

# 烧结矿显热分级回收实验研究

赵 斌, 温志梅, 钟晓晖, 韩希强

(河北联合大学 河北省现代冶金技术重点实验室 河北 唐山 063009)

**摘 要:** 基于余热能梯级利用理论, 搭建烧结矿显热分级回收实验台。在烧结矿初温相等的条件下, 比较了 9 组正交实验工况的烟回收率与热回收率。实验结果表明, 在粒径 10 ~ 16 mm、料层厚度 1 200 mm、冷却风量 748 m<sup>3</sup>/h、进口风温 70 °C 的工况下, 烟回收率和热回收率均较高, 分别为 49. 0% 和 88. 1%。动力与吸收式热泵分级回收系统平均热回收率达 84. 6%, 平均烟回收率达 47. 6%, 比单级动力回收系统热回收率平均提高了 10. 7 个百分点、烟回收率平均提高了 2. 3 个百分点。

**关 键 词:** 烧结矿; 显热; 中低温余热; 吸收式热泵; 分级回收; 正交实验

中图分类号: TK114 文献标识码: A

## 引 言

烧结矿的显热提取与高效回收是烧结工序深层次节能的关键技术<sup>[1~2]</sup>。烧结过程是热加工过程, 在目前普遍采用冷矿工艺的情况下, 烧结过程又可分为烧结和冷却两个环节。烧结过程有两部分余热可回收利用, 其一为烧结机后部几个风箱内的烟气余热, 其二是热成品矿具有的显热<sup>[3~4]</sup>。由于烧结机烟气显热受湿法脱硫工艺的限制, 利用较困难。因此, 目前烧结余热回收主要是指烧结矿显热回收。

烧结机生产的 700 ~ 800 °C 烧结矿, 从烧结机尾部落下经过单辊破碎后, 落到冷却机台车上。根据熟料的冷却过程和冷却机制来看, 高温烧结矿处在连续移动之中, 冷却空气穿过烧结矿料层下部篦板, 垂直吹入料层, 与烧结矿料层换热后从料层上部进入集气罩, 同时烧结矿被冷却<sup>[5~7]</sup>。

梯级利用是余热科学利用的有效方法, 即按余热资源的品位逐级加以利用。烧结余热利用将遵循

“温度对口、梯级利用”的原则, 在热量供求方面最大程度地实现“量”与“质”的匹配, 力求能级差最小, 烟效率最高<sup>[8]</sup>。基于余热能梯级利用理论, 研究搭建烧结矿显热分级回收实验台<sup>[9]</sup>, 对冷却机热废气显热采用动力与吸收式热泵两级回收, 以期为中低温余热高效回收工艺的研究提供理论依据和实验基础。

## 1 实 验

### 1.1 实验装置

烧结矿显热分级回收实验台由电阻炉、风机、空气加热器、换热本体、换热器、辅助加热器、吸收式热泵机组、埋地管和测控系统等组成, 如图 1 所示。实验用热泵为第一类吸收式热泵, 其主要技术参数如表 1 所示。冷却机气固换热是一个非稳态的换热过程, 在实验中依据换热本体出口热风温度随冷却时间的变化, 进行单级动力回收和分级回收实验。

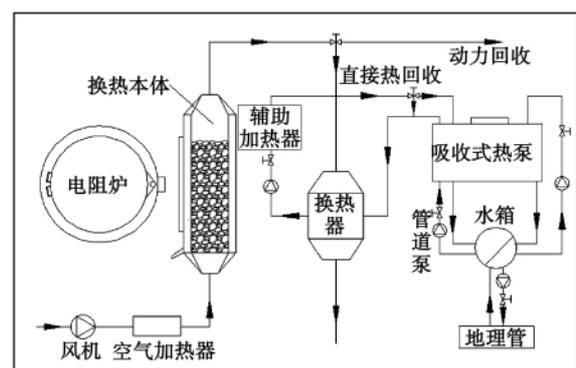


图 1 实验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of the test system

收稿日期: 2012 - 03 - 06; 修订日期: 2012 - 04 - 01

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目( E2011209011)

作者简介: 赵 斌( 1968 - ), 男, 吉林公主岭人, 华北电力大学博士研究生, 现为河北联合大学教授。

表 1 热泵机组主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of the heat-pump unit

