

生物质气参数对燃煤耦合生物质 发电机组影响研究

王一坤^{1,2}, 邓磊³, 常根周⁴, 柳宏刚¹, 吕凯¹, 聂鑫¹, 张广才¹
(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.华能长江环保科技有限公司, 北京 100031;
3.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
4.河北邯峰发电有限责任公司, 河北 邯郸 056200)

[摘要] 为了掌握掺烧生物质气对燃煤耦合生物质发电燃煤机组运行参数的影响, 针对某电厂 300 MW 等级燃煤机组, 以能量守恒定律为基础, 通过锅炉热力校核和机组热力系统计算分析了机组在 BMCR、75%THA、50%THA 和 30%THA 工况下, 掺烧生物质气后燃煤机组的锅炉热效率、发电煤耗、烟气温度和烟气量等参数的变化。结果表明: 掺烧生物质气会导致锅炉热效率下降, 燃煤消耗量减少, 理论燃烧温度降低, 排烟温度升高和烟气量增大, 变化幅度均随着生物质气掺烧量的增加而增大; 建议掺烧生物质气的温度低于 500 °C, 全负荷热量输入比小于 20%。

[关键词] 生物质; 生物质气; 耦合发电; 燃煤锅炉; 煤耗; 热效率

[中图分类号] TK6; X705 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202007076

[引用本文格式] 王一坤, 邓磊, 常根周, 等. 生物质气参数对燃煤耦合生物质发电机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 34-40. WANG Yikun, DENG Lei, CHANG Genzhou, et al. Influence of biomass gas parameters on coupled coal-fired biomass generation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 34-40.

Influence of biomass gas parameters on coupled coal-fired biomass generation

WANG Yikun^{1,2}, DENG Lei³, CHANG Genzhou⁴, LIU Honggang¹,
LYU Kai¹, NIE Xin¹, ZHANG Guangcai¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Yangtze Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100031, China;
3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
4. Hebei Hanfeng Power Generation Co., Ltd., Handan 056200, China)

Abstract: In order to study the influence of blending biomass gas on operation parameters of coal-fired boiler, thermal calculation for a 300 MW unit was carried out based on energy conservation equation. Under the load of BMCR, 75%THA, 50%THA and 30%THA, the influences of blending biomass gas on boiler parameters, such as boiler thermal efficiency, unit coal consumption, flue gas temperature, and gas flow, were investigated, via boiler thermodynamic calculation and unit thermal system analysis. The results show that, blending biomass gas will decrease the boiler efficiency, coal consumption and theoretical combustion temperature, and increase the exhaust gas temperature and quantity. The change will increase with the blending proportion of biomass gas. It suggests that the temperature of blended biomass gas be lower than 500 °C, and the heat input ratio of full load be less than 20%.

Key words: biomass, biomass gas, coupled power generation, coal-fired boiler, coal consumption, thermal efficiency

生物质能是指植物通过光合作用固定的太阳能, 具有来源广、可再生、成本低等诸多优点, 是人类最早利用的能源形式。随着人类工业化进程的加快, 能源低碳化逐渐成为人类发展的共识。生物

质能是当今仅次于石油、煤炭、天然气的第四大能源, 统计数据显示, 2018 年全球生物燃料产量已达 $95\ 371 \times 10^3$ t 油当量^[1], 而我国 2019 年第一季度的生物质发电装机容量已达 1 878 万 kW, 占装机

收稿日期: 2020-07-26

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ18-H09)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd.(HNKJ18-H09)

第一作者简介: 王一坤(1982), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生物质耦合发电、可燃废弃物利用、锅炉机组运行优化, apolloking@163.com。

容量的1%^[2]。目前我国发电集团面临着巨大的碳减排压力,国务院印发的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》规定,到2020年,大型发电集团CO₂排放指标需小于550 g/(kW h)。生物质燃料的“零碳排放”特性对于发电企业实现CO₂减排具有重要意义。

目前生物质能发电的形式主要有直接燃烧和耦合燃烧2种,耦合燃烧因其投资低、灵活性好和经济性显著成为了我国电力企业的关注热点。生物质气化后耦合发电因便于计量、灰渣可综合利用等优点,成为我国在役的生物质耦合发电项目的主流方案。

