

基于技术经济学的碳捕集系统与 燃煤电厂耦合对比研究

张利君*

(神华神东电力有限责任公司萨拉齐电厂, 内蒙古 包头 014100)

摘要:建立了碳捕集系统仿真模型和热力系统变工况模型, 提出添加和不添加小汽机的碳捕集耦合方式, 并从热经济性和技术经济性上对比 2 种耦合方案。结果显示, 不添加小汽轮机而尽量多地采用低段抽汽时, 脱碳机组相对于原机组出力降低 113.06 MW, 发电效率降低 7.79%, 发电煤耗增加 33.09 g/kWh, 发电成本增加 0.191 元/kWh, 脱碳成本为 270.33 元/kWh。添加小汽轮机后, 碳捕集机组的净输出功率提高 43.45 MW, 发电效率提高 3.23%, 发电煤耗降低 28.55 g/kWh, 发电成本降低 0.034 元/kWh, 捕碳成本降低 48.58 元/t。综上, 添加小汽轮机从热经济性和技术经济性上占有优势。

关键词:碳捕集; 单乙醇胺; 小汽轮机; 耦合方案

中图分类号: TK82

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)10-0189-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.10.045

Optimization of coupling carbon capture system with coal fired power plant based on technological economics

ZHANG Li-jun*

(Sa Laqi Power Plant, Shenhua Shendong Power Company Limited, Baotou 014100, China)

Abstract: The simulation model for carbon capture system and the variable condition model for thermodynamic system in power plant are established. Two coupling methods of the carbon capture systems with and without small turbine are proposed and their heat economics and technical economics performances are analyzed and compared. It is found that if the coupling method is not added with small turbine but extract as much as possible steam from the low section turbine, the output power of the carbon capture unit drops by 113.06 MW than the original unit, the power generation efficiency decreases by 7.79%, the coal consumption increases by 33.09 gram per kWh, the power generation cost rises by RMB 0.191 per kWh and the carbon capture cost is RMB 270.33 per kWh. If adding a small turbine to the carbon capture unit, its net output power increases by 43.45 MW than the original unit, the power generation efficient increases by 3.23%, the coal consumption reduces by 28.55 gram per kWh, the generation cost reduces by RMB 0.034 per kWh and the carbon capture cost drops by RMB 48.58 per ton of CO₂. In conclusion, the coupling method adding by small turbine performs better in both heat economics and technical economics than that without small turbine.

Key words: carbon capture; monoethanolamine; small steam turbine; coupling scheme

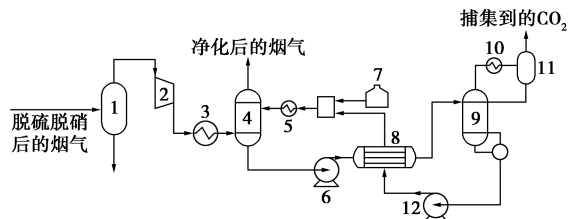
我国的燃料以煤炭为主, 其大量消耗引起 CO₂ 排放量逐年攀升。CO₂ 是产生温室效应的主要气体, 为降低 CO₂ 排放量, 缓解温室效应, 碳捕集与封存技术 (carbon capture and storage) 得到应用和发展。研究碳捕集系统与热力系统的耦合方式是碳捕集系统在热力系统中实施的前提, Hanak 等^[1]对碳捕集机组热耦合方案进行了研究, 结果显示, 碳捕集机组的运行性能较原机组降低 25% 左右, 最后利用夹点技术优化了碳捕集机组换热器的布置方式, 优化后机组的运行效率相对提高了 4.15%。韩中合等^[2-3]研究了碳捕集系统与热力系统的耦合方式, 选取了碳捕集系统抽汽位置和疏水返回位置, 优化了碳捕集系统结构。Martin^[4] 研究结果显示,

600 MW 机组耦合和碳捕集装置后机组净输出功率降低了 33.7%; Romeo 等^[5] 的研究结果则显示, 添加脱碳系统使机组发电效率降低 6.82%。在以往学者研究的基础上本文中提出了 2 种脱碳机组耦合方案, 并且通过技术经济学方法对比了 2 种脱碳机组的优劣性。

