

生物质气对内燃机发电机组特性影响的实验研究

章恺, 刘振峰, 翁一武

(上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海200240)

摘要: 文章以30kW生物质气内燃机发电机组为研究对象, 通过改变CO, H₂, CH₄, CO₂等组分比例配制气体, 来模拟不同生物质气, 并分析生物质气组分和热值对内燃机发电机组启动特性和发电特性的影响。分析结果表明: CO₂的阻燃效果显著, CO₂的比例升高会阻碍内燃机的点火启动, 导致内燃机无法正常工作; H₂的助燃效果显著, 提高H₂的比例可以改善内燃机发电机组的启动特性和发电特性; 内燃机发电机组的最大输出功率随着生物质气热值的增加而上升, 当生物质气的热值大于6.75MJ/m³时, 内燃机发电机组可以达到额定输出功率(30kW); 当生物质气热值相同时, 降低CO₂比例或提高H₂比例, 内燃机发电机组的做功能力将会增强; 内燃机发电机组的发电效率随着输出功率的增加而升高, 燃气消耗率随着输出功率的增加而降低。

0前言

为了应对当今社会面临的能源短缺和环境污染问题, 越来越多的国家开始调整能源结构, 减少对化石燃料的使用, 并大力开发可再生能源。可再生能源包括生物质能、太阳能、风能、海洋能、地热能等, 其中, 生物质能具有储量大、分布广、低污染的特点, 是传统能源良好的替代能源, 因此, 生物质能成为了世界各国研究开发的重点^[1]。

随着生物质能转换技术的发展, 通过生物质能来发电的方式逐渐多样化。我国具有良好的生物质气发电技术基础。早在20世纪60年代, 我国就研制出了谷壳气发电装置, 功率可达60kW^[2]。“十五”期间, 国家“863”计划研制开发了4~6MW的生物质气化燃气-蒸汽联合循环发电系统^[3]。

现阶段, 国内的专家学者们围绕生物质气内燃机发电的相关技术开展了大量研究。在模拟计算方面, 王令金设计、改装了12V190型生物质气发电机组, 设计并标定了适用于低热值燃料的生物质气/空气混合器^[4]。

冯向云建立了生物质气体内燃机燃烧室模型, 利用数值模拟的方法对生物质气体内燃机的燃烧过程进行了模拟分析, 研究结果表明, 生物质气体内燃机的燃烧速度较慢, 后燃现象严重, 动力性能低于天然气内燃机, 但是排放性能优于天然气内燃机^[5]。周洋毅利用GT-
Power软件对生物质气内燃机进行了性能模拟和动力性优化^[6]。

刘长宏针对生物质气体燃料成分的差异对发动机输出功率造成不稳定影响的问题, 提出了一种系统控制方案, 并完成了控制系统的仿真研究。研究结果表明, 该控制系统能够有效改善生物质气体燃料发动机的输出功率, 并具有较好的动态性能和抗干扰性能^[7]。

赖凯提出了一种基于下吸式固定床气化炉的新型生物质冷、热、电联供(CCHP)系统, 通过系统模型的建立与计算,

研究了气

化子系统的气化特

性以及系统在全工况条件下的能量输

出特性、运行经济特性和二氧化碳排放特性^[8]。

在实验研究方面, 樊俊杰以6126型发动机为基础研制了60kW生物质气内燃发动机, 针对生物质气的特性, 对控制模块进行优化设计, 设计了特殊电控混合器

, 并通过连续实验进行了验证^[9]。

李杨通过实验数据对生物质气内燃机和生物质气固体氧化物燃料电池这两种生物质气发电系统的特点进行了研究, 分析了两种生物质气发电方式在不同领域的应用前景^[10]。

张强开展了对190型生物质气内燃机动力性、经济性和排放特性的研究^[11]。

综上所述，国内有关生物质气内燃机发电技术的研究主要集中在模拟计算方面，而在实验方面的研究较少，针对生物质气组分变化对发电机组性能影响的研究更为缺少。因此，本文通过配制不同种类的生物质气进行实验，研究生物质气组分和热值的变化对内燃机组启动特性和发电特性的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料特性分析

生物质气的热值一般为 $4\sim 8\text{MJ}/\text{m}^3$

。不同的生产方式和原料，所获得的生物质气的组分和热值差异很大^[12]

