

铜合成炉余热锅炉热平衡测试与分析

严 兵, 谢 镨

(中南大学 能源科学与工程学院 湖南 长沙 410083)

摘 要: 由于合成炉余热锅炉的烟气处理能力是合成炉提产的主要限制因素之一,通过对合成炉余热锅炉进行热平衡测试与分析,提出一种热平衡迭代算法计算余热锅炉的热平衡特性。计算结果表明:在合成炉处于正常连续生产的稳定工况下,余热锅炉有效热利用系数和综合换热系数可以视为常数;对数平均温差与出口烟气温度关系可回归为线性关系;通过热平衡迭代算法,得出满足工艺要求时合成炉最大烟气量与余热锅炉出口烟气温度的关系,计算结果显示采用该算法能预测余热锅炉热力性能,有利于铜合成炉稳定生产,提产增效。

关 键 词: 铜合成炉; 余热锅炉; 热平衡; 计算方法

中图分类号: TF811; TK229. 92 文献标识码: A

引 言

在铜冶炼工业中,闪速熔炼工艺是目前世界上最先进的工艺技术。其中,闪速炉余热锅炉是闪速熔炼工艺余热回收的关键设备之一,其不仅回收高温烟气中的热能,而且捕捉烟气中的部分烟尘,保证工艺系统的正常运行,并为尾部收尘及制酸工艺创造必要的条件^[1-3]。

铜合成炉是将闪速炉与贫化电炉合为一体的铜合成熔炼炉^[4],产生烟气温度在 1 100 ~ 1 300 °C 左右,电收尘装置要求烟气温度不超过 380 °C。当铜合成炉投料量提升后,余热锅炉对流区入口及出口温度偏高成为限制铜合成炉提高投料量的因素之一^[5]。本研究在余热锅炉受热面设计、热力计算和校核计算的基础上^[6],基于热平衡计算基本方程,对铜合成炉余热锅炉进行热平衡测试数据分析,提出了一种余热锅炉热平衡迭代计算方法,计算得出余热锅炉最大烟气量与锅炉出口烟气温度之间的关系,并对余热锅炉的热力性能进行预测,有利于铜合成炉稳定生产,提产增效。

1 余热锅炉热平衡测试数据处理

余热锅炉热平衡测试主要测试数据有: 锅炉烟气出口温度,出口烟气流量,烟气成份; 锅炉给水温度,产生蒸汽温度(压力) 蒸汽产量。

1.1 余热锅炉漏风系数测试与计算

对结构不发生改变的余热锅炉,其漏风系数可视为定值。

由于余热锅炉入口和出口烟气中 SO₂ 全部来自合成炉,因此可根据锅炉入口和出口烟气中 SO₂ 含量守恒计算余热锅炉漏风率。对余热锅炉入口和出口烟气 SO₂ 含量测试数据如表 1 所示。

表 1 烟气 SO₂ 含量测试数据

Tab. 1 Testing data of the SO₂ content in the flue gases

测点	烟气量 / m ³ · h ⁻¹	烟气 SO ₂ 含量 / %
合成炉电场进口(锅炉出口)	71 022	19.7
上升烟道(锅炉入口)	/	22.0

根据烟气中 SO₂ 含量守恒计算漏风量的公式为:

$$\text{入口烟气流} \times \text{入口 SO}_2 \text{ 浓度}$$

$$= \text{出口烟气流} \times \text{出口 SO}_2 \text{ 浓度}$$

$$\text{其中,入口烟气流} = \text{出口烟气流} - \text{漏风量。}$$

将表 1 测试数据带入式中,即:

$$(71\ 022 - X) \times 22.0\% = 71\ 022 \times 19.7\%$$

得余热锅炉的漏风量 $X = 7\ 425\ \text{m}^3$,即相对于出口烟气流余热锅炉的漏风系数:

$$\Delta\alpha = 7\ 425 / 71\ 022 = 10.45\%$$

1.2 余热锅炉生产数据测试与处理

对合成炉余热锅炉再次进行了热平衡测试,合成炉在正常投料量范围(115 ± 15 t/h) 内,三大工艺控制参数: 冰铜品位、冰铜温度、渣中铁硅比保持稳

收稿日期: 2013 - 01 - 06; 修订日期: 2013 - 07 - 30

基金项目: “十一五”863 计划资源环境技术领域“铜铅锌高效节能清洁冶炼技术与装备开发”重点项目(2009AA064600)

