

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.008

烟气余热回收与储能技术耦合应用的可行性研究

Feasibility study on the coupling application of flue gas waste heat recovery and energy storage technology

郭璞维¹, 彭跃², 邓靖敏³, 李兵发³, 周兴³, 胡鋈³, 郭海强³, 王金星^{4*}
GUO Puwei¹, PENG Yue², DENG Jingmin³, LI Bingfa³, ZHOU Xing³, HU Yun³,
GUO Haiqiang³, WANG Jinxing^{4*}

(1. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201; 2. 沈阳工程学院 研究生部, 沈阳 110136; 3. 河北师范大学
中燃工学院, 石家庄 050024; 4. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

(1. Sanhe Power Generation Company Limited, Langfang 065201, China; 2. Shenyang Institute of Engineering
Graduate Faculty, Shenyang 110136, China; 3. College of Zhongran, Hebei Normal University,
Shijiazhuang 050024, China; 4. School of Energy, Power and Mechanical Engineering,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘 要:为实现碳中和目标,需要不断提高能源的利用效率。烟气余热回收是现有燃煤发电机组节能提效改造的重要方式之一。同时,储能技术在跨时空调节“源-荷”间匹配性方面展现出了一定的应用前景。介绍了变工况下烟气余热回收(350~400 ℃)、低温省煤器-暖风器联合运行(122~160 ℃)和直膨式热泵型烟气余热回收(77~180 ℃)3种烟气余热回收技术,以及压缩空气储能(200~400 ℃)、液体空气储能(-200 ℃)和热能存储(90~200 ℃)3种储能技术。结合烟气余热回收和储能技术的温度匹配性,提出烟气余热回收分别与压缩空气储能、热能存储技术耦合的潜在能源利用形式,探讨了其运行性能,为后续烟气余热高效回收及提高机组灵活性参数设计提供理论参考。

关键词:烟气余热回收;储能技术;压缩空气储能;热能存储;空气预热器;碳中和;热泵

中图分类号:TK 09:X 783 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)09-0062-07

Abstract: To achieve carbon neutrality, we must boost energy efficiency. Flue gas waste heat recovery is an important way to save energy and improve efficiencies of existing coal-fired units. At the same time, energy storage technology is of application prospect for being able to match “source-load” across time and space. Three flue gas waste heat recovery technologies, flue gas waste heat recovery under variable working conditions (350~400 ℃), combined operation of low-temperature economizers and heaters (122~160 ℃) and flue gas waste heat recovery with direct expansion heat pumps (77~180 ℃), are introduced, and so do the three energy storage technologies, compressed air energy storage (200~400 ℃), liquid air energy storage (-200 ℃) and thermal energy storage (90~200 ℃). Considering the matching of temperatures for flue gas waste heat recovery and energy storage technologies, the potential energy utilization forms of flue gas waste heat recovery technologies coupled with compressed air energy storage and thermal energy storage technology are proposed, and their operation performances are discussed. They provide theoretical references for efficient flue gas waste heat recovery and parameter design to improve unit flexibility.

Keywords: flue gas waste heat recovery; energy storage technology; compressed air energy storage; thermal energy storage; air preheater; carbon neutrality; heat pump

0 引言

2017年,国家发改委等部门联合发布《关于促

进储能技术与产业发展的指导意见》,确定了未来10年内储能发展的阶段性目标^[1],明确了两步实施方案。尤其在碳达峰、碳中和背景下^[2-3],为进一步加强新能源电力的发展,储能技术将成为能源领域未来数年乃至数十年的重要发展内容。

烟气余热回收是提高煤电机组系统效率的最

有效途径之一,国内外学者在这一技术领域进行了大量的研究工作。Riffat等^[4]对一种开放式烟气回收系统进行了研究,成功验证了该系统从常规热设备中回收烟气余热提高系统整体效率的可行性。Westerlund等^[5]以湿式生物质锅炉为示范探索了一种烟气驱动式回收系统。结果表明,生物质锅炉回收热量与传统锅炉相比增加了40.00%。Lazzarin等^[6]对烟气驱动的开放式回收系统进行模拟,结果表明,开放式系统中的电热泵回收烟气效果优于封闭式系统。Wei等^[7]建立了一个开放式烟气余热回收系统的仿真模型,为北京优选天然气和电力价格提供了重要的参考信息。Ye等^[8]为了提高烟气驱动式开放回收系统的效率,探索了一种根据热源温度自由切换单机或双机模式的余热回收方式。

