一种烧结工序多热源利用发电工艺

陈玉海
(北京中冶设备研究设计总院有限公司,北京 100029)

摘 要: 从余热发电角度出发,对$2\times150\ m^2$烧结机余热资源的分布情况及热烟气余热回收进行了探讨。针对烧结工序生产不稳定的特点,在改变环冷机余热取风方案的基础上,利用主烟道废气和环冷机烟气进行余热发电,由环冷机余热锅炉对主烟道锅炉产汽进行再热后进入汽轮机发电,采用多热源供汽协同控制,实现了发电系统的可靠运行。采用新方案后外供电量可提高9%左右且总投资减少,项目投资回收期缩短。本文从工艺设计角度对设备选型及参数确定进行了详细介绍与分析,以供同行参考。

关键词: 烧结工序; 多热源利用; 余热发电; 协同控制
中图分类号: X706 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2016)05-0057-05
doi: 10.13403/j.sjqt.2016.05.066

A kind of process of generating electricity by using multiple heat sources in sintering process

Chen Yuhai
(*Beijing Metallurgical Equipment Research & Design Corporation Ltd. of MCC Group*, *Beijing* 100029)

Abstract From the perspective of waste heat power generation, the distribution of the waste heat resources of $2\times150\ m^2$ sinter machine and the waste heat recovery of hot flue gas were discussed. According to the characteristics of sintering process and production instability, and based on changing waste heat collection scheme of circular cooler, the waste heat power generation is realized by utilizing the waste gas of sintering collecting main and flue gas of circular cooler, the steam produced by the boiler of the collecting main enters the steam turbine generator after it is reheated by the waste heat boiler of circular cooler, cooperative control is realized by gas supply of multi-heat source, and reliable operation of power generation system is realized. After adoption of the new scheme the external power supply can be increased by about 9%, the total investment decreases, and the payback period of project investment is also shortened. From the angle of process design, equipment selection and parameter determination are analyzed in detail for the peer reference.

Key words sintering process; multi-heat source utilization; waste heat power generation; cooperative control

1 前 言

目前,烧结系统余热发电技术及主体设备已实现国产化,国内钢铁企业加大了对中低温余热回收及利用的力度,烧结余热发电技术已得到普遍推广。仅从余热发电能源回收的角度考虑,环冷机能源回收装备已由最初的单压锅炉发展为应用较广的双温双压余热锅炉,后者比前者效率可高出5%~10%左右。此外,还有闪蒸余热发电和补燃余热发电等[1,2]。烧结机主烟道已由外置式余热锅炉变为内置式大烟道余热锅炉,后者在性能和效率上都有一定的改进。

在实际工程应用中,典型的烧结机余热发电是利用双温双压余热锅炉回收环冷机前部一段和二段烟气产生双参数蒸汽以供汽轮发电机

收稿日期: 2016-09-22
作者简介: 陈玉海(1975-)男,高级工程师,主要从事能源综合利用及电站工艺设计工作。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组发电，但一般的烟气收集方案表现为尽可能多地回收可利用余热[2,3]，造成烧结热源整体品质较低、发电量受外界温度变化影响大、系统可调节性较差、蒸汽参数稳定性难以保证等特点，且整个系统造价偏高。对烧结机主烟道余热进行回收发电也出现了不少案例[3~5]，但实际运行中存在与环冷机余热锅炉产汽参数不匹配，产汽参数不达设计值，稳定性差等现象。针对以上情况，结合以往工程设计经验，本文以河北某钢厂 $2\times150\ m^2$ 烧结余热发电工程为例进行探讨，在改变环冷机余热取风方案的基础上，提出了在利用主烟道废气和环冷机烟气进行余热发电时，由环冷机余热锅炉对主烟道锅炉产汽进行再热后进入汽轮机发电，采用多热源供汽协同控制，以实现发电系统可靠运行的同时提高收益率。

