DOI: 10.19666/j.rlfd.202507120

基于低温光热驱动余热利用的新型光煤互补发电系统

韩　宇[1,2]，严　雪[1,2]，孙颖颖[1,2]，吴俊杰[1,2]
（1. 南京工程学院能源与动力工程学院，江苏　南京　211167；
2. 南京工程学院江苏省多能融合与灵活性发电技术重点实验室，江苏　南京　211167）

［摘　　要］【目的】为解决光煤互补发电领域集热成本偏高、太阳能转换效率偏低的 2 个核心问题，提出新型低成本高效光煤互补发电系统。【方法】新系统采用低温真空管太阳能驱动余热利用的模式，大幅降低集热成本，并实现太阳能的放大利用。通过仿真模拟、热力学分析以及经济性分析，揭示了新系统的性能。【结果】基于典型 600 MW 机组，新系统通过创新的真空管太阳能驱动余热利用模式，能够实现 32.68%的光电转换效率，大幅降低太阳能集热设备成本至常规系统的 34.9%，将太阳能发电成本控制在 0.440 元/(kW h)。【结论】与常规系统相比，新系统的热力性能与经济性能有了大幅提升，解决了光煤互补发电领域的核心问题。

［关　键　词］光煤互补发电；太阳能驱动余热利用；真空管太阳能；集热成本

［引用本文格式］韩宇，严雪，孙颖颖，等. 基于低温光热驱动余热利用的新型光煤互补发电系统[J]. 热力发电，2026，55(3)：165-175.　HAN Yu，YAN Xue，SUN Yingying，et al. A new solar-coal hybrid power generation system based on low-temperature solar-driven waste heat recovery[J]. Thermal Power Generation，2026，55(3)：165-175.

A new solar-coal hybrid power generation system based on low-temperature solar-driven waste heat recovery

HAN Yu[1,2], YAN Xue[1,2], SUN Yingying[1,2], WU Junjie[1,2]
(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Multi-energy Integration and Flexible Power Generation Technology, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: [Objective] To solve the two core problems of solar-coal hybrid power generation, namely the high cost of solar collectors and the low solar conversion efficiency, a novel low-cost and efficient solar-coal hybrid power generation system was proposed. [Methods] In this new system, by using low-temperature evacuated tube solar energy to drive the waste heat recovery, the cost of solar collectors can be reduced significantly and solar amplified utilization is achieved. The performance of the new system was revealed by simulation, thermodynamic analysis, and economic analysis. [Results] Based on a typical 600 MW unit, the new system exhibited a solar-to-electricity efficiency of 32.68% via the novel mode of evacuated tube solar-driven waste heat recovery. The cost of solar collecting devices in the proposed system was reduced to 34.9% of that in the conventional system. The cost of solar-generated electricity was kept at 0.440 yuan/(kW h). [Conclusions] The thermal and economic performance of the proposed system was significantly improved compared with that of the conventional one, and the key problems in the field of solar-coal hybrid power generation have been solved.

Key words: solar-coal hybrid power generation; solar-driven waste heat utilization; evacuated tube solar energy; cost of solar collectors

收 稿 日 期：2025-07-17　修 回 日 期：2025-07-30　接 受 日 期：2025-08-07
基 金 项 目：江苏高校“青蓝工程”项目
Supported by：“Qinglan Project” of Jiangsu Universities
第一作者简介：韩宇（1990），男，博士，副教授，主要研究方向为太阳能耦合燃煤发电技术，hy@njit.edu.cn。

清洁低碳发电一直是能源领域的重要研究方向。我国总体呈现以煤为主的能源格局，作为发电行业的主体，我国燃煤机组发电量占比约 60%[1]。然而，燃煤机组的污染物以及 CO_2 排放偏高。太阳能的清洁低碳与燃煤机组的稳定能够形成良好互补，综合考虑太阳能行业的迅猛发展与我国以煤为主的能源格局，光煤互补发电成为了学术界与产业界的主流发展方向之一。目前，太阳能耦合燃煤发电系统已在我国电厂实现了工程示范[2]，众多学者对其进行了深入研究。严卉等[3]对系统的核心耦合参数进行了规律性分析，获得了太阳能辐射强度、光煤热量比例、机组负荷等变量对系统可用能损失与效率的影响规律。Mofidipour 等人[4]将槽式太阳能与脱碳燃煤机组进行耦合集成，在热力学第一定律与第二定律方面分别提升系统效率 0.74 和 1.35 百分点。Ding 等人[5]在 300 MW 热电联产机组中引入槽式太阳能，在供热季与非供热季燃料消耗分别降低 80.23 与 98.59 t/d，实现了机组良好的供热发电性能。杨晖等[6]提出采用塔槽结合的光煤互补发电模式实现高温太阳能充分利用，可将燃料消耗降低 8.83 g/(kW·h)。肖艳红等[7]对空冷光煤互补发电系统进行热力学分析，获得了空冷温度对于系统背压、光电转换效率、循环热效率等核心指标的影响规律。此外，还有众多学者对光煤互补发电系统的最优方案匹配[8]、储热调峰改造[9]、太阳能梯级利用[10]、热力耦合优化[11]等方面进行了研究。

然而，常规高温太阳能耦合燃煤发电系统并未在发电领域实现大规模工程应用，主要问题为集热成本过高，经济收益偏低。值得注意的是，在建筑领域，光热技术已经实现了广泛应用，如真空管太阳能集热器，由于其低廉的价格，已占据家用热水器的极大市场份额。因此，采用技术成熟的低成本真空管集热器（约 2 000 元/kW[12]）替代高成本槽式集热器（约 6 000 元/kW[13]），有望解决太阳能耦合燃煤发电领域的核心问题。

低温真空管太阳能集热器能够高效生产 100~150 ℃的工质[10]；吸收式热泵是成熟技术，能够被真空管太阳能产生的 100~150 ℃热量驱动，通过余热回收将少量太阳能转换为大量的 50~90 ℃低温热能[14]；燃煤机组凝汽器中存在大量余热，可被太阳能热泵回收；热泵产出的 50~90 ℃低温热能与燃煤机组的助燃空气（25 ℃空气）温区匹配，能够实现良好的换热效果。综合上述分析，采用真空管太阳能驱动余热利用的新型太阳能耦合燃煤发电模式，一方面有望解决集热器高成本的核心问题；另一方面实现了太阳能的“放大利用”，有望解决太阳能光电转换效率偏低的问题。