储能技术的发展为烟气余热回收提供了配套的应用保障。Sun等^[9]对以陶瓷为壳的熔融盐蓄热单元性能进行探索,这种复合相变材料可以在其熔点温度下正常使用,有效预防堵塞和腐蚀的问题。Parsimehr等^[10]用玉米基碳制备的储能电极,具有良好的电化学性能,可用来制作超级电容器的电极。Kohler等^[11]以水沸石为吸附物质进行热化学储能研究,分别测量并计算了热化学储能的效率和能量密度,证明随着吸附物质碳链长度的增加,解吸温度会提高。在整个解吸温度范围内甲醇具有的能量密度最高,为402 kJ/kg。Wang等^[12]提出了将抽水储能与压缩空气储能耦合的新型储能系统,有助于解决风电储能受限的问题。

燃煤电厂设计排烟温度为120~150℃,实际运行排烟温度往往高于设计标准。排烟热损失超过锅炉总热损失的50.00%~80.00%^[13],是煤电机组热损失最多的一项。因此,降低排烟热损失具有重要意义^[14-16]。将燃煤电厂烟气余热利用储能技术储存起来并加以利用,可极大地提高燃煤电厂的能源利用效率。结合烟气余热回收和储能技术的特点及二者的温度区间,探索燃煤电厂烟气余热回收与储能技术耦合应用的可行性,以期对该技术的推广与研究探索提供参考。

1 烟气余热回收的利用方式

1.1 变工况下烟气余热回收

变工况下烟气余热回收主要通过高压省煤器和低压省煤器实现。其中,烟气余热回收的循环部位是旁路烟气管道,其温度区间是350~400℃。将回收的余热能量同时用于加热锅炉给水和凝结水,当旁路烟气与总烟气流量比为10.00%~30.00%时,能够使锅炉给水和凝结水的温度达到前置空气

加热器和空气预热器出口空气温度。低压省煤器的进口烟气温度和排气烟气温度等主要节点温度均下降,系统的烟效率降低,废热回收效率和能量等级替换系数提高。Wang等^[17]通过安装低压省煤器提高了600 MW锅炉的节煤效果。Stevanovic等^[18]通过加装高压省煤器提高了620 MW燃煤机组的烟气余热利用效率。Xu等^[19]提出在高温空气预热器和低温空气预热器之间加装低温节能器,有效减少烟损失。Yan等^[20]通过改进湿法脱硫旁路系统实现烟气余热回收利用,使净标准煤耗减少了5.38 g/(kW·h)。Yang等^[21]提出了一种概念性的烟气余热回收系统,包括高温空气预热器、低温空气预热器、主空气预热器,可用于加热冷凝水。Liu等^[22]针对上述节煤和烟气余热改造,提出不同工况下烟气余热级联回收系统(Flue Gas Waste Heat Cascade Recovery System, FWCRS),如图1所示。

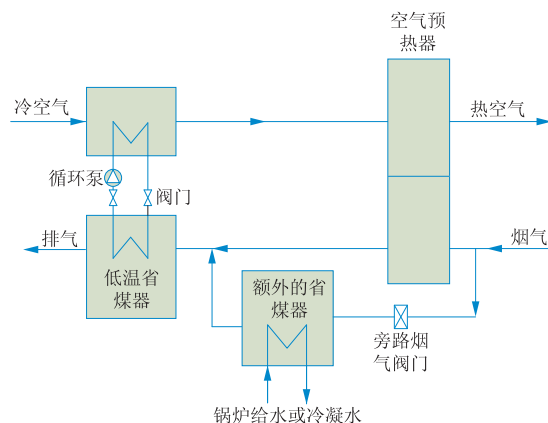


图1 烟气余热级联回收系统

Fig. 1 Flue gas waste heat cascade recovery system

图2是某1 000 MW超超临界双再热燃煤机组的工作原理^[23],来自锅炉的高温烟气分成2路,30.00%的旁路烟气经过调节阀依次流过高压省煤器和低压省煤器,分别加热冷凝水和锅炉补给水,再经过旁路阀门与通过空气预热器的另一路烟气汇合后进入反静电除尘器和后续的烟气脱硫装置。由低压省煤器和前置空气预热器组成循环装置预热来自送风机的冷空气之后,再经过空气预热器加热一次风和二次风并分别送入炉膛和磨煤机。

