

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304048

燃煤锅炉耦合垃圾发电试验研究

张 勇, 王晓娜, 杜永斌, 孙伟晋, 张一坤, 杨天亮
(烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东 烟台 264006)

[摘 要] 为解决现阶段常规垃圾焚烧电站污染物排放高、能量利用率低、初始投资成本高等问题, 结合燃煤电站机组绿色转型发展需求, 提出了燃煤锅炉耦合垃圾发电技术思路, 搭建了 30 t/d 燃煤锅炉耦合垃圾发电中试试验系统, 采用热风、烟气及汽水 3 种耦合方式实现了垃圾在大型燃煤锅炉上的高效清洁处置, 并针对系统运行对燃煤锅炉效率、污染物排放的影响以及垃圾处理能量利用效率进行了分析研究。研究表明: 3 种耦合方式对于实现垃圾的高效、清洁燃烧是完全可行的; 热风耦合可提高垃圾焚烧处置效果, 降低飞灰及大渣含碳量; 烟气耦合能够保证常规污染物 SO_2 、 NO_x 及粉尘达到燃煤电站机组排放水平, 且不会增加锅炉机组二噁英排放; 汽水耦合能够提高垃圾焚烧能量利用效率。该技术的提出为我国垃圾等有机固废的处置提供了新的技术路线, 具有广泛的应用前景。

[关 键 词] 燃煤电站; 垃圾处理; 耦合发电; 污染物排放; 能量利用效率

[引用本文格式] 张勇, 王晓娜, 杜永斌, 等. 燃煤锅炉耦合垃圾发电试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 167-173. ZHANG Yong, WANG Xiaona, DU Yongbin, et al. Experimental research on power generation technology of coal-fired power station coupled with waste[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 167-173.

Experimental research on power generation technology of coal-fired power station coupled with waste

ZHANG Yong, WANG Xiaona, DU Yongbin, SUN Weijin, ZHANG Yikun, YANG Tianliang
(Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: In order to solve the problems of high pollutant emission mass concentration, low energy utilization rate and high initial investment cost of conventional waste disposal power station, combined with the green transformation development needs of coal-fired power station. This paper proposes the technical ideas of coal-fired boiler station coupled with waste. A 30 t/d coal-fired boiler station coupled waste was built to analyze and study the impact of system operation on the efficiency of coal-fired power station, pollutant emissions and energy efficiency of waste disposal. And this paper uses three coupling methods of hot air, flue gas and steam water to achieve efficient and clean disposal waste on large coal-fired power station. The results show the three coupling methods are completely feasible to achieve efficient and clean disposal waste. The coupling of hot air can improve the effect of disposal waste and reduce the carbon content of fly ash and slag; the coupling of flue gas can ensure conventional pollutants such as SO_2 , NO_x and dust reach the emission level of coal-fired power station without increasing the emission of dioxins. The coupling of steam water can improve the energy efficiency of disposal waste. This technology provides new technical ideas for the disposal of organic solid waste and has a broad application prospect.

Key words: coal-fired power station; waste disposal; coupled power generation; pollutant emissions; energy utilization efficiency

随着国民经济的迅速发展, 城市生活垃圾日产量迅速增加^[1]。如何合理地处理城市生活垃圾成为人们关注的问题^[2-3]。垃圾处理方法主要有填埋和焚烧等^[4]。垃圾填埋方法简单易行、应用最为广泛, 但有可能造成二次污染, 且处理能力有限, 人口

密度大的地区采用填埋处理方式已遇到瓶颈^[5]。垃圾焚烧方式能够实现垃圾的无害化处理和资源化利用, 且减量效果明显, 与其他技术相比具有明显优势^[6]。

目前, 垃圾的焚烧处理比例逐年提高, 技术路

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY-20-196)

Supported by: Science and Technology Project of China Energy Group Co., Ltd. (GJNY-20-196)

第一作者简介: 张勇 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为有机固废综合利用及电站机组节能技术开发, zhangyuck@163.com。

线也日渐趋于成熟，成为我国生活垃圾处理的主要途径^[7]。但现阶段常规垃圾焚烧技术存在能量利用效率低、污染物排放高及投资成本高等问题。

为解决上述问题，本文提出了一种燃煤锅炉耦合垃圾发电技术思路，在现有燃煤电站机组基础上，增设垃圾焚烧处置系统^[8-9]，并通过与燃煤锅炉之间相互联通的工质与能量进行联通耦合^[10-11]。