1 MEA 法脱碳流程仿真

基于 MEA 法的碳捕集系统如图 1 所示, 脱硝脱氮的烟气首先进入烟气分离器分离烟气中的水分, 然后通过压缩机输送烟气, 经过烟气冷却器进入吸收塔。吸收塔内烟气与贫乙醇胺溶液 (MEA) 混合, 吸收烟气中的 CO₂, 处理后的烟气排入大气, 吸收了

CO₂ 的乙醇胺富液在再生塔中吸热放出 CO₂, 这些 CO₂ 通过压缩等处理被收集起来, 放出 CO₂ 的富液变为贫液再次进入吸收塔, 完成一个循环。本文中采用国产 600 MW 超临界机组碳捕集系统作为研究对象, 烟气参数如表 1 所示。



1—烟气分离器;2—压缩机;3—烟气冷却器;4—吸收塔;
5—贫液冷却器;6—富液泵;7—储胺罐;8—贫富液热交换器;
9—解吸塔;10—再生气冷却器;11—再生气分离器;12—贫液泵

图 1 碳捕集系统流程

表 1 脱硫脱硝后的烟气参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------------------|------|---------------------------|------|
| 温度/°C | 60 | N ₂ 质量分数/% | 75 |
| 压力/MPa | 0.12 | O ₂ 质量分数/% | 6 |
| H ₂ O 质量分数/% | 5 | 烟气流量/(t·h ⁻¹) | 2400 |
| CO ₂ 质量分数/% | 14 | | |

Aspen Plus 提供了 MEA 吸收 CO₂ 的物性包, 本文中采用其自带的热力学性质和传递性质作为仿真基础。仿真过程中烟气中 CO₂ 的捕集率为 85%, MEA 溶液的质量分数为 30%, 贫液负荷为 0.22 mol/mol。在 Aspen Plus 中搭建碳捕集系统的仿真模型, 各子系统所用模块如表 2 所示。

表 2 碳捕集系统设置情况

| 设备 | 使用模块 | 操作条件 |
|---------|---------|---------------------------|
| 烟气分离器 | Flash2 | 闪蒸条件: 压力 0.1 MPa, 温度 30°C |
| 压缩机 | Compr | 排气压力 0.21 MPa, 等熵效率 0.7 |
| 烟气冷却器 | Heater | 忽略压降, 出口温度 40°C |
| 吸收塔 | RadFrac | 塔板 11 层, 塔顶压力 0.12 MPa |
| 富液泵 | Pump | 出口压力 0.21 MPa, 等熵效率 0.8 |
| 贫富液热交换器 | HeatX | 冷端出口温度 95°C, 忽略压降 |
| 解吸塔 | RadFrac | 回流比 1.58, 塔顶压力 0.19 MPa |
| 再生气冷却器 | Heater | 忽略压降, 出口温度 25°C |
| 再生气分离器 | Flash2 | 操作压力 0.19 MPa, 温度 25°C |
| 贫液泵 | Pump | 出口压力 0.21 MPa, 等熵效率 0.8 |
| 混合装置 | Mixer | 绝热混合 |
| 贫液冷却器 | Heater | 忽略压降, 出口温度 40°C |

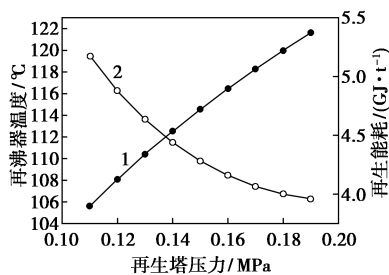
为了验证碳捕集系统仿真模型的正确性, 将本文中仿真系统的运行结果与文献值进行对比, 如表 3 所示。从对比结果可以看出, 本文中的仿真结果与国内外文献值基本相符。

表 3 文献值和实测值与本文值的对比

| 项目 | 文献[6] | 文献[7]实验 2 | 本文中 |
|----------------------------|-------|-----------|-------|
| 烟气 CO ₂ 质量分数/% | 10.0 | 16.5 | 14.0 |
| 碳捕集率/% | 78.9 | 51.9 | 85.0 |
| MEA 质量分数/% | 30.0 | 30.3 | 30.0 |
| 富液 CO ₂ 负荷 | 0.504 | 0.464 | 0.500 |
| 贫液 CO ₂ 负荷 | 0.190 | 0.308 | 0.220 |
| 再生能耗/(GJ·t ⁻¹) | 3.87 | 3.98 | 3.96 |

