

DOI: 10.7652/xjtuxb201607005

湿空气透平循环的压缩空气储能 热电联供系统热力学分析

王佳莹^{1,2}, 高毅超^{1,2}, 曹越^{1,2}, 戴义平^{1,2}

(1. 西安交通大学叶轮机机械研究所, 710049, 西安; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高传统压缩空气储能系统(CAES)的发电功率和能量利用率,设计了一种热电联供型湿空气透平循环的压缩空气储能系统(CAES-HAT),其将水作为压缩过程储热介质、通过合理利用压缩热和排气热量、以湿空气和水为工质分别对外输出电量和热量,同时分析了关键参数对系统燃烧室燃料质量流量、透平功率、供电量、供热量和系统效率的影响,揭示了释能机组进口工质温度随参数变化的规律。研究结果表明,与传统 CAES 相比,CAES-HAT 具有更高的发电功率和效率,在给定系统条件下机组发电功率增加 19.17%,达到 354.75 MW,供热功率达到 66.36 MW,相同发电量下节省燃料 18.17%,系统效率达到 58.14%。释能机组的参数对发电功率影响明显,供电量和供热量对水气比变化敏感,该结果可为 CAES 系统优化提供参考。

关键词: 压缩空气储能;湿空气;热电联供

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0026-06

Thermodynamic Analysis for CAES-HAT System Combined Power and Heat Generation

WANG Jiaying^{1,2}, GAO Yichao^{1,2}, CAO Yue^{1,2}, DAI Yiping^{1,2}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A combined heat and power system (CAES-HAT) based on humid air turbine cycle is proposed to improve turbine power and efficiency of the conventional CAES system, where water serves as the heat storage medium in charge process to utilize compression heat and exhaust air heat properly for generating electricity and heat with humid air and water as working media, respectively. The changing trends of combustor fuel flow rate, turbine power, electricity supply, heat supply and system efficiency are analyzed with respect to several key parameters. The trend of working medium temperature of discharge progress inlet is discussed by changing the above parameters. Compared with the conventional CAES system, the proposed CAES-HAT system produces more electricity power and operates more efficiently. The electricity power of the proposed system increases by 19.17% under the design condition and reaches 354.75 MW. The heat power reaches 66.36 MW and the system saves 18.17% of fuel with the same power generation, and its total efficiency reaches 58.14%. The parameters of discharge units affect electricity power obviously. Power and heat supply are more sensitive to liquid-to-gas ratio.

Keywords: compressed air energy storage; humid air; combined heat and power

储能系统对于优化能源结构和维持电网稳定具有重要意义,压缩空气储能系统(compressed air energy storage, CAES)作为技术成熟的大规模机械储能方式,具有成本低、寿命长等优点^[1],但其发电量依赖于储气装置容积,地理条件也限制了大型 CAES 系统的推广^[2]。为提高 CAES 系统发电量和适用性,Najjar 等在 CAES 系统基础上通过增设饱和器建立了 CASH 系统并将其与原系统进行对比,发现 CASH 系统具有更高的发电量及发电效率^[3-4]。赵攀等建立了 CAES-HAT 系统,其利用压缩热和透平乏气热量加热循环水,并对系统性能进行了分析和优化^[5]。

由于湿空气透平(HAT)循环需水量大,经饱和器的高温水能量大部分输出为低品位热能,间接增加了系统用水量和燃料质量流量,降低了供电效率。为了进一步利用乏气热量,本文将水作为压缩过程储热介质,提出了一种 CAES-HAT 热电联供系统,其将饱和器出口的部分低温水进行循环再加热,将未循环的低温水热量进行回收。做功乏气热量采用分级利用,分别用来加热饱和器出口工质、部分饱和器出口低温水和储气室出口干空气。本文还对所提系统的部分关键参数进行了热力学分析。

