# 燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的全流程模拟与评估分析

### 张利娟,张 睿,刘 冬

(南京理工大学能源与动力工程学院,江苏南京 210094)

摘 要:传统的垃圾焚烧发电厂具有发电效率低、投资大、环保成本高等缺点,难以市场化运营,长期 依赖财政补贴。同时,我国现存大量的燃煤发电机组规模大、参数高、机龄新、环保设施齐全,但受双 碳政策的限制,无法长期满负荷运行,造成了固定资产的巨大浪费。因此,开发燃煤耦合垃圾焚烧发 电技术可充分利用现有燃煤机组协同处理垃圾,提高垃圾发电效率、降低垃圾发电成本、降低设备投 资、降低燃煤机组碳排放。针对燃煤耦合垃圾焚烧发电系统开展了全流程模拟,并与燃煤发电系统进 行对比,计算及评估分析系统的发电效率、经济性、环保性以及电力生产全流程碳排放。结果表明,对 燃煤发电机组进行垃圾耦合改造后,系统发电效率仅下降 0.95%;经济性明显改善,内部收益率由 18.72% 提高至 21.89%,投资回报期由 9.72 a 降至 9.12 a,但环境折算损失明显增加;改造后系统电力 生产碳排放降低了 14.02 g/kWh(以 CO<sub>2</sub>计)。研究结果表明,燃煤耦合垃圾焚烧发电系统在技术和 经济上具有可行性。

关键词:耦合发电:燃煤机组:垃圾焚烧:全流程模拟:碳排放

中图分类号:TM619;TK6 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2023)09-0109-08

# Process simulation and evaluation of the coal coupled with waste incineration power generation system

ZHANG Lijuan, ZHANG Rui, LIU Dong

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract : Traditional waste incineration power plants have the disadvantages of low energy efficiency, large investment and high cost of environmental protection, making it difficult to operate in market and depending on financial subsidies for long-term survival. At the same time, there are large number of coal-fired generating units exist in China, which have large scale, high parameters, new age, and environmental protection facilities. Due to the limitations of the dual-carbon policy, a huge waste of fixed assets has been caused because of the inability to operate at full capacity for a long time. Therefore, the development of coal-fired coupled waste incineration power generation technology can make full use of the existing coal-fired units to cooperatively treat waste, improve the efficiency of waste power generation, reduce the investment in engineering equipment, and reduce the carbon emissions of coal-fired units. The process of the coal power generation efficiency, economy and environmental performances as well as the carbon emission throughout the entire power production process were calculated and evaluated. The results show that the power generation efficiency of the coal – fired generating unit only decreases by 0.95% after the waste coupling transformation. The economic performance is better, the internal rate of return increases from 18.72% to 21.89%, and the investment return period decreases from 9.72 years to 9.12 years, while the environmental loss cost increases after coupling transformation. But the carbon emission of the power production in the system is reduced by 14.02 g/kWh (calculated by  $CO_2$ ) after the renovation. The results show that the coal-fired coupled waste incineration power system is technically and economically feasible.

Key words: coupled power generation; coal fired units; MSW; process simulation; carbon emission

### 收稿日期:2023-02-01;责任编辑:张 鑫 **DOI**:10.13226/j.issn.1006-6772.SG23020102 基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1910000)

作者简介:张利娟(1998—),女,河南商丘人,硕士研究生。E-mail:120108010981@njust.edu.cn

通讯作者:张 睿(1986—),男,江苏徐州人,副教授。E-mail:zhangrui@njust.edu.cn

引用格式:张利娟,张睿,刘冬.燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的全流程模拟与评估分析[J].洁净煤技术,2023,29(9):109-116.

ZHANG Lijuan, ZHANG Rui, LIU Dong. Process simulation and evaluation of the coal coupled with waste incineration power generation system [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9):109-116.



移动阅读

### 0 引 言

随社会和经济的发展,垃圾处理需求与日俱 增<sup>[1-3]</sup>。而传统的垃圾焚烧发电厂具有发电效率 低、投资高、运营成本高等缺点,长期依赖财政补贴, 无法完全市场化运营[4]。在财政收紧背景下,垃圾 处理补贴将逐步退出,现有垃圾焚烧发电厂极可能 大面积亏损。而利用现有燃煤机组协同处置垃圾是 未来发展趋势。目前燃煤耦合垃圾发电方式主要有 直接耦合、平行耦合及间接耦合。直接耦合即垃圾 在燃煤锅炉中与煤混燃发电。许多学者针对煤与垃 圾混合燃烧特性及污染物排放进行了研究。 MUTHURAMAN 等<sup>[5]</sup>研究了木材、城市生活垃圾与 印度煤共燃的燃烧特性,结果表明木材、城市生活垃 圾的掺混改善了印度煤的挥发分释放及着火特性. 降低了着火温度:城市生活垃圾对煤燃烧的促进作 用更明显。PENG 等<sup>[6]</sup>研究城市生活垃圾(MSW)/ 煤混燃过程中多环芳烃(PAHs)的排放和分布特 征。结果表明,与 MSW 和煤炭单独燃烧相比, MSW/煤混燃产生的多环芳烃总量较低,毒性当量 降低。LIU 等<sup>[7]</sup>研究有机固废与褐煤的着火和燃尽 温度、灰分熔融温度及结渣倾向,发现随有机固废比 例增加,混燃物着火温度基本保持稳定,燃尽温度降 低。但有机固废比例高于 30%时,燃料在高温下可 能熔化并堵塞煤焦孔隙,掺混燃料结渣倾向严重,因 此在煤与固废的混燃过程中应特别注意避免结渣。 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司在流化 床机组中实现了煤、生物质及固废的耦合发电,验证 了利用循环流化床锅炉混烧固废的可行性<sup>[8]</sup>。我 国长春生活垃圾发电厂实现了循环流化床炉内 77% MSW 与煤混燃发电<sup>[9]</sup>,相较传统垃圾焚烧发 电,发电效率有所提升。但直接耦合对垃圾成分和 粒度要求较高,一般适用于流化床锅炉,且对锅炉影 响较大。

