

# 基于热力学模型的烧结环冷机漏风率测算方法研究

沈永兵, 刘建虎, 高 杨

(北京世纪源博科技股份有限公司, 北京 100036)

**摘 要:** 建立考虑漏风因素的烧结矿冷却热平衡模型, 再通过简易热工测试获得烟气温度数据, 通过获得烟气温度拟合沿环冷机圆周的温度分布曲线, 从而计算出漏风率。建立的漏风率计算模型, 对某钢厂的2台396 m<sup>2</sup>环冷机进行漏风率计算, 并将计算结果与已有文献数据做对比, 验证了所建立的漏风率计算模型的合理性, 表明所建立的漏风率计算模型适用于环冷机烟气余热资源估算和余热发电工程设计。

**关 键 词:** 环冷机; 热平衡; 漏风率; 计算模型

中图分类号: TK212+.1 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.014

## 引 言

环冷机是烧结工艺系统的一个关键设备, 主要用于烧结矿的冷却, 因其具有冷却效率高、结构紧凑等特点而被广泛采用。目前, 钢铁企业已经普遍采用低温余热发电技术回收利用环冷机冷却过程中排放的烟气余热。环冷机烟气余热主要以中低温烟气的形式存在, 因为烧结机操作、装备水平、烧结矿成分以及配比等不同导致余热资源差别很大。环冷机余热发电机组的配置及系统设计需要根据工艺给出的环冷机烟气流量和温度来设计余热锅炉、计算余热蒸汽参数等, 进而确定余热发电机组装机容量、工艺系统及总图布置等。

环冷机烟气温度获取容易, 获取烟气流量较难。目前, 获得环冷机烟气流量大致有两种办法: 一是通过环冷机烟囱来测量烟气流量和温度, 环冷机是一个开放系统, 受制于现场条件, 测量难度大, 而且时间长; 二是通过环冷鼓风机风量减去环冷机漏风量计算得到烟气流量, 这是一种简单的估算法。

针对烧结矿冷却模型已有很多研究<sup>[1~2]</sup>。已有模型主要分为两类: 一类基于连续介质假设, 采用三

维多孔介质模型, 利用 CFD 等商业软件研究; 另一类则采用简化的热平衡模型, 将烧结矿冷却过程看成一维传热过程<sup>[2]</sup>。现有研究主要集中于烧结矿冷却过程的气-固传热特性, 而忽略了环冷机漏风因素。

本研究首先建立考虑漏风因素的烧结矿冷却热平衡模型, 再通过简易热工测试获得烟气温度数据, 拟合获得烟气温度沿环冷机圆周的温度分布曲线, 从而计算出漏风率, 为余热资源估算和工程设计找到一种简单实用的漏风率计算新方法。

## 1 环冷机热力学模型的分析与建立

### 1.1 烧结环冷机工艺描述

烧结生产过程中, 从机尾翻卸下的红热烧结矿经单辊破碎机破碎后, 500~700℃烧结矿从烧结机落料到冷却机台车上并形成一定厚度的填充层。冷却机旁布置鼓风机, 强制冷却风穿过烧结矿料层, 冷风透过破碎的烧结矿层中无数微小的气孔和大量断裂的缝隙, 把烧结矿的热量带走, 使烧结矿逐渐冷却至低于150℃时排出环冷机<sup>[3~4]</sup>。一般冷却机上方设置烟罩用于收集冷风与炽热烧结矿石进行热交换后的中低温废气, 经烟罩收集后的烟气通过多个排气烟囱排入大气中。以烧结环冷机为例, 其工艺流程如图1所示。

### 1.2 基本假设

烧结矿随着台车水平移动, 冷风从下往上垂直流动, 台车宽度方向上排放烟气温度差别不大, 若不考虑被冷却风带走的烧结矿粉, 可以认为烧结矿被冷却的过程是一个连续的一维传热过程。

