

Energy Consumption Analysis of Coal-Fired Power Plant with CO₂ Capture System Based on Solar Energy

Haiping Chen, Jing Wang*, Ping Li, Shengli Wu

Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University), Ministry of Education, Beijing

Email: www1025jjj@163.com

Received: Aug. 7th, 2011; revised: Sep. 10th, 2011; accepted: Sep. 12th, 2011.

Abstract: According to the high energy consumption and cost of CO₂ emission reduction in thermal power plant, by the coupling mechanism study and integrated optimization of solar energy collection system, amiodogen CO₂ emission reduction system and coal-fired power plant thermal system, it is simulated and analyzed that the change of thermal economy of 600 MW Coal-fired units CO₂ capture system with amino in the condition of THA、75% THA、50% THA, which has various carbon capture rate, by using equivalent heat drop method, when solar supply energy to the system. And the trend of change on unit operation thermal economy is obtained in different carbon capture rate. It is shown that the relative increase of unit operation thermal economy increases with the carbon capture rate. To the conclusion, Optimization Design of System integration is carried out, and reference for achieving low energy consumption and cost of CO₂ emission reduction is supplied.

Keywords: CO₂ Capture; Solar Energy; Equivalent Heat Drop Method; Thermal Economy

基于太阳能集热技术的火电厂 CO₂ 捕捉系统 能耗特性分析

陈海平, 王 琛*, 李 平, 吴胜利

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), 北京

Email: www1025jjj@163.com

收稿日期: 2011年8月7日; 修回日期: 2011年9月10日; 录用日期: 2011年9月12日

摘 要: 针对火电厂 CO₂ 减排的高能耗与高成本问题, 本文通过对太阳能集热系统、胺基 CO₂ 捕集系统与火电机组热力系统的耦合机理研究及其系统的集成优化, 应用等效焓降法, 模拟分析了太阳能供能条件下, 拥有胺基 CO₂ 捕集系统的 600 MW 燃煤机组在 THA、75% THA、50% THA 工况下不同碳捕捉率时的热经济性变化情况, 得出了不同碳捕捉率下机组运行热经济性的变化趋势, 结果表明, 机组运行热经济性的相对提高程度随碳捕捉率的增加而增大, 在此基础上, 进行了系统集成方案的优化设计, 以期为实现低能耗、低成本的 CO₂ 减排提供借鉴。

关键词: CO₂ 捕集; 太阳能; 等效焓降法; 热经济性

1. 引言

目前, 温室效应已成为一个全球性共同关注的问题。以 CO₂ 为代表的温室气体的大量排放导致了全球温室效应的加剧, 这使得气候干旱、土地沙漠化、海平面上升、世界各地海岸线的大面积淹没。为了遏制

全球变暖趋势, 第三次世界气候大会通过了《京都议定书》以限制温室气体排放, 国内外正在积极通过开发新能源及新技术实现 CO₂ 减排。中国作为发展中大国, 探索一条适合我国国情的低碳经济 - 能源 - 电力的发展路径是至关重要的^[1]。

火电厂是煤炭耗用大户，是最大的 CO₂ 集中排放源，控制燃煤电厂 CO₂ 的排放是减少大气中二氧化碳含量的重要切入点。研究表明，对于运行中的燃煤发电厂而言，胺基化学吸收法是一种具有工程可行性的燃烧后 CO₂ 减排技术^[2]；然而，采用该技术并使用汽轮机某级抽汽作为溶剂再生热源而进行燃烧后 CO₂ 捕捉将使发电厂效率降低 6~15 个百分点，CO₂ 减排成本达到 15~70 美元/吨 CO₂，再考虑到 CO₂ 的运输与埋存费用，减排成本甚至超过 100 美元/吨 CO₂^[3]。CO₂ 减排的高能耗与高成本是阻碍此项技术广泛应用的主要因素。

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源，将太阳能作为燃煤电厂燃烧后胺基 CO₂ 减排系统的溶剂再生热源，并通过太阳能集热系统、燃烧后胺基 CO₂ 减排系统与燃煤电厂热力系统的流程互补与系统集成，合理、科学的利用能量密度高的化石燃料生产品位高的电能和能量密度低的太阳能提供品位低的热能（作为 CO₂ 减排系统的溶剂再生热源），以实现燃煤电厂二氧化碳的低能耗和低成本减排。为此，本文以国产 600 MW 火电机组为例展开研究，以期为能源利用领域内 CO₂ 的高效、低成本减排提供借鉴。