平行耦合即垃圾采用独立的焚烧及热力系统装置处理后,将产生的蒸汽并入燃煤机组热力系统发电。赵梁<sup>[10]</sup>以 200 MW 火电机组为例,设计垃圾焚烧蒸汽侧耦合方式的可行性。CHEN 等<sup>[11]</sup>提出一种垃圾发电与燃煤发电相结合的混合发电系统,利用垃圾焚烧炉产生的蒸汽加热燃煤机组的部分给水,显著提高了垃圾发电效率。但由于垃圾焚烧发电系统蒸汽参数较低,平行耦合的综合发电效率较低,同时由于垃圾处理需设置单独焚烧以及烟气处理装置,投资成本较高<sup>[12]</sup>。

间接耦合根据垃圾热处理工艺可分为热解耦 合、气化耦合和焚烧耦合。王学斌等[13]提出一种 垃圾热解耦合燃煤发电技术,热解高热值油气用 干机组助燃调峰、垃圾炭与煤掺烧,掺烧前后烟气 二噁英含量相差不大。PAN 等<sup>[14]</sup>提出将垃圾气 化与燃煤发电相结合的概念,通过等离子气化技 术将垃圾转化为合成气,随后输送到燃煤锅炉中 燃烧发电。垃圾发电效率大幅提升,远高于传统 垃圾发电厂。国电乐东电厂采用气化耦合方式, 将垃圾单独气化后送入燃煤锅炉中燃烧,采用这 种方式可大幅降低生活垃圾中有害组分对燃煤锅 炉的影响[15]。热解耦合及气化耦合在提高燃料适 应性的同时实现生活垃圾灰渣与燃煤灰渣的彻底 分离,但垃圾处理量较少且处理工艺复杂,投资成 本较高。而焚烧耦合垃圾处理量大,工艺简单。 史兵权等[16] 对锅炉烟气侧耦合垃圾焚烧进行研 究,发现垃圾焚烧烟气会影响燃煤锅炉流动特性, 提升炉膛出口烟温;耦合烟气后 SO,排放量降低。 焚烧耦合技术对原有机组改动较小,投资费用低, 能充分利用燃煤机组烟气净化装置协同处理垃圾 焚烧烟气。马瀚程等[17]研究了垃圾焚烧烟气对煤 粉炉内烟气中二噁英生成的影响,结果表明,燃煤 耦合垃圾焚烧烟气后,煤粉炉烟气和灰渣中二噁 英毒性当量降低。

笔者针对间接耦合工艺中的焚烧耦合方案开展 全流程模拟与评估分析,在 Aspen Plus 软件上建立 了燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的全流程模拟模型, 并根据模拟结果计算了系统的发电效率、经济性、环 保性和电力生产全流程碳排放,分析耦合改造对系 统的影响,为示范工程建设提供参考。

### 1 模拟与分析方法

### 1.1 系统模拟

以 600 MW 超临界煤粉炉燃煤电厂为参考,锅 炉采用 DG1900/25.4-Ⅱ型锅炉,汽轮机采用 N600-24.2/566/566 型汽轮机。对燃煤电厂进行垃圾焚 烧耦合改造,系统工艺流程如图 1 所示。在燃煤耦 合垃圾焚烧发电系统中,煤在煤粉锅炉中燃烧;垃圾 在回转窑焚烧炉中焚烧,垃圾焚烧后的烟气送入燃 煤锅炉中。选择烟煤和典型垃圾作为系统燃料,其 特性见表 1。垃圾在燃料中的替代比设定为 5%、 10%(以热值计)。采用 Aspen Plus 软件开展模拟, 模型可划分为燃料转化单元、换热单元、汽轮机单元 以及烟气净化单元 4 个部分,如图 2 所示。环境参 考温度为 15 ℃。

