

低能耗碳捕集技术及 燃煤机组热经济性研究

赵红涛^{1,2}, 王树民^{1*}, 张 曼³

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 中国神华煤制油化工有限公司, 北京 100011;
3. 华北科技学院化学与环境工程学院, 河北 廊坊 065201)

摘要:针对燃烧后胺法脱碳工艺捕集能耗高的问题,在普通碳捕集系统中集成级间冷却、机械蒸气再压缩(mechanical vapor recompression, MVR)和富液分流解析 3 项节能技术,建立低能耗碳捕集系统,并将该系统与 600 MW 燃煤机组热力系统耦合,分析该系统对燃煤机组热经济性指标的影响。结果表明,当 CO₂ 捕集率为 90% 时,该碳捕集系统中单位再生能耗从 4.09 GJ/t CO₂ 降低到 2.64 GJ/t CO₂,降幅达 35.28%。与耦合普通碳捕集系统的燃煤机组相比,耦合低能耗碳捕集系统燃煤机组的电厂效率从 30.81% 增加到 33.53%,提升了 2.72%;标准煤耗从 398.87 g/kWh 降低到 366.81 g/kWh,下降了 32.06 g/kWh;热耗率从 11 674.92 kJ/kWh 降低到 10 736.53 kJ/kWh,减少了 938.36 kJ/kWh,热经济性得到明显改善。研究还发现,CO₂ 捕集率每降低 1%,低能耗碳捕集燃煤机组的电厂效率增加 0.054%,标准煤耗降低 0.524 g/kWh,热耗率降低 15.353 kJ/kWh,降低碳捕集率可进一步改善电厂的热经济性。

关键词: 燃煤烟气; CO₂; 再生能耗; 节能; 热经济性

中图分类号: TQ110.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)01-0210-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.01.042

Research on low energy consumption CO₂ capture technology and thermal economy of coal-fired units

ZHAO Hong-tao^{1,2}, WANG Shu-min^{1*}, ZHANG Man³

(1. China Energy Investment Corporation, Beijing 100011, China; 2. China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. School of Chemical and Environmental Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: Aiming to solve the problem that the regeneration of post-combustion amine decarburization process consumes high energy, a low energy consumption CO₂ capture system is established through integrating three energy-saving technologies in the common CO₂ capture system, including inter-stage cooling, mechanical vapor recompression and rich liquid split desorption. This system is then coupled with the thermodynamic system of a 600 MW coal-fired unit, and the impact on the thermal economic indicators of the coal-fired unit is analyzed. Results show that as CO₂ capture ratio is 90%, the energy consumption per unit of CO₂ regeneration in this system drops from 4.09 GJ/t CO₂ to 2.64 GJ/t CO₂, a decrease of 35.28%. Compared with a coal-fired unit coupled with the common carbon capture system, the power plant efficiency of a coal-fired unit coupled with this low energy consumption carbon capture system increases from 30.81% to 33.53%, an increase of 2.72 percentage; the standard coal consumption decreases from 398.87 g/kWh to 366.81 g/kWh, a decrease of 32.06 g/kWh; the heat consumption rate decreases from 11,674.92 kJ/kWh to 10 736.53 kJ/kWh, a decrease of 938.36 kJ/kWh, and the thermal economy has significantly been improved. It is found that as CO₂ capture ratio decreases by every 1%, the power plant efficiency of the low energy consumption carbon capture coal-fired units will increase by 0.054%, the standard coal consumption will decrease by 0.524 g/kWh, and the heat consumption rate will decline by 15.353 kJ/kWh. Reducing CO₂ capture ratio can further improve the thermal economy of power plants.

Key words: coal-fired flue gas; CO₂; regeneration energy consumption; energy saving; thermal economy

我国正面临巨大的 CO₂ 减排压力^[1-2]。燃煤电厂是主要的 CO₂ 集中排放源,从燃煤电厂排放的烟气中捕获 CO₂ 是缓解 CO₂ 排放危机最有效的手

段^[3]。燃烧后化学吸收法工艺较成熟,易实现商业化,适合于现有电厂的改造,被认为是近期内减少 CO₂ 排放最可行的措施。醇胺吸收剂是目前从燃煤

收稿日期:2020-03-19;修回日期:2020-11-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0603300);廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2020011011)

作者简介:赵红涛(1985-),男,博士,工程师,研究方向为燃煤电厂 CO₂ 减排与煤炭清洁转化, zhaohongtaoipe@163.com;王树民(1962-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事电力生产技术管理、燃煤电站污染物控制及 CO₂ 减排技术,通讯联系人,20031438@chnenergy.com.cn。