2. 槽式太阳能集热技术

抛物面槽式太阳能集热器的工作原理是：借助槽形抛物面聚光器把太阳光聚焦反射到接收集热管上，直接把水加热或通过管内热介质将水加热，可产生温度 $T \leq 400^\circ\text{C}$ 、压力 $p \leq 10 \times 10^6 \text{ Pa}$ 的蒸汽^[4]。这种集热技术的优点是结构简单，只需南北跟踪，东西不跟踪，而且比较容易产业化。缺点是聚光效率比较低，余弦损失较大。在槽式太阳能集热系统中应用 DSG (Direct Steam Generation) 技术具有降低成本、提高效率等诸多优点^[5]。DSG 技术的实现方式有 3 种：一次通过模式、逐次注入模式、再次循环模式。

2.1. 一次通过模式

注入吸收管的水经预热后进入集热器被加热成过热蒸汽。系统流程如图 1 所示。

2.2. 逐次注入模式

系统由数个集热单元组成，水被分别注入每个单元直接加热成过热蒸汽。系统流程如图 2 所示。

2.3. 再次循环模式

在蒸发末端设置汽水分离器；水以较高流速流过集热区蒸发，部分获得湿蒸汽，未蒸发的水和生成的蒸汽被汽水分离器分离。分离水被再次循环到集热器的进口与新注入的水混合后一起被加热；蒸汽在集热器的过热段被进一步加热到所需温度的过热蒸汽。系统流程如图 3 所示。

三种直接蒸汽产生系统模式的特点比较如表 1 所示。

综合分析，再次循环系统是直接蒸汽产生系统中最理想的系统模式，也是本文所使用的系统。

3. 燃烧后 CO₂ 捕捉系统

燃烧后 CO₂ 捕捉系统安装在脱硫系统之后。从脱硫系统出来的烟道气脱除部分水并加压降温后进入吸



Figure 1. Once through mode
图 1. 一次通过模式

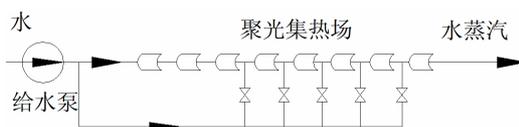


Figure 2. Successive injection mode
图 2. 逐次注入模式

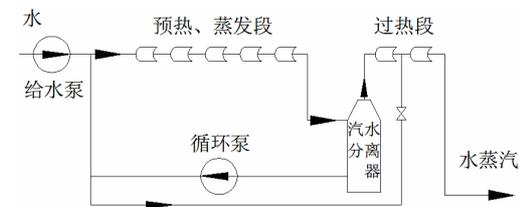


Figure 3. Re-circulation mode
图 3. 再次循环模式

Table 1. Characteristic comparison among three types of system which produce steam directly
表 1. 三种直接蒸汽产生系统模式特点比较

项目	成本	结构	参数控制
一次通过模式	较低	最简单	最难
逐次通过模式	最高	最复杂	较难
再次循环模式	较低	较简单	最易

收塔,在塔中与 MEA 贫液逆流接触,净化后气体从塔顶引出。吸收 CO₂ 后的 MEA 溶液(富液)经贫富液换热器后送至再生塔,解析出的 CO₂ 连同水蒸气进入闪蒸罐分离可得到纯度为 98% 的 CO₂ 产品气体。由再生塔塔底流出的 MEA 溶液(贫液)经贫富液换热器与补充的 H₂O、MEA 混合后加压降温进入吸收塔。MEA 溶液往返循环构成连续吸收和解吸的 CO₂ 的工艺过程。系统流程简图如图 4 所示。

系统中风机的主要作用是补偿压降,由于吸收塔操作时的压力高于大气压,因此烟道气需要用风机压缩。

冷凝器的作用是用来降低各股流体的温度。在烟道气进入风机前冷凝器将其温度降至 40℃,然后进入吸收塔,因为 MEA 和 CO₂ 吸收反应在温度较低(一般为 40℃)时反应完全,同时较低的温度也可以降低溶剂降解和设备腐蚀的速率。