110



图1 燃煤耦合垃圾焚烧发电系统流程

Fig.1 Process of coal-fired coupled waste incineration power generation system

## 表 1 燃料特性 Table 1 Characteristics of fuels

项目		工业	分析/%		元素分析/%			$Q_{ m net,ar}$ /			
	M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	$V_{\rm ar}$	FC <sub>ar</sub>	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	$\mathbf{S}_{\mathrm{ar}}$	Cl <sub>ar</sub>	$(MJ \cdot kg^{-1})$
烟煤	7.99	9.26	32.68	50.07	67.77	4.15	1.01	8.09	1.73	0	26.43
垃圾	51.87	14.83	27.43	5.87	19.46	2.29	0.45	10.17	1.72	0.10	7.24





Fig.2 Simulation model of the whole process of coal-fired coupled waste incineration power generation system

燃料转化单元主要设备为煤粉炉和回转窑焚烧 炉,均采用 RYield 反应器、Sep 模块和 RGibbs 反应 器进行模拟,物性方法为 PR-BM。换热单元包括水 冷壁、过热器、再热器、省煤器和空气预热器,水冷壁 模拟采用 Heater 模块,过热器、省煤器和空气预热 器模拟采用 HeatX 模块,再热器模拟采用 MHeatX 模块。风机模拟采用 Pump 模块。换热单元烟气侧 采用 PR-BM 物性方法,蒸汽侧采用 STEAMNBS 物 性方法。汽轮机单元包括汽轮机、冷凝器、凝结水 泵、除氧器和加热器,汽轮机采用 Compr 模块进行 模拟。冷凝器采用 Pump 模块模拟,除氧器采 用 Mixer 模块模拟,加热器采用 HeatX 模块模拟,物 性方法为 STEAMNBS。烟气处理单元包括选择性催 化还原脱硝(SCR)设备、活性炭喷射器、布袋除尘器 (ESP)以及石灰石-石膏法脱硫(FGD)设备,分别 用于脱除烟气中的  $NO_x$ 、二噁英、飞灰以及  $SO_2$ 。

#### 1.2 分析方法

分别从热力学性能、经济性、环保性以及电力生 产全流程碳排放等角度对系统性能进行分析评价, 评估系统可行性。

1.2.1 热力学性能

通过计算发电效率分析系统的热力学性能,其 计算方法为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{m} W_i - \sum_{k=1}^{m} P_k}{F_{\text{real}} C_{\text{V, real}} + F_{\text{watch}} C_{\text{V, watch}}} \times 100\% , \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为系统发电效率,%; $W_i$ 为系统各汽轮机功率,MW; $P_k$ 为系统各耗功设备功率,MW;F为相应燃料的质量流量,kg/s; $C_v$ 为相应燃料的低位热值, $MJ/kg_o$ 

1.2.2 经济性

采用工程总投资、内部收益率和投资回报周期 评估系统经济性。系统的设备投资衡量参数为固定 资产投资(F<sub>CI</sub>)和工程总投资(T<sub>PC</sub>)。固定资产投资通过规模放大法进行计算,计算方法为

$$F_{\rm CI} = \sum_{i=1}^{m} I_{{\rm a},i} = \sum_{i=1}^{m} \left[ I_{{\rm r},i} A_i I_{{\rm Fa},i} \left( \frac{S_{{\rm a},i}}{S_{{\rm r},i}} \right)^{b_{{\rm a},i}} \times E_{{\rm a},i} \right] \,_{\circ}$$
(2)

其中, $I_{a,i}$ 为设备 a 在现有规模下的设备投资, 万元; $I_{r,a,i}$ 为设备 a 在参考规模下设备投资,万元;m为设备总数; $A_{a,i}$ 、 $I_{Fa,i}$ 、 $b_{a,i}$ 分别为设备 a 的国内制造 价格系数、安装系数和规模放大系数; $S_{a,i}$ 、 $S_{r,a,i}$ 为设 备 a 的现有规模、参考规模; $E_{a,i}$ 为设备 a 的参考设 备投资对应年份的经济学指数。化工工厂成本指数 ( $C_{EPCI}$ )将不同年份设备价格统一换算为以 2020 年 为基准的设备价格, $E_{a,i}$ 即为 2020 年成本指数与参 考设备投资对应年份成本指数比值。

系统的工程总投资包括固定资产投资( $F_{CI}$ )、承 包服务费( $E_{PC}$ )及工程偶然性费用( $P_{JC}$ )。承包服 务费为固定资产投资的8%;工程偶然性费用为固 定资产投资、工程承包服务费之和的15%<sup>[18]</sup>。本文 设备投资计算基本参数<sup>[19-26]</sup>见表2。

	表 2	设备投资记	十算的基	基本参数	
Table 2	Basic para	ameters for	system	investment	calculation

