链算机—回转窑热工系统的控制模型研究

周仙霖[1,2]，胡 钺[1,2]，刘国防[3]，罗艳红[1,2]，蒋佳颖[1,2]，陈铁军[1,2]

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081；3. 山东钢铁集团日照有限公司 炼铁厂，山东 日照 2768003)

摘要：铁矿球团链算机—回转窑工艺热工系统具有控制对象复杂、调节过程长且滞后以及各热工参数之间相互耦合的特点，导致该工艺在调节和控制时无法有效推测出各热工参数的变化趋势，造成调节无法达到预期。针对这些问题，本文基于某钢铁企业球团工序的生产数据，采用数据挖掘及相关性分析的方法，深入研究链算机—回转窑热风循环系统之间的关联性，并构建相关数学模型。结果表明：回转窑窑头烧嘴参数(喷气量、助燃流量)与窑头、窑尾温度以及链算机—回转窑热风循环系统中各热工参数之间的显著性均为 0.000，同时相关系数基本上都在 0.900 以上，而且各参数之间所构建的回归模型误差较小，经现场生产验证，其中回转窑窑尾、窑头温度与回转窑高炉煤气用量 X_1、焦炉煤气用量 X_2、助燃流量 X_3 构建的回归方程 $K_5=858.534+0.027X_1+0.030X_2+0.027X_3$ 和 $K_6=337.735+0.047X_1+0.068X_2+0.124X_3$ 的误差仅为 4.9% 和 2.4%，可作为现场热工参数的预测模型。

关键词：链算机—回转窑；热工系统；参数控制；回归模型

中图分类号：TF046.6；TP391.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2023)01－0067－08

doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.010

Research on control model of grate-rotary kiln thermal system

ZHOU Xianlin[1,2], HU Yue[1,2], LIU Guofang[3], LUO Yanhong[1,2], JIANG Jiaying[1,2], CHEN Tiejun[1,2]

(1. *School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 3. *Iron Works, Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao* 2768003, *Hubei, China*)

Abstract: The thermal system of iron ore pellet grate-rotary kiln process characterizes complex control object, long and lagging adjustment process and mutual coupling of various thermal parameters, as a result, the process cannot effectively predict the changing trend of each thermal parameter during regulation and control process, while the adjustment does not meet expectations. In order to solve these problems, based on the production data of pelletizing process in an iron and steel enterprise, the methods of data mining and correlation analysis are used to deeply study the correlation between grate-rotary kiln hot air circulation system, and the relevant mathematical model is constructed. The results show that the significance between the burner parameters of the rotary kiln head (jet volume, combustion-supporting flow) and the temperature of the kiln head and kiln tail and the thermal parameters of the grate-rotary kiln hot air circulation system are all 0.000, the correlation coefficient is basically above 0.900, and the regression model constructed between the parameters has a small error, which has been verified by on-site production, among which the error of the regression equation $K_5=858.534+0.027X_1+0.030X_2+0.027X_3$ and $K_6=337.735+0.047X_1+0.068X_2+0.124X_3$ set up among the the temperature of the kiln head and kiln tail and blast furnace gas

收稿日期：2022－10－27；**修回日期**：2022－11－21

基金项目：湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022014)。

作者简介：周仙霖(1986—)，男，讲师，从事烧结球团方面的研究。

通信作者：胡 钺(1998—)，男，硕士研究生，从事烧结球团方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

consumption X_1, Coke oven gas consumption X_2 and combustion-supporting flow X_3 are only 4.9% and 2.4%, which can be used as a prediction model for field thermal parameters.

Key words: grate-rotary kiln; thermal system; parameter control; regression model

链算机—回转窑工艺在我国球团生产领域的占比较大，其生产过程是在链算机上进行干燥、预热后，进入回转窑内焙烧，然后在环冷机上进行冷却。该工艺可以看作是一个不断流动的串联生产结构，工艺流程在生产过程中的温度空间分布复杂且相互影响，若生球未干燥好，则预热球强度低，粉末率提高，在回转窑内易结圈，而结圈不利于生产，因此其热工制度的控制与调节是整个球团生产过程最重要的环节之一[1]。

