

doi: 10.3969/j.issn.1672-0792.2017.05.010

秸秆气化外燃机热电联产设计方法及计算

赵子东, 阎维平, 王禹朋

(华北电力大学 能源与动力机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了合理高效地利用秸秆气化燃气, 指出了秸秆气化内燃机热电联产的一些弊端与不足, 研究讨论了一种采用斯特林机为原动机的秸秆气化热电联产系统, 可以解决秸秆气化燃气的热值低、焦油含量多的问题, 同时还应用热力学第一定律和第二定律对秸秆气化外燃机热电联供系统进行了热力性能计算。结果显示: 4台50 kW的外燃机系统可以为10 000 m²的6层办公建筑提供足够的热量与电量; 经计算该系统在满负荷运行时, 一次能源利用率良好, 几乎接近于内燃机方案的能源利用率, 表明在能源利用率上外燃机热电联产系统已接近于目前成熟的分布式能源系统。

关键词: 秸秆气化; 热电联产; 外燃机; 热力性能

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0792(2017)05-0050-05

Design Method and Calculation of External Combustion Engine Cogeneration Based on Straw Gasification

ZHAO Zidong, YAN Weiping, WANG Yupeng

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to use straw gasification gas reasonably and efficiently, some drawbacks and shortcomings of straw gasification internal combustion engine cogeneration are pointed out in this paper. A straw gasification cogeneration system using stirling machine as a prime mover is discussed, which could solve some problems of the low calorific value and high tar of straw gasification gas. At the same time, the calculation for thermodynamic performance of the straw gasification combined heat and power cogeneration system was carried out by using the first and second laws of thermodynamics. The results show that those four sets of 50 kW external combustion engine systems can provide enough heat and electricity for the 10000m² 6-storey office buildings. When the system is running at full capacity, the primary energy efficiency is better, and is almost close to the internal combustion engine program energy efficiency, which indicates that the external combustion engine cogeneration system is close to the current mature distributed energy systems in energy efficiency.

Key words: straw gasification; cogeneration; external combustion engine; thermal performance

0 引言

国内生物质资源蕴含丰富, 秸秆占据很大比例, 其年产量达5亿t(干质量), 可供青贮的茎叶等鲜料约10亿t。随着生活水平的提高, 农民已

不燃用秸秆, 往往在田间就地焚烧处理, 产生大量的烟尘, 造成了严重的大气污染。此外, 秸秆是生物质能的重要载体, 具有含水量大、能量密度低、分布不集中的特点。

秸秆发电是目前提高秸秆中生物质能利用率的有效方法, 包括秸秆直燃发电和秸秆气化发电两种技术。秸秆直燃发电效率仅为14%~25%, 但输出功率较大, 秸秆气化发电的发电效率可达

收稿日期: 2016-10-28。

30%~40% ,是一个高效的发电技术 ,而且气化炉和内燃机的工作温度较低 ,可以减少 NO_x 和 SO_2 等气体污染物的生成 ,符合节能减排的要求^[1-2]。目前 ,国内生物质能发电整体技术水平和发达国家相比还存在一定差距 ,生物质直燃发电的锅炉、燃料输送系统等技术和设备仍靠进口 ,核心技术的缺乏导致国内生物质发电企业长期受制于国外^[3]。秸秆气化发电主要使用内燃机 ,系统简单 ,设备较少 ,但也存在着难以克服问题:秸秆气化产生的燃气焦油含量较多 ,必须经过处理才能在内燃机燃烧做功发电 ,生物质能不能够充分利用;秸秆气化产生的燃气属于低热值气体 ,热值约为 $5 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$,远低于内燃机的设计燃气热值 ($20 \text{ MJ}/\text{Nm}^3 \sim 30 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$) ,而且燃气的热值随秸秆的品质波动较大 ,易使发电系统效率大幅下降 ,工作不稳定 ,也易降低内燃机的使用寿命。

