

生物质气机组排气余热发电的工程应用

邵剑波

胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东 东营 257092

摘要:为高效回收生物质气机组高温排气余热并用于发电,设计每台机组配置一个锅炉、多台机组配置一个锅炉(排气先汇总再进锅炉)、多台机组配置一个锅炉(排气先进锅炉再汇总)3种排气余热回收利用方案,通过对排气回收方式、锅炉结构、经济效益的综合分析与评价,确定主要系统的参数和关键设备选型,筛选出最优方案。结果表明:多台机组配置一个锅炉(排气先进锅炉再汇总)的方案总体造价较低,排气排放互不干扰,且年利润较高,是最优方案。该方案有效提高生物质气电站的发电效率,降低了能耗。

关键词:电力工程;排气输送;余热转化;余热发电

中图分类号:TK65

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0063-06

引用格式:邵剑波. 生物质气机组排气余热发电的工程应用[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 63-68.

SHAO Jianbo. Engineering application of waste heat power generation from exhaust of biomass gas generator sets[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 63-68.

0 生物质气电站余热利用工程概况

近年来,我国不断加大环保力度,提出“双碳”目标,提倡和鼓励发展节能环保产业。随着生物质气发电技术的成熟、国家能源局的认可以及相关安全标准的出台,生物质气电站在全国各地煤矿企业得到广泛应用。在自然界中,植物通过光合作用产生的有机物就是生物质,这些有机物主要来源于空气、水和土壤。生物质的范畴极为广泛,涵盖了所有绿色生命体^[1]。生物质主要分为两大类:一类是木质纤维性生物类,包括秸秆、木材等;另一类是农业加工剩余物、林业废弃物以及家畜粪便等。生物质气是生物质经过厌氧发酵后生成的气体,主要用于能源利用。生物质气是可再生能源,应用广泛,常用于发电、供热或作为车辆燃料,减少化石资源的使用。

利用生物质气发电时需要大量的热能,并借助气缸、活塞及曲柄连杆机构将热能转成机械能,驱动发电机发电。在发电过程中大部分热能转变为二次能源被大量放散浪费^[2]。只有高效利用做功过程中产生的二次能源,才能有效提高生物质气电站的发电效率,降低能耗。目前,生物质气排气余热最常见的利用方式是通过余热锅炉生产热水。由于生物质气电站通常远离市区,许多电站的高温排气直接排放到大气中。随着能源价格的持续上涨和国家对节能减排要求的不断提高,生物质气电站排气余热的回收利用受到更为广泛关注和应用。

本文中以 15 台额定功率为 700 kW 的高压生物质气发电机组为研究对象,设计生物质气排气余热回收方案,分析低品质蒸汽发电的可行性与经济性,为生物质气排气余热高效回收和低压饱和蒸汽发电提供参考。

1 生物质气排气余热回收工艺路线

1.1 生物质气电站余热来源

生物质气燃烧后的排气从机组内部排出时温度为 500~600℃,生物质气排气携带大量的热量,可利

收稿日期:2024-08-28

作者简介:邵剑波(1986—),男,山东东营人,工程师,主要研究方向为新能源发电,E-mail:13562260493@126.com。

用余热锅炉进行回收,生成蒸汽或热水^[3]。

1.2 低温余热发电机组

低温余热回收发电技术通过利用工业生产过程中产生的温度高于 100 ℃ 的余热,驱动发电机做功,实现能源回收利用。在低温余热回收发电过程中,需要综合考虑技术可行性、安全性以及经济性等关键因素。当前低温余热回收技术主要利用余热锅炉生产蒸汽驱动汽轮发电机发电,这一技术经过数十年的发展和完善,已经具备了商业化应用的成熟条件^[4]。

螺杆膨胀动力机是一种将热能转化为机械能的设备,能够适应多种不同品质的流体介质,是目前国内唯一能够有效利用过热蒸汽、饱和蒸汽、汽水混合物、热水以及高盐热流体进行能量回收的热动力设备,且制造技术成熟^[5]。螺杆膨胀动力机在结构和工作原理上与常规的汽轮机存在显著差异,两者对比如表 1 所示。

