

太阳能-碳捕集机组热经济学分析及生命周期评价

王继选¹, 刘小贞², 高丽莎³, 刘丹娜⁴, 孟 鑫¹, 于佐东¹

(1. 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056021; 2. 邯郸职业技术学院电子信息工程系, 邯郸 056001;
3. 河北电力工程监理有限公司, 石家庄 050011; 4. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 保定 071003)

摘 要: 碳捕集和封存是实现电力低碳化发展的关键所在, 建立太阳能辅助碳捕集系统与燃煤机组的耦合系统, 构建耦合系统的热经济学优化模型, 研究碳捕集机组的热经济性。构建碳捕集机组的生命周期评价体系, 研究燃煤机组和碳捕集机组建设、运行、退役等各阶段的CO₂排放特性, 对比分析其对环境的影响特性。结果表明: 脱碳率为85%, 吸收剂质量分数为30%时, 解吸能耗为4.5 GJ/tCO₂, 碳捕集机组优化前后的热效率分别为38.2%和39.3%。燃煤机组电厂运行阶段碳排放量所占比重约为99.4%, 电厂建造、煤炭运输及电厂退役等阶段排放的CO₂比重约为0.6%。碳捕集系统建造、运行和退役增加的CO₂排放量为56.314 t/h, 占耦合系统全生命周期排放总量的58.01%, 减排率约为52.65%。碳捕集机组和太阳能辅助碳捕集机组中CO₂的排放由原燃煤机组的3.63×10⁻³标准当量降低为1.72×10⁻⁵和0.98×10⁻⁵标准当量。燃煤机组、碳捕集机组和太阳能辅助碳捕集机组中, 酸化对环境的贡献分别为1.5×10⁻⁶标准当量和1.9×10⁻⁶和1.0×10⁻⁶标准当量, 固体废弃物对环境的贡献分别为2.76×10⁻³标准当量和3.52×10⁻⁵和1.97×10⁻³标准当量。

关键词: 燃煤锅炉; 碳捕集; 生命周期; 太阳能

中图分类号: TM611

文献标识码: A

0 引 言

燃煤机组CO₂的集中排放是温室效应的主要来源, 对燃煤机组进行CO₂捕集是实现低碳排放的主要途径之一。低碳排放主要有富氧燃烧技术、燃烧前脱碳和燃烧后脱碳等^[1-5], 其中富氧燃烧技术尚处于理论研究阶段; 燃烧前脱碳技术路线适用于整体煤气化联合循环发电系统IGCC机组等煤气化后进行燃烧的机组; 燃烧后捕集技术应用范围广适用性强, 发展相对成熟^[6-10], 现绝大多数脱碳技术均采用燃烧后CO₂捕集的路线。

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)作为碳减排的评价方法逐渐受到国内外学者的青睐。Weisser^[11]利用生命周期评价方法对可再生能源、核能等发电形式进行分析, 结果表明上游和下游造成的CO₂排放总量约占总排放量的25%。Tahara等^[12]对常规矿物和可再生能源电厂在CO₂减排方面的特点进行生命周期评价, 并进行对比分析。Muramatsu等^[13]

运用生命周期评价方法, 分析燃煤电厂中的CO₂捕集技术, 发电过程的CO₂排放对环境影响最大。Babbitt等^[14]利用生命周期评价方法对美国佛罗里达州的燃煤电厂进行分析, 清单分析主要有煤炭开采、燃煤发电及废弃物处理等阶段, 对造成环境污染的影响因子进行定性和定量分析。Koornneef等^[15]运用环境影响评价与战略环境评价工具对荷兰燃煤电厂的碳捕集、封存项目进行研究。Wijaya等^[16]对印尼燃煤电厂发电阶段的外部环境成本做了简要的生命周期清单分析, 计算CO₂、SO₂、NO_x与PM10引起的外部环境成本。Stanley等^[17]利用生命周期评价方法对墨西哥的燃煤机组、碳捕集机组进行研究。

综上所述, 国内外对燃煤机组生命周期评价的研究大多仅限于对环境负荷的影响或对燃煤发电某阶段对环境的某一影响进行分析, 缺少对太阳能辅助碳捕集机组的能量流、质量流、环境流、资金流的综合研究。在能源、经济、环境协调发展情况下,

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 河北省自然科学基金(E2017402084); 博士科研启动项目(20120134); 河北省科技厅项目(17214509D); 邯郸市科技局基金项目(1528102058-2); 河北工程大学教育教学研究项目

通信作者: 于佐东(1966—), 男, 硕士、副教授, 主要从事可再生能源利用基础方面的研究。yuzuodong@hebeu.edu.cn

太阳能辅助碳捕集机组发电有望成为主要的发电形式之一。本文在对太阳能辅助碳捕集机组进行优化分析的基础上,将生命周期理论用于太阳能辅助碳捕集机组,进行能源、环境、经济的综合评价。

1 太阳能-碳捕集机组热经济性分析

1.1 碳捕集系统解吸能耗分析

基于单乙醇胺(MEA)的燃烧后 CO_2 捕集工艺流程如图 1 所示。MEA 吸收剂的解吸能耗高是燃煤机组碳捕集系统改造的瓶颈之一,单位摩尔 CO_2 吸收剂的再生能耗计算式如式(1)。

$$q_z = \frac{K}{\alpha_{\text{CO}_2}^{\text{R}} - \alpha_{\text{CO}_2}^{\text{L}}} \times \frac{M_a}{\Phi} \times c_p \cdot \Delta t_{\text{HE}} + \Delta Q_{\text{CO}_2} + R r_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

式中, K ——吸收液的循环倍率; $\alpha_{\text{CO}_2}^{\text{R}}$ 和 $\alpha_{\text{CO}_2}^{\text{L}}$ ——吸收剂富液及吸收剂贫液 CO_2 的负荷能力, mol/mol; M_a ——吸收剂中活性成分的摩尔质量, kg/mol; Φ ——吸收剂中活性成分的质量分数, %; c_p ——MEA 溶液的比定压热容, kJ/(kg·K); t_{HE} ——MEA 溶液温升, °C; Q_{CO_2} ——单位摩尔 CO_2 所需的平均反应热, kJ/mol; R ——再生塔上部回流比。