烟气中捕集 CO_2 应用最广泛的吸收剂^[4]。然而,醇胺法脱碳最大的缺陷是捕集能耗高,其中 70% 左右集中在吸收剂的再生部分^[5-6]。因此针对燃烧后碳捕集系统进行多种节能工艺优化组合^[7],构建低能耗碳捕集系统,对降低整体系统能耗以及运行成本至关重要。

燃煤电厂加装碳捕集系统后势必影响电厂的发电成本。为尽可能减少对设备的改造,一般采用原燃煤机组的抽汽作为富液再生系统的热源,机组的热效率必然降低^[8-10]。对于燃煤电厂,更关心加装低能耗碳捕集系统对燃煤电厂发电效率、标准煤耗和全厂热耗率等热经济性指标的影响程度^[11]。因此将燃煤机组与低能耗碳捕集系统耦合,研究低能耗碳捕集系统对燃煤机组热经济性指标的影响更具有指导意义。

本文中针对燃煤电厂燃烧后碳捕集系统再生能耗高的难题,结合国家能源集团锦界电厂 600 MW 燃煤机组工况条件,建立集成级间冷却、机械蒸汽再压缩(MVR)和富液分流解析 3 项节能工艺的 15 万 t/a 低能耗碳捕集系统,并将该低能耗碳捕集系统与燃煤机组进行耦合,考察该低能耗碳捕集系统对燃煤机组热经济性指标的影响,以及与普通碳捕集系统(不加装节能工艺)对比,分析低能耗碳捕集系统对燃煤机组热

经济性指标的改善情况。

1 15 万 t/a 低能耗碳捕集系统流程

15 万 t/a 低能耗碳捕集系统的流程如图 1 所示。本流程集成级间冷却、机械蒸汽再压缩(MVR)和富液分流解析 3 项节能工艺。其中,级间冷却节能技术是指在吸收塔的中下部安装冷却器,将吸收溶液从塔中抽出,经冷却处理后再送回吸收塔,以维持吸收塔在最佳的吸收温度^[12];MVR 节能技术主要由闪蒸罐和闪蒸汽压缩机组成,再生塔底部出来的高温贫液经闪蒸罐减压闪蒸出大量二次蒸汽,这部分二次蒸汽经压缩机提高压力和温度后转变为高品位蒸汽,再次进入再生塔,与塔内解析液直接接触换热,蒸汽逐步冷凝,释放出大量气化潜热,可有效降低再沸器负荷^[13];富液分流解析节能技术是指将离开吸收塔的富液分为 2 股物流,一股物流进入再生塔顶部,为冷富液,另一股物流经贫富液换热器预热后进入再生塔,为热富液,该节能工艺可有效回收再生气的热量以及冷凝再生气所携带的水蒸汽^[14]。本低能耗碳捕集系统中,级间冷却工艺提高吸收塔中富液负荷并减少吸收液用量,MVR 工艺回收再生塔底高温贫液中的热量,富液分流解析工艺回收再生气的热量,3 项节能工艺优化组合,将吸收塔和再生塔有机关联,可有效降低系统的再生能耗。