关于燃煤耦合垃圾发电技术的研究，很多学者探究了不同垃圾与燃煤电站机组耦合系统^[12-14]，着重分析了耦合发电对燃煤机组运行安全性、环保特性、碳排放、系统经济性的影响、积灰结渣情况和污染物释放特性^[15-17]及如何提高垃圾焚烧发电效率^[18-25]。

邓庚庚等^[26]通过燃煤电站机组与垃圾发电系统相互集成，可有效减少燃煤机组供热抽汽和垃圾发电机组的冷端损失，从而提高系统整体效率。王学斌等^[27]提出了一种新的生活垃圾热解耦合燃煤电厂协同处置的工艺路线，并结合现场实验数据，经过测试表明二噁英含量在掺烧前后没有显著的变化，且远低于地方排放标准。

此外，许多学者对如何提高垃圾焚烧发电效率进行研究，表明常规垃圾焚烧发电机组的发电效率远远低于大型燃煤发电机组的发电效率，其主要原因在于机组容量小、蒸汽参数低、回热循环不完善等^[28]。张美妍等^[12]为提高生活垃圾焚烧机组的发电效率，提出 2 种与燃煤发电机组耦合的新型垃圾焚烧发电系统进行汽水侧耦合，并通过模拟分析得出垃圾焚烧发电效率分别提高 8.02% 和 10.17%。

为验证燃煤电站机组与垃圾处理系统相互耦合的可行性，搭建了 30 t/d 燃煤锅炉耦合垃圾发电中试试验系统，采用热风、烟气及汽水 3 种耦合方式实现了垃圾在大型燃煤锅炉上的高效清洁处置，并针对系统运行对燃煤锅炉效率、污染物排放的影响以及垃圾处理能量利用效率进行了分析研究。

1 燃煤电站耦合垃圾发电技术

燃煤电站耦合垃圾发电系统如图 1 所示。左侧垃圾处理系统为新增垃圾处理系统，右侧为耦合锅炉，即原锅炉系统。垃圾处理系统主要由垃圾料仓、上料系统、垃圾焚烧（回转窑）系统、出渣系统及二次燃烧系统 5 部分组成。系统中 3 种耦合方式如图 1 所示，通过垃圾处理系统与燃煤电站锅炉间工质、能量的传递，充分发挥耦合系统的优势。

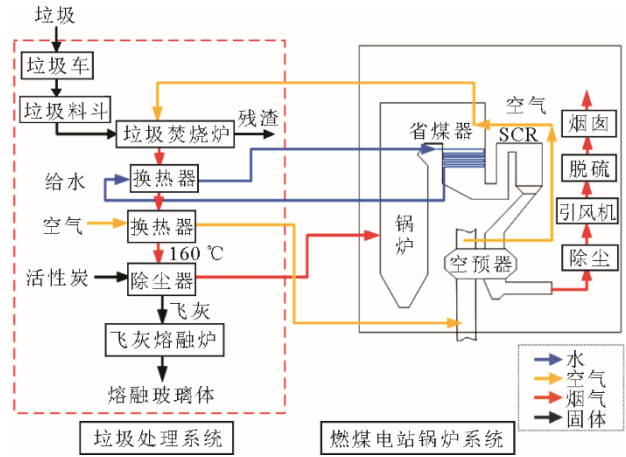


图 1 燃煤机组耦合垃圾发电系统
Fig.1 Coal-fired boiler coupled with waste power generation system

1.1 燃煤电站耦合垃圾发电方式

本文通过热风耦合、烟气耦合和汽水耦合 3 种方式来实现垃圾处理与燃煤电站锅炉系统的相互耦合，3 种耦合路线每种均可单独采用，以结合现场情况达到最优的技术效果。

1.1.1 热风耦合

为提高垃圾焚烧效果，提高焚烧温度，以降低垃圾焚烧后飞灰、大渣含碳量并充分利用垃圾能量，本文提出热风耦合系统，即通过锅炉与垃圾处理系统之间热风介质进行能量与物质传递。热风耦合主要分为 2 种方式：