。实验过程中参考棉秆通过

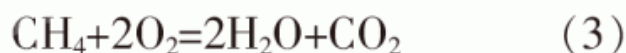
空气气化所得的成分配制了一种生物质气，其组分如表1

所示^[13]。由于棉秆是以空气为气化剂进行气化的，因此，产出的气体中氮气的比例较高。

表 1 生物质气的组分
Table 1 Component of biomass gas

组分	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
比例/%	19.7	11.5	3.92	11.6	1.5	51.78

生物质气完全燃烧时的化学反应方程式如下所示。



1 m³ 的生物质气完全燃烧所需要的氧气量为 11.5%×0.5+19.7%×0.5+3.92%×2=0.234 4 m³, 1 m³ 的生物质气完全燃烧所需要的空气量为 0.234 4/0.21=1.116 m³, 所以理论空燃比(A/F)为 1.116。

生物质气的热值可根据式(4)由各组分的热值相加得到。

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i V_i \quad (4)$$

式中: Q_i 为第 i 种组分气体的低位热值, MJ/m³; V_i 为第 i 种组分气体所占的比例, %。

表 2 给出了几种常用气体燃料的热值。

表 2 常用气体燃料的热值
Table 2 Calorific value of common gas fuel

气体燃料	高位热值/MJ·m ⁻³	低位热值/MJ·m ⁻³
H ₂	12.74	10.79
CO	12.64	12.64
CH ₄	39.82	35.88

由表 1,2 中的数据, 计算得到本实验所配制生物质气的热值 Q 。

$$Q=10.79 \times 11.5\% + 12.64 \times 19.7\% + 35.88 \times 3.92\% = 5.14 \text{ MJ/m}^3 \quad (5)$$

将生物质气按理论空燃比与空气进行混合, 所得混合气的热值记为 Q_1 。

$$Q_1 = 5.14 / (1 + 1.116) = 2.43 \text{ MJ/m}^3 \quad (6)$$

为了研究组分变化对生物质气热值的影响, 以本实验所配制生物质气为例, 假设 CO 的比例为 0~25% 时, H_2 和 CH_4 的比例仍保持 11.5:3.92 不变, 且 CO, H_2 和 CH_4 三者的比例之和保持 35.12% 不变。按同样的方法可以分析得到 H_2 , CH_4 的比例发生变化时, 生物质气热值的变化规律(图 1)。从图 1 可以看出: 当 CH_4 的比例增加时, 生物质气的热值迅速增加, 这是由 CH_4 的高热值所决定的; 与之相反, 当 CO 和 H_2 的比例增加时, 生物质气的热值随之减小, 且 CO 的比例增加时减小缓慢, H_2 的比例增加时减小迅速。

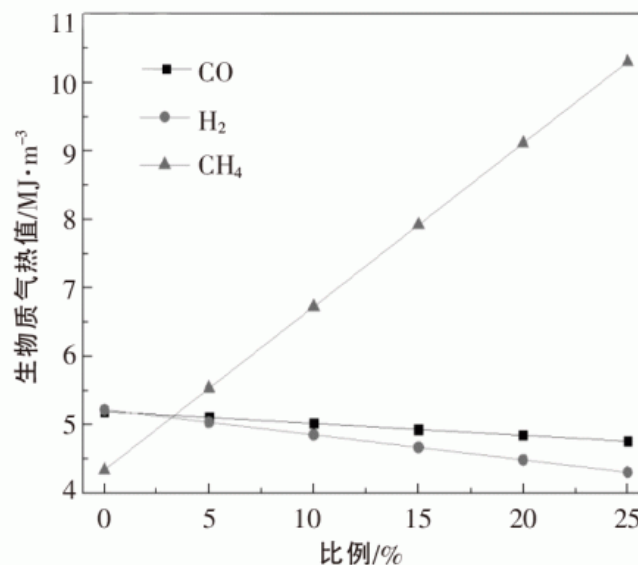


图 1 生物质气热值与组分变化的关系

Fig.1 The calorific value of biomass gas changes with component proportion

1.2 实验步骤

(1) 实验开始前,对管道进行气密性检查,确保管道不漏气,并对各测量部件进行校准,确保测量精度。检查负载柜内各负载开关是否出现短路,确保负载系统不出现漏电现象;检查冷却液和机油是否充足,确保冷却系统能够正常工作。