1 热电联供系统

1.1 CAES-HAT

CAES-HAT 系统如图 1 所示,储能过程和释能过程均分为两级。此系统包含的 3 个子系统分别为储能系统、释能系统和水循环系统。

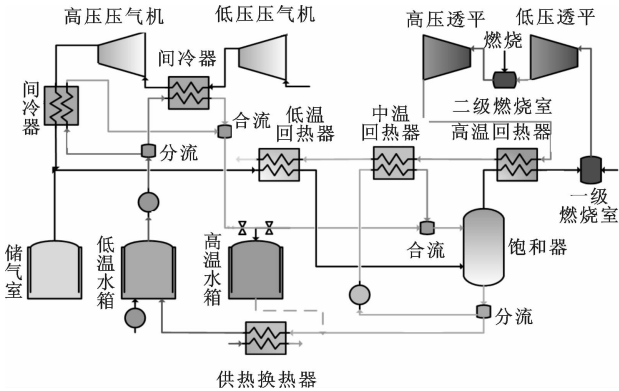


图 1 CAES-HAT 热电联供系统示意图

储能系统基本组件为压气机、间冷器和储气室,其将可利用的电或可再生能源转换为空气的机械能,级后高温空气与低温储水箱中水进行热量交换后存储在储气室中,低温水吸收热量后储存在高温储水箱中。水循环系统包括低温水箱、

高温水箱、水泵和供热换热器。在释能阶段,干空气经低温回热器后与高温水分别从底部和上部同时进入饱和器,在饱和器内部逆向流动,高温水被蒸发降温,干空气被加热、加湿。饱和器出口产生饱和湿空气和部分低温水。低温水分流,一部分经过中温回热器后与高温水箱中的水混合重新参与到气水循环中,另一部分作为系统对外供热热源进入到供热换热器。释能系统包括高压透平、低压透平以及对应燃烧室,高温回热器、中温回热器、低温回热器分别用来加热饱和湿空气、部分低温水和低温压缩空气。

1.2 系统模型

为了简化系统计算模型^[5-7],对分析过程进行如下假设:①干空气组分设定为质量分数为 76% 的 N_2 和 24% 的 O_2 ;②储能和释能过程中系统处于稳定状态;③燃烧室绝热且燃料燃烧充分,饱和器绝热,出口湿空气为饱和状态;④各换热器冷端和热端温差都必须大于现有技术所能达到的最小值,气-气换热器最小温差为 10 °C,气-水换热器最小温差为 5 °C;⑤最低排气温度为 354 K;⑥压气机和透平绝热效率不变;⑦除间冷器、回热器和饱和器外,其他压损忽略不计。

系统各状态点的空气、水蒸气等做功过程均作为实际气体处理,并考虑其热力性质随温度和压力的变化。

饱和器出口温度^[8]

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{wt(air, in)}} + \Delta T \quad (1)$$

式中: $T_{\text{wt(air, in)}}$ 为进入饱和器的空气湿球温度; ΔT 至少为 4 K。

透平功率

$$P_{\text{tur}} = \Delta h_s \eta_{\text{tur}} (m_{\text{ha}} + m_c) \quad (2)$$

式中: Δh_s 为透平等熵焓降; η_{tur} 为透平绝热效率; m_{ha} 和 m_c 分别为湿空气和燃烧室燃料的质量流量。

供电量和供热量分别为

$$W_t = P_{\text{tur}} t \quad (3)$$

$$Q_h = m_w \Delta h_h t \quad (4)$$

式中: m_w 和 Δh_h 分别为供热换热器工质流量和焓降; t 为系统释能时间。

系统效率

$$\eta_t = \frac{W_t}{W_c + W_{\text{pump}} + Q_{\text{fuel}}} \quad (5)$$

$$\eta_h = \frac{Q_h}{W_c + W_{\text{pump}} + Q_{\text{fuel}}} \quad (6)$$

$$\eta = \eta_t + \eta_h \quad (7)$$

式中: W_c 为储能过程压缩功; W_{pump} 为系统所耗泵

功; Q_{fuel} 为输入系统燃料热量。

2 系统热力学分析

2.1 系统分析

采用 REFPROP 软件^[9]对状态点进行物性查询,以 Matlab 为平台对系统热力学特性进行分析。系统相关部件及运行参数见表 1,部分参数参照德国 Huntorf CAES 电站^[10]选取。