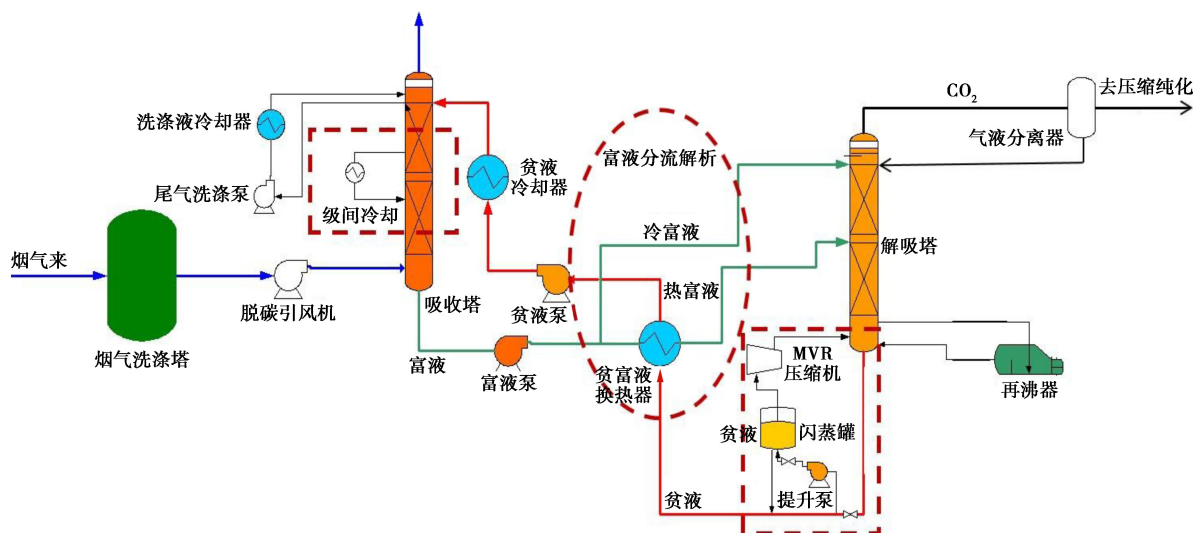


图 1 15 万 t/a 低能耗碳捕集系统流程

2 低能耗碳捕集系统与燃煤机组热力系统耦合

为满足吸收剂再生所需要的热量,对于燃煤机

组可采用机组抽汽作为再沸器的热源,从机组抽汽将增加原汽轮机的抽汽量。本低能耗碳捕集系统再沸器内富液温度控制在 120°C 左右,假设换热器热侧换热温差为 10°C ,则蒸汽侧的温度取 130°C ,相应

的饱和蒸汽压约为 0.27 MPa。根据锦界电厂 600 MW 机组的热力系统流程图并考虑机组安全经济运行^[15-16],采用从机组中低压连通管处抽气,并经减温减压后作为再沸器的热源。抽汽减温水引自凝结水。蒸汽经再沸器换热后的饱和水按照其热量品位相应地返回到回热系统,以保证机组水汽水平衡。

本文中低能耗碳捕集系统中吸收剂再生所需的蒸汽量计算见公式(1),式中 W_{steam} 为再生塔中吸收剂再生所需蒸汽量, t/h; Q_{str} 为吸收剂的再生能耗, GJ/h; H 为再沸器蒸汽侧进出口焓差, kJ/kg。采用等效焓降法计算燃煤电厂的电厂效率和标准煤耗以及热耗率等热经济性指标^[17-18]。采用汽轮机抽汽作为再沸器的热源,蒸汽携带热量出系统,汽轮机做功减少。分为 α_f 、焓值为 h_f 的蒸汽从汽轮机抽汽段出系统,汽轮机内新蒸汽的做功变化见公式(2),式中 h_n 为汽轮机的排气焓。经过换热后的蒸汽转变为携带热量的饱和水从第 j 加热器出口重新进入到汽轮机回热系统,热水从凝结水管路进入系统的全部做功变化见公式(3),式中 $\alpha_{r,\text{in}}$ 为热水携带热量进入系统的份额; $h_{r,\text{in}}$ 为进入系统的热水焓值, kJ/kg; $h_{j,\text{out}}$ 为第 j 加热器的出口水焓值, kJ/kg; η_{j+1} 为第 $j+1$ 加热器抽汽效率; Δh_r 为 1 kg 水在第 r 加热器中的焓升, kJ/kg; η_r 为第 r 加热器抽汽效率。

$$W_{\text{steam}} = Q_{\text{str}}/H \quad (1)$$

$$\Delta H_{\text{out}} = \alpha_f(h_f - h_n) \quad (2)$$

$$\Delta H_{\text{in}} = \alpha_{r,\text{in}}[(h_{r,\text{in}} - h_{j,\text{out}})\eta_{j+1} + \sum_{r=1}^j \Delta h_r \times \eta_r] \quad (3)$$

由于汽轮机抽汽,做功将减少,则汽轮机的绝对内效率必然降低,进而造成电厂效率降低,煤耗和热耗增加。本文中耦合低能耗碳捕集系统燃煤机组的汽轮机绝对内效率 η_i 见公式(4),式中 w_i 为汽轮机内功, kJ/kg; q_0 为汽轮机比热耗, kJ/kg。耦合低能耗碳捕集系统燃煤机组的电厂效率 η_{cp} 见公式(5),式中 η_b 为锅炉效率,取 0.934 5; η_p 为管道效率,取 0.99; η_m 为汽轮机机械效率, η_g 为发电机效率,两者的乘积取 0.99。耦合低能耗碳捕集系统燃煤机组的标准煤耗 b^s 见公式(6)。电厂热耗率 q_{cp} 见公式(7),式中 Q_b^s 为标准煤低位发热量,取 29 270 kJ/kg。

