生物质气化合成气对燃煤机组负荷的影响试验

陈宣龙1，刘三举2，杨涛2

(1.华电湖北发电有限公司，武汉430061；2.湖北华电襄阳发电有限公司，湖北襄阳441041)

摘要：以湖北华电襄阳发电有限公司为例，在生物质气化耦合燃煤机组发电系统上进行定负荷和定煤量试验。研究发现：生物质气化系
统中产生合成气中气体成分稳定，可燃气
体质量分数在30%左右，其中CH_4，H_2
的质量分数稳定在5%以上，CO的质量分数稳定在18%左右。在试验中，燃煤机组消纳了合成气入炉对燃煤机组烟气中污染物SO_2和NO_x的影响。当合成气入炉后，烟气中污染物SO_2的质量浓度在35mg/m^3
以下，NOx的质量浓度在40mg/m^3
以下，均达到了超净排放标准。合成气入炉对燃煤机组的燃烧有增强作用，生物质合成气通过燃煤机组高效发电，并有降低燃煤机组煤耗的作用。

1研究背景

随着工业化的不断发展，根据近4年BP中国数据 [1]
，煤炭占中国能源消耗比重如图1所示：2014年煤炭占中国能源消耗量的66.0%，2017年煤炭占中国能源消耗量的60.4%。煤炭占中国能源消耗量的60.0%以上，说明煤炭依旧是中国的能源主体，但是以煤炭为主要能源的利用方式并不利于中国的能源安全，寻求可再生的新能源迫在眉睫。国家能源局关于印发《生物质能发展“十三五”规划》的通知明确提出，生物质能是重要的可再生能源。开发利用生物质能，是能源生产和消费革命的重要内容，是改善环境质量、发展循环经济的重要任务。生物质作为一种可再生的新能源，被人们广泛关注。

生物质具有清洁、可再生、来源广泛、价格低廉等特点 [2]
，是一种碳中性的可再生资源，包括林业残留物，工厂木材废料，伐木废料，草本能源作物，木质能源作物，农作物稻壳、秸秆、花生
壳，可燃烧垃圾等。生物质主要利用
方式有物理化学法、热化学法和生物化学法[3]
。生物化学法包括厌氧消化、发酵等；物理化学法主要是将生物质成型压块燃烧；热化学法包括气化、液化、热解、燃烧等。其中，热化学法更贴近工业生产应用，是目前研究的热点。

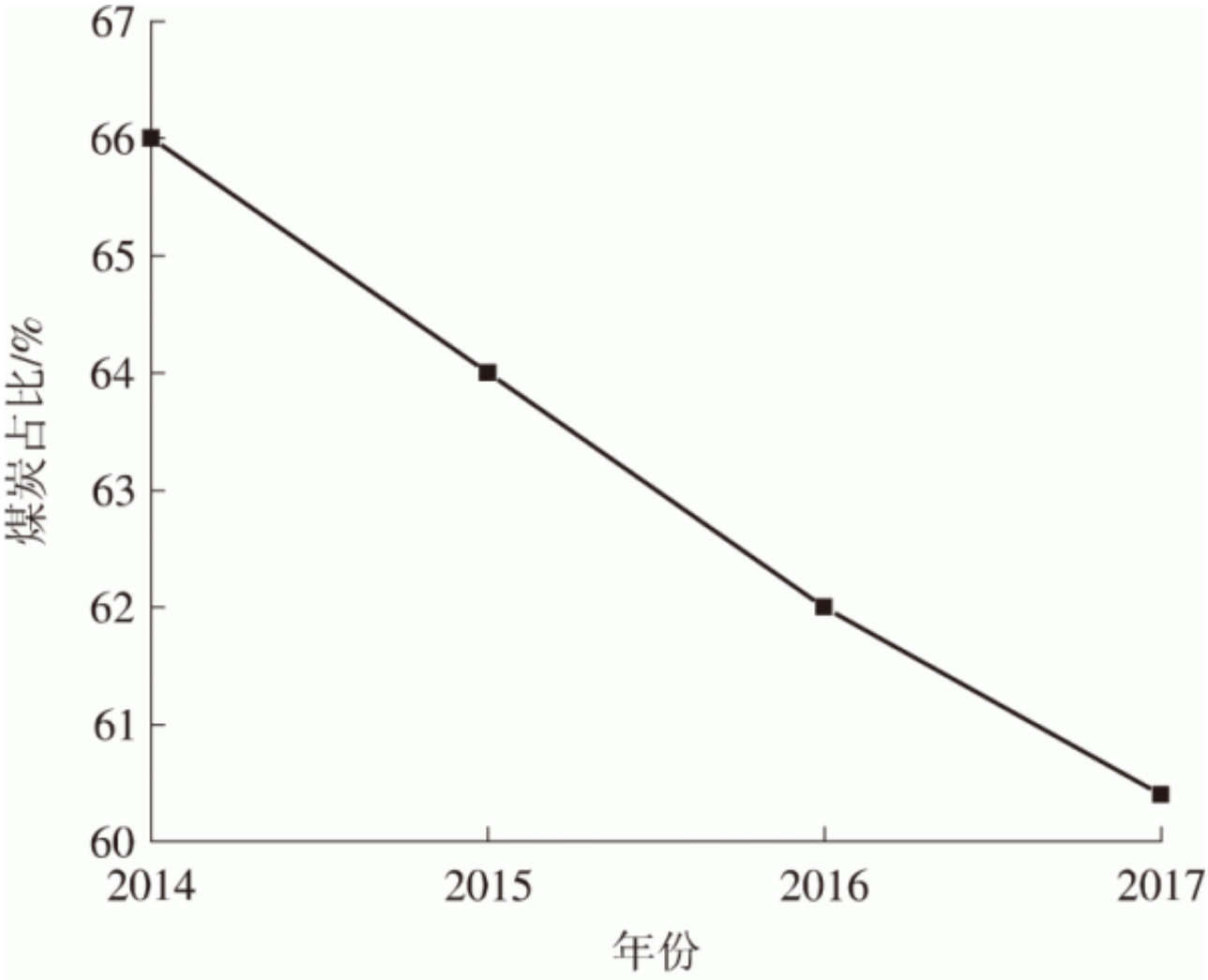

图 1　近 4 年煤炭占中国能源消耗情况

Fig. 1　Proportion of coal accounts in China's energy consumption in the past 4 years

