

# 氧化球团回转窑质能平衡分析及节能优化

冯俊小<sup>1</sup>, 吕悠扬<sup>1</sup>, 张永明<sup>2</sup>, 杨金宝<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 首钢矿业公司 球团厂, 河北 迁安 064404)

**摘要:** 针对首钢球团厂二系列回转窑系统, 根据窑内物料平衡和热平衡原理, 进行了质能平衡测算, 对整个系统进行了评估。该回转窑采取了一些有效的节能措施, 生产运行管理基本得当, 燃料消耗比较低, 为 15.6 kg/t; 也还有一些不足, 如炉衬材料、厚度均一化, 导致表面温度分布不够均衡; 分析了影响质能平衡状态的主要因素, 以及回转窑的最优控制条件和措施, 提出优化系统结构, 改善燃烧控制, 以减少大量热损失, 进一步实现节能降耗。

**关键词:** 回转窑; 质能平衡; 节能; 热工分析

中图分类号: TF551

文献标识码: A

文章编号: 1002-1639(2007)05-0014-03

## Mass-heat Balance and Energy-saving Technique Analysis on Oxidative Pellet Kiln

FENG Jun-xiao<sup>1</sup>, LV You-yang<sup>1</sup>, ZHANG Yong-ming<sup>2</sup>, YANG Jin-bao<sup>2</sup>

(1. Beijing Science and Technology University, Mechanical Engineering School, Beijing 100083, China;

2. The Pellet Factory of the Shougang Group, Qian'an 064404, China)

**Abstract:** Based on the principles of heat balance and materials balance, the paper carries out the mass-energy balance calculations. Simultaneously, the evaluation of the whole facility is gained. The kiln adopts several measures to ensure the pretty production run; however, improvement is still in need; this paper also analyzes main factors affecting heat balance state in kiln of the pellet factory of the Shougang group, puts forward a series of optimizing parameters and control measures of the oxidative pellet kiln; the suggestions that would decrease the heat loss is put forward to reduce the energy cost.

**Key words:** rotary kiln; mass-heat balance; energy-saving; thermotechnical analysis

链篦机-回转窑最早用于水泥工业, 1960 年美国在亨博尔特球团厂建成了世界上第一套生产铁矿球团的链篦机-回转窑, 并获得迅速发展。

球团焙烧最终是在回转窑内完成的。火焰温度对于球团质量起着关键性作用, 控制火焰温度, 维持窑内工作温度的稳定十分重要<sup>[1]</sup>。回转窑内的气流以及窑内氧化气氛, 是确保燃料完全燃烧, 确保球团氧化和控制低熔点结圈物生成的关键<sup>[2]</sup>。如果能够保证这些热力过程的合理进行, 则可以提高球团矿的产量和质量, 提高生产效率, 并极大地减少对环境的污染。

此次对回转窑质能平衡测试的目的是深入了解回转窑装置的各个工艺过程参数; 研究和确定各个热设备的热利用率等热工参数; 分析实际生产中存在的问题, 并制定相应的改进措施; 为优化回转窑操作过程提供可靠的技术数据。

本文将在回转窑的物料和热量平衡的基础上, 对于影响回转窑质能平衡状态的主要因素进行热工分析, 以

提出回转窑的最优控制条件和措施。

## 1 回转窑质能平衡原理与方法

根据能量守恒原理, 在回转窑稳定运行时, 单位时间内供入窑内的热量之和(热收入项)应等于通过各种途径排出的热量之和(热支出项), 即  $\sum Q_1 = \sum Q_2$ 。

因回转窑操作大约以 1 h 为周期(入球和出球), 故取质能平衡周期为 1 h, 所有参数均取 1 h 平均值。所有必测参数都是在生产正常稳定条件下进行测定。进入系统的生料物理水、灼减量及熟料的理化检测在测定期间内至少送检 3 次。在一个测定周期内, 风温、风压、风量测定 2 次, 气体成分分析 4 次<sup>[3]</sup>。

