

Study on Thermodynamics Calculation of Pellet Three-Big-Main-Machine

Ziming Wang, Jixiang Zhao

China Ben-Steel Pellet Plant, Benxi
Email: wangzimingsq88@qq.com

Received: Mar. 13th, 2013; revised: Mar. 27th, 2013; accepted: Apr. 10th, 2013

Copyright © 2013 Ziming Wang, Jixiang Zhao. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: With the demand of blast furnace iron-smelting and pellet reducing coal consumption improving constantly, improving thermal efficiency and metallurgical properties of pellets is a general trend. The article studies on thermodynamics calculation of pellet three-big-main-machine systematically, and establishes the relationship affecting compressive strength through it. Heat utilization rate and compressive strength of 10 - 12.5 mm pellet being not high in pelletizing industry, we put forward the method and direction of thermodynamics calculation to solve it, being propitious to improving the thermal stability of three-big-main-machine and the quality of pellet.

Keywords: Three-Big-Main-Machine; Thermodynamics; Calculation

基于球团三大主机热力学计算的研究

王子鸣, 赵吉祥

本钢球团厂, 本溪
Email: wangzimingsq88@qq.com

收稿日期: 2013 年 3 月 13 日; 修回日期: 2013 年 3 月 27 日; 录用日期: 2013 年 4 月 10 日

摘要: 随着高炉炼铁和球团降煤耗的需求的不断提高, 提高热利用率和球团冶金性能是大势所趋。本文系统地研究了球团三大主机热力学计算, 并通过热力学计算谈提高球团矿抗压强度。在球团行业热利用率、10~12.5 mm 球团抗压强度不高的情况下, 我们提出了基于热力学计算来解决的方法和方向, 这将有利于改进三大主机热稳定性和提高球团矿质量。

关键词: 三大主机; 热力学; 计算

1. 引言

本钢南芬球团厂 200 万吨/年链算机 - 回转窑氧化球团生产线投产至今已 7 年多的时间, 已顺产达标, 煤耗逐年降低, 热效率逐年提高, 但与国内同行业其它球团相比仍有一定的差距。为了稳定控制三大主机热工操作参数, 从而稳定提高球团矿抗压强度, 笔者潜心研究, 同时参照周茂军等《宝钢 1 号烧结机质能

平衡测试和分析》、鞍钢球团物料平衡和热平衡测试、傅念新等《复合球团还原热力学平衡成分计算机模拟》, 希望通过热力学计算的研究来解决上述问题。

众所周知, 不同原料条件和控制方法会产生不同的生球质量, 而不同的球团质量有不同的三大主机最佳热工控制参数。但球团热力学机理是不变的且是最关键的, 且热力学、流体力学、系统工程、数学建模

等是可交叉联系的学科，因而可通过基于球团三大主机热力学计算来定性、定量地研究球团的烧结机理。

2. 球团三大主机热力学计算

2.1. 球团物料平衡和热平衡测试^[1,2]

对于球团物料平衡和热平衡测试要参照宝钢、攀钢、鞍钢等烧结机、球团物料平衡和热平衡平衡测试，具体设计结构和工艺技术参数可参考《球团初步设计手册》。

2.1.1. 测试基础

测试与计算采用国际标准，物料平衡与热平衡均以吨球团矿为基准计算单位。测定时铁精矿、膨润土、除尘灰配比基本不变，设备正常运转，生产操作稳定。

物料平衡测试范围包括物料收入(精矿量、膨润土量、除尘灰量、生球水分量)、物料支出(预热球量、物料机械损失量、干返料量等)。

热平衡测试包括球团链算机、回转窑、环冷机、鼓风系统、抽风系统、回热系统和冷却系统。测试分析以现场测试数据为主，主控室数据为辅。测试范围包括热量收入(热风带入热量、生球带入热量、生球水分带入热量、FeO 氧化放热)、热量支出(废气带走热量、预热球带走热量、焙烧球带走热量、冷却球带走热量、水分蒸发带走热量、干返料带走热量、链算机/回转窑/环冷机带走热量、系统热损失)。

