带式焙烧机焙烧温度分析研究

刘丕亮[1]，臧日浩[1]，崔桂梅[1]，陈智辉[2]，李志强[2]
（1. 内蒙古科技大学 信息工程学院，内蒙古 包头 014010；
2. 内蒙古包钢稀土钢炼铁厂 自动化部，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 焙烧温度不合理将直接造成球团质量的下降，过烧对于球团矿的抗压强度影响不大，但热损失增加，能耗高；失烧则不利于球团矿的还原度和还原膨胀性。鉴于目前带式焙烧机焙烧温度控制系统存在不能实时反馈的缺陷以及影响其焙烧温度的因素众多的现状，本文通过 SPSS 的相关性分析和 MATLAB 的回归分析对其焙烧温度相关量进行数据挖掘和回归分析。最终确定烟罩温度和风箱温度对焙烧温度的影响较大，适用于焙烧温度优化控制系统的设计，以保证焙烧温度的稳定性，从而提升球团质量。

关键词： 带式焙烧机；焙烧温度；球团矿；相关性分析；回归分析
中图分类号： TF046.6　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2018)02－0029－04
doi： 10.13403/j.sjqt.2018.02.022

Analysis and research on roasting temperature of travelling grate

Liu Piliang[1], Zang Rihao[1], Cui Guimei[1], Chen Zhihui[2], Li Zhiqiang[2]
(1. *School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia*;
2. *Automation Department, Iron-making Plant of Rare Earth Steel Co., Ltd., of Baotou Steel in Inner Mongolia, Baotou* 014010, *Inner Mongolia*)

Abstract The unreasonable roasting temperature will lead to the decrease of pellet quality, the over-roasting has little influence on the compressive strength of pellets, but it increases the heat loss and the energy consumption. While under-roasting is unfavorable to reduction degree and reduction swellability of the pellets. In view of the fact that the roast temperature control system cannot give real-time feedback and that there are many factors affecting the roasting temperature, and in this paper, the data mining and regression analysis of the roasting temperature are carried out through correlation analysis of SPSS and the regression analysis of MATLAB. Finally, it is determined that the hood temperature and windbox temperature have great effect on roasting temperature, which is suitable for design of roasting temperature optimization and control system to ensure the stable roasting temperature and improve pellet quality.

Key words travelling grate; roasting temperature; iron ore pellets; correlation analysis; regression analysis

1 前 言

目前，世界上焙烧球团法主要有竖炉法、带式焙烧机法和链篦机－回转窑法三种。在上述三种模式中，带式焙烧机虽具有原料适用性强、效率高、热量消耗低、球团质量均匀等优点，但同时也具有耐热合金需要量大、电耗较高等缺点，且其缺点限制了带式焙烧机的发展[1]。在带式焙烧机的生产中，焙烧温度的影响贯穿于干燥、预热、焙烧、均热和冷却等各阶段中，其与球团成品的质量息息相关。过烧虽然对于球团矿的抗压强度影响不大，但过烧和失烧都对球团矿的还原度和还原膨胀性有不利的影响，所以焙烧温度的合理性对于球团质量来说十分重要。因此，合

收稿日期：2017－09－11
基金项目：国家自然科学基金项目(61673039)；内蒙古自然科学基金项目(2015MS0620)。
作者简介：刘丕亮(1980－)，男，讲师，主要从事工业过程自动化控制方面的研究。
通讯作者：臧日浩(1993－)，男，硕士，主要从事过程优化控制方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

适的焙烧温度有利于带式焙烧机的节能降耗和高炉冶炼[2]。

在带式焙烧机的生产工艺中，由于球团矿焙烧过程的复杂多样，采用常规的系统建模以及控制的方法难以对焙烧过程进行平稳的控制[3,4]。加上环境的不确定性以及供给煤气的压力和热值、风温的不断变化，为了达到最好的焙烧效率和状态，就需要一直对焙烧温度进行调节，而这种操作的方式极大地加大了操作的难度和劳动强度，造成了资源的浪费。本文以带式焙烧机焙烧过程为例，采用SPSS的相关性分析和MATLAB的回归分析探讨了影响其焙烧温度的主要因素，以期为其焙烧温度的优化控制提供理论依据。

