

# 燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统分析

韩金珂, 刘建辉\*, 徐彬

(深圳市燃气集团股份有限公司, 广东深圳 518049)

**摘要:**提出了一种燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统,采用 Aspen Plus 软件对该流程进行了模拟和热力学分析,并与常规燃气蒸汽联合发电系统进行了对比。考察了燃气入口压力和组成对系统能源利用效率和烟效率的影响。研究结果表明,该系统能源利用效率和烟效率分别达到 57.48% 和 54.68%,高于常规参比系统 0.23% 和 0.15%。系统最大烟损发生在燃烧室,占总烟损的 63.5%。燃气入口压力增加,有利于系统整体效率的提升,但不同组分的燃气对系统的效率影响较小。

**关键词:**燃气;压力能;热力学分析;Aspen Plus

**中图分类号:**TK29

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2024)11-0240-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.11.043

## Analysis on gas pipeline network pressure energy coupled with steam combined power generation system

HAN Jin-ke, LIU Jian-hui\*, XU Bin

(Shenzhen Gas Corporation Ltd., Shenzhen 518049, China)

**Abstract:** A gas pipeline network pressure energy coupled with steam combined power generation system is proposed, and compared with the conventional gas steam combined power generation system. Simulation and thermodynamic analysis are performed on this process by means of ASPEN PLUS software. The effects of inlet pressure and composition of gas on the energy efficiency and exergy efficiency of the system are investigated. Study results show that the energy efficiency and the exergy efficiency reach 57.48% and 54.68%, respectively, which are higher than that of the conventional reference system by 0.23% and 0.15%. The biggest exergy loss of the system occurs in the combustion chamber, accounting for 63.5% of the total loss. Higher gas inlet pressure is conducive to the improvement of the overall efficiency of the system, but gas composition has little impact on the efficiency of the system.

**Key words:** gas; pressure energy; thermodynamic analysis; Aspen Plus

燃气高压输送不仅可节约管网建设成本,也是反映国家整体技术水平的标志<sup>[1]</sup>。我国陕京线、西气东输和中缅线的管道天然气输送压力高达 10 MPa,而根据《城镇燃气设计规范》设定的城市燃气管网最高输送压力为 1.6~2.5 MPa,居民燃气使用压力不超过 0.4 MPa,因此需对长输高压燃气经过分输站、门站和调压站降压处理后,才可进入城市高中压管网<sup>[2-3]</sup>。目前,在各调压站常采用节流阀进行降压,该方式不仅产生大量的能量损失,还会输出低温燃气导致管路冰堵。为了消除冰堵,需在管路上对降压燃气进行电加热,进一步增大了能耗。因此,开发燃气压力能利用的新工艺和新技术,对节能降耗和可持续发展有积极促进作用。

对高压管网燃气压力能的回收,目前主要有发电和制冷 2 方面的应用。在管网压力能发电技术方面,可分为直接膨胀发电和燃气-蒸汽联合发电系统。直接膨胀发电是高压燃气直接推动透平做功发电,工艺路线短、成熟度高,国内外已经有不少的运行案例,如日本东京电力在 2003 年建成世界第一座

燃气降压发电站,输出电能达 7.7 MW,我国深圳燃气、北京燃气等公司也建有压力能发电项目,对发电系统和设备进行了深入的研究<sup>[4-6]</sup>。在压力能制冷方面,利用燃气膨胀后燃气温度降低这一特点,可实现制冷,用于空调、冷库、燃气轮机等进气冷却<sup>[7]</sup>。此外,利用高压燃气生产城市调峰液化天然气是目前压力能利用的重要方向,原理为高压燃气分为膨胀流股和液化流股,液化流股经过净化脱水后与膨胀后低温燃气换热制得液化天然气,该技术目前在国内外已有利用,但该系统投资大,液化率低<sup>[8]</sup>。

在压力能利用耦合燃气-蒸汽联合发电方面,国内外研究主要集中于工艺系统的设计和冷热电联产系统的流程开发。王松岭等<sup>[9]</sup>提出一种逐单元回收天然气管网压力能的燃气蒸汽联合循环系统,并定性分析了该联合循环的收益,研究表明该循环具备较好的效率。王登亮等<sup>[10]</sup>提出一种耦合天然气压力能的新型三联供系统,研究表明该系统的燃气能源利用效率达到 93%。Golchoobian 等<sup>[11]</sup>提出利用天然气压力能的冷热电联产流程,对该流程进行