表 1 系统运行参数

参数	数值
空气温度/K	293.15
空气压力/kPa	101.325
间冷器出口空气温度/K	323.15
储气室压力/kPa	4 200~7 200
储气室体积/ m^3	180 000
储气室内空气温度/K	323.15
低温回热器进气压力/kPa	4 200
饱和器进口空气温度/K	423.15
水气比	0.8
高压透平进口温度/K	823
低压透平进口温度/K	1 100
低压透平进口压力/kPa	1 100
压气机绝热效率/%	88
透平绝热效率/%	85
水泵绝热效率/%	70
压损系数/%	2
天然气低位发热量/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	50 010
储能过程空气质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	105
释能过程空气质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	420.09

系统性能如表 2 所示,CAES-HAT 系统效率达到 58.14%,相同释能空气质量流量下发电功率达到 354.75 MW,与传统 CAES 电站相比提高了 19.17%,燃烧过程所需天然气流量为 9.42 kg/s,相同发电量情况下可节省燃料 18.17%。

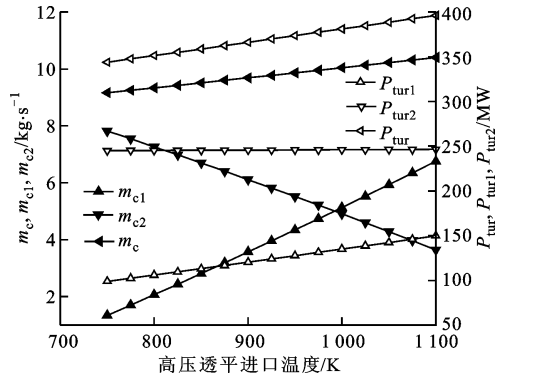
表 2 CAES-HAT 与传统 CAES 系统性能比较

参数	CAES-HAT 系统	传统 CAES 系统 ^[10]
透平功率/MW	354.75	295.45
供热功率/MW	66.36	
燃烧所需燃料流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	9.42	9.53
系统效率/%	58.14	41.73
系统焓效率/%	48.72	40.45

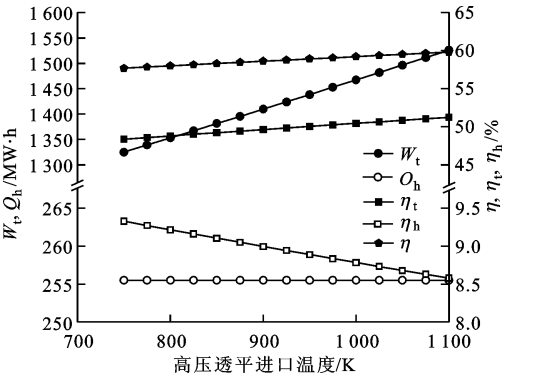
2.2 系统热力学分析

高压透平进口温度对系统性能的影响如图 2 所示。图 2a 显示,一级燃烧室燃料质量流量 m_{c1} 升高,二级燃烧室燃料质量流量 m_{c2} 降低。饱和湿空气在进入一级燃烧室之前已通过高温回热器进行了预热,当高压透平进口温度较低时,工质对燃烧室的热量需求较小,一级燃烧室燃料质量流量较低。高压透平的进口工质温升会提高其出口温度,工质对二级燃烧室的热量需求降低,使得二级燃烧室燃料质量流量降低,但燃烧室总燃料质量流量 m_c 升高。总功率 P_{tur} 随高压透平进口温度升高而升高。高压透平功率 P_{tur1} 升高,低压透平功率 P_{tur2} 略有升高,这是由于进入到系统内的总燃料流量增大,一方面增加了低压透平做功工质流量,另一方面改变了工质组分,带来了少量焓降差异。图 2b 显示:系统总供电量 W_t 随高压透平进口温度升高而明显升高,在恒定水气比下,进入到系统供热换热器的低温水热能保持不变,系统供热量 Q_h 保持恒定;高压透平进口温度越高,系统能耗越高,供热效率 η_h 降低,但供电效率 η_t 和系统总效率 η 升高。