设备	$S_{\mathrm{r,a},i}$	I <sub>r,a,i</sub> /万元	$I_{\mathrm{Fa},i}$	$b_{a,i}$	$A_{a,i}$	年份	$E_{\mathrm{a},i}$
煤处理[19]	273 t/h	42 902.66	67.0	0.65	0.65	2008 年	1.11
垃圾处理[20]	100 t/h	185.13	60.0	0.70	1.00	2017 年	1.14
煤粉锅炉[21]	600 MW	57 689.00	—	0.70	1.00	2011 年	1.09
回转窑焚烧炉[22]	136 t/h	532.30	—	0.65	0.65	2011 年	1.09
凝汽式汽轮机[23]	275 MW	50 718.68	16.0	0.67	0.65	2007 年	1.21
脱硝设备[24]	2 234 kg/h(以NO <sub>x</sub> 计)	21 477.00	—	0.65	1.00	2015 年	1.15
活性炭喷射器[20]	700 t⁄d	105.54	—	0.70	1.00	2011 年	1.09
布袋除尘器[20]	400 MW	3 181.34	—	0.65	1.00	2001 年	1.62
脱硫设备[25]	5 731.69 kg/h(以 SO <sub>2</sub> 计)	13 567.00	—	0.65	1.00	2004 年	1.44
水泵[26]	250 m <sup>3</sup> /h	13.50	99.5	0.65	0.65	2007 年	1.21
风机[20]	497 m <sup>3</sup> /s	61.71	3.4	0.70	1.00	2010年	1.15

内部收益率(*I*<sub>RR</sub>)即资金流入现值总额与资金 流出现值总额相等、净现值等于零时的折现率,计算 方法为

$$\sum_{t=0}^{n} C_{t} (1 + I_{\rm RR})^{-t} = 0, \qquad (3)$$

$$C_{t} = C_{s} - \left[ T_{PC} (C_{RF} (1 + \alpha) + O_{M}) + C_{F} + C_{M} \right] + C_{F} + C_{M}$$
(4)

$$C_{\rm RF} = \frac{j}{1 - (1 + j)^{-n}},\tag{5}$$

式中, $C_t$ 为第 t年的年现金流,万元; $C_{RF}$ 为年度平均 投资比; $O_M$ 为运行维护费率; $C_F$ 为燃料费用; $C_M$ 为 材料费用;j为贴现率,%;n为项目运行寿命, $a_o$  投资回报期 D<sub>pp</sub>即收回所有投资成本所需时间。本研究考虑了项目运行期间贴现率对投资回报期的影响,采用动态投资回报期评估项目的经济性, 计算方法为

$$D_{\rm PP} = A + \frac{\sum_{i=0}^{A} B_i (1+j)^{-i}}{C}$$
(6)

其中,A为净现金流为负值的上一阶段,a;B<sub>i</sub>为 第 t 年的净现金流,万元;C 为 A 的下一阶段的净现 金流,万元。内部收益率及投资回报期计算基本参 数见表 3。

表 3	$I_{ m RR}$ 与 $D_{ m pp}$ 计算的基本参数	
Table 3 I	Resignary motors for L and D	

1	able 3 Basic parameters for $I_{\rm RR}$ a	and $D_{\rm PP}$
	项目	数值
	煤/(元・t <sup>-1</sup> )	500
	垃圾/(元・t <sup>-1</sup> )	0
	水/(元・t <sup>-1</sup> )	2
材料	活性炭/(元・t <sup>-1</sup> )	10 000
费用	石灰石/(元・t <sup>-1</sup> )	165
	氨/(元・t <sup>-1</sup> )	3 000
	灰渣处理费/(元・t <sup>-1</sup> )	25
	飞灰处理费/(元・t <sup>-1</sup> )	505
立日	电/(元・kWh <sup>-1</sup> )	0.362
)印	石膏/(元・t <sup>-1</sup> )	60
们悄	垃圾处理补贴/(元・t <sup>-1</sup> )	100
	系统设计寿命/a	30
	发电系统年运行时间/(h・a <sup>-1</sup> )	7 000
经济性	运行与维护费率/%	4
计算参数	贴现率/%	8
	银行贷款利息/%	4.90
	系统建设周期/a	3

#### 1.2.3 环保性

环境损失成本用于评价系统产生的污染物对环 境的影响和破坏。本研究主要考虑环境影响为:全 球变暖、酸化、光化学污染以及固体废弃物。环境损 失成本计算方法:

$$P_{\rm E} = \sum_{c=1}^{R} \sum_{a=1}^{N} \sum_{b=1}^{M} W(a,b) P_{\rm WR}(b,c) \,. \tag{7}$$

其中, $P_{\rm E}$ 为环境损失成本,元/h;W(a,b)为污染物b的排放总量,t/h; $P_{\rm WR}(b,c)$ 为污染物b在c 类影响类别下的货币环境价值,元/t。各污染物的 影响类别和货币环境价值见表4。

表 4 污染物的影响类别和货币环境价值

 
 Table 4 Impact classes and monetary environment values of pollutants

影响类别	污染物	货币环境价值/(元・t <sup>-1</sup> )
全球变暖	$CO_2$	80
	$NO_x$	25 600
酸化	$SO_2$	6 000
	NO <sub>x</sub>	4 200
光化学污染	CO	1 000
	HC	20 000
	$NO_x$	3 800
固体废弃物	灰渣	120
	危险废物	4 000

1.2.4 电力生产全流程碳排放

电力生产全流程中碳排放包括煤炭开采加工、 燃料运输、锅炉燃烧、烟气处理、固废运输。本文采 用排放系数法进行碳排放的计量与计算。碳排放计 算公式:

$$C_{\rm E} = C_m E_{\rm Fm} \,, \tag{8}$$

式中, $C_{\rm E}$ 为碳排放总量; $C_{\rm m}$ 为产生碳排放的活动强度; $E_{\rm Fm}$ 为该项活动的排放系数; m为活动过程的数目。