生物质气化是在一定的热力学条件下，在某种空气介质气氛中，促使生物质燃料转化为含有CO，H_2，CH_4等的合成气。影响生物质气化的主要因素有气化介质、原料特性、温度、物料比例等。GIL[4]研究不同气化介质(空气、水蒸气、水蒸气和O_2混合气)对生物质气化产物分布及气体产率的影响，发现水蒸气作为气化介质时，合成气的热值更高，这是由于水蒸气增加，促进水汽反应向右边进行($CO+H_2O—CO_2+H_2$)，使得氢气产量增加。Herguido[5]等研究不同松树粒径对生物质气化的影响，发现粒径更小的生物质原料，传热升温速率较快，气化反应速度更快。Turn[6]等研究了温度对生物质气化的影响，发现温度从750°C升高到900°C时，气体产率大大增加。但温度并不是越高越好，在生物质气化过程中，生物质热解产生挥发分以及二氧化碳的气化反应是吸热反应，而水汽变换反应以及甲烷化反应

是放热反应，为了得到更高的气体产率和热值的合成气，必须选择合适的气化温度。

在实际工业生产中，生物质原料由于热值较低，容积比较小，并不能满足生物质气化炉的负荷需求和连续给料要求。现在国内的生物质成型设备，按照生产成型生物质燃料大小主要有压块成型机和颗粒状成型机[7]。根据成型燃料横截面直径，大于25mm的为压块，小于15mm的为颗粒，从生产效率考虑，压块成型具有明显优势。生物质成型燃料的制成原理是将生物质通过粉碎、混合、挤压、烘干等一系列工艺，制成块状、棒状、颗粒状等各种形状的成型燃料，相比成型前，生物质燃料的密度增加，热值大大提高，便于运输。采用生物质压块成型技术将生物质压块成型后，其生物质压块更容易被利用。生物质能源是一种非常高效、清洁的可再生能源，有效利用生物质能可减少石油和煤等化石能源的消耗。

国内利用生物质燃料发电的方式主要有生物质直燃发电[8－10]、生物质气化耦合燃煤机组发电[11]、生物质热电联产[12]等。生物质直燃发电是将生物质直接送到锅炉中燃烧，加热给水产生高温、高压蒸汽，推动蒸汽轮机做功，带动发电机产生清洁的电能[8]。但生物质直燃发电燃料的利用率较低，会产生SO_2等有害气体，对环境造成严重污染。生物质气化耦合燃煤机组发电[11]是在气化炉中将不断流化的成型生物质压块转化为具有较高热值的可燃气体，再将合成气送入燃煤锅炉炉膛中，可燃气体与煤粉燃烧加热给水，产生高温、高压蒸汽，推动汽轮机叶片做功，带动发电机产生清洁高效的电能。生物质燃料的利用率高，同时利用燃煤机组的超净排放装置，避免了环境污染的问题。生物质热电联产是利用生物质燃烧放出的热能，加热给水产生高温、高压蒸汽，推动蒸汽轮机做功，余热对城区供热。生物质燃料被转化为清洁的电能和有用的热能，可以很好地满足人们的需求，但国内缺乏生物质热电联产相关核心技术，多数设备依赖进口，投资成本高达6000～7000元/kW[12]。

生物质气化耦合燃煤机组发电系统将生物质气化与成熟的燃煤发电技术结合在一起，不仅解决了生物质利用过程中释放出SO_2对环境造成污染的问题，同时将生物质气化过程中产生的焦油在燃煤锅炉内作燃料，大大提高了生物质燃料的利用率。利用成型的生物质燃料不断在流化床中气化，产生的可燃气体进入燃煤锅炉分离燃尽风(SOFA)附近，在锅炉炉膛中与煤粉、一次风、二次风等充分混合燃烧，加热给水生成高温、高压水蒸气，推动汽轮机叶片做功，带动发电机产生电能。其中，生物质燃料利用过程中突出的SO_2排放产生的环境问题，可以通过燃煤机组中的脱硫塔吸收很好地解决。

但是，生物质气化耦合燃煤机组发电系统中，生物质系统相对于燃煤机组的体量较小，对燃煤机组大系统而言，生物质气化生成的可燃气体进入燃煤机组，产生的扰动很小，是否真的会对燃煤机组负荷产生影响，本文主要通过试验进行研究。

2生物质气化耦合燃煤机组发电负荷试验

生物质气化耦合燃煤机组发电是在燃煤机组的基础上进行生物质气化可燃气体利用的相关改造，燃煤机组是生物质气化系统生成可燃气体中SO_2的过滤装置，生物质气化系统是燃煤机组可燃气体的来源，通过燃煤机组可以很好地解决生物质燃料燃烧释放SO_2和污染颗粒物等问题，同时也解决了直接在燃煤机组中利用生物质燃料产生的结渣问题，更好地保障了燃煤机组的安全运行。

2.1生物质气化耦合燃煤机组系统介绍

湖北华电襄阳发电有限公司(以下简称襄阳公司)在现有的#6机组(640.00MW燃煤机组)上进行生物质气化耦合改造，将生物质气化系统与#6机组结合在一起。如图2所示，生物质压块进入气化炉中，经过旋风分离装置将物料和可燃气

体分离。分离出来的粗颗粒物料通过返料装置进入气化炉中循环流化，分离出的可燃气体进入除尘分离装置，将可燃气体中的细灰颗粒分离出来，通过冷灰装置将高温的生物质灰颗粒收集储存。将净化的可燃气体通过增压风机吹入燃煤机组锅炉中，通过与煤充分燃烧加热给水生成高温、高压蒸汽，推动汽轮机叶片做功，带动发电机发电，产生清洁环保的电能。同时，燃烧产生的SO_2，NO_x
及烟尘颗粒通过选择性催化还原(SCR)脱硝、除尘装置、脱硫塔进行净化后通过烟囱排出。

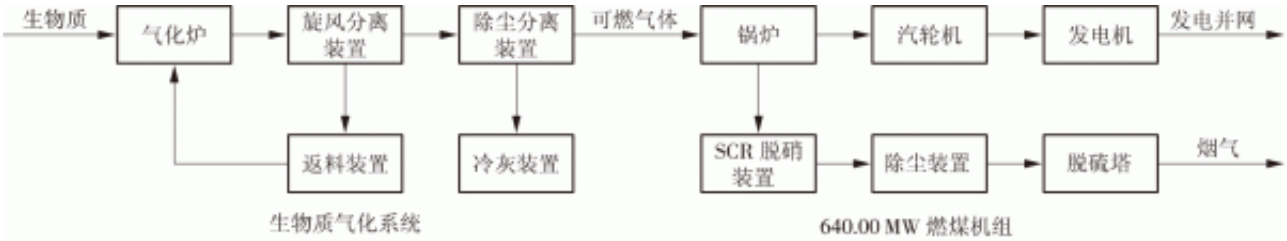

图 2　生物质气化耦合燃煤机组系统流程示意

Fig. 2　Schematic of the system flow of biomass gasification coupled coal-fired units