本文探讨了一种秸秆气化发电技术 ,能够在一定程度上解决上述问题 ,充分利用秸秆中的生物质能。在该技术中 ,用外燃机(斯特林机)替代内燃机作为原动机。国外已有现成的外燃机发电机组进行发电 ,A. Gaun 和 E. Schmautzer 应用德尔菲法对生物质直燃的热气机微型热电联供系统进行分析^[4]。2005 年 ,采用清洁气体燃料的斯特林热机开始用于商业化 ,其发电功率为 55 kW ^[5]。一家德国公司自 2004 年开始销售采用 α 型斯特林热机的微型热电联供系统 ,该系统使用的斯特林热机设置两个气缸 ,工质压力为 $3.5 \sim 150 \text{ MPa}$,输出电功率 $2 \sim 9 \text{ kW}$,热能 $8 \sim 26 \text{ kW}$,改良部分系统被使其可以利

用生物质气^[6]。丹麦技术大学研发的微型热电联供系统 ,采用 β 型斯特林热机 ,氢气作为工质 ,生物质气作为热源。在设计工况下 ,输出电功率 8.1 kW ,热量 24.9 kW ,目前还未投入市场^[7];而在国内外燃机发电机组只是出于研究阶段 ,如孔祥强^[8]等人 ,以天然气作为能源 ,以热气机为动力设备进行研究。外燃机对燃气的品质要求不高 ,只要燃烧烟气的温度大于 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 即可工作^[9] ,此外 ,燃料在外缸接近大气压力下燃烧 ,不需要压气机 ,一般风机即可满足要求。因此 ,基于外燃机的秸秆气化发电技术可以克服焦油含量高、燃气热值不稳定的问题 ,使能量能够充分利用 ,符合“温度对口 ,梯级利用”的原则^[10]。

1 外燃机热电联产系统

该系统的其他主要设备包括生物质气化炉、燃烧器、发电机 ,还包括换热器、引风机及管道等 ,在整个系统中 ,外燃机作为原动机发电 ,外燃机冷却水经过热交换器加热 ,供给热用户。采用固定床气化炉气化的燃气 ,气体发生之后没有使用净化过滤装置 ,这是由外燃机对燃料适应性极强的特点决定的。减少净化过滤装置不仅可以降低初投资 ,还可以提高可靠性 ,节省维护成本;更重要的是可以减少占地面积 ,使得该系统可以做得紧凑 ,而且由于外燃发电机组的振动小噪声低 ,更适合应用于大中城市中心区域的建筑。其工作原理如图 1 所示。

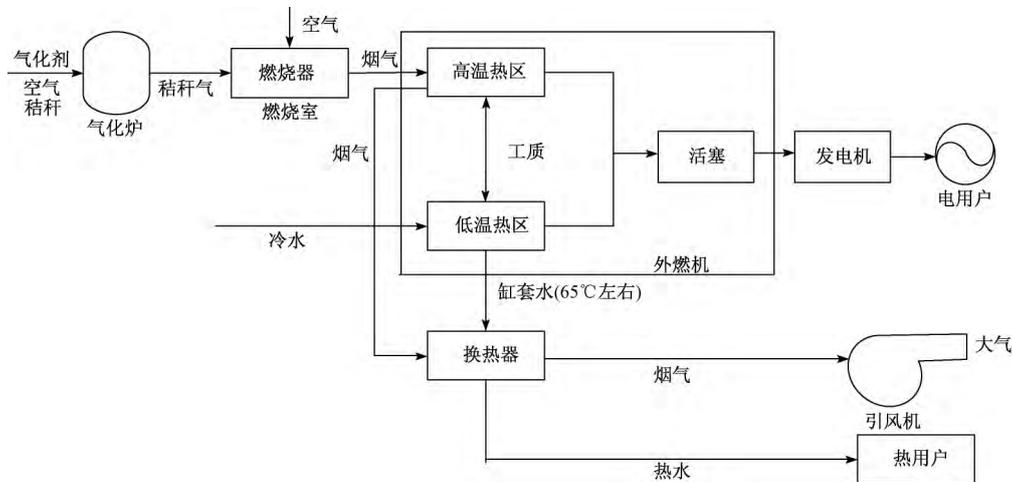


图1 秸秆气化外燃机热电联供系统工作原理

秸秆在气化炉中气化 ,气化产生的气化气被送入燃烧室燃烧 ,产生的热烟气被送入外燃机做

功发电,满足用户的电负荷需求,而热烟气和冷腔冷却水进入换热器,产生的热量用来满足用户的热负荷需求。此外,该系统也与公共电网并网,当所需电负荷较大时,可以从公共电网获得电能。