本文提出基于低温光热驱动余热利用的新型太阳能耦合燃煤发电系统，能够实现太阳能的“放大利用”与低成本发电，并对新系统进行了仿真模拟，且在此基础上进行了热力学与经济性分析，揭示了新系统的优势，旨在解决光煤互补发电中成本过高与转换效率偏低的核心问题。

1 新型光煤互补发电系统

1.1 常规光煤互补发电系统

常规太阳能耦合燃煤发电系统的特征如图 1 所示。常规系统采用高温槽式集热器产出 300~400 ℃导热油，通过加热高温锅炉给水的方式与燃煤机组热力循环耦合集成。从图 1 可以看出，常规系统的 2 个核心问题，限制了其在工程中的大规模应用。首先，高温槽式集热器的成本约为 6 000 元/kW[13]，高昂的集热成本使得常规系统的经济效益不足；其次，常规系统也存在太阳能转换效率偏低的工程限制，其光电转换效率为 15%~25%[5]，远低于燃煤机组的效率。

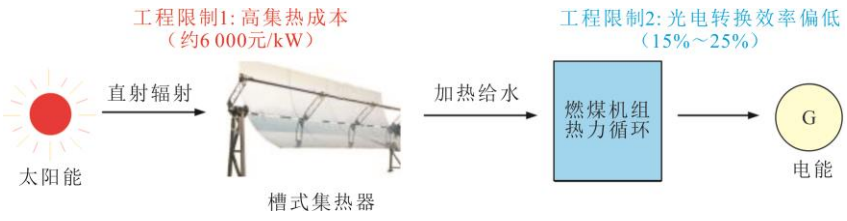


图 1 常规系统特征

Fig.1 Characteristics of the conventional system

1.2 真空管太阳能驱动余热利用

采用低温真空管太阳能驱动余热利用有望解决常规系统上述 2 个核心问题，其思路如图 2 所示。从图 2 可以看出：低温真空管集热器成本仅约为

2 000 元/kW[12]，采用真空管集热器替代高温槽式集热器能够显著降低太阳能耦合燃煤发电系统的成本；此外，真空管集热器能够产生 100~150 ℃热量来驱动吸收式热泵，通过高效回收余热的形式，将太阳能转换为大量 50~90 ℃低品位热能，实现太阳能的“放大利用”，有效提升太阳能转换效率。然而，真空管太阳能驱动余热利用的新模式存在如何实现大量低品位热能与燃煤机组高效耦合集成的问题。

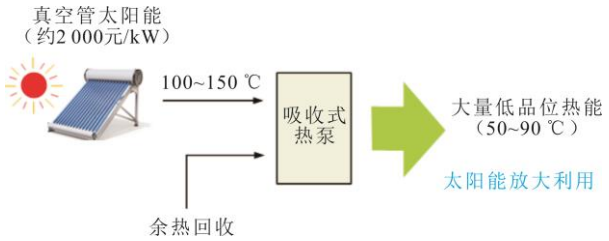


图 2　真空管太阳能驱动余热利用思路

Fig.2 Concept of waste heat utilization driven by vacuum tube solar energy

1.3 与燃煤机组空气预热过程耦合集成

通过上述分析，低温真空管太阳能驱动余热利用的新模式能够同时降低集热成本并实现高效光热转换。然而，太阳能虽能够通过驱动余热利用的形式高效转换成为大量热能，但其产出的热能品位较低。将热泵与燃煤机组空气预热过程进行耦合集成，可实现低品位能量的能级提升与高效利用。图 3 为某典型燃煤机组空气预热过程，其中烟气放热温区为 360~128 ℃，空气吸热温区为 25~332 ℃。图 4 给出了真空管太阳能热泵与空气预热耦合的设计思路。从图 4 可以看出：1）真空管太阳能的应用能够显著降低系统的集热成本；2）吸收式热泵显著提升了太阳能的能量利用效率，将少量太阳能转换为大量低品位热能；3）低品位热能通过预热空气节省出原高温烟气热源，所节省的 360 ℃烟气与常规系统中槽式太阳能温度相近，同样可通过加热高温锅炉给水的方式与燃煤机组耦合集成。