电力全生产流程碳排放计算相关系数见表 5。 对于燃煤耦合垃圾焚烧发电系统,由于垃圾焚烧涉 及生物碳排放以及化学碳排放,锅炉燃烧过程的碳 排放应去除垃圾中生物碳焚烧产生的 CO<sub>2</sub>。垃圾成 分见表 6,采用平衡法,根据文献给出的干燥无灰垃 圾中生物碳和化学碳含量的平均值,可计算得到垃 圾中生物碳和化学碳的含量<sup>[31-32]</sup>。

表 5 碳排放计算相关系数(均以 CO, 计))

Table 5 Calculate correlation coefficient of carbon emission

活动过程	碳排放系数
煤炭开采加工 <sup>[27]</sup> /(kg·t <sup>-1</sup> )	65.7
煤炭运输 <sup>[28]</sup> /(km・t <sup>-1</sup> )	0.010 9
垃圾运输 <sup>a</sup> /(kg・km <sup>-1</sup> )	0.808
锅炉燃烧	采用模拟结果
脱硝用氨 <sup>[29]</sup> /(t・t <sup>-1</sup> )	5.372
脱硫用石灰石 <sup>[30]</sup> /(kg・t <sup>-1</sup> )	2.996
脱硫置换反应 <sup>b</sup>	根据脱硫反应计算
固废运输 <sup>[a]</sup> /(kg・km <sup>-1</sup> )	0.808

注:<sup>a</sup>为垃圾及固废运输工具采用 12 t 载货汽车;<sup>b</sup>为 CO<sub>2</sub> 排放 量=SO<sub>2</sub>产量×44/64×脱硫效率。

表6 垃圾成分

Table 6 Composition of MSW

成分	塑料	皮革	布料	纸	木材	厨余	不可燃
质量分数/%	10.71	23.95	11.09	11.55	0.75	38.00	3.95

### 2 结果与讨论

### 2.1 热力学性能

对耦合改造前后的系统发电效率进行计算,结 果见表7。相较原燃煤发电系统,耦合改造后的系 统汽轮机单元做功减少,这是因为为保持空气预热 器出口烟气温度一致,汽轮机单元循环水流量减小。 2种系统中破碎机、风机和泵是主要的耗能设备。 相较原燃煤发电系统,燃煤耦合垃圾焚烧发电系统 的破碎机、泵能耗降低,风机能耗增加。耦合垃圾 后,燃煤量减少,循环水量减少,因此破碎机以及泵 能耗降低;燃料燃烧所需空气量增加,因此风机能耗 增加。原燃煤发电系统净发电量为573.97 MW,随 垃圾耦合比例增加,燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的 净发电量降至559.99 MW,耦合垃圾后系统净发电 量减少了 13.98 MW;耦合垃圾后系统的发电效率由 39.09%降至 38.14%,降低了 0.95 个百分点。可见, 耦合改造对原燃煤发电系统的发电效率影响较小。

Table 7	Energy	calculation	results	of	the	system
---------	--------	-------------	---------	----	-----	--------

	项目	0	5%	10%
	煤能量输入/MW	0         5%           1 468.39         1 394.97           0         73.42           1 468.39         1 468.39           592.25         586.00           3.13         2.99           0.92         0.94           1.62         1.64           2.34         2.38           9.93         9.77           0.01         0.01           0.16         0.17           0.18         0.19           573.97         567.91           39.09         38.68	1 321.55	
输入	垃圾能量输入/MW	0	73.42	146.84
	总能量输入/MW	1 468.39	1 468.39	1 468.39
输出注	气轮机做功/MW	592.25	586.00	577.91
	破碎机/MW	3.13	2.99	2.86
	一次风机/MW	0.92	0.94	0.95
	二次风机/MW	1.62	1.64	1.67
创动	引风机/MW	/MW 1.62 W 2.34	2.38	2.42
把朽	泵/MW	9.93	9.77	9.64
	脱硝/MW	0.01	0.01	0.01
	布袋除尘器/MW	0.16	0.17	0.17
	脱硫设备/MW	0.18	0         73.42         146.8           58.39         1         468.39         1         468.3           2.25         586.00         577.9           .13         2.99         2.86           .92         0.94         0.95           .62         1.64         1.67           .34         2.38         2.42           .93         9.77         9.64           .01         0.01         0.01           .16         0.17         0.17           .18         0.19         0.19           3.97         567.91         559.9           0.09         38.68         38.14	0.19
<u></u>	净发电量/MW	573.97	567.91	559.99
合计	发电效率/MW	39.09	38.68	38.14