2.2定煤量试验

2.2.1定煤量试验条件

(1)#6机组保持机组运行总煤量在一定值，各给煤机煤量保持稳定，试验期间给煤量不调整。

(2)#6机组解除协调控制和一次调频。

(3)#6机组采取定压方式运行。

(4)#6机组投锅炉手动，汽机自动。

(5)#6机组汽温、真空度维持稳定。

(6)气化炉给料量保持8.00t/h，燃气量及燃气组分稳定。

2.2.2定煤量试验内容

(1)合成气入炉，#6机组在总煤量保持不变的工况下稳定运行60min。

(2)切断合成气来源，维持燃煤机组工况运行。

(3)#6机组保持各原煤仓煤质稳定。

(4)#6机组保持供热固定开度。

2.2.3定煤量试验过程

2018－09－19T10：00—11：00，当生物质气化合成气进入燃煤机组炉膛后，记录燃煤机组的运行情况。在11：00之后，切断生物质气化合成气来源，并在11：35—12：35记录切断合成气后燃煤机组的运行情况。#6机组发电机的平均发电负荷取样分散控制系统(DCS)发电负荷，每秒1个点计算1h平均发电功率。

2.3定负荷试验

2.3.1定负荷试验条件

(1)#6机组负荷保持600.00MW稳定运行。

(2)#6机组协调方式运行。

(3)#6机组保持原煤仓煤质稳定。

(4)#6机组采取定压方式运行。

(5)#6机组汽温、真空度维持稳定。

(6)气化炉给料量保持8.00t/h，燃气量及燃气组分稳定。

(7)#6机组保持一套制粉系统给煤机投自动，其他运行给煤机手动方式且给煤量不变。

(8)#6机组保持供热固定开度。

2.3.2定负荷试验内容

(1)合成气入炉，#6机组在负荷保持不变的工况下稳定运行2h。

(2)切断合成气来源，维持燃煤机组工况运行。

(3)投自动的给煤机在试验阶段每小时取煤样一次。

2.3.3定负荷试验过程

在2018－09－19T15：00—17：00，生物质气化合成气进入燃煤机组炉膛，记录燃煤机组的运行情况。定负荷试验只投运C给煤机给煤量自动，其他给煤机保持手动状态且煤量不变。在17：00之后，切断生物质气化合成气来源，并在18：30—20：30记录切断合成气后燃煤机组的运行情况，#6机组发电机的平均发电负荷取样分散控制系统(DCS)发电负荷。C磨煤机给煤量取样DCS给煤量，每秒1个点计算2h平均给煤量。

本研究在襄阳公司生物质气化耦合燃煤机组发电系统上进行定煤量试验和定负荷试验，观察生物质气化炉在运行过程中是否稳定产生可燃气体，生物质气化产生合成气中H_2，CO，CH_4等组分的体积分数，合成气进入燃煤机组中对其负荷和排放烟气中SO_2，NO_x质量浓度的影响，合成气进入燃煤机组对DCS发电负荷以及煤量的影响。

3试验结果分析

3.1生物质气化炉燃气组分分析

生物质气化耦合燃煤机组发电系统是由生物质气化系统与640.00MW燃煤机组2个系统组成。在研究生物质气化耦合燃煤机组负荷试验中，需确保生物质气化系统产生合成气中的可燃气体H_2，CO，CH_4体积分数稳定。将上述DCS数据进行整理，分别在合成气入炉之前20min开始取点，每10min取1个点进行分析。

本生物质气化耦合燃煤机组负荷试验中，生物质气化系统采用某厂的Gasboard－3500燃气组分分析仪对生物质流化床气化炉中的合成气进行实时在线检测，并对合成气中气体组分进行分析。

定煤量试验中可燃气体组分变化情况如图3所示。在定煤量试验中，当合成气入炉之后，CO，H_2，CH_4等可燃气体的体积分数基本稳定，CH_4，H_2的体积分数稳定在5%以上，CO的体积分数稳定在18%左右，可燃气体体积分数总体在30%左右。11：00时，气化炉已经开始切换至合成气放散状态，这个过程中会造成合成气组分的波动，可燃气体体积分数大大降低。