换热器的主要作用是用来交换吸收塔底部低温出料和再生塔底部高温出料的热量,它作为一个逆流换热器,在富液进入再生塔前对其加热,使之达到最大换热量。

再生塔的作用是将 CO₂ 从富液中解吸出来,得到纯净的 CO₂,再生后的贫液 MEA 继续循环利用。再生塔的塔底加热介质为饱和水蒸气或微过热水蒸气,塔顶可以使用循环水做冷却介质。溶剂再生的能耗为本系统的主要能耗。

4. 集成系统的工艺流程

传统利用汽轮机抽汽提供溶液再生能耗的碳捕捉

系统会导致机组循环热效率降低,主要原因是抽汽使得机组产生能量损失,基于此研究用新能源代替 CO₂ 再生所需的抽汽。通过前面的介绍本文将太阳能集热系统、胺基 CO₂ 捕捉系统与机组热力系统集成在一起以求降低电厂碳捕捉的成本。

以 600 MW 燃煤电厂为研究对象,基于太阳能供能条件下的胺基 CO₂ 捕捉系统与机组热力系统的集成工艺流程如图 5 所示。其中,以凝结水泵出口凝结水作为太阳能集热系统的集热工质,该凝结水经太阳能集热系统后被加热至压力为 0.4 MPa、温度为 144℃ 的蒸汽,以此作为 CO₂ 捕捉系统中溶液再生的热源,利用其汽化潜热来提供再沸器溶剂再生所需要的热负荷,出再沸器的为相应压力下的饱和水,并将其返回至回热系统。

5. 集成系统的能耗特性分析

5.1. 集成系统运行能耗计算模型的构建

针对前述集成系统,采用等效焓降法^[6]建立集成系统运行能耗的分析与计算模型如下。

5.1.1. 再沸器入口蒸汽流量

对于再沸器列热平衡方程如下:

$$D_{\text{汽}}(h_{\text{进}} - h_{\text{出}}) = D_{\text{CO}_2\text{总}} \delta \cdot Q$$