1) 将锅炉热一次风通过管道输送至焚烧炉入口作为助燃空气参与垃圾焚烧。为进一步提高垃圾的处置效果，还可在锅炉转向室位置增设气气换热器，将一次风温进一步提高至 600 °C 左右，气气换热器布置如图 2 所示。采用此种热风耦合方式可梯级利用锅炉烟气能量，提高垃圾焚烧处置效果；

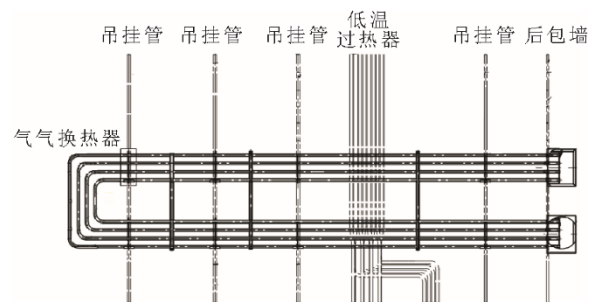


图 2 气气换热器布置示意
Fig.2 Layout of gas-gas heat exchanger

2) 通过垃圾焚烧炉后布置的空预器将冷空气加热后通过管道输送至锅炉空预器入口，与空预器

入口一/二次风混合,提高进入锅炉空预器的一/二次风温。采用此热风耦合方式可提高空预器入口一/二次风温,对减缓空预器腐蚀和堵塞有一定的促进作用,起到暖风器等设备的作用。

1.1.2 烟气耦合

为降低系统投资、充分利用燃煤电站机组优势及降低污染物排放,烟气耦合系统将垃圾焚烧产生的烟气通过烟气风机增压后输送至燃煤锅炉。

通过烟气耦合,垃圾焚烧系统产生的常规污染物,如 NO_x 、 SO_2 及粉尘等可通过燃煤电站锅炉系统布置的 SCR、脱硫及除尘系统除去。针对二噁英类特殊污染物在炉内高温环境下可被瞬间摧毁,且在炉内低氧、高硫烟气氛下,二噁英类污染物的再生也会受到抑制,在上述 2 种效果的作用下进一步降低了二噁英排放。

1.1.3 汽水耦合

为充分利用大型燃煤电站机组高参数工质提高能量利用效率,汽水耦合通过垃圾焚烧炉与燃煤电站锅炉汽水系统的相互连接,将部分电站锅炉系统给水通过管道输送至垃圾焚烧炉,经焚烧炉后布置的换热器吸热升温后再通过管道输送至锅炉。

1.2 技术先进性分析

通过上述 3 种耦合方式可实现如下优势:

1) 将垃圾处理与燃煤电站相互耦合,可以充分利用燃煤电站充足的热量和能源,如高温烟气、高温热风、高温蒸汽等,这些热量在燃煤电站中可以足量、便捷的获得,高温热源可以增加垃圾的处理效果,实现垃圾高效减量处置;

2) 垃圾处理基于大型燃煤电站锅炉进行资源化利用时,可以通过燃煤电站机组高效的污染物处理系统,不但可以减少垃圾处理系统投资,还可以大大提高污染物的处理效果,减少污染物排放,实现垃圾的清洁处理;

3) 大型燃煤电站具有较高的蒸汽参数,系统耦合后,可借助高参数蒸汽优势提高垃圾能量利用效率,提高系统运行经济性;

4) 垃圾具有一定热值时,燃煤电站系统吸收垃圾热量后,其总燃料消耗量将有一定的减少,有助于减少燃煤电站煤炭消耗,降低机组年煤炭消耗总量,同时垃圾不属于化石燃料,其焚烧产生的 CO_2 不计入电厂 CO_2 排放指标,有助于燃煤电站机组减碳;

5) 大型燃煤电站锅炉,有着较强环保责任意识,

大部分的灰渣、石膏均与建材公司合作,部分先进企业实现了垃圾 100%综合利用,实现了污染物零排放,通过燃煤电站锅炉处理,可以实现垃圾零排放。

因系统涉及高压给水系统及需要与锅炉烟风系统进行耦合连锁,其主要缺点为:1) 系统较为复杂,尤其是需要将 3 种耦合路线全部投入使用时;2) 与锅炉高压给水系统连接,水及蒸汽侧系统压力高,换热器受热面材质要求较高;3) 需与锅炉系统建立连锁控制逻辑,保证系统启停过程不对锅炉造成影响,系统控制需要较高的操作水平。