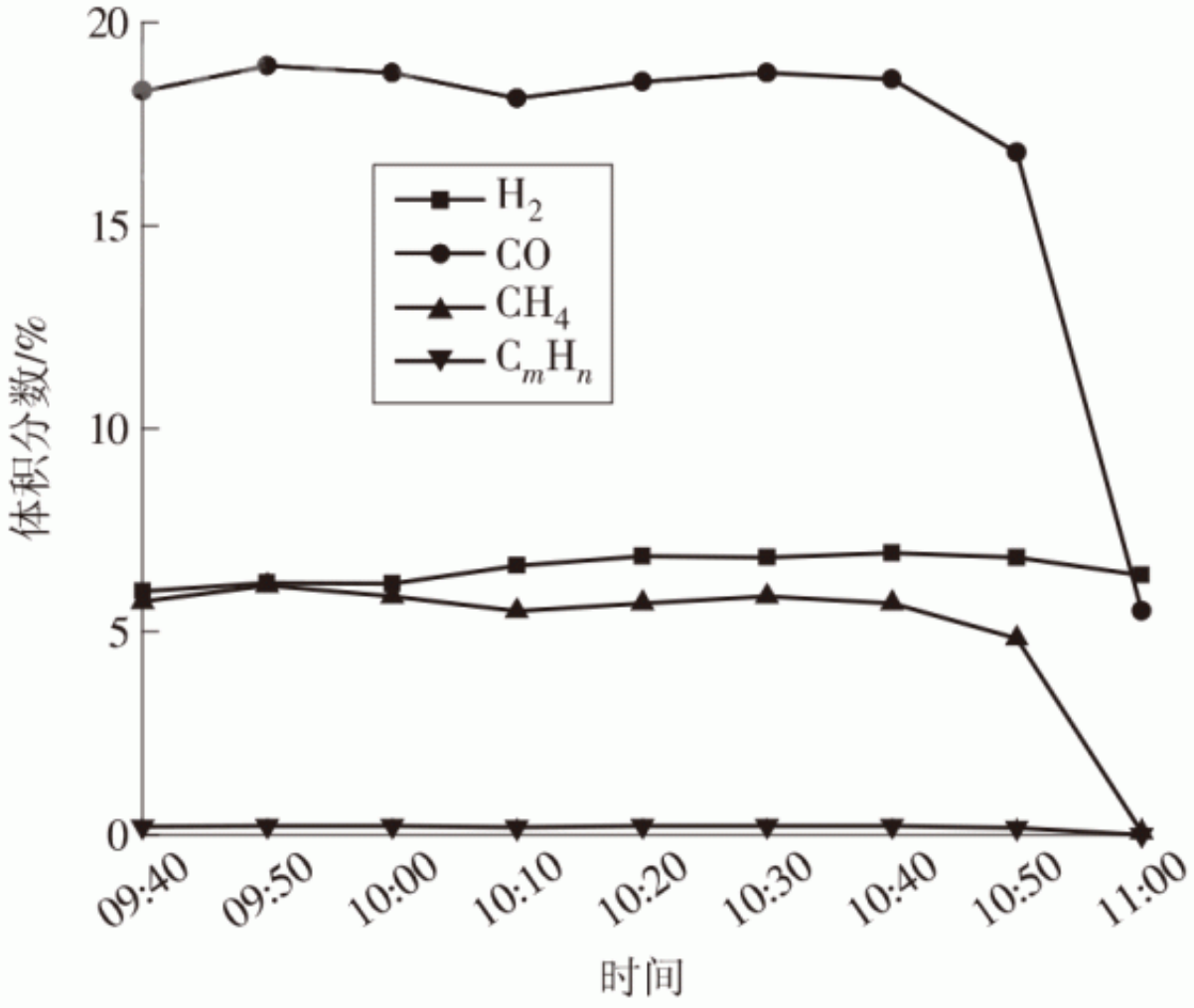

图 3　定煤量试验中可燃气体组分变化情况

Fig. 3　Change of combustible gas composition in constant coal consumption test

定负荷试验中可燃气体组分变化情况如图4所示。在定负荷试验中，当合成气入炉之后，CO，H_2，CH_4等可燃气体的体积分数基本稳定，CH_4的体积分数稳定在6%左右，H_2的体积分数稳定在8%左右，CO的体积分数稳定在18%左右，可燃气体体积分数总体在32%左右。

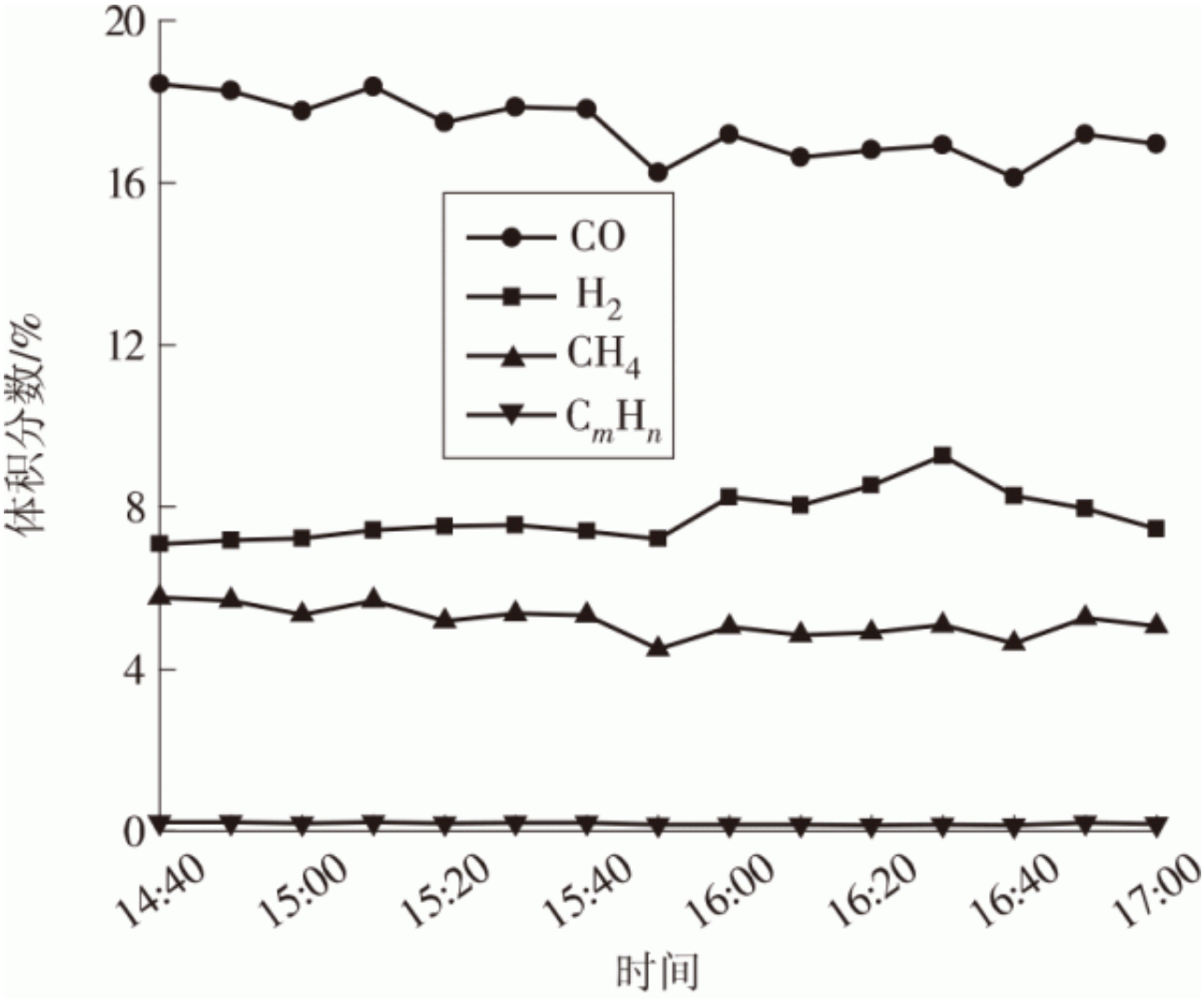

图 4　定负荷试验中可燃气体组分变化情况

Fig. 4　Change of combustible gas composition in constant load test

在定煤量和定负荷试验中，可燃气体体积分数均非常稳定，但从图3和图4中可以看出，可燃气体体积分数在30%左右，采用空气作为生物质气化的气化介质，空气中的N2大大稀释了可燃气体，当合成气进入炉膛燃烧时，降低了对炉膛内火焰中心偏移及炉膛壁超温的影响。