作者简介: 严 兵(1989 -), 男, 湖北潜江人, 中南大学硕士研究生。

定,合成炉连续生产时的稳定工况下测得出口烟气的多组测试数据如表 2 所示。

根据锅炉的漏风系数,计算余热锅炉入口烟气的参数如表 3 所示。

根据合成炉余热锅炉设计参数规定其入口烟气的

温度范围为 1 270 ~ 1 280 °C,计算时取锅炉入口烟气的温度为 1 280 °C。

余热锅炉总换热面积 $F: 4\,325\text{ m}^2$ 。

锅炉给水温度: 105 °C (5.17 MPa)。

锅炉产蒸汽温度: 251 °C (4.1 MPa 饱和蒸汽)。

表 2 2012 年 8 月 ~ 9 月烟气测试数据

Tab. 2 Testing data of the flue gases during Aug. and Sept. of 2012

测点	锅炉产汽量 / t · h ⁻¹	烟气温度 / °C	烟气流 / m ³ · h ⁻¹	烟气成份 / %				
				SO ₂	CO ₂	O ₂	CO	N ₂
锅炉出口	40.7	354	65 646	27.6	14.9	5.5	0.0	52.0
锅炉出口	39.4	339	64 203	30.7	11.9	2.8	0.0	54.7
锅炉出口	40.3	340	71 169	31.7	5.9	5.5	0.0	57.0
锅炉出口	40.5	347	73 304	30.8	7.4	5.1	0.0	56.7
锅炉出口	39.9	339	74 274	31.8	8.4	3.3	0.0	56.5
锅炉出口	38.9	333	70 735	31.8	4.9	5.1	0.0	58.2
锅炉出口	39.5	360	79 067	29.1	5.1	4.4	0.0	61.3

表 3 锅炉入口烟气参数计算结果

Tab. 3 Calculation results of the parameters of the flue gases at the inlet of the boiler

数据点	烟气流 / m ³ · h ⁻¹	烟气成份 / %				
		SO ₂	CO ₂	O ₂	CO	N ₂
锅炉入口	58 786.1	30.8	16.6	3.7	0.0	48.9
锅炉入口	57 494.0	34.2	13.3	0.7	0.0	51.8
锅炉入口	63 731.5	35.4	6.6	3.7	0.0	54.3
锅炉入口	65 644.0	34.4	8.2	3.3	0.0	54.1
锅炉入口	66 512.6	35.5	9.4	1.3	0.0	53.8
锅炉入口	63 343.2	35.5	5.5	3.3	0.0	55.7
锅炉入口	70 804.8	32.5	5.7	2.5	0.0	59.3

2 测试数据分析

余热锅炉测试数据分析过程为: 根据锅炉入口和出口烟气成分和温度, 计算入口和出口烟气焓值; 查表计算给水和饱和水蒸气的焓值^[7]; 根据热平衡方程, 计算锅炉有效热利用系数 Δq , 有效热利用系数表示水侧吸收热量与烟气侧放热量比值; 根据传热方程, 计算锅炉综合换热系数 K 。

由锅炉给水和蒸汽参数, 查表得锅炉给水焓 $h_1 = 440.328\text{ kJ/kg}$, 产生蒸汽焓 $h_2 = 2\,799.9\text{ kJ/kg}$ 。