2 机组抽汽压力的确定

建立了碳捕集系统的仿真模型, 由仿真结果得到的再生塔压力与再生能耗之间的关系如图 2 所示, 当降低再生塔的压力时, 碳捕集系统的再生能耗会不断地增加, 同时再沸器温度会上升。显然, 提升再生塔压力对脱碳能耗的减小总是有利的, 但是温度过高容易造成再沸器内工质的降解, 所以一般设定再沸器内的温度不可以高于 122°C。从图 2 可以看出, 当再生塔压力高于 0.19 MPa 后再沸器温度就会高于 122°C, 所以本文中选取再沸器压力为 0.19 MPa, 此时, 再生能耗最小为 3.96 GJ/t。



1—再沸器温度;2—再生能耗

图 2 再生塔压力对再沸器温度和再生能耗的影响

由于再沸器的能量是通过机组抽汽供应的, 抽取蒸汽的原则是抽汽压力的饱和温度要与再沸器内工质温度有 10°C 的温差, 因此抽汽的饱和温度至少为 132°C, 所以所需抽汽压力至少为 0.287 MPa。

3 热力系统评价模型

3.1 热力系统变工况模型

本文中的计算以国产某 600 MW 机组热力系统

为例,该机组各段抽汽的主要参数如表4所示。本文中对热力系统运行性能的分析采用能效分布矩阵的方式。

表4 600 MW 超临界机组主要参数

| 参数 | 最大允许抽汽量/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 压力/ MPa | 焓/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 熵/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) |
|-------|---|---------------------------|---------------------|--|--|
| 第1段抽汽 | 132696 | 370.9 | 6.687 | 3086.05 | 6.358 |
| 第2段抽汽 | 162526 | 315.9 | 4.434 | 2992.13 | 6.374 |
| 第3段抽汽 | 76583 | 468.8 | 2.132 | 3397.74 | 7.312 |
| 第4段抽汽 | — | 367.5 | 1.069 | 3194.04 | 7.329 |
| 第5段抽汽 | 52234 | 234.6 | 0.363 | 2934.26 | 7.366 |
| 第6段抽汽 | 51536 | 168.8 | 0.197 | 2807.83 | 7.377 |
| 第7段抽汽 | 57996 | 104.1 | 0.990 | 2614.70 | 6.230 |
| 第8段抽汽 | 84857 | 78.5 | 0.450 | 2502.20 | 6.283 |
| 凝结水 | — | 32.8 | 0.005 | 140.00 | 0.475 |

3.2 热力系统评价指标

涉及到的经济性评价标准如表5所示。碳捕集电厂主要设备初始投资见表6。

表5 经济性评价标准

| 指标 | 数值 | 指标 | 数值 |
|--------------------|-------|---------------------------------------|------|
| 投资回收期 $k/\text{年}$ | 20 | 系统维护因子 φ | 1.06 |
| 利率 $j/\%$ | 5.94 | 机组年运行时间 H/h | 5000 |
| 通货膨胀率 $r/\%$ | 2.424 | 煤价 $c_F/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$ | 700 |

表6 碳捕集电厂主要设备初始投资 万元

| 项目 | 普通燃煤电厂 | 脱硫设备 | 脱硝设备 | 脱碳设备 |
|----|--------|-------|-------|-------|
| 费用 | 213000 | 18900 | 16950 | 96652 |

运行维护费用主要包括设备的检修费用、工人工资等,可通过运行与维护费用 C_{OM} 占其初始投资的比例 r_{OM} 来确定。

4 脱碳机组耦合方式对比

4.1 不添加小汽机耦合方案

直接采用五段抽汽时的抽汽量较大,会使该段的抽汽压力增加,表4中列出了该600 MW 汽轮机各段抽汽允许的最大抽汽量。一般从机组的中低压联通管抽汽供热,但是采用较低压力的蒸汽时对机组的热经济性影响最小,所以为了降低碳捕集系统对脱碳机组热经济性的影响,尽量从机组低压段抽汽,其余的蒸汽从中低压联通管抽汽,如图3所示。