表 1 汽轮机与螺杆膨胀动力机对比

项目	通用汽轮机技术	螺杆膨胀动力机技术
热源情况	仅适用过热蒸汽热源	应用于过热蒸汽、饱和蒸汽、热水热液或其他热源等
工作效率	设计工况下,效率为 80% ~ 90%;变动工况下,效率大幅下降甚至停机	设计工况下,效率为 70% ~ 80%;变动工况下,效率变动很小,仍可稳定运行
安全	存在飞车等重大事故隐患	不存在重大事故隐患
维护服务	维护费用高昂,需要专业的技术队伍,检修工作量较大	15 a 无大修,维护简单方便,可无人职守
应用范围	适用于大型发电厂、高品质余热发电等	适用低品位余热废热和可再生能源发电等

由上述分析可知:螺杆膨胀动力机技术更适合低品质余热发电。因此本文在生物质气电站项目中采用压力为 0.8 MPa 的饱和蒸汽推动螺杆膨胀动力机发电。

2 生物质气发电设备排气余热回收方案

2.1 回收方案设计

生物质气燃烧产生的排气具有周期性和间歇性波动的特点,需要借助余热锅炉将其转化为稳定连续的蒸汽流,再通过专门设计的低参数饱和蒸汽螺杆膨胀动力机做功,实现发电。

2.1.1 方案一

生物质气发电设备与余热锅炉采用一一对应的方式连接,即在每台生物质气发电设备的排气管道上均配备一台余热锅炉,并在生物质气发电设备与余热锅炉之间的排气管道上设置三通阀^[6]。冷水流入各台余热锅炉,经过热交换产生饱和蒸汽,再将所有锅炉产生的蒸汽汇总至一条主蒸汽管道,输送至螺杆膨胀动力机发电。

该方案无需对现有操作工艺和操作参数进行任何调整,工艺成熟且系统结构简单。但该方案的锅炉数量较多,整体建设成本较高;为了确保输出压力稳定的饱和蒸汽,每台锅炉都需要配备独立的控制系统,系统故障风险增加,控制难度也相应增大。

2.1.2 方案二

每 5 台生物质气发电设备的排气管道在室外汇总至一根排气总管,然后接入余热锅炉。在每台生物质排气支管上安装高温排气止回阀、三通阀、压力传感器和排气流量计等设备,防止机组之间串气和增加背压。与方案一相比,虽然方案二余热锅炉的容量有所增加,但两者的结构完全相同,因而制造和安装都较便捷。

余热排气压力过高可能导致生物质气发电设备功率下降,应及时打开三通阀,调节生物质气发电设备之间的排气压力至稳定后,才能进入下一工艺流程^[7]。为了保证生物质气发电设备的排气不出现紊流现象,需要在每条排气管支管中设置高温截止阀,阀门本体需要耐高温、高压,价格不菲^[8-9],所以投资增大。

2.1.3 方案三

每5台700 kW生物质气机组共用一台余热锅炉,与方案二的主要区别为:每台生物质气发电设备的排气分别独立输送至余热锅炉,余热锅炉设置5个独立的进气口,在锅炉内部通过隔断板划分出5个独立的排气流动区域,确保每台机组的排气流动互不干扰。排气在锅炉的腔体内与冷水进行热交换后温度降低,在余热锅炉排烟管线低点设置低温止回阀,将排气汇总并统一排放至室外。