3.2定煤量试验分析

在生物质气化耦合燃煤机组的定煤量试验中，生物质压块在气化炉中不断流化，产生合成气进入燃煤锅炉中，提供稳定的可燃气体。将燃煤机组的给煤量控制在230.00t/h，燃煤机组采用定压运行方式，解除协调控制和一次调频，机组的汽温和真空度维持稳定，保持稳定供热(汽轮机中压四段抽汽供工业园蒸汽)开度，观察合成气进入炉膛后对#6机组烟气中污染物质量浓度以及负荷的影响。

将上述烟气中污染物质量浓度及机组负荷的DCS数据进行整理，在合成气入炉之前20min开始取点，每10min取1个点，对烟气中污染物质量浓度是否超标及#6机组负荷变化情况进行分析。定煤量试验烟气中污染物的质量浓度如图5所示。

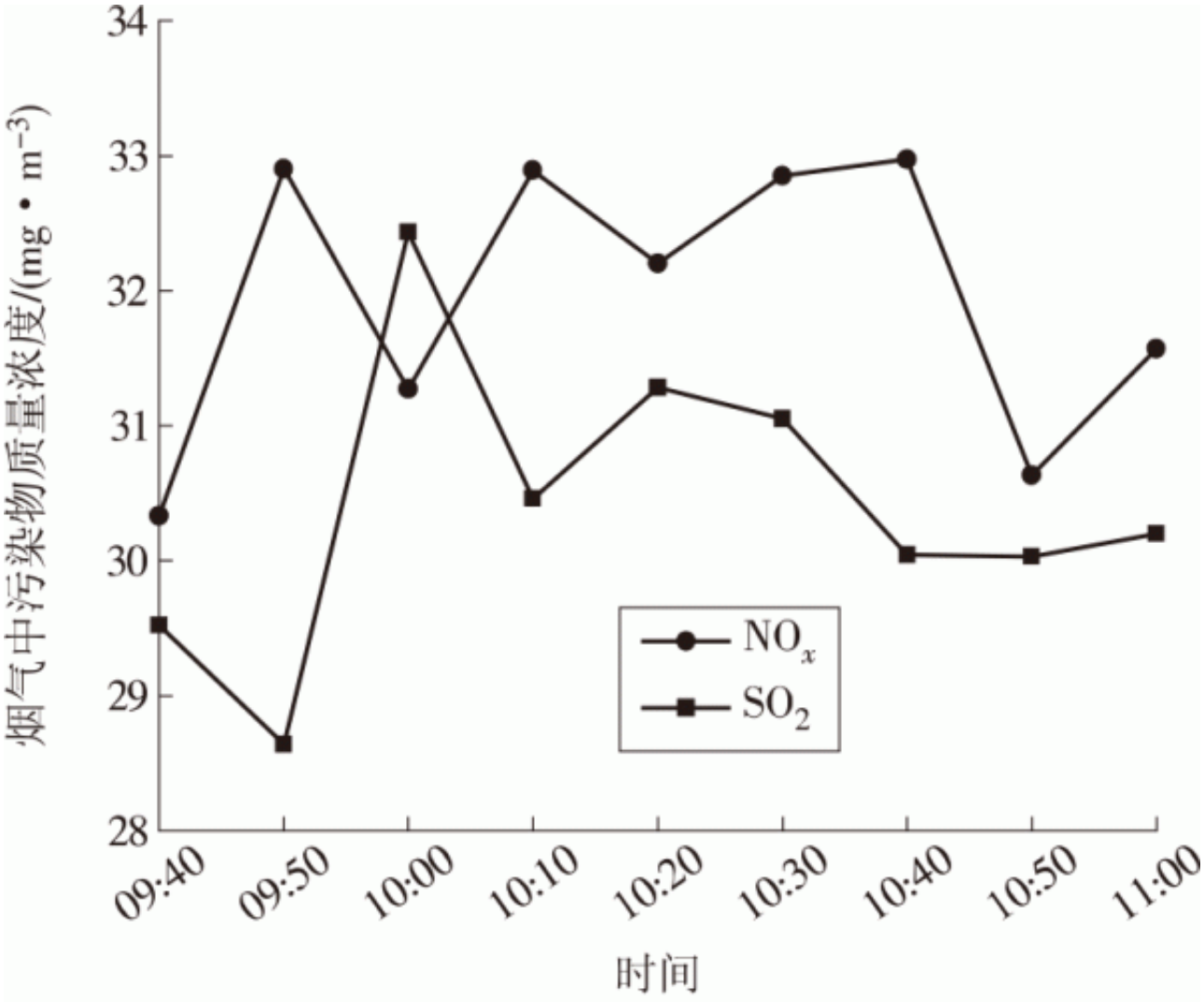

图 5　定煤量试验烟气中污染物的质量浓度

Fig. 5　Pollutant mass concentration of flue gas in constant coal consumption test

根据国家2012年实行的GB13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》[13]的要求，火电厂排放烟气中SO_2质量浓度≤200mg/m^3，NO_x质量浓度≤100mg/m^3。近几年，电力行业提出了超净排放标准：火电厂排放烟气中SO_2质量浓度≤35mg/m^3，NO_x质量浓度≤50mg/m^3。如图5所示，定煤量试验中烟气污染物SO_2，NO_x的质量浓度在35mg/m^{3}以下，达到了超净排放的标准。对比合成气入炉前后SO_2，NO_x的质量浓度，发现合成气入炉后烟气中污染物的质量浓度并没有明显变化，640.00MW燃煤机组系统很好地消纳了合成气进入燃煤锅炉炉膛带来的影响。

当合成气进入燃煤机组锅炉中与煤粉充分混合燃烧时，会产生大量SO_2，NO_x等污染物，但通过燃煤机组已有的S

CR脱硝、电除尘及脱硫塔等一系列烟气处理装置，可吸收烟气中SO_2，NO_x等污染物，保证排放烟气达到超净排放标准。

定煤量试验#6燃煤机组负荷变化如图6所示。定煤量试验中#6燃煤机组负荷稳定维持在600.00MW，合成气入炉对燃煤机组负荷并没有明显影响。这是由于生物质气化炉负荷为10.80MW，燃煤机组参数为640.00MW，相比而言，燃煤锅炉中可燃气体体量太小，对640.00MW燃煤机组负荷影响较小。