(2) 实验开始时,先将CO, H₂, CH₄, CO₂和N₂5种气体通入储气罐,在储气罐内配制出成分比例不同的生物质气。

(3) 生物质气配制完成后,打开进气管路的电磁阀,同时使空气调节阀开度较小,保证混合气中具有较大浓度的燃气,以便点火启动。在机组控制面板上按下启动按钮,6s后机组点火启动,如果点火失败,机组停机报警。点火成功后,机组进入怠速运行工况,怠速运行12s后,控制系统会增大节气门开度,提高发动机转速,直至机组达到额定工况。额定工况时,转速为1500r/min。

(4) 待发动机转速达到1500r/min后,通过负载柜加载,同时调整控制柜上的电控旋钮来改变空气调节阀的开度,从而保证合理的空燃比。当机组输出功率增加时,适当提高调节阀开度,使燃气能够充分燃烧,以提高机组的输出功率。

(5) 生物质气中各气体成分的比例可在气体分析仪上读出,输出功率、发电电压和电流可在内燃机控制屏上读出,进气流量可在涡街流量计上实时显示。

(6) 记录实验数据后,将机组先调整为怠速工况运行一段时间,然后再停机。停机之后,调整生物质气组分比例,配制出新的生物质气,再重复进行上述步骤。

(7) 实验结束后,确保各阀门和电源开关处于关闭状态。

2 实验设备

实验使用的内燃机发电机组是由6105型柴油发动机改造而来,取消了原机的燃油系统,代之以燃气系统(包括点火器、电控混合器、调压阀、进气管、电磁阀等)。发动机的机体、曲柄连杆机构、冷却系统和润滑系统基本保持不变。生物质气内燃机发电机组系统的示意图、实验现场图和内燃机实物图分别如图2,3所示。

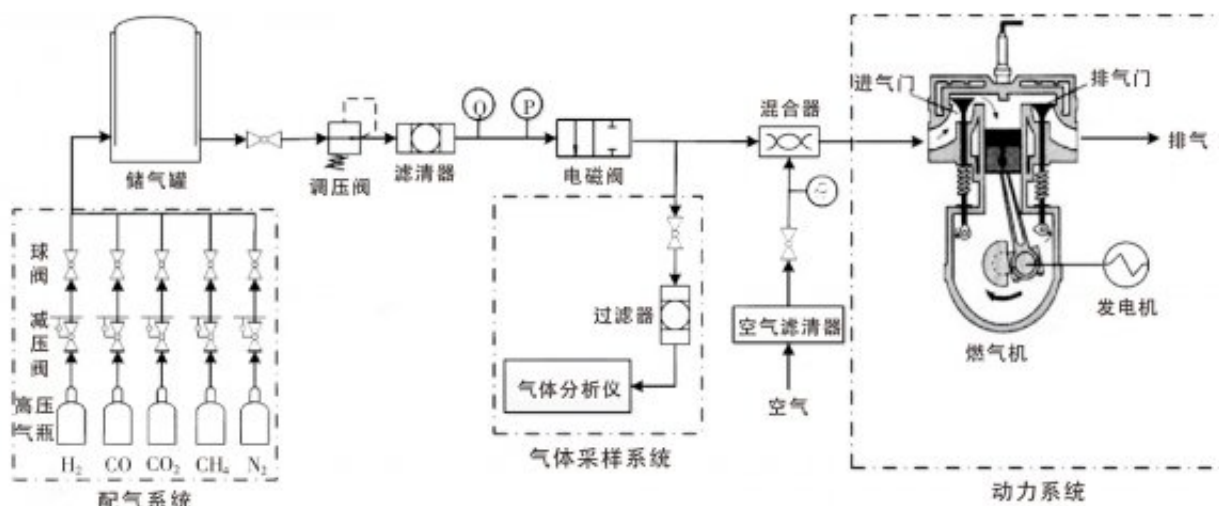


图2 生物质气内燃机发电机组系统的示意图

Fig.2 Diagram of the biomass gas internal combustion engine generator system



(a)发电机组系统现场图



(b)内燃机实物图

图3 生物质气内燃机发电机组系统实验现场及内燃机实物图

Fig.3 Experimental table of biomass gas internal combustion engine system and diagram of internal combustion engine