1.2 低温省煤器-暖风器联合运行

肖卓楠等^[24-25]针对燃煤电厂设计排烟温度低于实际排烟温度的情况,提出3种可行的解决方案,分别是低温省煤器-冷风加热器联合运行、低温省煤器-空气预热器联合运行、低温省煤器-暖风器联合运行,最后一种方案如图3所示。烟气余热回收的循环部位是暖风器,其温度为122~160℃,将回收的余热用于加热汽轮机回热加热器中的混合凝结水,

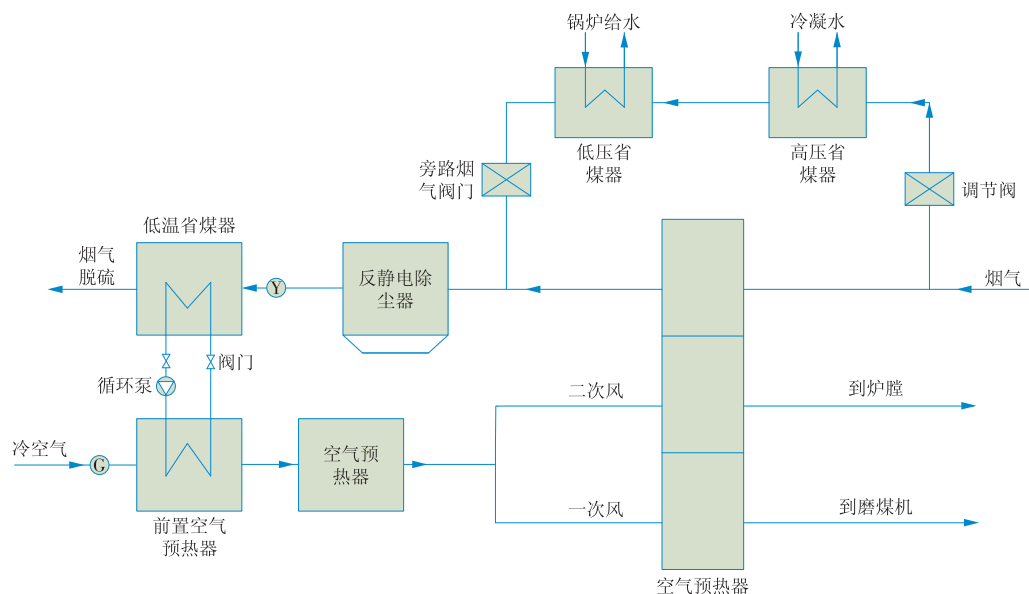


图 2 1000 MW 超临界双再热燃煤机组的 FWCRS 工作原理

Fig. 2 Working principle of the FWCRS in a 1000 MW ultra-supercritical double reheat coal-fired unit

达到排烟温度降到 100℃ 的效果。研究表明,低温省煤器-暖风器可起到较好的节煤效果,烟损失效率最低,更适合降低烟气的排烟温度。

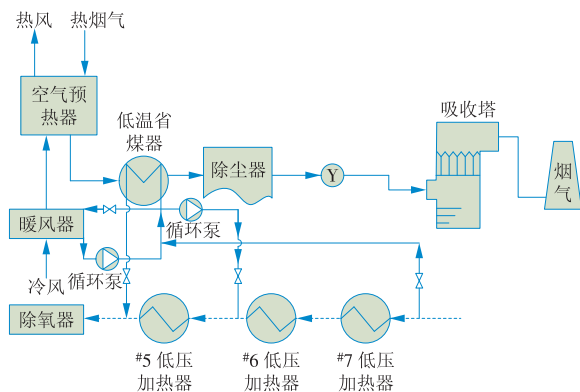


图 3 低温省煤器-暖风器联合运行

Fig. 3 Combined operation of low-temperature economizers and air heaters

1.3 直膨式热泵型烟气余热回收装置

直膨式热泵型烟气余热回收装置通过直膨式热泵蒸发器换热和高温烟气-水换热器回收烟气余热,其工作温度为 77~180℃。回收的余热用于加热热网回水,进而可计算得到余热回收系统水流量与燃气利用效率的关系。王明爽^[26]为利用回水温度约 50℃ 的热水管网对中小型锅炉 (10~10 000 kW) 进行深度烟气余热回收,研究了直膨式热泵型烟气余热回收系统,如图 4 所示。试验结果表明,直膨式热泵型烟气余热回收系统的效果良好。