2.1.2. 球团基础数据测试

测试期间铁矿粉、膨润土、煤、除尘灰、球团矿化学成分、配比和测试结果进行记录。

2.1.3. 物料平衡和热平衡测试

三大主机的物料平衡和热平衡计算要将三大主机分成若干个子系统，对每个子系统进行物料平衡和热平衡测试，并分析物料平衡和热平衡测定计算相对误差是否符合标准。

2.1.4. 漏风情况

测试漏风点，发现设计缺陷部位，消除不必要的热量损失。比如，链算机东西两侧温度不一致、链节漏风等。

2.2. 应用 HSC 吉布斯自由能最小法结论

HSC(焓、熵和热容)软件对多元、多相、多个反

应复杂体系平衡成分模拟的原理为体系总的吉布斯自由能最小法^[3]，应用其结论：

$$\mu_i^n + RT \ln \alpha_i - \sum_{e=1}^{N_e} \lambda_e \alpha_{i,e} = 0 \quad (1)$$

式中， μ_i^n —组元 i 生成的自由能， R —气体常数， T —绝对温度， α_i —组元 i 的活度。

$$M_e = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^P M_{i,j} \alpha_{i,e} \quad (2)$$

式中， $\alpha_{i,e}$ —组元 i 中第 e 种元素的原子数， $M_{i,j}$ —组元 i 中第 j 相的摩尔数。

复杂体系中 N_i 个组元在 P 个相中平衡成分计算条件即为式(1)和式(2)组成的联立方程组，求解该方程组，可计算组元 i 的摩尔数 M_i ，即可确定体系的平衡成分。

因此，球团矿的相变、氧化反应均可用该结论来确定各体系成分的含量。

2.3. 从系统工程角度谈球团热力学计算

球团是一个庞大的热工自动控制系统，可将该系统分解为若干个子系统，这样会有利于确定温度场^[4]。

以预热 II 段温度场为例(见图 1)：

则预热 II 段温度场为：

$$G(s) = M(s) + Q(s) - N(s) - T(s) - P(s) - R(s)$$

其中， $M(s)$ 为回转窑供热温度场， $Q(s)$ 为进预热 II 段口温度场， $N(s)$ 为热风阻力损失场， $T(s)$ 为出预热 II 段口温度场， $P(s)$ 为回热温度场， $R(s)$ 为球团吸热温度场。

参数收集应包括：

$M(s)$ ： 焓增量、窑内氧化气氛、进系统气流速度。

$Q(s)$ ： 料层和挡墙高度 h_1 、进预热 II 段口温度 t_1 、机速。

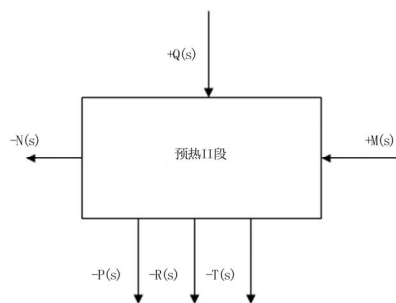


Figure 1. Temperature field control chart of preheating section II
图 1. 预热 II 段温度场控制图

$N(s)$: 位移量、空气阻力。

$T(s)$: 料层和挡墙高度 h_2 、出预热 II 段口温度 t_2 、
机速。

$P(s)$: 阀门开度 k 、风管风速 v 、接口风温 t_3 。

$R(s)$: 球团比热 c 、料层厚度 h 、进出预热 II 段温度 Δt 。

$$\text{则 } M(s) = \Delta H + \frac{1}{2} m \cdot \Delta v_{\text{气流}}^2$$

$$Q(s) = c_{\text{空气}} \cdot \rho \cdot S_{\text{截面}} \cdot h_1 \cdot \Delta t_1$$

$$N(s) = f_{\text{阻}} \cdot S_{\text{截面}}'' \cdot y_{\text{位移}}$$

$$T(s) = c_{\text{空气}} \cdot \rho \cdot S_{\text{截面}}' \cdot h_2 \cdot \Delta t_2$$

$$P(s) = c_{\text{空气}} \cdot \rho \cdot S_{\text{风管}} \cdot v_{\text{风管}} \cdot k \cdot \Delta t_3$$

$$R(s) = c_{\text{球团}} \cdot \rho \cdot S_{\text{料床}} \cdot h \cdot \Delta t$$

以此类推，可确定球团三大主机任意段的温度场。

2.4. 从流体力学角度谈热力学计算

对于气体的三维流动，则有：惯性力=质量力+压力+粘性力，这三个维度的加速度分别为：

$$a_x = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$a_y = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$a_z = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