为简化分析和计算, 结合已有研究及实际测量数据<sup>[1~2, 5~6]</sup>, 做如下假设:

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-04-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2013CB228306)

作者简介: 沈永兵(1982-), 男, 江苏南京人, 北京世纪源博科技股份有限公司高级工程师。

- (1) 冷却风沿环冷机圆周方向均匀分布;
- (2) 烧结矿分布均匀,冷却过程中烧结矿损失忽略不计;
- (3) 台车及烟罩表面的散热量忽略不计;
- (4) 烟罩与台车之间的漏风可通过密封技术得以有效控制,忽略不计。环冷机漏风仅指风箱与台车之间的漏风;
- (5) 环冷机圆周方向各处漏风率相等;
- (6) 烧结矿在环冷机台车上不存在二次燃烧。

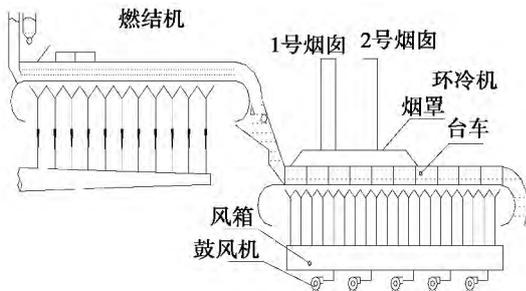


图 1 烧结环冷工艺流程

Fig. 1 Process flow diagram of a calcination and circulation cooler

1.3 数学模型

烧结矿在环冷机上的冷却周期大约 40 ~ 70 min,连续稳定运行时烧结机和环冷机的运行速度基本不变,在沿烧结矿运动方向(环冷机周向)上,每块烧结矿的冷却是一个非稳态传热过程,时间变量可以转换为烧结矿的运动长度。

沿环冷机周向方向上取一个微小长度的台车内的烧结矿为研究对象,如图 2 所示。在烧结线连续稳定运行时,从环冷机入口处开始的第一个  $dx$  长度微元代表  $t_1$  时刻,下一个  $dx$  微元代表  $t_2$  时刻,环冷机出口处第  $n$  个微元代表冷却完成的时刻  $t_n$ 。

烧结矿微元的热平衡方程如下:

$$D_s H_{si} - D_s H_{so} = \rho Q_{ao} (H_{ao} - H_{ai}) \quad (1)$$

$$Q_{ai} = Q_{ao} + Q_{off} \quad (2)$$

式中:  $D_s$  —微元入口烧结矿流量, kg/h;  $H_{si}$  —微元入口烧结矿焓, kJ/kg;  $H_{so}$  —微元出口烧结矿焓, kJ/kg;  $Q_{ai}$  —微元入口冷风流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;  $Q_{ao}$  —微元出口烟气流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;  $Q_{off}$  —微元漏风流量,  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;  $H_{ai}$  —微元入口冷风焓, kJ/kg;  $H_{ao}$  —微元的烟气出口焓, kJ/kg;  $\rho$  —微元入口冷风密度, 取  $1.293 \text{ kg}/\text{Nm}^3$ 。

环冷机漏风率计算式为:

$$\varphi = \frac{(Q_{ai} - Q_{ao})}{Q_{ai}} \quad (3)$$

微元入口的冷风流量可以通过式(4)计算:

$$Q_{ai} = q_a dx \quad (4)$$

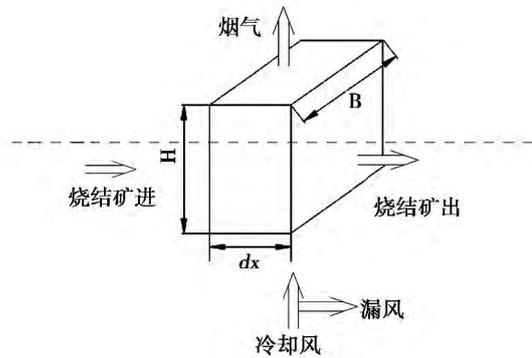


图 2 烧结矿微元模型

Fig. 2 Model for elementary units of ores calcinated

烧结矿被冷却是连续过程,式(1)左边可以用烧结矿焓的微分形式表达。综合式(1)~式(4),热平衡方程可以表达为:

$$D_s dH_s = (1 - \varphi) \rho q_a (H_{ao} - H_{ai}) dx \quad (5)$$

式中:  $D_s$  —环冷机入口的烧结矿流量, kg/h;  $q_a$  —沿环冷机周长方向的单位冷风流量,  $\text{Nm}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ ;