Nihad Hodzic 等^[3]研究了松木与天然气同时作为再燃燃料对NO_x排放特性的影响。Han 等人^[4]模拟了2 MW 燃油锅炉使用生物质气作为再燃燃料的燃烧特性。Zhao 等人^[5]在管式炉上研究了生物质气作为再燃燃料对NO_x的影响。王琨^[6]、王凯^[7]、张小桃^[8-13]、徐浩鹏^[14]、闻猛^[15]和黄勇^[16]等模拟研究了生物质气与煤粉混燃或生物质气作为再燃燃料的锅炉燃烧及污染物排放特性,讨论了生物质掺烧比例、生物质气特性以及增加燃尽风对运行参数的影响。王一坤等^[17]分析了330 MW 机组耦合20 MW 生物质气化项目对机组受热面安全性及脱硫、脱硝系统的影响。李登山等^[18]开发了针对生物质燃气与煤粉耦合发电的数值燃烧模型。陈宣龙等^[19]通过试验研究了640 MW 燃煤机组掺烧生物质气后的SO₂和NO_x的排放特性,验证了掺烧生物质气带来的污染物减排效应。这些研究大多以模拟和试验为主,主要关注掺烧生物质气后对锅炉燃烧温度、污染物排放等参数的影响,但对于锅炉热效率、机组煤耗、烟气量等关键参数变化鲜有关注。

本文在作者已有的研究基础上^[17],针对某电厂300 MW 等级燃煤机组,以能量守恒定律为基础,通过锅炉热力校核^[20]和机组热力系统能耗计算^[21],对掺烧生物质气后的机组进行了全负荷计算,分析了生物质气参数(热值、温度、掺烧量)对锅炉热效率、发电煤耗、烟气温度及烟气量等参数的影响,得出了生物质气参数在全负荷下对机组经济性指标的影响规律,并对该影响进行了定量化的评价。

1 机组概况

1.1 锅炉

某电厂锅炉为SG-1025/17.50-M749型、亚临界参数、一次中间再热、自然循环汽包炉。最大连续出力(BMCR)工况为设计参数,最大连续出力时

蒸发量1025 t/h,过热蒸汽温度540 °C,再热蒸汽温度540 °C。锅炉截面尺寸为14020 mm×12350 mm,采用平衡通风、四角切圆燃烧方式。锅炉布置示意如图1所示,锅炉主要性能参数见表1。

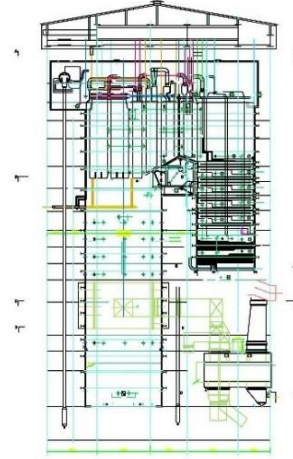


图1 锅炉布置示意

Fig.1 Schematic diagram of the boiler arrangement

表1 锅炉主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of the boiler

项目	BMCR	75%THA	50%THA	30%THA
主蒸汽流量/(t h ⁻¹)	1025	662	441	335
主蒸汽出口温度/°C	540	540	540	540
再热蒸汽流量/(t h ⁻¹)	880.0	582.4	395.6	313.7
再热蒸汽出口温度/°C	540	540	540	535
减温水喷水温度/°C	193	176	160	140
过热器喷水量/(t h ⁻¹)	11.0	43.7	32.4	32.5
炉膛出口过量空气系数	1.25	1.25	1.25	1.35
排烟温度(修正前)/°C	114.8	107.6	107.8	105.9
效率(按低位发热量)/%	93.86	94.18	92.65	92.18

锅炉采用常规II型布置,炉膛上部沿烟气流程,依次布置有墙式再热器、大屏过热器、后屏过热器、屏式再热器、末级再热器和末级过热器,尾部竖井烟道由上到下依次布置有低温过热器和省煤器。

过热器采用喷水+燃烧器摆动调温,共设两级四点喷水:第一级粗调喷水设在低温过热器出口到大屏过热器入口的连接管道上;第二级细调喷水设在后屏过热器出口到末级过热器入口间的连接管道上。再热器则采用典型的摆动燃烧器+过量空气系数方式进行调温。燃烧器可上下摆动20°。

1.2 汽轮机

电厂汽轮机为N300-16.7/538/538型亚临界、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、反动、凝汽式汽轮机,整个通流部分共有38级叶片,其中高压缸1+13级、中压缸10级、低压缸2×7级,低压缸末级动叶

长度为 905 mm。汽轮机 THA 热耗率验收工况额定进汽压力 16.7 MPa、进汽温度 538 °C、进汽流量 913 t/h，运行背压 6 kPa 时，发电机功率为 300 MW。回热系统共设置 8 级回热抽汽，依次供给三级高压加热器、除氧器及给水泵汽轮机和四级低压加热器。典型工况下汽轮机主要设计参数见表 2。