该纳维-斯托克斯方程对于三大主机的气体任一放缩部位均适用。

气体的流速 $v_{\text{气流}}$ 受空气阻力 $f_{\text{阻}}$ 的影响， $f_{\text{阻}}$ 与空气粘度系数 $\mu_{\text{空气}}$ 有关，且 $f_{\text{阻}}$ 是可变的。

$$f_{\text{阻}} = v_{\text{气流}} \cdot \frac{\mu_{\text{空气}}}{y}$$

其中， $v_{\text{气流}}$ 可用流量计表测， $\mu_{\text{空气}}$ 可查表， y 可现场测量。

这样，可确定三大主机某时某点的气流速度 $v_{\text{气流}}$ 与阻力 $f_{\text{阻}}$ 、位移量 y 之间的关系式。

此外，对气体的流向、流量等的把握，有利于把握逆压区、顺压区，有利于掌握回转窑煤粉燃烧情况，

有利于控制三大主机热力学参数，有利于把握球团矿中铁的氧化过程。

2.5. 基于热力学计算、数学建模谈提高球团矿抗压强度

球团三大主机温度与球团矿抗压强度使用回归分析的局限性，即使用 Minitab15 回归分析得出的各因子 P 值不显著，从工艺现实性上证明：

1) 球团矿在干燥、预热、焙烧和冷却的过程中，铁的铁价和存在形式都发生了变化，且该过程是一个复杂的物理、化学反应，应着重进行球团矿化学物相分析和检查；

2) 球团温度值不是一个具体数值，采用 PID 控制，并采用模糊控制，若操作没有变化，温度 10 s 内一般上下波动可达 $\pm 10^\circ\text{C}$ ；

3) 拿抗压强度指标来说，同一批次球团矿的每个球团抗压强度均不一样，与均值有高达 70~80 N/球的偏差，有的多达 200 N/球以上；

4) 从对应的角度说，球团矿某一质量指标和温度是多对多对应，不可能形成多元方程，也不可能形成函数关系式，更不要说是回归方程了；

5) 温度有设计值范围和理想值范围，而标准化操作能稳定和提高球团矿质量。

下面从热力学角度研究抗压强度，以三大主机为研究对象，则该系统吸收(即球团吸收)的热量：

$$Q_{\text{吸}} = \Delta H + \frac{1}{2} m \Delta c_f^2 + mg \Delta z - Q_{\text{漏}} - Q_{\text{散}}$$

要判断 $Q_{\text{漏}} + Q_{\text{散}}$ (漏热和散热) 随外界环境温度不同时占 $Q_{\text{吸}}$ 的比重。

假设预热 II 段出口球团矿抗压强度 y ，如果将某时间点 y 看成是一个离散集合体 y^* ，均值 $\overline{y^*}$ ，则 $\overline{y^*}$ 可与 $T_{\text{吸}}$ 形成如下关系式： $T_{\text{吸}} \xrightarrow{\text{正比}} Q_{\text{吸}} \xrightarrow{f} \overline{y^*}$ 。

用反证法可排除映射法则 f 非线性关系、非一般曲线关系、非响应曲面关系。

2.5.1. 对影响球团矿抗压强度总变异分解^[4]

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{process}}^2 + \sigma_{\text{MS}}^2$$

(1) 对抗压强度压力仪测量系统分析

$$\sigma_{\text{MS}}^2 = \sigma_{\text{RPD}}^2 + \dots + \sigma_{\text{error}}^2$$

要求：1) 没有重复性。2) 保证再现性≤10%，能力很好；保证 10%<再现性≤30%，能力处于临界状态。3) 保证相对误差 1%以内。

(2) 分析变异源(SOV)

$$\sigma_{\text{process}}^2 = \sigma_{\text{time}}^2 + \sigma_{PT1}^2 + \sigma_{PT2}^2 + \dots + \sigma_{\text{Error}}^2$$