目前，大多数生产厂家对流程装置还处于手动操作状态，需要工人凭借经验去操作，具有很大的不确定性，这种状况使得成品球的产、质量完全依赖于球团工艺段的状态[2]。因此，实现链算机—回转窑热工参数调节的可视化，及时有效地调节链算机—回转窑热工系统中各个参数以适应原料的变化非常重要。李洋等[3-5]采用数学建模与数值模拟或多场耦合数值模拟的方法分别对链算机干燥及预热过程的温度场传热传质规律进行了研究，但该方法没有结合回转窑、环冷机温度场进行研究，其实际生产的指导意义有限。孙红星等[6]对链算机—回转窑温度场的机理分析，提出了一种有限差分法求解温度场优化控制模型的方法，实现了多参数变动下温度场的优化控制，但其在一定程度上偏向理论化而缺少相应的实践基础。范晓慧等[7]采用数据挖掘技术结合专家经验知识，建立链算机—回转窑的过程模拟模型和物热平衡模型，并开发出链算机—回转窑氧化球团生产优化专家系统用于指导生产，但是该系统只是根据不同的原料性质来设定最佳的工艺参数，没有考虑链算机—回转窑状态参数重新设定时各工艺之间相互影响而产生的波动。

本文以某钢铁企业提供的球团工序中链算机—回转窑热工系统的大量数据为基础，运用数据分析软件对链算机—回转窑热风循环系统进行分析，依据热工参数之间的相关性判断回归方程是否具有统计学意义，然后根据回归方程得到链算机—回转窑热工系统调节时各热工参数之间的变化规律，从而实现链算机—回转窑各热工参数调节后数值变化的可视化，同时为钢铁企业球团生产过程中链算机—回转窑部分工艺参数的运行优化提供指导。

1 研究方案

链算机—回转窑热风循环系统的风流路径如图 1 所示。

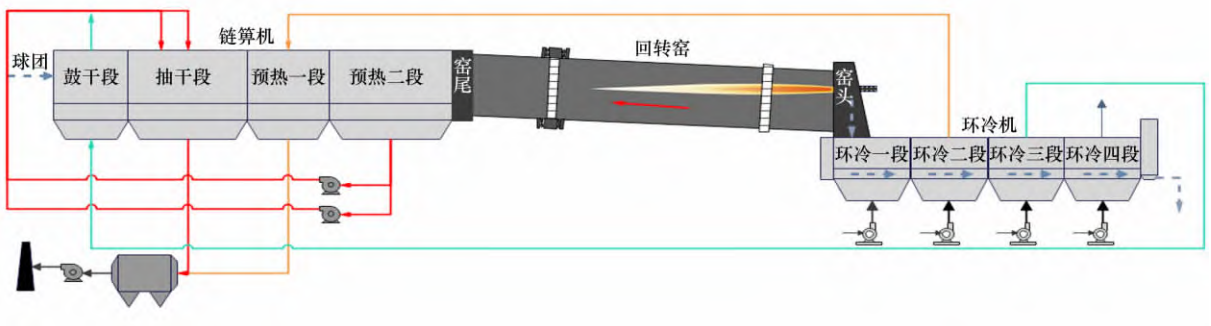


图 1 主机热风循环路径

Fig. 1 Hot air circulation path of the host

结合图 1，三大主机热工参数调整时的变化规律可以理解：燃料用量的变化会影响回转窑窑内温度，当回转窑窑内的热风输送到链算机预热二段时，回转窑窑内焙烧球温度也会随之发生变化，而焙烧球温度的变化会影响环冷机的运行状况，为了保证成品球的最终温度达

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

到标准，就需要改变环冷机的鼓风风量，因此改变了环冷机烟气的温度，所以回转窑窑内温度的变化会对链算机预热二段烟罩温度和环冷机一段的烟气温度产生影响。同理可知，环冷机下一段的烟气温度会受到上一段烟气温度变化的影响，其中链算机预热二段、环冷机二段和环冷机三段的废气热风又会分别输送到链算机抽风干燥段、预热一段和鼓风干燥段。因此，三大主机热风循环路径揭示了热工参数调整的变化方式。