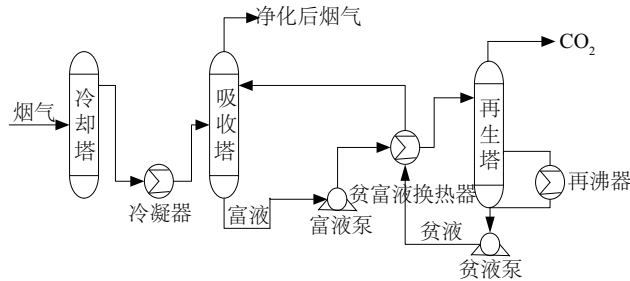


图1 MEA法碳捕集工艺流程

Fig. 1 Process flow of MEA system

图 2 为 MEA 吸收剂再生能耗随吸收剂质量分数的变化趋势。由图 2 可知, MEA 吸收剂溶液质量分数低于 30% 时, MEA 吸收剂溶液再生能耗随着质量分数的增大而逐渐降低; 高于 30% 时, MEA 吸收剂溶液的解吸再生能耗基本不变, 但吸收剂质量分数越高越易造成设备高温腐蚀, 且 MEA 的成本也随质量浓度的增大而有较大幅度的增加, 考虑到设备的安全性, 本文选取吸收剂质量分数为 30%, 此时 MEA 吸收剂再生能耗值为 4.5 GJ/t CO_2 。为有效防止 MEA 溶液的高温腐蚀及降解, 将再沸器中 MEA 溶液的温度控制在约 122 °C, 换热器热

侧温差取为 10 °C, 则 MEA 再生蒸汽侧的温度取为 132 °C, 饱和蒸汽压为 0.28 MPa^[18], MEA 溶液质量流量为 1.5 kg/t CO_2 , 蒸汽质量流量为 504.8 t/h。

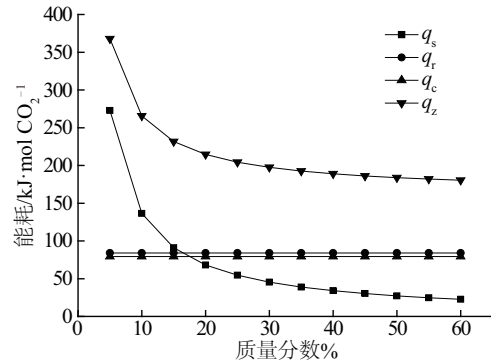


图2 MEA吸收剂解吸能耗图

Fig. 2 Heat consumption of MEA solution during regeneration

1.2 太阳能集热系统

将多个槽型抛物面聚光集热器经串并联的排列, 产生高温高压蒸汽(温度 $T \leq 400$ °C、压力 $p \leq 10 \times 10^6$ Pa), 主要参数如表 1 所示^[19]。

表1 LS-2型槽式抛物面集热器参数

Table 1 Main parameters of LS-2 collector

参数	数值	参数	数值
吸收管内径/m	0.066	吸收管外径/m	0.07
玻璃罩管发射率	0.9	吸收管导热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	54
光学效率/%	73.3	玻璃罩管直径/m	0.115

集热器换效率表达式为^[19]:

$$\eta_{jr} = \eta_{opt} K_{ia} - (a + cv)(T_{ab} - T_a)/I - \varepsilon_{ab} b(T_{ab}^4 - T_{sky}^4)/I \quad (2)$$

式中, η_{opt} ——集热器光学效率; K_{ia} ——入射角修正系数; a 、 b 、 c ——热平衡系数; v ——风速; T_{ab} ——吸收管温度; T_a ——环境温度; I ——太阳能直射辐射强度; ε_{ab} ——吸收体发射率; T_{sky} ——大气温度。

文中集热器光学效率取为 73.3%, T_{ab} 可由管内流体平均温度求出。

$$T_{wall} = T_{ab} + Q_{fluid}/2\pi rLU \quad (3)$$

式中, Q_{fluid} ——流体吸收的热量; U ——吸收管内流体与管外壁间的换热系数。

入射角修正系数为入射角函数表达为^[19]:

$$K_{ia} = \cos\theta + 0.000994\theta - 0.00005369\theta^2 \quad (4)$$

式中, θ ——入射角。

1.3 太阳能辅助碳捕集系统与燃煤机组耦合系统

以东方汽轮机厂生产的超临界 600 MW 机组为例,各段抽汽参数如表 2 所示。从表 2 可知,第 1 段抽汽至第 5 段蒸汽的品质可满足 MEA 吸收剂再生的用能需求,从其他各段抽汽为吸收剂再生供能会由于抽汽量过大而使级前后压差增加,对机组安全运行带来不利,为此可从第 4 段抽汽供给吸收剂再生,第 5 段抽汽可抽到极限设计值,抽汽的减温水引自凝结水。蒸汽换热后的饱和水按照其热量品质返回到回热系统,太阳能辅助碳捕集机组热力系统如图 3 所示。

表 2 抽汽参数

Table 2 Steam extraction parameters			
参数	流量/ kg·h ⁻¹	压力/ MPa	温度/ ℃
1 段	113999	6.687	370.9
2 段	140686	4.434	315.9
3 段	66930	2.133	468.8
4 段至除氧器	86255	1.069	367.5
4 段至给水泵汽轮机	91997	1.069	367.5
5 段	4548	0.363	234.6
6 段	44189	0.197	168.8
7 段	44003	0.099	104.1
8 段	78189	0.045	78.5