烧结矿焓为:

$$H_{si} = T_{si} C_{si} \quad (6)$$

烟气焓为:

$$H_{ai} = T_{ai} C_{ai} \quad (7)$$

根据经验,烧结矿比热与烧结矿温度之间近似线性关系。环冷机烟气相当于热空气,其比热关系式可以近似采用干空气比热公式,烧结矿比热公式和烟气比热公式为<sup>[5,7]</sup>:

$$C_{si} = 0.0003 T_{si} + 0.6966 \quad (8)$$

$$C_{ai} = 0.000093 T_{ai} + 0.9956 \quad (9)$$

环冷机台车上方向外排放的烟气温度  $T_{ao}$  可以测量。环冷机在转动过程中,烧结矿温不断降低,与烧结矿热交换后的烟气温度也是不断降低的,环冷机圆周方向任意位置出口排放的烟气温度可以认为是此处距环冷机入口之间圆周长度  $x$  的函数,即  $T_{ai} = f(x)$ 。通过测量可以获得环冷机烟气温度沿圆周方向的分布情况,并进而找到这样一个函数

关系。鼓风机出口的冷风温度  $T_{ai}$  是可测的, 并且可以认为沿环冷机周向是不变的, 则  $H_{ai}$  可认为是一常数。

式(5)可以进一步简化为:

$$D_s dH_s = (1 - \varphi) \rho q_a [f(x) (0.000\ 093f(x) + 0.995\ 6) - H_{ai}] dx \quad (10)$$

环冷机鼓风机出口冷却风先进入风箱, 冷却风经风箱后再通过环冷机台车冷却烧结矿, 台车下各风箱由短管相互连接起来, 风箱内风压沿环冷机圆周方向变化很小, 因此可以认为沿环冷机周长方向的单位冷风流量  $q_a$  是一常数。

式(10)沿环冷机圆周积分可以得到:

$$D_s (H_{s0} - H_{sL}) = (1 - \varphi) \rho q_a \int_0^L [f(x) (0.000\ 093f(x) + 0.995\ 6) - H_{ai}] dx \quad (11)$$

$$\varphi = 1 - \frac{D_s (H_{s0} - H_{sL})}{\rho q_a \int_0^L [f(x) (0.000\ 093f(x) + 0.995\ 6) - H_{ai}] dx} \quad (12)$$

式中:  $H_{s0}$ —环冷机入口处烧结矿焓  $\text{kJ/kg}$ ;  $H_{sL}$ —环冷机出口处烧结矿焓  $\text{kJ/kg}$ ;  $L$ —环冷机圆周长  $\text{m}$ 。

从式(12)可以看出, 找出烟气温度函数  $f(x)$  是求解漏风率  $\varphi$  的关键。

## 2 算例计算

### 2.1 热工测试获取计算参数

某钢厂有2台  $360\ \text{m}^2$  烧结线, 配套  $396\ \text{m}^2$  环冷机, 环冷机烟气余热已经回收并用于发电(2炉1机配置), 环冷机设备参数如表1所示。选取其中1台环冷机测量其烟气温度。为保证测试数据的准确性, 热工测试期间原料配比不变, 烧结生产正常, 在烧结机连续稳定运行4 h后才开始进行烟温测量。测试分两个时间段进行, 白天进行10组烟气温度测量并求取平均值作为工况1, 夜间进行10组烟气温度测量并求取平均值作为工况2, 测试期间烧结生产数据如表2所示。