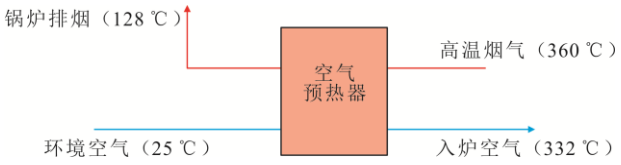


图 3　典型燃煤机组空气预热过程

Fig.3 Air preheating process of a typical coal-fired power unit

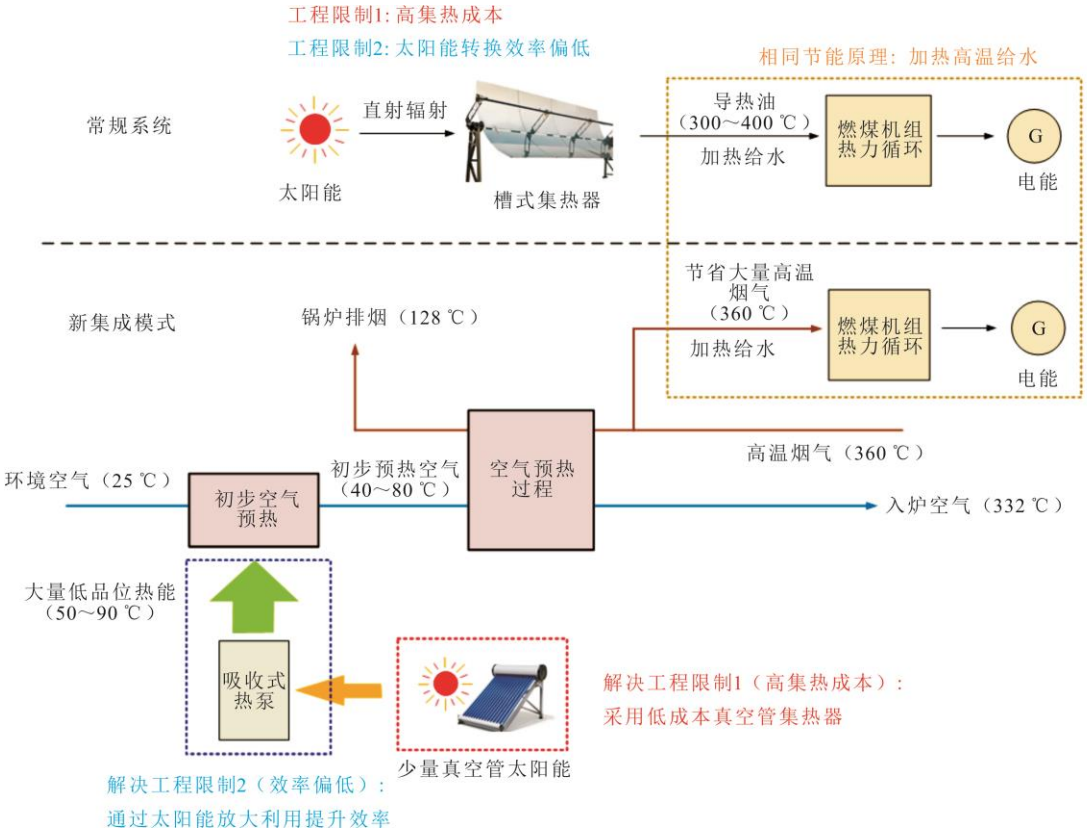


图 4　真空管太阳能热泵耦合空气预热设计思路

Fig.4 Design concept of the coupling of evacuated tube solar heat pump and air preheating

综合来看，新型耦合模式与常规系统在节能原理相同（加热高温锅炉给水）的基础上，一方面用低温真空管太阳能替代了高成本的槽式太阳能；另一方面通过太阳能“放大利用”，显著提升了所加热的高温给水量，有效解决了常规系统中集热成本过高和太阳能转换效率偏低 2 个核心问题。

1.4 新系统设计思路

综合上述分析，真空管太阳能、吸收式热泵、空气预热过程的耦合集成形成了新型光煤互补发电系统，其设计思路如图 5 所示。从图 5 可以看出：真空管太阳能被用来驱动吸收式热泵，回收燃煤机组凝汽器余热，产出大量低品位热能；所产出的低温热能通过预热冷空气节省了原始高温烟气；节省的高温烟气用来加热锅炉给水，节省汽轮机抽汽，增加汽轮机发电功率，提升系统性能。

2 新系统在 600 MW 机组中的应用

2.1 案例机组介绍

选用典型 600 MW 机组作为案例，对新系统进行研究，案例机组锅炉参数与回热系统参数见表 1、表 2。

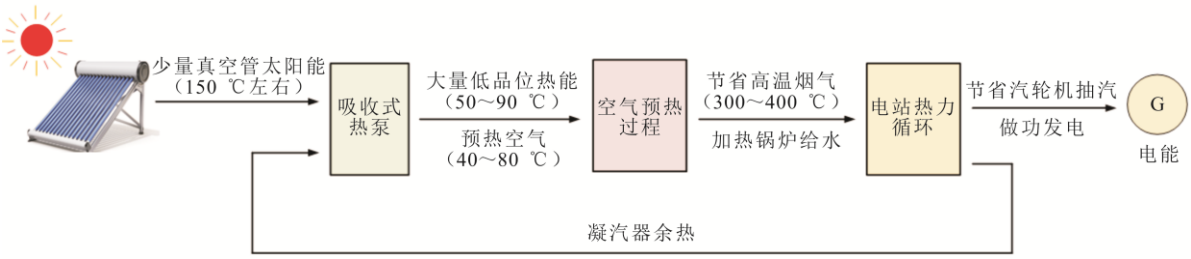


图 5 新系统设计思路
Fig.5 Design concept of the new system

表 1 案例机组锅炉参数
Tab.1 Parameters of the boiler in case unit

参数	数值	参数	数值
煤发热量/(MJ kg^{-1})	21.41	主蒸汽/再热蒸汽压力/MPa	24.20/3.23
煤消耗量/(kg s^{-1})	63.0	过量空气系数	1.2
煤含碳量/%	56.26	空气预热器入口/出口烟气温度/℃	360.0/128.0
主蒸汽/再热蒸汽温度/℃	566.0/566.0	空气预热器入口/出口空气温度/℃	25.0/332.0

表 2 案例机组回热系统参数
Tab.2 Parameters of the regenerative system in case unit

回热加热器（1 号—8 号）	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号
汽轮机抽汽温度/℃	349.8	290.7	500.7	397.2	282.8	150.7	91.4	62.1
汽轮机抽汽压力/MPa	6.01	3.78	2.15	1.06	0.43	0.12	0.06	0.02
汽轮机抽汽量/(kg s^{-1})	33.1	29.2	18.9	21.9	24.0	10.8	13.2	12.3
出口水温度/℃	275.4	247.1	214.5	185.2	141.6	100.5	81.8	58.2
出口水压力/MPa	30.65	30.66	30.67	30.68	0.99	1.00	1.01	1.02
出口水流量/(kg s^{-1})	459.0	459.0	459.0	459.0	355.9	355.9	355.9	355.9
疏水温度/℃	273.7	245.2	214.5		144.4	103.3	84.6	61.0

2.2 新系统工作原理

为了实现光煤互补发电，新系统在案例燃煤机组的基础上，新增真空管太阳能集热器、吸收式热泵，以及若干换热器，其工作原理如图 6 所示。新系统布置真空管太阳能集热器生成 150 ℃媒介工质，送入吸收式热泵作为驱动热源；凝汽器汽侧入口的部分乏汽（35.5 ℃蒸汽）被抽取出来，送入热泵进行余热回收，放热后凝结为疏水（35.5 ℃饱和水），返回至凝汽器疏水入口；热泵产出的 80 ℃媒介水用以预热冷空气。为了实现太阳能热泵低品位能量的能级提升利用，新系统将空气预热分为 3 段，引入的太阳能热泵能量在低温空气预热器中放热，节省部分原 360 ℃高温烟气，加热高压回热加热器

中的锅炉给水，节省的烟气加热锅炉给水后返回空气预热流程，与主流烟气汇合，在中温空气预热器中放热。选取常规太阳能耦合燃煤发电系统为参比系统，流程如图 7 所示。2 个系统在汽水热力循环处的集成方式相同，均采用热源加热高压回热加热器中的锅炉给水。