项目	数值
热水流量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	5.8
热水温度/℃	90/82
冷水流量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	4.0
冷水温度/℃	12/7
冷却水流量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	10.0
冷却水温度/℃	30/35

1.2 实验方法

使用电阻炉将烧结矿加热到 950 ℃ 后转移到换热本体中,待换热本体热电偶温度稳定后,启动风机和管道泵。料层厚度根据等容积法,通过控制料框容积使其达到目标值,冷却风量通过风机的调频实现,进口风温通过空气加热器调节。冷却烧结矿得到高温热风,220 ℃ 以上的热风进入动力回收系统,220 ℃ 以下的热风利用吸收式热泵系统回收,在吸收式热泵热源温度偏低时启动辅助加热器,以模拟实际生产工况。实验系统采用计算机自动控制和自动数据采集。

1.3 实验工况

采用正交实验方法对烧结矿粒径、料层厚度、冷却风量、进口风温这 4 个因素的 3 个水平进行分析,选择正交表 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>),正交实验工况控制参数如表 2 所示。

表 2 正交实验工况控制参数

Tab.2 Control parameters of the orthogonal test operating conditions

工况	粒径 /mm	料层厚度 /mm	冷却风量 /m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	进口风温 /℃
I	10 ~ 16	1000	576	50
II	10 ~ 16	1200	748	70
III	10 ~ 16	1400	921	90
IV	16 ~ 25	1000	748	90
V	16 ~ 25	1200	921	50
VI	16 ~ 25	1400	576	70
VII	25 ~ 40	1000	921	70
VIII	25 ~ 40	1200	576	90
IX	25 ~ 40	1400	748	50

2 实验结果与分析

2.1 烧结矿显热分级回收

目前,烧结矿显热回收方式主要有直接热泵热

回收和动力回收两种,本研究搭建烧结矿显热分级回收实验台,对烧结矿显热进行深度分级回收。

2.1.1 单级动力回收

直接热泵热回收是将烧结冷却机余热源温度为 110 ℃ 以上的热量全部用吸收式热泵来回收。而单级动力回收是回收烧结冷却机出口 220 ℃ 以上的热风余热,220 ℃ 以下的热风直接排入环境中。烧结矿显热单级动力回收系统采用热回收率  $\eta_1$  和焓回收率  $\eta_2$  指标进行评价,即:

$$\eta_1 = Q_1 / Q_0 \quad (1)$$

$$\eta_2 = E_1 / E_0 \quad (2)$$

式中:  $Q_0$ —单位热风总热量, kJ/kg;  $Q_1$ —220 ℃ 以上单位热风热量, kJ/kg;  $E_0$ —单位热风总焓值, kJ/kg;  $E_1$ —220 ℃ 以上单位热风总焓值, kJ/kg; 环境温度取 298.15 K。正交实验计算结果如表 3 所示。

表 3 正交实验计算结果 (kJ/kg)

Tab.3 Calculated results of the orthogonal tests(kJ/kg)

工况	$Q_0$	$Q_1$	$E_0$	$E_1$	$Q_2$	$Q_h$	$Q_g$	COP
I	898	693	602	291	47	29.3	17.2	1.7
II	898	705	602	295	54	33.2	20.7	1.6
III	898	710	602	298	36	31.3	18.7	1.7
IV	898	657	602	271	39	29.5	15.0	2.0
V	898	680	602	285	44	33	20.5	1.6
VI	898	688	602	291	29	32.4	16.4	2.0
VII	898	608	602	239	76	36.9	23.4	1.6
VIII	898	627	602	246	58	35.6	18.6	1.9
IX	898	607	602	241	43	35.7	20	1.8