环冷机入口烧结矿温度的测量采用高温红外测温枪测量, 环冷机出口烧结矿温度较低采用常规红外测温枪测量( $0 \sim 400\ ^\circ\text{C}$ )。在台车横向截面方向对多块烧结矿进行多点测量, 为提高准确度, 测量过程中尽量选取表面红炽状况不一样的烧结矿来测量,

多次测量求取平均数以减少误差。

环冷机烟罩内的烟气温度采用热电偶测量, 并在台车横向截面方向上选取3个点进行多次测量并求平均以减少误差。3点位置分别为距台车外缘0.5、1.0及1.6 m处。

$396\ \text{m}^2$  烧结环冷机共有22个鼓风机箱, 前10个风箱对应的台车上设置烟罩环冷机1段范围为1~5号, 2段范围为6~10号。

表1 环冷机参数

Tab. 1 Parameters of a calcination and circulation cooler

参数	数值
烧结机面积/ $\text{m}^2$	360
环冷机面积/ $\text{m}^2$	415
环冷机中径/ $\text{m}$	44
台车宽度/ $\text{m}$	3.5
台车挡板高度/ $\text{m}$	1.5
环冷机风箱数	22
环冷机有效冷却时间/ $\text{min}$	40~120
环冷鼓风机额定流量/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	450 000
环冷鼓风机台数	5
环冷鼓风机电机功率/ $\text{kW}$	710

表2 测试期间烧结生产数据

Tab. 2 Calcination production data during the test period

参数	工况1	工况2
烧结综合上料量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	701	672
烧结利用系数/ $\text{t} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$	1.30	1.25
烧结矿堆积密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 500	1 500
环冷机机速/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	2.28	2.23
环冷机中径/ $\text{m}$	44	44
环冷机冷却时间/ $\text{min}$	60.6	61.7
环冷机入口冷风温度/ $^\circ\text{C}$	30	30
环冷机入口冷风焓值/ $\text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$	39.5	39.5
环冷鼓风机出口阀门开度/ $\%$	83	83
环冷鼓风机实际运转台数	4	4
环冷机入口烧结矿温/ $^\circ\text{C}$	650	606
环冷机出口烧结矿温/ $^\circ\text{C}$	80	71
环冷机台车内料层厚度/ $\text{m}$	~1.4	~1.36

工况1、工况2下所得到的环冷机烟罩内1~10号风箱烟气温度进行数学统计后, 形成烟气温度分布1和烟气温度分布2两条曲线, 如图3所示。

根据工况1和工况2环冷机排烟温度分布, 拟

合排烟温度函数:

$$f_1(x) = -7 \times 10^{-6}x^4 + 0.0023x^3 - 0.2248x^2 + 2.8569x + 506.97 \quad (13)$$

$$f_2(x) = -5 \times 10^{-6}x^4 + 0.0017x^3 - 0.1762x^2 + 1.7786x + 495.65 \quad (14)$$

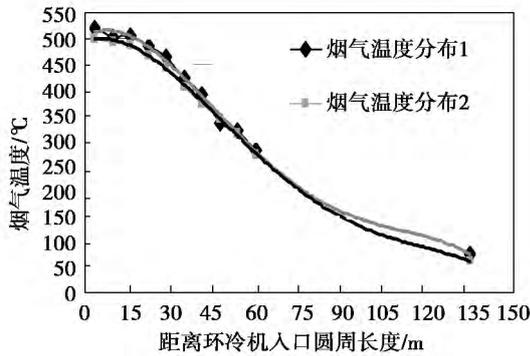


图3 环冷机烟气温度沿距环冷机圆周方向的分布  
Fig. 3 Distribution of the temperature of the flue gases along the circumferential direction of the circulation cooler