2.1 生物质气内燃发电机

额定功率为30kW的生物质气内燃发电机为六缸四冲程直列立式，该发电机通过火花塞进行点火，并用水进行循环散热，额定转速为1500r/min。发电机组的燃气供给系统安装有压力调节阀和混合器，以保证燃气的进气压力稳定，同时可以合理控制空燃比。生物质气内燃发电机的主要技术参数如表3所示。

表 3 生物质气内燃发电机的技术参数

Table 3 Technical parameters of biomass gas internal combustion generator

参数	数值
发电机组的型号	30GF
发动机型号	R6105D
型式	直列立式、水冷、四冲程、自然吸气
气缸数	6
气缸直径/mm	105
活塞行程/mm	135
总排量/L	6
点火系统	ECU 点火
点火电源	
点火次序	1-5-3-6-2-4 (气缸排列从水箱端起)
点火方式	火花塞电点火
旋转方向	逆时针(从输出端视)
起动方式	24 V 直流电动机起动
额定功率/kW	30
额定转速/r·min ⁻¹	1 500
额定电压/V	400
额定电流/A	54

2.2主要配件

系统的主要配件包括Gasboard-3100型气体分析仪、CKLUGB-DC-D50-W型涡街流量计、AMCO1803型调压阀和SYF02-08型电控空气调节阀等。

3结果与分析

3.1组分变化对内燃机发电系统启动特性和发电特性的影响

通过改变CO₂和H₂两种气体的比例，来研究生物质气组分变化对内燃机发电系统启动特性和发电特性的影响。

3.1.1 CO₂组分变化的影响

选取CO₂组分在20%~65%内变化，来研究CO₂组分变化对发电机组启动特性和发电特性的影响。为了排除H₂和CO的影响，控制H₂的比例不超过1%，CO的比例不超过5%，将CH₄作为生物质气中主要的可燃性气体。实验结果如表4所示。从表4可以看出，当CO₂的比例超过40%时，机组均无法正常点火启动。气体1中CH₄的比例为19.54%，气体1的热值为7.63MJ/m³，高于其他3种气体。发电机组在采用高热值生物质气的情况下，都难以实现点火启动，可见CO₂的阻燃效果显著。当生物质气中的可燃性组分主要为CH₄时，要实现机组的正常点火启动，CO₂的比例必须降低到20%以下，如气体4中CO₂的比例19.4%，CH₄的比例为19.10%，气体4的热值为7.02MJ/m³，此时，机组能够点火启动，实现1500r/min的空载运行，而无法输出功率。这反映了CO₂对气体燃烧具有显著的抑制作用。

表 4 CO₂ 对发电系统启动特性和发电特性的影响

Table 4 The influence of CO₂ on the ignition start and power characteristics of the system

生物质 气序号	气体比例/%					热值 MJ/m ³	运行 状态
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	其他		
1	64.31	4.86	0.31	19.52	11.00	7.63	无法启动
2	63.00	3.80	0	15.00	18.00	5.85	无法启动
3	41.80	1.83	0.33	14.13	41.91	5.32	无法启动
4	19.40	0.70	0.89	19.10	59.91	7.02	空载运行

注：其他气体中，主要成分为 N₂、O₂ 和 C_nH_m 组分之和不超过 1%。

3.1.2 H₂组分变化的影响

为了研究H₂组分的变化对发电机组启动特

性和发电特性的影响，固定CO₂的比例为40%左右，并控制其他可燃性气体的比例，其中，CO的比例为7%~10%，CH₄的比例为9%~13%。在此基础上，将H₂组分的比例调整为0~15%进行实验。实验结果如表5所示。

表 5 H₂ 对发电系统启动特性和发电特性的影响

Table 5 The influence of H₂ on the ignition start and power characteristics of the system

生物质 气序号	气体比例/%					热值 MJ/m ³	输出功率 kW
	H ₂	CO ₂	CO	CH ₄	其他		
1	0.47	40.43	9.72	12.76	36.62	5.84	无法启动
2	9.00	39.90	6.80	11.70	32.6	6.00	6
3	14.86	40.50	7.98	9.38	27.28	5.95	18