本次的质能平衡测试范围是从链篦机熟料出口到回转窑熟料出口。回转窑的结构及工艺流程如图 1 所示。

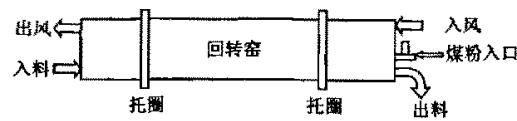


图 1 回转窑结构及工艺流程简图

## 2 质能平衡测试结果

### 2.1 测试

本次测试工作是在链篦机-回转窑系统基本正常的情况下进行的, 共分为 2 天, 第 1 天对一些工况变化不大

收稿日期: 2007-07-06; 修回日期: 2007-07-09

**作者简介:** 冯俊小(1960-), 男, 山西省代县人, 教授, 博士生导师, 从事热能及动力工程方面的教学和科研工作; 吕悠扬(1982-), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为氧化球团回转窑质能平衡分析以及窑内流动传热过程数值模拟。

数据进行提前测试; 第 2 天进行了全面的测试, 并连续测试了 6 h。其质能平衡计算结果中, 物料平衡差值为 0.35%, 其它热损失及误差只占 2.46%, 都小于标准规定的  $\pm 5\%$ <sup>[4]</sup>, 说明本次测试是成功的, 计算结果是可靠的, 可以据此对该系统的工作进行分析。测试结果见表 1、表 2。质能平衡周期为 1 h, 表中所有参数均取 1 小时平均值。

表 1 回转窑物料平衡表

| 收入物料质量/t (%) |                | 支出物料质量/t (%) |                |
|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 燃料 $G_1$     | 4.26 (1.06)    | 熟料 $G_1'$    | 273.34 (68.27) |
| 入窑料球 $G_2$   | 272.29 (68.01) | 烟气 $G_2'$    | 125.65 (31.38) |
| 二次风 $G_3$    | 113.95 (28.46) |              |                |
| 助燃风 $G_4$    | 6.36 (1.59)    |              |                |
| 压缩空气 $G_5$   | 3.52 (0.88)    |              |                |
|              |                | $\Delta G$   | 1.39 (0.35)    |
| 合计           | 400.38 (100)   | 合计           | 400.38 (100)   |

表 2 回转窑热平衡表

| 收入热量/ $\times 10^6$ kJ (%) |                | 支出热量/ $\times 10^6$ kJ (%) |                |
|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
| 燃料燃烧的化学热量 $Q_1$            | 111.71 (23.08) | 熟料带出的热量 $Q_1'$             | 301.19 (62.23) |
| 入窑料球带入的物理热量 $Q_2$          | 219.20 (45.29) | 烟气带出的热量 $Q_2'$             | 151.91 (31.38) |
| 环冷机二次风带入的热量 $Q_3$          | 134.58 (27.80) | 风机冷却带走的热量 $Q_3'$           | 0.85 (0.17)    |
| 氧化铁燃烧放出的热量 $Q_4$           | 18.54 (3.83)   | 窑体表面散热 $Q_4'$              | 17.46 (3.61)   |
|                            |                | 炉门辐射热 $Q_5'$               | 0.71 (0.15)    |
|                            |                | $\Delta Q$                 | 11.91 (2.46)   |
| 合计                         | 484.03 (100)   | 合计                         | 484.03 (100)   |

## 2.2 主要生产技术经济指标

(1) 耗能量  $Q_1 = 111.71 \times 10^6$  kJ

(2) 回转窑热效率

$$\eta_1 = [(Q_1' - Q_2 - Q_4) / (Q_1 + Q_3 + Q_4)] \times 100\% = 23.96\%$$

式中:  $Q_1'$  为球出窑带出的热量, kJ;  $Q_1$  为燃料燃烧热, kJ;  $Q_2$  为球入窑带入的热量, kJ;  $Q_3$  为二次热风带入热量, kJ;  $Q_4$  为球氧化放热量, kJ。

(3) 回转窑热利用率

$$\eta_2 = [(\sum Q - Q_2') / \sum Q] \times 100\% = 42.57\%$$

式中:  $\sum Q$  为回转窑热量总收入量, kJ;  $Q_2'$  为烟气带走的热量, kJ。

(4) 燃料消耗

## 单位产量燃料消耗

$$b = G_1 / G_1' = 0.0156 \text{ t/t}$$

式中:  $G_1$  为燃料质量, t;  $G_1'$  为球团熟料质量, t。

$$\text{耗热 } b' = b \times Q_{\text{dw}} = 0.41 \times 10^3 \text{ kJ/t}$$

式中:  $Q_{\text{dw}}$  为燃料低位发热量, kJ/kg。

## 3 测试结果分析及节能优化

根据以上质能平衡测试和计算结果, 结合系统运行工况, 对首钢球团厂链篦机-回转窑系统二系列中回转窑提出如下分析结论:

### 3.1 窑体散热

回转窑的表面平均温度为 268 °C。窑体表面散热为  $17.46 \times 10^6$  kJ/h, 占总热量的 3.61%, 这是比较理想的。主要是因为整个回转窑内部布置了耐火材料, 回转窑耐火材料为预制砖和浇注料宽度 1:1 相间使用, 浇注料、预制砖均为 TGM-3 材质, 厚 270 mm, 宽 350 mm。测试结果表明该窑衬结构比较合理, 散热损失属正常范围<sup>[5]</sup>。

### 3.2 烟气成分

一般燃烧属于化学当量燃烧, 而回转窑内的燃烧应是过氧燃烧, 这是氧化球团生产工艺要求的, 即窑内烟气必须具有一定的氧化性, 一般需要将烟气中的含氧量控制在 8% 以上, 以保证烟气进入链篦机后有足够的氧使球团当中的 Fe 氧化为  $Fe_2O_3$ 。通过在回转窑窑尾取气分析, 测得回转窑尾烟气成分中氧的含量较高, 达到 14.8%, 该值偏高, 在满足燃烧和球团氧化的前提下, 氧气含量控制在 8%~11% 较佳<sup>[6]</sup>。

### 3.3 回转窑燃料消耗

通过燃料消耗的统计计算得到本次回转窑的燃料消耗为 15.6 kg/t, 稍高于设计值 13.37 kg/t, 此结果表明该系统经过改造基本达到了设计水平, 设计和技术改造是成功的。当然, 在结构上还存在一些不足, 如炉体绝热还可以进一步改进, 减少散热损失, 又如链篦机篦板结构可以进行优化, 可减少大量的热损失<sup>[7]</sup>。此外, 燃烧控制也可以进一步提高水平。回转窑燃料消耗较低, 但还有进一步节能降耗的潜力。

### 3.4 窑身温度

由图 2 可以看出, 回转窑窑头、窑身温度比较高, 达到平均 280 °C, 而窑尾则偏低, 这是由于回转窑内各段窑温是不同的, 窑头高窑尾低, 测试结果与实际情况相符。从窑体平均温度来看偏高, 尤其是窑头部位。为使表面温度分布均衡, 建议在回转窑大修时各段可采用不同质量或者不同厚度的炉衬, 在窑头和窑身高温段增加耐材厚度<sup>[8]</sup>。

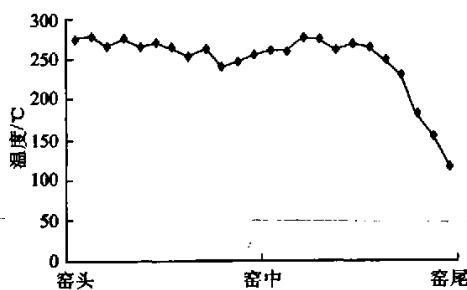


图2 回转窑表面温度

### 3.5 回转窑焙烧温度

图3为回转窑内的焙烧温度变化图。链篦机-回转窑法适宜的焙烧温度应当是在设备材质耐热及使用寿命允许的条件下尽可能高的温度,这样不仅可以提高入窑球团的强度,同时可以提高回转窑烟气废热的利用,提高回转窑的热效率。对于氧化球团回转窑来说,一般来说其焙烧温度应该在1250℃左右<sup>[9]</sup>。图3中曲线表示的是窑温变化情况。分析图3则可以得到窑内的焙烧情况,从图3中可以看到:窑内的温度达到了球团焙烧的要求。这也说明窑温控制比较稳定,波动小。