2 热能储存形式及应用特点

2.1 压缩空气储能技术

压缩空气储能技术的应用温度区间为 200~

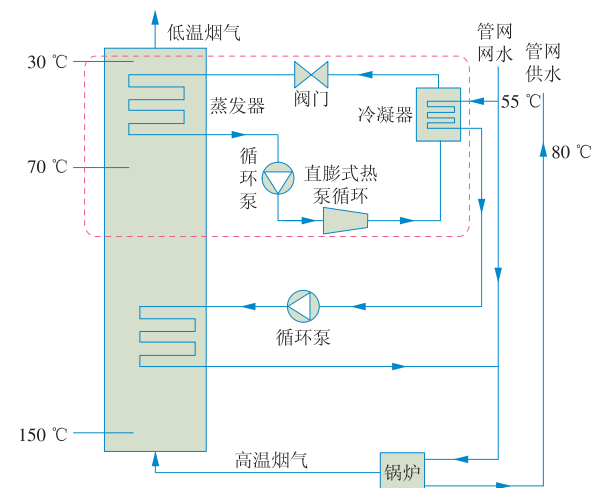


图 4 直膨式热泵型烟气余热回收系统工作原理

Fig. 4 Working principle of the flue gas waste heat recovery system with direct expansion heat pumps

400℃,通常利用地下岩洞、熔岩洞或人工建造的管道系统等作为容器,将非峰值时段的电力通过压缩空气储存在上述容器内^[27],在用电高峰时间段将压缩空气释放、加热、膨胀,利用涡轮发电机发电。该项技术可以更灵活地根据区域内的具体情况进行应用。压缩空气储能的效率接近 70.00%,预期运行周期为 40 a^[28]。目前该项技术包括以下 2 个方面:一是在空气膨胀过程中,重用压缩热来消除和减少排放阶段和加湿压缩空气过程中消耗的燃料;二是直接利用压缩泵储存能量^[29-30],如图 5 所示。

2.2 液化空气储能技术

液化空气储能技术将电能以低温液态空气的形式储存,其应用的温度区间低于 200℃。英国 Highview Power Storage 公司率先将该技术应用于

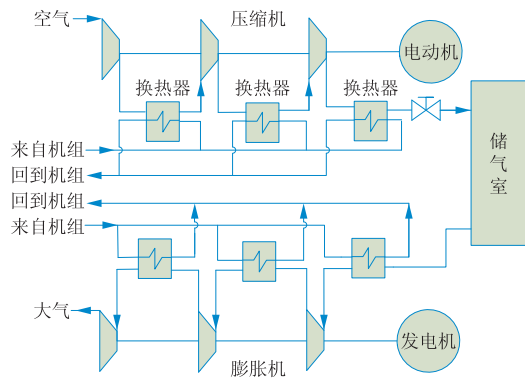


图5 压缩空气储能原理

Fig.5 Principle of compressed air energy storage technology

Slough 工厂^[31],如图6所示。该项技术第1阶段类似于压缩空气储能,区别是需要将压缩空气液化并在接近大气压力的情况下储存在容器中。使用时可以用泵抽取液化空气直接用于制冷;余下的废热可以用来进行膨胀做功产生电能。该技术的优点是液态空气的体积仅为气态空气的1/700,即使是小容器也可以储存大量的液态空气。不足之处是该技术储能效率较低,仅为40.00%~70.00%^[32-33],仍有可以提升和发展的空间。同时,在发电阶段可以利用液化过程回收热量,从而提高效率。