#### 2.2 经济性

### 2.2.1 设备投资

燃煤耦合垃圾焚烧系统的设备投资计算结果见 表8。两系统中,煤预处理设备、煤粉炉、汽轮机、脱 硝设备、脱硫设备、布袋除尘器及水泵设备投资保持 不变,这是因为燃煤耦合垃圾焚烧发电系统是基于 原燃煤发电系统进行改造,电厂规模不变,耦合垃圾 对燃煤电厂的设备投资无影响。与原燃煤发电系统 相比,燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的垃圾预处理设 备、回转窑焚烧炉、活性炭喷射器、风机的投资增加。 这是因为耦合垃圾后,需新增垃圾处理及回转窑焚 烧炉设备。同时垃圾焚烧烟气中含有二噁英,按现 行 GB 18485—2014《生活垃圾焚烧污染标准》,生活 垃圾焚烧炉排放烟气中二噁英限值为0.1 ng/m<sup>3</sup>(以 TEQ 计),因此需新增活性炭喷射器,喷射活性炭吸 附二噁英,以降低烟气中二噁英含量。耦合垃圾后, 燃料燃烧所需空气增多,因此风机设备投资增加。 原燃煤发电系统的固定资产投资为 245 507.16 万 元,随垃圾耦合比例增加,燃煤耦合垃圾焚烧发电系 统的固定资产投资升至246 124.98 万元,增加了 617.82 万元: 燃煤发电系统的工程总投资为 304 919.90 万元,随垃圾耦合比例增加,燃煤耦合垃 圾焚烧发电系统的工程总投资升高至 305 687.23 万 元,增加了767.33万元。因此,垃圾耦合改造对燃 煤发电系统的设备投资影响较小。

	衣ð	杀玧坄	<b></b>	ਸ	昇斗	市未	
•	<b>.</b> .					• .•	

Table 8	Equipment	investment	calculation	results

		of the system		万元
	项目	0	5%	10%
	煤预处理	42 194.47	42 194.47	42 194.47
	垃圾预处理	0	167.15	271.54
设备 投资	煤粉炉	62 832.45	62 832.45	62 832.45
	回转窑焚烧炉	0	160.28	251.50
	凝汽式汽轮机	77 632.43	77 632.43	77 632.43
	脱硝设备	34 154.80	34 154.80	34 154.80
	脱硫设备	21 863.73	21 863.73	21 863.73
	活性炭喷射器	0	57.35	93.17
	布袋除尘器	6698.98	6 698.98	6698.98
	水泵	60.62	60.62	60.62
	风机	69.68	70.49	71.29
合计	固定资产投资	2 455 07.16	245 892.75	246 124.98
	承包服务费	19 640.57	19 671.42	19 690.00
	工程偶然性	39 772.16	39 834.63	39 872.25
	工程总投资	304 919.90	305 398.80	305 687.23

### 2.2.2 内部收益率与投资回报期

燃煤发电系统和燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的 内部收益率和投资回报期计算结果见表9。燃煤发 电系统的内部收益率为18.72%,随垃圾耦合比例增 加,燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的内部收益率升至 21.89%,系统的内部收益率均高于贴现率,说明 600 MW 燃煤发电系统和燃煤耦合垃圾焚烧发电系 统均符合经济发展水平。相较燃煤发电系统,燃煤 耦合垃圾焚烧发电系统内部收益率提高了3.17%。 燃煤发电系统的投资回报期为9.72 a,燃煤耦合垃 圾焚烧系统的投资回报期为9.72 a,燃煤耦合垃 圾焚烧系统的投资回报期为9.72 a,燃煤耦合垃 级焚烧系统的投资回报期为9.12 a,降低了0.60 a。 这是因为燃煤耦合垃圾焚烧发电系统能够获得垃圾 处理补贴,对燃煤发电系统进行垃圾耦合改造能够 提高系统的内部收益率,缩短投资回报期,提高系统

表 9 系统 I<sub>RR</sub>和 D<sub>PP</sub> 计算结果

Table 9	$I_{\rm RR}$	and	$D_{\rm pp}$	calculation	results	of	the	system
	D D		- F F					•

项目	0	5%	10%
工程总投资/万元	304 919.90	305 398.80	305 687.23
投资回报比/%	9	9	9
产品销售额/(万元・a <sup>-1</sup> )	146 216.05	147 265.08	147 842.01
燃料费用/(万元・a <sup>-1</sup> )	70 000.00	66 500.00	63 000.00
材料费用/(万元・a <sup>-1</sup> )	7 993.40	10 949.27	10 954.46
内部收益率/%	18.72	19.60	21.89
动态投资回报期/a	9.72	9.54	9.12