从表5可以看出，3种气体的热值相近，3种气体的CO，CH₄和CO₂

组分比例也相近，可以认为在这

种情况下，发电机组的启动和发电特性主要与H₂组分比例有关。当H₂

组分比例为0.47%时，气体的热值为5.84MJ/m³，机组无法正常点火启动；当H₂

组分比例提高到9%时，机组能够顺利点

火启动，输出功率为6kW；当H₂

组分比例，发电机组的

启动特性将会显著改善，做功能力也会有很大的提

高。这是因为H₂的着火范围宽、火焰传播速度快、点火能量低，相比于其他燃料具有更高的燃烧效率。

3.2热值对最大输出功率的影响

当生

物质气的

热值改变时，机组

做功的能力会随之改变。实验过程中

控制生物质气中各组分比例，其中，CO₂的比例为10%~22%，H₂的比例为10%~20%，CH₄

的比例为3%~14%，CO的比例为10%~21%，其余均为氮气。在上述范围内配制不同热值的生物质气进行实验，实验结果如表6所示。根据实验结果绘制出的最大输出功率与进气热值的关系图如图4所示。

表 6 热值对最大输出功率的影响

Table 6 The influence of biomass gas calorific value on maximum power output

生物质 气序号	气体比例/%					热值 MJ/m ³	输出功率 kW
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	其他		
1	10.25	17.59	10.75	5.39	56.02	4.37	15.00
2	10.49	17.38	19.60	3.79	48.74	4.78	15.00
3	13.55	19.69	14.47	4.76	47.54	4.96	15.00
4	15.54	18.90	10.55	6.35	48.67	5.36	15.00
5	15.27	13.27	18.37	3.95	49.15	5.30	18.00
6	17.17	21.18	12.71	4.99	43.93	5.31	18.00
7	20.81	17.64	16.25	3.42	41.88	5.59	18.00
8	18.92	18.55	13.04	5.25	44.24	5.66	18.00
9	16.49	19.29	11.86	7.24	45.13	5.94	18.00
10	17.45	18.27	10.28	7.66	46.34	6.04	18.00
11	17.92	17.30	18.20	4.61	41.97	5.86	21.00
12	20.44	16.37	19.59	3.36	40.24	5.87	24.00
13	14.66	18.64	10.84	9.22	46.65	6.31	24.00
14	15.16	15.48	17.69	6.88	44.79	6.27	27.00
15	15.65	16.90	14.42	7.77	45.27	6.30	27.00
16	14.30	11.30	16.20	8.11	50.09	6.44	27.00
17	18.85	17.70	13.82	7.91	41.73	6.69	27.00
18	14.82	14.71	19.64	7.74	43.09	6.74	30.00
19	16.30	19.38	17.26	8.88	38.19	7.08	30.00
20	18.90	14.80	18.84	8.45	39.01	7.42	30.00
21	17.25	10.21	19.92	9.07	43.55	7.55	30.00

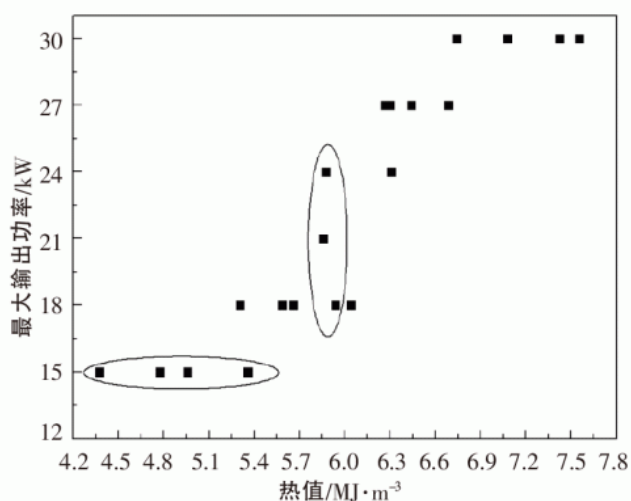


图 4 最大输出功率随生物质气热值变化的规律

Fig.4 Maximum power output changes with the calorific value of biomass gas

由图4可知，最大输出功率随着

生物质气热值的增加而增加，当热值大于 $6.75\text{MJ}/\text{m}^3$

时，最大输出功率可以达到额定的 30kW 。横向观察可以发现，当生物质气热值处于某个范围内时，最大输出功率保持不变，如当生物质气热值为 $4.35\sim 5.40\text{MJ}/\text{m}^3$

时，最大输出功率保持在 15kW 。纵向观察可发现，当生物质气热值处于某个数值附近时，会出现不同的最大输出功率，如当生物质气热值约为 $6.0\text{MJ}/\text{m}^3$