$$\eta_i = w_i/q_0 \quad (4)$$

$$\eta_{\text{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_m \eta_g \eta_i \quad (5)$$

$$b^s = (3\ 600 \times 1\ 000)/(\eta_{\text{cp}} Q_b^s) \quad (6)$$

$$q_{\text{cp}} = b^s Q_b^s \quad (7)$$

3 结果与讨论

3.1 低能耗碳捕集系统的再生能耗分析

普通碳捕集系统以及在其基础上集成 3 项节能工艺的低能耗碳捕集系统的再生能耗如表 1 所示。从表 1 中可以看出,普通碳捕集系统中再生能耗为 4.09 GJ/t,当单独集成级间冷却工艺后,再生能耗降低到 3.81 GJ/t,与普通流程相比下降了 6.84%。级间冷却工艺的节能原理主要是由于在吸收塔内增加内部冷却器,相应的富液负荷小幅提升,吸收液循环流量小幅降低,进入到再生塔中进行解析时,再沸器所需的能耗相应地减少。贫液闪蒸再压缩(MVR)工艺的节能效果最显著,在普通流程上单独集成该工艺时,节能效率达到 20.29%。MVR 工艺的节能原理主要是通过减压闪蒸操作回收再生塔底高温贫液中的气化潜热,再循环为再生塔供能,由此可使再生能耗降低到 3.26 GJ/t。当在普通流程中同时集成级间冷却工艺和 MVR 工艺时,节能效果更加明显,再生能耗降低到 3.13 GJ/t,节能效率增加到 23.47%。富液分流解析工艺是连接吸收塔和再生塔的节能工艺,主要是通过冷富液回收再生塔顶高温蒸汽的气化潜热达到节能目的。当在集成前面 2 种节能工艺的基础上再集成富液分流工艺,构建的低能耗碳捕集系统中再生能耗可进一步降低到 2.64 GJ/t,节能效率达到 35.28%。从表 1 中低能耗碳捕集系统中 3 项节能工艺对再生能耗降低的贡献率可以看出,贫液闪蒸再压缩(MVR)节能工艺的贡献最大,为 47.12%,级间冷却工艺的贡献率最小,为 19.40%。

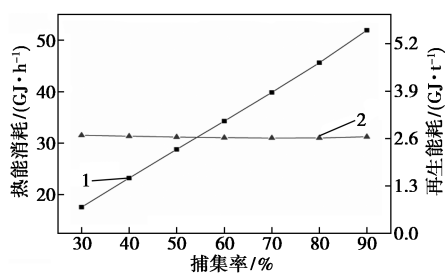
表 1 不同节能工艺组合时的再生能耗、节能效率以及低能耗碳捕集系统中 3 种节能工艺对再生能耗降低的贡献率

	再生能耗/ (GJ·t ⁻¹)	节能效率/ %	贡献率/%
普通碳捕集流程	4.09	0	
普通+级间冷却	3.81	6.84	
普通+MVR	3.26	20.29	
普通+级间冷却+MVR	3.13	23.47	
低能耗碳捕集流程(普通+级间冷却+MVR+富液分流)	2.64	35.28	级间冷却 19.4 MVR 47.12 富液分流 33.49

3.2 不同碳捕集率的再生能耗分析

限制 CO₂ 捕集工艺大规模工业化应用的一个主要原因是再生热能消耗量偏高,需消耗大量的燃煤机组蒸汽热,从而使机组的热效率降低以及煤耗增加。除可以通过节能工艺优化组合降低单位再生能耗之外,降低 CO₂ 的捕集率亦可大幅降低所需的热能消耗量。

图2为采用该15万t/a低能耗碳捕集工艺得到的不同捕集率时的热能消耗量和单位再生能耗。从图2中可以看出,随着碳捕集率的增加,热能消耗量呈直线上升,而单位 CO₂ 的再生能耗几乎没有变化,基本维持在 2.64 GJ/t,由此可知,热能消耗量的直线上升主要是因为捕集率的增加。由于捕集单位 CO₂ 所需热能几乎不随 CO₂ 捕集率的高低发生大的改变,因此通过降低碳捕集率来减少热能消耗量,是减少对电厂热经济性指标影响的重要措施。