式中: $D_{\text{汽}}$ ——再沸器入口蒸汽流量, t/h

$h_{\text{进}}$ ——再沸器入口水蒸汽焓, kJ/kg

$h_{\text{出}}$ ——再沸器出口水焓, kJ/kg

$D_{\text{CO}_2\text{总}}$ ——CO₂ 总的排放量, t/h

Q ——脱除单位 CO₂ 所需能耗, kJ/t·CO₂

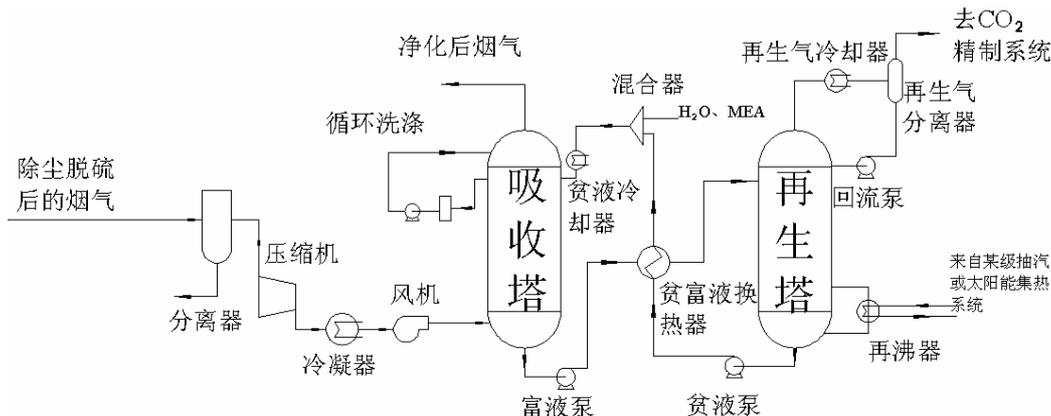


Figure 4. Craft flow diagram of CO₂ capture system
图 4. CO₂ 捕捉系统工艺流程图

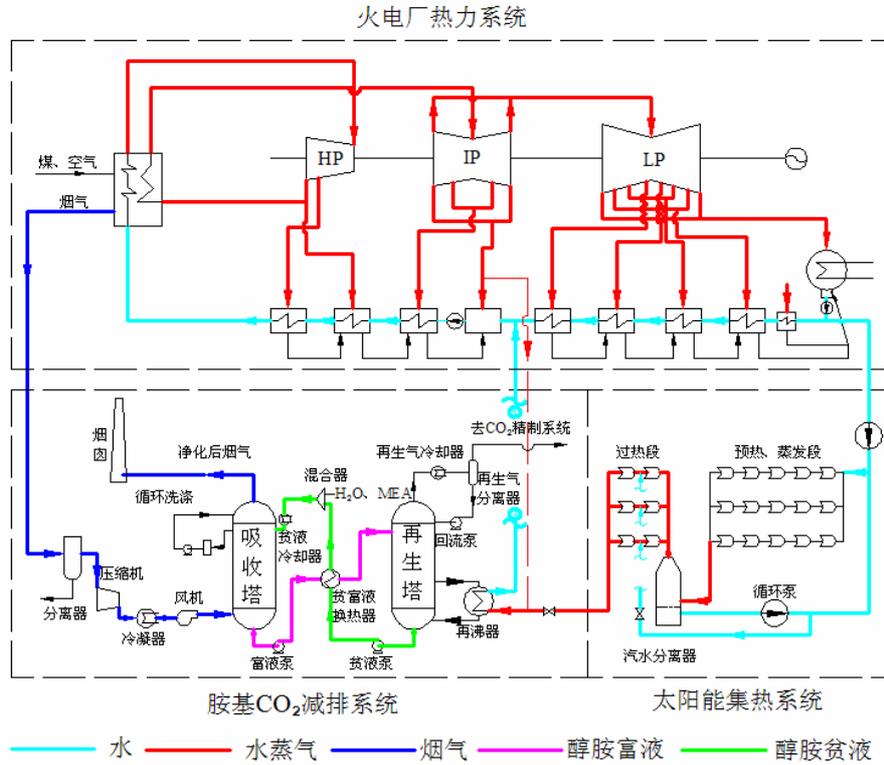


Figure 5. Craft flow diagram of new type integration system
图 5. 新型集成系统工艺流程

δ ——碳捕捉率，表示二氧化碳捕捉量占二氧化碳排放总量的比例。

上式中求出的再沸器入口蒸汽量也就是太阳能集热系统的出口蒸汽量，而在太阳能集热系统中，通过对集热器的布置和汽水分离器的选型，可使得太阳能集热系统的入口水量等于系统出口的蒸汽量。

定义 α 为太阳能集热系统入口水流量占回热系统主给水流量的份额，其计算式如下：

$$\alpha = D_{\text{水}} / D_0$$

式中： $D_{\text{水}} = D_{\text{汽}}$

5.1.2. 能耗分析

由图 5 可知，600 MW 机组回热系统由八级回热加热器组成，从右至左其编号依次为 1 到 8 号。按照等效焓降法，凝结水出系统属于带工质的热量离开系统，它的做功损失为 ΔH_1 ：

$$\Delta H_1 = \alpha (h_{\text{水}} - h_{\text{补水}}), \text{ [kJ/kg]}$$

式中： $h_{\text{水}}$ ——凝结水泵出口凝结水焓，kJ/kg；

$h_{\text{补水}}$ ——凝汽器补水焓，取补水温度 20℃，其焓值为 83.86 kJ/kg。

对于 CO₂ 捕捉系统再沸器出口的饱和水，可以将其返回机组回热系统加以利用，按照等效焓降法，其属于热水携带热量入系统，它所带来的等效热降变化为 ΔH_2 ，按照其引入回热系统不同地点以及不同方式来划分，其计算式如下：

1) 返回主凝结水管道，分为从 4 号加热器出口返回系统(方案 1)和从 3 号加热器出口返回系统(方案 2)，计算公式为：

$$\Delta H_2 = \alpha \left[(h_{\text{出}} - \bar{t}_j) \eta_{j+1} + \sum_{r=1}^j \tau_r \eta_r \right], \text{ [kJ/kg]}$$