时，最大输出功率会出现大幅度变化，最小为 18kW ，最大可达 24kW 。这是因为，一方面，输出功率是每隔 3kW 逐步增加，由于机组效率的影响，导致发电机组每个输出功率都有对应的最低热值和最高热值，当生物质气热值处于两者之间时，最大输出功率保持不变；另一方面，在热值相同的情况下，气体组分的影响较大，这就导致生物质气热值相同时会出现不同的最大输出功率。由于 H_2

的助燃效果显著，燃烧效率较高，而 CO_2

的阻燃效果明显。因此，在生物质气热值相同的情况下，

H_2 组分的比例越高， CO_2 组分的比例越低，机组的最大输出功率将会越大。

3.3效率特性分析

为了研究机组发电效率随输出功率的变化关

系，选取一种生物质气进行实验（该生物质气的

热值为 $7.17\text{MJ}/\text{m}^3$ ， CO 的比例为 19.98% ， CO_2 的比例为 15.89% ， H_2 的比例为 18.44% ， CH_4

的比例为 7.47% ，其余均为氮气）。实验过程中，依次增加电阻丝负载，使机组的输出功率在 $6\sim 30\text{kW}$ 内变化，通过实验结果可绘制出效率特性曲线和燃气消耗率曲线，分别如图5，6所示。