综上所述,虽然燃煤电站耦合垃圾发电系统在后续工程建设过程中较为复杂,但其实现难度并不算高,且其带来的优势是无可比拟的。

1.3 燃煤电站耦合垃圾发电中试试验系统

为验证项目技术路线的可行性,在海南某电厂搭建超临界 350 MW 燃煤机组耦合处置 30 t/d 垃圾发电技术中试试验系统,并进行试验研究。中试试验系统如图 3 所示。



图 3 燃煤电站耦合垃圾发电中试试验系统
Fig.3 Coal-fired power plant coupling waste power generation pilot test system

中试试验系统按照图 1 所示系统搭建,试验系统设计参数见表 1。垃圾经垃圾车运输至厂区后,经垃圾料斗送至回转窑。垃圾料斗主要用来储存由垃圾车运输来的生活垃圾,并与回转窑连接,将垃圾输送至回转窑内。热风取自热一次风,后引入锅炉转向室内换热器加热,再通入回转窑。

流出回转窑的烟气在经过 2 次换热后进入布袋除尘,除尘后的烟气再进入锅炉系统,随锅炉烟气进入烟气净化系统,经处理达标后排放。烟气流程中第 1 换热是气水换热器,水源取自锅炉给水,经加热后返回省煤器出口集箱;烟气流程中第 2 换热是气气换热器,换热后的空气进入机组锅炉冷二次风。

表1 燃煤机组耦合垃圾发电试验系统设计参数
Tab.1 Coal-fired boiler coupled with waste power generation system parameters

序号	项目	数值	备注
1	耦合机组容量/MW	350	
2	垃圾处理量/(t·d ⁻¹)	30	
3	热一次风风温/℃	330	
4	炉内气换热器 出口温度/℃	600	
5	高压给水温度/℃	290.4	
6	高压给水压力/MPa	29	
7	污染物排放指标/ (mg·m ⁻³) ^①	SO ₂	10
8		NO _x	10
9		粉尘	1

①标准状态，下同。

垃圾处理后的无害残渣直接由除渣装置收集。引自锅炉的高压给水进入换热器，吸热后返回省煤器出口，将焚烧产生的大部分热量通过锅炉给水被机组利用。

2 燃煤电站耦合垃圾发电试验研究

本文提出3种垃圾耦合技术路线，并验证了每种技术路线的可行性及带来的技术优势，进行了中试试验研究，同时采用垃圾适应性较好的回转窑作为垃圾焚烧炉。但因本试验系统垃圾焚烧量较低，

为保证试验能够顺利进行，采用热值较高的干垃圾进行。生活垃圾及原煤成分分析见表2。

表2 燃煤电站耦合垃圾发电系统垃圾及原煤成分分析
Tab.2 Waste and raw coal composition analysis of coal-fired boiler coupled with waste power generation system

项目	垃圾	原煤
收到基水分/%	15.65	11.80
收到基灰分/%	12.23	19.33
收到基挥发分/%	58.71	26.09
收到基固定碳/%	13.41	48.5
收到基碳/%	46.70	54.02
收到基氢/%	5.87	3.14
收到基硫/%	0.07	0.30
收到基氮/%	0.41	0.91
收到基氧/%	19.07	10.5
低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	15.25	20.71

2.1 热风耦合系统验证

图4为热风耦合系统试验运行画面。通过锅炉炉内气换热器将部分锅炉一次风加热，为垃圾处理系统提供能量及空气。在中高负荷工况下，通过调节热一次风至换热器调节阀和旁路阀门，可以控制热一次风温度超过500℃。试验过程系统可输出的最高热风温度达到594℃。由试验结果可见，热风耦合系统满足设计要求，达到了预期效果。