由测试数据计算锅炉有效热利用系数和综合换热系数结果如表 4 所示。

表 4 锅炉测试数据分析结果

Tab. 4 Analytic results of the testing data of the boiler

入口烟气热量 / kJ · h ⁻¹	出口烟气热量 / kJ · h ⁻¹	烟气放热量 / kJ · h ⁻¹	水侧吸收热量 / kJ · h ⁻¹	有效热利用系数 / %	对数平均温差 / °C	综合换热系数 / kW · m ⁻² · °C ⁻¹
142 014 298	39 602 849	102 197 006	96 034 580	93.9	401.25	0.015 6
138 892 956	37 162 090	101 416 466	92 967 137	91.7	381.54	0.015 4
150 428 319	40 667 143	109 296 639	95 090 752	87	382.90	0.015 8
155 220 552	42 773 082	112 088 501	95 562 666	85.3	392.24	0.015 9
158 824 969	42 637 810	115 823 441	94 146 922	81.3	381.54	0.015 6
148 662 208	39 436 378	108 886 512	91 787 350	84.3	373.20	0.015 8
163 902 270	47 082 154	116 432 926	93 203 094	80.1	408.75	0.014 6

由表 4 可以看出,在生产条件下,合成炉入口烟气体量与成份波动,锅炉换热面积灰和测试误差等因素,造成余热锅炉有效热利用系数和综合换热系数的计算结果波动,例如表中最后 1 组数据计算结果明显偏低,即可能受此因素影响。考虑到正常生产中烟气流速和温度的变化幅度并不大,且锅炉综合热损失率几乎不变,因此将锅炉综合换热系数和有效热利用系数设置为反映余热锅炉特性的常数系数,取前 6 组工况下的平均值:余热锅炉有效热利用系数为 86.1%,综合换热系数为 0.015 7 kW/(m²·℃),标准差分别为 0.043 2 和 0.000 17 kW/(m²·℃)。

3 热平衡计算方法

3.1 热平衡计算基本方程

在不同烟气体量时,锅炉产蒸汽量和出口烟气温度均不相同。在合成炉投料成份稳定时,投料量增大时,合成炉产生的烟气体量也会增大,锅炉产汽量和出口烟气温度增加,但是锅炉后电收尘设备要求烟气温度不高于 380℃,因此通过锅炉热平衡计算求得满足电收尘烟气温度要求下的最大锅炉入口烟气体量进而求出合成炉的最大物料处理量可以预测合成炉最大产能。

余热锅炉热平衡计算基本方程为:

热平衡方程:

$$1\ 000 \times G(h_2 - h_1) = (V \times H_1 - V \times H_2 / (1 - \Delta\alpha)) \times \Delta q$$

传热方程:

$$Q = FK\Delta T_m$$

式中: V —烟气体量, m³/h; Δq —有效热利用系数, %; G —锅炉产蒸汽量, t/h; H_1, H_2 —入口、出口烟气焓值, kJ/m³; h_1, h_2 —蒸汽、给水焓值, kJ/kg。 $\Delta\alpha$ —漏风系数; Q —烟气放热量, kW; F —换热面积, m²; K —综合换热系数, kW/(m²·℃); ΔT_m —对数平均温度, ℃。

$$\Delta T_m = (\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) / \ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}$$

3.2 热平衡计算参数处理

3.2.1 余热锅炉有效热利用系数和综合换热系数

根据第二节测试数据分析结果将余热锅炉有效热利用率和综合换热系数取为定值,分别为:余热锅

炉有效热利用系数为 86.1%,综合换热系数为 0.015 7 kW/(m²·℃)。

3.2.2 对数平均温差简化

在热平衡计算过程中需要通过温差 ΔT_m 求出口烟气温度 T_2 ,直接采用对数平均温差计算求解比较困难,在此将对数平均温差 ΔT_m 与烟气出口温度 T_2 的关系简化为线性关系,即:

$$\Delta T_m = b_0 + b_1 T_2$$

例如,当烟气入口温度为 1 280 ℃时,对数平均温差与烟气出口温度之间的关系利用 Matlab 软件进行一元线性回归^[8],计算结果如表 5 所示,拟合曲线图如图 1 所示。拟合公式为:

$$\Delta T_m = -38.57 + 1.24 T_2$$

表 5 回归系数置信区间表

Tab. 5 Table of the regression coefficient confidence intervals

回归系数	回归系数估计值	回归系数置信区间
b_0	-38.57	[-42.65, -34.49]
b_1	1.24	[1.229, 1.252]
$R^2 = 0.998\ 8 \quad F = 480\ 54 \quad p < 0.000\ 1$		

相关系数 R^2 越接近 1, F 越大, F 对应的 p 越小,则回归模型越有效,从表 5 和图 1 可以看出,将对数平均温差与出口温度简化为线性关系是可行的。

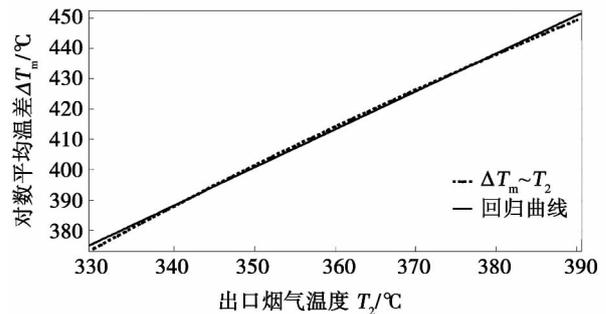


图 1 对数平均温差与出口温度拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of the logarithmic mean temperature differences and temperatures at the outlet

当烟气入口温度为其它值时, ΔT_m 与 T_2 关系可采用同样的线性回归方法进行简化。

3.3 热平衡计算流程

余热锅炉热平衡迭代计算流程如图 2 所示。

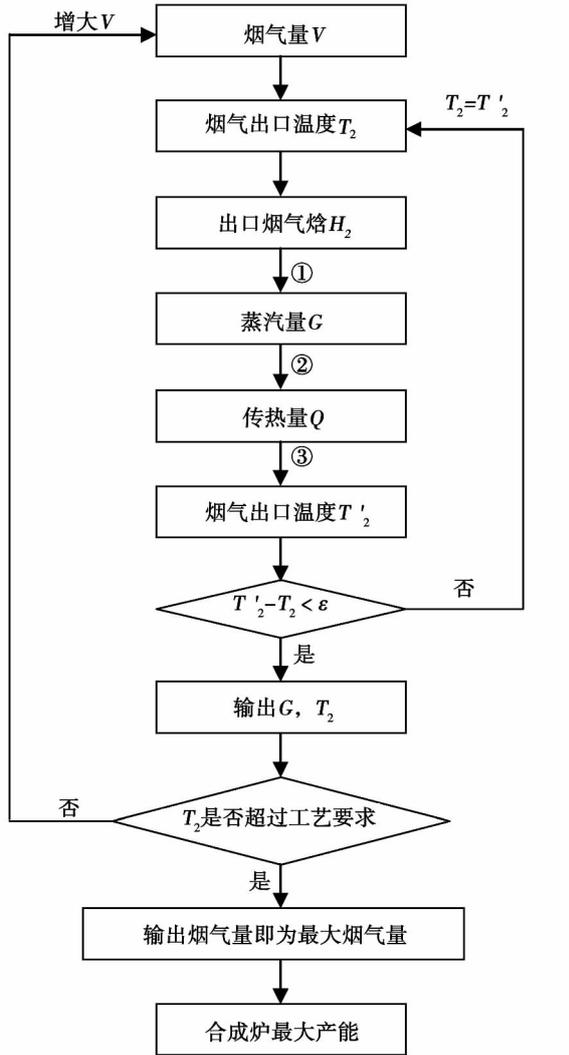


图 2 热平衡计算流程

Fig. 2 Flow path for calculating the heat balance

图 2 中:

$$① G = (V(H_1 - H_2) / (1 - \Delta\alpha)) \times \Delta q / (h_2 - h_1)$$

$$② Q = G(h_2 - h_1)$$

$$③ T'_2 = (Q / FK - b_0) / b_1$$

在进行热平衡计算前,分析计算合成炉在此工况下连续稳定生产时余热锅炉出口和入口烟气成份及烟气焓温特性。

热平衡计算采用迭代算法,对某一工况,以较小的入口烟气量 V 和出口烟气温度 T_2 带入计算,通过热平衡方程迭代计算出此烟气量时的出口烟气温度,若 T_2 未超过工艺要求出口烟气温度,则增大烟气量再次进行迭代计算直至 T_2 超过要求值,最后通过差值计算即可求出在工艺要求出口烟气温度下的

合成炉最大烟气量。差值计算公式为:

$$V = (V'' - V')(T_2 - T'_2) / (T'' - T'_2) + V'$$

式中: V'' 、 T'' —最后一次计算烟气量 (m^3/h) 和烟气出口温度 ($^\circ\text{C}$); V' 、 T' —前一次计算烟气量 (m^3/h) 和烟气出口温度 ($^\circ\text{C}$)。

3.4 热平衡计算举例

当合成炉在某一确定目标冰铜品位、目标冰铜温度、目标渣中铁硅比的稳定工况时,余热锅炉出口烟气成份分析值和根据漏风率计算入口烟气成份值如表 6 所示。

表 6 出口烟气成份分析值和入口烟气成份计算值

Tab. 6 Analytic values of the constituents of the flue gases at the outlet and calculated values of the constituents of the flue gases at the inlet

位置	烟气成份 / %			
	SO ₂	CO ₂	O ₂	N ₂
锅炉出口	30	8	4.5	57.5
锅炉入口	33.5	8.93	2.57	55

余热锅炉入口烟气温度为 1280°C , 计算得入口烟气焓值 $H_1 = 2385.56 \text{ kJ}/\text{m}^3$, 出口烟气不同温度下焓值如表 7 所示, 锅炉其它参数为上文确定值。

表 7 不同温度时出口烟气焓值

Tab. 7 Enthalpy of the flue gases at the outlet at various temperatures

出口烟气温度 $T_2 / ^\circ\text{C}$	出口烟气焓值 $H_2 / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
300	504.35
310	521.03
320	537.70
330	554.38
340	571.05
350	587.73
360	604.40
370	621.08
380	637.76

将确定的锅炉参数确定值带入热平衡迭代算法程序中,通过计算得到在满足工艺要求下合成炉最大烟气量与余热锅炉限制出口烟气温度的对应关系如图 3 所示。

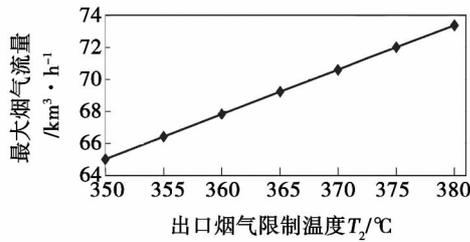


图3 合成炉最大烟气量与余热锅炉限制出口温度关系

Fig. 3 Relationship between the maximum flue gas quantity of the synthetic furnace and the temperature restricted at the outlet of the heat recovery steam generator

由图3可以看出,在某一连续稳定工况下,合成炉余热锅炉最大烟气处理量随锅炉限制出口温度增大而增大,当电收尘装置要求余热锅炉出口烟气温度不超过380℃时,合成炉允许产生最大烟气量为73.367 km³/h,与测试工况下烟气量相比,合成炉还有一定的提产潜力。