2 焙烧温度控制系统概述

带式焙烧机原焙烧温度控制系统为双闭环串级控制，内环为煤气流量闭环控制，外环为焙烧温度闭环控制，空气流量固定不变，有一台风机满载工作。改进后的带式焙烧机焙烧温度控制系统，如图1所示为烧嘴控制5区(19#～26#烧嘴)的焙烧温度控制系统结构图。通过与现场工程师交流经验得出生球量、风量和风箱温度与焙烧温度密切相关。在焙烧温度控制回路引入焙烧温度串级控制，外加焙烧温度决策器。决策器的引入使焙烧温度可根据决策器设定的焙烧温度曲线来控制煤气流量，从而实现对焙烧温度跟踪模型的曲线变化。焙烧温度反馈系统在结构上形成两个环，内环完成粗调，外环起到细调的作用，以最终满足焙烧工艺要求[5]。

煤气流量闭环控制系统，抑制煤气压力波动，稳定进入烧嘴的煤气量。通过改变空燃比K[6]，调节空气流量，将残氧含量稳定在1%～2%内，调整后的比值即为最佳空燃比。通过将寻优后的空燃比实时传给焙烧设备控制系统，来实现焙烧优化控制。

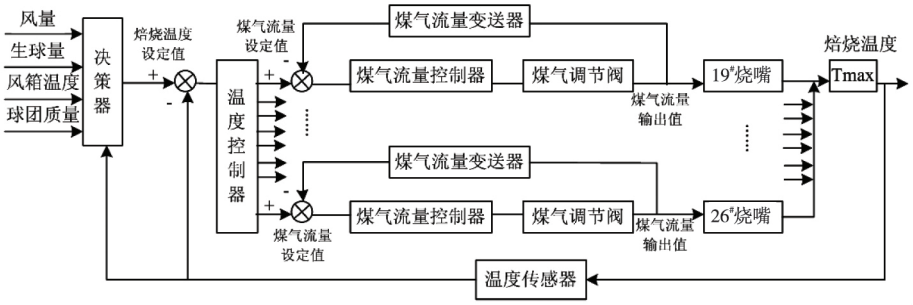


图1 焙烧温度控制系统结构图

带式焙烧机整个焙烧流程为台车进入焙烧区，生球从机头进入，分别经历干燥、预热、焙烧、均热和冷却等阶段之后，其成品球团从机尾倾斜卸下，然后台车沿回行轨道经机头返回上部轨道，完成一个工作循环。如图2所示。

分析研究焙烧温度需要明确焙烧段的初始时刻，将预热段结束点设为焙烧段初始点，使得焙烧过程更加合理，可以减少球团的爆裂和焙烧温度的稳定性，提高球团的质量[7]。

3 焙烧温度控制系统的可行性探究

3.1 数据预处理

为了保证焙烧数据分析的准确性，需要对现场采集的数据就行预处理，消除其量纲，使数据之间具有可比性。本次采用区间值化变换的方法进行数据预处理，定义如下:

设序列有

$$x=(x(1),x(2)\cdots x(n))$$

若 $f(x(k))=\dfrac{x(k)-\min\limits_{k}x(k)}{\max\limits_{k}x(k)-\min\limits_{k}x(k)}=y(k)$

则称 f 为区间值化变换。

3.2 相关性分析

包钢624 m^2 D－L型带式焙烧机，年产量达500万t，其中规格一致的风箱共26个，焙烧机两侧各有15个烧嘴，共30个，分为6个烧嘴控制区: 烧嘴控制1区(1#、2#烧嘴)、烧嘴控制2区

中国知网 https://www.cnki.net

(3#～6#烧嘴)、烧嘴控制 3 区(7#～10#烧嘴)、烧嘴控制 4 区(11#～18#烧嘴)、烧嘴控制 5 区(19#～26#烧嘴)、烧嘴控制 6 区(27#～30#烧嘴) 如图 2 所示。烧嘴区域的划分依据: 现场数据采集和工程师经验,30 个烧嘴都在焙烧和均热段,其余阶段没有烧嘴,属于连通供给热量。