收稿日期:2024-01-08;修回日期:2024-09-22

作者简介:韩金珂(1993-),女,硕士,工程师,研究方向为天然气管道输送、能源高效利用、氢能等新能源应用,hanjk@szgas.com.cn;刘建辉(1967-),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为城市燃气管网输配、能源转化及高效利用,通讯联系人,liujh@szgas.com.cn。

了热力学和经济分析。Yao 等<sup>[12]</sup>针对双螺杆压缩机在非设计工况下用于天然气压力能产电工艺进行了试验分析,结果表明系统炯效率可达 66%。本文中提出一种新型的燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统,利用透平膨胀机回收燃气压力能发电,同时降压后的燃气进入燃气-蒸汽联合循环发电。利用 Aspen Plus 对该流程进行了模拟,以能源利用率和炯作为评价指标,对该系统进行了热力学评价,以期表明系统的高效性和先进性。此外,还考察进气压力和组成对系统性能的影响。

## 1 系统设计

### 1.1 物理模型

图 1 显示了所提出的燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统流程,该系统主要由高压燃气膨胀机、压气机、燃烧室、燃烧轮机、双压无再热蒸汽循环和换热设备等组成。相较于直接燃气联合循环流程(参比系统),本系统增加了燃气管网压力能利用装置,以实现进气空气的冷却。如图所示,高压燃气经过膨胀降压后一次进入透平膨胀机和进气冷却器与空气换热后进入燃烧室,同时经换热后的空气压缩后进入燃烧室。在燃烧室内,空气和燃气混合燃烧,产生高温的烟气流经燃气轮机膨胀发电。燃气轮机出口的高温烟气流经余热锅炉降温后排出。经换热后的水变成高温高压蒸汽,进入蒸汽轮机膨胀发电后,乏汽经过凝汽器降温后进入水泵加压,完成循环。

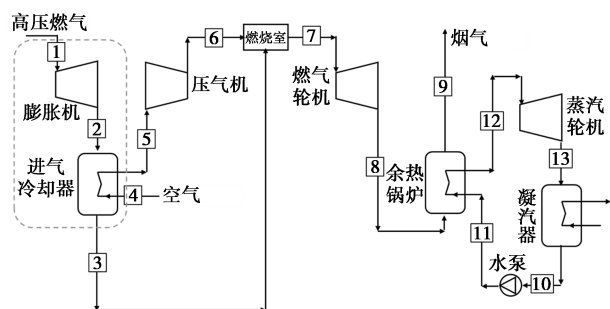


图 1 燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统流程

### 1.2 运行参数

流程计算采用的燃气进口参数见表 1,进气压力为 4.0 MPa,温度为 25℃,流量为 16.62 kg/s,据此可得到基准燃气(L1)低位热值为 46.49 MJ/kg。为考察不同管网气源气体组成对所提出的发电流程性能的影响,表 1 中也列出了其他的 2 种气体成分,见 L2 和 L3。

表 1 燃气进口参数

参数	L1(基准)	L2	L3
燃气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )		16.62	
燃气供气压力/MPa		4.0	
组成/%			
CH <sub>4</sub>	89.00	98.54	95.99
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.00	0.30	1.49
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.00	0.20	0.31
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.10	0.25	0.10
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.01	0.05	0.07
CO <sub>2</sub>	2.00	0.20	1.44
N <sub>2</sub>	0.89	0.46	0.60
热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	46.49	49.28	47.53

对所提出的系统和参比系统采用化工流程模拟 Aspen Plus<sup>TM</sup> 软件进行计算。物性选用 PR-BM 状态方程进行计算,蒸汽循环采用 STEAM 物性方法。在基准工况下,系统的运行参数见表 2<sup>[13]</sup>,燃气轮机压比为 18,排烟温度设定在 120℃,采用双压无再热蒸汽循环系统,蒸汽的最高压力为 6.0 MPa,温度为 600℃。在模拟过程中,压缩机和膨胀机采用 Compr 模块,燃烧室采用 RGibbs 模块,余热锅炉、冷却器和凝汽器采用 HeatX 换热模块,水泵采用 Pump 模块。

表 2 系统运行参数

参数	数值
空气流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	656.94
摩尔分数/%	
O <sub>2</sub>	20.74
N <sub>2</sub>	79.26
燃气轮机进气压力/MPa	1.82
燃气轮机排气压力/MPa	0.1039
排烟温度/℃	120
蒸汽循环系统	双压无再热
主蒸汽压力/MPa	6.0
主蒸汽温度/℃	600
二次蒸汽压力/MPa	0.7
二次蒸汽温度/℃	200
凝汽器压力/MPa	0.05
蒸汽轮机等炯效率/%	90
燃气轮机等炯效率/%	88
膨胀机和压气机等炯效率/%	90
机械效率/%	99