2 余热资源现状

烧结工序废烟气的物理显热占烧结厂全部热支出的50%左右[2,3]，主要有烧结机烟气显热和环冷机废气显热两部分，13%~23%的热量存在于烧结机烟气显热中，19%~34%的热量被冷却机废气携带。

2.1 环冷机废气余热资源

烧结矿从烧结机尾经过热破碎后卸到冷却机上，卸出的烧结饼为高温介质，鼓风机的送风穿透环冷机上的矿料层，热烧结矿在冷却过程中其热能变为废气显热，废气温度随冷却机部位的不同而不同，给料部位温度最高，卸料部位温度最低。

环冷机进口和出口的烧结矿采用红外测温枪测量，在台车横向界面对多块烧结矿进行多点测量，多次测量选取具有代表性的数据，以减少随机误差，求得平均值作为该测点热工测试参数的计示值，台车上烧结矿采用热电偶埋入法测温取得计示值。环冷机烟罩内的烟气温度采用热电偶测量，选取各风箱中点对应台车上方25 cm处为测试位置，横向界面上选取3个点进行多次测量求取平均值。环冷机台车前9个风箱对应矿温及其料层上部热风温度如图1所示。

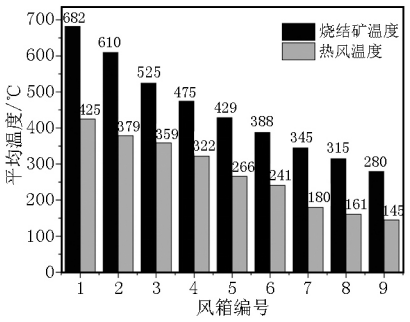


图1 台车前9个风箱对应矿温及其料层上部热风温度

由图1可知，随着冷却过程的进行，环冷机上废气温度逐渐降低，从450 ℃左右逐渐降到200 ℃以下，最低处达150 ℃以下，1#~6#风箱上部经料层换热后的热风属于高中温热源。

2.2 烧结工序机尾烟气余热资源

烧结机主烟道配置1台 $1.65\times10^4\ m^3/min$ 主抽风机，额定负压为16.5 kPa，工矿运行负压为15 kPa，正常生产风门开启度92%，主抽风机入口温度为140 ℃。图2为现场监测的主烟道最后6个风箱的烟气平均温度分布情况。

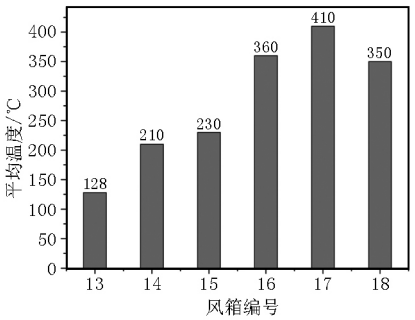


图2 机尾风箱烟气温度平均值统计

在回收该部分烟气时，必须考虑风箱温度波动、主抽风机目前的能力富余空间及运行状况、大烟道中排烟温度、脱硫工艺、烧结烟气含硫量、含水量等因素的影响，为保证烟道出口温度不影响后续工序，选取后三个风箱烟气进行回收，即利用350 ℃以上热烟气发电。

3 系统配置及分析

两条烧结生产线配置相同，烟气收集和锅炉选型选取单套烧结生产线的热能回收系统为

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

研究对象。

3.1　环冷机余热锅炉

烧结环冷机采用烟气再循环系统，对烧结环冷机进行密封改造，并在环冷机内部设置取风隔板等。环冷机取风按取风量及风温设计为高温段一个取风口，低温段设置二个取风口并连至低温烟气管道（传统方案为高温段两个取风口，低温段设置一个取风口[5]），各取风管道分别接入环冷烟气余热锅炉高、低温烟气入口。环冷机取风管道将设置必要的阀门用于调控取风量及在余热锅炉事故状态时切换原有烟气排放系统，保证余热回收系统不影响烧结主工艺运行。