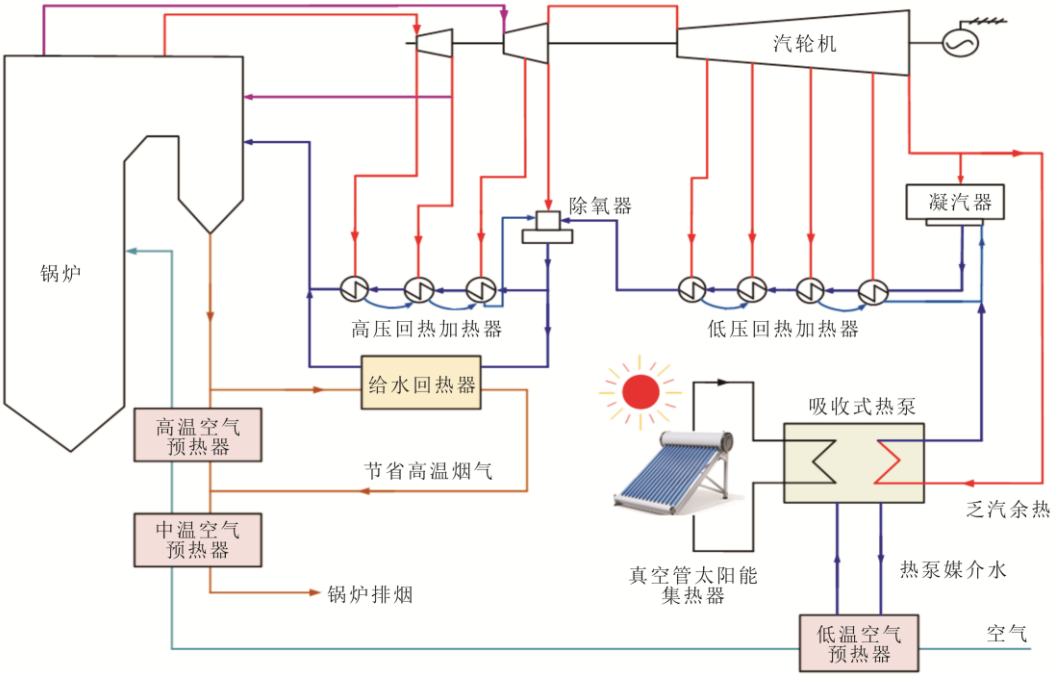


图 6　新系统工作原理

Fig.6 Working principle of the proposed system

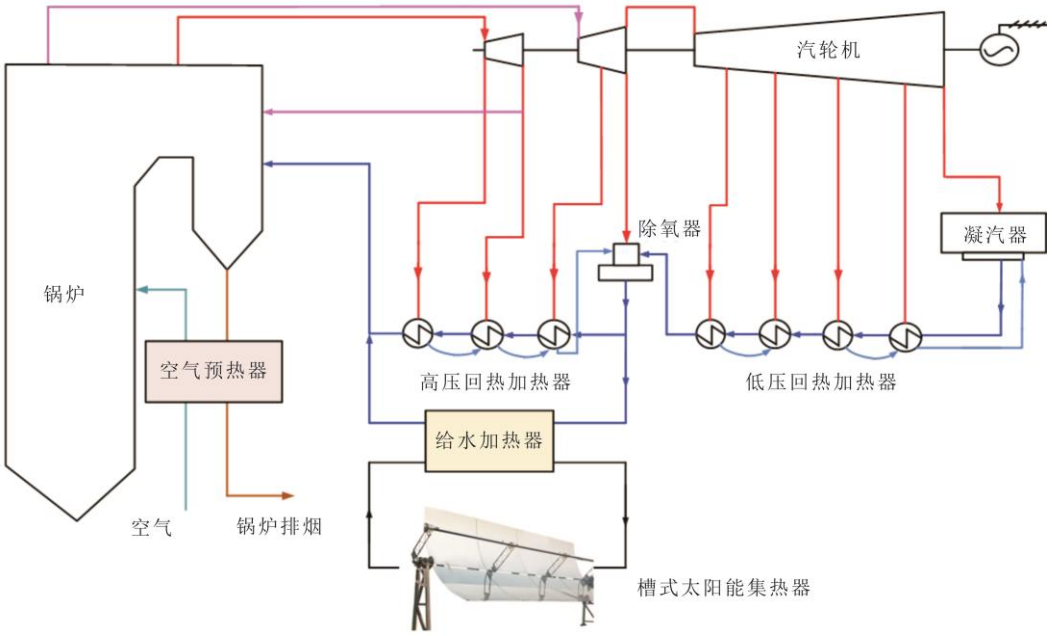


图 7　常规系统流程

Fig.7 Working fluid process of the conventional system

2.3 系统设计参数

在太阳能工况方面，选取西宁地区全年太阳能直射辐射与水平面总辐射数据作为系统全年运行工况（图 8）。选取 10 月 1 日 14:00 这一典型时刻的太阳能数据（直射辐射 606 W/m^2，水平面总辐射 564 W/m^2）作为系统的设计工况。系统核心设备设计参数见表 3。

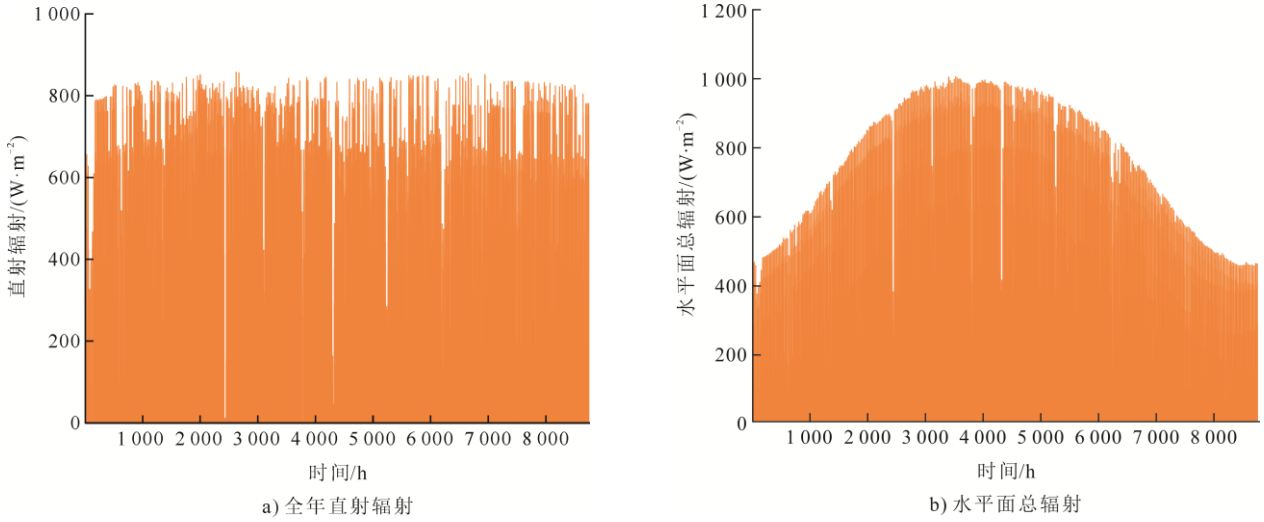


图 8 全年直射辐射与水平面总辐射

Fig.8 Annual direct normal irradiance and global horizontal irradiance

表 3 系统核心设备设计参数

Tab.3 Design parameters of the core devices of two systems

系统	参数	数值
新系统	真空管集热器进/出口工质温度/℃	100/150
	吸收式热泵进/出口媒介水温度/℃	50/80
	吸收式热泵系数[15]	1.7
	真空管集热器面积/m²	30 000
常规系统	槽式集热器进/出口工质温度/℃	210/300
	槽式集热器面积/m²	30 000