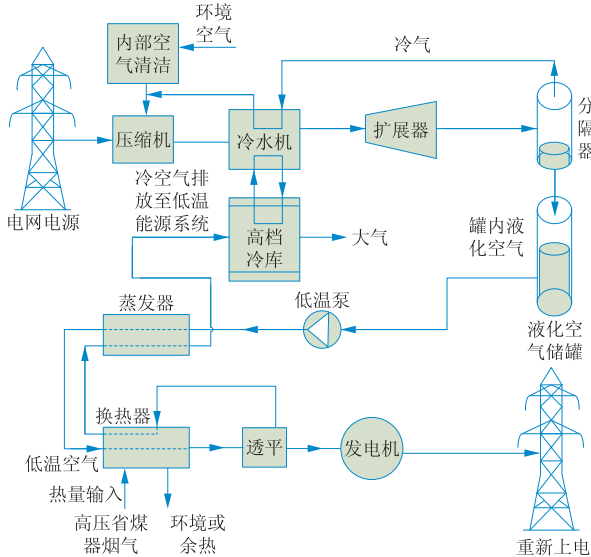


图6 液化空气储能技术原理

Fig.6 Principle of liquefied air energy storage technology

2.3 热能存储

热能存储的工作温度区间为90~200℃,目前有3种应用方式^[34]。

(1)显热储能。该方式一般采用水、岩石等作为储能材料,主要用来储存温度较低($\leq 150^\circ\text{C}$)的热能^[35]。该技术受限于储热材料的热力学性能,储能效率不高,仅适用于采暖。

(2)潜热储能。该方式是利用物质发生固体-

液相变的相变潜热进行储能,因此具有较高的储能容量^[36]。目前用于潜热储存的原介质有氟化物、氯化物、磷酸盐、硫酸盐、亚硝酸盐以及氢氧化物的低共熔混合物。

(3)热化学储能。利用吸热反应储存能量,利用放热反应释放能量^[37-38]。这种系统与潜热储能系统同样具有在恒温下存储、释放能量的优点。热化学储能系统不需要绝缘的储能容器,但其反应装置复杂、精密,必须由经过训练的人员进行仔细维护,只适用于较大型的系统。

3 烟气余热回收耦合储能应用方式

3.1 烟气余热回收系统耦合压缩空气储能技术

压缩空气储能技术有多种应用方式,如图7所示,可结合烟气余热回收系统温度范围进行选择。

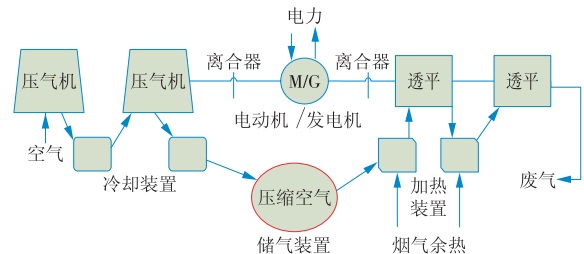
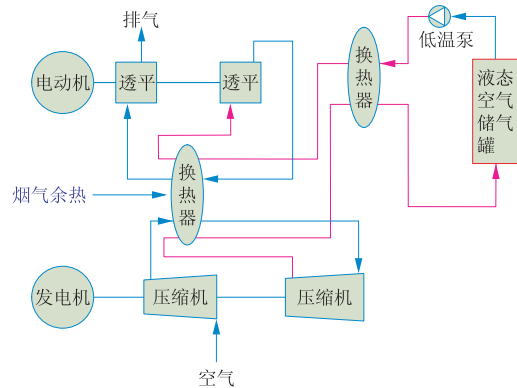
a 德国Huntorf压缩空气储能电站原理
a Principle of Huntorf compressed air energy storage power station in Germanyb 烟气余热回收系统耦合超临界压缩空气储能
b Flue gas waste heat recovery system coupled with supercritical compressed-air energy storage devices

图7 烟气余热回收装置与压缩空气储能的耦合

Fig.7 Coupling of flue gas waste heat recovery devices and compressed air energy storage technologies

例如,德国Huntorf电站是世界上容量最大的压缩空气储能电站,机组压缩机功率60MW,释能输出功率为290MW^[39],具体原理如图7a所示。超临界压缩空气储能也是烟气余热回收利用的备选方案,以中科院工程热物理所在廊坊所建1.5MW示范装置为例,其以超临界压缩空气为介质,循环效率可以达到67.41%^[40]。该系统的蓄冷容量为10GJ,装置容积为60m³,可承受-196℃的低温,装置

承压达到 7 MPa,由此带来造价较高、制造难度大等问题^[41]。而通过如图 7b 所示的烟气余热回收系统与其进行耦合,可以降低对外部热源的需求,进一步解决运行成本高的问题。

