

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.008

# 槽式太阳能聚光集热-燃煤发电碳捕集系统研究

Research on a carbon capture system coupling parabolic trough solar collectors with coal-fired power generating units

钱煜, 颜爱晶, 邢晨健, 王瑞林\*

QIAN Yu, YAN Aijing, XING Chenjian, 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:** 燃煤电站已成为我国最大的 CO<sub>2</sub> 排放源, 开展燃煤电站碳减排是我国 2060 年前实现碳中和的必经之路。相较于其他碳捕集技术, 钾基固体吸收剂捕集 CO<sub>2</sub> 具有捕集效率高、反应能耗低等优势, 但过高的再生能耗会大幅影响燃煤电站性能。槽式太阳能聚光集热的聚光温度可满足钾基固体吸收剂再生反应的要求, 由此建立了槽式太阳能集热辅助燃煤发电碳捕集耦合系统。通过建立槽式太阳能聚光集热模型及碳捕集反应模型, 获取了聚光集热温度、集热工质流量等关键参数对系统综合性能的影响规律。将该系统集成于某 330 MW 燃煤电站, 系统性能分析结果表明: 相较于单一燃煤碳捕集系统, 该系统设计条件下汽轮机出力增加 29.85 MW, 综合发电效率提升 10.3%; 采用优化运行方案后, 典型日的全天碳捕集量增至 312.96 t, 日均能量利用率相对提高 15.84%。

**关键词:** 碳中和; 碳捕集; 钾基固体吸收剂; 太阳能; 槽式太阳能聚光集热; 燃煤电站; 发电效率

**中图分类号:** TK 512; X 511      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-1951(2021)06-0061-08

**Abstract:** Coal-fired power stations have become the largest CO<sub>2</sub> emission source in China. To achieve carbon neutrality before 2060, we must reduce CO<sub>2</sub> emission in coal-fired power plants. Compared with other carbon capture technologies, Potassium based solid absorbent has the advantages of high capture efficiency and low reaction energy consumption. But its high energy consumption in regeneration greatly affects the performance of coal-fired power plants. The temperature kept by the solar collectors of trough solar collectors can meet the requirements of the regeneration reaction of potassium based solid absorbent. Therefore, a carbon capture system coupled parabolic trough solar collector was set up to coordinated control the CO<sub>2</sub> discharged from coal-fired power generating units. The effects of key parameters such as the solar concentrators' temperature and the working fluid' flow rate on the comprehensive performance of the system can be obtained based on the model for heat concentration and CO<sub>2</sub> capture. Compared with the single coal-fired carbon capture system, the carbon capture system coupling parabolic trough solar collectors with coal-fired power generating units is more effective, whose steam turbine output increases by 29.85 MW increase and comprehensive power generation efficiency increases by 10.3% under the design condition. Adopted the optimized operation scheme, the carbon capture capacity of the system on a typical day has increased to 312.96 t and its daily mean energy utilization rate has increased by 15.84%.

**Keywords:** carbon neutrality; carbon capture; potassium based solid absorbent; solar energy; trough solar collector; coal-fired power plant; power generation efficiency

## 0 引言

当前, 由于过量的温室气体排放, 全球气候变暖, 进而引发了海平面上升、降水分布异常、洪水干旱频发等一系列环境问题。根据世界气象组织(WMO)发布的《2019年全球气候状况声明》<sup>[1]</sup>, 2019年结束时, 全球平均气温比工业化前高出 1.1℃。

如果温室气体以目前的水平持续上升, 未来 5 年全球气温会创下新的年度记录。各类温室气体中, CO<sub>2</sub> 对温升的贡献度最大, 达到 60%<sup>[2]</sup>。我国已成为世界最大的 CO<sub>2</sub> 排放国, 根据英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计年鉴 2020》<sup>[3]</sup>, 2019 年我国化石燃料燃烧所排放的 CO<sub>2</sub> 量为 9 825.8 Mt, 占世界 CO<sub>2</sub> 排放量的 28.8%。在我国的能源消费结构中, 煤炭消费量占化石能源消费量的 70%<sup>[4]</sup>, 而 60% 的煤用于燃煤电站发电。燃煤电站已成为我国最大的 CO<sub>2</sub>

排放源,进行燃煤电站减排是我国 2060 年前实现碳中和的必经之路。

CO<sub>2</sub>的捕集是碳减排的重要途径,捕集煤等化石燃料燃烧过程中产生的 CO<sub>2</sub>技术路线众多,按照不同的尾气来源和工艺流程,工业 CO<sub>2</sub>捕集技术一般分为燃烧前捕集、燃烧中脱碳和燃烧后捕集三大类。燃烧后捕集 CO<sub>2</sub>主要面向燃煤、燃油和燃气电站,可在已有的电站装置中直接加装脱碳设备,具有改造费用低的优势。燃烧后捕集 CO<sub>2</sub>分为吸收法、吸附法、膜分离法 3 种,相较于其余方法,碱金属基固体吸收剂吸收 CO<sub>2</sub>具有再生能耗低、对设备腐蚀性小、循环效率高、选择性高等优点<sup>[5]</sup>,具有广阔的应用前景。