#### 2.3 环保性

对燃煤发电系统和燃煤耦合垃圾焚烧发电系统 进行生命周期评价的目的是评价系统对环境的影 响,计算系统造成的环境损失成本。系统生命周期 的范围包括燃料运输及燃烧发电、电能运输及使用、 废弃物生成及处置。由于电力是一种清洁资源,对 环境影响较小,故不考虑电能的使用过程。系统的 环境损失成本见表 10.其中主要的环境影响类别为 全球变暖和固体废弃物。由于燃煤发电系统及燃煤 耦合垃圾焚烧发电系统均无碳捕获设备,系统产生 的 CO,直接排放到大气中,因此 CO,排放导致的全 球变暖在系统环境影响中占比较高。对于燃煤发电 系统,由于煤燃烧产生的二噁英类物质可忽略,系统 产生的飞灰经除尘器收集后可当作正常废弃物处 理,因此危险废弃物的环境成本为0。燃煤耦合垃 圾焚烧发电系统中,由于垃圾焚烧产生二噁英,用于 处理烟气中二噁英的活性炭及系统产生的飞灰均作 为危险废弃物处理。燃煤耦合垃圾焚烧发电系统中 由危险废弃物造成的固体废弃物环境损失成本较 高,随垃圾耦合比例增加,燃煤耦合垃圾焚烧发电系 统的环境损失成本由 43 881.59 元/h 增至 80 681.72 元/h,增加了36800.13元/h。垃圾耦合对燃煤发电 系统的环境损失影响较大。

表 10 系统环境损失成本

Table 10 Environmental cost of the system  $\overline{\pi}/h$ 

影响类别		耦合比例			
		0	5%	10%	
全球变	CO2	3 9421.16	39 490.06	39 563.79	
暖	NO <sub>x</sub>	1 541.10	1 816.22	1 900.53	
酸化	$SO_2$	210.11	217.23	224.76	
	NO <sub>x</sub>	252.84	297.97	311.81	
光化学	CO	2.50	2.52	2.52	
	HC	3.60	3.30	3.30	
	NO <sub>x</sub>	228.76	269.60	282.11	
固体废	灰渣	2 221.53	1 689.77	2 212.79	
弃物	危险废物	0	35673.44	36 180.12	
合计		43 881.59	79 460.11	80 681.72	

### 2.4 电力生产全流程碳排放

燃煤发电系统及燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的 电力全生产流程碳排放计算结果见表 11。其中锅 炉燃料燃烧产生碳排放在总碳排放中占比较大,接 近 95%。相较燃煤发电系统,由于垃圾中含有生物 源碳,其燃烧产生的 CO<sub>2</sub>将参与大气碳循环,不计入 碳排放计算,因此燃煤耦合垃圾焚烧发电系统的锅 炉燃烧碳排放减少。相较燃煤发电系统,燃煤耦合 垃圾焚烧发电系统用煤量减少,因此煤炭开采加工 部分碳排放减少。燃煤发电系统电力生产碳排放为 910.33 g/kWh,随垃圾耦合比例增加,燃煤耦合垃圾 焚烧发电系统电力生产碳排放降至 896.31 g/kWh, 降低了 14.02 g/kWh。耦合改造能够降低燃煤发电系统的电力生产碳排放。

表 11 电力生产全流程碳排放(以 CO<sub>2</sub> 计)

Table 11 Electricity pro	oduction process	carbon	emissions
--------------------------	------------------	--------	-----------

活动过程	0	5%	10%
煤炭开采加工/(t・h <sup>-1</sup> )	13.14	12.48	11.83
燃料运输/(t・h <sup>-1</sup> )	1.09	1.07	1.04
锅炉燃烧∕(t・h⁻¹)	491.67	482.43	473.20
烟气处理/(t・h <sup>-1</sup> )	16.56	16.20	15.83
固废运输/(t・h <sup>-1</sup> )	0.03	0.03	0.03
电力生产碳排放/(g・kWh <sup>-1</sup> )	910.33	901.93	896.31

### 3 结 论

 1)与燃煤发电系统相比,燃煤耦合垃圾焚烧发 电系统的热力学性能略有降低,系统发电效率由
 39.09%降至 38.14%。

2) 与燃煤发电系统相比, 燃煤耦合垃圾焚烧发 电系统的经济性有所提升, 内部收益率由 18.72% 升 至 21.89%, 投资回报期由 9.72 a 降至 9.10 a。

3) 耦合改造对系统的环保性影响较大。系统 的环境损失成本由 43 881.59 元/h 增至 80 681.72 元/h。

4)耦合改造后系统的电力生产碳排放降低。
系统的电力生产碳排放由 910.33 g/kWh(以 CO<sub>2</sub>
计)降至 896.31 g/kWh。

#### 参考文献(References):

- [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] WOON K S, LO I M C. An integrated life cycle costing and human health impact analysis of municipal solid waste management options in Hong Kong using modified eco-efficiency indicator [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016,107: 104-114.
- [3] GUO Y, GLAD T, ZHONG Z Z, et al. Environmental life-cycle assessment of municipal solid waste incineration stocks in Chinese industrial parks [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018,139: 387-395.
- [4] TAI J, ZHANG W, CHE Y, et al. Municipal solid waste sourceseparated collection in China: A comparative analysis [ J ]. Waste Management, 2011, 31: 1673-1682.
- [5] 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.
- [6] PENG N N, LI Y, LIU Z G, et al. Emission, distribution and tox-

洁净煤技术

icity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) during Municipal Solid Waste (MSW) and coal co-combustion[J]. Science of the Total Environment, 2020, 565: 1201-1207.