式中： \bar{t}_j ——第 j 级加热器的出口水焓，kJ/kg；

η_{j+1} ——第 $j+1$ 级加热器的抽汽效率；

τ_r ——1 kg 水在第 j 级加热器中的焓升，kJ/kg。

2) 作为补水从除氧器补入系统(方案 3)，计算公式为：

$$\Delta H_2 = \alpha \left[-(t_m - h_{\text{出}}) \eta_m + \sum_{r=1}^m \tau_r \eta_r \right], \text{ [kJ/kg]}$$

式中： t_m ——除氧器出口水焓，kJ/kg。

3) 从 4 号加热器疏水管路返回系统(方案 4)，计算公式为：

$$\Delta H_2 = \alpha \left[(h_{\text{出}} - \bar{t}_{sj}) \eta_{j-1} + \sum_{r=m}^{j-1} \gamma_r \eta_r + \sum_{r=1}^{m-1} \tau_r \eta_r \right], [\text{kJ/kg}]$$

式中: \bar{t}_{sj} ——第 j 级加热器疏水焓, kJ/kg;
 γ_r ——第 r 级加热器的疏水放热量, kJ/kg。

综上所述可得: $\Delta H = -\Delta H_1 + \Delta H_2$

$$\text{装置效率相对提高: } \delta \eta_i = \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \times 100\%$$

5.2. 不同工况下碳捕捉系统能耗特性分析

5.2.1. 计算用基础数据

计算用煤质资料及汽轮机组热力性能数据如表 2 和表 3 所示。

5.2.2. THA 工况

依据表 3 数据, 在 THA 工况下, 机组循环吸热量、主蒸汽等效热降及循环热效率的计算结果如下:

$$Q_0 = h_0 - h_{\text{gs}} + \alpha_{\text{zr}} \sigma + \tau_p = 2655.068 \text{ kJ/kg}$$

$$H_0 = 1225.075 \text{ kJ/kg}; \quad \eta_0 = \frac{H_0}{Q_0} = 46.141\%$$

Table 2. The elemental analysis of coal composition
 表 2. 煤的元素分析成分表

煤的收到基	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	灰分 A _{ar}	水分 M _{ar}
比例(%)	56.97	3.5	9.18	0.94	0.7	11.65	17.06

Table 3. Steam turbine thermal performance parameter at three working conditions

表 3. 三种工况下的汽轮机热力性能参数

参 数 \ 工 况	THA	75% THA	50% THA
主蒸汽流量 D_0	1803.938 t/h	1345.527 kJ/kg	938.62 kJ/kg
给水焓值 h_{gs}	1202.3 kJ/kg	1120.0 kJ/kg	1034.5 kJ/kg
主蒸汽焓值 h_0	3396.9 kJ/kg	3396.9 kJ/kg	3459.8 kJ/kg
排汽焓值 h_c	2341.9 kJ/kg	2384.3 kJ/kg	2446.0 kJ/kg
再热吸热量 σ	521.3 kJ/kg	545.8 kJ/kg	457.6 kJ/kg
凝结水焓值 h_n	136.3 kJ/kg	136.3 kJ/kg	136.3 kJ/kg
泵功 τ_p	25.4 kJ/kg	25.5 kJ/kg	20.3 kJ/kg

在 THA 工况下, 脱硫后烟气中 CO₂ 流量为 9127.320 kmol/h, 约合 401.6 t/h, 由模拟可知每吸收 1 吨 CO₂ 最低能耗约为 3.55 GJ^[7-9]。太阳能集热系统出口微过热蒸汽(0.4 MPa、144 °C^[10])汽化潜热为 2132.53 kJ/kg。凝结水泵出口水参数为 1.724 MPa, 32.54 °C。在上述条件下, 600 MW 燃煤机组在 THA 工况不同碳捕捉率下的碳捕捉量、溶剂再生所需蒸汽量(太阳能集热系统入口水流量)和不同方案下碳捕捉系统所带来的机组做功变化及循环热效率的相对变化情况如表 4。可以看出随着碳捕捉量的增加, 四种方案的机组做功变化和循环热效率都在增加。其中方案三的增益较为明显。