3 研究方法

3.1 系统模型

采用 Ebsilon 软件模拟是光煤互补发电系统的主流研究方法之一[16]。采用 Ebsilon 软件对系统进行模拟，系统各设备模型[17]及其参数如表 4 所示。

3.2 太阳辐射能计算

新系统中真空管集热器接收的太阳辐射能量 I_{zkg} 由倾斜面直射 I_z 辐射、散射 I_s 辐射、反射 I_f 辐射 3 部分构成，分别由下列公式计算[18]：

$$I_z = W_{DNI} \cdot \begin{pmatrix} \sin\delta\cdot\sin\varphi\cdot\cos\beta - \sin\delta\cdot \\ \cos\varphi\cdot\sin\beta + \cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot \\ \cos\beta\cdot\cos\omega + \cos\delta\cdot\sin\varphi\cdot \\ \sin\beta\cdot\cos\omega \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$I_s = \frac{1+\cos\beta}{2}\cdot(W_{GHI} - W_{DNI}\cdot\cos\theta_z) \tag{2}$$

表 4 设备模型与参数

Tab.4 Model and parameters of the devices

设备	模型
锅炉	采用带有再热循环的锅炉模型，输入参数来自案例机组锅炉参数（表 1）
汽轮机	采用透平模型，抽汽参数来自案例机组回热系统参数（表 2），排汽压力为 5.8 kPa
回热加热器	采用给水加热器模型，端差为–1.7~2.8 ℃，抽汽压降为 3%~ 5%
凝汽器	采用凝汽器模型，端差 6 ℃，循环冷却水入口温度 25 ℃，压力 0.1 MPa
真空管集热器	采用能量输入模型，具体能量输入参数由 3.2 章节公式计算得出
槽式集热器	采用能量输入模型，模拟为图 7 给水加热器的能量输入，具体能量输入参数由 3.2 章节公式计算得出
吸收式热泵	采用能量输入模型，模拟为低温空气预热器的能量输入，具体能量输入参数由 3.2 章节公式计算得出
给水加热器	采用换热器模型，水与烟气参数来自案例机组参数，导热油参数基于合理设计
空气预热器	采用空气预热器模型，工质参数来自案例机组参数及合理设计

$$I_{\mathrm{f}}=\rho\cdot\frac{1-\cos\beta}{2}\cdot W_{\mathrm{GHI}} \tag{3}$$

式中：W_{DNI}、W_{GHI}为直射辐射和水平面总辐射；φ与β分别为当地纬度 36.6 °和集热器倾斜角 41.6 °；δ、ω、θ_{z}分别为赤纬角、时角以及天顶角，具体计算方法可由文献[12]获得。

常规系统中，槽式集热器接收太阳能辐射量I_{cs}等于直射辐射W_{DNI}与入射角θ的乘积，槽式集热器的入射角θ可表示为[19]：

$$\cos\theta=\sqrt{\cos^2\theta_{\mathrm{z}}+\cos^2\delta\cdot\sin^2\omega} \tag{4}$$

真空管[20]与槽式[21]太阳能的光热转换效率可由相应典型集热器的工程测试公式计算：

$$\eta_{\mathrm{zkg}}=\left[0.771\,9-1.304\,7\left(\frac{\Delta T}{I_{\mathrm{zkg}}}\right)-0.004\,8\left(\frac{\Delta T^2}{I_{\mathrm{zkg}}}\right)\right]\cdot 100\% \tag{5}$$

$$\eta_{\mathrm{cs}}=\left[0.655-0.15\cdot\left(\frac{\Delta T}{I_{\mathrm{cs}}}\right)\right]\cdot 100\% \tag{6}$$

式中：η_{zkg}为真空管太阳能光热转换效率；η_{cs}为槽式太阳能光热转换效率；ΔT为集热器与环境的温差。

新系统中，真空管太阳能用于驱动吸收式热泵，其输出热量 Q 与真空管太阳能和热泵系数η_{COP}有关，可通过如下公式计算：

$$Q=I_{\mathrm{zkg}}\cdot A\cdot\eta_{\mathrm{zkg}}\cdot\eta_{\mathrm{COP}} \tag{7}$$

式中：A为集热器面积。

3.3 经济性分析

太阳能发电成本$C_{\mathrm{COE_s}}$[11]与年增加净收益N_{NAR}[22]是评价发电系统的主要经济性指标，可通过下列公式计算：

$$C_{\mathrm{COE_s}}=\frac{(c_{\mathrm{z}}+c_{\mathrm{a}})\cdot C_{\mathrm{CRF}}+c_{\mathrm{y}}}{G_{\mathrm{s}}} \tag{8}$$

$$N_{\mathrm{NAR}}=G_{\mathrm{s}}\cdot p-(c_{\mathrm{z}}+c_{\mathrm{a}})\cdot C_{\mathrm{CRF}}-c_{\mathrm{y}} \tag{9}$$

式中：C_{CRF}为回收因子；c_{z}为系统设备总投资，可由规模因子法[23]计算获得，其中参考设备参数如表 5 所示；c_{a}与c_{y}分别为安装建造（总设备投资的 15%[18]）与运行维护投资（总设备投资的 1.5%[26]）；G_{s}为太阳能发电量；p为太阳能热发电电价（1.15 元/(kW·h)[12]）。

回收因子C_{CRF}可表示为[27]：

$$C_{\mathrm{CRF}}=\frac{(1+i)^n\cdot i}{(1+i)^n-1} \tag{10}$$

式中：i与n分别为折现率 8%[8]与系统运行年限 30 年[13]。

投资回收期P_{PP}可通过下列公式获得[18]：

$$P_{\mathrm{PP}}=(c_{\mathrm{z}}+c_{\mathrm{a}})/(p\cdot G_{\mathrm{s}}-c_{\mathrm{y}}) \tag{11}$$