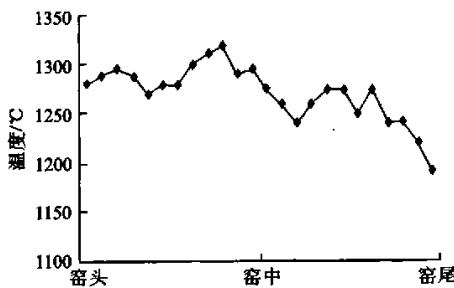


图3 回转窑焙烧温度

### 3.6 窑头、窑尾冷却风机

窑头、窑尾冷却风机,是用来冷却窑的表面,避免其温度过高,延长窑的使用寿命。由测试计算得知,该部分热损失为 $0.85 \times 10^6 \text{ kJ/h}$ ,仅占总热量的0.17%。窑头、窑尾风机的实际风量分别为69 776.78, 28 382.445 m<sup>3</sup>/h,而它们的额定风量为90 000 m<sup>3</sup>/h,这就造成了大马拉小车的现象,造成投资增加和运行成本的提高<sup>[10]</sup>。这在今后的设计改造中需要借鉴。

## 4 结论

总体来说,该回转窑采取了一些有效的节能措施,生产运行基本得当,燃料消耗是比较低的,在国内居领先水平。但也还有一些不足,比如它的炉衬结构,燃烧控制等。今后,需要进一步完善设备,改善回转窑的管理运行,优化热工操作。

### 参考文献:

- [1] 张汉泉. 链篦机-回转窑氧化球团热工操作分析 [J]. 中国冶金, 2006, 16 (2): 12-15.
- [2] 熊守安, 朱德庆, 范晓慧, 等. 链篦机-回转窑法氧化球团矿试验研究 [J]. 烧结球团, 2002, 27 (4): 1-6.
- [3] 刘文采. 回转窑整体结构与加热方式的探讨 [J]. 技术工艺应用, 2003, 3 (1): 30-34.
- [4] 张春. 高温回转窑的热工设计与实践 [J]. 耐火材料, 1999, 5 (2): 101-103.
- [5] 杨佳龙, 谭穗勤. 增加球团矿用量以优化高炉炉料结构 [J]. 钢铁, 2005, 40 (10): 13-16.
- [6] 王介生, 张勇, 丛峰武, 等. 鞍钢200万t氧化球团链篦机-回转窑系统的设计 [J]. 烧结球团, 2005, 30 (4): 9-12.
- [7] MEISEN A, SHUAI X. A Rule Based Cement Kiln Control System Using Neural Networks [J]. Proceeding on IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, 1997, 1 (1): 493-497.
- [8] GUEDES DE CARVALHO, J R F PINTO A M F R, PINHO C M C T. Mass Transfer Around Carbon Particles Burning in Fluidized Beds [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1991, 69 (6): 63-70.
- [9] COKER DT, ALLEN, FREEMAN BD, et al. Nonisothermal Model for Gas Separation-hollow-fiber membranes [J]. AIChE J, 1999, 45 (1): 1451-1468.
- [10] BISIO G, GUGLIELMINI G. REMARKS on Heat and Work Transfers in Systems with Uniform Intensive Properties [J]. Chem Engng Com., 1993, 120 (1): 1-14.

WZ003212 德国德马格公司生产的带材卷取机——《Industrial Heating》, 2006, V. LX XIII, No.9, 56 (英)

德国SMS德马格公司最近接受德国阿塞洛·不来梅热轧带钢厂的订单,为该厂制作了重型大轨距的带材卷取机。该卷取机是用来卷绕高强度大口径钢管之用,用来取代原有的陈旧落后的No.3卷取机。这种重型卷取机在结构上属于四辊机型,它能够卷绕口径25.4 mm的高强度钢管,卷绕宽度达到2 150 mm。

### [花 品 摘]

WZ003213 智能式真空炉——《Industrial Heating》, 2006, V. LX XIII, No.10, 28 (英)

美国加州G-M企业集团公司最近接受一批真空炉的订货。这批炉子包括:2台HVF501-SFQ型真空炉(真空度分别为 $10^{-6} \text{ Pa}$ 和 $6 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ )、1台HVF701-B型真空炉(真空度为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ )和3台VVF202-B型底装料立式真空炉(真空度为 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ),所有炉子均配有GMVACI型智能式计算机控制系统。这批炉子被用来处理飞机发动机部件和发电设备中的汽轮机部件。HVF501-SFQ型炉子的炉膛尺寸:宽×高×深=1 067 mm×1 067 mm×1 500 mm;HVF701-B型炉膛尺寸:1 200 mm×1 200 mm×1 500 mm;每台炉子中均设有金属加热区。图1

### [花 品 摘]