### 2.2 漏风率计算结果

环冷鼓风机出口开度 83% ,可以认为单台鼓风机供应的冷却风量等于鼓风机额定风量。将测试获得冷却前后烧结矿温度、冷风温度、鼓风机风量、空气温度等数据代入式(6)~式(9),求取烧结矿焓、冷风焓等参数,然后将拟合的环冷机排烟温度函数  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  代入式(12),可求解工况 1 和工况 2 对应的漏风率分别为 31.9% 和 30.3%。

### 3 模型验证

潘鹤针对宝钢某 460 m<sup>2</sup> 环冷机进行了热工测量<sup>[5]</sup>,并得到了环冷机各段的漏风率,部分实验数据如表 3 所示。

表 3 宝钢 460 m<sup>2</sup> 环冷机部分测试数据  
Tab. 3 Part of the test data of the 460 m<sup>2</sup> circulation cooler in Baoshan Iron and Steel Corporation

段号	总风量/ m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>	有效风量/ m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>	无效风量/ m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>	漏风 率/%
1	6 167.082	4 762.69	1 404.39	22.77
2	6 875.327	5 624.32	1 251.01	18.2
3	7 052.001	5 227.28	1 824.72	25.88
4	7 129.709	5 098.96	2 030.75	28.48

赵斌等人针对唐钢北区 1 号和 2 号两台 190 m<sup>2</sup> 环冷机进行了热工测试<sup>[8]</sup>,1 号环冷机部分实验及计算数据如表 4 所示。

表 4 唐钢 190 m<sup>2</sup> 环冷机测试数据  
Tab. 4 Test data of the 190 m<sup>2</sup> calcination and circulation cooler in Tangshan Iron and Steel Corporation

参数	数值
环冷机测试段风量/Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	389 666
测试段有效热风量/Nm <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	243 212
漏风率/%	37.6

从表 3、表 4 可以看出,不同钢铁企业、不同规格环冷机测量得到的漏风率差距比较大。通常,余热发电系统利用环冷机 1、2 段排放的烟气作为热源,从上表可以看到 1、2 段漏风率为 18.20% ~ 37.6%。本研究模型测算出的漏风率处于实验测试所得的漏风率范围之内,可以认为本模型计算得到的漏风率基本合理,具有工程应用价值。

### 4 结 论

通过合理假设烧结矿冷却过程得到一个环冷机热力学模型,再结合简易热工测量即可求解环冷机漏风率,将模型计算得到的漏风率与已有测试结果进行对比,本研究模型测算出的漏风率处于实验测试所得的漏风率范围之内,可以认为本模型计算得到的漏风率基本合理,可用于环冷机烟气余热资源估算和余热发电系统设计。

参考文献:

[1] 张欣,温治,楼国锋. 高温烧结矿气-固换热过程数值模拟及参数分析[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(3): 339-345.  
ZHANG Xin, WEN Zhi, LOU Guo-feng. Numerical simulation and parameter analysis of the gas-solid heat transfer process of ores calcinated at a high temperature [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2011, 33(3): 339-345.

[2] 陈春霞. 钢铁生产过程余热资源的回收与利用[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
CHEN Chun-xia. Recovery and utilization of the waste heat resources resulted from the iron and steel production process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

[3] 刘三军, 苏震, 张卫亮. 安钢烧结环冷机余热发电技术[J].

冶金能源. 2009 28(6): 40-43.  
 LIU San-jun, SU Zhen, ZHANG Wei-liang. Waste heat power generation technology for use in calcinations and circulation coolers in Anyang Iron and Steel Corporation [J]. Metallurgical Energy Source 2009 28(6): 40-43.

[4] 谢泽民. 宝钢 1、3 号烧结机设置余热回收装置 [J]. 钢铁, 2003 38(11): 62.  
 Xie Zemin. Heat recovery plants on NO. 1 and NO. 3 sintering machines at BaoSteel [J]. Iron And Steel 2003 38(11): 62.