5.2.3. 75% THA 工况

依据表 3 数据, 在 75% THA 工况下, 机组循环吸热量、主蒸汽等效热降及循环热效率的计算结果如下:

$$Q_0 = 2769.354 \text{ kJ/kg}, \quad H_0 = 1244.091 \text{ kJ/kg};$$

$$\eta_0 = 44.9235\%$$

在 75% THA 工况下, 脱硫后烟气中 CO₂ 流量 6936.895 kmol/h, 约合 305.22 t/h。600 MW 燃煤机组在 75% THA 工况不同碳捕捉率下的碳捕捉量、溶剂再生所需蒸汽量(太阳能集热系统入口水流量)和不同方案下碳捕捉系统所带来的机组做功变化及循环热效率的相对变化的情况如表 5。

5.2.4. 50% THA 工况

依据表 3 数据, 在 50% THA 工况下, 机组循环吸热量、主蒸汽等效热降及循环热效率的计算结果如下:

$$Q_0 = 2848.457 \text{ kJ/kg}, \quad H_0 = 1211.499 \text{ kJ/kg};$$

$$\eta_0 = 42.5318\%$$

在 50% THA 工况下, 脱硫后烟气中 CO₂ 流量 4680.122 kmol/h, 约合 205.93 t/h, 表 6 给出了该工况下不同碳捕捉率的碳捕捉量、抽水量情况和不同方案下碳捕捉系统所带来的机组做功变化及循环热效率的相对变化情况。

通过表 4~表 6 的对比分析可以看出, 在三种不同的工况下, 第 3 种方案较其他方案所带来的机组循环热效率的相对增益较大。图 6 为 THA、75% THA、50% THA 工况下方案 3 的装置热经济性相对提高值与碳捕捉率的关系。

Table 4. The energy consumption characteristics analysis data for the 600 MW unit with CO₂ capture at THA working condition
表 4. 600 MW 机组 THA 工况下碳捕捉系统能耗特性分析数据

δ	5%			15%			20%			30%			40%		
D_{CO_2} (t)	20.08			60.24			80.32			120.48			160.64		
D_* (t)	33.43			100.28			133.71			200.56			267.42		
ΔH_1	0.97			2.92			3.89			5.83			7.77		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	1.43	0.46	0.04	4.30	1.38	0.11	5.73	1.84	0.15	8.59	2.76	0.22	11.46	3.68	0.30
方案2	1.36	0.39	0.03	4.08	1.17	0.10	5.44	1.56	0.13	8.16	2.33	0.19	10.88	3.11	0.25
方案3	1.56	0.59	0.05	4.69	1.77	0.14	6.25	2.36	0.19	9.38	3.55	0.29	12.50	4.73	0.38
方案4	1.10	0.13	0.01	3.29	0.38	0.03	4.39	0.50	0.04	6.59	0.76	0.06	8.78	1.01	0.08
δ	50%			60%			70%			80%			90%		
D_{CO_2} (t)	200.8			240.96			281.12			321.28			361.44		
D_* (t)	334.27			401.12			467.98			534.83			601.69		
ΔH_1	9.72			11.66			13.60			15.55			17.49		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	14.32	4.60	0.37	17.18	5.52	0.45	20.05	6.44	0.52	22.91	7.36	0.60	25.77	8.28	0.67
方案2	13.60	3.89	0.32	16.33	4.67	0.38	19.05	5.44	0.44	21.77	6.22	0.51	24.49	7.00	0.57
方案3	15.63	5.91	0.48	18.75	7.09	0.58	21.88	8.27	0.67	25.00	9.45	0.77	28.13	10.64	0.86
方案4	10.98	1.26	0.10	13.17	1.51	0.12	15.37	1.77	0.14	17.57	2.02	0.16	19.76	2.27	0.19

Table 5. The energy consumption characteristics analysis data for the 600 MW unit with CO₂ capture at 75% THA working condition
表 5. 600 MW 机组 75% THA 工况下碳捕捉系统能耗特性分析数据