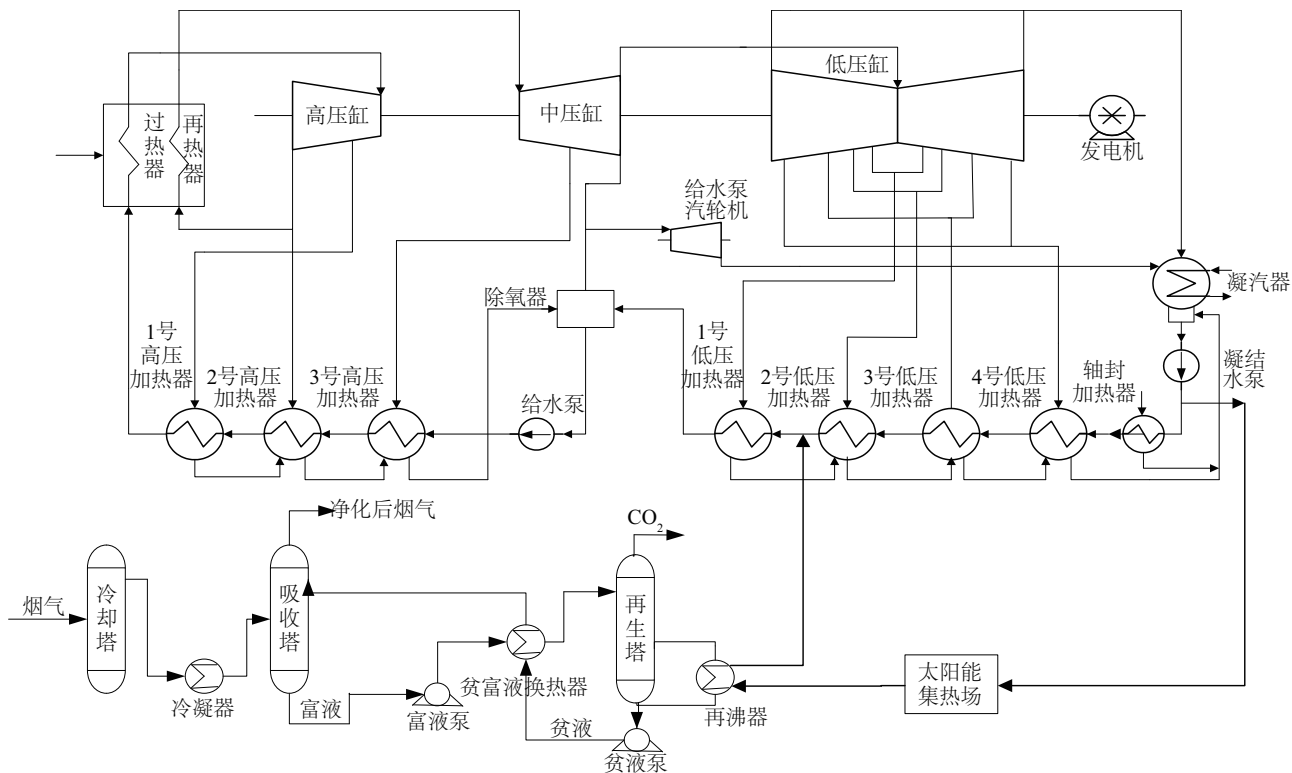


图 3 碳捕集系统与燃煤机组耦合方式

Fig. 3 Coupling system of CCS system and coal-fired unit

1.4 碳捕集机组热力学优化模型

为吸收剂解吸提供热量将引起燃煤机组热力系统参数的变化,最终使太阳能辅助碳捕集机组的热力性能发生改变。为了满足当前低碳环境要求,需对太阳能辅助碳捕集机组建立以能量优化为基础,以热力学最优为目标的热经济学优化模型,对

太阳能辅助碳捕集机组进行热力学建模流程如图 4 所示。式(5)以热力系统参数为基础,在太阳能辐射强度不足以为吸收剂解吸提供热源时建立的全局范围内优化模型。碳捕集机组热经济学优化模型参数范围的选定为机组的各段抽汽量、各段抽汽压力、供给碳捕集系统的抽汽以及提供给碳捕集系统的抽汽所需的减温水量。在一定的物理环境和

经济环境下,系统的主蒸汽流量一定。各约束条件如式(6)所示。

$$\max_x \eta_c = 123 \frac{q_s \eta_b \eta_p}{1000 q_0} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 0 \leq D_{4\text{CO}_2} \leq D_{\text{CO}_2} \\ 0 \leq D_{5\text{CO}_2} \leq D_5 \\ 0 \leq D_{4\text{CO}_2} + D_{\text{jw}4} + D_4 + d_{\text{xj}4} \leq D_{4\text{max}} \\ 0 \leq D_{5\text{CO}_2} + D_5 \leq D_{5\text{max}} \\ 0 \leq D_i \leq D_{i\text{max}} \\ 0 \leq p_i \leq p_{i\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

$$x = [p_i, D_i (i=1, 2, \dots, 8), D_{4\text{CO}_2}, D_{5\text{CO}_2}, D_{\text{jw}4}, D_{\text{jw}5}] \quad (7)$$

式中, q_s ——标煤发热量,取 29270 kJ/kg; η_b ——锅炉效率,取 0.9295; η_p ——管道效率,取 0.99; q_0 ——电站热耗率, kJ/kg; $D_{4\text{CO}_2}$ ——第 4 段抽汽至碳捕集系统的流量, t/h; D_{CO_2} ——吸收剂所需解吸蒸汽的总流量, t/h; $D_{5\text{CO}_2}$ ——第 5 段抽汽至碳捕集系统的流量, t/h; D_5 ——第 5 段抽汽到加热器的流量, t/h; $D_{\text{jw}4}$ ——提供给的减温水量, t/h; D_4 ——第 4 段抽汽到加热器的流量, t/h; $d_{\text{xj}4}$ ——第 4 段抽汽到小汽轮机的流量, t/h; $D_{4\text{max}}$ ——第 4 段抽汽的最大流量, t/h; $D_{5\text{max}}$ ——第 5 段抽汽的最大流量, t/h; D_i ——机组的各段抽汽流量, t/h; $D_{i\text{max}}$ ——各段抽汽的最大流量, t/h; p_i ——机组的各段抽汽压力, MPa; $p_{i\text{max}}$ ——各段抽汽压力最大值, MPa。