该方案每个生物质气发电设备的排气排放互不影响,排气系统更加稳定、高效,但是余热锅炉需要根据具体需求定制,体积较大。

2.2 方案选择

方案三的总体造价相对较低,每个生物质气发电设备独立运行,所以最终决定采用方案三,即多台机组共用一台余热锅炉,排气先进锅炉再汇总。

2.3 节能计算

2.3.1 机组排气参数

在机组运行过程中,排气从发动机组内部排出时带有大量热量,回收后,排气温度降至约190℃。机组排气参数如表2所示。

表2 机组排气参数

排气温度/℃	排气质量流量/(kg·h ⁻¹)	发动机最大允许排气背压/kPa	降温后排气温度/℃
550	3 465	6	190

参数来源:某公司12V190-700 kW系列自动化燃气发电机组工程技术资料。

2.3.2 蒸汽量计算

计算条件:环境温度为0℃,大气压力为0.1 MPa,额定工况下沼气中甲烷体积分数为60%,过量空气系数为1.4。5台生物质气发电机组每小时回收的热量

$$Q = c_p m (t_{in} - t_{out}), \quad (1)$$

式中: c_p 为排气的平均定压比热容,kJ/(kg·℃); m 为5台生物质发电设备每小时产生的排气质量,kg; t_{in} 为排气进入余热锅炉时的温度,℃; t_{out} 为排气从锅炉排出时的温度,℃。

本文中, $c_p = 1.145$ kJ/(kg·℃), $m = 17\,325$ kg, $t_{in} = 550$ ℃, $t_{out} = 190$ ℃。考虑锅炉换热效率以及排气输送损失,总体效率按94%计算,由式(1)可得 $Q = 6\,712\,000$ kJ。

余热锅炉生产1 t压力为0.8 MPa(即温度为170℃)的蒸汽所需的热量(蒸汽压力要求来源客户端需求)

$$Q' = m' c_{p1} t_1 + m' c_{p2} + m' c_{p3} t_2, \quad (2)$$

式中: m' 为锅炉所需的排气质量,kg; t_1 为标准状态下水从15℃加热到100℃的温差,℃; t_2 为水从100℃变为170℃蒸汽的温差,℃; c_{p1} 、 c_{p2} 、 c_{p3} 分别为标准状态下水的比热容、标准状态下水的汽化潜热、水蒸汽的比热容,kJ/(kg·℃)。

本文中 $m' = 1\,000$ kg, c_{p1} 、 c_{p2} 、 c_{p3} 分别为4.2、2 260、2.1 kJ/(kg·℃),由式(2)可得 $Q' = 2\,764\,000$ kJ/t。

5台生物质气发电机组每小时可产饱和蒸汽量

$$m_1 = Q/Q'. \quad (3)$$

由式(3)可得: $m_1 = 2.43$ t,即每5台生物质气发电机组每小时能产生2.43 t温度为170℃的饱和蒸汽。

2.4 排气余热回收系统主要设备及费用

依据国家能源局发布的《20 kV及以下配电网工程定额和费用计算规定(2022年版)》(国能发电力

[2023]20 号文件)推荐的编制方法、费用构成及计算标准编制排气余热回收系统主要设备及费用表,结果如表 3 所示。对于未涵盖的部分,参考类似的工程概算和预算指标进行补充;本投资估算的静态价格基准年份为 2023 年。由表 3 可知:排气余热回收系统的投资为 214.40 万元。

表 3 排气余热回收系统主要设备及费用

序号	设备名称	规格型号	数量	单位	价格/元
1	蒸汽式余热锅炉	额定蒸汽温度为 170 ℃,蒸汽质量流量为 2.5 t/h	3	套	
2	全自动软水器		1	台	
3	软水器给水泵		2	台	1 800 000
4	余热利用系统给水泵		2	台	
5	装配式给水箱	1m×1m×1m	2	台	
6	其余附件及材料		1	套	250 000
7	建筑工程费		1	项	30 000
8	安装工程费		1	项	64 000

3 螺杆膨胀动力机发电系统设计与技术经济分析

由第 2.3 节可知,15 台生物质气发电机组每小时可产生压力为 0.8 MPa 的饱和蒸汽 7.29 t。对螺杆膨胀动力机实际运行效率进行调研,同时参考常用厂家凝气式螺杆膨胀动力机参数,确定本项目螺杆膨胀动力机汽耗率为 0.063 kg/(kW·h),15 台发电机组所产生的压力为 0.8 MPa 的饱和蒸汽可发电 460.7 kW。