表 2 汽轮机主要设计参数
Tab.2 Main design parameters of the turbine

项目	VWO	75%THA	50%THA	30%THA
发电功率/MW	330	225	150	113
主蒸汽流量/(t h ⁻¹)	1025	662	441	335
主蒸汽压力/MPa	17.5	14.5	9.8	6.2
主蒸汽温度/°C	538	538	538	538
热再压力/MPa	3.71	2.49	1.70	1.31
热再温度/°C	538	538	538	534
一抽压力/MPa	6.76	4.45	3.08	2.38
一抽温度/°C	394.7	378.2	385.1	387.2
二抽压力/MPa	4.07	2.74	1.87	1.44
二抽温度/°C	326.9	314.1	320.1	336.6
三抽压力/MPa	1.88	1.28	0.88	0.68
三抽温度/°C	436.4	438.6	440.2	441.3
四抽压力/MPa	0.90	0.62	0.43	0.33
四抽温度/°C	332.9	336.2	338.6	340.6

2 设计煤质及生物质燃气参数

计算煤质选用实际燃用煤种，生物质气为不同配比成型生物质燃料的气化产物，具体参数见表 3 和表 4。

表 3 煤质参数
Tab.3 The coal quality parameters

项目	数值	项目	数值
w _{ar} (C)/%	50.25	w _{ar} (A)/%	34.56
w _{ar} (H)/%	3.08	w _{ar} (M)/%	6.0
w _{ar} (O)/%	4.25	w _{daf} (V)/%	27.87
w _{ar} (N)/%	0.93	Q _{net,ar} /(kJ kg ⁻¹)	19 230
w _{t,ar} (S)/%	0.93		

表 6 掺烧不同温度生物质气计算结果 (BMCR)

Tab.6 Calculation results of the combustion of coal blended with biomass gas at different temperatures (BMCR)

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
排烟温度/°C	118.1	118.2	118.2	117.9	118.1	117.8	117.8	117.8
排烟热损失/%	5.14	5.14	5.14	5.12	5.14	5.12	5.11	5.11
锅炉热效率/%	93.66	93.66	93.66	93.68	93.66	93.68	93.69	93.69
主蒸汽喷水量/(t h ⁻¹)	33.2	33.3	33.4	33.0	33.1	32.7	32.6	32.4
再热蒸汽喷水量/(t h ⁻¹)	6.1	6.1	6.2	6.1	6.0	5.9	6.0	5.9
燃煤消耗量/(t h ⁻¹)	146.11	146.07	146.04	145.95	145.91	145.81	145.73	145.61
生物质消耗量/(m ³ h ⁻¹)	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
生物质热值/(kJ m ⁻³)	5 682	5 682	5 682	5 682	5 682	5 682	5 682	5 682
燃气温度/°C	350	400	450	500	550	600	700	800
发电功率/MW	331.9	331.9	331.9	331.8	331.8	331.8	331.8	331.8
发电煤耗/(g (kW h) ⁻¹)	296.1	296.0	295.9	295.8	295.7	295.5	295.4	295.2

表 4 生物质气参数
Tab.4 The biomass gas parameters

项目	燃气 1	燃气 2	燃气 3	燃气 4
φ(CO)/%	12.40	8.30	17.50	19.15
φ(H ₂)/%	14.10	13.20	4.00	10.13
φ(CH ₄)/%	3.90	3.90	2.40	1.03
φ(C ₂ H ₄)/%	1.80	1.80	1.60	0
φ(CO ₂)/%	16.30	18.00	10.00	5.95
φ(N ₂)/%	37.90	36.80	48.50	43.08
φ(O ₂)/%	0	0	0	0
φ(H ₂ O)/%	13.60	18.00	16.00	20.66
Q _{net,ar} /(kJ m ⁻³)	5 682	5 069	4 532	3 880

3 计算结果与分析

对机组在 BMCR、75%THA、50%THA 和 30%THA 工况下掺烧生物质气进行了锅炉热力校核和机组热力系统能耗计算，计算模型见文献[17,22]，结果见表 5—表 8。进行热力校核计算时假设掺烧生物质气前后的过量空气系数、固体未完全燃烧热损失和化学未完全燃烧热损失均保持不变。

表 5 不同热值生物质气掺烧计算结果 (BMCR)
Tab.5 Calculation results of the combustion of coal blended with biomass gas with different calorific values (BMCR)

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
排烟温度/°C	120.2	120.9	121.0	121.0
排烟热损失/%	5.27	5.32	5.33	5.33
锅炉热效率/%	93.53	93.48	93.47	93.47
主蒸汽喷水量/(t h ⁻¹)	33.80	35.29	35.28	35.55
再热蒸汽喷水量/(t h ⁻¹)	5.60	6.20	6.20	6.44
燃煤消耗量/(t h ⁻¹)	142.86	143.69	144.29	145.04
生物质消耗量/(m ³ h ⁻¹)	20 000	20 000	20 000	20 000
生物质热值/(kJ m ⁻³)	5 682	5 069	4 532	3 880
燃气温度/°C	450	450	450	450
发电功率/MW	331.8	332.0	332.0	332.0
发电煤耗/(g (kW h) ⁻¹)	295.5	297.0	298.2	299.6