3.2 烟气余热回收耦合其他单一储热技术

根据烟气余热回收和低温储能技术的特点,可将二者进行耦合如图 8a 所示。其工作原理是利用电网低谷时段电量驱动压缩机做功,获得低温或液态空气,回收烟气中的热能并驱动透平主机发电。图 8b 和图 8c 分别展示了利用空气预热器和吸收式热泵回收烟气余热的工作原理。空气预热器系统依靠来自汽轮机内的混合凝结水作为储热介质,热泵型烟气余热回收系统主要利用蒸发器内流动的热网低温水为储热介质。

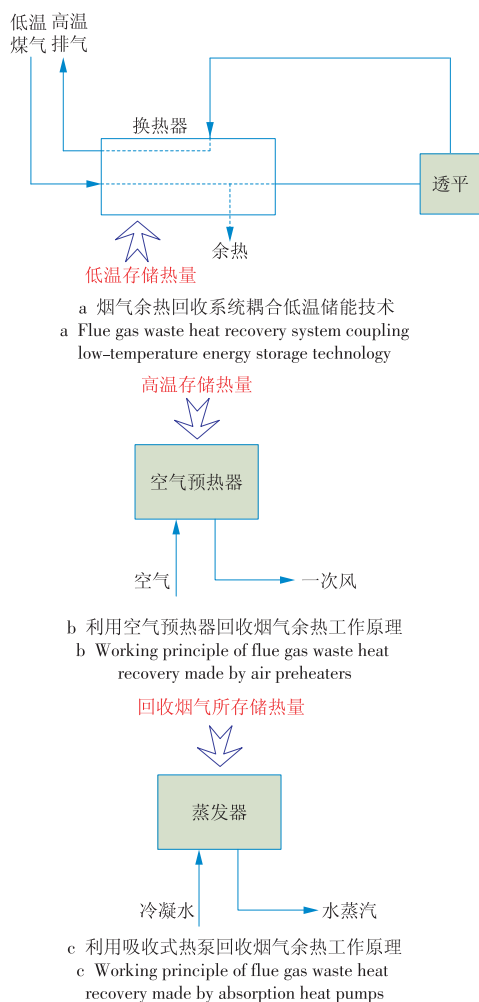


图 8 烟气回收装置与热能存储的 3 种耦合方式

Fig. 8 Three coupling ways of flue gas recovery devices and heat energy storage technologies

4 结论

介绍了 3 种烟气余热回收形式和 3 种储热应用技术,并结合烟气余热回收和储热技术的温度区间特点提出了各种可行的耦合方式。其中,相变储热

材料为烟气余热利用提供了新的发展方向。

从未来发展趋势来看,烟气余热回收与压缩空气储能技术耦合方案最具实际应用意义及发展潜力。该方案保留了现有系统中的大部分设备,在不造成试验装置失效浪费的前提下进行耦合,提高了能源的利用效率,符合国家高效、环保的能源理念。

最后,对不同烟气余热回收技术与热能存储技术的耦合方式进行了可行性分析,阐述了有效可行耦合方式的技术原理,为烟气余热回收技术与热能存储耦合技术开发提供参考。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,财政部,国家能源局,等.关于促进储能技术与产业发展的指导意见[R].2017.
- [2] 周宏春,李长征,周春.碳中和背景下能源发展战略的若干思考[J].中国煤炭,2021,47(5):1-6.
ZHOU Hongchun, LI Changzheng, ZHOU Chun. Some thoughts on energy development strategy under the background of carbon neutrality [J]. China Coal, 2021, 47(5):1-6.
- [3] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等.双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6):21-32.
- [4] RIFFAT S B, ZHAO X, DOHERTY P S. Application of sorption heat recovery systems in heating appliances-feasibility study [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(1):46-55.
- [5] WESTERLUND L, HERMANSSON R, FAGERSTR M J. Flue gas purification and heat recovery: A biomass fired boiler supplied with an open absorption system [J]. Applied Energy, 2012, 96:444-450.
- [6] LAZZARIN R M L, LONGO G A, PICCININNI F. An open cycle absorption heat pump [J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1992, 12(5):391-396.
- [7] WEI M L, YUAN W X, SONG Z J, et al. Simulation of a heat pump system for total heat recovery from flue gas [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86:326-332.
- [8] YE B C, LIU J, XU X G, et al. A new open absorption heat pump for latent heat recovery from moist gas [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 94:438-446.
- [9] SUN G T, LIU Y F, DONG S L, et al. Study on novel molten salt-ceramics composite as energy storage material [J/OL]. The Journal of Energy Storage. (2020-01-31) [2021-06-05]. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101237>.
- [10] PARSIMEHR H, EHSANI A. Corn-based Electrochemical