碱金属基固体吸收剂通过碳化反应与再生反应脱除烟气中的 CO<sub>2</sub>,目前常选用钙基、镁基、钾基、钠基。相较于钙基与镁基,钾基固体吸附剂的工作温度在 200 ℃<sup>[2]</sup>左右,工作温度较低,不易出现烧结等现象,碳捕集效率较高。相较于钠基,钾基固体吸附剂的碳化反应较快、转化率高。但钾基固体吸收剂再生时仍需要大量的能量,如果仅依靠电站抽汽驱动碳捕集反应,则要以降低电站效率为代价<sup>[6]</sup>,给电站经济性和汽轮机热力性能造成严重的不利影响。

针对此问题,部分学者提出将太阳能集热技术与燃煤电站 CO<sub>2</sub>捕集技术相结合。Wibberley 等<sup>[7]</sup>提出将太阳能集热场收集的热能用于解吸塔内再沸器的热源,实现 CO<sub>2</sub>的解吸。Plaza 等<sup>[8]</sup>提出使用太阳能作为预热器的热源,配合三级绝热闪蒸的新形式,代替原有的单乙醇胺(MEA)法中的解吸器。邢晨健等<sup>[9]</sup>提出利用聚光光伏余热驱动燃煤电站钾基碳捕集。Cohen 等<sup>[10]</sup>对太阳能与燃烧后碳捕集技术结合的方式进行了归纳,提出低温和高温 2 种太阳能辅助化学吸收的方法,指明使用太阳能辅助化学吸收在技术上的可行性。

槽式太阳能聚光集热技术是目前最为成熟的太阳能热利用技术。其原理是利用抛物槽式聚光镜,将太阳光聚焦于焦线处的金属真空吸热管上,将太阳能转化为热能加以利用<sup>[11]</sup>。槽式太阳能聚光集热温度可达 350~550 ℃<sup>[12]</sup>,从能量品位上看满足驱动钾基固体吸收剂再生反应的要求。

本研究提出槽式太阳能集热辅助燃煤发电碳捕集耦合系统,通过建立槽式太阳能聚光集热模型、碳捕集反应模型,研究关键参数对槽式太阳能聚光集热效率、碳捕集性能的影响规律。将该系统集成于燃煤电站,研究其对燃煤电站发电效率、碳减排的作用。

## 1 槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统建模

### 1.1 系统介绍

本文主要研究通过槽式太阳能聚光集热器吸收太阳能,从而驱动钾基固体吸收剂再生反应,实现燃煤电站尾气的脱碳处理。槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统如图 1 所示。

该系统主要由聚光集热模块、钾基碳捕集模块和燃煤发电模块组成。燃煤电站发电产生的尾气经尾气处理装置后通入钾基碳化反应器,通过碳化反应 CO<sub>2</sub>被捕集,同时 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>转变为 KHCO<sub>3</sub>;太阳能通过槽式太阳能聚光集热器转变为热能,为钾基固体吸收剂再生反应供能,高纯 CO<sub>2</sub>被释放, KHCO<sub>3</sub>重新再生为 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>进入下一个循环。

### 1.2 槽式太阳能聚光集热模型

太阳辐射包含直射辐射和散射辐射,能被槽式太阳能聚光集热器利用的只有垂直于集热器开口平面入射的直射辐射部分。太阳直射辐射产生的能量为

$$Q_{\text{inc}} = IA, \quad (1)$$

式中: $A$ 为槽式太阳能聚光集热器开口平面被太阳直射辐射到的面积; $I$ 为单位面积太阳直射辐射度。

太阳光首先照射到反射器,再通过反射器的反射汇聚到中间的金属吸热管上。太阳光与槽式太阳能聚光集热器的开口平面存在夹角,因此存在余弦损失;同时,因为这个夹角的存在,金属管的端部会出现无法接收到光线的情况,产生端部损失。查阅文献可知,计算中普遍将端部损失折算入余弦损失  $Q_{\text{loss,cos}}$  中,余弦损失计算公式为<sup>[12]</sup>

$$Q_{\text{loss,cos}} = Q_{\text{inc}}(1 - k_{\text{IAM}} \cos \theta), \quad (2)$$

$$\theta = \arccos[\cos \theta_z \cos \beta + \sin \beta \sin \theta_z \times \cos(\gamma_{\text{solar}} - \gamma_{\text{PTC}})], \quad (3)$$

$$k_{\text{IAM}} = 1 - (7 \times 10^{-4} \theta + 3.6 \times 10^{-5} \theta^2) / \cos \theta, \quad (4)$$

式中: $\theta$ 为槽式太阳能聚光集热器入射角,定义为太阳光线同集热器聚光镜开口面法向的夹角; $k_{\text{IAM}}$ 为入射角修正系数; $\theta_z$ 为天顶角,即太阳光线同地面法向的夹角; $\beta$ 为槽式太阳能聚光集热器旋转跟踪的角度; $\gamma_{\text{solar}}$ 为太阳方位角; $\gamma_{\text{PTC}}$ 为槽式太阳能聚光集热器方位角。上述角度的计算可参考文献[13]。

太阳光从接收器反射到中间金属管的过程中,由于聚光镜等设备自身存在光学缺陷,不可避免地会产生光学损失。光学损失  $Q_{\text{loss,opt}}$  的确定方式为

$$Q_{\text{loss,opt}} = Q_{\text{inc}} \cos \theta k_{\text{IAM}}(1 - \eta_{\text{opt}}), \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{opt}}$ 为槽式太阳能聚光集热器的光学效率。