低压透平进口温度对系统性能影响如图 3 所



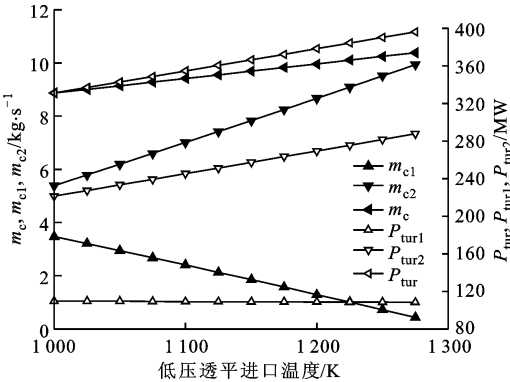
(a)对燃烧室燃料质量流量和发电功率的影响



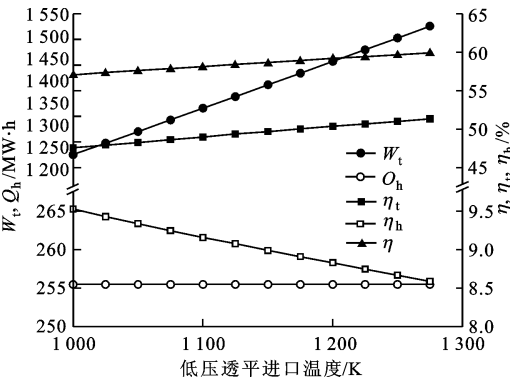
(b)对系统供电量、供热量和系统效率的影响

图 2 高压透平进口温度对系统性能的影响

示。图 3a 显示,低压透平进口温度升高会使二级燃烧室燃料质量流量升高。低压透平进口温度升高带来其出口温度升高,乏气在高温回热器内与饱和湿空气换热量增加,由此降低了饱和湿空气对一级燃烧室的热量需求,使一级燃烧室燃料质量流量降低,但总燃料质量流量受二级燃烧室影响更大,总燃料质量流量升高。低压透平功率升高明显,高压透平功率略有降低,一方面是进口工质质量流量降低,另一方面是工质成分变化带来了焓降的差异,然而总功率受低压透平影响更大,随低压透平进口温度升高而升高。图 3b 显示,系统供热量不变,供电量上升明显。