## 2 系统性能评价指标

系统能源利用效率( $\eta_{en}$ )是表征系统的电力输出与燃气输入的热值的比值:

$$\eta_{en} = [(W_T + W_{GT} + W_{ST} - W_C - W_P) /$$

$$(F_{GAS}LHV_{GAS})] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $W_T$ 、 $W_{GT}$ 、 $W_{ST}$ 、 $W_C$ 、 $W_P$  分别表示膨胀机、燃气轮机、蒸汽轮机、压气机和泵的功率, MW;  $F_{GAS}$  表示燃气流量, kg/s;  $LHV_{GAS}$  表示燃气的低位热值, MJ/kg。

能源利用效率仅考虑了能量利用的量的关系, 未考虑质的关系。焓是用来评价能量做功能力的, 表示任何形式的能量理论上能够转化为功的最大数值。对于燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统, 系统的焓效率( $\eta_{ex}$ )的计算式为<sup>[14]</sup>:

$$\eta_{en} = [(W_T + W_{GT} + W_{ST} - W_C - W_P) / (EX_{GAS} + EX_{AIR})] \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $EX_{GAS}$  和  $EX_{AIR}$  分别为输入燃气和空气的焓值, MW。

对于本系统的任一物流, 忽略动能和位能, 焓值( $EX$ )由物理焓( $EX_{ph}$ )和化学焓( $EX_{ch}$ )构成, 表达式为:

$$EX = EX_{ph} + EX_{ch} \quad (3)$$

$$EX_{ph} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (4)$$

$$EX_{ch} = \sum_i \tilde{x}_i \tilde{e}_{0,i} + RT_0 \sum_i \tilde{x}_i \ln(\tilde{x}_i) \quad (5)$$

式中,  $\tilde{x}_{0,i}$  为物流中单个组分标准化学焓, MW;  $\tilde{x}_i$  为物流中各个组分的摩尔分数, %;  $T_0$  为基准环境参考温度,  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ;  $R$  为通用气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

对于系统的各单元, 焓平衡表达式为:

$$EX_{in} = EX_{out} + EX_{des/loss} \quad (6)$$

单元的焓效率为:

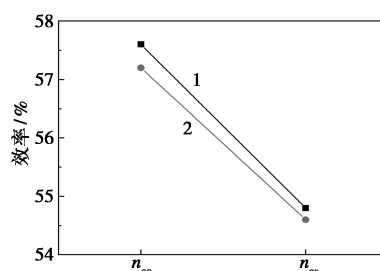
$$\eta_{EX,i} = EX_{out} / EX_{in} \quad (7)$$

式中,  $EX_{in}$  和  $EX_{out}$  分别表示输入和输出的焓, MW。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模拟结果分析

图 2 表示在基准进料组成下, 本系统和无压力能利用的参比系统的性能对比。由图可知, 在输入的温度压力及单元操作参数相同的情况下, 本文中提出的燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统能源利用效率和焓效率分别为 57.48% 和 54.68%, 分别高于参比系统 0.23% 和 0.15%。这主要是因为本系统增加了透平膨胀机, 将燃气进口压力由 4.0 MPa 减压至 1.82 MPa, 增加了约 3 MW 电量。此外, 燃气经过透平膨胀后温度降低, 可用来预冷空气进入燃气轮机温度, 增加燃气轮机的输出量, 增加了系统的输出电量。另一方面, 由于输入的燃气焓和空气焓高于输入的燃气低温热值, 故焓效率低于能源利用效率。



1—本系统; 2—参比系统

图 2 本系统和参比系统性能对比

为探究提出的新型系统各个主要单元焓效率, 在环境温度为  $25^\circ\text{C}$ , 环境压力为 0.1 MPa 下计算各个物流焓值, 再根据式 (6) 和式 (7) 计算出焓效率, 如表 3 所示。由表 3 可知, 膨胀机、燃气轮机、蒸汽轮机和压气机的焓效率均高于 93%, 这主要是由于机组机械损失及不可能绝热过程做功引起的电量损失。余热锅炉的焓效率为 87.85%, 这主要是由于烟气和热水换热过程中的不可逆内部热损失。燃烧室的焓效率最低, 仅为 78.38%, 原因是在燃烧室内, 燃气与空气发生化学反应的化学焓损失以及燃料与燃烧后烟气的物理焓的损失。此外, 燃烧室内的不完全燃烧、散热损失等也会降低燃烧室的焓效率。