注: COP—热泵性能系数。

根据式(1)~式(2)和表 3,分别计算 9 组实验工况的焓回收率和热回收率,结果如图 2 所示。

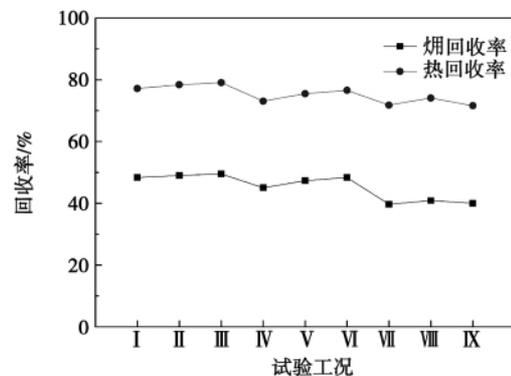


图 2 焓回收率与热回收率

Fig.2 Exergy recovery rate and heat recovery rate

由图 2 分析可知,9 组正交实验工况单级动力回收热回收率平均为 73.9%, 烟回收率平均为 45.3%。

### 2.1.2 动力与吸收式热泵两级回收

由于 9 组正交实验控制参数不同,致使换热本体中烧结矿冷却总时间(动力回收时间与热泵热回收时间之和)、动力回收时间和热泵热回收时间也各不相同,如图 3 所示。

由图 3 可知,平均总冷却时间为 2 230 s,由于动力回收系统利用的余热源温度为 220 ~ 520 °C,动力回收时间约占总换热时间的 77%。而吸收式热泵回收的余热源温度为 110 ~ 220 °C,热泵热回收时间约占总换热时间的 23%。

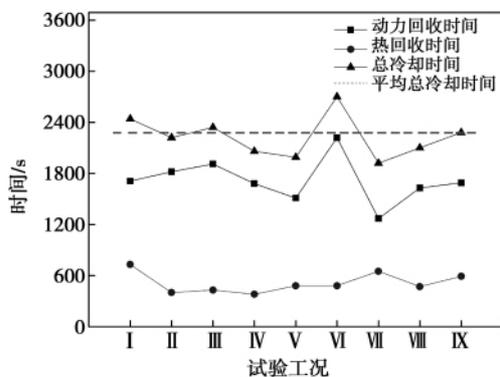


图 3 正交实验烧结矿冷却时间

Fig. 3 Sinter cooling time of the orthogonal tests

烧结矿在换热本体中被空气冷却,随着换热的进行,其出口热风温度逐渐降低,当其温度降至 220 °C 以下时,热风则进入热泵机组进行热回收。换热器中热水吸热率(换热器中热水吸热量占 110 ~ 220 °C 热风总热量的百分比)为  $\eta_3$ ,通过吸收式热泵的热回收率为  $\eta_4$ ,即:

$$\eta_3 = Q_3 / Q_2 \quad (3)$$

$$COP = Q_h / Q_g \quad (4)$$

$$\eta_4 = COP \cdot \eta_3 \quad (5)$$

式中:  $Q_2$ —110 ~ 220 °C 单位热风热量, kJ/kg;  $Q_3$ —换热器热水吸热量, kJ/kg;  $COP$ —热泵性能系数;  $Q_h$ —热泵的制热量, kW;  $Q_g$ —热泵消耗的热能, kW。根据式(3)、式(5)和表 3,分别计算 9 组实验工况的热泵热回收率和热水吸热率,结果如图 4 所示。

由图 4 分析可知,热水从低温热风余热中的吸热率平均为 5.3%,经过热泵机组制热后,热回收率平均为 9.3%,比热水吸热率提高了 4 个百分点。因此,利用吸收式热泵可有效回收烧结矿低温热风显热,制取更多的热量,从而提高余热资源的回

收率。

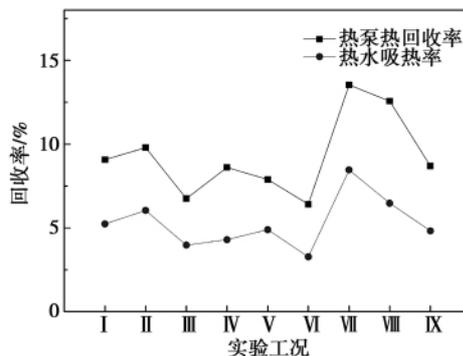


图 4 热水吸热率和热泵热回收率对比

Fig. 4 Comparison of the hot water heat absorption rate and heat-pump heat recovery rate

## 2.2 分级回收工况优化

### 2.2.1 实验工况分析

烧结矿显热分级回收的 9 组实验工况中,单级动力回收系统最佳工况为工况 III,其烟回收率达 49.5%,热回收率达 79.1%;直接热泵热回收系统最佳实验工况为工况 VII,其热回收率达 86.4%,烟回收率达 39.7%。对比工况 III 与工况 VII 可知,粒径越小、料层越厚、进口风温越高,烟回收率越大;粒径越大、料层越薄、进口风温越低,热回收率越高。综上分析,在粒径 10 ~ 16 mm、料层厚度 1200 mm、冷却风量 748 m<sup>3</sup>/h、进口风温 70 °C 的工况 II 下,烧结矿显热分级回收系统烟回收率为 49.0%,热回收率为 88.1%,可为分级回收系统最佳工况。