3.1 热力发电工艺流程

排气余热产生的蒸汽进入螺杆膨胀动力机,配套发电机发电。蒸汽在凝汽器中冷凝成水,通过凝结水泵输送到系统给水箱^[10-11]。当发电系统因故障紧急停机或需要检修时,自动放散阀将启动,余热锅炉产生的蒸汽通过原管路进入冷凝回收系统^[12-14]。螺杆膨胀发电机热力利用系统图如图 1 所示。

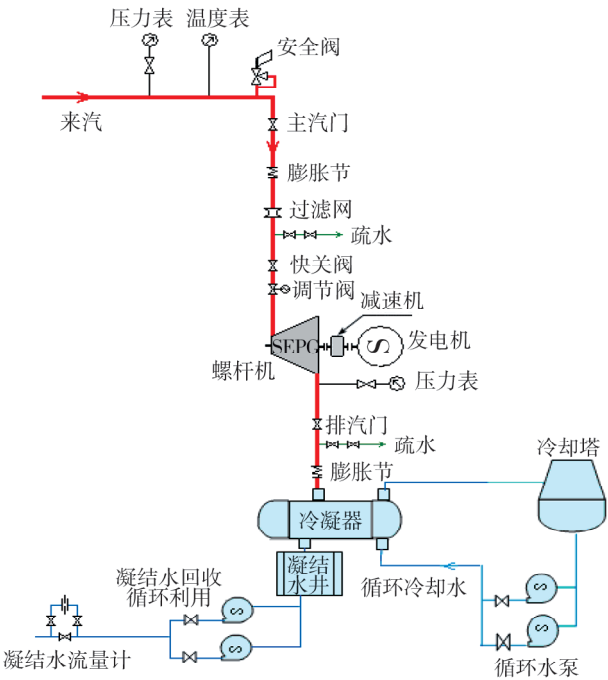


图 1 螺杆膨胀发电机热力利用系统图

3.2 发电系统主要设备及费用

按2.4节的方法编制发电系统主要设备及费用表,结果如表4所示。由表4可知,发电系统的投资为361.00万元。

表4 发电系统主要设备及费用

序号	设备名称	规格型号	数量	单位	价格/元
1	螺杆机本体	额定功率为500 kW,配套温度、压力、转速仪表	1	套	
2	发电机	额定功率为500 kW,高压发电机	1	台	
3	减速机	传输功率为800 kW,速比为2.0	1	台	2 580 000
4	联轴器	连接螺杆机与螺杆机、螺杆机与减速机、减速机与发电机	3	台	
5	可编程逻辑控制器成套柜	机组配套	1	套	
6	并网控制成套柜	机组配套	1	套	
7	电动调节阀		1	个	200 000
8	气动快关阀		1	个	
9	冷凝器	水箱有效容积为2 m ³	1	台	
10	凝结水箱	体积流量为6.3 m ³ /h,扬程为32 m	1	套	
11	凝结水泵	循环水质量流量为500 t/h,温降为10 ℃	2	台	300 000
12	冷却塔	体积流量为470 m ³ /h,扬程为21 m	1	套	
13	循环水泵	水箱有效容积为2 m ³	2	台	
14	其余附件及材料		1	套	100 000
15	建筑工程费		1	项	350 000
16	安装工程费		1	项	80 000

3.3 技术经济分析

螺杆膨胀动力机的持续输出功率为460 kW,年运行时间为7 200 h,电价为0.73元/(kW·h),则年发电收益约为241.79万元(电价数据来源于某生物质电厂)。包含自耗电成本、人员费用、年消耗水成本、折旧等在内的项目年经营成本约为87.96万元。因此,项目每年利润总额为153.83万元,税后利润103.07万元(所得税税率为33%),盈利能力较好。