槽式集热器将光能转换为热能并加热接收器中工质的过程中会产生散热损失  $Q_{\text{loss,heat}}$ ,其定义为

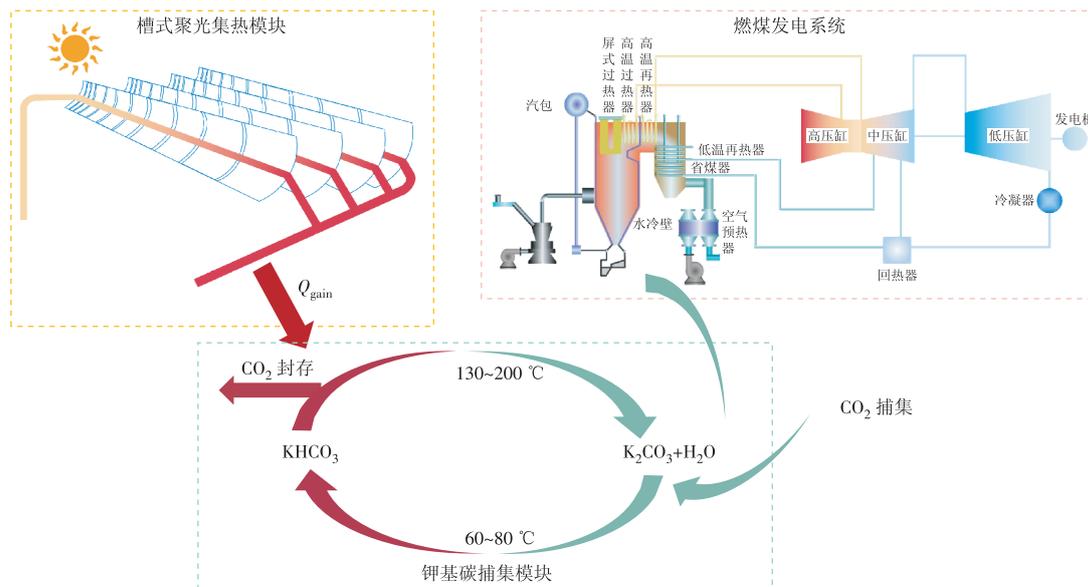


图 1 槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统示意

Fig. 1 Schematic of the carbon capture system integrated parabolic trough solar collectors

$$Q_{\text{loss, heat}} = (\alpha_1 \Delta t_{\text{amb}} + \alpha_2 \Delta t_{\text{amb}}^4) \frac{A}{b}, \quad (6)$$

式中:  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为散热损失系数, 查阅相关文献<sup>[13]</sup>, 其数值分别定为 0.40 和  $1.25 \times 10^{-8}$ ;  $\Delta t_{\text{amb}}$  为金属吸热管外表面温度与环境温度的差值;  $b$  为槽式太阳能聚光集热器开口宽度。

最终, 槽式太阳能聚光集热器提供的热量为

$$Q_{\text{gain}} = Q_{\text{inc}} - (Q_{\text{loss, cos}} + Q_{\text{loss, opt}} + Q_{\text{loss, heat}}). \quad (7)$$

对于金属吸热管内部的工质来说, 这部分热量全部被用于提升温度, 因此又有

$$Q_{\text{gain}} = q_{m, h} c_p (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}), \quad (8)$$

式中:  $q_{m, h}$  为金属吸热管内部工质的质量流量;  $t_{\text{in}}, t_{\text{out}}$  分别为集热器进、出口温度;  $c_p$  为集热工质定压比热容, 此处选用广泛使用的 VP-1 导热油, 该导热油  $c_p$  的计算公式可由文献[14]给出。

聚光集热效率  $\eta_{\text{col}}$  是评判槽式太阳能聚光集热性能的重要依据, 直接影响系统运行的经济性, 其计算公式为

$$\eta_{\text{col}} = f_{\text{IAM}} \cos \theta \cdot \eta_{\text{opt}} k_{\text{end}} k_{\text{sh}} f_c - \frac{\alpha_1 \Delta t_{\text{amb}} + \alpha_2 \Delta t_{\text{amb}}^4}{IS_a}, \quad (9)$$

式中:  $k_{\text{end}}$  为集热器端部系数;  $k_{\text{sh}}$  为集热器排间遮挡系数;  $f_c$  为集热器聚光镜的洁净系数, 0.97;  $S_a$  为单位吸收管长对应的开口镜面积,  $5.76 \text{ m}^2$ 。

集热器端部系数  $k_{\text{end}}$  的计算公式为

$$k_{\text{end}} = 1 - f/L \times (1 + b^2/48f^2) \tan \theta, \quad (10)$$

式中:  $f$  为集热器焦距;  $L$  为单排集热器长度。

集热器排间遮挡系数  $k_{\text{sh}}$  的计算公式为

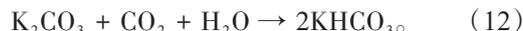
$$k_{\text{sh}} = d_R \cos \theta_z / (b \cos \theta), \quad (11)$$