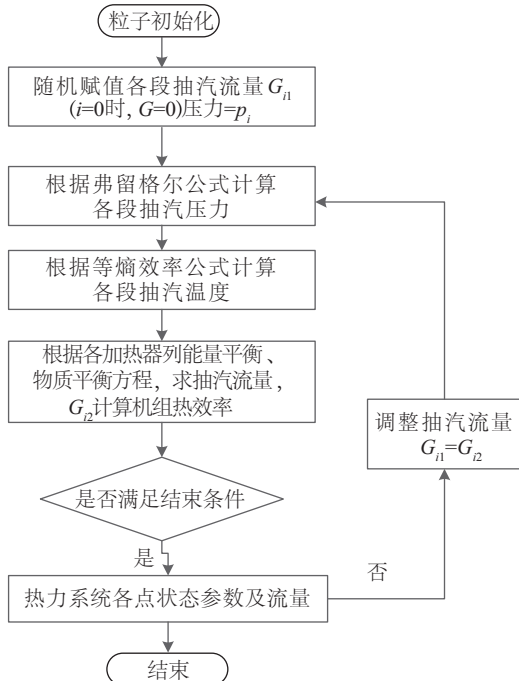


图4 热力学建模流程图

Fig. 4 Flow chart of thermodynamic modeling

根据所建立的碳捕集机组的热经济学优化模型,基于粒子群优化算法(PSO),对式(5)进行求解。PSO 算法流程如图 5 所示。

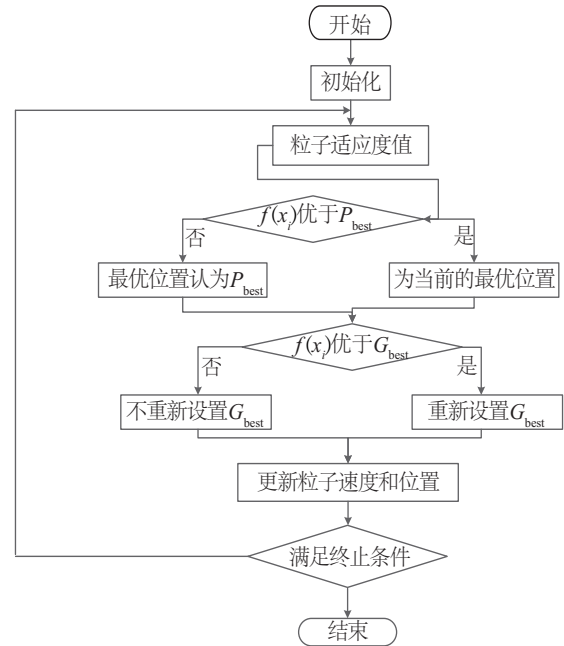


图5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of algorithm

1.5 优化结果

在碳捕集率为 85% 时,对碳捕集机组热力系统参数的优化结果如表 3、表 4 所示。碳捕集机组和太阳能辅助碳捕集机组的热经济性指标分别如表 5、表 6 所示。由表 4 可知,碳捕集机组中第 4 段和第 5 段抽汽均高于燃煤机组设计值,其中再沸器再生消耗的蒸汽由 $D_{4\text{CO}_2}$ 、 $D_{5\text{CO}_2}$ 、 $D_{\text{jw}4}$ 、 $D_{\text{jw}5}$ 提供。

表3 各抽汽压力优化结果

Table 3 Extraction steam pressure optimized results

参数	燃煤机组设计值	MPa	
		碳捕集机组优化值	
p_1	6.687	6.574	
p_2	4.434	4.282	
p_3	2.133	1.900	
p_4	1.069	0.685	
p_5	0.363	0.228	
p_6	0.197	0.116	
p_7	0.099	0.059	
p_8	0.045	0.028	

表 4 各抽汽流量优化结果
Table 4 Extraction flow optimized results

参数	燃煤机组设计值	碳捕集机组优化值
D_1	113.999	119.425
D_2	140.686	153.163
D_3	66.930	99.423
D_4 至除氧器	86.255	79.551
D_5	45.448	27.138
D_6	44.189	23.661
D_7	44.003	22.848
D_8	78.189	29.542
D_{4CO_2}	—	381.400
D_{5CO_2}	—	73.315
D_{jw4}	—	43.183
D_{jw5}	—	1.859

表 5 碳捕集机组热经济性指标
Table 5 Thermodynamic index of CCS unit

指标	优化前	优化后
热耗/ $\text{kJ}\cdot\text{kWh}^{-1}$	8571.0	8360.0
标准煤耗/ $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$	321.3	312.8
热效率/%	38.2	39.3

由表 5 可知,碳捕集机组优化后和优化前相比,其标准煤耗和热耗均有所降低,碳捕集机组优化后的发电热耗较优化前降低 211 kJ/kWh,碳捕集机组优化后的标准煤耗降低了 8.5 g/kWh,优化后其热效率较优化前提高了 1.1%。以本文中 600 MW 机组为例,标煤耗降低 8.5 g/kWh。当机组中碳捕集吸收剂解吸的热源由太阳能集热场提供时,对太阳能辅助碳捕集机组进行热力学建模,并计算耦合系统的热经济性,辐射强度按 500 W/m² 计算^[19]。相关辐射强度及经济性研究成果见参考文献[19]。

表 6 太阳能辅助碳捕集机组热经济性指标
Table 6 Thermodynamic index of solar aided CCS unit

评价指标	太阳能辅助碳捕集机组
碳捕集率/%	85
集热场面积/ $10^3/\text{m}^2$	774
热耗/ $\text{kJ}\cdot\text{kWh}^{-1}$	7439
标准煤耗/ $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$	278.4
热效率/%	0.442

据表 6 可知,当碳捕集率为 85%,集热场面积为 774000 m² 时,太阳能集热系统可为碳捕集系统提供全部热源,此时机组的热耗比抽汽为机组提供热源时降低 921 kJ/kWh,标准煤耗降低 34.4 g/kWh,热效率提高 4.9%。