4 结束语

本文中设计的生物质气机组排气余热发电系统由生物质排气余热利用系统、凝结水回收系统、软化水系统、膨胀螺杆发电机组、电气系统、自控系统等构成。研究结果表明:从工艺角度来看,该方案是可行的;从经济角度来看,该方案是盈利的;在余热锅炉的排气利用方式上,突破了传统的生物质发电设备与余热锅炉一对一配套的模式,显著降低了相关投资成本,可为生物质排气余热的回收利用提供了一种新的选择,对其他形式的排气余热回收利用也具有一定的参考价值,有利于生物质气电站的进一步推广,提高生物质气电站的综合能源效率。

参考文献:

- [1] 闫晶晶.我国生物质能源开发利用的可持续发展评价与实证研究:以北京密云县为例[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
- [2] 赵恩婵,张方炜,赵永红.火力发电厂烟气余热利用系统的研究设计[J].热力发电,2008,37(10):66-70.
- [3] 马有福,杨丽娟,吕俊复.电站锅炉尾部烟气余热利用系统技术经济性比较[J].动力工程学报,2017,37(4):

321-328.

- [4] 胡深亚. 中低温烟气余热利用系统优化和换热特性的研究[D]. 上海:上海电力学院, 2011.
- [5] 张晨旭,韩宇,徐钢,等. 新型燃煤电站低温烟气余热优化利用系统[J]. 电站系统工程, 2014,30(4):33-35.
- [6] 刘永林,屈杰,周科,等. 烟气余热回收利用系统节能效果试验研究[J]. 热能动力工程, 2017,32(4):76-79.
- [7] 鞠硕华,颜丽娟,廉学军. 烟气余热回收利用技术经济分析[J]. 区域供热, 2014(2):20-23.
- [8] 陈晓欣,胥建群,张方,等. 基于 ORC 烟气余热利用系统的工质筛选及节能分析[J]. 汽轮机技术, 2018,60(5):335-339.
- [9] 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.
- [10] 郝卫. 集成旁路烟道技术的高效烟气余热利用系统[J]. 山西电力, 2013(2):44-47.
- [11] 吴维成,谷志卿,鞠朋,等. 工业低温余热回收利用研究进展[J]. 可再生能源, 2024,42(8):1096-1103.
- [12] 王新军,蔡艳平,曹继平. 柴油机组废气能量联合回收系统的设计与应用[J]. 柴油机设计与制造, 2024,30(1):18-20.
- [13] 刘向东. 饱和蒸汽汽轮机发电技术在电炉炼钢烟气余热回收中的应用[J]. 东方汽轮机, 2023(4):15-17.
- [14] 王必. 烟气余热回收技术在垃圾发电密封系统中的应用[J]. 电子技术, 2023,52(7):322-324.

Engineering application of waste heat power generation from exhaust of biomass gas generator sets

SHAO Jianbo

Shengli Oilfield Shengli Power Machinery Group Co., Ltd., Dongying 257092, China

Abstract: In order to efficiently recover high-temperature exhaust heat from biomass gas generator sets and use it for power generation, three exhaust heat recovery and utilization schemes are designed: one boiler for each unit, solo boiler for multiple units (exhaust is firstly mixed before entering the boiler), and solo boiler for multiple units (exhaust enters the boiler before being mixed). Through comprehensive analysis and evaluation of exhaust recovery methods, boiler structures, and economic benefits, the parameters of the main system and key equipment selection are determined, and the optimal scheme is selected. The results show that the overall cost of “solo boiler for multiple units (exhaust enters the boiler before being mixed)” is relatively low, the exhaust do not interfere with each other, and the annual profit is high, which effectively improves the power generation efficiency of biomass gas power plants and reduces the energy consumption of enterprises.

Keywords: power engineering; exhaust flow; waste heat conversion; waste heat power generation

(责任编辑:臧发业)