为了防止再沸器内吸收工质的降解,需要降低抽汽压力到0.29 MPa,本文中通过一个绝热节流的过程来降低抽汽的压力,然后通过凝结水降温达到再沸器入口要求的132 $^{\circ}\text{C}$ 饱和蒸汽。从机组的第五、六、七、八段的抽汽均采用最大允许抽汽量。

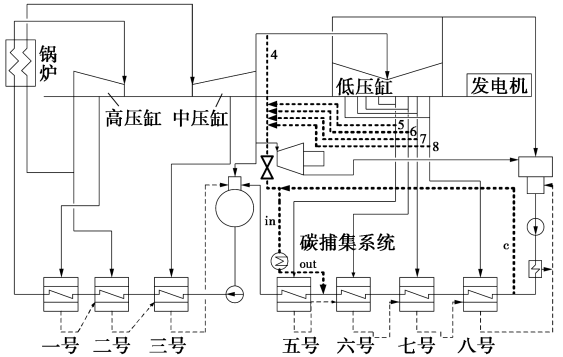


图3 不添加小汽机的碳捕集机组耦合方案

4.2 添加小汽轮机

由于碳捕集系统再沸器对压力和温度的限制,从中低压联通管抽来的蒸汽压力通过节流阀的作用被浪费,为了降低这部分损失,提出一种在中低压联通管抽汽口增设小汽机的耦合方案,如图4所示,图中所加小汽机的等熵效率设为90%。从中低压联通管出口的蒸汽先通过小汽机做功然后经过凝结水冷却进入碳捕集系统释放热能。

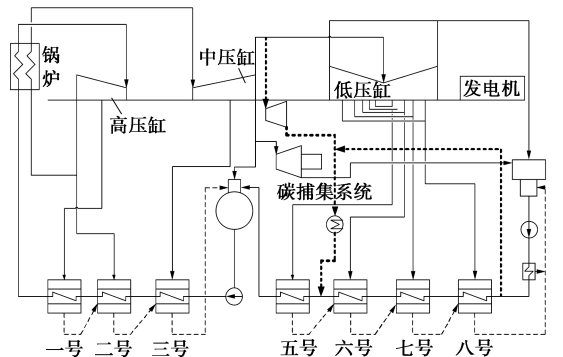


图4 添加小汽机的碳捕集机组耦合方案

5 结果与分析

5.1 不添加小汽轮机

基于以上建立的碳捕集机组变工况模型分析了方案一不添加小汽轮机时机组各处的抽气量,并且将结果列于表7中。该耦合方案下第五、六、七、八段抽汽均处在该段抽汽允许的最大抽汽量,此时需从中低压联通管抽取蒸汽523.79 t/h,从凝结水泵出口引冷却水96.25 t/h。可见采用该过程的抽汽量是十分巨大的。

表 7 不添加小汽机耦合方式主要流股参数

| 流股 编号 | 流量/ (t·h ⁻¹) | 焓值/ (kJ·kg ⁻¹) | 流股 编号 | 流量/ (t·h ⁻¹) | 焓值/ (kJ·kg ⁻¹) |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 4 | 523.79 | 3194.40 | 8 | 24.00 | 2562.20 |
| 5 | 24.43 | 2934.00 | c | 96.25 | 140.00 |
| 6 | 26.45 | 2807.30 | in | 745.30 | 2722.85 |
| 7 | 50.37 | 2684.70 | out | 745.30 | 555.02 |

依据以上结果分析了碳捕集系统对机组运行性能的影响,所得结果如表 8 所示。

表 8 不添加小汽机耦合方式分析结果

| 项目 | 结果 | 原机组 |
|-----------------------------|--------|--------|
| 净输出功/MW | 451.78 | 564.84 |
| 发电效率/% | 35.72 | 43.51 |
| 发电煤耗/(g·kWh ⁻¹) | 315.79 | 282.70 |
| 发电成本/(元·kWh ⁻¹) | 0.544 | 0.353 |
| 捕碳成本/(元·t ⁻¹) | 270.33 | |