4 结 论

(1) 针对合成炉余热锅炉的烟气处理能力是合成炉提产的限制因素之一,提出了一种热平衡迭代算法计算余热锅炉的热平衡特性。

(2) 通过热平衡迭代算法能得出满足工艺要求下合成炉最大烟气量与余热锅炉限制出口烟气温度的关系,结果显示当要求余热锅炉出口烟气温度不超过380℃时,合成炉还有一定的提产潜力。采用该算法能预测余热锅炉热力性能,有利于铜合成炉稳定生产,提产增效。

参考文献:

[1] 曾达云. 铜闪速炉余热锅炉的结构特点及其分析[J]. 有色冶金设计与研究. 1995(4): 57-62.
ZENG Da-yun. Structural features and analysis of a copper flash smelting furnace heat recovery steam generator [J]. Nonferrous Metallurgical Designing & Research, 1995(4): 57-62.

[2] 北京有色冶金设计院. 余热锅炉设计与运行[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
Beijing Nonferrous Metallurgical Designing Institute. Heat recovery steam generator design and operation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982.

[3] Rauno Peippo, Hannu Holopainen, Jari Nokelainen. Copper smelter

waster heat technology for the next millennium [A]. Proceedings of Copper 99 International Conference, Vol. V-Smelting Operation and Advances [C], Edited by D B George, W J (Pete) Chen, P J Mackey, et al, The Minerals, Metals & Materials Society, 1999: 71-82.

[4] 陆金忠, 张天权. 金川铜合成炉开炉操作实践[J]. 中国有色冶金. 2007(4): 19-20.
LU Jin-zhong, ZHANG Tian-quan. Practice for operation of Jinchuan-based synthetic furnace during its startup period [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2007(4): 19-20.

[5] 任鸿九, 王立川. 有色金属提取冶金手册(铜镍)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
REN Hong-jiu, WANG Li-chuan. Nonferrous metal extraction handbook (Cu and Ni) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

[6] 赵钦新. 余热锅炉研究与设计[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
ZHAO Qin-xin. Heat recovery steam generator research and design [M]. Beijing: China Standard Publishing House, 2010.

[7] 《有色冶金炉设计手册》编委会. 有色冶金炉设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
Editorial committee of the nonferrous metallurgical furnace design handbook. Nonferrous Metallurgical Furnace Design Handbook [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

[8] 章栋恩. MATLAB 高等数学实验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
ZHANG Dong-en. MATLAB higher mathematic experiment [M]. Beijing: Electronic Industry Publishing House, 2008.

(陈滨 编辑)

• 书 讯 •

无卤含硅阻燃剂的合成及作用机理

以新型的无卤含硅阻燃剂的合成及作用机理为主线,系统论述8种新型的含硅、磷、氮或硅磷无卤阻燃剂的设计、合成并首次应用在PC、PC/ABS上的应用。讨论了PC和PC/AES的相形态发展,断裂韧性及阻燃性能,研究了蒙特土纳米粒子对PC/ABS及PC/AES的流变性、热稳定性和阻燃性的影响。本书是一部原创性阻燃PC/ABS的学术专著,内容新颖,系统,具有前沿实用性。本书共分为8章,第1章综述了各类阻燃剂,第2章~第7章阐述了无卤含硅阻燃剂的研究成果,第8章探讨了含硅无卤阻燃剂及阻燃PC/ABS复合材料的热降解机理。本书可供相关的工程技术人员使用,可供大学生和科研工作者参考。