- [7] LIU H, WANG Y C, XUE J W, et al. Experimental study on combustion, ash fusibility and slagging propensity during co-combustion of organic solid waste and lignite[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 106: 101145.
- [8] 张世鑫, 史磊, 许燕飞, 等. 煤和生物质、固废直燃耦合发电 技术应用[J]. 电站系统工程, 2021, 37(4):12-16.
  ZHANG Shixin, SHI Lei, XU Yanfei, et al. Application of power generation by coupling direct - combustion of biomass, solid waste and coal[J]. Power System Engineering, 2021, 37(4): 12-16.
- [9] CHENG H, ZHANG Y, MENG A, et al. Municipal solid waste fueled power generation in China: A case study of waste - to energy in Changchun city [J]. Environment Science Technology, 2007, 41(21): 7509-7515.
- [10] 赵梁.火电机组垃圾焚烧耦合发电的可行性分析[J].科技世界,2020(21):168-169.
   ZHAO Liang. Feasibility analysis of waste incineration coupled power generation for thermal power units[J]. Science and Tech-

nology Vision, 2020(21): 168-169.

- [11] CHEN H, ZHANG M Y, CHEN Z D, et al. Performance analysis and operation strategy of an improved waste-to-energy system incorporated with a coal - fired power unit based on feedwater heating[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115637.
- [12] 王一坤,徐晓光,王栩,等. 燃煤机组多源耦合发电技术及应用现状[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 60-68.
  WANG Yikun, XU Xiaoguang, WANG Xu, et al. Multi-source coupling coal-fired power generating technology and its application status [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51 (1): 60-68.
- [13] 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.

- [14] PAN P Y, PENG W K, LI J R, et al. Design and evaluation of a conceptual waste - to - energy approach integrating plasma waste gasification with coal-fired power generation [J]. Energy, 2022, 238: 121947.
- [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 genera-tion technology of coal-fired power station coupled with do-mestic waste [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50 (11): 83-92.
- [16] 史兵权,史明哲,张睿. 220 t/h 锅炉烟气侧耦合垃圾焚烧数 值模拟[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 150-158.
   SHI Bingquan, SHI Mingzhe, ZHANG Rui. Numerical simulation of flue gas side coupled municipal solid waste incineration in a

220 t/h boiler [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 150-158.

- [17] 马瀚程, 詹明秀, 蔡鹏涛, 等. 燃煤耦合垃圾焚烧灰渣的二 噁英再合成实验研究[J]. 煤炭转化, 2020, 43(6): 84-94.
  MA Hancheng, ZHAN Mingxiu, CAI Pengtao, et al. Experimental study on dioxin re-synthesis of coal fired coupled with waste incin-eration[J]. Coal Conversion, 2020, 43(6): 84-94.
- [18] KRISTIN G, WILLIAM M S, JOHN W. Cost estimation methodology for NETL assessments of power plant perfor-mance [R].
   Washington: U.S. Department of Energy, 2011.
- [19] MEERMAN J C, RAMIREZ A, TURKENBURG W C, et al. Performance of simulated flexible integrated gasification polygeneration facilities, part B: Economic evaluation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 6083-6102.
- [20] 叶步青.烟气循环式燃煤耦合垃圾焚烧系统的全流程模拟及综合评估[D].南京;南京理工大学,2020.
- [21] YE B Q, ZHANG R, CAO J, et al. Thermodynamic and economic analyses of a coal and biomass indirect coupling power generation system[J]. Frontiers in Energy, 2020, 14: 590-606.
- [22] YE B Q, SHI B Q, SHI M Z, et al. Process simulation and comprehensive evaluation of a system of coal power plant coupled with waste incineration[J]. Waste Management and Research, 2021, 39(6): 828-840.
- [23] 雷凯.烟气循环式燃煤耦合污泥焚烧发电系统中的煤粉燃烧 特性及重金属迁徙特性的研究[D].南京:南京理工大 学,2019.
- [24] 李昂.火电机组烟气脱硝选型及技术经济分析研究[D].北 京:华北电力大学,2015.
- [25] 王琼.火电厂石灰石/石膏湿法烟气脱硫系统的设计及优化 [D].武汉:武汉大学,2005.
- [26] GUO Z H, WANG Q H, FANG M X, et al. Thermody-namic and economic analysis of polygeneration system inte-grating atmospheric pressure coal pyrolysis technology with circulating fluidized bed power plant [J]. Applied Energy, 2014, 113: 1301-1314.
- [27] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.
- [28] 国家铁路局. 2020 铁道统计公报[R].北京:中华人民共和国 交通运输部, 2021.
- [29] 吴程浩.氢能行业系列深度报告二[R].无锡:国联证券,2021.
- [30] 时文肖. 燃煤电厂不同烟气脱硫过程的生命周期评价[D]. 济南:山东大学, 2016.
- [31] SCHWARZBOCK T, ASCHENBRENNER P, SPACEK S, et al. An alternative method to determine the share of fossil carbon in solid refusederived fuels – validation and comparison with three standardized methods[J]. Fuel, 2018, 220: 916–930.
- [32] FELLNER J, CENCIC O, RECHBERGER H. A new method to determine the ratio of electruty production from fossil and biogenic sources in waste-to-energy plants [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(7): 2579–2586.