烟气收集方式改变后，由于烟气总量和分配比例不同，各方案余热锅炉参数不同。优化取风方案中回收烟气总量为 24.4 万 $Nm^3 \cdot h^{-1}$，较传统方案少了 15.86%，优化方案可回收烟气平均温度为 410 ℃，比传统方案高出 40 ℃，相应余热锅炉的换热面积减少，重量得到优化，而且循环风机[7,8]等辅助设备由于风量减小，相应烟风管道等材料也大为降低，工程成本和自耗电大为降低。环冷机密封改造后，仍不可避免有漏风现象，本方案回收环冷机中高品质的烟气，机组发电量和抗环境温度变化能力提高，冬、夏季均能保证在稳定的状态下运行。两种取风方案下双压锅炉输入与产出参数对比分别如表 1 与表 2 所示。

表 1　两种方案下双温双压锅炉输入参数对比

方案	总烟气量 /万 $Nm^3 \cdot h^{-1}$	高温段取风量 /万 $Nm^3 \cdot h^{-1}$	高温段平均温度/℃	低温段取风量 /万 $Nm^3 \cdot h^{-1}$	低温段平均温度/℃	排烟温度 /℃	供水温度 /℃
传统取风	29	19	380	10	330	140	40
新取风	24.4	7.83	410	16.57	320	138	40

表 2　两种方案下双温双压锅炉产出参数对比

方案	高参数蒸汽压力/MPa	高参数蒸汽温度/℃	高参数蒸汽外供量/$t \cdot h^{-1}$	低参数蒸汽压力/MPa	低参数蒸汽温度/℃	低参数蒸汽外供量/$t \cdot h^{-1}$
传统取风	1.6	320	22.9	0.4	200	5.3
新取风	1.6	345	22.3	0.4	200	4.6

说明：表中两种参数蒸汽量之和中包含大烟道余热锅炉蒸汽。

由表 1 和表 2 可知，合理减小烟气回收总量，回收高品质的烟气，蒸汽温度提升了 25 ℃，锅炉产汽品质得到提高，降低损失。在双压余热锅炉中，高参数烟气对过热蒸汽的生成起调节作用，而少量高参数烟气热值即可实现饱和蒸汽到过热蒸汽的转化，高参数烟气量在传统取风方案中占 60%，在新取风方案中占 32%，由于烟气量占比小更有利于对过热蒸汽产生的调节作用。

3.2　主烟道余热锅炉

利用大烟道最后三个风箱中的高温热烟气进行回收利用，余热锅炉分若干模块直接插入烧结机大烟道最后 3 个风箱范围内。

目前烧结机主烟道风箱最高负压为 15 kPa，即理论上主抽风机还有 1.5 kPa 的富余能力，考虑烧结机今后运行漏风率还会增加，故大烟道锅炉阻力实际最多有 800 Pa 左右富余。

如果大烟道余热锅炉产过热蒸汽与双压余热锅炉高参数蒸汽直接并联进入汽轮机主蒸汽口，则大烟道锅炉产汽温度需与双压余热锅炉高参数蒸汽温度相同，即达到 345 ℃。然而，受锅炉材质、换热器布置空间等因素的限制，大烟道锅炉实际运行温度一般低于 320 ℃[5,6]。两种不同温度的蒸汽直接混合，必将降低主蒸汽品质，增加损失，影响进入汽轮机蒸汽的温度适应范围。而且大烟道余热锅炉直接产过热蒸汽，需用翅片管换热器组成过热管束，如发生爆管，会使锅炉水大量漏入大烟道，造成事故停车。大烟道余热锅炉设备参数如表 3 所示。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 烧结大烟道余热锅炉参数表

烟气流量/万 $Nm^3 \cdot h^{-1}$	高温段平均温度/℃	蒸汽量/$t \cdot h^{-1}$	总传热量/kW	废气侧阻力/Pa	蒸汽出口温度/℃	蒸汽压力/MPa
8.1	365	4.3	3 080	<500	饱和	1.65