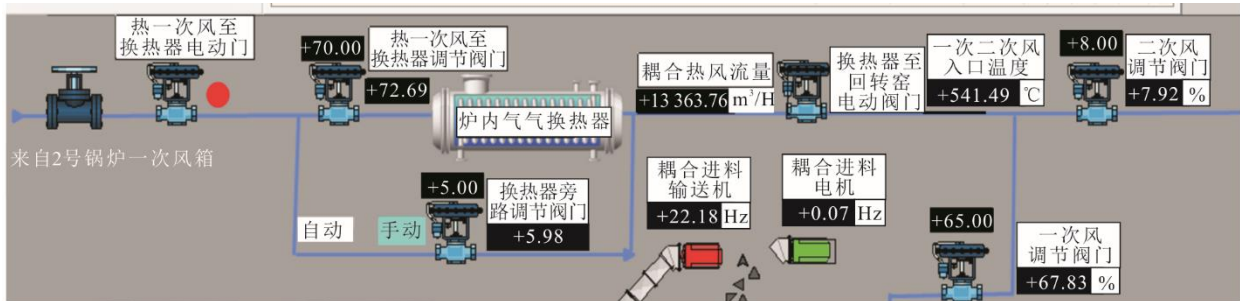


图4 热风耦合系统试验运行画面
Fig.4 Hot air coupling system operation

在热风耦合作用下，垃圾在回转窑内剧烈焚烧，回转窑内温度升高，投运期间垃圾飞灰、大渣中碳质量分数分别为2.19%、3.03%，垃圾的燃尽性较好，完全满足垃圾处理要求。

2.2 汽水耦合系统验证

回转窑内垃圾稳定燃烧，二燃室烟气温度达到500℃以上后，逐步开大高压给水管道上进水调节阀，增加高压给水流量。高压给水依次经过耦合系统省煤器、辐射烟冷室等换热设备，将垃圾燃烧后部分热量输入锅炉，汽水耦合系统试验运行画面如图5所示。

在不同工况下，受锅炉负荷影响，高压给水进水温度有所不同，具体见表3。

但经过汽水耦合系统换热后，高压给水流量50 t/h左右时，温升可达到40℃左右。由试验结果可见，汽水耦合系统满足设计要求，达到了预期效果。

2.3 烟气耦合系统验证

分别对垃圾处理系统投运与退出不同工况下锅炉性能进行试验，主要评判不同系统运行期间对锅炉效率、常规(SO₂、NO_x、粉尘)及特殊污染物(二噁英)排放的影响，试验结果见表4。

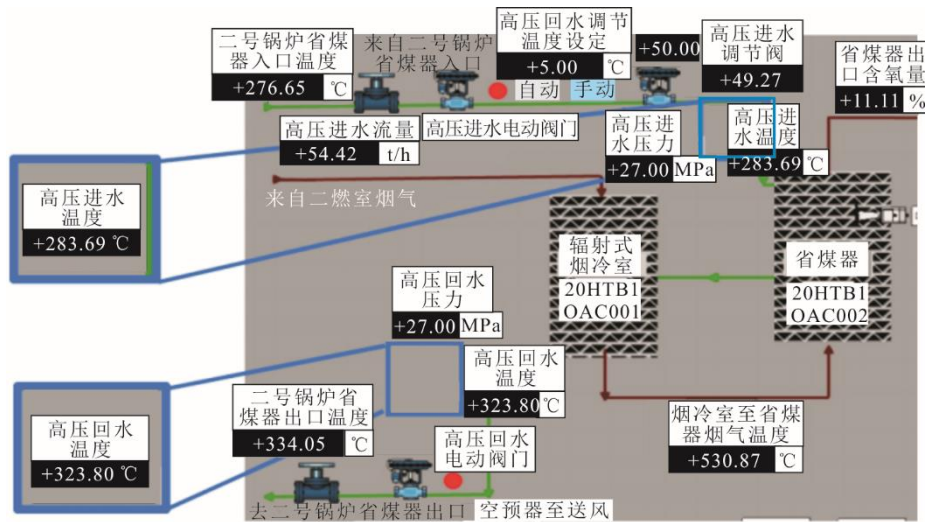


图 5 汽水耦合系统试验运行画面
Fig.5 Steam-water coupling system operation

表 3 高压给水系统运行参数
Tab.3 Operation parameters of water supply system

项目	工况数值	
	274 MW	336 MW
高压给水流量/(t·h ⁻¹)	52.72	54.42
高压进水温度/°C	245	282
高压出水温度/°C	287	318
高压给水温升/°C	42	36