表 7 不同工况生物质气掺烧计算结果 (BMCR、75%THA)

Tab.7 Calculation results of the combustion of coal blended with biomass gas under different conditions (BMCR, 75%THA)

项目	BMCR					75%THA				
	排烟温度/℃	118.2	120.2	122.2	124.6	126.5	110.4	112.8	115.6	118.5
排烟热损失/%	5.14	5.27	5.40	5.55	5.68	4.69	4.87	5.05	5.24	5.42
锅炉热效率/%	93.66	93.53	93.40	93.25	93.12	93.98	93.83	93.65	93.46	93.28
省煤器出口烟温/℃	347.8	347.8	347.8	348.3	348.2	312.5	312.7	312.9	313.4	313.7
炉膛出口烟温/℃	1 079.2	1 077.2	1 075.2	1 073.4	1 071.5	968.7	968.9	969.1	969.5	969.8
理论燃烧温度/℃	1 859.7	1 852.9	1 846.1	1 839.4	1 832.7	1 834.4	1 824.8	1 815.4	1 806.1	1 797.3
燃煤消耗量/(t h ⁻¹)	146.04	142.86	139.73	136.64	133.46	99.67	96.57	93.48	90.40	87.31
空预器出口烟气量/(kg h ⁻¹)	1 421 147	1 424 536	1 428 429	1 432 703	1 436 136	980 541	984 716	988 993	993 378	997 673
生物质消耗量/(m ³ h ⁻¹)	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000
发电功率/MW	331.9	331.8	331.7	331.7	331.6	224.0	224.0	224.1	224.1	224.2
发电煤耗/(g (kW h) ⁻¹)	295.9	295.5	295.2	294.9	294.5	302.0	301.4	300.9	300.5	300.0

表 8 不同工况生物质气掺烧计算结果 (50%THA、30%THA)

Tab.8 Calculation results of the combustion of coal blended with biomass gas under different conditions (50%THA, 30%THA)

项目	50%THA					30%THA				
	排烟温度/℃	111.8	115.1	118.1	121.5	124.5	111.2	114.6	118.3	121.8
排烟热损失/%	4.71	4.92	5.13	5.36	5.57	4.78	5.03	5.30	5.56	5.81
锅炉热效率/%	92.39	92.18	91.97	91.74	91.53	91.82	91.57	91.30	91.04	90.79
省煤器出口烟温/℃	282.3	282.5	282.6	283.1	283.3	268.0	268.3	269.0	269.5	269.9
炉膛出口烟温/℃	851.9	851.3	853.2	852.8	852.7	844.8	846.5	845.8	845.6	845.7
理论燃烧温度/℃	1 804.6	1 792.6	1 781.2	1 770.0	1 759.1	1 707.4	1 695.7	1 683.9	1 672.4	1 661.0
燃煤消耗量/(t h ⁻¹)	69.85	66.72	63.60	60.48	57.35	55.32	52.18	49.06	45.92	42.78
空预器出口烟气量/(kg h ⁻¹)	686 736	690 572	694 431	698 360	702 167	608 404	611 372	614 492	617 484	620 450
生物质消耗量/(m ³ h ⁻¹)	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000	10 000	20 000	30 000	40 000	50 000
发电功率/MW	150.3	150.3	150.3	150.3	150.4	112.9	113.0	113.0	113.0	113.0
发电煤耗/(g (kW h) ⁻¹)	319.4	318.5	317.6	316.8	315.9	340.1	338.9	337.7	336.5	335.3