烧结大烟道余热锅炉采用内置热管式余热锅炉，所产蒸汽在双温双压锅炉中过热后再进汽轮机，其设计压力略大于双压锅炉出口压力值，以补偿蒸汽在双压余热锅炉中的压力降。由于烧结机大烟道余热回收所产蒸汽量受诸多因素制约，需综合衡量，在保证烧结系统绝对安全条件下，生产合理的蒸汽，而绝不能单纯追求产汽量而回收烟道余热，影响烟气品质。此外，大烟道排烟温度过低产生积露腐蚀，将造成后续设备安全隐患。

3.3 汽轮发电机组配置及性能分析

$2 \times 150\ m^2$ 烧结余热发电工程采取四炉一机的配置，可以确保在单套烧结系统停产检修或者暂停某一个或两个锅炉检修时，汽轮机可降负荷正常运转而不停机。余热锅炉与汽轮发电机组工艺配置方案如图3所示。

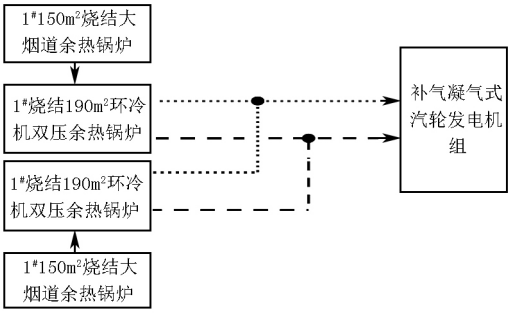


图3 余热锅炉与汽轮发电机组工艺配置方案

大烟道余热锅炉所产蒸汽进入环冷机余热锅炉过热，2台双压余热锅炉输出的高参数蒸汽并联后送入汽轮机主蒸汽口，低参数蒸汽并联后作为补汽进入汽机补汽口，汽轮发电机做功发电。其汽轮发电机组参数配置如表4所示。

表4 汽轮发电机组参数

项目	蒸汽汽轮机型号	高参数额定进气量/$t \cdot h^{-1}$	高参数额定进汽温度/℃	高参数额定进汽压力/MPa(a)	低参数额定进气量/$t \cdot h^{-1}$	低参数额定进汽温度/℃
传统方案	BN9-1.55/0.38	43.8	315	1.55	10.6	195
优化方案	BN9-1.55/0.38	44.6	340	1.55	9.2	195

续表4 汽轮发电机组参数

项目	低参数额定进汽压力/MPa(a)	额定排汽压力/MPa(a)	发电机型号	额定功率/MW	额定转速/$r \cdot min^{-1}$	额定电压/kV	功率因素
传统方案	0.38	0.008	QF2-9-2Z	9	3 000	10.5	0.8
优化方案	0.38	0.008	QF2-10-2Z	10	3 000	10.5	0.8

针对环冷机双温双压余热锅炉，两种方案均配置补汽凝汽式汽轮机组，型号：BN9-1.55/0.38；经热力学计算，新取风方案单位发电汽耗为5.6 kg/kWh，传统方案为6.2 kg/kWh。新取风方案发电量为9 630 kWh/h，配汽轮发电机10 MW；传统方案发电量为8 790 kWh/h，配9 MW的汽轮发电机。

4 经济效益分析

烧结工序余热回收发电后，优化方案年产经济效益可达3 309.23万元，财务内部收益率43.75%，项目投资回收期1.52年(不含建设期)，具有良好的经济效益。其中平均年利用小时数按7 200 h计，电价0.54元/kWh。两种取风方案经济技术指标见表5。

表5 两种方案下的技术经济指标

项目	发电量/$kWh \cdot h^{-1}$	估算总投资/万元	年销售收入/万元	年总成本费用/万元	总投资收益率/%	项目财务内部收益率/%	项目投资回收期/a
传统方案	8 790	5 010	3 019.42	675.86	44.25	38.36	1.73
优化方案	9 630	4 870	3 309.23	673.39	51.21	43.75	1.52

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由表 5 可知，新方案热源利用率高，发电量增多 840 kWh/h，提高约 9% 左右，而新方案中烟气量减少，系统造价降低，使得整个项目的财务内部收益率、投资回收期等指标都优于传统的方案。

