冶金企业燃气蒸汽联合循环发电的应用与发展*

张志平[1,2],张雨欣[3],李 科[1]

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司动供总厂,内蒙古 包头 014010;
3. 包头市热力总公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 冶金企业燃气-蒸汽联合循环发电机组主要动力设备为燃气轮机,可以燃烧低热值的高炉煤气。文章通过介绍冶金企业燃气-蒸汽联合循环发电的应用情况以及燃气-蒸汽联合循环的优势及特点,分析其发展趋势,针对冶金企业的利用富裕煤气带来的经济效益和社会效益,认为在冶金企业燃气-蒸汽联合机组的应用和发展是十分必要的。

关键词: 冶金企业; 燃气-蒸汽联合循环; 燃气轮机; 低热值

中图分类号: TK01+1,TM611.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2019)05-0072-03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.05.020

Applications and Development of Gas-steam Combined Cycle Power Generation in Metallurgical Enterprises

Zhang Zhi-ping[1,2], *Zhang Yu-xin*[3], *Li Ke*[1]

(1. *School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Power Supply General Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
3. *Baotou Heat Power Corp., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The main power equipment of combined cycle power plant in metallurgical enterprises is the gas turbine, which can burn the blast furnace gas with low heating value. In this paper, the applications and development of gas-steam integral unit are considered to be necessary in metallurgical enterprises through introducing the applications, advantages and characteristics of combined cycle power plant, analyzing its development trend as well as the economic and social benefits of using the gas surplus in metallurgical enterprises.

Key words: metallurgical enterprises; gas-steam combined cycle; gas turbine; low heating value

随着钢铁冶金技术的不断发展,炼铁产出的高炉煤气量不断增多,这些高炉煤气除了热风炉自用一部分之外,还用于炼焦炉加热以及煤气锅炉燃烧发电,但是还是有一部分高炉煤气不能被回收利用而放散,造成能源的极度浪费和环境污染;燃气-蒸汽联合循环(Combined Cycle Power Plant,以下简称CCPP)机组可以利用煤气进行发电,充分利用企业的二次能源。

* **收稿日期:** 2019-06-03

作者简介: 张志平(1989-),男,吉林省四平市人,在读硕士,工程师,现从事燃气-蒸汽联合循环发电的基建管理工作。

CCPP 机组是由燃气轮机发电和蒸汽轮机发电组合起来的联合循环发电装置，燃气轮机主要由空气压缩机、燃烧室、燃气透平以及必要的辅助设备等组成，燃料通过煤气压缩机的压缩，与空气在燃烧室充分燃烧产生高温高压的烟气，进入透平膨胀做功，将烟气的部分热能转换为机械能；而汽轮机组利用从余热锅炉来的过热蒸汽进行膨胀做功，将蒸汽的热能转化为机械能，最后将机械能转换为电能[1]。

CCPP 机组具有低排放、节能等优势，所以 CCPP 机组成为冶金企业煤气利用的重要设备，其未来的发展非常可观。

1　联合循环发电机组的应用

目前，我国宝钢、鞍钢、马钢、济钢、通钢、邯钢、包钢、莱钢、太钢、迁钢等钢厂的 CCPP 机组已建成运行，并取得了很好的经济效益与环境效益。受技术起步晚，材料、加工环节薄弱等因素影响，目前国内制造企业仅能完成部分小型天然气燃气轮机的生产制造，尚无法生产冶金企业低热值煤气燃气轮机。冶金企业低热值燃气轮机目前主要由 MHI（日本三菱）、GE（美国通用电气）两家公司设计制造，表 1 列出了几种低热值煤气燃气轮机的机型。

表 1　低热值煤气燃气轮机的主要机型

项目	GE	三菱			川崎 ABB	新比隆
	6B	MW－701D	MW－701DX	MW－251	GT11N2	PGT10B
燃烧室	分管	分管	分管	分管	单管	单管
燃料	合成气	高炉煤气	高炉煤气或混合煤气	高炉煤气或混合煤气	高炉煤气	合成气
热值/（kJ·m^{-3}）	8 360	4 034～5 810	3 553～4 389	2 926－7 524	3 260	7 350
入口温度/℃	1 140	1 150	1 250	1 150	1 158	
压缩比	21.9	12.0	15.0～20.0		15.4	14.0
单循环出力/kW	45 000	124 800	167 000	32 000		13 000
联合循环出力/kW	62 000	150 000	186 000	67 400	145 000	
排气温度/℃	525	540	540		540	488
联合循环效率/%	45.00	43.00	42.00	>46.00	45.52	
NO_x 排放/（mg·m^{-3}）	86	50	50	41	61	120