δ	5%			15%			20%			30%			40%		
D_{CO_2} (t)	15.26			45.78			61.04			91.57			122.09		
D_* (t)	25.40			76.21			101.62			152.43			203.24		
ΔH_1	0.99			2.97			3.96			5.94			7.92		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	1.54	0.55	0.04	4.61	1.64	0.13	6.15	2.19	0.18	9.22	3.28	0.26	12.30	4.38	0.35
方案2	1.42	0.43	0.03	4.27	1.30	0.10	5.69	1.73	0.14	8.54	2.60	0.21	11.39	3.46	0.28
方案3	1.67	0.68	0.05	5.01	2.04	0.16	6.69	2.72	0.22	10.03	4.09	0.33	13.37	5.45	0.44
方案4	1.11	0.12	0.01	3.33	0.36	0.03	4.44	0.48	0.04	6.66	0.72	0.06	8.88	0.96	0.08
δ	50%			60%			70%			80%			90%		
D_{CO_2} (t)	152.61			183.13			213.65			244.18			274.70		
D_* (t)	254.05			304.86			355.67			406.48			457.29		
ΔH_1	9.90			11.88			13.86			15.84			17.82		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	15.37	5.47	0.44	18.45	6.57	0.53	21.52	7.66	0.61	24.60	8.76	0.70	27.67	9.85	0.79
方案2	14.23	4.33	0.35	17.08	5.20	0.42	19.92	6.06	0.49	22.77	6.93	0.55	25.62	7.80	0.62
方案3	16.71	6.81	0.54	20.06	8.17	0.65	23.40	9.54	0.76	26.74	10.90	0.87	30.08	12.26	0.98
方案4	11.10	1.20	0.10	13.32	1.44	0.12	15.54	1.68	0.13	17.76	1.92	0.15	19.98	2.16	0.17

Table 6. The energy consumption characteristics analysis data for the 600 MW unit with CO₂ capture at 50% THA working condition
表 6. 600 MW 机组 50% THA 工况下碳捕捉系统能耗特性分析数据

δ	5%			15%			20%			30%			40%		
D_{CO_2} (t)	10.30			30.89			41.19			61.78			82.37		
D_* (t)	17.14			51.42			68.56			102.84			137.12		
ΔH_1	0.96			2.87			3.83			5.75			7.66		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	1.51	0.56	0.05	4.54	1.67	0.14	6.06	2.22	0.18	9.08	3.34	0.27	12.11	4.45	0.37
方案2	1.35	0.39	0.03	4.06	1.18	0.10	5.41	1.58	0.13	8.11	2.37	0.20	10.82	3.16	0.26
方案3	1.61	0.66	0.05	4.84	1.97	0.16	6.46	2.62	0.22	9.68	3.94	0.32	12.91	5.25	0.43
方案4	1.01	0.05	0.004	3.03	0.15	0.01	4.04	0.21	0.02	6.05	0.31	0.03	8.07	0.41	0.03
δ	50%			60%			70%			80%			90%		
D_{CO_2} (t)	102.97			123.56			144.15			164.74			185.34		
D_* (t)	171.40			205.69			239.97			274.25			308.53		
ΔH_1	9.58			11.49			13.41			15.32			17.24		
	ΔH_2	ΔH	$\delta\eta_i$												
方案1	15.14	5.56	0.46	18.17	6.67	0.55	21.19	7.79	0.64	24.22	8.90	0.73	27.25	10.01	0.82
方案2	13.52	3.16	0.26	16.23	4.74	0.39	18.93	5.52	0.45	21.64	6.31	0.52	24.34	7.10	0.58
方案3	16.14	6.56	0.54	19.37	7.87	0.65	22.59	9.19	0.75	25.82	10.50	0.86	29.05	11.81	0.97
方案4	10.09	0.51	0.04	12.11	0.62	0.05	14.13	0.72	0.06	16.14	0.82	0.07	18.16	0.93	0.08

