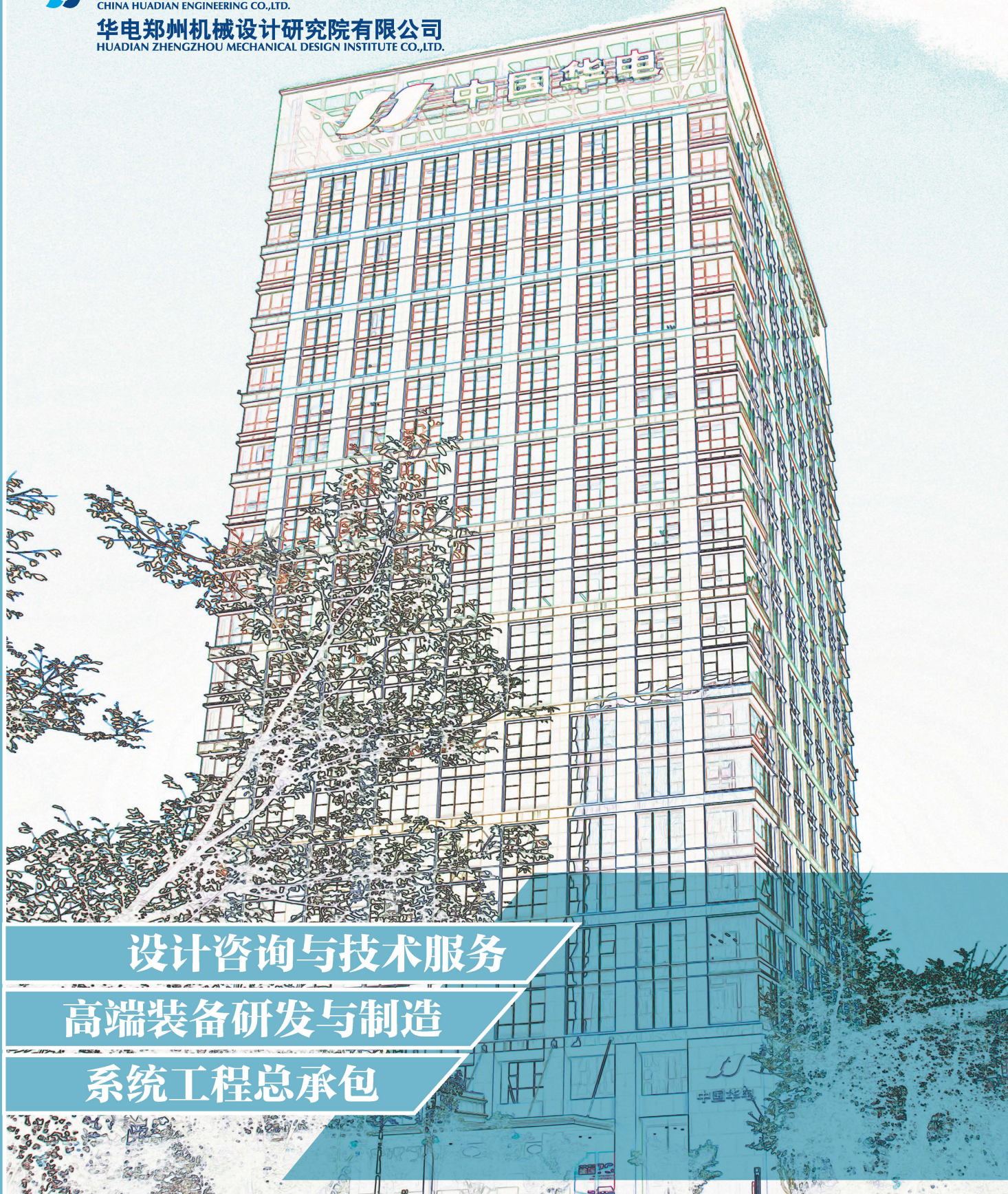
王瑞林*(1992—), 男, 山西长治人, 讲师, 工学博士, 从事太阳能综合利用方面的研究工作(E-mail: wangruilin@njnu.edu.cn)。





中国华电科工集团有限公司
CHINA HUADIAN ENGINEERING CO., LTD.

华电郑州机械设计研究院有限公司
HUADIAN ZHENGZHOU MECHANICAL DESIGN INSTITUTE CO., LTD.



设计咨询与技术服务

高端装备研发与制造

系统工程总承包

电话: 0371-58501491 传真: 0371-58501234 网址: www.hdmdi.com
地址: 河南省郑州市郑东新区龙子湖湖心岛湖心环路 27 号 邮编: 450046