式中:  $d_R$  为集热器排间距离。

### 1.3 碳捕集反应模型

钾基固体吸收剂捕获二氧化碳是建立在碳酸钾、二氧化碳、水蒸气和碳酸氢钾之间的可逆反应。

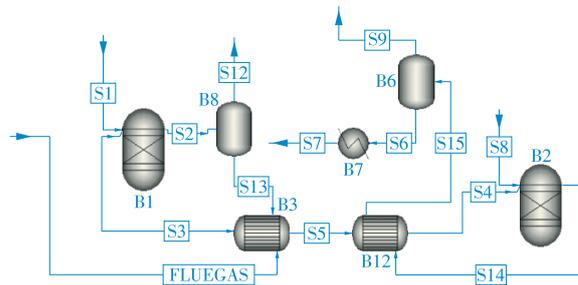
吸收剂碳酸化反应:



吸收剂再生反应:



基于上述反应, 本文在 Aspen Plus 软件中进行碳捕集模块建模, 其中锅炉烟气余热利用过程、 $\text{CO}_2$  碳酸化反应过程、 $\text{KHCO}_3$  预热过程、钾基固体吸收剂再生反应过程等均在软件中模拟, 如图 2 所示。采用活性炭作为固体吸收剂的负载, 依据相关文献<sup>[15]</sup>, 负载量定为 30%。



B1.碳酸化反应器; B2.再生反应器; B3, B12.逆流换热器; B6, B8.闪蒸器; B7.加热器; FLUEGAS.进入碳捕集系统的电厂尾气物流; S1.钾基固体吸收剂的进料物流; S2.锅炉烟气与钾基固体吸收剂发生碳酸化反应后的产物物流; S3.电厂尾气与碳酸化反应产物经过换热后的锅炉烟气流; S4.碳酸化反应产物的液相物流与再生反应产物经过换热后的冷流体出口物流; S5.电厂尾气与碳酸化反应产物的液相物流经过换热后的冷流体出口物流; S6.经过换热后的再生反应产物闪蒸后的液相物流; S8.  $\text{N}_2$  进料物流; S9.经过换热后的再生反应产物闪蒸后的蒸汽物流; S12.碳酸化反应产物经过闪蒸后的蒸汽物流; S13.碳酸化反应产物经过闪蒸后的液相物流; S14.钾基固体吸收剂再生反应的产物物流; S15.碳酸化反应产物的液相物流与再生反应产物经过换热后的热流体出口物流。

图 2 碳捕集反应系统模拟

Fig. 2 Simulation of the carbon capture reaction system

根据 Aspen Plus 模拟结果可得  $\text{CO}_2$  捕集率、 $\text{K}_2\text{CO}_3$  再生率与温度之间的关系, 如图 3—4 所示。

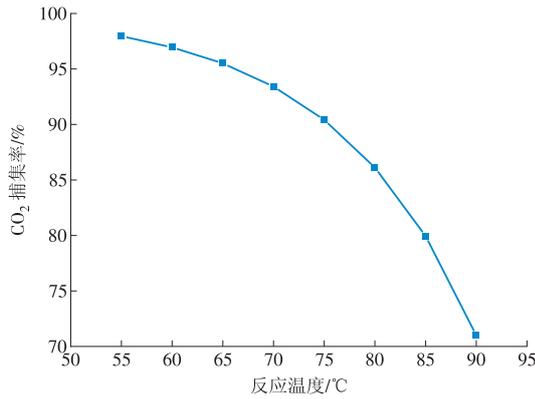


图3 反应温度与CO<sub>2</sub>捕集率之间的关系

Fig. 3 CO<sub>2</sub> capture rate varied with reaction temperature

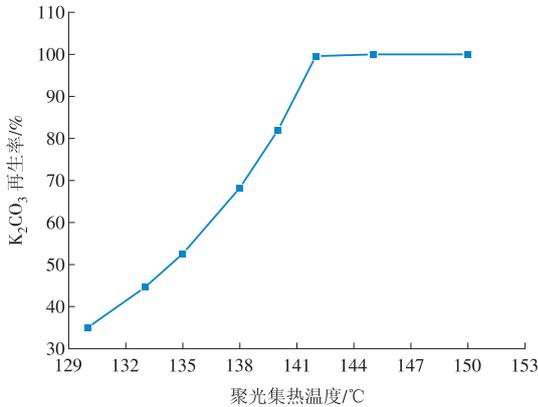


图4 聚光集热温度与K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>再生率之间的关系

Fig. 4 Regeneration rate of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> varied with collectors' temperature

根据前人研究结果,钾基吸收剂可在60~80℃时发生碳酸化反应<sup>[15]</sup>,与Aspen Plus的模拟结果吻合。由于碳酸化反应为放热反应,随着温度的升高,平衡反应逆向移动,碳酸化反应率逐渐下降,CO<sub>2</sub>捕集率也随着降低。参照燃煤电站的运行参数,进入碳捕集系统的锅炉烟气温度为130℃,与碳酸化反应产物的液相流股换热后(如图2所示),温度降至85℃左右,当反应温度为85℃时,CO<sub>2</sub>捕集率约为80%。

根据模拟结果,聚光集热温度在143℃以上时,再生反应率达100%。由于再生反应率越高,单位质量的CO<sub>2</sub>捕集能耗越低,为降低碳捕集反应能耗,需保证钾基固体吸附剂的完全再生,因此聚光集热温度应大于143℃。由于聚光集热温度越高,系统热损耗越大,为保障系统的经济运行,需要在满足再生反应率的前提下,使聚光集热温度尽量低。