表 4 锅炉性能试验结果
Tab.4 Boiler performance test results

项目	耦合系统投运 耦合系统退出	
	机组负荷/MW	350
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 119	1 121
试验基准温度/°C	25	25
实测排烟温度/°C	110.03	111.53
空预器出口氧量/%	5.30	4.87
飞灰含碳量/%	0.27	0.28
炉渣含碳量/%	0.04	0.01
排烟热损失/%	4.29	4.26
化学未燃尽热损失/%	0.08	0.08
机械未燃尽热损失/%	0.08	0.08
散热损失/%	0.18	0.18
灰渣热物理损失/%	0.14	0.14
其他热损失/%	0.30	0.30
试验锅炉效率/%	94.93	94.96
总排口 NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)	5.05	11.72
总排口 SO ₂ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	5.07	2.20
总排口 粉尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	0.59	0.82
回转窑出口二噁英质量浓度/(ng·m ⁻³)	0.015	
总排口二噁英质量浓度/(ng·m ⁻³)	0.053	0.041

垃圾处理系统投运与退出工况下，飞灰、大渣含碳量均较低、排烟温度未出现明显变化。经第三方测试，垃圾处理系统投运工况下，锅炉平均热效率为 94.93%，垃圾处理系统退出工况下锅炉平均效率为 94.96%，因本中试试验系统垃圾处理量较低，占锅炉总热量的不足 1%，垃圾处理系统投运与否对锅炉效率影响较小。

在锅炉烟囱处取样检测的总排口，NO_x、SO₂、粉尘的质量浓度在垃圾处理系统运行与退出工况分别为 5.05、5.07、0.59 mg/m³ 及 11.72、2.20、0.82 mg/m³，垃圾处理系统运行时常规污染物排放浓度满足近零排放要求。垃圾处理系统运行与否不会对常规污染物排放造成影响。

针对特殊污染物排放，经第三方测试，垃圾处理系统投运时回转窑出口二噁英质量浓度 0.015 ng/m³，烟囱处总排口二噁英质量浓度 0.053 ng/m³，垃圾耦合处置系统退出时烟囱处总排口二噁英质量浓度为 0.041 ng/m³，总排口二噁英排放浓度变化不大。从上述数据可以看出，本次试验过程中垃圾焚烧回转窑出口二噁英浓度要低于烟囱处总排口二噁英浓度，不会对锅炉二噁英的排放造成影响。

2.4 垃圾处理能量利用效率

2.4.1 耦合系统能量利用率计算方法

耦合系统热效率的计算按照《工业锅炉热工性能试验规程》(GB/T 10180—2017) 采用正平衡法进行计算。

$$\eta_t = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \quad (1)$$

式中： Q_{out} 为输出系统边界的有效利用热量，包含高压循环水带走热量、系统排烟带走热量、一次风带走热量； Q_{in} 为耦合系统的输入热量，包含输入系统燃料燃烧释放热量、进入耦合系统高温一次风所带热量。

耦合系统中的有效利用热量先被锅炉利用后再通过汽轮机做功进行发电，因此耦合发电系统能量利用率=耦合系统热效率×锅炉热效率×管道效率×汽轮机热效率。其中，管道效率取设计值 99%，汽轮机热效率取设计值 45%。

2.4.2 试验结果分析

在系统稳定运行条件下，对锅炉在高负荷及中负荷工况下能量利用率进行了试验，期间生活垃圾平均处理量 1.3 t/h，折合 31.2 t/d，试验结果见表 5。

表 5 耦合系统性能试验结果
Tab.5 Performance test results of coupled system

项目	数值
机组负荷/MW	340
高温热一次风流量/(m ³ ·h ⁻¹)	13 364
高温热一次风温度/℃	541
高温热一次风输入热量/(kJ·kg ⁻¹)	2 460
高压给水流量/(t·h ⁻¹)	54.42
高压进水温度/℃	282
高压出水温度/℃	318
高压给水带走热量/(kJ·kg ⁻¹)	7 744
排烟温度/℃	257
烟气量/(m ³ ·kg ⁻¹)	12.48
排烟热量/(kJ·kg ⁻¹)	6 300
送风温度/℃	81
送风流量/(m ³ ·h ⁻¹)	5 046
送风输出热量/(kJ·kg ⁻¹)	320
耦合系统有效利用热量/(kJ·kg ⁻¹)	14 364
生活垃圾平均处理量/(t·h ⁻¹)	1.30
飞灰含碳量/%	2.19
炉渣含碳量/%	3.03
耦合系统输入热量/(kJ·kg ⁻¹)	17 847
耦合系统热效率/%	81.11
耦合系统能量利用率/%	32.76