### 2.2.2 回收方式对比分析

烧结矿显热分级实验台可切换进行单级动力回收和分级回收两种实验。在烧结矿初温相等的条件下,进行烧结矿直接热回收、单级动力回收和分级回收 3 种方式的热回收率和烟回收率指标对比如表 4 所示。

表 4 3 种回收方式余热回收率对比(%)

Tab. 4 Contrast of the waste heat recovery rates in the three recovery modes(%)

回收方式	热回收率	烟回收率
直接热泵热回收	142.6	24.2
单级动力回收	73.9	45.3
分级回收	84.6	47.6

由表 4 分析可知,如果将高温热风实施直接热回收,其热回收率为 139.7% (热泵 COP 平均值

为 1.77, 如表 3 所示, 虽然回收的热量较多, 但焓回收率仅为 10.5%; 当高温热风实施单级动力回收时, 得到的焓回收率约为直接热泵热回收方式中焓回收率的 4.3 倍, 但热回收率降低; 采用吸收式热泵进行热回收, 使分级回收方式热回收率达 84.6%, 介于直接热泵热回收和单级动力回收两种方式之间, 但焓回收率达 47.6%, 高于直接热泵热回收和单级动力回收两种方式。因此烧结矿显热分级回收是最优的回收方式。

### 3 结 论

烧结矿显热分级回收实验台可切换进行单级动力回收和分级回收实验, 达到“高质高用、梯级利用”的目标。通过对 9 组正交实验工况结果对比分析, 得到以下结论:

(1) 单级动力回收系统热回收率平均为 73.9%, 焓回收率平均为 45.3%; 采用动力与吸收式热泵两级回收, 系统热回收率平均为 84.6%, 焓回收率平均为 47.6%; 与单级动力回收相比, 其平均热回收率提高了 10.7 个百分点, 平均焓回收率提高了 2.3 个百分点。

(2) 烧结矿显热分级回收的 9 组实验工况中, 在粒径 10 ~ 16 mm、料层厚度 1 200 mm、冷却风量 748 m<sup>3</sup>/h、进口风温 70℃ 的工况 II 下, 焓回收率高达 49.0%, 热回收率高达 88.1%, 为分级系统最佳工况。实验结果分析表明, 烧结矿粒径越小、料层越厚、进口风温越高, 焓回收率越大。因此, 在烧结矿冷却过程中, 可根据显热回收方式, 科学选择运行工况控制参数。

#### 参考文献:

- [1] 徐 鸿, 赵 斌, 付子文, 等. 双热源集成发电系统研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(12): 933-937.  
XU Hong, ZHAO Bin, FU Zi-wen, et al. Study of integrated power generation systems with dual heat sources[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 933-937.
- [2] 赵 斌, 杜小泽, 崔 健, 等. 烧结旋冷机余热梯级发电技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 37-43.  
ZHAO Bin, DU Xiao-ze, CUI Jian, et al. Research of waste heat stepped power generation technology in a sinter spiral cooler[J]. Proceedings of Chinese Electric Machinery Engineering, 2012, 32(8): 37-43.
- [3] 蔡九菊, 董 辉, 杜 涛, 等. 烧结过程余热资源分级回收与梯级利用研究[J]. 钢铁, 2011, 46(4): 88-92.  
CAI Jiu-ju, DONG Hui, DU Tao, et al. Study of graded recovery and stepped utilization of waste heat resources in the sintering

process[J]. Iron and Steel, 2011, 46(4): 88-92.