表 5 参考设备参数
Tab.5 Parameters of the reference devices

参考设备	设备投资/万元	设备规模参数	缩放因子
真空管集热器[18]	5 694	集热面积 70 000 m²	0.90
槽式集热器[22]	38 717	集热面积 183 000 m²	0.90
吸收式热泵[15]	3 816	产出能量 62.0 MW	0.90
常规空气预热器[24]	4 247	换热面积 339 454 m²	0.68
低温空气预热器[25]	576	换热面积 8 372 m²	0.68
给水加热器[22]	461	换热面积 13 149 m²	0.68

4 结果与讨论

4.1 设计工况热力性能

表 6 给出了 2 个系统中核心换热器的热力参数。从表 6 可以看出：1）新系统通过太阳能驱动热泵的形式，产出大量热量（17.72 MW）进入低温空气预热器，将冷空气从 25.0℃预热至 58.9 ℃；2）由于新系统空气预热过程的额外能量输入，相同能量的原始热源（360 ℃高温烟气，17.72 MW 热量）被节省出来，用于加热 43.6 kg/s 的锅炉给水，实现系统性能提升；3）常规系统中的太阳能并未驱动热泵，仅能够提供少量热量（9.11 MW）来加热 22.4 kg/s 的锅炉给水。总体来看，新系统通过太阳能驱动热泵耦合空气预热的创新模式，实现了太阳能的放大利用，显著提升了给水加热器的换热量。

表 6 核心设备热力参数
Tab.6 Thermal parameters of the core devices

设备	热源进/出口温度/℃	冷源进/出口温度/℃	热源/冷源工质流量/(kg·s⁻¹)	换热量/MW	换热面积/m²
高温空气预热器	360.0/210.0	168.3/332.0	509.6/519.0	79.58	204 288
中温空气预热器	210.0/128.0	58.9/168.3	623.1/519.0	53.19	88 190
低温空气预热器	80.0/50.0	25.0/58.9	141.1/519.0	17.72	12 950
给水加热器（新系统）	360.0/210.0	185.2/275.4	113.5/43.6	17.72	12 423
给水加热器（常规系统）	300.0/210.0	185.2/275.4	45.1/22.4	9.11	1 687

表 7 对比了 2 个系统设计工况下的热力性能。首先，在相同的集热面积下，新系统的非聚光集热模式能够利用散射和反射辐射接收的太阳辐射（20.44 MW）远高于常规系统（15.18 MW）；新系统所收集的太阳能热量用于驱动热泵，回收 3.3 kg/s 的汽轮机乏汽，有效回收蒸汽余热 7.30 MW；新系统太阳能发电量达到 6.68 MW，比常规系统（3.44 MW）高出 94%。总体来看，新系统优秀的热力性能来源于：1）非聚光真空管集热器带来的太阳辐射高效收集；2）创新耦合集成模式带来的太阳能放大利用。

表 7 2 个系统设计工况热力性能
Tab.7 Thermal performance of the two systems under designed condition

参数	原机组	常规系统	新系统
集热器面积/m^2		30 000	30 000
太阳辐射/集热量/MW		15.18/9.11	20.44/10.42
热泵回收乏汽流量/(kg s^{-1})			3.3
热泵回收余热量/MW			7.30
热泵产出热量/MW			17.72
系统总发电量/MW	600.00	603.44	606.68
系统太阳能发电量/MW		3.44	6.68
系统煤基热效率/%	44.47	44.72	44.96

2 个系统的太阳能转换过程如图 9 所示。常规系统通过槽式集热器收集太阳直射辐射，将生成热能直接以加热锅炉给水形式输入热力循环发电，能够实现 60.02%的光热转换效率与 22.63%的光电转换效率。新系统采用真空管集热器收集太阳总辐射，将 1 MW 太阳辐射转换为 0.509 9 MW 的热泵驱动热能，通过耦合余热利用与空气预热产出 0.866 9 MW 的热量输入热力循环发电。从热力循环作为热量接收终端的角度来看，新系统通过创新的太阳能放大利用模式，实现了 86.69%的光热转换效率，大幅突破了现有集热技术的效率瓶颈。新系统总体上能够实现 32.68%的光电转换效率，达到常规系统的 1.4 倍。新系统的太阳能放大利用模式能够在光煤互补发电领域中，为光热转换效率（以热力循环作为热量接收终端）的大幅突破提供创新思路。

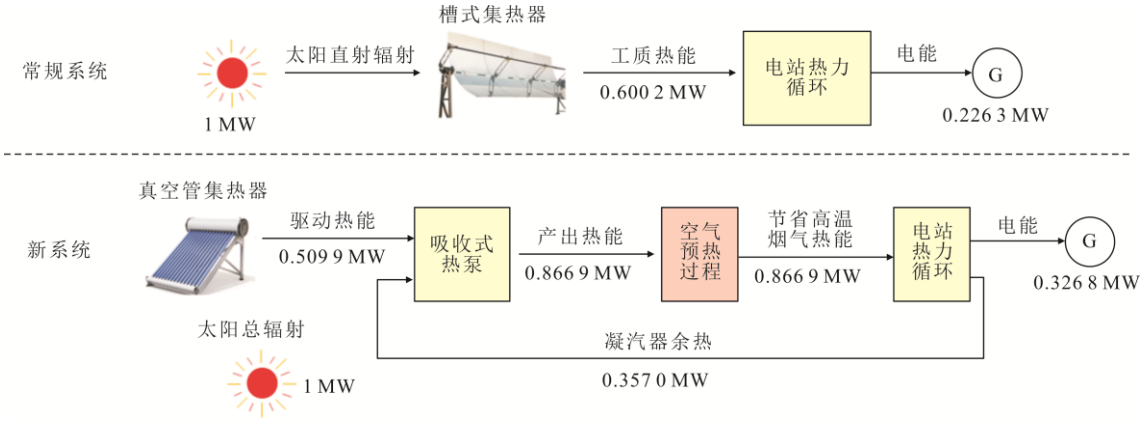


图 9 系统太阳能转换
Fig.9 Solar conversion of the systems

4.2 年度热力性能

表 8 给出了系统的年度热力性能，年度太阳能发电量如图 10 所示。新系统基于非聚光集热技术，能够高效接收太阳散射与反射辐射，全年接收 54.15 GW h 的太阳辐射，显著优于常规系统（39.79 GW h）；通过太阳能的高效利用与转换，新系统将接收的太阳辐射转换为 17.59 GW h 的太阳能发电量，接近常规系统（8.99 GW h）的 2 倍。新系统实现了 32.48%的年光电转换效率，大幅领先于常规系统（22.58%）。在碳排放方面，新系统 CO_2 排放为 771.6 t/(GW h)，与常规系统相比有所降低。综合来看，新系统中创新的真空管太阳能驱动吸收式热泵模式，有望在光煤互补发电领域，解决太阳能转换效率偏低这一核心问题。