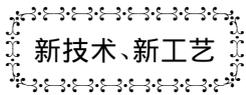
[5] 潘 鹤. 烧结环冷机系统测试技术及优化研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学 2007.  
 Pan He. Study of Test Technology and Optimization of Sinter Annual Cooler System [D]. AnShan: University of Science and Technology Liaoning 2007.

[6] 罗远秋. 钢铁生产过程余热资源的回收与利用 [D]. 沈阳: 东北大学 2009.  
 Luo Yuanqiu. Experimental and simulant study on cooling process of sinter [D]. Shenyang: Northeastern University 2009.

[7] 庞麓鸣. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1984.  
 PANG Lu-ming. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: China Higher Education Press, 1984.

[8] 赵 斌, 张玉柱, 王子兵. 烧结环冷机热工测试及余热源参数确定 [J]. 钢铁 2010 45(8): 90.  
 Zhao Bin, Zhang Yuzhu, Wang Zibing, et al. Thermal Measurement of Sintering Circular Cooler and Determination of Waste Heat Source Parameters [J]. Iron And Steel 2010 45(8): 90.

(刘 遥 编辑)



## KHI 的 MIA - 17D 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2014 年 9 ~ 10 月刊报道, KHI(川崎重工)最近推出了它新的 PUC17D 超高有效的热电联产系统。

该系统是由 KHI 研制并于 2011 年投放市场的 MIA - 17D 燃气轮机提供动力的。

1.7 MW 的 MIA - 17D 燃气轮机具有 26.5% 的额定电效率, 使它属于该功率等级中最高效率之列。

该燃气轮机装的新研制的 DLE(干式低排放)燃烧系统, 这排除了把水喷入燃烧室的需求。这种燃烧方法有助于把 NO<sub>x</sub> 排放减少到 0% 氧下的 50 mg/m<sup>3</sup>。

DLE 系统被设计成能在低 NO<sub>x</sub> 排放情况下响应运行时负荷条件突然的波动, 即使在独立操作运行时也能响应这种波动。

此外, 在该燃气轮机的进气管内装有可供选用的可变几何叶片机构。这允许在部分负荷运行时使空气 - 燃料比保持在一个固定值, 允许在低 NO<sub>x</sub> 运行的宽广范围内应用 DLE 燃烧。

### MIA - 17D 燃气轮机简单循环技术规范

ISO 基本负荷额	热耗率	效率	压比	流量	涡轮转速	排气温度	大约的重量	大约的尺寸
定输出功率/kW	/kJ · (kWh) <sup>-1</sup>	/%		/kg · s <sup>-1</sup>	/r · min <sup>-1</sup>	/°C	/kg	L × W × H/m
1 685	12 905	26.6	10.5	8.03	1500/1800	521	3 550	3.05 × 1.52 × 2.13

从 2011 年推出该型机组以来, KHI 公司已交付了 22 台 MIA - 17D 燃气轮机。

(吉桂明 摘译)

ly from Class-I and Class-II ports ,increasing the charging quantity from Class-II port is the key to the increase of L-valve returning flow rate. Compared with the increase of charging quantity from Class-II port ,more stable system operation can be achieved by increasing the charging quantity from Class-I port and the best system operation stability can be got when the charging quantity is of  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . The L-valve resistance will increase with the increase of charging quantity from Class-I port ,but will decrease with the increase of charging quantity from Class-II port ,so increasing the charging quantity from Class-II port will become the effective way for reducing the valve resistance. With air charged jointly from Class-I and Class-II ports ,compared with the L-valve returning capability achieved as the air charging quantity from air charging port g in horizontal section being of  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  ,greater L-valve returning capability can be achieved as the air charging quantity from air charging port b in vertical section being of  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Increasing the charging quantity from Class-I port can achieve more stable system operation. When the charging quantity being of  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  ,the best system operation stability can be reached. **Key words:** high density circulating fluidized bed ( HDCFB) ,L-valve ,air distribution mode ,returning characteristics