## 2 关键参数对系统性能的影响

### 2.1 关键参数计算

基于上述计算结果,在Matlab软件中计算确定满足碳捕集需求的聚光集热温度与聚光集热量。

本文选用ET-150型抛物槽式太阳能集热器<sup>[16]</sup>

进行计算,相关参数见表1。

表1 ET-150型抛物槽式太阳能集热器主要参数  
Tab. 1 Main parameters of an ET-150 parabolic trough solar collector

项目	参数
单个集热阵列长度/m	150
开口宽度/m	5.77
金属吸热管外径/mm	70
光学效率/%	76.5

本文选取华北地区典型日为设计工况,正午太阳入射角取28.9°,设计辐照度为600 W/m<sup>2</sup>,集热管长度为600 m。由于集热管内导热油工质与钾基固体吸附剂之间的传热过程属于液-固传热,传热温差取50℃左右,故将集热管入口工质温度定为200℃。

将相关参数代入计算模型,可得聚光集热过程中聚光集热效率与管中工质流量之间的关系,如图5所示。

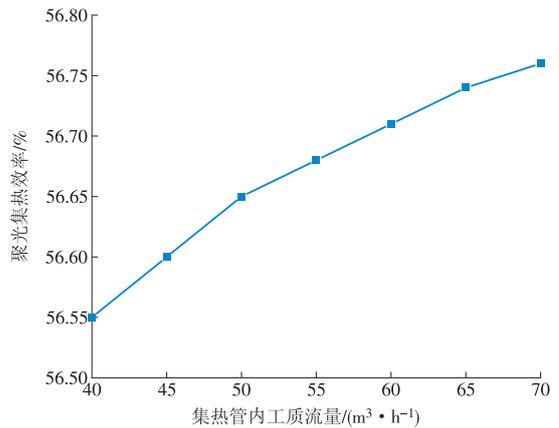


图5 聚光集热效率与集热管内工质流量之间的关系  
Fig. 5 Collector efficiency varied with the working fluid flow rate in the collector tube

随着集热管内工质流量的增大,聚光集热效率与聚光集热量呈现明显上升趋势,原因在于随着工质流量的增大,聚光集热温度降低,集热管内传热介质与外界环境间的温差降低,集热过程的散热损失将大幅减少。由图5可知,当管内工质流量为70 m<sup>3</sup>/h时,聚光集热效率为56.76%,聚光集热量为1.17 MW,聚光集热温度为215.77℃。因此,为实现系统太阳能的高效利用,保证聚光集热量,槽式太阳能聚光集热温度应低于215.77℃。

## 3 典型案例分析

本文基于典型的330 MW燃煤电站,将电站尾气通入钾基固体吸附剂碳捕集系统进行脱碳处理,利用太阳能槽式太阳能聚光集热系统为碳捕集系

统供能。根据已有的燃煤电站数据<sup>[17]</sup>, 330 MW 燃煤电站的二氧化碳产生量为 78.24 kg/s, 根据 Aspen Plus 模拟结果, 碳酸化过程中碳捕集率取 80%。当活性炭的负载量为 30%、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的再生反应率为 100% 时, 碳酸化过程的放热量为 161.05 MW, 再生反应过程的吸热量为 184.60 MW。

由槽式太阳能聚光集热模块的模拟数据可得, 当设计辐照度为 600 W/m<sup>2</sup>、工质流量为 70 m<sup>3</sup>/h、聚光集热温度为 215.77 °C 时, 单个集热阵列可提供的热量为 292.5 kW。由于 1 个聚光集热器回路一般由 4 个太阳能集热阵列(SCA)组成, 通过计算可得聚光集热器回路数为 157.77, 由于只能布置整数个回路, 故需设置 158 个聚光集热器回路。槽式太阳能聚光集热耦合 330 MW 燃煤电站碳捕集系统主要参数见表 2。

表 2 槽式太阳能聚光集热耦合 330 MW 燃煤电站碳捕集系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of the carbon capture system in the 330 MW coal-fired power plant

项目	参数
辐照度/(W·m <sup>-2</sup> )	600
集热管内工质流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	70
聚光集热温度/°C	215.77
聚光集热效率/%	56.76
聚光集热器回路数	158
CO <sub>2</sub> 捕集量/(t·h <sup>-1</sup> )	225.33

为进一步评价集成系统的性能, 将案例系统与单一燃煤碳捕集系统进行对比分析。单一燃煤碳捕集系统仅利用汽轮机的抽汽为碳捕集供能。典型的 330 MW 燃煤电站发电系统如图 6 所示。

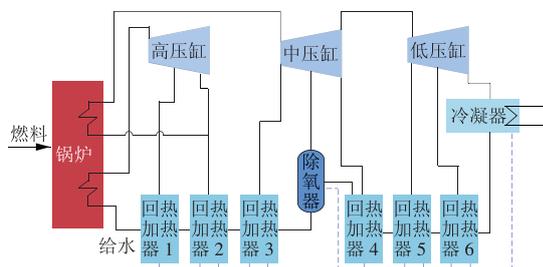


图 6 330 MW 燃煤电站发电系统

Fig. 6 Power generation system of the 330 MW coal-fired power station

给水在锅炉中加热为过热蒸汽, 随后进入高压缸膨胀做功; 蒸汽离开高压缸后, 重新进入锅炉再热; 再热蒸汽在中、低压缸内做功后进入冷凝器冷凝; 冷凝水经过 6 个回热加热器加热, 重新进入锅炉进行下一次循环。在汽水循环过程中, 分别从高中低压缸引出部分抽汽进入回热加热器, 提供回热所