5 结　论

比较了目前已上发电工程中较多采用的余热回收方法和优化取风比例后的技术方案，从技术层面和经济效益两方面进行了对比。得出如下结论:

1) 利用烧结工序废气进行余热回收发电时，同时采用烧结机主烟道烟气余热和环冷机烟气余热，合理控制烟气参数，可有效提高机组外供发电量，同时降低工程成本，项目财务内部收益率可达 43.75%，具有良好的经济效益。

2) 烧结主烟道尾气余热回收时，考虑到锅炉经济性和功能性，宜设计为生产饱和蒸汽，压力满足工艺要求时，其蒸汽品质可通过环冷机余热锅炉再热得以提高，可保证锅炉设备经济安全运行。

参考文献

[1] Teijin Shibuya，Hatsuki KUBQ，Hideomi，et al. A System for the Recovery of Waste Heat from the Sinter Plant [J]. Transaction ISIJ，1981. 21：664.

[2] 常弘，梁凯，刘靖宇. 我国烧结余热回收技术发展概述 [C] // 第八届全国能源与热工学术年会论文集，2015 (8)，570 - 576.

[3] 何张陈，宋纪元，侯宾才. 烧结机尾烟气与冷却废气余热联合回收发电技术的开发与应用 [J]. 冶金动力，2012 (3)：41 - 45.

[4] 杨继锐，范玉新，叶志强. 烧结机机尾烟气余热发电的探究与应用 [J]. 冶金动力，2013(8)：44 - 46.

[5] 董辉，王爱华，冯军胜，等. 烧结过程余热资源回收利用技术进步与展望 [J]. 钢铁，2014(9)：1 - 9.

[6] 胡建红. 某钢厂烧结机大烟道余热回收技术探究 [J]. 冶金动力，2015(1)：25 - 30.

[7] 梁建民，胡兵. 烧结冷却余热锅炉用引风机的选型 [J]. 烧结球团，2014(6)：51 - 57.

[8] 李宗平，范晓慧，孙英，等. 烧结环冷机余热发电的风量优化配置 [J]. 烧结球团，2016(2)：52 - 56.

(上接第 56 页)

[2] 陈砚雄，冯万静，林宗彩. 钢铁企业粉尘的综合处理与利用 [J]. 烧结球团，2005，30(5)：42 - 46.

[3] 张向伟，廖洪强，包向军，等. 除尘灰泥集中处理及资源化利用技术 [J]. 冶金环境保护，2007，5：32 - 34.

[4] 张欣欣. 钢铁企业含锌尘泥的循环利用 [C] //全国能源与热工程学术年会论文集. 贵阳，2008：49 - 74.

[5] 李明阳. 电炉粉尘综合利用的研究 [D]. 重庆：重庆大学，2006.

[6] 张寒霜. 从废镀锌板炼钢粉尘中回收锌的工艺研究 [D]. 北京：北京有色金属研究总院，2011.

[7] 罗伟，徐政，张寒霜，等. 电弧炉烟尘湿法提锌的研究 [J]. 金属矿山，2011(2)：153 - 156.

[8] Puta W D. The Recovery of Zinc from EAF Dust by the Waltz Process [J]. Steel Times，1989，217(3)：194 - 195.

[9] 曾丹林，刘胜兰，龚晚君，等. 从含锌粉尘中湿法回收锌的研究现状 [J]. 湿法冶金，2013，32(4)：217 - 219.

[10] 李密. 锌焙砂选择性还原与铁锌分离的基础研究 [D]. 长沙：中南大学，2013.

[11] James M McClelland，Jr P E，Hidetoshi Tanaka，et al. Fastment Dust Pellet Reduction Operations Report on the First Fastment Waste Recovery plant [C] //2001 Iron making conference proceedings. 2001，629 - 640.

[12] 魏国，赵庆杰，董文献，等. 直接还原生产概况和发展 [J]. 中国冶金，2004，82(9)：16 - 20.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net