表 8 年度热力性能
Tab.8 Annual thermal performance

参数	原机组	常规系统	新系统
太阳辐射/集热量/(GW·h)		39.79/23.83	54.15/27.44
太阳能发电量/(GW·h)		8.99	17.59
煤基热效率/%	44.47	44.72	44.96
光电转换效率/%		22.58	32.48
单位电量 CO_2 排放/(t·(GW·h)$^{-1}$)	780.0	775.70	771.60

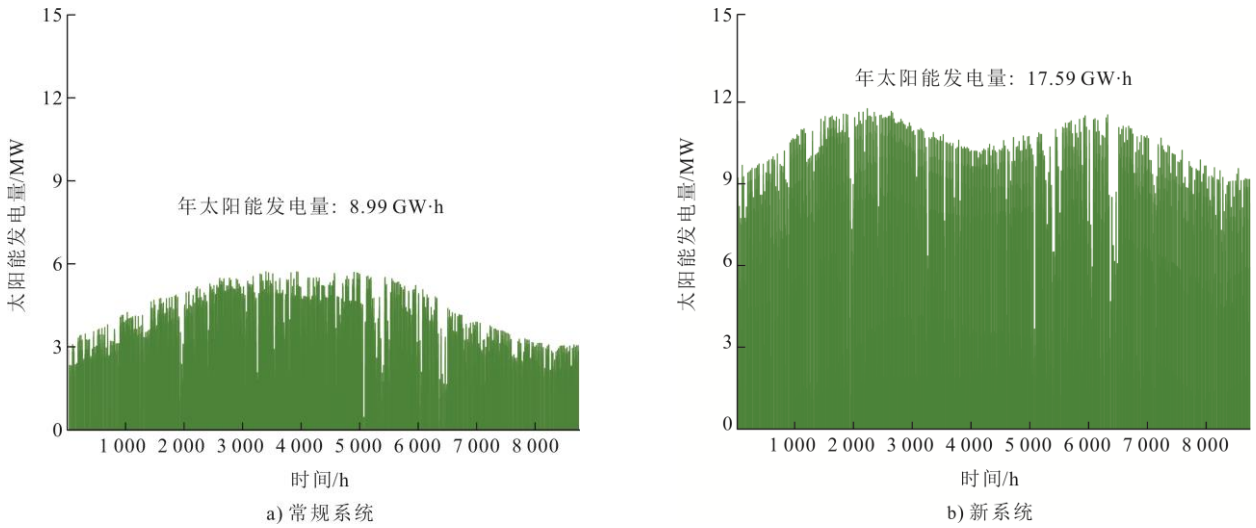


图 10 常规系统与新系统年度太阳能发电量
Fig.10 Annual solar-generated electricities of the conventional and new systems

4.3 经济性能

表 9 给出了系统的设备投资。可见，新系统采用了低成本真空管集热器，将太阳能集热设备投资控制在 2 656 万元，仅为常规系统的 34.9%。结合增设热泵与空气预热改造，新系统总设备投资为 6 611 万元，与常规系统相比下降了 14.4%。综合来看，采用低温真空管集热器替代常规槽式集热器，有效降低了集热设备与总设备投资，能够解决光煤互补发电系统中集热成本偏高的核心问题。

表 9 设备投资　　单位：万元
Tab.9 Investments of the devices

设备	常规系统	新系统
太阳能集热设备	7 605	2 656
空气预热新增投资		2 275
吸收式热泵		1 236
给水加热器	114	444
总设备投资	7 719	6 611

系统经济指标见表 10。新系统一方面通过采用低成本集热设备，将系统的年化总成本控制在 774 万元，显著低于常规系统（904 万元）；另一方面通过太阳能放大利用模式，大幅提升太阳能发电量，实现每年 2 023 万元的太阳能发电收益，比常规系统高出 95.8%。综合来看，新系统将太阳能发电成本控制在 0.440 元/(kW·h)，仅为常规系统的 43.7%，同时获得 1 248 万元的年净收益，达到常规系统的 9.7 倍。新系统的投资回收期仅为 4.0 年，比常规系统缩短了近 60%，展现出良好的投资前景。新系统具有杰出的经济性能，主要来源于两方面：低成本低温太阳能集热设备的应用；基于太阳能放大利用的高效能量转换模式。

表 10 系统经济指标
Tab.10 Economic indicators of the systems

参数	常规系统	新系统
系统总投资/万元	7 719	6 611
安装建造费用/万元	1 158	992
年运行维护费用/万元	116	99
年化总成本/万元	904	774
年太阳能发电量/(GW·h)	8.99	17.59
年太阳能发电收益/万元	1 033	2 023
太阳能发电成本/(元·(kW·h)$^{-1}$)	1.006	0.440
年净收益/万元	129	1 248
投资回收期/a	9.7	4.0

新系统将真空管太阳能热泵与空气预热过程进行耦合集成，展现出良好的热力性能与经济收益，但受到空气加热过程温度制约，系统总集热量受限，难以大规模扩展镜场。此外，新系统尚未考虑储能，基于新系统的特性，在未来的研究中可通过布置低成本储热装置，即低温热水罐，进一步扩大新系统的优势。

5 结 论

为了解决光煤互补发电领域中集热成本偏高、太阳能转换效率偏低的 2 个核心问题，提出应用低温真空管太阳能驱动热泵的能量利用模式，实现太阳能的低成本协同高效利用，形成新型光煤互补发电系统。对新系统进行了仿真模拟、热力学分析与经济性分析，具体结论如下。

1）应用低温真空管太阳能替代常规槽式太阳能能够显著降低集热成本，通过真空管太阳能驱动热泵耦合空气预热的创新能量利用模式，能够实现太阳能的放大与能级提升利用，为光煤互补领域集热成本偏高、太阳能转换效率偏低 2 个核心问题提供了解决方案。

2）在热力性能方面，新系统基于典型 600 MW 机组，其太阳能发电量达到 6.68 MW，比常规系统高出 94%，同时实现 32.68%的光电转换效率，达到常规系统的 1.4 倍，体现出良好的热力性能。

3）在经济性能方面，低温真空管集热器的应用显著降低了新系统的集热设备投资，仅为常规系统的 34.9%。基于低集热成本与高太阳能转换效率，新系统将太阳能发电成本控制在 0.440 元/(kW·h)，仅为常规系统的 43.7%，同时获得 1 248 万元的年净收益，达到常规系统的 9.7 倍，展现出杰出的经济性能。

[参 考 文 献]

[1] 杨海生, 吴瑞涛, 李路江, 等. 燃煤机组集成储热系统的热力学性能研究[J]. 动力工程学报, 2025, 45(5): 645-653.
YANG Haisheng, WU Ruitao, LI Lujiang, et al. Thermodynamic performance study on coal-fired power plant integrated with molten salt thermal energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(5): 645-653.