(a) 对燃烧室燃料质量流量和发电功率的影响

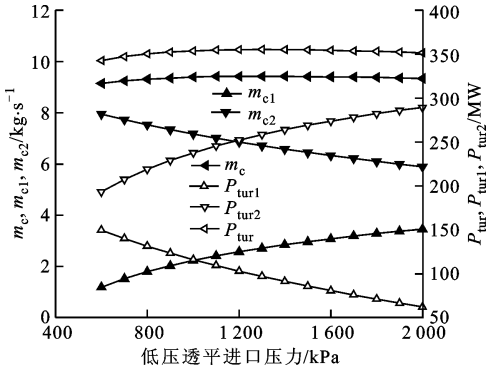


(b) 对系统供电量、供热量和系统效率的影响

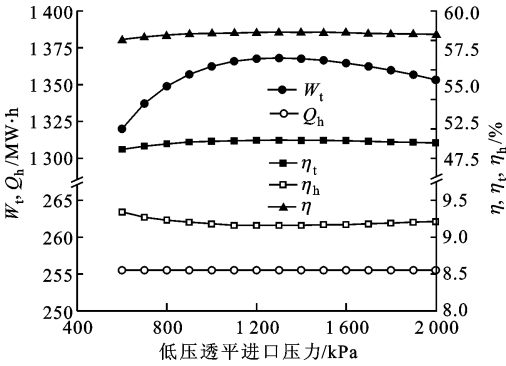
图 3 低压透平进口温度对系统性能的影响

供热效率下降,供电效率上升,系统总效率受供电效率影响呈上升趋势。另一个影响系统性能的因素是低压透平进口工质压力,其对系统性能的影响如图 4 所示。图 4a 显示,随低压透平进口压力升高,一级燃烧室燃料质量流量升高,二级燃烧室降低,总燃料质量流量在较小的变化区间内先升高后降低。这是因为随着压力升高,低压透平出口温度降低,经过高温回热器的饱和湿空气温度降低的缘故。高压透平功率降低,低压透平功率升高,总功率

先升高后降低,但变化幅度不明显。图 4b 显示:系统对外供电量先升高后降低,系统的供热量保持恒定;供电效率先升高后降低,供热效率与供电效率相反;总效率受供电效率影响较大,先升高后降低,但变化不明显。这是由于系统总燃料质量流量和系统发电功率随低压透平进口压力变化幅值很小的缘故。



(a) 对燃烧室燃料质量流量和发电功率的影响



(b) 对系统供电量、供热量和系统效率的影响

图 4 低压透平进口压力对系统性能影响

水气比为进入饱和器的高温水与干空气质量流量的比值,改变水气比指在饱和器进口干空气质量流量不变的情况下,对高温水流量做出调整来获得不同温度和湿度的饱和湿空气。不同水气比下进入中温回热器的循环水质量流量 m_{MHE} 以及饱和器出口的湿空气含湿量 d 和温度 T_{out} 变化如图 5 所示。图 5 显示:随水气比增加,饱和器出口湿空气含湿量和温度均升高;水气比小于 0.6 时,储能阶段产生的高温水足以参与饱和器水循环,中温回热器循环水量为 0;随水气比增大,经过中温回热器的循环水量增大,中温回热器换热量增大,这间接降低了经高温回热器后的饱和湿空气温度,从而影响系统性能。

水气比变化对系统性能影响如图 6 所示。

图 6a 显示,二级燃烧室燃料质量流量均匀增加,一级燃烧室燃料质量流量在较小范围内波动后

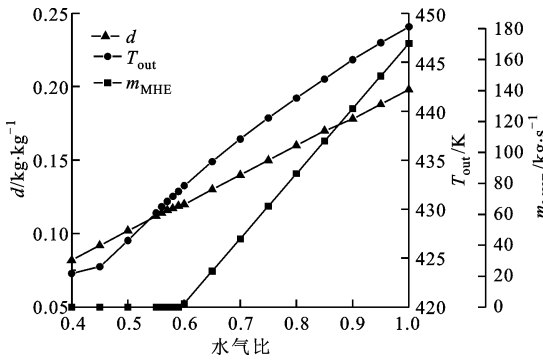
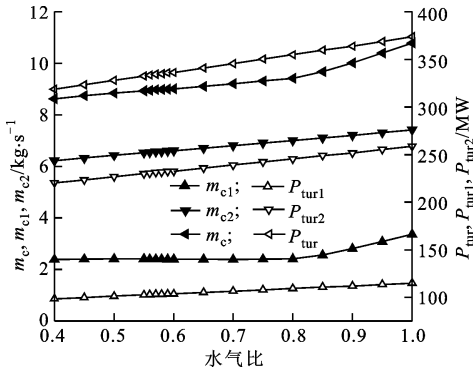
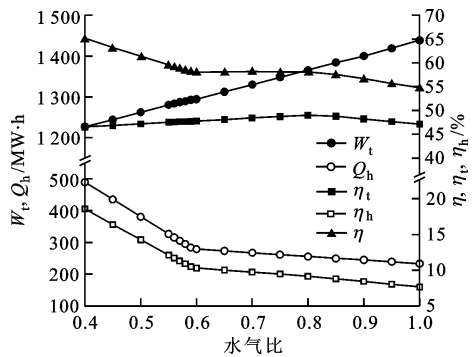