需的热量。

基于表 3 的 330 MW 燃煤电站发电系统参数, 可得各个抽汽回热过程的抽汽份额, 由此可计算出汽轮机组在设计工况下的总出力为 337.874 MW。

表 3 330 MW 燃煤电站发电系统参数

Tab. 3 Parameters of the power generation system in the 330 MW coal-fired power plant

项目	单位	参数
额定功率	MW	330
给水压力/温度	MPa/°C	16.70/272.1
主蒸汽压力/温度	MPa/°C	16.70/538.0
再热器入口蒸汽压力/温度	MPa/°C	3.86/329.7
再热器出口蒸汽压力/温度	MPa/°C	3.47/538.0
发电标准煤耗	g/(kW·h)	305

根据碳捕集系统的计算可得, 钾基固体吸附剂再生反应温度为 220 °C, 反应吸热量为 184.60 MW。为使抽汽温度满足集热温度的需求, 选择抽取进入第 3 个回热器的蒸汽, 该股蒸汽的压力为 3.47 MPa、温度为 538 °C。为满足反应集热量的需求, 抽汽份额为 22.4%。汽轮机流量改变时, 各级相对内效率也随之改变, 计算公式为<sup>[18]</sup>

$$\eta_T = \eta_{T,r} (0.809 + 0.409 \frac{q_m}{q_{m,r}} - 0.218 \frac{q_m^2}{q_{m,r}^2}), \quad (14)$$

式中:  $q_{m,r}$  为额定工况下汽轮机内工质的流量;  $q_m$  为变工况下汽轮机内工质的流量;  $\eta_{T,r}$  为额定工况下汽轮机的相对内效率。

变工况下, 汽轮机内工质压强的下降与流量有关, 其关系由弗留格尔公式确定<sup>[19]</sup>

$$\frac{q_m}{q_{m,r}} = \sqrt{\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{p_{in,r}^2 - p_{out,r}^2}} \sqrt{\frac{t_{0,r}}{t_0}}, \quad (15)$$

式中:  $p_{in}, p_{out}$  为变工况下工质的进、出口压力;  $p_{in,r}, p_{out,r}$  为额定工况下工质的进、出口压力;  $t_{0,r}$  为额定工况下级前的温度;  $t_0$  为变工况下级前的温度。

通过相对内效率随汽轮机流量变动的计算公式与弗留格尔公式, 可确定变工况下汽轮机的相对内效率与理想焓降。由此可得, 采用单一燃煤碳捕集系统时, 汽轮机的出力为 308.023 MW, 相比于耦合系统, 出力减少 29.850 MW, 燃煤电站发电效率降低 10.3%。系统主要参数及效果对比见表 4。

#### 4 典型日变工况运行

上一节计算是在设定的辐照度和太阳入射角条件下进行的, 但实际生产生活中, 辐照度、太阳入射角不是固定值, 会根据不同的情况而变化。本节在前文的基础上, 根据华北地区四季的太阳辐照

表 4 系统主要参数及效果对比

Tab. 4 Comparison of main parameters and performance of the systems

项目	单一燃煤碳捕集系统	案例系统
辐照度/(W·m <sup>-2</sup> )		600
聚光集热器回路数		158
聚光集热温度/°C		215.77
再生反应器温度/°C	150	150
汽轮机出力/MW	308.023	337.874
电站发电效率/%	31.21	34.41
CO <sub>2</sub> 捕集量/(t·h <sup>-1</sup> )	225.33	225.33