2 系统采用斯特林机的优点

秸秆气化原动机采用外燃机与活塞式内燃机相比,有着诸多优点,适用范围也很广。其工作特性主要有以下几个方面。

2.1 多种燃料的适应性

内燃机使用的燃料大部分是汽油、柴油或是煤气、天然气等液、气体燃料。而由于外燃机的闭式循环部分对外部加热装置的热源形式无特殊要求,凡是在400℃以上的任何形式的发热装置都可以成为外燃机外部加热系统的热源,因此外燃机是名副其实的多种燃料发动机。

2.2 排气污染低

内燃机燃料燃烧温度高,会产生CO、NO_x和SO₂等气体,所以在排气中会产生一定的有害成分。和内燃机相比,外燃机的燃烧是接近于大气压的压力下连续进行的,燃料与空气的混合良好,而内燃机的间断燃烧对燃烧反应是不利的。由于燃烧室在接近大气压条件下,接近于完全燃烧,结果使排气中的NO_x、CO和碳颗粒很少。

2.3 较高的热转换效率

外燃机的效率主要决定于循环温度比、工质的流阻损失和机械效率。根据现有水平,外燃机的有效效率在32%~38%的范围内,高的可达40%。

3 系统的热力性能计算

3.1 研究对象

本文的研究对象是华北地区的10000m²的6层办公建筑,砖混结构,建筑物檐高19.8m,层高3.6m,坐北朝南,综合窗墙比为0.21,体形系数为0.17。^[11]

根据建筑的冷热电负荷,由联供系统各设备的性能参数计算外燃机应提供的电量和余热量,得到办公楼的热需求和电需求的全年延时曲线如图2所示。

根据全年延时曲线,使联供系统的驱动设备

全年中最大化地运行在满负荷状态下,经过对负荷与时间积的最大值的求解,计算得到点A(1173,301)和点B(2088,296)分别为热电负荷曲线下的最大面积,因此,在以基荷定容量的设计方案中,驱动装置在以热定电模式下的最大回收热量为301kW,在以电定热模式下的最大发电量为296kW。本文按照热需求来配置外燃机容量。

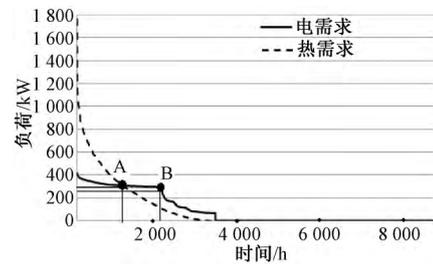


图2 办公楼热电需要量的全年延时曲线

根据全年负荷延时曲线得到A点,此时,热电联供的最大回收热量为301kW,由此根据能量平衡关系可计算求得外燃发电机组容量,如式(1)。

$$P = \frac{Q\eta_e}{\eta_{re}\eta_b} \quad (1)$$

式中: η_e 为外燃机发电机组发电效率,%; η_{re} 为外燃机发电机组热回收效率,%; η_b 为热交换器换热效率,%。

由于建筑的最大热负荷为1342kW,因此,外燃机发电机组的最大余热量不足以满足用户所需的热负荷。经计算可知,为满足热电联供的最大回收热量,所需外燃发电机组的容量为182.4kW,外燃发电机组的主要参数如表1所示,为方便分析,本文假设设备在运行期间效率不变。根据计算,若满足最大回收热量则需4台4R90GZ型燃气外燃发电机组。

3.2 燃料分析

该系统所采用的秸秆的元素分析及工业分析如表1和表2所示。

表1 秸秆元素分析

项目	$C_{ar}/\%$	$H_{ar}/\%$	$N_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$O_{ar}/\%$	其他/ $\%$
含量	45.30	5.58	0.40	0.10	39.19	9.43

表2 秸秆工业分析

项目	$M_{ar}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{ar}/\%$	$FC_{ar}/\%$	$Q_{ar}/(MJ\cdot kg^{-1})$
含量	5.46	3.97	77.77	12.80	12.56