660 MW 机组增设低温省煤器的经济性分析 = **Economic Analysis for 660 MW Unit Added with Low-temperature Economizer** [刊 汉]TONG Jia-lin ,WENG Jing ( Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company ,Hangzhou ,Zhejiang Province ,China ,Post Code: 310014) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 3) . -83 -86

The heat loss of the exhaust gas is the greatest loss in all kinds of the boiler heat loss. The major influence factor on the heat loss of the exhaust gas is the exhaust gas temperature. Adding a low-temperature economizer into the rear duct of power station boiler and utilizing the waste heat of the exhaust gas to heat condensate water can decrease the inlet flue gas temperature of desulfurization system. Taking a domestic 660MW ultra-supercritical unit as the study object ,the paper uses the equivalent enthalpy drop method for the calculation and analysis on the energy-saving effect of low-temperature economizer. The calculation results show that the coal consumption rate for power generation can be decreased by  $2.33 \text{ g/kWh}$  after low-temperature economizers put into operation and the significant energy-saving effect can be achieved. Compared to the domestic same-type Gas-Gas-Heater units ,the specific pressure of induced draft fan can drop about  $1000 \text{ NM/kg}$  and the operating point can be improved remarkably. **Key words:** low-temperature economizer ,waste heat utilization ,coal consumption rate for power generation ,induced draft fan

基于热力学模型的烧结环冷机漏风率测算方法研究 = **Study on Calculating Method for Air Leakage Rate of**

**Sintering Circular-Cooler Based on Thermodynamic Model** [刊 汉] SHEN Yong-bing ,LIU Jian-hu ,GAO Yang ( Beijing Century Benefits Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100036) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -87 -91

By establishing a heat balance model for sinter cooling with consideration of the air leakage factor ,getting the flue gas temperature data by ways of the simple thermodynamic measurements and obtaining the fitted curves on the flue gas temperature distribution around the circular-cooler ,the paper calculated out the air leakage rate. By use of the established calculation model for air leakage rate ,the paper made the calculation on the air leakage rate for 2 sets of 396 m<sup>2</sup> sintering circular-cooler of a steel mill ,compared the calculating results with the available published data and verified the reasonability of the established calculation model for air leakage rate. The result indicates the established calculation model for air leakage rate can apply to the estimation of circular-cooler waste heat resource as well as the design of waste heat power generation projects. **Key words:** circular-cooler ,heat balance ,air Leakage rate ,calculation model

**油页岩半焦在流化床内的燃烧特性研究 = Study on Combustion Characteristics of Oil Shale Semi-coke in Fluidized Bed** [刊 汉] HONG Yong ,LU Xiao-feng ,WANG Quan-hai ,YANG Yu ( Chongqing University ,Key Laboratory of Education Ministry on Low-grade Energy Utilization Technology and System ,Chongqing ,China ,Post Code: 400044) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(3) . -92 -96

In order to achieve the combustion of oil shale semi-coke in the bubbling fluidized bed ,the paper built up a fluidized bed test bench with the furnace size of 150 mm × 150 mm × 2 500 mm ,and studied combustion characteristics of the oil shale semi-coke as well as the emission characteristics of pollutants in the flue gas. The Study indicates that the semi-coke with low-calorific value can obtain stable combustion in the bubbling fluidized bed. Along with the increase of temperature in dense phase zone ,flue gas oxygen content and fuel residence time will decrease and emission concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> will increase. The flue gas oxygen content and fuel residence period can reach the maximum value as bed height ratio ( the ratio of bed height to furnace body height) being of 0.16. When temperature in dense phase zone rises to 900 °C ,the carbon contents of fly ash and bottom slag can reach stable values and the concentration of fly ash can get the lowest value. The typical operating conditions for the combustion of bubbling fluidized bed are as follows: the fluidization air temperature is taken as 400 °C ,bed height ratio is taken as 0.16 and the temperature in dense phase zone in furnace is taken as 900 °C. **Key words:** low-calorific value ,oil