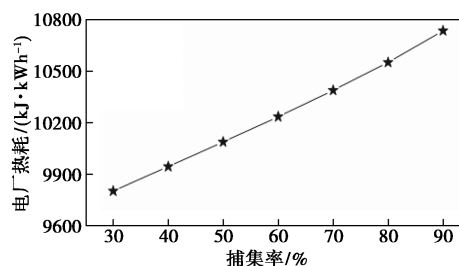


1—热量消耗;2—再生能耗

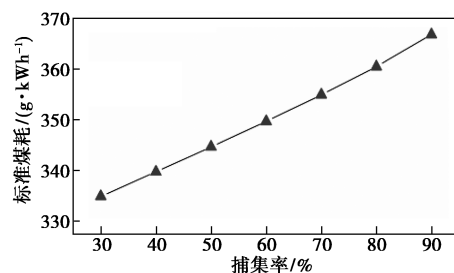
图2 单位再生能耗和热能消耗量随捕集率的变化

3.3 低能耗碳捕集系统对电厂热经济性指标的影响

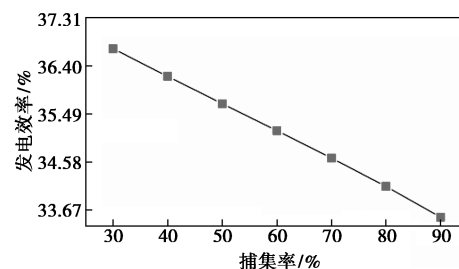
燃煤电厂的热经济性指标主要是指电厂效率、标准煤耗量和热耗率。图3为耦合低能耗碳捕集系统后燃煤机组的电厂效率、标准煤耗量和热耗率随碳捕集率的变化。从图3中可以看出,随着碳捕集率的增加,电厂效率近似直线下降,表明随着碳捕集率提高,系统脱除二氧化碳总能耗升高,从而导致电厂效率降低。从捕集率30%增加到90%,电厂效率降低了3.24%,即碳捕集率每增加1%,电厂热效率约降低0.054%。从图3还可以看出,随着碳捕集率的增加,电厂标准煤耗和热耗率呈现直线增加趋势。从捕集率30%增加到90%,电厂标准煤耗增加了31.48 g/kWh,热耗率增加了921.15 kJ/kWh,由此得到碳捕集率每增加1%,电厂标准煤耗增加0.524 g/kWh,电厂热耗率增加15.353 kJ/kWh。



(a) 电厂热耗



(b) 标准煤耗



(c) 发电效率

图3 碳捕集率对电厂热经济指标的影响

表2为CO₂捕集率为90%时,原电厂(非碳捕集电厂)、普通碳捕集电厂和低能耗碳捕集电厂的热经济性指标结果对比。从表2中可以看出,由于碳捕集系统中吸收剂再生需要消耗大量的汽轮机蒸汽热能,由此导致普通碳捕集电厂的电厂效率为30.81%,比原机组电厂效率38.36%降低了7.55%;标准煤耗量为398.87 g/kWh,比原机组全厂标准煤耗320.65 g/kWh增加了78.22 g/kWh;热耗率为11674.92 kJ/kWh,比原机组全厂热耗率9385.43 kJ/kWh增加了2289.49 kJ/kWh。然而低能耗碳捕集电厂和普通碳捕集电厂对比发现,由于低能耗碳捕集系统中优化集成级间冷却、机械蒸汽再压缩(MVR)和富液分流解析3项节能工艺,单位再生能耗大幅降低,由此导致低能耗碳捕集电厂的电厂效率为33.53%,比普通碳捕集电厂提升了2.72%;标准煤耗量为366.81 g/kWh,比普通碳捕集电厂的标准煤耗降低了32.06 g/kWh。热耗率为10736.53 kJ/kWh,比普通碳捕集电厂的全厂热耗率减少了938.36 kJ/kWh。总之,在燃煤机组上加装碳捕集

装置将导致电厂热经济性指标变差,但采用低能耗碳捕集系统却可使电厂热经济性指标得到显著改善。

表 2 耦合碳捕集系统前后电厂的热经济性指标对比

热经济指标	原电厂	普通碳捕集电厂	低能耗碳捕集电厂
电厂效率/%	38.36	30.81	33.53
标准煤耗/(g·kWh ⁻¹)	320.65	398.87	366.81
电厂热耗率/(kJ·kWh ⁻¹)	9385.43	11674.92	10736.53