该系统中,秸秆气化采用固定床气化炉,气化

剂为空气。空气作为气化剂所需的设备少,系统简单 投资较小 但气化燃气中含氮气等不可燃气体较多 因此热值较低 秸秆气化燃气的成分及热值如表 3 所示^[12]。

表 3 秸秆气化燃气成分

项目	CO ₂	C ₂ H ₄	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	LHV
	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	/(kJ·kg ⁻¹)
含量	11.4	1.55	12.9	0.67	49.5	2.28	21.6	5 600

3.3 燃料消耗量及发电量

计算模型为本系统为满足热用户及电用户需求 外燃机所需的热量。按照“以热定电”原则,气化炉气化效率为 72%^[13],单位时间(1 h)所消耗麦秸的质量的计算公式如下:

$$P_e = mQ_{ar}\eta_g\eta_e \quad (2)$$

式中: m 为秸秆单位时间的消耗量, t ; Q_{ar} 为麦秸的发热量, MJ/kg ; η_g 为气化炉气化效率, $%$; η_e 为外燃机发电机组的发电效率, $%$; P_e 为输出电功率, kW 。

由上可得 若满负荷发电 1 h 秸秆气化外燃机发电系统每小时消耗 265.36 kg 的小麦秸秆 此时的发电量为 200 $kW\cdot h$ 。

3.4 一次能源利用率

目前,一次能源利用率(PER)是最常用热力学性能评价指标,也叫做系统热效率或总能利用效率^[14]。一次能源利用率依据热力学第一定律 根据热平衡和热效率的原则,评价系统的能源有效利用情况。通常来说,一次能源利用率并不区分电量、热量和冷量的品质。

一般来说,在热电联供系统中一次能源利用率 η_{PER} 表示为:

$$\eta_{PER} = \frac{Q_{heat} + P_{el}}{Q_{in}} \quad (3)$$

式中: P_{el} 为联供系统发电量, $kW\cdot h$; Q_{heat} 为联供系统供热量, $kW\cdot h$; Q_{in} 为联供系统输入热量, $kW\cdot h$ 。

3.5 烟效率

系统烟效率的定义是系统所收益的各种烟之和与燃料热量烟之间的比值。烟效率也称二次能耗率。一次能源利用率表示系统所利用的能源多少情况,只能代表能源“量”的利用情况,而烟效率能够代表所利用能源“质”的情况,因此烟效率能够更合理地衡量能源的利用

程度,是一个从热力学第二定律角度衡量能源利用情况的重要指标^[15-16]。对于系统热电联产的烟效率可以表示为:

$$\eta_{ex} = \frac{E_w + E_h}{Q_{ge}} \quad (4)$$

式中: η_{ex} 为烟效率, $%$; E_w 为系统总供电量, $kW\cdot h$; E_h 为系统输出热量, $kW\cdot h$; Q_{ge} 为燃料总烟值, kJ 。

其中,热量烟可以表示为:

$$E_h = (1 - \frac{T_0}{T}) Q_1 \quad (5)$$

式中: T_0 为低温热源温度(环境温度), K ; T 为高温热源温度, K ; Q_1 为供热量, $kW\cdot h$ 。

综上,系统热电联产的烟效率如下:

$$\eta_{ex} = \frac{E_w + (1 - \frac{T_0}{T}) Q_1}{Q_{ge}} \quad (6)$$

秸秆气化外燃机电联产系统能效参数见表 4。

表 4 热电联供能效参数

项目	烟/ ($MW\cdot h$)	一次能源消耗 量/($MW\cdot h$)	PER/ $%$	烟效率/ $%$
数值	1 762.11	3 333.19	0.612	0.529

4 内燃机和分供系统计算

对该 10 000 m^2 建筑进行供电与供热,同样可用内燃机电联供系统和分供系统。内燃机、余热锅炉等的参数如表 5 所示,内燃机方案的设备参数根据图 2 热、电负荷全年延时曲线设计;热电分供方案根据传统供能形式,设备容量选择应满足用户全部的冷热电负荷需求。

表 5 设备系统主要参数

项目	单位	数值
内燃机组发电效率	$%$	36.5
缸套水余热回收效率	$%$	25
烟气余热回收效率	$%$	24.5
排烟温度	$^{\circ}C$	500
缸套水进/出口温度	$^{\circ}C$	85/98
余热锅炉效率	$%$	90
电厂和电网总效率	$%$	33
热电联产集中供热效率	$%$	55