3.1 对锅炉运行参数的影响

3.1.1 燃气热值对锅炉运行参数的影响

掺烧不同热值生物质气后 BMCR 工况的燃煤量变化值如图 2 所示。

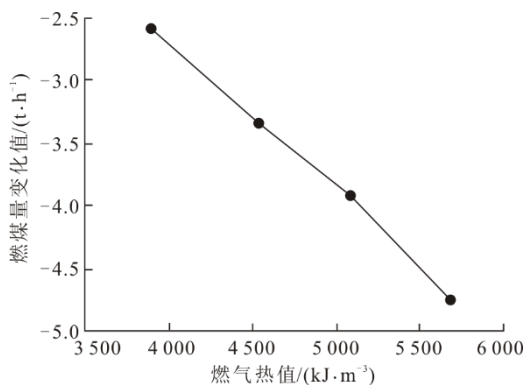


图 2 生物质气热值对燃煤量的影响

Fig.2 The effect of biomass gas calorific value on coal amount

从图 2 及表 5 的计算结果可以看出,掺烧生物质气的节煤量随着生物质气热值的增加而逐渐增

大,锅炉效率则逐渐上升,发电煤耗逐渐下降。这主要是由于随着生物质气热值的增加,生物质中不能放热的 N₂、CO₂ 等组分降低,燃烧产物带走的排烟热损失逐渐减小所致,这与邓磊等^[23]之前的研究结果类似。当燃气热值增加至一定程度后,掺烧燃气后的锅炉热效率将高于纯燃煤工况。生物质气的热值受气化剂、原料成分的影响一般在 4 000~6 000 kJ/m³,因此后继选定热值 5 682 kJ/m³ 的典型生物质燃气进行分析。

3.1.2 燃气温度对锅炉运行参数的影响

掺烧不同温度生物质气后 BMCR 工况的燃煤量变化值如图 3 所示。从图 3 及表 6 的计算结果可以看出,当生物质气温度从 350 ℃ 升高至 800 ℃ 时,锅炉热效率、排烟温度和减温水量等参数变化很小,但燃煤消耗量较掺烧前减少了 1.51~2.01 t/h。这是由于随着掺烧生物质气温度的升高,生物质气带入锅炉的显热也逐渐增加,因而所替代的燃煤量逐渐增多。

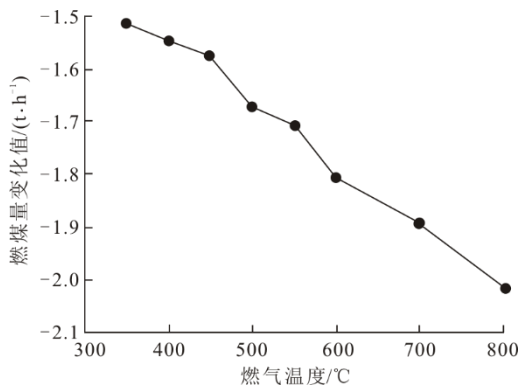


图3 生物质气温度对燃煤量的影响

Fig.3 The effect of biomass gas temperature on coal amount

3.1.3 生物质气掺烧量对锅炉热效率的影响

不同生物质气掺烧量对锅炉热效率的影响如图4所示。从图4可以看出, 锅炉热效率随着生物质气掺烧量的增加和负荷的降低而降低。这是因为, 对于低热值的生物质燃气而言, 占比60%~70%的组分为不可燃的 N_2 、 CO_2 和水蒸气, 掺烧生物质气后将使辐射受热面吸热量减少, 对流受热面吸热量增加, 最终导致排烟热损失增加, 锅炉热效率下降, 且在低负荷下表现的更为显著。当生物质气掺烧量为 $10\,000\sim 50\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (标态)时, 锅炉热效率全负荷下降0.20百分点~1.39百分点。

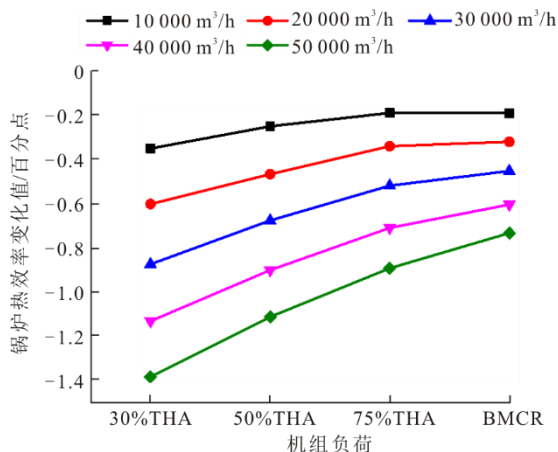


图4 生物质气掺烧对锅炉热效率的影响

Fig.4 The effect of co-firing biomass gas on thermal efficiency of the boiler

3.1.4 生物质气掺烧量对锅炉烟气温度的影响

不同生物质气掺烧量对烟气理论燃烧温度和排烟温度的影响如图5和图6所示。烟气的理论燃烧温度与燃料的热值、燃烧产物的特性(数量、比热容)、燃料与空气的温度和过量空气系数等因素有关。一般说来, 理论燃烧温度随燃料热值的降低而降低, 生物质气的热值仅为 $5\sim 7\text{ MJ}/\text{m}^3$, 属于典