2 太阳能-碳捕集机组生命周期评价

2.1 太阳能-碳捕集机组生命周期评价目标

对 600 MW 超临界燃煤发电系统进行碳捕集改造后的系统边界包括:1)电厂建设、运行、退役 3 个阶段,主要包括机组建设、燃料运输、发电过程和电力使用等;2)碳捕集系统生命周期,即碳捕集系统建设、运行和退役 3 个阶段。太阳能辅助碳捕集机组生命周期评价边界如图 6。

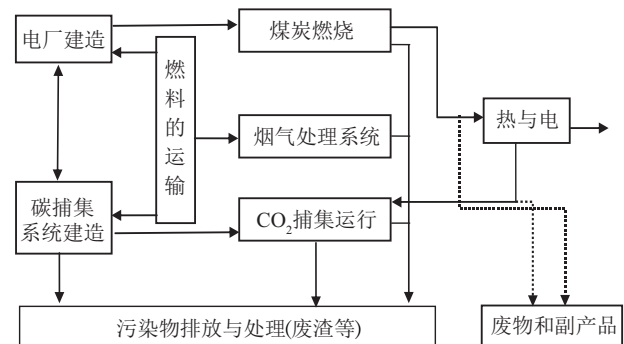


图 6 太阳能辅助碳捕集机组生命周期评价边界

Fig. 6 System boundary of CCS unit

表 7 为燃煤机组的主要参数。

表 7 燃煤机组的主要参数
Table 7 Main parameters of coal-fired unit

参数	数值
电厂额定发电容量 P_e/MW	600
耗煤量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$	220.15
电厂、碳捕集系统寿命/a	30
电厂建设周期/a	2
锅炉效率 $\eta_b/\%$	92.94
汽轮机机械效率 $\eta_m/\%$	98
管道效率 $\eta_p/\%$	98
发电机效率 $\eta_g/\%$	98
厂用电率 $\zeta_{ep}/\%$	5.05
汽轮机绝对内效率 $\eta_i/\%$	48.24

煤质分析如表 8 所示。太阳能辅助碳捕集机组

生命周期评价中主要耗材单位产量中 CO₂ 的排放数据如表 9 所示^[20,21]。电厂建设过程中 CO₂ 的排放,主要考虑燃煤机组、汽轮机发电机组等大型设备的制造、安装过程中的排放量,其所需建材数据见表 10。

表 8 设计煤种的工业分析

Table 8 Proximate analysis of coal

成分(收到基)	含量	成分(收到基)	含量
[C]/%	61.50	[S]/%	0.46
[H]/%	3.30	灰含量/%	7.00
[O]/%	10.84	水含量/%	16.30
[N]/%	0.60	干燥无灰基挥发分/%	30.42
低位发热量 Q/MJ·kg ⁻¹		23.25	

表 9 主要建材的 CO₂ 排放量

Table 9 CO₂ emission from production of construction materials and energy resources

建材名称	钢	铝	铁	钢筋混凝土
CO ₂ 排放量/ g·kg ⁻¹	1160	1740	1160	30

建材名称	水泥	铜	PVC	MEA
CO ₂ 排放量/ g·kg ⁻¹	1167.18	1304	1497	26.5

表 10 电厂建造所需建材数据

Table 10 Data of construction materials for coal-fired unit

电厂建设所需建材	钢	钢筋混凝土	水泥
计算所用数据/t	12243	21629	104791

2.2 太阳能辅助碳捕集机组生命周期排放量

假设煤矿和电厂之间的距离为 500 km,煤炭的运输分别由火车和汽车进行运输,二者分别占比 70%和 30%。燃煤运输能耗主要火车能耗和汽车油品的消耗,假设铁路运输中所消耗的柴油为 41 g/(t·km),公路运输中所消耗的汽油为 51 g/(t·h)。目前国内内燃机车废气排放水平为:汽油机排放 CO₂ 为 170 g/km;柴油机排放 CO₂ 为 150 g/km。在发电机组连续工作情况下,假设汽车运输时载重量为 10 t,火车载重量为 1300 t。太阳能辅助碳捕集机组中消耗的电能,按厂用电率 5.05%计算。依据文献[21],电厂退役过程中 CO₂ 排放量为建设期的 10%。碳捕集系统建造过程的碳排放量计算,主要包括吸收塔、再生塔、再沸器等建设排放,相关数据^[22]如表 11。

表 11 太阳能辅助碳捕集系统建造所需建材数据

Table 11 Data of construction materials for solar aided CCS unit system

材料	钢	玻璃铜	PVC
数量/t	32174.7/382	3486.67	20

3 生命周期影响评价

环境影响评价主要分为分类、特征化和加权评估 3 部分。

3.1 环境影响分类

碳捕集机组消耗资源量及产出如表 12 所示。将环境影响类型分为 3 类,如表 13 所示。

表 12 碳捕集机组物质的投入产出

Table 12 Consumption and output of CCS unit material

消耗物质	消耗量	生成物质	生成量
空气/t·h ⁻¹	4096.6	发电量/MW	470.7
煤/t·h ⁻¹	220.15	CO ₂ /kg·kWh ⁻¹	0.2062
水/t·h ⁻¹	5694	SO ₂ /g·kWh ⁻¹	0.203
石灰石/t·h ⁻¹	6.20	NO _x /g·kWh ⁻¹	0.277
氨水/t·h ⁻¹	0.72	灰渣/kg·kWh ⁻¹	0.0614
NaOH/kg·h ⁻¹	17.61	脱硫石膏/kg·kWh ⁻¹	0.0251
活性炭/kg·h ⁻¹	35.23	MEA/kg·h ⁻¹	33.16

表 13 太阳能-碳捕集机组环境干扰因子分类

Table 13 Environmental disruptor of solar aided CCS unit in LCA

环境影响类型	环境干扰因子
全球变暖(最主要的)	CO ₂
酸化	SO ₂ 、NO _x
固体废弃物	灰渣、脱硫石膏

3.2 环境影响潜值

环境影响潜值指太阳能辅助碳捕集机组生产过程中所有环境排放影响的总和,表达式为:

$$\eta_{EP}(j)=\sum \eta_{EP}(j)_i=\sum [Q(j)_i\cdot \eta_{EF}(j)_i]$$

(8)