根据热力学第一定律计算得到内燃机电联

供系统和分供系统的一次能源利用率,表6为外燃机方案、内燃机方案和热电分供方案的一次能源利用率。

表6 一次能源利用率对比

q	外燃机	内燃机	热电分供
系统输出能量/(MW·h)	2 039.91	1 585	1 525
一次能源消耗量/(MW·h)	3 333.19	2 504	3 199
一次能源利用率/%	0.612	0.63	0.48

5 结论

(1) 秸秆气化外燃机热电联供系统的思路新颖,可以解决当前生物质能利用不充分等问题,该系统是一个节能高效的供能系统,符合“温度对口 梯级利用”的原则。

(2) 外燃机因其对燃气的成分及热值适应性极强,使得低热值、多焦油的生物质气可以被利用,能够形成稳定的能源供应,成功地解决了内燃机热电联供系统在生物质能利用上所出现的问题。

(3) 在满负荷运行时,该系统的热力性能评价指标:一次能源消耗量为3 333.19 MW·h,烟为1 762.11 MW·h,一次能源利用率为61.2%,烟效率为52.9%,表明了秸秆气化外燃机热电联产系统合理性与可行性。

(4) 分析比较三种系统方案,得出分供系统方案的一次能源利用率最低,能源的利用最不充分;内燃机方案的一次能源利用率最高,一次能源被利用的最充分;外燃机方案的一次能源利用率居中,接近于内燃机方案,表明外燃机方案的一次能源利用情况比较好,接近于以内燃机作为原动机的系统,在能源利用率上接近于目前成熟的分布式能源系统,同时克服了内燃机热电联供的一些不足。

参考文献:

[1] 雒廷亮,许庆利,刘国际,等. 生物质能的前景应用分析[J]. 能源研究与信息,2003,19(4): 194-197.

[2] 阴秀丽,周肇秋,马隆龙,等. 生物质气化发电技术现状分析[J]. 现代电力,2007,24(5): 48-

52.

[3] 李春曦,王佳,叶学民,等. 我国新能源发展现状及前景[J]. 电力科学与工程,2012,28(4): 1-8.

[4] 贺星,孙丰瑞. 布雷顿与斯特林联合循环的热力学性能优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2010,37(2): 85-88,112.

[5] SATOU K, OHIWA N. Research and development of Stirling engine power generating system using biomass[J]. Solar Energy,2006(4): 41-48.

[6] NEPVEU F, FERRIEREA, BATAILLE F. Thermal model of a dish/Stirling systems[J]. Solar Energy,2009,83(1): 81-89.

[7] ANGRISANI G, ROSELLI C, SASSO M. Distributed microtrigeneration systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2012,38(38): 502-521.

[8] 孔祥强,王如竹,李瑛,等. 基于热气机分布式冷热电三联供效益分析[J]. 中国建设信息,2005(4): 24-28.

[9] 关海滨,孙荣峰,闫桂焕,等. 生物质气化的分布式冷热电联供系统研究[J]. 农业机械学报,2010,41(11): 98-104.

[10] 吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

[11] 王江江. 楼宇级冷热电联供系统优化及多属性综合评价方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2012: 20-26.

[12] 孟凡彬,杨天华,刘建坤,等. 秸秆成型燃料气化气作为车载燃料的实验研究[J]. 可再生能源,2008,26(6): 48-51.

[13] 刘明. 生物质气化及其燃气燃烧试验研究与分析[D]. 天津:天津大学,2008: 21-30.

[14] 王江江,杨昆,刘娟娟. 生物质燃气冷热电联供系统性能分析[J]. 农业机械学报,2014,45(3): 196-205.

[15] 岳晨,黄锦涛,丰镇平. 楼宇冷热电三联产系统性能研究[C]. 西安:中国工程热物理学会,2004: 258-264.

[16] 杨勇平. 分布式能量系统[M]. 北京:化学工业出版社,2011: 72-76.

作者简介: 赵子东(1990-),男,硕士研究生,主要研究新能源发电技术。