型的低热值燃气, 因此掺烧生物质气后理论燃烧温度将随之下降, 全负荷降低 $6.9\sim 58.6\text{ }^\circ\text{C}$ 。

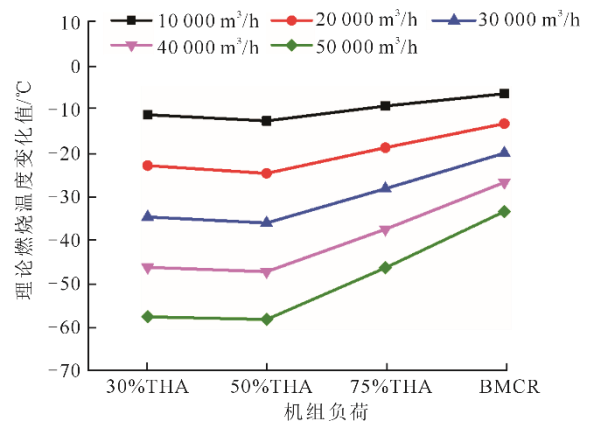


图5 生物质气掺烧对理论燃烧温度的影响

Fig.5 The effect of co-firing biomass gas on theoretical combustion temperature

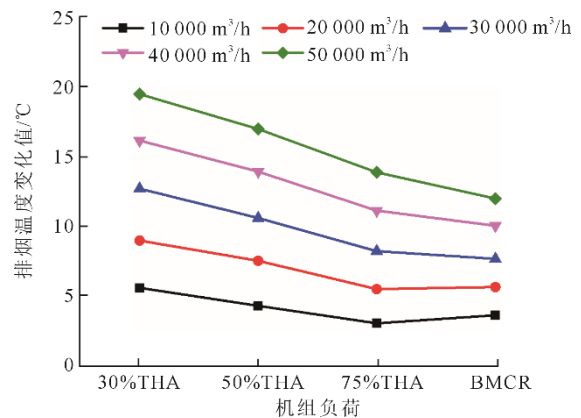


图6 生物质气掺烧对排烟温度的影响

Fig.6 The effect of co-firing biomass gas on exhaust gas temperature

由于生物质气的理论空气量较小, 燃烧所需的空气量将随之下降。此外, 由于生物质气替代了部分燃煤, 因此燃煤所需要的空气量也随之下降, 加之生物质气中大量不可燃的 N_2 、 CO_2 及水蒸气还会带走大量的热量, 这都将导致排烟温度的上升, 掺烧生物质气后排烟温度全负荷上升 $2.8\sim 19.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.1.5 生物质气掺烧量对锅炉烟气量的影响

不同生物质燃气掺烧量对锅炉烟气量的影响如图7所示。从图7可以看出, 随着生物质气掺烧量的增加, 烟气量也逐渐增加。由于不同负荷下的生物质气掺烧量为固定值, 因此对烟气比例的影响有所不同。从图7还可以看出, 随着负荷的降低, 掺烧生物质气后的烟气量变化比例先减小后增大, 这是因为一般锅炉在设计时, 80%左右为热效率最高点, 因此掺烧生物质气后单位功率的燃料消耗量相对最低, 相应的烟气量变化比例也最小。

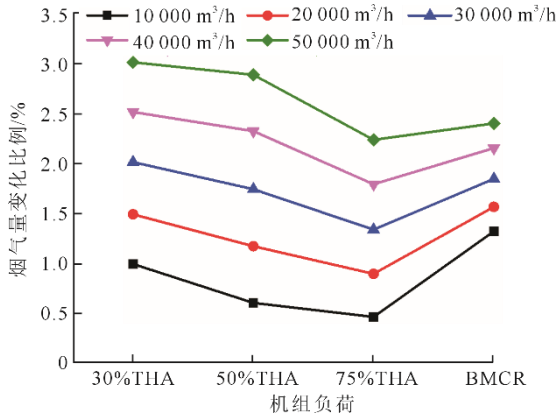


图7 生物质气掺烧对烟气量的影响

Fig.7 The effect of co-firing biomass gas on flue gas volume

3.2 对机组煤耗的影响

不同生物质气掺烧量对机组发电煤耗的影响如图8所示。

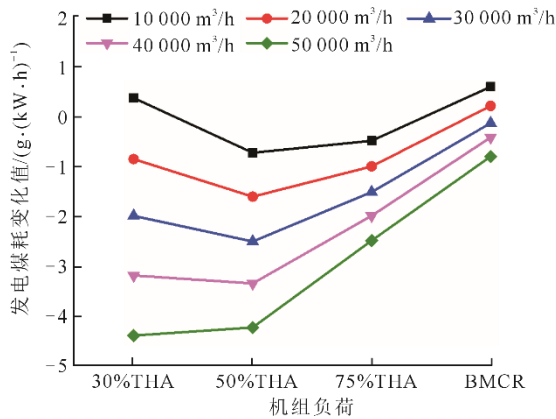


图8 生物质气掺烧对机组煤耗的影响

Fig.8 The effect of co-firing biomass gas on coal consumption of the unit

由于掺烧生物质气后,仅会因为减温水量的变化影响发电机功率,不同负荷下的发电功率仅增加了0~2.4 MW。从图8可以看出:当生物质气掺烧量较小时,随着机组负荷的降低,发电煤耗先增加后降低然后再增加;随着生物质气掺烧量的增加,发电煤耗的变化逐渐变为随着负荷而降低,这主要是由于生物质气掺烧量不同导致辐射和对流换热量的比例变化所致。从表7和表8计算结果可以看出,当生物质气掺烧量为10 000~50 000 m³/h(标态)时,全负荷下发电煤耗的变化值为-4.38~-0.59 g/(kW h)。