- Energy Storage Devices [J]. The Chemical Record, 2020, 20(10):1163-1180.
- [11] KOHLER T, MULLER K. Influence of different adsorbates on the efficiency of thermochemical energy storage [J]. Energy Science and Engineering, 2017, 5(1):21-29.
- [12] WANG H R, WANG L Q, WANG X B, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. Energies, 2013, 6(3):1554-1567.
- [13] 白凤臣, 马文姝, 宋海江. 燃气锅炉烟气余热回收潜力及影响因素分析[J]. 工业锅炉, 2019(3):5-9, 13.
BAI Fengchen, MA Wenshu, SONG Haijiang. Recovery potential and influencing factors of flue gas waste heat in gas-fired boilers [J]. Industrial Boilers, 2019(3):5-9, 13.
- [14] HORST T A, TEGETHOFF W, ELITS P, et al. Prediction of dynamic rankine cycle waste heat recovery performance and fuel saving potential in passenger car applications considering interactions with vehicle's energy management [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78:438-451.
- [15] VELEZ F, CHEJNE F, ANTOLIN G, et al. Theoretical analysis of a transcritical power cycle for power generation from waste energy at low temperature heat source [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 60:188-195.
- [16] 陈珣, 徐曙, 杨益, 等. 660 MW 燃煤发电机组烟气余热梯级利用系统性能分析与优化[J]. 热能动力工程, 2021, 36(3):1-12.
CHEN Xun, XU Shu, YANG Yi, et al. Performance analysis and optimization for the flue gas waste heat cascade utilization system of 660 MW coal-fired generating unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021(3):1-12.
- [17] WANG C J, HE B S, SUN S Y, et al. Application of a low pressure economizer for waste heat recovery from the exhaust flue gas in a 600 MW power plant [J]. Energy, 2012, 48(1):196-202.
- [18] STEVANOVIC V D, PETROVIC M M, WALA T, et al. Efficiency and power upgrade at the aged lignite-fired power plant by flue gas waste heat utilization: High pressure versus low pressure economizer installation [J/OL]. Energy (2019-08-21) [2021-06-05]. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115980>.
- [19] XU G, XU C, YANG Y P, et al. A novel flue gas waste heat recovery system for coal-fired ultra-supercritical power plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1-2):240-249.
- [20] YAN M, ZHANG L, SHI Y T, et al. A novel boiler cold-end optimisation system based on bypass flue in coal-fired power plants: Heat recovery from wet flue gas [J]. Energy, 2018, 152:84-94.
- [21] YANG Y P, XU C, XU G, et al. A new conceptual cold-end design of boilers for coal-fired power plants with waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89:137-146.
- [22] LIU J Y, GONG X Y, ZHANG W H, et al. Experimental study on a flue gas waste heat cascade recovery system under variable working conditions [J]. Energies. (2020-01-09) [2021-06-05]. <https://doi.org/10.3390/en13020324>.
- [23] LIU J Y, SUN F Z. Experimental study on operation regulation of a coupled high-low energy flue gas waste heat recovery system based on exhaust gas temperature control [J/OL]. Energies (2019-08-21) [2021-06-05]. <https://doi.org/10.3390/en12040706>.
- [24] 肖卓楠, 高文彬, 王金波, 等. 电厂烟风系统不同形式余热利用的经济性分析[J]. 锅炉技术, 2020, 51(2):57-63.
XIAO Zhuonan, GAO Wenbin, WANG Jinbo, et al. Economic analysis of waste heat utilization in air-flue gas system [J]. Boiler Technology, 2020, 51(2):57-63.
- [25] 江婷, 徐静静, 马琴, 等. 分布式能源系统低温烟气余热利用经济性分析[J]. 华电技术, 2019, 41(5):46-49.
JIANG Ting, XU Jingjing, MA Qin, et al. Economic analysis of low temperature flue gas waste heat utilization in distributed energy system [J]. Huadian Technology, 2019, 41(5):46-49.
- [26] 王明爽. 直彭式热泵型烟气余热回收系统试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学. 2019.
- [27] AKHIL A A, HUFF G, CURRIER A B. et al. DOE/EPRI electricity storage handbook in collaboration with NRECA [EB/OL]. (2015-02-01) [2021-06-05]. <https://doi.org/10.2172/1170618>.
- [28] KOUKSOU T, BRUEL P, JAMIL A, et al. Energy storage: Application and challenges [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 120:59-80.
- [29] 李斌, 陈吉玲, 李晨昕, 等. 压缩空气储能系统与火电机组的耦合方案研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(3):244-250.
LI Bin, CHEN Jiling, LI Chenxin, et al. Research on coupling scheme of a compressed air energy storage system and thermal power unit [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3):244-250.
- [30] 魏书洲, 李兵发, 孙晨阳, 等. 压缩空气储能技术及其耦合发电机组研究进展[J]. 华电技术, 2021, 43(7):9-16.
WEI Shuzhou, LI Bingfa, SUN Chenyang, et al. Research progress of compressed air energy storage and its coupling power generation [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7):9-16.
- [31] STRAHAN D. Liquid air technologies: A guide to potential [M]. UK: Liquid Air Energy Network, 2013.
- [32] ANEKE M, WANG M. Process analysis of pressurized oxy-coal power cycle for carbon capture application integrated with liquid air power generation and binary