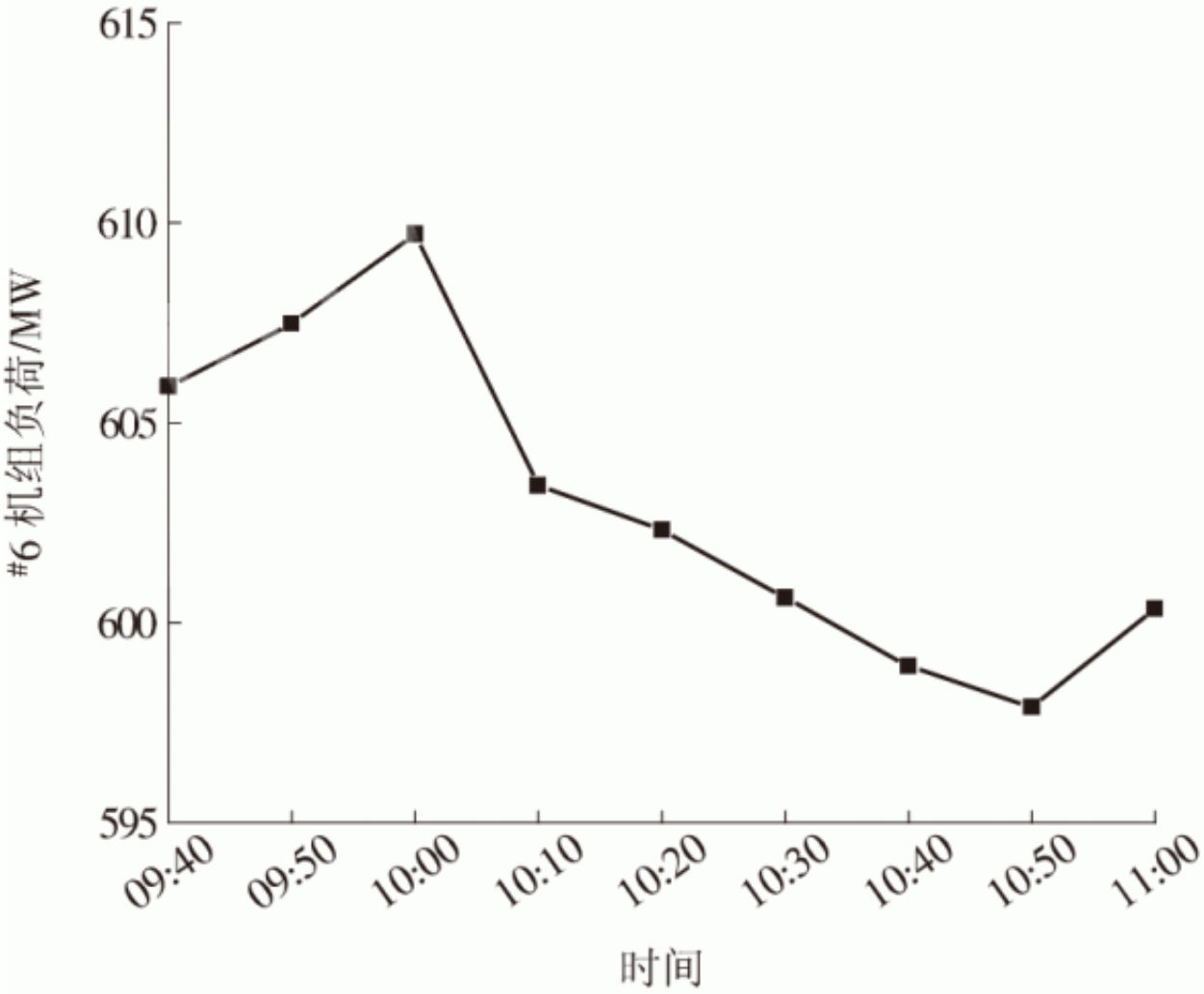

图 6　定煤量试验 #6 燃煤机组负荷变化

Fig. 6　Change of loadof No. 6 coal-fired unit in constant coal consumption test

3.3定负荷试验分析

在生物质气化耦合燃煤机组的定煤量试验中，生物质气化产生合成气进入燃煤锅炉，提供稳定的可燃气体。将燃煤机组负荷控制在600.00MW，燃煤机组采用定压、协调方式运行，供热保持稳定开度，观察合成气进入炉膛后对#6机组烟气中污染物质量浓度以及负荷的影响。将上述烟气中污染物质量浓度及机组负荷的DCS数据进行深度整理，从合成气入炉之前20min开始取点，每10min取1个点，对烟气中污染物质量浓度是否超标及#6机组负荷变化情况进行分析。

定负荷试验烟气中污染物的质量浓
度如图7所示。定负荷试验中烟气污染物SO_2的质量浓度在35mg/m^3以下，NO_x
的质量浓度在40mg/m^3
以下，均达到了超净排放的标准。对比合成气入炉前后SO_2，NO_x
的质量浓度，发现合成气入炉后烟气中SO_2
的质量浓度几乎达到超净排放的临
界值，生物质气化合成气导致了机组烟气中SO_2
质量浓度的升高，通过调节脱硫塔吸收SO_2，保证SO_2
的质量浓度维持在超净排放标准；合成气入炉后烟气中N
O_x
的质量浓度有一个峰值，可能是由于生物质气化合成气
中的N_2
进入燃煤锅炉破坏了低氮燃烧系统的平衡，但是依旧能控制NOx的质量浓度在超净排放标准。通过燃煤机组中SCR
脱硝、电除尘及脱硫塔等一系列装置，大量吸收烟气中
的SO_2，NO_x等污染物，可保证排放的烟气达到超净排放标准。