3.3 生物质气掺烧参数的选取

从表6的计算结果来看,提高生物质气温度后增加了燃气携带的显热,锅炉热效率有所提高,发电煤耗相应降低。由于生物质气化后的燃气带有一定的气态焦油,实际运行时为了防止焦油冷却堵

塞管道,需要将生物质气温度保持在焦油凝结温度之上。当生物质气温度高于500℃时输送管道、增压风机都必须使用价格昂贵的耐热合金材料,且设备的可靠性大大降低,因此经济较差,建议将生物质燃气输送温度维持在500℃以下。

从表7和表8计算结果来看,随着生物质气掺烧量的增加,锅炉效率和发电煤耗逐渐下降,节煤量逐渐增大。当生物质气掺烧量为50 000 m³/h(标态)时,排烟温度全负荷下升高了11.7~19.2℃,过高的排烟温度将降低空气预热器转子轴承和布袋除尘器的可靠性。此外,生物质气中还会携带大量的碱金属氯化物进入锅炉,影响受热面和催化剂的安全性,综合考虑发电煤耗、设备可靠性等因素,建议全负荷下生物质燃气的热量输入比不超过20%。

4 结 论

1) 随着生物质气温度的增加,由于生物质气显热提高所造成的节煤量逐渐增大,但对锅炉热效率、排烟温度等参数的影响很小;随着生物质气热值的增加,锅炉效率逐渐上升,节煤量逐渐增大。

2) 当生物质气掺烧量为10 000~50 000 m³/h(标态)时,掺烧生物质气后全负荷下的生物质气输入热量为2.0百分点~25.6百分点,锅炉排烟温度变化2.8~19.2℃,锅炉热效率下降0.20百分点~1.39百分点,燃煤消耗量降低1.58~15.39 t/h,烟气量仅增加0.5%~3.0%,发电煤耗变化-4.38~0.59 g/(kW h)。

3) 生物质气掺烧量越大,对机组各个参数的影响就越大。综合考虑改造成本、受热面安全性、设备可靠性以及经济性,建议掺烧生物质气时气温控制在500℃以下,全负荷下热量输入比控制在20%以下。

[参考文献]

- [1] BP. Statistical review of world energy 2019[EB/OL]. (2019-06-14)[2020-07-26]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- [2] 2019年我国生物质能源产业的市场状况[EB/OL]. (2019-07-16)[2020-07-26]. https://www.sohu.com/a/327276502_110668. Market situation of China's biomass energy industry in 2019[EB/OL]. (2019-07-16)[2020-07-26]. https://www.sohu.com/a/327276502_110668.
- [3] HODZIC N, KAZAGIC A, SMAJEVIC I. Influence of multiple air staging and reburning on NO_x emissions during co-firing of low rank brown coal with woody