式中, $\eta_{EP}(j)$ ——太阳能辅助碳捕集机组生命周期的第 j 类潜在环境影响类型的贡献值; $\eta_{EP}(j)_i$ ——太阳能辅助碳捕集机组生命周期中第 i 类环境影响因子对第 j 类环境影响的贡献值; $Q(j)_i$ ——太阳能辅助碳捕集机组生命周期的第 j 类环境影响类型所包含的第 i 类环境影响因子的排放量; $\eta_{EF}(j)_i$ ——

太阳能辅助碳捕集机组生命周期的第 j 类环境影响类型所包含的第 i 类环境干扰因子的当量系数。

3.3 数据标准化

以人均资源消耗总量和人均对环境的潜在影响贡献作为无量纲化分析基准,以 1990 年的数据作为标准化的基准,建立每年每人平均对环境造成的影响潜值,即标准当量。

$$\eta_{NP}(j) = \eta_{EP}(j) \frac{1}{T \times \eta_{EP}(j)_{90}} \quad (9)$$

式中, $\eta_{NP}(j)$ ——标准化后的潜在环境影响和资源消耗; T ——单位电量的生命周期; $\eta_{EP}(j)_{90}$ ——1990 年第 j 类环境影响类型的基准。

3.4 加 权

对不同环境影响类型赋予不同权重,赋予权重后对环境影响潜值表达式为^[23]:

$$\eta_{WP}(j) = \eta_{WF}(j) \cdot \eta_{NP}(j) \quad (10)$$

式中, $\eta_{WP}(j)$ ——第 j 种环境影响潜值; $\eta_{WF}(j)$ ——第 j 种环境影响的权重系数。

4 结果与分析

燃煤机组和碳捕集机组碳排放如图 7 所示。燃煤机组全生命周期碳排放总量为 262.88 t/h,电厂运行阶段碳排放量为 261.3 t/h,所占比重约为 99.4%,是整个生命周期的碳排放的主要来源。其他阶段造成的间接排放,只占总排放量的 0.6%,其中电厂在建造时期排放的 CO_2 为 0.9144 t/h,占比约为 0.3%,煤炭运输阶段碳排放量为 0.5703 t/h,占 0.2%,而电厂退役阶段 CO_2 排放量最少,为 0.09144 t/h,所占比重仅为 0.1%。

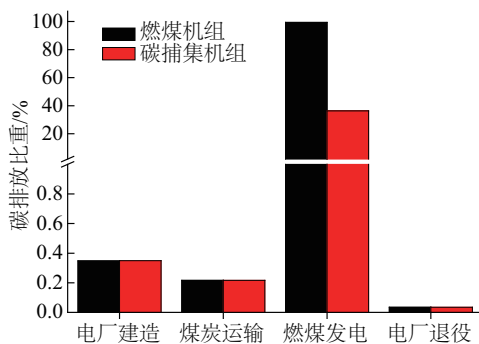


图7 碳排放比重

Fig. 7 Proportion of CO_2 emission

碳捕集率为 85% 时,碳捕集系统可捕获 CO_2 为 222.105 t/h,系统建造、运行和退役增加的 CO_2 排放量为 56.314 t/h,占耦合系统全生命周期排放总量的 58.01%。耦合系统全生命周期中,电厂建造、退役和煤炭运输阶段的碳排放总量与常规系统相同,整体全生命周期碳排放总量为 97.08 t/h。电厂每发 1 kWh 电量,碳排放量从 0.4355 kg/kWh 降到 0.2062 kg/kWh,减排率约为 52.65%。燃煤发电阶段和碳捕集系统运行阶段碳排放比重分别为 40.37% 和 58.00%,碳捕集机组排放量为 39.195 t/h,由于捕集耗能产生的 CO_2 排放量为 56.31 t/h。而碳捕集系统建造阶段和退役阶段所占比重较少,分别约为 0.0033% 和 0.0003%,电厂建造和电厂退役阶段分别占 0.94% 和 0.09%,煤炭运输阶段碳排放量占 0.59%。碳捕集机组每生产 1 kWh 的电量,全生命周期过程中各阶段碳排放量如图 8 所示。

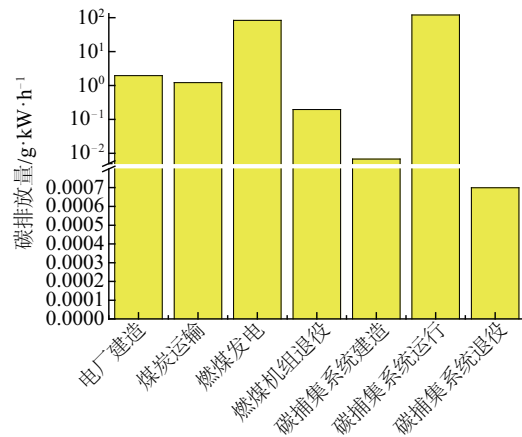


图8 碳捕集机组各阶段碳排放量

Fig. 8 CO_2 emission of CCS unit

由图 8 可知,在碳捕集燃煤机组生命周期中,电厂运行阶段的燃煤发电和碳捕集系统运行阶段的碳排放量最高,分别为 83.27 $\text{g} \cdot \text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 119.63 $\text{g} \cdot \text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$,所占比重最大的为碳捕集系统运行阶段,其次为电厂燃煤发电阶段。太阳能辅助碳捕集机组每生产 1 kWh 电量,全生命周期各阶段碳排放量如图 9 所示。由图 9 可知,太阳能辅助碳捕集系统运行时,机组在建造阶段和退役阶段碳排放量均比原燃煤机组和抽汽碳捕集机组的碳排放量有所增加。由于太阳能为碳捕集系统吸收剂解吸提供热源,在碳捕集系统运行时,该阶段的碳排放量几乎为零,此时整个耦合系统的碳排放量为 41.75 $\text{g} \cdot \text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