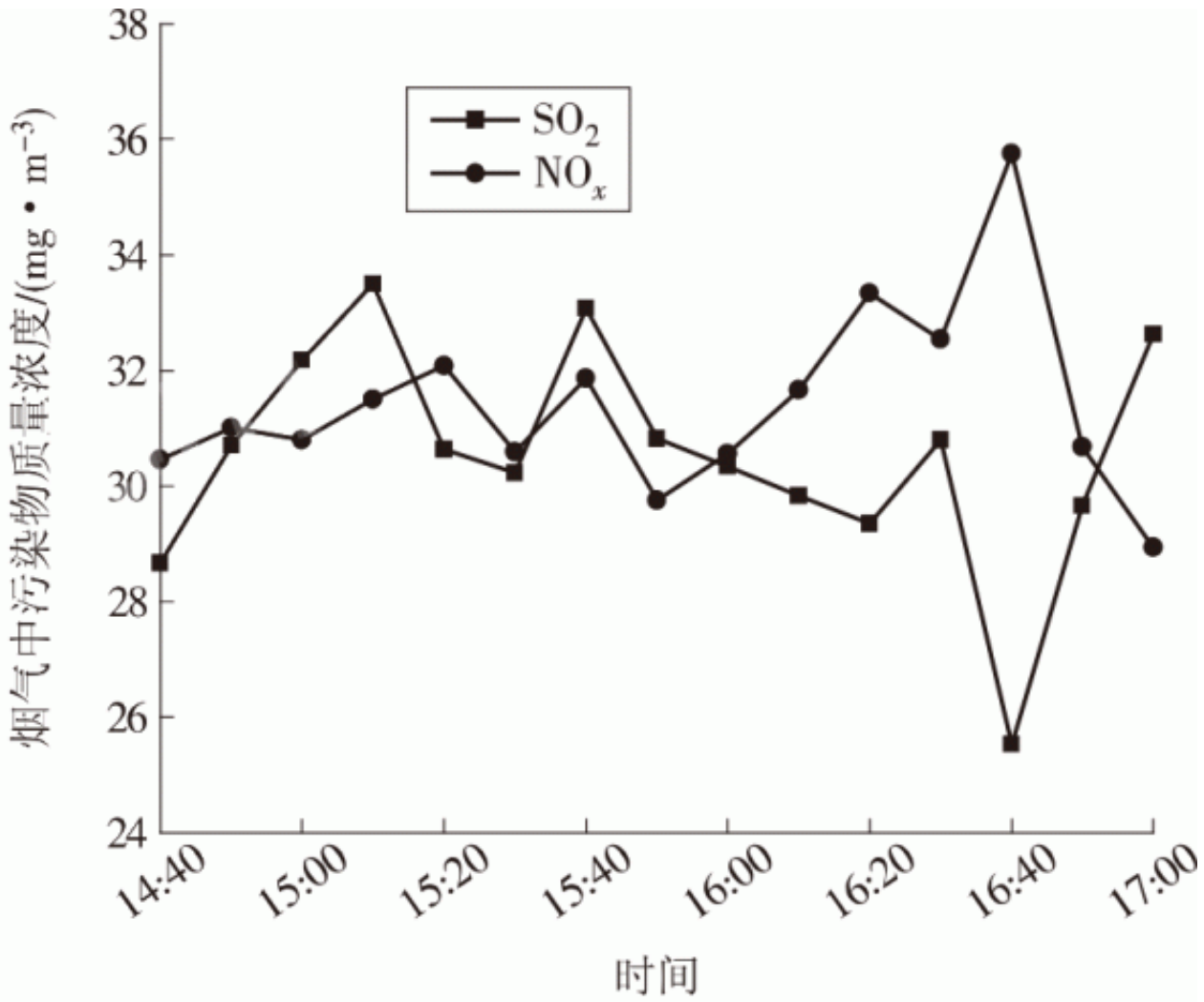

图7　定负荷试验烟气中污染物的质量浓度

Fig. 7　Pollutant mass concentration of flue gas in constant load test

定负荷试验#6燃煤机组总煤量变化如图8所示。定负荷试验中#6燃煤机组总煤量在220.00～230.00t/h之间波动，由于生物质气化合成气进入燃煤机组，在锅炉中燃烧并加热给水，在维持#6燃煤机组600MW负荷运行时，燃煤机组的总煤量会略微下降。实际上，合成气进入燃煤锅炉会降低锅炉炉膛的过量空气系数，这样不仅会降低燃烧效率，而且会影响SOFA控制低氮燃烧，导致更多NO_x的生成。