- biomass and natural gas[J]. Applied Energy, 2016, 168(15): 38-47.
- [4] HAN S H, CHANG D, YANG W. Numerical study on the reburning characteristics of biomass syngas in a 2 MW pilot scale heavy oil furnace[J]. Fuel, 2016, 181: 277-285.
- [5] ZHAO J, WANG Q C, YU L H, et al. Influence of the biogas reburning for reducing nitric oxide emissions in an alundum-tube reactor[J]. Atmospheric Environment, 2016(132): 290-295.
- [6] 王锬. 600 MW 超临界 W 型火焰锅炉生物质气再燃数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 50-55.
WANG Kun. Numerical simulation of reburning of biomass gas in 600 MW supercritical W-type flame boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 50-55.
- [7] 王凯. 660 MW 褐煤前后墙对冲锅炉生物质燃气再燃数值模拟[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 40-45.
WANG Kai. Numerical simulation of reburning of biomass gas in 660 MW lignite opposed firing boiler[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 40-45.
- [8] 张小桃, 赵伟, 闻猛. 不同温度生物质气与煤粉混燃过程及污染物排放特性[J]. 热力发电, 2017, 46(9): 47-52.
ZHANG Xiaotao, ZHAO Wei, WEN Meng. Study on co-combustion process and pollutant emission characteristics of biomass gas and pulverized coal at different temperatures[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 47-52.
- [9] 张小桃, 闻猛, 丁全斌, 等. 煤粉和生物质气混燃锅炉燃烧特性数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(3): 82-87.
ZHANG Xiaotao, WEN Meng, DING Quanbin, et al. Numerical Simulation Study on the boiler combustion performance for biomass gas co-firing with pulverized coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2017, 32(3): 82-87.
- [10] 张小桃, 李柯颖, 赵伟, 等. 燃煤锅炉掺烧生物质气运行效率及污染物排放模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 194-202.
ZHANG Xiaotao, LI Keying, ZHAO Wei, et al. Simulation on operation efficiency and pollutant emissions of coal-fired boiler with bio-gas co-firing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 194-202.
- [11] 张小桃, 黄勇, 张川, 等. 燃尽风及生物质气对燃煤锅炉燃烧过程及 NO_x 排放影响的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(2): 39-46.
ZHANG Xiaotao, HUANG Yong, ZHANG Chuan, et al. Numerical simulation of the effect of over-fire air and syngas on combustion process and NO_x emission of coal-fired boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2019, 34(2): 39-46.
- [12] 张小桃, 黄勇, 赵伟, 等. 生物质气与煤混燃锅炉分离式燃尽风反切消旋数值模拟[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 23-30.
ZHANG Xiaotao, HUANG Yong, ZHAO Wei, et al. Numerical simulation of reverse-tangent and swirling-elimination for SOFA of boiler co-firing biomass gas with coal[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 23-30.
- [13] 张小桃, 段佛元, 黄勇, 等. 660 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 1-7.
ZHANG Xiaotao, DUAN Foyuan, HUANG Yong, et al. Numerical simulation on biomass gas re-burning in a 660 MW coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 1-7.
- [14] 徐皓鹏, 任少辉, 邵敬爱, 等. 对冲锅炉生物质气与煤粉混燃模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 61-67.
XU Haopeng, REN Shaohui, SHAO Jingai, et al. Numerical study on co-combustion process of biomass gas and pulverized coal in an opposed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 61-67.
- [15] 闻猛. 基于 300 MW 燃煤锅炉掺烧生物质气燃烧特性及污染物排放研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017: 30-34.
WEN Meng. Study on combustion characteristic pollutant emission of biomass gas co-firing with in a 300 MW coal-fired boiler[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017: 30-34.
- [16] 黄勇. 生物质气耦合煤粉燃烧过程及 NO_x 排放数值模拟[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019: 40-42.
HUANG Yong. Numerical investigation for syngas co-firing characteristic and NO_x emissions in a coal-fired boiler[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019: 40-42.
- [17] 王一坤, 张广才, 王晓旭, 等. 生物质气化耦合发电提升燃煤机组灵活性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 77-82.
WANG Yikun, ZHANG Guangcai, WANG Xiaoxu, et al. Analysis of flexibility improvement of coal-fired power plant by biomass gasification coupled power generation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 77-82.
- [18] 李振山, 陈登高, 张志, 等. 生物质气化燃气耦合煤粉低氮燃烧的 CFD 数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2032-2045.
LI Zhenshan, CHEN Denggao, ZHANG Zhi, et al. CFD modeling of pulverized coal low-NO_x combustion coupling with biomass syngas firing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2032-2045.
- [19] 陈宣龙, 刘三举, 杨涛. 生物质气化合成气对燃煤机组负荷的影响试验[J]. 华电技术, 2019, 41(4): 41-46.
CHEN Xuanlong, LIU Sanju, YANG Tao. Experiment on the influence of biomass gasification syngas on the load of coal-fired power plant[J]. Huadian Technology, 2019, 41(4): 41-46.
- [20] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2008: 149-157.
CHE Defu, ZHUANG Zhengning, LI Jun, et al. Boiler[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishing House, 2008: 149-157.
- [21] 严俊杰, 黄锦涛, 张凯, 等. 发电厂热力系统及设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 200-245.
YAN Junjie, HUANG Jintao, ZHANG Kai, et al. Thermal system and equipment of power plant[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishing House, 2003: 200-245.
- [22] 王一坤, 柳宏刚, 周凌宇, 等. 烟气抽取位置对抽烟气干化污泥耦合发电机组的影响[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 43-48.
WANG Yikun, LIU Honggang, ZHOU Lingyu, et al. Effects of flue gas extraction position on sludge-coal blending combustion generation units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 43-48.
- [23] DENG L, WANG Y, WU S, et al. Utilization of combustible waste gas as a supplementary fuel in coal-fired boilers[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(4): 1677-1692.

(责任编辑 马昕红)