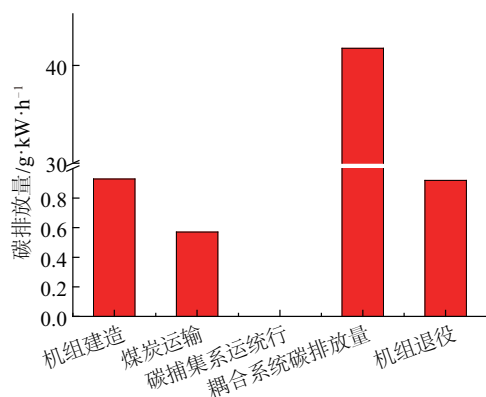


图9 太阳能-碳捕集机组各阶段碳排放量

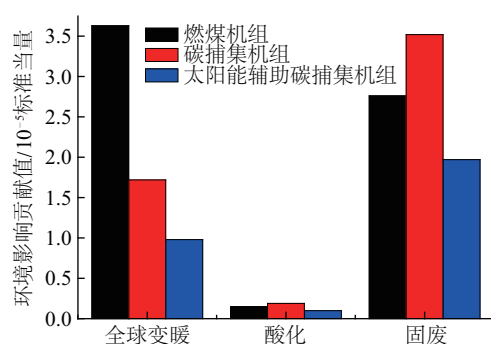
Fig. 9 CO₂ emission of solar aided CCS unit

图10 燃煤机组与碳捕集机组对环境影响贡献值

Fig. 10 Contribution value to the environment of coal-fired unit and solar aided CCS unit

由图10可知,在整个生命周期过程中,燃煤机组对全球变暖的贡献远远大于碳捕集机组,实施碳捕集技术后CO₂的排放由原来的 3.63×10^{-5} 标准当量降为 1.72×10^{-5} 标准当量,太阳能辅助碳捕集机组为 0.98×10^{-5} 标准当量。实施碳捕集技术后由于机组功率降低,致使标准化后单位电量的SO₂排放量较燃煤机组有所增加,分别为 3.166×10^{-4} kg SO₂/kWh和 3.969×10^{-4} kg SO₂/kWh,经加权计算,酸化对环境的贡献分别为 1.5×10^{-6} 标准当量和 1.9×10^{-6} 标准当量。酸化对环境的贡献为 1.0×10^{-6} 标准当量。由于机组抽汽为碳捕集系统提供热源,碳捕集机组功率降低,标准化后单位电量的固体废弃物的排放由 0.06795 kg/kWh增至 0.0865 kg/kWh。燃煤机组、碳捕集机组和太阳能辅助碳捕集机组中固体废弃物对环境的贡献分别为 2.76×10^{-5} 标准当量、 3.52×10^{-5} 标准当量和 1.97×10^{-5} 标准当量。

5 结论

1) 建立碳捕集系统与燃煤机组耦合系统的热

经济学优化模型,优化前后耦合系统的热效率分别为38.2%和39.3%,太阳能辅助碳捕集机组的热效率为44.2%。

2) 燃煤机组在生命周期内碳排放总量为262.88 t/h,电厂运行阶段碳排放量为261.3 t/h,所占比重约为99.4%,其他阶段造成的间接排放,只占总排放量的0.6%,其中电厂建造排放的CO₂为0.9144 t/h,比重约为0.3%,煤炭运输阶段碳排放量为0.5703 t/h,占0.2%,而电厂退役阶段CO₂排放量最少,为0.09144 t/h,所占比重仅为0.1%。

3) 碳捕集机组在生命周期内可捕获CO₂为222.105 t/h,碳捕集系统建造、运行和退役增加的CO₂排放量为56.314 t/h,占耦合系统全生命周期排放总量的58.01%。电厂建造及退役阶段和煤炭运输阶段的碳排放总量与燃煤机组基本相同;发电阶段,每发1 kWh电量,碳排放量从0.4355 kg/kWh降到0.2062 kg/kWh,减排率约为52.65%。而太阳能辅助碳捕集机组的碳排放量为0.04175 kg/kWh。在碳捕集燃煤机组生命周期中,电厂运行阶段的燃煤发电和碳捕集系统运行阶段的碳排放量最高,分别为83.27和119.63 g/kWh,所占比重最大的为碳捕集系统运行阶段,是耦合系统中碳排放的主要阶段,其次为电厂燃煤发电阶段。

4) 实施碳捕集技术后CO₂的排放由原燃煤机组的 3.63×10^{-5} 标准当量降低为抽汽为碳捕集系统提供热源的 1.72×10^{-5} 标准当量,太阳能辅助碳捕集机组为 0.98×10^{-5} 标准当量。酸化对环境的贡献分别为 1.5×10^{-6} 、 1.9×10^{-6} 和 1.0×10^{-6} 标准当量。固体废弃物对环境的贡献分别为 2.76×10^{-5} 、 3.52×10^{-5} 和 1.97×10^{-5} 标准当量。

[参考文献]

- [1] Skorek-Osikowska Anna, Bartela Łukasz, Kotowicz Janusz. Thermodynamic and ecological assessment of selected coal-fired power plants integrated with carbon dioxide capture [J]. Applied Energy, 2017, 200 (2): 73—88.
- [2] Duan Liqiang, Xia Kun, Feng Tao, et al. Study on coal-fired power plant with CO₂ capture by integrating molten carbonate fuel cell system [J]. Energy, 2016, 117 (2): 578—589.
- [3] Hanak Dawid P, Kolios Athanasios J, Manovic Vasilije, et al. Comparison of probabilistic performance