从目前国内 CCPP 机组的投运情况来看，日本三菱机组的占有份额很高，CCPP 机型主要为 M251S、M701S（DA）、M701S（DA）X、M701S（F），从 2004 年到 2017 年 9 月，全国共引进 M251S 型机组 21 台，分别建设投运在青钢、太钢、邯钢、沙钢、马钢、天铁、涟钢、重钢；共引进 M701S（DA）型机组 9 台，分别建设投运在包钢、迁钢、鞍钢；180MW 级别的 M701（DA）X 型燃机首台在 2016 年 8 月落户首钢京唐，在 2018 年投产，鞍钢 III 期 2017 年 8 月签订了一台此型机组的合同，计划 2019 年投入运行[2]。

美国通用电气公司的主要机型为 MS9001FA、6B、PG9171（E），2009 年武钢引进 GE 公司的 PG9171（E）型 CCPP 发电技术，新建了 2 套 150 MW 级 CCPP 机组，燃料额定热值 4 396 kJ/m^3，由高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气混合制备。

2　联合循环发电机组的优势

冶金企业的炼铁、炼钢、炼焦伴生的煤气是宝贵的二次能源，将其作为原料发电是各冶金企业的普遍做法，CCPP 机组的投入运行，不仅可以利用大量放散的煤气资源，减少能源浪费，还能提高企业的自发电量。

CCPP 机组相比于常规燃气锅炉发电机组的热效率要高很多，基于同等煤气热量，一般常规燃气锅炉发电热效率仅为 25%，CCPP 机组的联合循环热效率可以达到 43%；CCPP 机组热效率高的主要原因为：CCPP 机组采用联合循环（布莱顿循环和朗肯循环），煤气燃烧发生化学反应后产生的高温高压烟气可以做功发电，做完功的烟气温度可达

500～550 ℃，在余热锅炉加热给水产生蒸汽用于汽轮机发电；这样烟气既参与布莱顿循环，又参与朗肯循环，使 CCPP 机组的热效率比常规朗肯循环发电机组要高很多。

3 联合循环发电机组的特点

高炉煤气的可燃成分是一氧化碳和氢气，也含有大量的氮气和二氧化碳，低位热值一般为 2 510～3 520 kJ/m^3，属于低热值煤气；燃烧低热值煤气使 CCPP 机组空压机和透平机容积流量显著增大，流量平衡被破坏。解决此类问题可以使用单缸的轴流式空压机，可以降低压气机的叶片长度，降低空气的流量[3]。当燃气轮机燃烧低热值煤气后，还要考虑燃烧产物问题，尤其燃烧产物中的氮氧化合物可能超标。可以通过在燃烧室中某个位置射入水蒸气或者在混合煤气进入燃烧室之前喷水，使其被水蒸气饱和。由于高炉煤气含尘量大，这些含尘煤气进去 CCPP 机组后，会磨损煤压机以及燃气轮机的叶片，影响机组效率，一般采用适合于清除高煤含尘用的电气除尘器，清除灰尘[4]。

因为焦炉煤气的热值高，所以常常作为热值控制燃料，大多与高炉煤气混合使用配成一定发热量的煤气供给 CCPP 机组，这样可以使煤气的热值稳定，从而使燃烧状况良好。但是由于焦炉煤气含有较高组分的氢气，氢气的高活性和高的火焰传播速度使焦炉煤气在 CCPP 机组的使用中要区别于燃烧天然气的燃气轮机[5]，因此一般在设计燃气轮机火焰筒时要根据具体的煤气特性而加以改造，并采取相应的技术措施进行优化。

此外，CCPP 机组还具有随时可以启动和停机、可急降负荷、甩负荷等优点。启动模式简单可靠，同轴采用辅助蒸汽启动；分轴布置采用 SFC 启动；点火可直接采用混合煤气[6]。由于 CCPP 机组煤气燃烧采用更有效的低 NO_x 燃烧器，将有效地减少大气污染物的排放。

4 联合循环发电机组的发展趋势

与同期发达国家冶金行业能源利用发展趋势相比，我国能源综合高效利用率相比世界级钢企存在差距；CCPP 高效发电技术起步晚，更先进的大型高效燃机发电设备占比低。而且冶金企业煤气的生产与消耗随生产的调整而波动，一般新建 CCPP 机组作为煤气的缓冲用户，可以起到煤气产、消平衡的作用，同时提升企业煤气资源综合利用的效率。

在钢铁行业不断发展的过程，除了保证安、稳、长、满、优运行外，如何节能降耗、挖掘增效是能源体系面临的新问题，在 CCPP 机组运行的过程中，由于夏天气温普遍偏高，在煤气充足的情况下，机组却不能满负荷运行，严重影响机组的出力，这种情况下，提出燃料喷水加湿技术，通过给燃料喷水加湿，燃料温度下降，燃料的热值下降，燃料的质量流量增加，排气质量流量增加；通过在某 180 MW 等级的机组的实验过程，通过加湿技术，出力相应增加，每小时投入 8 t 水，最大可以增加 4.4 MW 的功率，经济效益明显。