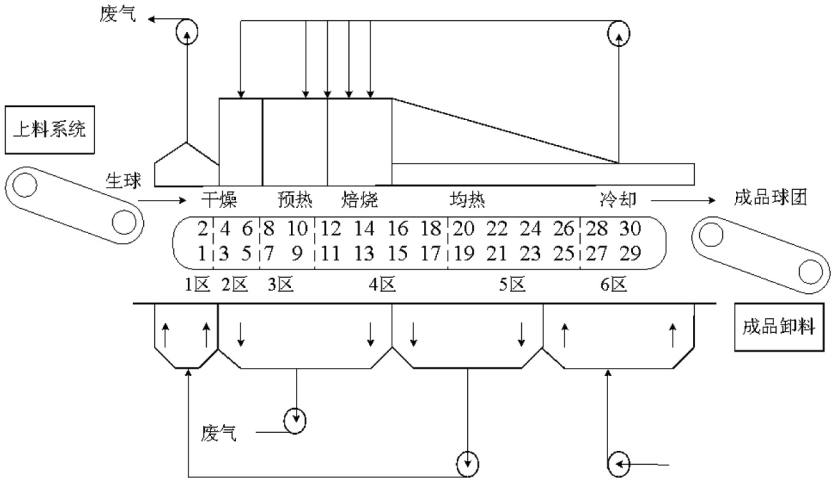


图 2　焙烧机工艺流程图

焙烧温度控制系统决策器取决于历史数据的数量及质量。由于受到操作过程仪器测量精度、稳定性,现场环境及人为因素的影响,存在数据异常或缺失等情况。结合现场工程师经验,需对焙烧温度控制系统现场数据: 生球量、主引风机风量、煤气量、14#烟罩温度、17#烟罩温度、14#～17#风箱温度、烧嘴 3～6 区温度、FeO 质量分数、转鼓指数、抗压强度做归一化及相关性分析,找出其对焙烧温度影响的几个主要因素(不相关或相关性很低的变量已剔除),并将其做为决策器的输入。采用 3σ 准则剔除异常数据[8],线性插值方法补足缺损值,归一化处理选择最大最小法,并对焙烧数据进行相关性分析[9,10],多次相关性分析的结果如表 1 所示。

表 1　各参数间 Pearson 相关系数

项目		生球量	主引风机流量	煤气流量	14#烟罩温度	17#烟罩温度	14#风箱温度	17#风箱温度	烧嘴 5 区温度	烧嘴 6 区温度
烧嘴 5 区温度	Pearson	−0.658**	−0.130	−0.345	0.900**	−0.427*	0.668**	0.630**	1	0.976**
	Sig	0.000	0.493	0.062	0.000	0.019	0.000	0.000		0.000
烧嘴 6 区温度	Pearson	−0.702**	−0.075	−0.299	0.858**	−0.515**	0.701**	0.580**	0.976**	1
	Sig	0.000	0.692	0.109	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	
FeO%	Pearson	0.590**	0.460*	0.359	−0.336	0.518**	−0.547**	−0.240	−0.414*	−0.435*
	Sig	0.001	0.010	0.051	0.069	0.003	0.000	0.202	0.023	0.016
转鼓指数	Pearson	−0.311	0.073	−0.096	0.521**	−0.127	0.356	0.514**	0.711**	0.647**
	Sig	0.095	0.700	0.615	0.003	0.503	0.054	0.004	0.000	0.000
抗压强度	Pearson	−0.431*	−0.584**	−0.218	0.293	−0.232	0.503**	0.335	0.369*	0.345
	Sig	0.017	0.001	0.247	0.116	0.217	0.000	0.071	0.045	0.062

注: Pearson 为相关系数大小; Sig 为相关性显著程度; ** 表示 Sig < 0.01,为相关性高度显著; * 表示 0.01 < Sig < 0.05,为相关性显著

影响球团质量的三个关键因素分别为: FeO 质量分数、转鼓指数和抗压强度。从表 1 中可以

中国知网　https://www.cnki.net

得出: FeO 质量分数与烧嘴 5 区温度、烧嘴 6 区温度低度相关且相关性显著; 转鼓指数与烧嘴 5 区温度、烧嘴 6 区温度中度相关且相关性高度显著; 抗压强度与烧嘴 5 区温度低度相关且相关性显著,与烧嘴 6 区温度低度相关; 并且烧嘴 5 区温度相关系数大于烧嘴 6 区。因此,球团质量与烧嘴 5 区温度密切相关,烧嘴 5 区温度可以作为焙烧温度来研究。