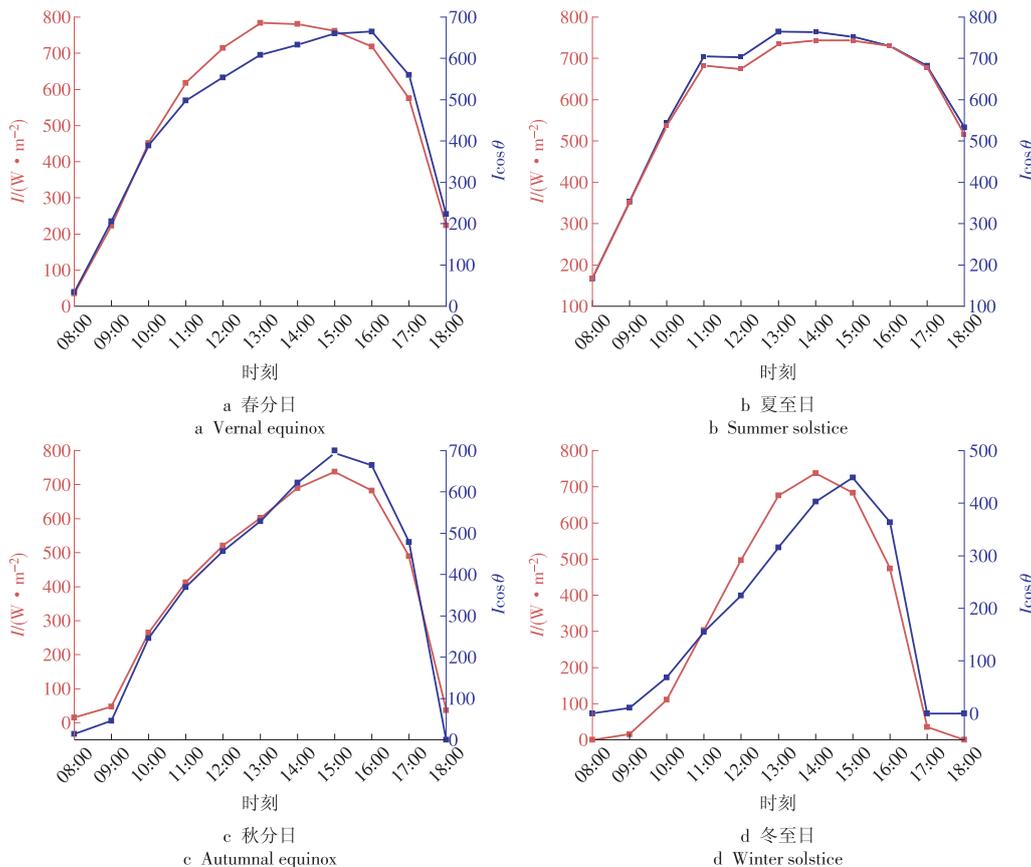


图 7 四季典型日 I 及 Icos θ

Fig. 7 DNI and cos θ of DNI on typical days in four seasons

碳捕集量随着太阳辐照度的增大而不断增加,但由于 330 MW 燃煤电站 CO<sub>2</sub> 产生量为 78.24 kg/s, CO<sub>2</sub> 捕集率为 80%, 因此碳捕集量存在上限。由如图 8 所示的四季典型日碳捕集量变化可知, 春分日、夏至日及秋分日均存在太阳辐照度超过设计值导致碳捕集量达到上限的时段, 因而造成热能的浪费。为减少热能损耗, 提高能源利用率, 可增加这一时段再生反应中 KHCO<sub>3</sub> 的供给量, 使聚光集热量全部用于驱动钾基固体吸收剂的再生。再生后多余的固体吸收剂可以进行储藏, 用于太阳辐照不足的时间段进行碳酸化反应, 实现碳捕集量在时段上的转移。

度、天顶角余弦值, 选取春分、夏至、秋分、冬至 4 个典型日, 计算应用该系统后燃煤电站的碳捕集量。四季典型日的太阳直射辐照度 (I) 以及太阳直射辐照度与天顶角余弦值的乘积 (Icos θ) 变化如图 7 所示。

其中: 夏至日的太阳辐照度较大, 一天中有 7 h 的太阳直射辐照度超过 600 W/m<sup>2</sup>, 远大于其余季节; 而冬至日的太阳辐照度较低, Icos θ 的最高值为 450 W/m<sup>2</sup>; 春分日与秋分日的太阳直射辐照度与设计工况基本吻合。

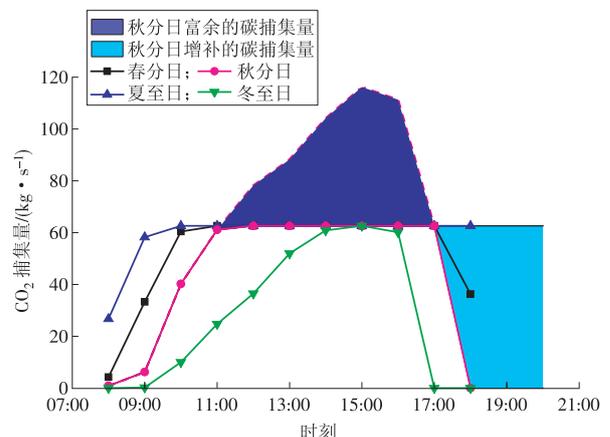


图 8 四季典型日碳捕集量变化

Fig. 8 CO<sub>2</sub> captured on typical days in four seasons

以秋分日为例,11:00—17:00时段太阳辐照度高,集热器产生的聚光集热量大于燃煤电站碳捕集量达到上限时的能耗。多余的集热量在这一时段不能进行碳捕集,因此产生了富余的碳捕集量。将多余的集热量用于驱动 $K_2CO_3$ 的再生,并储藏 $K_2CO_3$ 用于17:00之后的时段进行碳酸化反应,补偿17:00之后由于太阳辐照度低而造成的集热量不足,增加这一时间段的碳捕集量,因此产生了增补的碳捕集量。采用这种调控方式,全天碳捕集量将增加至312.96 t,碳捕集系统能量利用率可相对提高15.84%。

## 5 结论

在碳中和背景下,本研究针对燃煤电站碳排量大的问题,提出了燃煤电站槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统。分析了聚光集热温度、集热管内工质流量等关键参数对系统性能的影响规律。将该系统集成于330 MW的燃煤电站并与单一燃煤碳捕集系统进行性能对比,证明了槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统对系统综合性能的提升。根据华北地区四季典型日辐照度与太阳高度角的变化,得出系统在变工况条件下的优化运行方案。