- of calcium looping and chemical solvent scrubbing retrofits for CO₂ capture from coal-fired power plant[J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 323—336.
- [4] Brandl Patrick, Soltani Salman Masoudi, Fennell Paul S, et al. Evaluation of cooling requirements of post-combustion CO₂ capture applied to coal-fired power plants[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 122: 1—10.
- [5] Yu Shiwei, Zhang Junjie, Cheng Jinhua. Carbon reduction cost estimating of Chinese coal-fired power generation units: A perspective from national energy consumption standard[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139(1): 612—621.
- [6] Cormos Ana-Maria, Cormos Calin-Cristian. Reducing the carbon footprint of cement industry by post-combustion CO₂ capture: Techno-economic and environmental assessment of a CCS project in Romania[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 123(1): 230—239.
- [7] Rafiee Ahmad, Panahi Mehdi, Khalilpour Kaveh Rajab. CO₂ utilization through integration of post-combustion carbon capture process with Fischer-Tropsch gas-to-liquid (GTL) processes[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017, 18(8): 98—106.
- [8] Rio Maria Sanchez del, Gibbins Jon, Lucquiaud Mathieu. On the retrofitting and repowering of coal power plants with post-combustion carbon capture: An advanced integration option with a gas turbine windbox[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58(3): 299—311.
- [9] Wang Fu, Zhao Jun, Li Hailong, et al. Preliminary experimental study of post-combustion carbon capture integrated with solar thermal collectors[J]. *Applied Energy*, 2017, 185(2): 1471—1480.
- [10] Ferrara G, Lanzini A, Leone P, et al. Exergetic and exergoeconomic analysis of post-combustion CO₂ capture using MEA-solvent chemical absorption[J]. *Energy*, 2017, 130(1): 113—128.
- [11] Weisser D. A guide to life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1543—1559.
- [12] Tahara K, Kojima T, Inaba A. Evaluation of CO₂ pay back time of power plants by LCA[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(1): 615—620.
- [13] Muramatsu E, Iijim A M. Life cycle assessment for CO₂ capture technology from exhaust gas of coal power plant [A]. *Proceeding of the 6th International Conference [C]*, Oxford: Greenhouse Gas Control Technologies, 2003.
- [14] Babbitt C W, Lindner A S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(9): 903—912.
- [15] Koornneef J, Faaij A, Turkenburg W. The screening and scoping of environmental impact assessment and strategic environmental assessment of carbon capture and storage in the Netherlands[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2008, 28(6): 392—414.
- [16] Wijaya M E, Limmeechokchai B. The hidden costs of fossil power generation in Indonesia: A reduction approach through low carbon society[J]. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2010, 32(1): 81—89.
- [17] Stanley Jessica R, Moisés Dávila-Serrano. A life cycle assessment of a coal fired power plant with carbon capture and storage in Mexico[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2012, 7(41): 5624—5641.
- [18] 韩中合, 王继选. CO₂减排机理及与燃煤电厂集成特性研究[J]. *动力工程学报*, 2013, 33(10): 808—814.
- [18] Han Zhonghe, Wang Jixuan. Study on mechanism of CO₂ capture process and its integration with power generation systems[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(10): 808—814.
- [19] 韩中合, 王继选, 刘小贞, 等. 太阳能辅助火电机组燃烧后碳捕集的集成方式研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(2): 311—319.
- [19] Han Zhonghe, Wang Jixuan, Liu Xiaozhen. Study on integration system of post-combustion carbon capture of solar thermal aided coal-fired power plant[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2014, 35(2): 311—319.
- [20] Tahara K, Kojima T, Inaba A. Evaluation of CO₂ pay back time of power plants by LCA[J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(1): 615—620.
- [21] 陈春香, 马晓茜. 燃煤机组富氧燃烧发电的生命周期评价[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(S1): 82—87.
- [21] Chen Xiangxiang, Ma Xiaoqian. Life cycle assessment on oxygen-enriched combustion of coal-fired power generation units[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(S1): 82—87.
- [22] Berry J E, Holland M R, Joh Nson C, et al. Full fuel

- cycle study on power generation schemes incorporating the capture and disposal of carbon dioxide [R]. United Kingdom: ETSU, 1994.
- [23] 武民军. 燃煤发电的生命周期评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [23] Wu Minjun. The life cycle assessment of coal-fired power generation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.

THERMO-ECONOMY STUDY AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SOLAR AIDED COAL-FIRED UNIT WITH CARBON CAPTURE

Wang Jixuan¹, Liu Xiaozhen², Gao Lisha³, Liu Danna⁴, Meng Xin¹, Yu Zuodong¹

(1. School of Water Conservancy and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China;

2. Handan Polytechnic College, Electronic and Information Engineering, Handan 056001, China;

3. Hebei Electric Power Engineering Supervision CO., LTD., Shijiazhuang 050011, China;

4. Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Carbon dioxide capture and storage (CCS) is a technology to reduce carbon emission and the key to develop low-carbon power. This study has established an environment-friendly coupling system of solar aided coal-fired unit with carbon capture. The optimization model for thermal economics of the coupling system is successfully constructed, which aims at researching thermal-economy of the coupling system. Meanwhile it is effective to apply life cycle assessment (LCA) to CCS unit, with the purpose to analyse the CO₂ emitted from carbon capture unit during the stages of construction, operation and retirement. Through comparison study, the environmental characteristics of the unit are researched. As a result, when carbon capture rate is 85% and mass fraction of absorbent is 30%, energy consumption of desorption is 4.5 GJ/tCO₂, with the thermal efficiency 38.2% and 39.3% before and after the optimization. The study also reveals that approximately 99.4% of the CO₂ emissions of coal-fired unit is derived from running stages and 0.6% CO₂ emissions is derived from power plant construction, coal transportation and power plant retirement. The study also indicates that the amount of CO₂ emissions increased by CCS system's construction, operation and retirement is 56.314 t/h. This amount accounts for 58.01% of the total emissions of the coupling system. CO₂ emissions reduction rate is about 52.65%. The CO₂ emission of CCS unit and solar aided coal-fired unit is 1.72×10^{-5} and 0.98×10^{-5} standard unit value, compared to the coal-fired unit's 3.63×10^{-5} . The contribution to the environment of the acidification is 1.5×10^{-6} , 1.9×10^{-6} and 1.0×10^{-6} standard unit value and the solid waste treatment is 2.76×10^{-5} , 3.52×10^{-5} and 1.97×10^{-5} standard unit value.

Keywords: coal-fired boilers; carbon capture; life cycle; solar