此外,还可从表 1 中可以得出: 烧嘴 5 区温度与 14#烟罩温度高度相关并且相关性高度显著; 烧嘴 5 区温度与生球量、14#风箱温度、17#风箱温度中度相关且相关性高度显著; 烧嘴 5 区温度与 17#烟罩温度低度相关且相关性显著,烧嘴 5 区温度与煤气流量低度相关; 烧嘴 5 区温度与主引风机流量不相关,但是主引风机流量与抗压强度中度相关且相关性高度显著。因此,影响焙烧温度的主要因素有: 14#烟罩温度、生球量、14#风箱温度、17#风箱温度和煤气流量。

3.3 逐步回归分析

以焙烧温度作为目标参量 y,14#烟罩温度、生球量、14#风箱温度、17#风箱温度和煤气流量分别作为自变量 x_1、x_2、x_3、x_4、x_5,在 MATLAB 中做逐步回归分析得到结果如图 3、图 4 所示。

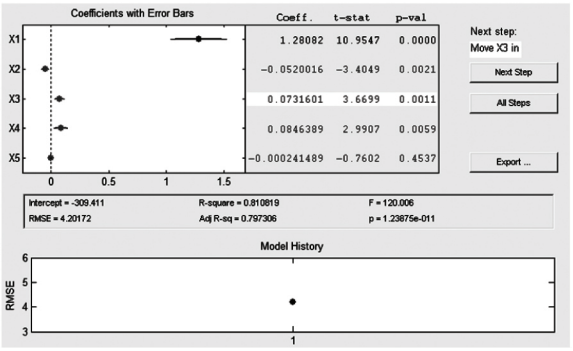


图 3 一步回归分析

一步回归分析可以得出回归方程:

$$y = -309.441 + 1.280\ 82x_1 \quad (1)$$

在一步回归方程(1)中录用到变量 x_1,回归方程的常数项即为截距 $intercept = -309.441$。

模型评估参数分别为:

修正前的 $R^2 = 0.810\ 819$,修正后的 R^2 值 $R_\alpha^2 = 0.797\ 306$,与显著性概率相关的 p 值 $= 1.238\ 75 \times 10^{-11} < 0.05$,F_检验值 = 120.006,残差均方 RMSE = 4.201 72。

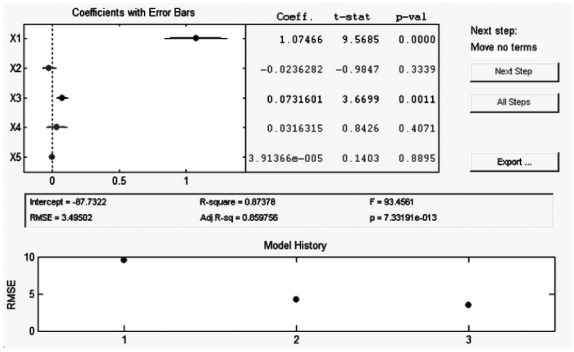


图 4 多步回归分析

最终回归分析可以得到回归方程:

$$y = -87.732\ 2 + 1.074\ 66x_1 + 0.073\ 160\ 1x_3 \quad (2)$$

在最终回归方程(2)中用到变量 x_1 和 x_3,回归方程的常数项为截距 $intercept = -87.732\ 2$。

模型评估参数分别为:

修正前的 $R^2 = 0.873\ 78$,修正后的 R^2 值 $R_\alpha^2 = 0.859\ 756$,与显著性概率相关的 p 值 $= 7.331\ 91 \times 10^{-13} < 0.05$,F_检验值 = 93.456 1,残差均方 RMSE = 3.495 02(这个值越小越好)。以上指标值在统计分析中均满足要求,说明最终的回归效果较为理想。

4 结 论

带式焙烧机焙烧温度各个参量之间相互关联、互为影响、复杂多变。本文以包钢 624 m^2D-L 型带式焙烧机焙烧温度为研究对象,通过 SPSS 的相关性分析和 MATLAB 的回归分析,结合相关数据,得出对焙烧温度产生重大影响的因子是 14#烟罩温度和 14#风箱温度。此结果在对焙烧数据的分析中,既可以消除其他无关参量的干扰,又可以提高工作效率,而且可为带式焙烧机焙烧温度的优化控制打下坚实的理论基础。该方法也可以推广到具备焙烧温度检测的小型带式焙烧机。

(下转第 36 页)