- cycle engines [J]. Applied Energy, 2015, 154: 556–566.
- [33] ZACH K, AUER H, LETTNER G. Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy [DB/OL]. (2013-02-20) [2021-06-05]. <https://www.store-project.eu/uploads/docs/presentation-at-eurelectric-hydro-wg-by-thomas-maidonis.pdf>.
- [34] REDMAN C. Liquid air energy storage [EB/OL]. (2015-05-23) [2021-06-05]. <https://energyvulture.com/2015/05/23/liquid-air-energy-storage>.
- [35] TOMLINSON J J, KANNBERG L D, 施国威. 热能储存 [J]. 世界科学, 1991, 12: 34–36.
- [36] CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2008, 19(3): 291–312.
- [37] 李毅妮, 王韶旭, 张施慧. 二十烷@二氧化硅复合相变储能材料的热化学性能 [J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(S1): 161–165.
- LI Yini, WANG Shaoxu, ZHANG Shihui. Thermal properties of n-eicosane@ silicon dioxide composites as phase change materials for heat energy storage [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2014, 35(S1): 161–165.
- [38] 李进, 王峰, 张世广, 等. 四元硝酸盐/MCM41 多孔复合蓄热材料的制备及稳定性研究 [J]. 华电技术, 2020, 42(4): 17–22.
- LI Jin, WANG Feng, ZHANG Shiguang, et al. Study on preparation for quaternary nitrates/MCM41 porous composite heat-storage material and its stability [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 17–22.
- [39] NAKHAMKIN M, WOLK R, LINDEN S, et al. New compressed air energy storage concept improves the profitability of existing simple cycle, cycle combined, wind energy, and landfill gas power plants [C]//ASME Conference. Vienna, 2004: 103–110.
- [40] GUO H, XU Y J, CHEN H S, et al. Thermodynamic characteristics of a novel supercritical compressed air energy storage system [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 115: 167–177.
- [41] 刘佳. 超临界空气蓄热蓄冷数值与试验研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012.
- (本文责编: 惠忻)

作者简介:

郭璞维(1980—), 男, 内蒙古达拉特旗人, 工程师, 从事燃煤机组烟气余热利用方案设计与研究工作。

彭跃(1995—), 男, 内蒙古通辽人, 在读硕士研究生, 从事循环流化床锅炉换热器设计与研究工作。

邓靖敏(2000—), 女, 广东佛山人, 从事压缩空气储能运行优化方面的研究工作。

李兵发(2000—), 男, 河北邯郸人, 从事压缩空气储能运行优化方面的研究工作。

周兴(1987—), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 从事煤、生物质制氢技术方面的研究工作。

胡鋈(2002—), 男, 浙江杭州人, 从事耦合储能装置变工况方面的研究工作。

郭海强(2001—), 男, 河北邢台人, 从事烟气余热回收利用方面的研究工作。

王金星*(1985—), 男, 河北唐山人, 讲师, 博士, 从事燃煤热电联产机组灵活性改造及储热优化设计方面的研究工作 (E-mail: wangruoguang860928@126.com)。