(1)综合考虑聚光集热效率、聚光集热量与碳捕集钾基固体吸附剂再生反应率,确定槽式太阳能聚光集热温度为215.77℃,集热管内导热油工质流量为70 m<sup>3</sup>/h。

(2)采用槽式太阳能聚光集热-碳捕集系统时,汽轮机的出力为337.873 MW,相比于单一燃煤碳捕集系统,汽轮机出力增加29.85 MW,燃煤电站发电效率提升10.3%。

(3)春季、夏季、秋季可在光照充足时段增加再生反应中 $KHCO_3$ 的供给量,使多余聚光集热量全部用于驱动钾基固体吸收剂的再生。通过储藏多余的固体吸收剂,实现碳捕集量在时段上的转移。秋分日应用该方案后,全天碳捕集量可增加312.96 t,碳捕集系统能量利用率可相对提高15.84%。

## 参考文献:

[1]世界气象组织.2019年全球气候状况声明[EB/OL].(2020-03-10)[2021-05-10].[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10216](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10216).

[2]陈少卿,赵长遂,赵传文.钾基固体吸收剂脱除烟气中 $CO_2$ 技术的研究进展[J].动力工程学报,2010,30(7):542-549.  
CHEN Shaoqing, ZHAO Changsui, ZHAO Chuanwen.

Research progress on removal of  $CO_2$  from flue gas by potassium based solid absorbent [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2010, 30 (7): 542-549.

[3]英国石油公司.BP世界能源统计年鉴:2020(第69版)[EB/OL].[https://www.cenews.com.cn/company/202006/t20200623\\_947469.html](https://www.cenews.com.cn/company/202006/t20200623_947469.html).

[4]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 Zhu, GUAN Dabo, WEI Wei. Carbon emission accounting in China (in Chinese) [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(7): 878-887.

[5]赵传文,陈晓平,赵长遂.碱金属基吸收剂干法脱除 $CO_2$ 技术的研究进展[J].动力工程,2008,28(6):827-833.  
ZHAO Chuanwen, CHEN Xiaoping, ZHAO Changsui. Research progress of dry  $CO_2$  removal technology with alkali metal based absorbent [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 827-833.

[6]PARK Y C, JO S H, CHONG K R, et al. Long-term operation of carbon dioxide capture system from a real coal-fired flue gas using dry regenerable potassium-based sorbents[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):1235-1239.

[7]BATTAGLIA P, BUFFO G, FERRERO D, et al. Methanol synthesis through  $CO_2$  capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment [J]. Journal of  $CO_2$  Utilization, 2021, 44(2):101407.

[8]PLAZA J M, WAGENER V D, ROCHELLE G. Modeling  $CO_2$  capture with aqueous monoethanolamine [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):1171-1178.

[9]邢晨健,钱煜,周燃,等.太阳能聚光光伏-余热碳捕集利用方式分析[J].华电技术,2020,42(4):84-88.  
XING Chenjian, QIAN Yu, ZHOU Ran, et al. Analysis of utilization modes of concentrating photovoltaic and photovoltaic residual heat driven carbon capture [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 84-88.

[10]COHEN S M, WEBBER M E, ROCHELLE G T. Utilizing solar thermal energy for post-combustion  $CO_2$  capture[C]//ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability. Phoenix City: Advanced Energy Systems Division and Solar Energy Division, 2011:663-672.

[11]张智,孙杰,祁昊均.抛物槽式集热器双轴跟踪方式性能研究[J].华电技术,2020,42(5):1-7.  
ZHANG Zhi, SUN Jie, QI Haojun. Performance study on two-axis tracking method of parabolic trough collectors [J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 1-7.

[12]WANG F, CHENG Z, TAN J, et al. Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1314-1328.

[13]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.

- [14] WANG R L, SUN J, HONG H, et al. An on-site test method for thermal and optical performances of parabolic-trough loop for utility-scale concentrating solar power plant [J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 142-152.
- [15] 王彦霖, 贾里, 梅雪松, 等. 负载型钾基吸附剂的 CO<sub>2</sub> 吸附机理及失效特性 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 98-104.  
WANG Yanlin, JIA Li, MEI Xuesong, et al. The mechanism and failure characteristics of CO<sub>2</sub> adsorption of loaded potassium based adsorbents [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(11): 98-104.
- [16] ZARZA E, ROJAS M E, GONZÁLEZ L, et al. INDITEP: The first pre-commercial DSG solar power plant [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(10): 1270-1276.
- [17] 王勇, 孙文杰. 电站汽轮机设备及运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 74-80.
- [18] 崔映红, 杨勇平, 杨志平, 等. 太阳能辅助燃煤一体化热发电系统耦合机理 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(29): 99-104.
- CUI Yinghong, YANG Yongping, YANG Zhiping, et al. Coupling mechanism of solar assisted coal fired integrated thermal power generation system [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2008, 28(29): 99-104.
- [19] 谢诞梅, 戴义平, 王建梅, 等. 汽轮机原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 76-77.

(本文责编: 刘芳)

#### 作者简介:

钱煜(2000—), 男, 江苏常州人, 在读硕士研究生, 从事太阳能综合利用方面的研究 (E-mail: 20180223@njnu.edu.cn)。

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 (E-mail: wangruilin@njnu.edu.cn)。