表 3 各个主要单元的焓效率 %

主要单元	膨胀机	压气机	燃烧室	燃气轮机	余热锅炉	蒸汽轮机
焓效率	99.82	94.69	78.37	96.05	87.86	93.74

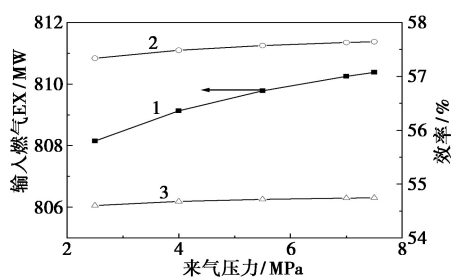
表 4 显示了所提出的新型系统的焓流数据。由表 4 可以看出, 系统的总输入焓值为 812.32 MW, 总输出电能为 445.65 MW。燃烧室焓损高达 232.36 MW, 占系统总焓损的 63.5%, 其次是余热锅炉, 焓损值为 35.39 MW, 占总焓损的 9.6%。膨胀机、压气机和蒸汽轮机的焓损较小, 占总焓损比例小于 4%。值得注意的是, 经余热锅炉后的排放烟气由于温度为  $120^\circ\text{C}$ , 因此还具有部分能量, 直接排放后未参与利用, 因此这部分能量也考虑在焓损里面, 占比约 9.3%。要减少系统的总焓损, 关键在于降低燃烧室的能量损失, 提高燃烧效率、提高入口燃气压力和降低燃烧热损失等方式可减少燃烧室的焓损。

表 4 系统焓流数据 MW

输入焓		812.32						
输出电能及焓损	输出电能	膨胀机	压气机	燃烧室	燃气轮机	余热锅炉	蒸汽轮机	烟气
		445.65	1.45	14.96	232.36	33.26	35.39	14.28

### 3.2 影响因素分析

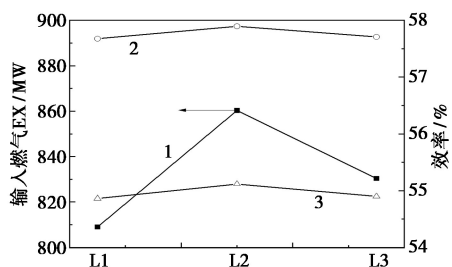
由于不同的燃气管输压力不同,因此高压燃气经膨胀后产生的发电量和温度会发生改变。考察了当来气压力从 2.5 MPa 增加到 7.5 MPa 情况下,燃气输入焓损失和系统能量利用效率和焓效率的变化情况,如图 3 所示。由图 3 可看出,来气压力的变化对燃气输入焓的影响较大,对系统的效率影响较小。具体来看,燃气入口压力从 2.5 MPa 增加到 7.5 MPa 时,输入的燃气焓值由 808.15 MW 增加至 810.38 MW,系统能量利用效率由 57.3% 增加至 57.6%,焓效率由 54.6% 增加至 54.7%。这主要是因为燃气进口压力增加,燃气中可利用的压力焓相应增加,经膨胀后输出的电能亦升高,但由于燃气膨胀机所输出的电能整体占系统总输入电能的占比较小( $<1\%$ ),因此在操作条件不变的情况下,对系统的效率影响较小。



1—燃气焓值;2—系统能源利用效率;3—焓效率

图 3 来气压力对系统性能的影响

受燃气来气气源的影响,不同管线的燃气组分不同,表 1 中列举了 3 种燃气气质的组分情况(L1~L3)。L2 燃气管线中甲烷含量最高,达到了 98.54%,其次是 L3 管线,甲烷含量为 95.99%,其他的烃类组分相对较少。在表 2 所列的操作条件下,计算得到的燃气输入焓和系统性能的变化如图 4 所示。对于燃气输入焓,L2 最大为 860.3 MW,L3 为 830.3 MW,均高于基准燃气管线 L1 30~60 MW。