[2] 侯宏娟, 张楠, 丁泽宇. 太阳能热与燃煤电站互补发电技术综述[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(11): 49-56.
HOU Hongjuan, ZHANG Nan, DING Zeyu. Review on solar aided coal-fired power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11): 49-56.

[3] 严卉, 刘明, 种道彤, 等. 光煤互补发电系统变工况能势匹配分析[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(11): 2981-2990.
YAN Hui, LIU Ming, CHONG Daotong, et al. Energy potential matching analysis of solar-aided coal-fired power plant under off-design conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(11): 2981-2990.

[4] MOFIDIPOUR E, BABAELAHI M. New procedure in solar system dynamic simulation, thermodynamic analysis, and multi-objective optimization of a post-combustion carbon dioxide capture coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 224: 113321.

[5] DING Z, HOU H, DUAN L, et al. Performance analysis and capacity optimization of a solar aided coal-fired combined heat and power system[J]. Energy, 2022, 239: 122141.

[6] 杨晖, 段立强, 王振, 等. 槽塔结合太阳能辅助燃煤发电机组性能分析[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 99-107.
YANG Hui, DUAN Liqiang, WANG Zhen, et al. Performance analysis on a solar aided coal-fired power generation system with simultaneous integration of trough and tower solar collectors[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 99-107.

[7] 肖艳红, 郭田, 余廷芳. 两种运行模式下光煤互补发电系统热性能对比分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 121-127.
XIAO Yanhong, GUO Tian, YU Tingfang. Thermal performance analysis of solar-aided coal-fired power generation system under two typical operation modes[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 121-127.

[8] WU J, HAN Y, HOU H, et al. Optimization of solar field layout and flow velocity in a solar-aided power generation system[J]. Energy, 2020, 208: 118344.

[9] 钱兆跃. 可参与调频的光煤互补系统容量选型及经济性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 154-161.
QIAN Zhaoyue. Capacity optimization and economic analysis for hybrid system of solar thermal and coal-fired power plant considering grid frequency modulation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 154-161.

[10] 李元媛, 孙祎, 戴玺. 新型分级式太阳能辅助燃煤发电系统性能研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(9): 2139-2146.
LI Yuanyuan, SUN Yi, DAI Xi. Research on performance of new integrated solar aided power generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(9): 2139-2146.

[11] SHAGDAR E, SHUAI Y, LOUGOU B G, et al. New integration mechanism of solar energy into 300 MW coal-fired power plant: performance and techno-economic analysis[J]. Energy, 2022, 238: 122005.

[12] HAN Y, SUN Y, WU J. An efficient and low-cost solar-aided lignite drying power generation system based on cascade utilisation of concentrating and non-concentrating solar energy[J]. Energy, 2024, 289: 129932.

[13] 周璐璐, 王军, 邴旖旎, 等. 太阳能辅助的燃煤机组经济性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 105-110.
ZHOU Lulu, WANG Jun, BING Yini, et al. Economic analysis of solar energy aided coal-fired power system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 105-110.

[14] XU Z Y, MAO H C, LIU D S, et al. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps[J]. Energy, 2018, 165: 1097-1105.

[15] XU C, BAI P, XIN T, et al. A novel solar energy integrated low-rank coal fired power generation using coal pre-

drying and an absorption heat pump[J]. Applied Energy, 2017, 200: 170-179.

[16] 刘骏, 陈衡, 赵淑媛, 等. 太阳能辅助碳捕集的 660 MW 燃煤电站出力变化研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 253-261.
LIU Jun, CHEN Heng, ZHAO Shuyuan, et al. Research on performance of new integrated solar aided power generation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 253-261.

[17] XU G, XU C, YANG Y, et al. A novel flue gas waste heat recovery system for coal-fired ultra-supercritical power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67: 240-249.

[18] HAN Y, YAN X, SUN Y, et al. A novel solar-aided NO_x removal system in peaking power plants[J]. Energy, 2024, 306: 132494.

[19] HOU H, YU Z, YANG Y, et al. Performance evaluation of solar aided feedwater heating of coal-fired power generation (SAFHCPG) system under different operating conditions[J]. Applied Energy, 2013, 112: 710-718.

[20] 张昕宇, 由世俊, 葛洪川, 等. 带遮热板的热管式真空管集热器中温性能的理论与实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 116-121.
ZHANG Xinyu, YOU Shijun, GE Hongchuan, et al. Theoretical and experimental research on the medium temperature thermal performance of heat pipe based evacuated tube solar collector with heat shield[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(1): 116-121.

[21] REDDY K S, ANANTHSORNARAJ C. Design, development and performance investigation of solar parabolic trough collector for large-scale solar power plants[J]. Renewable Energy, 2020, 146(2): 1943-1957.

[22] HAN Y, YAN X, SUN Y, et al. Energy and economic analyses of a novel photovoltaic-lignite hybrid power generation system[J]. Energy, 2025, 324: 136064.

[23] XU C, GAO Y, XU G, et al. A thermodynamic analysis and economic evaluation of an integrated cold-end energy utilization system in a de-carbonization coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 218-230.

[24] 李永毅, 韩宇, 陈袁, 等. 基于空气预热器分级设计的电站锅炉余热利用系统[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 41-47.
LI Yongyi, HAN Yu, CHEN Yuan, et al. A deep waste heat utilization system for utility boilers based on segmented air preheater design[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 41-47.

[25] HAN Y, XU G, ZHENG Q, et al. New heat integration system with bypass flue based on the rational utilization of low-grade extraction steam in a coal-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 460-471.

[26] SHAGDAR E, LOUGOU B G, SHUAI Y, et al. Performance analysis and techno-economic evaluation of 300 MW solar-assisted power generation system in the whole operation conditions[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114744.

[27] SHUAI Y, SHAGDAR E, LOUGOU B G, et al. Performance analysis of 200 MW solar coal hybrid power generation system for transitioning to a low carbon energy future[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116140.

（责任编辑　杨嘉蕾）