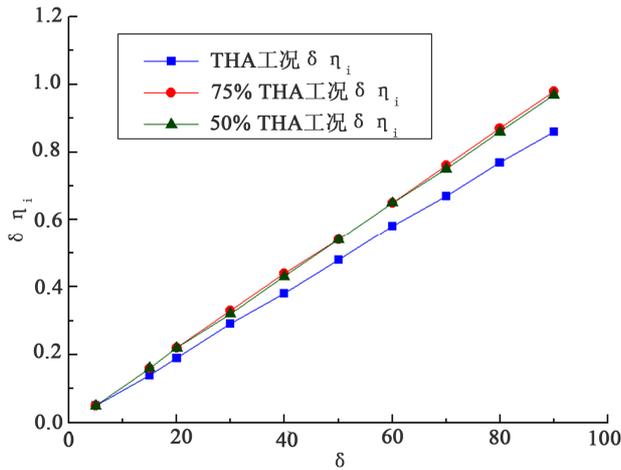


Figure 6. The curve relationship of option 3 between the relative changes in thermal efficiency and carbon capture rate
图 6. 方案 3 热效率相对变化与碳捕捉率之间的关系曲线

由图 6 可看出，机组热经济性相对提高程度随碳捕捉率的增加而增大。当碳捕捉率为 90% 时，在 THA、75% THA 及 50% THA 工况下方案 3 的循环热效率分别增加了 0.86%、0.98% 和 0.97%。

按煤价 800 元/吨，600 MW 机组在 THA、75% THA 及 50% THA 工况下发电标准煤耗分别为 320.54 g/kWh、324.82 g/kWh 和 328.72 g/kWh。可得出全年标准煤耗量(年利用小时 5000 h)分别为 961,620 t、

730,845 t 和 493,080 t。当碳捕捉率为 90% 时，在 THA 工况下方案 3 使得标准煤耗降低 2.76 g/kWh，全年节约标准煤 8276.7 t，节省了约 662 万元。

目前利用太阳能利用成本较高，但一次能源是不可再生的，利用太阳能将是一个合理的选择，我们工作的主要任务就是如何提高太阳能规模化产业化，从而降低太阳能的利用成本。

6. 结论与展望

1) 新型 CO₂ 减排系统与利用汽轮机抽汽提供溶液再生能耗相比，不仅没有降低机组热经济性，反而使机组的相对效率有了一定程度的提高。

2) 根据节能理论，分别求解出 THA、75% THA、50% THA 工况下不同碳捕捉率对应的四种方案的热经济性变化情况。得出将再沸器出口水作为补水从除氧器补入系统时的循环热效率的相对提高值最大，并且随碳捕捉率的增大而增加。

3) 从上述的计算分析中可以看出，新型的集成系统降低了 CO₂ 减排的能耗，但对太阳能集热系统的技术有一定得要求。因此开发成本更低、效率更高的太阳能集热系统，是进一步降低 CO₂ 减排成本的一个研究方向。

参考文献 (References)

- [1] 胡兆光. 中国特色的低碳经济、能源、电力之路初探[J]. 中国能源, 2009, 32(11): 16-19.
- [2] 仲伟龙. CO₂ 化学吸收技术研究[D]. 浙江大学, 2008.
- [3] 徐刚. 减排 CO₂ 的能源动力系统综合评价与多目标优化[D]. 中国科学院工程热物理研究所, 2007: 12.
- [4] 廖伟初, 柯秀芳. 太阳能集热器在中高温蒸汽生产中的应用[J]. 节能技术, 2008, 26(150): 328-331.
- [5] 王军, 张耀明, 刘德有, 孙利国, 安翠翠. DSG 技术在槽式太阳能热发电中的实践[J]. 太阳能, 2007, 3: 20-22.
- [6] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学, 1994.
- [7] D. Singh, E. Croiset, P. Douglas and M. Douglas. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired Power Plant: MEA scrubbing vs O₂/CO₂ recycle combustion. Energy Conversion & Management, 2003, 44(19): 3073-3091.
- [8] H. Article, J. M. Perera, S. E. Kentish, et al. CO₂ absorption behavior with a novel random packing: super miniring. Separation Science and Technology, 2007, 42(4): 701-716.
- [9] Z. W. Liang, L. P. T. Uthiku and R. Idem. Simulation of the effects of lean loading and flue Gas temperature (with and without a saturator) on energy requirements for absorption of CO₂ in 30 wt MEA solution using ProMax2.0. Ottawa: 58th Canadian Chemical Engineering Conference, 2008: 20-22.
- [10] 黄斌, 许世森, 郜时旺. 华能北京热电厂 CO₂ 捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-15.