作者: 韦平

ISBN: 978-7-313-09072-0

出版社: 上海交通大学出版社

出版时间: 2013-09-24

定价: 49.00 元

A numerical simulation study was performed in detail of the flow characteristics of the tangentially fixed blade type swirling burners in a supercharged boiler and the simulation results under the normal temperature and pressure condition were compared with the flow resistance value in the test and the boundary of the central return flow zone provided in the literature No. 11, thus it is verified that the calculation model chosen by the authors is correct. It has been found by analyzing the calculation results of the return flow zone distribution at various air inlet widths, velocity distribution and resistance coefficient under the pressure boosting condition that when the geometrical dimensions are similar and other structural parameters are kept unchanged, the air inlet width will assume a single-value corresponding relationship. When the diffusion angle at the air outlet is constant and the swirling intensity is between 1 and 1.35, a central return flow zone will be formed and favorable to the ignition of the fuel and the stability of the combustion. With an increase of the air inlet width, the uniformity of the air distribution will get worse, the maximum axial return flow speed (absolute value) in the central return flow zone will become smaller, the maximum axial speed in the main flow zone will become bigger, the axial speeds in various sections along the flow direction will totally assume a "M"-shaped distribution, the tangential speeds will all take on a "N"-shaped distribution, the resistance coefficient will exhibit a good positive proportional relationship with the swirling flow intensity. The foregoing is identical to those given by the literature No. 15, further proving that the calculation model chosen by the authors is rational. **Key words:** air inlet width, flow characteristics, numerical simulation, swirling burner

铜合成炉余热锅炉热平衡测试与分析 = **Testing and Analysis of the Heat Balance of a Copper Synthesizer Waste Heat Recovery Boiler** [刊, 汉] YAN Bing, XIE Kai (College of Energy Science and Engineering, South China University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(6). - 606 ~ 610

The flue gas treatment capacity of a copper synthesizer waste heat recovery boiler is regarded as one of the main factors limiting the enhancement of the yield of the synthesizer. Through a heat balance testing and analysis of a synthesizer waste heat recovery boiler, proposed was a heat balance iterative algorithm for calculating the heat balance characteristics of a waste heat recovery boiler. The research results show that when the synthesizer is under the continuous and stable operating condition, the effective heat utilization coefficient and comprehensive heat exchange coefficient of the waste heat recovery boiler can be regarded as constants and the logarithmic mean temperature differ-

ence can be regressed to a linear relationship with the flue gas temperature at the outlet. The heat balance iterative algorithm was adopted to obtain the relationship between the maximum flue gas flow rate of the synthesizer and the flue gas temperature at the outlet of the waste heat recovery boiler when the requirements for the process were met. The calculation results show that the algorithm in question can be used to predict the thermal performance of the waste heat recovery boiler, thus contributing to a stable production yield and efficiency enhancement of the copper synthesizer. **Key words:** copper synthesizer, waste heat recovery boiler, heat balance, calculation method

气固两相撞击流内颗粒运动规律的实验研究 = **Experimental Study of the Law Governing the Movement of Particles Inside a Gas-solid Two-phase Impingement Flow** [刊, 汉] DU Min (College of Energy Source and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013), ZHOU Bin (College of Space Science and Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(6). - 611 ~ 615

To study the movement law of particles inside a gas-solid two-phase impingement flow, investigated was the impingement characteristics of particles inside an impingement flow with glass balls serving as the particle materials on a self-designed impingement flow test rig by changing the material feeding mode, clearance between nozzles, gas flow speed, particle feeding speed and diameter etc. and the movement law of particles under different conditions were obtained. It has been found that inside a gas-solid two-phase flow, after a drastic impingement of two strands of particle flow has occurred in the particle impingement zone, the particles will disperse to everywhere and there will be no phenomena that any particle obviously joins in a reverse flow. Furthermore, the drastic impingement in the impingement zone will lead to a rise of the particle concentration. In the case that other conditions are kept constant, to decrease the clearance between the nozzles and increase the particle feeding speed will force the impingement inside the impingement zone more drastic, thus the particle impingement zone will become smaller and narrower. When the particle diameter is relatively big, to decrease the particle density will result in a decrease of the impingement correspondingly between particles. **Key words:** impingement flow, gas-solid two-phase flow, particle movement, collision

基于内模控制的火电机组功率控制系统 = **Power Control System for Thermal Power Generator Units Based on the Inner Model Control** [刊, 汉] SHENG Kai (Academy of Sciences, Hunan Provincial Electric Power Co.,