中国知网 https://www.cnki.net

表6 焙烧实验方案及结果

编号	铁矿粉配比/%	磨矿试样1/%	磨矿试样2/%	膨润土配比/%	抗压强度/N·P^{-1}
1	100			1.2	
2	70	30	– –	1.2	2 733
3	60	40	– –	1.2	2 725
4	70	30	– –	1.0	2 815
5	70	30	– –	0.8	2 742
6	70	– –	30	1.2	2 719
7	60	– –	40	1.2	2 751
8	70	– –	30	0.8	2 776

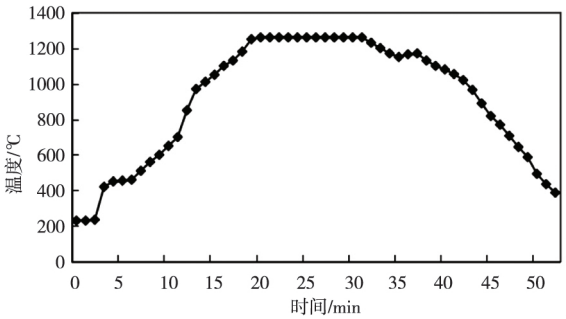


图2 焙烧温度曲线

从表6焙烧实验结果来看，两种混磨试验，在配加30%和40%的比例下，膨润土配比在0.8~1.2的水平下，焙烧球抗压强度均达到了2 700 N/P以上，能够满足球团的生产要求。

4 结 论

(1) 在实验室条件下，使用湿磨机对石灰石和铁矿粉的混合料进行细磨，细磨后，-74 μm含量达到95%以上，-45 μm含量也能够达到90%以上，可满足球团工艺的要求。

(2) 使用混磨料进行造球，生球的性能指标均有所改善。由于混磨料粒度较细，生球抗压强度提高较为明显，落下强度随着混磨料配比增加而增加。使用混磨料后，膨润土配比从基准的1.2%，可以适当降低到0.8%~1.0%，生球指标与基准值相差不大。

(3) 使用混磨料后，焙烧球的抗压强度达到2 700 N/P以上，能够满足生产的要求。

(4) 石灰石和铁矿粉混磨既可以得到粒度合适的碱性熔剂，又能够改善含铁料的成球性能，是一种具有优势处理碱性熔剂的方法。

参考文献

[1] 傅菊英，姜涛，朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1996.239.
[2] 王昌安，罗廉明. 铁精矿粒度组成对球团质量的影响[J]. 武汉化工学院学报，2005，27(2)：38.
[3] 彭志伟，李光辉，唐兆坤，等. 改善铁精矿成球性能的研究[J]. 钢铁，2008，43(12)：7.
[4] 范晓慧，袁晓丽，姜涛，等. 铁精矿粒度对球团强度的影响[J]. 中国有色金属学报，2006，11(11)：19.

(上接第32页)

参考文献

[1] 张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]. 北京：化学工业出版社，2015. 7.
[2] 夏雷阁，苏步新，李新宇，等. 焙烧温度与球团矿强度和还原性的关系[J]. 烧结球团，2014，39(1)：21-24+39.
[3] 利敏，王纪英，李祥. 我国带式焙烧机技术发展研究与实践[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集，北京：冶金工业出版社，2011：4314-4321.
[4] 夏雷阁，苏步新，李新宇，等. 首钢504 m^{2}带式焙烧机热工制度的试验研究[J]. 矿冶工程，2014，34(03)：69-75.
[5] 张卫华. 带式焙烧机球团技术在首钢京唐钢铁厂中的创新应用[N]. 世界金属导报，2010-03-23(008).
[6] 朱宏祥，温治，徐海，等. 空燃比寻优技术在加热炉中的应用[J]. 北京科技大学学报，2003，25(2)：139-142.
[7] 周卫. 带式焙烧机生产过程中预热焙烧优化控制[J]. 冶金自动化，2014，38(03)：72-75.
[8] 周晓君，阳春华，桂卫华. 全局优化视角下的有色冶金过程建模与控制[J]. 控制理论与应用，2015，32(9)：1158-1169.
[9] 冯国生，刘荣，吕振通，等. SPSS统计分析与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2014，2：76-83.
[10] M. Parvizimosaed，F. Farmani，H. Monsef，A. Rahimi-Kian. A multi-stage Smart Energy Management System under multiple uncertainties：A data mining approach [J]. Renewable Energy，2017，102.

中国知网 https://www.cnki.net