按照现行国标 GB 13223—2011[7]《火电厂大气污染物排放标准》，大部分企业的燃气锅炉的烟尘、SO_2、NO_x 排放基本达标，但按照国家超低排放限额的要求，目前的排放指标均会超标，如果采用对原有的燃气锅炉进行改造的的方案，改造以及维修保养成本会很高，而且随着年限增长设备劣化严重，事故率增加，这样的情况下，新建符合环保法律法规要求的低排放的 CCPP 机组势在必行。

所以针对 CCPP 机组在冶金企业的不断推进，会相应提出很多新的技术手段和运行优化或者改造，调整设备动力结构；同时炼钢、炼铁、炼焦设备的不断发展，同样会促使 CCPP 机组的发展更具有前景。

5 效益分析

(1) 冶金企业的 CCPP 机组可以消耗放散的高、焦炉煤气，可以基本消除企业剩余煤气向大气的排放的能源浪费，同时也减少对周边环境的污染。

(2) 燃气－蒸汽联合循环机组在冶金企业投产后，以某钢铁企业两台 150 MW 的燃气－蒸汽联合循环机组算，可以消耗高炉煤气 26.1 万 m^3/h，焦炉煤气 1.5 万 m^3/h，此项目共折合标煤约 158 t，经济效益明显。

(3) CCPP 机组的投运可以大大提高企业的自发电率，提高企业电力自供能力，加强企业生产用电的安全可靠性，同时降低企业成本，提高企业效益。

6 结束语

在钢铁去产能的大背景下，尤其钢铁企业面临的能源管理因素和环境保护方面的制约，采用更加

(下转第 78 页)

3.3 环境效益的评估

项目从2016年至2018年累计减少黄河取水3 189.93万m^3,减少污水排放3 480.16万m^3,按照国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A排放标准排放污水中含COD 50 mg/L计算,3年内累计减少COD的排放共1 740 t。可见项目在减少黄河水使用上缓解了对本市自然水环境生态的影响,同时通过减少污水及污染物的排放降低了本区域内水体的污染程度,在环境生态的改善方面创造了显著的"环境效益"。

3.4 社会效益的评估

此项目的建成,在企业生产能耗方面同样做出突出贡献,节约了钢铁企业全流程工序下的新水消耗量,将本企业吨钢耗新水量降至2.7 m^3/t,不仅降低了企业工序能耗水平,也为企业降低了产品运营成本,提高了产品利润值,增强了企业产品在国内及国外市场上的竞争力,并且改善了企业的生产环境,使得职工能更好的为企业服务。

4 结论

(1)供污水改造项目是北方某钢铁企业的一项节水改造项目,它是钢铁企业提高效率、谋求发展的一项实事工程。项目的实施产生了巨大的经济效益、节水效果和企业知名度的提升,可为类似钢铁企业的改造提供借鉴。

(2)项目在节水方面实现了经济、环境和社会效益的三赢。它是以环境效益为目标,在达到环保要求基础上的经济效益的提升和良好的社会反响。

(3)开展项目在节水方面的效益评估,对推进节水减排政策,完成节水及污染物总量控制指标上有着重要的作用。本文在污水改造项目节水效益评估的基础上,总结了钢铁企业节水项目效益评估的一般适用方法。

参 考 文 献

[1] 李爽,张海迎.城市大规模节水器具改造的费用效益分析案例[J].给水排水,2012,38(5):143-147.

[2] 李振东.环保投资的费用—效益分析[J].中国环保产业,2002,2:42-45.

[3] 张妍.费用效益分析在项目评估中的运用[J].环境科学导刊,2009,28(增刊):21-22.

(上接第74页)

先进高效和环保的CCPP发电技术,从有限的经营资源中挖掘更多的经济效益,是所有冶金企业的发展趋势,同时提高了环境保护和资源综合利用水平,因此CCPP发电机组在冶金企业将会受到越来越高的重视和支持。

参 考 文 献

[1] 薛福培.我国工业燃气轮机的现状与前景[A].天然气在热电联产中的应用专题研讨会论文集[C].南京:中国电机工程学会,2002,64-77.

[2] 刘尚明,何皑,蒋洪德.重型燃气轮机控制发展趋势及未来关键技术[J].热力透平,2013,42(04):217-224.

[3] 王欢.燃气轮机辅机控制系统的设计研究[D].秦皇岛:燕山大学,2015.

[4] 蒋洪德,任静,李雪英,等.重型燃气轮机现状与发展趋势[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5096-5102.

[5] 蔡宁生,崔荣繁,陈克杰,等.R0110重型燃气轮机的自主研发[J].燃气轮机技术,2014,(03):1-7.

[6] 裴宏峰.建设燃气-蒸汽联合循环发电机组高效回收和利用钢铁企业煤气资源[J].鞍钢技术,2004,(5):41-42.

[7] GB 13223—2011,火电厂大气污染物排放标准[S].