4 结论

(1)集成 3 项节能工艺的低能耗碳捕集系统具有良好的节能表现,单位再生能耗从 4.09 GJ/t 降低到 2.64 GJ/t,降幅达 35.28%。其中,贫液闪蒸再压缩(MVR)工艺的节能贡献率最大,为 47.12%,级间冷却工艺的节能贡献率最小,为 19.40%。

(2)降低碳捕集率,单位 CO₂ 再生能耗几乎没有变化,基本维持在 2.64 GJ/t,而热能消耗量却呈现直线下降。通过降低碳捕集率来减少热能消耗量,是减少对电厂热经济性指标影响的重要措施。

(3)将低能耗碳捕集系统与燃煤机组耦合研究发现,碳捕集率每增加 1%,电厂效率约降低 0.054%,标准煤耗增加 0.524 g/kWh,电厂热耗率增加 15.353 kJ/kWh。

(4)当 CO₂ 捕集率为 90%时,普通碳捕集电厂的电厂效率为 30.81%,低能耗碳捕集电厂的电厂效率为 33.53%,提升了 2.72%;普通碳捕集电厂的标准煤耗量为 398.87 g/kWh,低能耗碳捕集电厂的标准煤耗量为 366.81 g/kWh,降低了 32.06 g/kWh。普通碳捕集电厂的热耗率为 11 674.92 kJ/kWh,低能耗碳捕集电厂的全厂热耗率为 10 736.53 kJ/kWh,减少了 938.36 kJ/kWh。

参考文献

- [1] Hemmati, Abbas, Hamed Rashidi. Optimization of industrial inter-cooled post-combustion CO₂ absorber by applying rate-base model and response surface methodology (RSM) [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 121: 77-86.
- [2] Bao W, Zhao H, Li H, et al. Process simulation of mineral carbonation of phosphogypsum with ammonia under increased CO₂ pressure [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 17: 125-136.
- [3] Rolfe, Angela. Integration of the calcium carbonate looping process into an existing pulverized coal-fired power plant for CO₂ capture: Techno-economic and environmental evaluation [J]. Applied Energy, 2018, 222: 169-179.
- [4] 沈超,李瑶瑶,刘颖颖,等. DMBA-DEEA-水三元吸收剂的 CO₂ 吸收解吸特性 [J]. 现代化工, 2017, 37(6): 141-145.
- [5] Wang S, Yan S, Ma X, et al. Recent advances in capture of carbon dioxide using alkali-metal-based oxides [J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(10): 3805-3819.
- [6] 陆时建,黄凤敏,李清方,等. 燃烧后 CO₂ 捕集技术与工程进展 [J]. 现代化工, 2015, 35(6): 48-52.
- [7] 林海周,裴爱国,方梦祥. 燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展 [J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4874-4886.
- [8] Wang T, He H, Yu W, et al. Process simulations of CO₂ desorption in the interaction between the novel direct steam stripping process and solvents [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(4): 4255-4262.
- [9] Xu G, Hu Y, Tang B, et al. Integration of the steam cycle and CO₂ capture process in a decarbonization power plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 277-286.
- [10] 黄斌,许世森,郜时旺,等. 燃煤电厂 CO₂ 捕集系统的技术与经济分析 [J]. 动力工程, 2009, 29(9): 864-867.
- [11] 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, 33(6): 1616-1623.
- [12] Plaza J M, Van Wagener D, Rochelle G T. Modeling CO₂ capture with aqueous monoethanolamine [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1171-1178.
- [13] Xue B, Yu Y, Chen J, et al. A comparative study of MEA and DEA for post-combustion CO₂ capture with different process configurations [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2017, 4(1): 15-24.
- [14] Zhao B, Liu F, Cui Z, et al. Enhancing the energetic efficiency of MDEA/PZ-based CO₂ capture technology for a 650 MW power plant: Process improvement [J]. Applied Energy, 2017, 185: 362-375.
- [15] Hu Y, Xu G, Xu C, et al. Thermodynamic analysis and techno-economic evaluation of an integrated natural gas combined cycle (NGCC) power plant with post-combustion CO₂ capture [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 308-316.
- [16] Xu C, Xu G, Zhu M, et al. Thermodynamic analysis and economic evaluation of a 1000 MW bituminous coal fired power plant incorporating low-temperature pre-drying (LTPD) [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 613-622.
- [17] 韩中合,王营营,周权,等. 燃煤电厂与醇胺法碳捕集系统耦合方案的改进及经济性分析 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 222-229.
- [18] 杨作梁,温新宇,李永玲. 火电厂安全经济运行与管理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013. ■