2.5.2. 忽略次要因素，确定抗压强度与温度、时间的关系

以预热 II 段为例，当预热时间一定时，预热球抗压强度与预热温度的关系见图 2：

当预热温度一定时，预热球抗压强度与预热时间的关系见图 3：

可得， $y^* = g(T_{\text{温度}}, t_{\text{时间}})$

其中，1) 温度曲线实际是许多小折线组成的，温度、时间均可变，两曲线叠加；2) 应根据球团矿产量，控制机速和布料厚度；3) 不考虑算板等备件损坏、故障停机，且球团不出现爆裂。

预热球抗压强度与预热温度 $T_{\text{温度}}$ 、预热时间 $t_{\text{时间}}$ 的函数关系为：

$$y^* = \sum_{i=0}^n k_i T_{\text{温度}}^i + \sum_{j=0}^m p_j t_{\text{时间}}^j + \varepsilon^*$$

$$(T_1 \leq T_{\text{温度}} \leq T_2, t_{\text{时间}} \geq t_1)$$

其中， ε^* 为误差，所有计算出的 ε^* 形成一个级数，该级数收敛于 N 。

以此类推，三大主机各段均可确定时间和温度的范围。在工业生产中，需要试验确定机速、窑速、环速和给料量、料层厚度的最佳范围，以此来确定 $T_{\text{温度}}$ 、 $t_{\text{时间}}$ 的最佳控制范围。在保证机速、窑速、环速的协调性、一致性外，还要考虑温度调控的合理性。

2.5.3. 理想条件，忽略相的反应、铁的氧化过程和化学组成

假设在预热 II 段范围内，抗压强度 \bar{y}^* 与 $T_{\text{吸}}$ 呈函数关系，令 $T_{\text{吸}} = \xi$ ，则：

$$\bar{y}^* = k_0 + k_1 \xi + k_2 \xi^2 + k_3 \xi^3 + \dots + k_n \xi^n + \xi^*$$

其中， ξ^* 为误差，所有计算出的 ξ^* 形成一个级数，该级数收敛于 M 。

采集样本数据，得出该状态时的抗压强度方程。多组数据计算进行比较、校正，得出加权平均值。

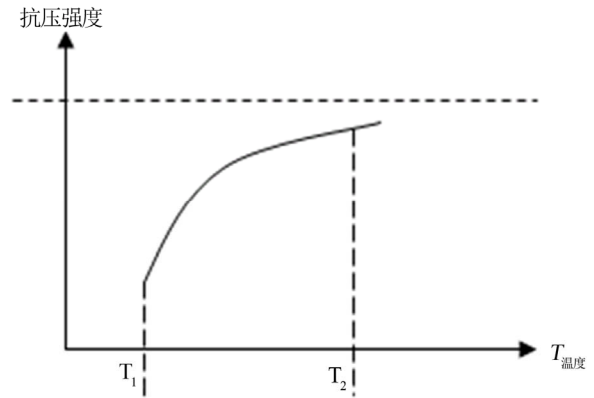


Figure 2. Relationship chart of compressive strength and preheating temperature
图 2. 预热球抗压强度与预热温度关系图

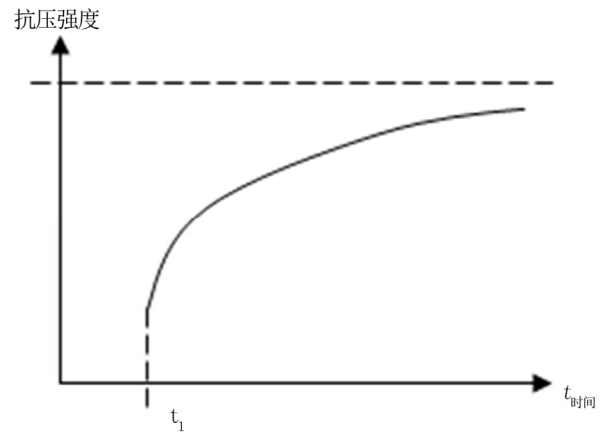


Figure 3. Relationship chart of compressive strength and preheating time
图 3. 预热球抗压强度与预热时间关系图

当 n 取值足够大时，该方程满足误差要求、准确，设当 m 值时合适，即：

$$\bar{y}^* = k_0 + k_1 \xi + k_2 \xi^2 + k_3 \xi^3 + \dots + k_m \xi^m = \sum_{i=0}^m k_i \xi^i$$