图 5 水气比对湿空气性质的影响



(a) 对系统燃料质量流量和透平功率的影响



(b) 对系统供电量、供热量和系统效率的影响

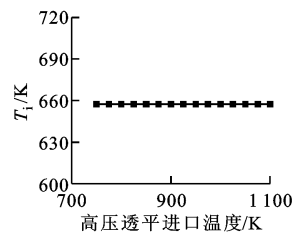
图 6 水气比对系统性能影响

增大,总燃料质量流量增大。因为水气比直接影响饱和湿空气含湿量和温度,饱和湿空气经高温回热器后的温度随水气比增大先上升后降低。湿空气含湿量增大,对工质温度变化影响加强,低压透平出口温度略有上升,但为了同时满足中低温回热器的热量需求,高温回热器内部换热量受到限制。透平功率随水气比增加均增大,总功率也随之增大,这是工质含湿量增大,其做功能力增强造成的。图 6b 显示:当水气比小于 0.6 时,储能阶段存储的热水直接参与饱和器循环和供热过程,系统供热量很大,供电量相对较低;水气比大于 0.6 时,湿空气含湿量随水气比增大而增大,供热阶段工质流量减小,供热量减

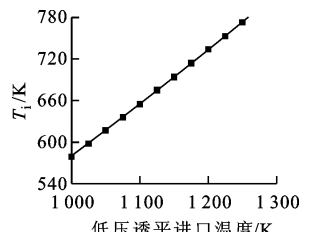
小,但释能机组工质流量增大且做功能力增强,供电量增大;供热效率随水气比增大而降低,变化趋势与供热量相同,供电效率先增大后降低。系统总效率在水气比小于 0.6 时较大,这是受到此阶段供热效率的影响;当水气比大于 0.6 时,系统总效率先上升后下降,这是受到此阶段供电效率的影响。综合考虑电站性质,均衡供电量和供热量,合适的水气比对于电站的经济性建设具有重要意义。

高压透平进口温度、低压透平进口温度和压力以及水气比对进入释能机组前工质温度 T_i 的影响如图 7 所示。

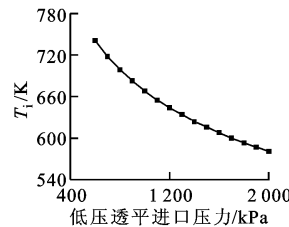
图 7a 显示,高压透平进口温度升高对 T_i 影响较小,因为此参数对加热饱和湿空气的低压透平工质出口温度、流量以及成分影响较小。图 7b 显示, T_i 随着低压透平进口温度升高而升高,这是在满足各回热器换热量情况下,由低压透平出口工质温度升高所致。图 7c 显示, T_i 随低压透平进口压力升高而降低,这是低压透平进口压力增大,其出口工质温度降低,在高温回热器内部提供给湿空气的换热量降低所致。图 7d 显示,水气比对系统工质组分影响较大,随水气比增大,为保证各级回热器换热量,一级燃烧室进口工质温度在水气比为 0.8 时达到最大值,水气比大于 0.8 时下降明显。