垃圾处理发电系统运行期间，高压给水为 54.42 t/h 时，可将给水从 282 ℃提升到 318 ℃。经测试该工况下耦合发电系统能量利用率为 32.76%，较常规垃圾焚烧电站 22% 的能量利用率提高幅度超过 48%。

3 结 论

本文提出燃煤锅炉耦合垃圾发电技术思路，分

析了 3 种耦合技术路线对垃圾高效、清洁处置，降低污染物排放，提高垃圾能量利用率方面的作用，并依托超临界 350 MW 燃煤电站机组搭建了 30 t/d 燃煤锅炉耦合垃圾发电中试试验系统，验证了汽水耦合系统、热风耦合系统及烟气耦合系统实现垃圾处理系统与锅炉系统能量输送及利用技术路线的可行性，为垃圾处理提供了新的路线。

对垃圾处理系统运行过程中垃圾处理效果、燃煤锅炉效率、污染物排放的变化以及垃圾处理能量利用效率分析研究表明，燃煤锅炉耦合垃圾发电技术可提高垃圾处理效果，降低垃圾处置过程中常规污染物排放质量浓度，提高垃圾能量利用效率，且不会对锅炉二噁英排放造成影响。

[参 考 文 献]

- [1] KHANDELWAL H, DHAR H, THALLA A K, et al. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: a worldwide critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 630-654.
- [2] FEI Fan, WEN Zongguo, HUANG Shengbiao, et al. Mechanical biological treatment of municipal solid waste: energy efficiency, environmental impact and economic feasibility analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 731-739.
- [3] CERVANTES DE T, MARTÍNEZ A L, HERNÁNDEZ M C, et al. Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: a critical review[J]. Waste Management, 2018, 80: 51-63.
- [4] 邵旭萍. 城市生活垃圾处理、处置和利用技术分析[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(9): 99-101.
TAI Xuping. Technical analysis of municipal solid waste treatment, disposal and utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(9): 99-101.
- [5] HE Jiaxin, LIN Boqiang. Assessment of waste incineration power with considerations of subsidies and emissions in China[J]. Energy Policy, 2019(126): 190-199.
- [6] 李文瀚, 马增益, 杨恩权, 等. 循环流化床垃圾焚烧系统电除尘飞灰和布袋飞灰特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1397-1405.
LI Wenhan, MA Zengyi, YANG Enquan, et al. Characteristics of electrostatic precipitator ash and bag filter ash from a circulating fluidized bed municipal solid waste incinerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1397-1405.
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 120.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China statistics Press, 2020: 120.
- [8] 杜永斌, 杨天亮, 付玉玲, 等. 一种焚烧处理系统及方法: CN108036324A[P]. 2018-05-15[2023-04-05].
DU Yongbin, YANG Tianliang, FU Yuling, et al. The invention relates to an incineration treatment system and method: CN108036324A[P]. 2018-05-15[2023-04-05].
- [9] 张勇, 赵俊伟, 张云龙, 等. 一种垃圾处理与发电机组耦合发电系统: CN111895424A[P]. 2020-11-06[2023-04-05].