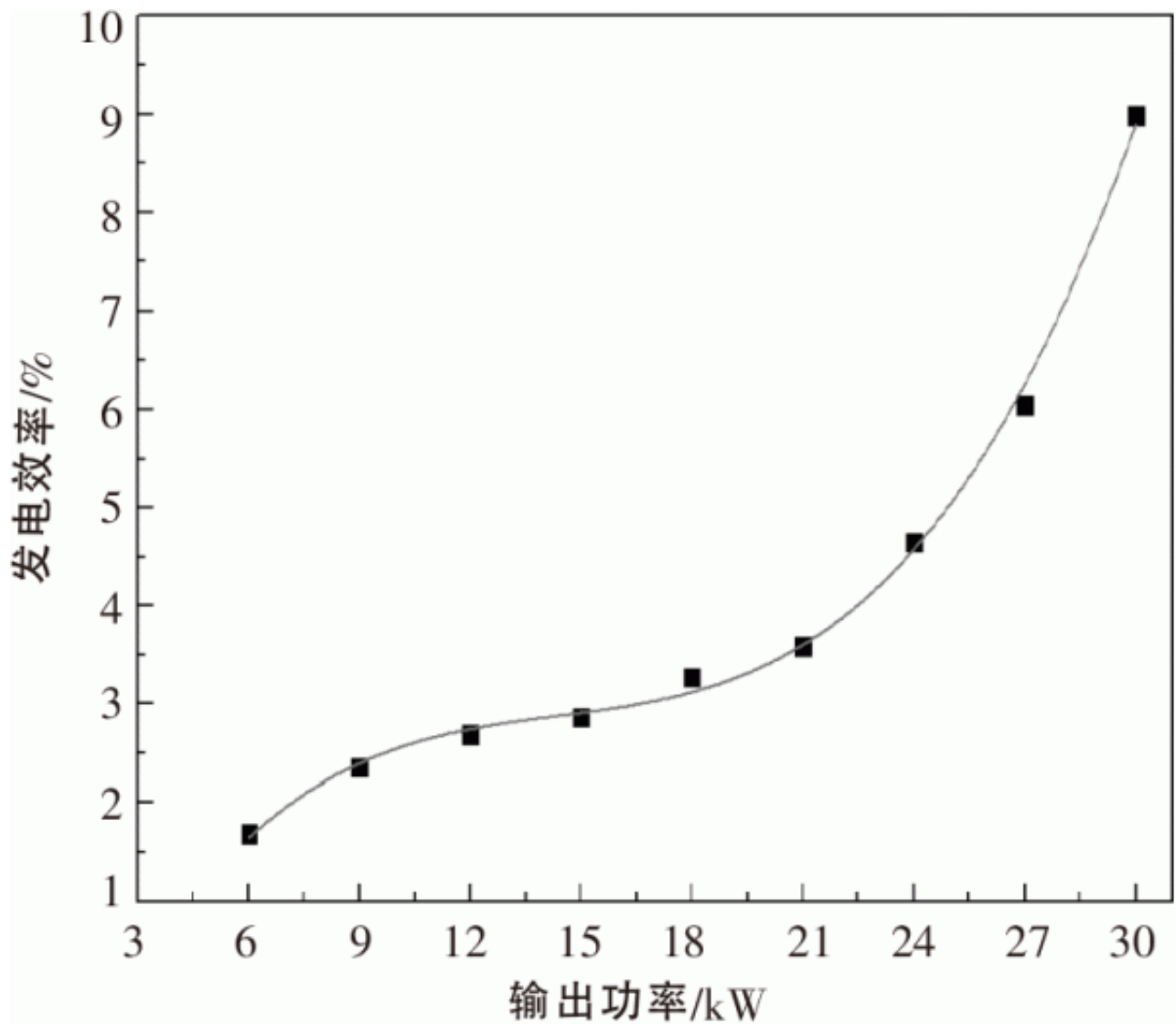


图 5 发电效率与输出功率的关系

Fig.5 Power generation efficiency changes with power output

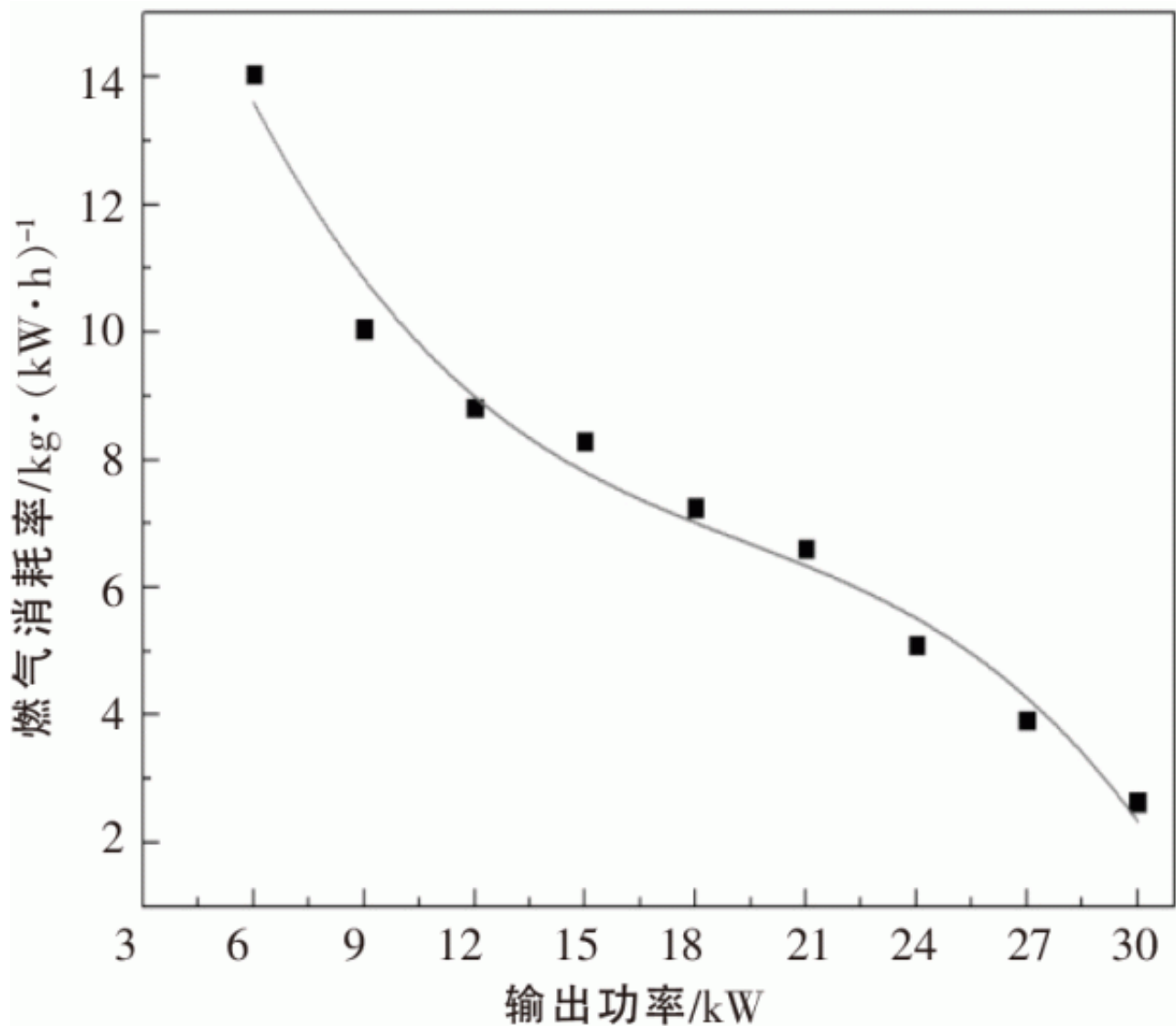


图 6 燃气消耗率与输出功率的关系

Fig.6 Gas consumption rate changes
with power output

从图5可以看出,随着输出功率的增加,机组的发电效率呈逐渐上升的趋势。当输出功率小于21kW时,发电效率上升缓慢;当输出功率大于21kW时,发电效率上升迅速。从图6可以看出,随着输出功率的增加,燃气消耗率呈逐渐下降的变化趋势。这是因为: 本实验的机组是在1500r/min的定转速条件下运行,机械损失几乎不变,因此,随着输出功率的上升,发电效率升高,燃气消耗率降低; 发电机组拥有一套电控系统来调整节气门开度,当输出功率较低时,节气门开度较小,换气损失较大,发电效率较低,燃气消耗率较高; 生物质气的热值较低,当输出功率较低时,进气量较少,缸内压缩温度较低,造成点火滞燃期较长,燃烧速率缓慢,不利于燃气充分燃烧和膨胀做功,因此,燃气消耗率较高。

4总结

CO₂
会抑制发电机组的点火启动,阻燃效果非常明显,当CO₂

的比例超过40%时, 机组无法点火启动; 当可燃性组分主要为 CH_4 时, 为保证机组能够正常点火启动, CO_2 组分的比例需要低于20%。与 CO_2 相反, H_2 的助燃效果相当显著, 即使在 CO_2 的比例较高的条件下, 适当提高 H_2 的比例, 机组便能点火启动; 随着 H_2 组分比例的增加, 机组的做功能力迅速增强。

随着生物质气热值的增加, 发电机组的最大输出功率将会随之上升。当生物质气热值大于 $6.75\text{MJ}/\text{m}^3$

时, 发电机组的最大输出功率可以达到额定功率(30kW)。由于输出功率是每隔3kW逐步增加, 因此, 机组每个输出功率都有对应的最低热值和最高热值, 当生物质气热值处于两者之间时, 输出功率保持不变。当生物质气热值相同时, 提高 H_2 组分或者降低 CO_2 组分的比例, 机组的最大输出功率均会提高。

机组的发电效率随输出功率的增加而增加, 当输出功率小于21kW时, 发电效率上升缓慢; 当输出功率大于21kW时, 发电效率上升迅速。燃气消耗率随输出功率的增加而降低。