由以上的结果可以看出,碳捕集系统的添加使机组的热经济性和经济性发生了很大的降低,碳捕集过程使机组的出力降低了 113.06 MW,发电效率降低了 7.79%,发电煤耗增加了 33.09 g/kWh,发电成本增加了 0.191 元/kWh,采用该种方式的脱碳成本为 270.33 元/kWh。

5.2 添加小汽轮机

同样分析了添加小汽轮机对机组运行性能的影响,所得各股工质流量如表 9 所示。

表 9 添加小汽机耦合方式主要流股参数

| 流股编号 | 流量/(t·h ⁻¹) | 焓值/(kJ·kg ⁻¹) |
|------|-------------------------|---------------------------|
| 4 | 697.97 | 3194.40 |
| c | 47.33 | 140.00 |
| in | 745.30 | 2722.85 |
| out | 745.30 | 555.02 |

依据表 9 的结果分析了该机组的热经济性和技术经济性,如表 10 所示。

表 10 添加小汽机耦合方式分析结果

| 项目 | 净输出 功/MW | 发电效 率/% | 发电煤耗/ (g·kWh ⁻¹) | 发电成本/ (元·kWh ⁻¹) | 捕碳成本/ (元·kWh ⁻¹) |
|----|-------------|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 结果 | 495.23 | 38.95 | 344.34 | 0.510 | 221.75 |

从表 10 中可以看出,添加小汽轮机后,碳捕集机组的净输出功提高了 43.45 MW,发电效率提高了 3.23%,发电煤耗降低了 28.55 g/kWh,发电成本降低了 0.034 元/kWh,捕碳成本降低了 48.58 元/t,

无论从热经济性上还是从经济性上来看,添加小汽轮机的脱碳方式更具有优势。但是添加小汽轮机对于电厂来说实施起来比较复杂,且随着不同工况的变化小汽轮机出口压力将发生变动,碳捕集系统的稳定运行将受到影响。

6 结论

基于 Aspen Plus 建立了碳捕集系统的仿真模型,应用弗留格尔公式建立了 600 MW 超临界机组的变工况模型,提出了碳捕集机组的 2 种耦合方案,并且从热经济性和技术经济性上对比了 2 种耦合方案的优缺点,得到的主要结论如下。

(1)分析了碳捕集系统再生塔压力与再生能耗和再沸器温度之间的关系,建立了碳捕集机组抽汽参数与再生能耗之间的关系,选取了碳捕集过程的最佳再生塔压力为 0.19 MPa。

(2)当不添加小汽轮机而尽量多地采用低段抽汽时,机组的出力降低 113.06 MW,发电效率降低 7.79%,发电煤耗增加 33.09 g/kWh,发电成本增加 0.191 元/kWh,脱碳成本为 270.33 元/kWh。

(3)添加小汽轮机后,碳捕集机组的净输出功提高 43.45 MW,发电效率提高 3.23%,发电煤耗降低 28.55 g/kWh,发电成本降低 0.034 元/kWh,捕碳成本降低 48.58 元/t。

参考文献

- [1] Hanak D P, Biliyok C, Yeung H, et al. Heat integration and exergy analysis for a supercritical high-ash coal-fired power plant integrated with a post-combustion carbon capture process[J]. Fuel, 2014, 134: 126-139.
- [2] 韩中合, 王营营, 王继选, 等. 碳捕集系统与燃煤机组热力系统耦合的热经济性分析[J]. 化工进展, 2014, (6): 1616-1623.
- [3] 韩中合, 王继选, 王营营, 等. 太阳能辅助燃煤机组碳捕集系统性能研究及技术经济分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, (5): 724-732.
- [4] Martin E W. Investigation of thermal integration in a coal-fired power plant with MEA post-combustion carbon capture[M]. Lehigh University, 2011.
- [5] Romeo L M, Bolea I, Escosa J M. Integration of power plant and amine scrubbing to reduce CO₂ capture costs[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(S8/9): 1039-1046.
- [6] 李晗, 陈健. 单乙醇胺吸收 CO₂ 的热力学模型和过程模拟[J]. 化工学报, 2014, 65(1): 47-54.
- [7] Notz R, Mangalapally H P, Hasse H. Post combustion CO₂ capture by reactive absorption: Pilot plant description and results of systematic studies with MEA[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 6: 84-112. ■