1—不同气源燃气输入焓;2—不同气源系统能源利用效率;  
3—不同气源焓效率

图 4 不同气源对系统性能的影响

从系统的效率来看,L2 管输燃气的能量效率和焓效率最高,分别为 57.9% 和 55.1%。L1 和 L3 管线燃气所得的效率基本一致。这是由于燃气中甲烷含量越高,其燃烧温度越高,经燃气轮机膨胀后所得的燃气温度越高,在排烟温度不变的情况下,经余热锅炉换热后所得的蒸汽流量增加,故蒸汽轮机的输出电量增加,因此系统的效率呈现增加趋势。但整体而言,不同组分对系统的效率影响较小。

## 4 结论

提出了一种燃气管网压力能耦合蒸汽联合发电系统,采用 Aspen Plus 对该流程进行了模拟和热力学分析,并与常规燃气蒸汽联合发电系统进行了对比。考察了燃气入口压力和组成对系统能源利用效率和焓效率的影响。研究结果如下。

(1)该系统能源利用效率和焓效率分别达到 57.48% 和 54.68%,分别高于常规参比系统 0.23% 和 0.15%。

(2)系统最大焓损发生在燃烧室,占总焓损的 63.5%,其次是余热锅炉,占总焓损的 9.6%,因此燃烧器需要进一步优化提高效率,以减少焓损失。

(3)燃气入口压力由 2.5 MPa 增加到 7.5 MPa,系统能源利用效率由 57.3% 增加至 57.6%,焓效率由 54.6% 增加至 54.7%。

(4)燃气进料组分中,甲烷含量越高,能量效率和焓效率越高,但不同组分的燃气对系统的效率整体影响较小。

## 参考文献

- [1] 王玉君.天然气门站压力能的回收利用[J].冶金动力,2015,(7):23-26.
- [2] 城镇燃气设计规范,GB 50028—2006[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] 马帅杰,林文胜.天然气分输站压力能利用方式经济性分析[J].化工学报,2018,69(S2):413-419.
- [4] 徐文东,刘一成,蔡振培,等.天然气管网压力能发电技术现状及未来发展方向[J].现代化工,2019,39(12):11-15,20.
- [5] Borelli D, Devia F, Lo Cascio E, et al. Energy recovery from natural gas pressure reduction stations: Integration with low temperature heat sources[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 159: 274-283.
- [6] 安成名.天然气门站管网压力能回收利用技术研发与应用[J].城市燃气,2012,(9):25-28.
- [7] 张安安,冯雅婷,黄璜,等.含天然气压力能利用的综合能源系统优化调度模型[J].电力系统自动化,2021,45(12):30-39.
- [8] 张冬梅.利用长输天然气压力能生产 LNG 系统性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

(下转第 249 页)