这样，可用 Minitab 回归方程一次、二次或三次即可得出函数关系式的主项^[4]。由于球团为热力学模糊控制，精度要求不高，温度 10 s 内可波动±10℃，那么用回归方程的一次、二次和三次就可求解，即

$$\bar{y}^* \approx k_0 + k_1 \xi + k_2 \xi^2 + k_3 \xi^3$$

假设以预热 II 段为例，以入口和出口两个数据采集点为基准，可求得两函数 $\bar{y}_1^* = f_{\lambda 1}(t)$ ， $\bar{y}_2^* = f_{\text{出}2}(t)$ ，两函数关系式进行加权计算求平均值

$$\bar{y}^* = \sqrt{\frac{(\bar{y}_1^*)^2 + (\bar{y}_2^*)^2}{2}} = \sqrt{\frac{f_{\lambda 1}^2(t) + f_{\text{出}2}^2(t)}{2}}$$

2.5.4. 现实条件, 考虑相变、氧化过程和化学组成的影响

假设在预热 II 段范围内, 抗压强度 $\overline{y^*}$ 与 $T_{\text{吸}}$ 呈函数关系, 令 $T_{\text{吸}} = \xi$, 则:

$$\overline{y^*} = k_0 + k_1 \xi^m + k_2 \xi^n + k_3 \xi^p + \dots + k_n \xi^r + \xi^*$$

其中, m, n, p, \dots, r 为任意实数; ξ^* 为误差, 所有计算出的 ξ^* 形成一个级数, 该级数收敛于 M 。

要分析球团的热力学参数(温度、机速、窑速、环速、料层厚度、负压)、每个阶段相的反应(固相之间的反应、液相生成和冷却结晶)、铁的氧化过程(氧化气氛、铁的存在形式)、化学组成(铁精矿理化指标、膨润土理化指标、生球指标、 SiO_2 含量、 CaO 含量等)是如何影响抗压强度, 分析其具体规律。将球团的热力学参数、相的反应、各段温度、氧化过程分别与抗压强度形成关系式得 y_1, y_2, y_3, y_4 , 则可得现实条件的 $\overline{y^*} = y_1 + y_2 + y_3 + y_4$ 。

2.5.5. 数据采集样本的研究

研究对象一则采用某一时间点为研究对象, 反映的是点实时控制; 一则采用某一段时间为研究对象, 反映的是时间段控制。

那么, 多少样本量才能比较客观地反映数据的真实性呢? 首先, 要保证数据在线检测的真实性, 要保证数据记录的真实性; 其次, 标准化操作, 保证采集时间的连续性和均匀性, 保证设备稳定运行; 最后, 要做好样本量的研究。

样本量越大, 越能反映数据的真实情况, 越能反

映曲线的真实走势。但样本量过大, 给数据分析、计算带来很大的麻烦。样本量越小, 曲线失真越严重, 数据反映的越不属实, 不能反映真实情况。回归分析样本量至少 30~50 个, 置信度视要求而定; 同理, 该关系式也可用 50 个样本量便可确定, 置信度要求大于 70%~80%^[4]。

3. 结语

球团物料平衡和热平衡测试提高热利用率和稳定系统, 应用 HSC 吉布斯自由能最小法结论确定球团烧结过程相变体系化学成分, 从系统工程角度谈热力学计算确定三大主机温度场, 从流体力学角度谈热力学计算把握热风的流速、流向, 基于热力学计算、数学建模建立球团抗压强度与其影响因素(热力学温度等)之间的关系式, 这些均全面地、系统地研究球团热力学计算, 将这几种方法相互结合使用, 就可解决热利用率和成品球抗压强度不高的问题。这从传统的工艺实物研究转向定性、定量的热力学计算, 但仍有许多不完善的地方, 需进一步研究、分析。

参考文献 (References)

- [1] 周茂军等. 宝钢 1 号烧结机质能平衡测试与分析[Z]. 宝山钢铁股份有限公司, 2011.
- [2] 刘宝先等. 链算机物料平衡及热平衡计算[Z]. 江苏大垣集团有限公司, 2009.
- [3] 傅念新等. 复合球团还原热力学平衡成分计算机模拟[D]. 东北大学, 1998.
- [4] 马林等. 六西格玛管理[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.