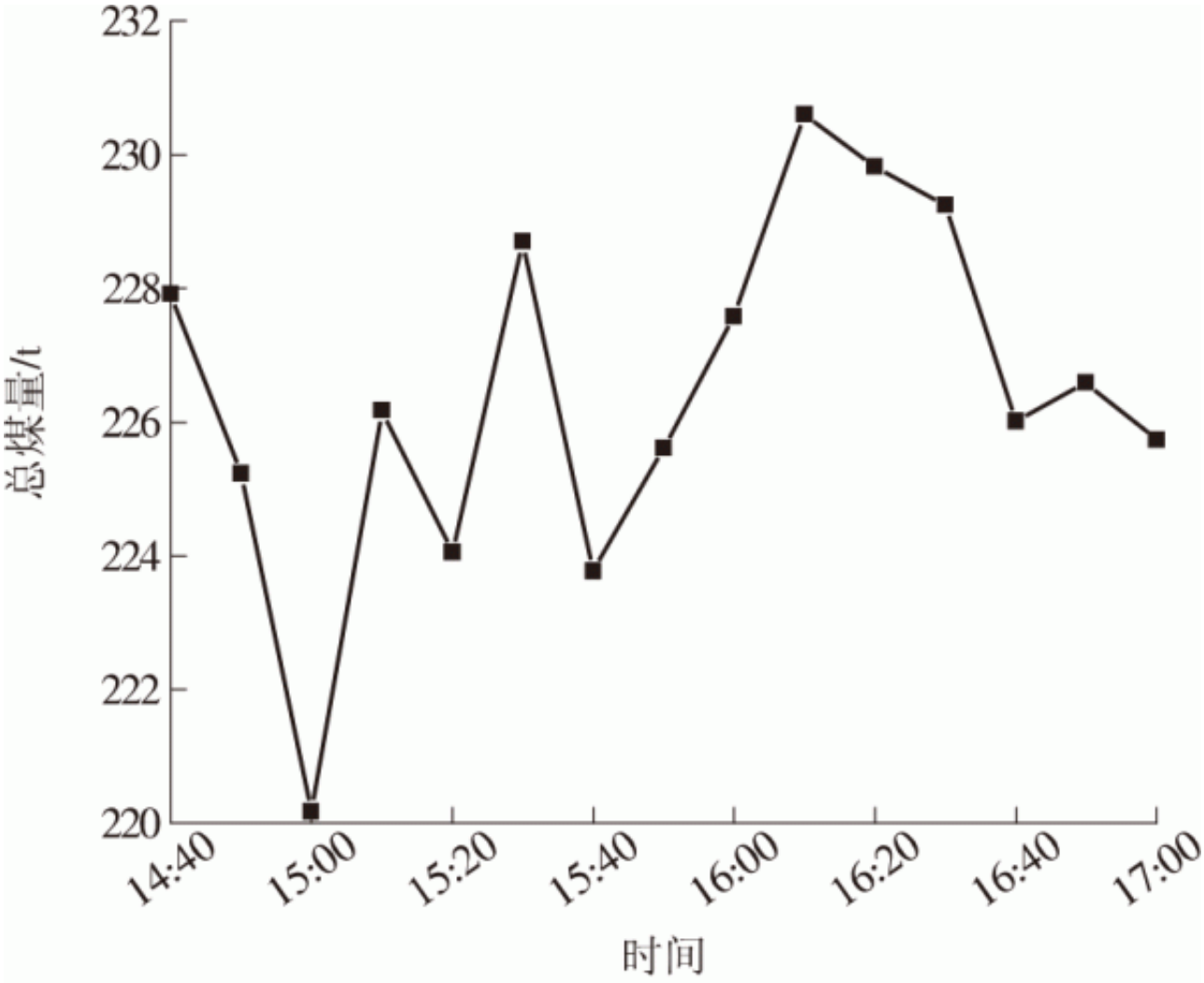

图 8　定负荷试验 #6 燃煤机组总煤量变化

Fig. 8　Change of coal consumption of No. 6 coal-fired unit in constant load test

3.4合成气入炉对DCS发电负荷的影响

3.4.1定煤量试验中合成气对DCS发电负荷的影响

在2018－09－19T10：00—11：00，当生物质气化合成气进入燃煤机组炉膛后，记录燃煤机组的运行情况。在11：00之后，切断生物质气化合成气来源，并在11：35—12：35记录切断合成气后燃煤机组的运行情况。气化运行状态气化计量装置平均发电负荷10.90MW，#6机组发电机的平均发电负荷取样DCS发电负荷，每秒1个点计算1h平均发电功率。具体试验数据见表1。

表1　定煤量试验中合成气对DCS发电负荷的影响

Tab.1　Influence of syngas on DCS generation load in constant coal consumption test

项目	合成气入炉	合成气放散	影响
时间	10:00—11:00	11:35—12:35	
煤量/(t·h^{-1})	230.00	230.00	
负荷/MW	601.50	588.08	13.42

注：表中负荷为DCS发电负荷，下同。

通过定煤量试验，计算#6机组合成气入炉及燃气切至放散时，前后1h平均发电功率。通过平均发电功率的对比发现，当合成气进入炉膛后，#6机组负荷增加了13.42MW，试验验证了合成气入炉后对机组负荷产生13.42MW的正方向影响。

3.4.2定负荷试验中合成气对DCS发电负荷的影响

在2018－09－19T15：00—17：00，生物质气化合成气进入燃煤机组炉膛，记录燃煤机组的运行情况。定负荷试验只投运C给煤机给煤量自动，其他给煤机保持手动状态且煤量不变。在17：00之后，切断生物质气化合成气来源，并在18：30—20：30记录切断合成气后燃煤机组的运行情况，气化运行状态气化计量装置平均发电负荷10.70MW，#6机组发电机的平均发电负荷取样DCS发电负荷。C磨煤机给煤量取样DCS给煤量，每秒1个点计算2h平均给煤量。具体数据见表2。

表2　定负荷试验中合成气对DCS发电负荷的影响

Tab.2　Influence of syngas on DCS generation load in constant load test

项目	合成气入炉	合成气放散	影响
时间	15:00—17:00	18:30—20:30	
煤量/(t·h^{-1})	40.37	46.92	6.55
标准煤/(t·h^{-1})	37.78	42.84	5.06
负荷/MW	600.27	600.21	−0.06

通过定负荷(DCS发电负荷保持在600.00MW)试验，计算#6机组合成气入炉及燃气切至放散时，前后2hC给煤机的平均给煤量。#6机组未通合成气时平均多用原煤6.55t/h，折算成标煤为5.05t/h，试验验证了合成气入炉后减小了机组用

煤量。

综上所述，合成气入炉对#6机组的燃烧有增强作用，当生物质合成气进入燃煤机组后，提高了#6机组发电负荷，并有降低#6机组煤耗的作用。

4试验结论

根据上述分析，在生物质气化耦合燃煤机组发电系统上进行定负荷试验与定煤量试验，对生物质气化产生可燃气，可燃气进入燃煤机组后燃煤机组负荷和排放烟气中SO_2，NO_x
质量浓度的变化，以及DCS发电负荷的变化情况进行分析，得到以下结论。

(1)生物质气化系统
中产生合成气的气体成分稳定，可燃气体
体积分数在30%左右。其中，CH_4，H_2的体积分数稳定在5%以上，CO的体积分数稳定在18%左右。

(2)在定煤量和
定负荷试验中，当合成气进入燃
煤机组炉膛后，合成气与煤粉在炉膛中燃烧产生NO_x，SO_2
等污染气体，经过超净排放装置后，烟气中污染物SO_2的质量浓度在35.00mg/m^3以下，NO_x
的质量浓度在40.00mg/m^3以下，均达到了超净排放的标准，燃煤机组消纳了生物质气化合成气的影响。

(3)合成气入炉对#6机组的燃烧有增强作用，生物质合成气通过#6机组高效发电，并有降低#6机组煤耗的作用。

参考文献：

[1] BP 中国. BP 世界能源统计年鉴 [Z]. 2015—2018.

[2] 马隆龙，吴创之，孙立. 生物质气化技术及其应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2003.

[3] 金宝生. 生物质能发电技术分析 [J]. 能源研究与信息，2008，24(4)：199－205.

[4] GIL J, CORELLA J, AZNAR M P, et al. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution [J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 17(5): 389－403.

[5] HERGUIDO J, CORELLA J, GONZALEZ－SAIZ J. Steam gasification of lignocellulosic residues in a fluidized bed at a small pilot scale. Effect of the type of feedstock [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,

1992,31(5):1274－1282.

[6] TURN S, KINOSHITA C, ZHANG Z, et al. An experimental investigation of hydrogen production from biomass gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, 23(8):641－648.

[7] 陈晓红,王智勇,毛天宇. 生物质成型燃料产业现状与发展前景 [J]. 中国资源综合利用,2018,36(6):83－85.

[8] 吕游,蒋大龙,赵文杰,等. 生物质直燃发电技术与燃烧分析研究 [J]. 电站系统工程,2011,27(4):4－7.

[9] 黄春超. 生物质直燃烟气处理技术的研究进展 [J]. 吉林化工学院学报,2016,33(7):8－12.

[10] 李志军. 我国生物质直燃发电的现状、问题及政策建议 [J]. 技术经济,2008,27(9):34－37.

[11] 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.

[12] 戴婷婷,张曙光. 生物质热电联产的相关问题分析 [J]. 电工技术,2018(16):100－101.

[13] 火电厂大气污染物排放标准:GB 13223—2011 [S].

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/144984.html