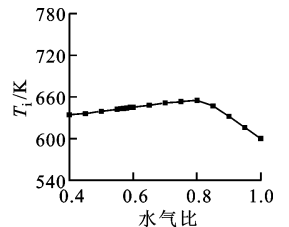
(a) 高压透平进口温度的影响



(b) 低压透平进口温度的影响



(c) 低压透平进口压力的影响



(d) 水气比的影响

图 7 不同做功条件对进入释能机组工质温度的影响

3 结 论

本文提出了一种湿空气透平循环的压缩空气储

能热电联供系统,其将水作为压缩过程储热介质,通过合理利用压缩热和排气热量,并以湿空气和循环水为工质分别对外输出电量和热量。系统热力学分析研究结果如下。

(1)CAES-HAT 热电联供系统总效率为 58.14%, 烟效率为 48.72%,供热功率达 66.36 MW,供电功率可达 354.75 MW,燃烧室所需天然气流量为 9.42 kg/s。与传统 CAES 电站相比,本文系统供电功率增加了 19.17%,相同发电量情况下可节省燃料 18.17%。

(2)释能机组的部分参数对发电量和发电功率的影响明显,对供热功率没有影响,供电量和供热量对水气比变化敏感。

(3)CAES-HAT 系统在原 CAES 系统基础上增设循环水设备,通过分化系统储能装置,可大大提高 CAES 系统的灵活性和环境适应性,为 CAES 系统进一步研究提供参考。

参考文献:

- [1] 张新敬,陈海生,刘金超,等. 压缩空气储能进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40.
ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air storage system: a review [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.
- [2] 刘金超,徐玉杰,陈宗衍,等. 压缩空气储能储气装置发展现状与储能特性分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 148-155.
LIU Jinchao, XU Yujie, CHEN Zongyan, et al. The development status and energy storage characteristic of gas storage device of compressed air energy storage system [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(35): 148-155.
- [3] NAJJAR Y S H, JUBEN N M. Comparison of performance of compressed-air energy-storage plant with compressed-air storage with humidification [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2006, 220(6): 581-588.
- [4] JUBEH N M, NAJJAR Y S H. Comparison of performance for cascaded humidified advanced turbine with the corresponding combined system [J]. International Journal of Sustainable Energy, 2007, 26(4):

209-220.

- [5] ZHAO Pan, DAI Yiping, WANG Jiangfeng. Performance assessment and optimization of a combined heat and power system based on compressed air energy storage system and humid air turbine cycle [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 103: 562-572.
- [6] CHACATEGUI R, BECERRA J A, BLANCO M J, et al. A humid air turbine-organic Rankine cycle combined cycle for distributed microgeneration [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 104: 115-126.
- [7] 焦树建. HAT 循环的热力学分析 [J]. 燃气轮机技术, 1995, 8(2): 1-11.
JIAO Shujian. Thermodynamic analysis of HAT cycle [J]. Gas Turbine Technology, 1995, 8(2): 1-11.
- [8] HUI Yu, WANG Yuzhang, WENG Shilie. Experimental investigation of pressurized packing saturator for humid air turbine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(62): 513-519.
- [9] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties (Version 9.0. Boulder) [R]. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [10] 张伟德,徐刚,刘文毅,等. 典型压缩空气蓄能(CAES)电站热力学分析与系统优化 [J]. 现代电力, 2013, 30(2): 41-47.
ZHANG Weide, XU Gang, LIU Wenyi, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a typical compressed air energy storage (CAES) power plant [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(2): 41-47.

[本刊相关文献链接]

- 姚尔人,王焕然,席光. 一种压缩空气储能与内燃机技术耦合的冷热电联产系统. 2016,50(1):22-27. [doi:10.7652/xjtuxb201601004]
- 吴毅,胡东帅,王明坤,等. 一种新型的跨临界 CO₂ 储能系统. 2016,50(3):45-49. [doi:10.7652/xjtuxb201603007]
- 吴毅,王旭荣,杨翼,等. 以液化天然气为冷源的超临界 CO₂-跨临界 CO₂ 冷电联供系统. 2015,49(9):58-62. [doi:10.7652/xjtuxb201509011]
- 李鹏,杨玉龙,黄越辉,等. 综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究. 2014,48(2):69-73. [doi:10.7652/xjtuxb201402012]

(编辑 苗凌)