参考文献:

- [1]魏伟, 张绪坤, 祝树森, 等. 生物质能开发利用的概况及展望[J]. 农机化研究, 2013, 35(3): 7-11.
- [2]王文, 万显君, 别如山. 简述生物质气化发电现状及发展趋势[J]. 新农村: 黑龙江, 2016(25): 34.
- [3]杨永亮. 浅谈生物质气化在发电技术中的应用和潜力[J]. 经济技术协作信息, 2017(16): 74.
- [4]王令金. 大型火花点火生物质气发电机组的研究开发[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5]冯向云. 生物质气体内燃机燃烧特性模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6]周洋毅, 王彦岩, 季周盈, 等. 分布式供能系统中生物质气内燃机的动力性优化研究[J]. 内燃机与动力装置, 2015, 32(3): 29-33.
- [7]刘长宏, 徐国凯, 宋鹏, 等. 一种生物质气体燃料发动机控制系统及其仿真研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(4): 608-611.
- [8]赖凯, 吴静怡, 李春煜. 基于生物质的冷、热、电联供系统全工况特性研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(12): 1744-1750.
- [9]樊俊杰. 60kW生物质气内燃发电机组控制系统设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [10]李杨, 翁一武, 屠恒勇. 两种低热值生物质气发电方式的实验研究[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1938-1942.
- [11]张强, 李娜, 王令金, 等. 190型裂解生物质气内燃机性能研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 50-53.
- [12]阳永富, 申青连, 段继宏, 等. 生物质气化发电技术[J]. 内燃机与动力装置, 2006(4): 47-51.
- [13]马隆龙. 生物质气化技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/144831.html>