- [4] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能利用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
JIN Hong-guang, LIN Ru-mou. Comprehensive stepped utilization of energy and total energy utilization of a gas turbine[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] 史晓军, 车得福, 王 欢. 对一种具有余热回收系统的 LNG 联合循环电站分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 47-52.  
SHI Xiao-jun, CHE De-fu, WANG Huan. Analysis of LNG (Liquefied Natural Gas)-fired combined cycle power plants with a waste heat recovery system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(1): 47-52.
- [6] Hongxi Yin, Ming Qu, David H Archer. Model based experimental performance analysis of a microscale LiBr-H<sub>2</sub>O steam-driven double-effect absorption chiller[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 1741-1750.
- [7] 孙作亮, 付 林, 张世钢, 等. 吸收式热泵回收烟气冷凝热的实验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 13-17.  
SUN Zuo-liang, FU Lin, ZHANG Shi-gang, et al. Experimental study of the recovery of flue gas condensing heat by using an absorption heat pump[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(1): 13-17.
- [8] Castro J, Oliva A, Perez-Segarra C D, et al. Modelling of the heat exchangers of a small capacity, hot water driven, air-cooled H<sub>2</sub>O-LiBr absorption cooling machine[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31: 75-86.
- [9] 赵 斌, 钟晓晖, 王洪利, 等. 烧结矿显热回收综合实验台[P]. 中国: ZL201020593512.0, 2011.  
ZHAO Bin, ZHONG Xiao-jun, WANG Hong-li, et al. Comprehensive test rig for recovering apparent heat from sintering mines[P]. China: ZL201020593512.0, 2011.

(陈 滨 编辑)

#### · 书 讯 ·

### 《工程热力学精要与题解》

本书是清华大学国家级精品课“工程热力学”的教学材料之一, 可作为主教材《工程热力学(第2版)》的教学参考用书, 也可单独使用。为了便于与主教材对照参考, 本书各章的排序与主教材基本相同。每章内容包括主要要求、内容精要、思考题和习题的详细解答以及解题中易出现的问题和相关提示等。内容安排循序渐进, 注重引导读者清晰理解和掌握基本概念、基本定律及基本定理, 明确重点和难点, 培养从热力学的角度抽象和解决实际问题的思维和能力。

本书适宜读者对象: 能源、动力、工程热物理、制冷与低温、化工及核工程等专业学生、教师及工程技术人员等。

作者: 吴晓敏

印刷日期: 2012-09-04

calculation method in question is effective and reliable. The test results show that the model pump can meet the design requirements keeping a relatively high efficiency and a relatively wide high efficiency zone at the same time of realizing an operation without any overload. The test results can offer useful reference for further studying the hydrodynamic performance of a non-overload vortex pump and optimizing the design methods. **Key words:** vortex pump , non-overload ,orthogonal design ,numerical simulation

**烧结矿显热分级回收实验研究 = Experimental Study of the Apparent Heat Staged Recovery of a Sinter Mine** [刊, 汉] / ZHAO Bin , WEN Zhi-hai , ZHONG Xiao-hui , HAN Xi-qiang ( Hebei Provincial Key Laboratory on Modern Metallurgical Technology , Hebei United University , Tangshan , China , Post Code: 063009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 5) . - 596 ~ 599

Based on the waste heat energy stepped utilization theory , set up was a test stand for recovering in stages the apparent heat of a sinter mine. Under the condition that the initial temperature of a sinter mine is identical , the exergy and heat recovery rates of the nine groups of orthogonal test operating conditions were compared. The test results show that under the operating condition of which the particle diameter is 10 - 16 mm , the material layer thickness is 1 200 mm , the cooling air quantity is 748 m<sup>3</sup> / h and the air temperature at the inlet is 70 °C , both exergy and heat recovery rate are relatively high , reaching 49. 0% and 88. 1% respectively. The average heat recovery rate of a power and absorption type heat pump-based staged recovery system hits 84. 6% and the average exergy recovery rate reaches 47. 6% , averagely 10. 7 percentage points higher than the heat recovery rate of a single stage power recovery system and averagely 2. 3 percentage points higher than the exergy recovery rate of the single stage power recovery system. **Key words:** sintering and cooling machine , medium and low temperature waste heat , absorption type heat pump , staged recovery , orthogonal test

**基于叶尖损失的风力机叶片气动性能数值模拟 = Numerical Simulation of the Aerodynamic Performance of the Blades of a Wind Turbine Based on the Blade-tip Losses** [刊, 汉] WANG Xu-dong , WANG Li-cun , CHEN Bin ( Education Ministry Engineering Research Centre for Waste Oil Resource Technology and Equipment , Chongqing Technology and Business University , Chongqing , China , Post Code: 400067) , JIANG Ren-ke ( Guangxi Liugong Machinery Co. Ltd. , Liuzhou , China , Post Code: 545007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 5) . - 600 ~ 603

In the light of the influence of the blade tip losses on the load and output power of a wind turbine , contrasted and