## 参考文献

- [1] Wang Z, Lin K, Liu X. Distribution and pollution risk assessment of heavy metals in the surface sediment of the intertidal zones of the Yellow River Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 174: 113286.
- [2] Liu Z, Fei Y, Shi H, et al. Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808, 151874.
- [3] Ynalvez R, Gutierrez J, Gonzalez-Cantu H. Mini-review: Toxicity of mercury as a consequence of enzyme alteration [J]. *BioMetals*, 2016, 29, 781–789.
- [4] 史慧芳, 赵强, 安众福, 等. 基于小分子的汞离子荧光探针 [J]. *化学进展*, 2010, 22(9): 1741–1752.
- [5] 张勇, 李伟, 王强, 等. 一种基于苯并噁唑类的可视化检测汞离子的荧光探针 [J]. *化学学报*, 2013, 71(11): 1496–1499.
- [6] Mahato P, Saha S, Das P, et al. An overview of the recent developments on Hg<sup>2+</sup> recognition [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(68): 36140–36174.
- [7] 黄文君, 吴文辉, 梁嘉香. 基于脱硫反应的硫脲基罗丹明 B 汞离子荧光化学剂量计的合成及分子氢键的影响 [J]. *化学学报*, 2012, 70(7): 873–880.
- [8] Mikroyannidis J, Tsagkourmos D, Sharma S, et al. Symmetrical molecules of low band gap with a central spacer connected via ether bond with terminal 4-nitro- $\alpha$ -cyanostilbene units: Synthesis and application for bulk heterojunction solar cells [J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(10): 1631–1641.
- [9] Selvaraj M, Rajalakshmi K, Ahn D, et al. Tetraphenylethene-based fluorescent probe with aggregation-induced emission behavior for Hg<sup>2+</sup> detection and its application [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2021, 1148: 238178.
- [10] Sharma S, Ghosh K. Overview on recently reported fluorometric sensors for the detection of copper ion based on internal charge transfer (ICT), paramagnetic effect and aggregation induced emission (AIE) mechanisms [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1237: 130324.
- [11] Lu X, He W. Research advances in excited state intramolecular proton transfer fluorescent probes based on combined fluorescence mechanism [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(2): 184–196.
- [12] 李张宜. 基于 FRET 机理的比率型荧光探针的设计、合成及其应用 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [13] Sun S, Wu X, Huang Y, et al. Visual detection of Cu<sup>2+</sup> in high-copper feed based on a fluorescent derivative of rhodamine B [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 171: 106858.
- [14] Duan G, Zhang G, Yuan S, et al. A pyrazolo[1,5-a]pyridine-based ratiometric fluorescent probe for sensing Cu<sup>2+</sup> in cell [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, 219: 173–178.
- [15] Yu Y, Liu C, Tian B, et al. A novel highly selective ratiometric fluorescent probe with large emission shift for detecting mercury ions in living cells and zebrafish [J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 177: 108290.
- [16] Pang B, Li Q, Li C, et al. A highly selective and sensitive coumarin derived fluorescent probe for detecting Hg<sup>2+</sup> in 100% aqueous solutions [J]. *Journal of Luminescence*, 2019, 205: 446–450.
- [17] 李登超, 韩秋敏, 邱忠洋, 等. 新型 H<sub>2</sub>S 的荧光探针制备及其在水样中的应用 [J]. *现代化工*, 2024, 44(8): 238–243.
- [18] Chan C, Liu H, Xue Z. Chromogenic and fluorescent probe for detection of mercury (II) ion based on mono-pyrrolyl substituted BODIPY [J]. *Microchemical Journal*, 2021, 166: 106247.
- [19] 薛松松, 解正峰, 何佳伟, 等. 高选择性快速识别汞 (II) 离子的磺酰胺型探针的合成及在吸附中的应用 [J]. *应用化学*, 2022, 39(5): 760–768.
- [20] 何佳伟, 解正峰, 薛松松, 等. 高选择性快速检测 Cu<sup>2+</sup> 的水杨酰胺型探针的合成及在逻辑门和吸附中的应用 [J]. *有机化学*, 2021, 41(7): 2839–2847.
- [21] Chu Y, Xie Z, Zhuang D, et al. An intramolecular charge transfer and aggregation induced emission enhancement fluorescent probe based on 2-phenyl-1,2,3-triazole for highly selective and sensitive detection of homocysteine and its application in living cells [J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2019, 37: 1216–1222.
- [22] Guo Z, Lei T, Jin Z, et al. T-Shaped Donor-acceptor molecules for low-loss red-emission optical waveguide [J]. *Organic Letter*, 2013, 15: 3530–3533.
- [23] Yang B, Huang J, Bao C, et al. A highly sensitive colorimetric and ratiometric fluorescent probe based on 3-hydroxyphthalimide for detection of Hg<sup>2+</sup> in aqueous solution and its application in real sample analysis [J]. *Tetrahedron Letters*, 2020, 61: 151534.
- [24] Wu D, Chen L, Xu Q, et al. Design principles, sensing mechanisms, and applications of highly specific fluorescent probes for HOCl/OCl<sup>-</sup> [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52: 2158–2168. ■
- [12] Yao S, Zhang Y, Deng N, et al. Performance research on a power generation system using twin-screw expanders for energy recovery at natural gas pressure reduction stations under off-design conditions [J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 1218–1230.
- [13] Esquivel-Patiño G G, Serna-González M, Nápoles-Rivera F. Thermal integration of natural gas combined cycle power plants with CO<sub>2</sub> capture systems and organic Rankine cycles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 151: 334–342.
- [14] Zhao H, Jiang P, Chen Z, et al. Improvement of fuel sources and energy products flexibility in coal power plants via energy-cyber-physical-systems approach [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113554. ■

(上接第 243 页)

- [9] 王松岭, 论立勇, 谢英柏, 等. 基于天然气管网压力能回收的联合循环构思 [J]. *热能动力工程*, 2005, (6): 75–78, 111.
- [10] 王登亮, 舒雯, 张书凯, 等. 耦合天然气压力能的新型三联供系统构建及分析 [J]. *材料与冶金学报*, 2022, 21(4): 306–312.
- [11] Golchoobian H, Saedodin S, Ghorbani B. Exergetic and economic evaluation of a novel integrated system for trigeneration of power, refrigeration and freshwater using energy recovery in natural gas pressure reduction stations [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 145(3): 1467–1483.