- ZHANG Yong, ZHAO Junwei, ZHANG Yunlong, et al. The utility model relates to a garbage disposal and generator set coupling power generation system: CN111895424A[P]. 2020-11-06[2023-04-05].
- [10] 张勇, 孙贻超, 张恒, 等. 废弃物处理与电站机组协同耦合发电系统: CN113154399A[P]. 2021-07-23[2023-04-05].
- ZHANG Yong, SUN Yichao, ZHANG Heng, et al. Collaborative coupling power generation system of waste treatment and power plant unit: CN113154399A[P]. 2021-07-23[2023-04-05].
- [11] 颜雪芬, 薛少洋, 赵钰琳, 等. 燃煤机组耦合固废焚烧关键技术研究进展[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 39-47.
- YAN Xuefen, XUE Shaoyang, ZHAO Yulin, et al. Research progress on key technologies for coupled combustion of coal and solid waste in coal-fired unit[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 39-47.
- [12] 张美妍, 彭维珂, 陈衡, 等. 燃煤发电与垃圾发电耦合系统的性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8067-8077.
- ZHANG Meiyang, PENG Weike, CHEN Heng, et al. Performance analysis of new waste-to-energy plant incorporated with coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8067-8077.
- [13] 刘晶晶, 吴奇, 李倦生, 等. 生活垃圾与煤混合燃烧特性及动力学分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 915-921.
- LIU Jingjing, WU Qi, LI Juansheng, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of living garbage and coal blends[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 915-921.
- [14] MUTHURAMAN M, NAMIOKA T, YOSHIKAWA K. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(7): 2477-2482.
- [15] 王一坤, 贾兆鹏, 魏星, 等. 燃煤电站耦合生活垃圾发电技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 83-92.
- WANG Yikun, JIA Zhaopeng, WEI Xing, et al. Study on power generation technology of coal-fired power station coupled with domestic waste[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 83-92.
- [16] 张晴, 莫华, 徐海红, 等. 燃煤电厂掺烧废弃物现状及环境管理建议[J]. 环境工程, 2020, 38(6): 202-207.
- ZHANG Qing, MO Hua, XU Haihong, et al. Present situation of cocombustion of waste and coal in power plants and suggestions on environmental management[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(6): 202-207.
- [17] 张焕亨. 垃圾焚烧电厂超低排放烟气处理技术应用研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52(3): 76-80.
- ZHANG Huanheng. The application of ultra-low emission of flue gas in waste incineration power generation[J]. Boiler Technology, 2021, 52(3): 76-80.
- [18] 官贞珍, 潘卫国, 郭瑞堂, 等. 国内外燃煤电厂二噁英排放及控制[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(5): 423-429.
- GUAN Zhenzhen, PAN Weiguo, GUO Ruitang, et al. PCDD/Fs emissions and control in coal-fired power plants at home and abroad[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(5): 423-429.
- [19] MARTIN J J E, KORALEWSKA R, WOHLLEBEN A. Advanced solutions in combustion-based WtE technologies[J]. Waste Management, 2015, 37: 147-156.
- [20] STROBEL R, WALDNER M H, GABLINGER H. Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste plant[J]. Waste Management, 2018(73): 301-306.
- [21] HULGAARD T, MSC I S. Integrating waste-to-energy in Copenhagen, Denmark[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 2018, 171(5): 3-10.
- [22] BEHZADI A, GHOLAMIAN E, HOUSHFAR E, et al. Multi-objective optimization and exergo-economic analysis of waste heat recovery from Tehran's waste-to-energy plant integrated with an ORC unit[J]. Energy, 2018(160): 1055-1068.
- [23] CONSONNI S, SILVA P. Off-design performance of integrated waste-to-energy, combined cycle plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(4): 712-721.
- [24] MENDECKA B, LOMBARDI L, GŁADYSZ P, et al. Exergo-ecological assessment of waste to energy plants supported by solar energy[J]. Energies, 2018, 11(4): 773.
- [25] POMA C, VERDA V, CONSONNI S. Design and performance evaluation of a waste-to-energy plant integrated with a combined cycle[J]. Energy, 2010, 35(2): 786-793.
- [26] 邓庚庚, 薛小军, 徐钢, 等. 燃煤发电与垃圾发电耦合供热系统性能分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(11): 30-36.
- DENG Gengeng, XUE Xiaojun, XU Gang, et al. Performance analysis of coupling heating system for coal-fired power generation and waste-to-energy power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11): 30-36.
- [27] 王学斌, 周澳, 杨明辉, 等. 燃煤电厂 200 t/d 生活垃圾无氧热解耦合协同处置优化[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3897-3905.
- WANG Xuebin, ZHOU Ao, YANG Minghui, et al. Optimization on 200 t/d garbage co-utilization in a coal-fired power plant through air-free pyrolysis process[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3897-3905.
- [28] LOMBARDI L, CARNEVALE E, CORTI A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste[J]. Waste Management, 2015, 37: 26-44.

(责任编辑 邓玲惠)