本文依据上述链算机—回转窑热风循环系统中各参数之间的对应关系，采用数据分析软件对链算机—回转窑部分热工参数的数据进行统计分析，其具体的流程如图 2 所示。

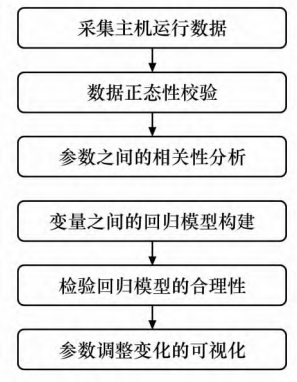


图 2　数据处理分析流程

Fig. 2　Data processing and analysis process

由图 2 可知：首先，采集相关数据(本文数据在某球团厂生产过程正常的情况下采集，分别在链算机、回转窑和环冷机各段的烟罩和风箱处设有温度采样点，同时在中控室采集实时的燃料量，最后每隔 2 min 采集一次)；然后，将数据预处理，检验它们的正态性，正态性检验是判断样本所来自总体是否服从正态性分布的常用统计分析方法，而总体服从正态分布是进行回归分析方法的基础和前提[8]，对于大量且连续性定量数据的正态性检验，在基本统计分析的探索过程中本文使用的检验方法有 2 种：即 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Shapiro-Wilk 检验；经过正态性检验后，分析变量的相关性，从而判断变量能否构建数学模型，相关性分析是对两个或两个以上可能具有相关性的变量元素进行分析，由此判断两个变量是否具有相关性及它们之间的相关密切程度。皮尔逊相关系数就是衡量相关程度的数值，定义为这两个变量的协方差与标准差积的商，用 ρ_{XY} 表示，其值范围 $[-1,1]$，当 ρ_{XY} 的绝对值越接近于 1，表明两个变量的相关程度就越高。显著性是判断变量之间是否相关的依据，由方差分析得到相应的概率值，用 Sig 值表示，其值越小表明错误率越低，小于 0.050 的错误率是可以接受的[9]；最后，采用多元回归分析法构建工艺参数之间的数学模型，明确各参数之间的变化规律，多元线性回归分析可以揭示因变量和解释变量之间的关系中哪些变量是重要的，通过将模型的决定系数与预先设定的显著性水平进行比较，选择重要的输入变量[10-11]，重复这个回归过程，以确保最终的解释变量集最优。

多元线性回归分析法的数学模型见式(1)[12]：

$$y=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\varepsilon \tag{1}$$

式中：β_0 表示截距；β_1、β_2、β_3 表示偏回归系数；ε 表示残差。

多元线性回归方程效果的检验可通过观察理论参数和观测参数间的差异来判断所建立的多元线性回归分析方程的合理性。

2　结果与讨论

2.1　正态性检验

利用统计分析软件对数据进行正态性检验，结果如表 1 所示。

数据样本中高炉煤气量、焦炉煤气量和助燃风机流量是回转窑内加热装置的消耗量，由于数据样本的数量 $n>2\ 000$，则计算结果以 Kolmogorov-Smirnov 的检验为准，其显著性值越大，越能说明数据服从正态分布，一般以 0.050 作为界限[13]。

由表 1 中 Kolmogorov-Smirnov 计算的结果可知：在样本量较大且数据稳定的情况下，回转窑内高炉煤气量、焦炉煤气量和助燃风流量的显著性都较高，均达到了 0.200，同时链算机、回转窑和环冷机三大主机各段温度的显著性也呈高度显著，其中链算机抽干段烟罩温度和环

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 数据的正态性检验

Table 1 Normality test of data

项目	代表参数	Kolmogorov-Smirnov[a]		
		统计	自由度	显著性
高炉煤气量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	X_1	0.072	4 000	0.200*
焦炉煤气量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	X_2	0.074	4 000	0.200*
助燃风机流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	X_3	0.039	4 000	0.200*
链算机鼓干段风箱温度/℃	G_1	0.037	4 000	0.200*
链算机抽干段烟罩温度/℃	G_2	0.144	4 000	0.150
链算机预热一段烟罩温度/℃	G_3	0.038	4 000	0.200*
链算机预热二段烟罩温度/℃	G_4	0.041	4 000	0.200*
回转窑窑尾温度/℃	K_5	0.042	4 000	0.200*
回转窑窑头温度/℃	K_6	0.027	4 000	0.200*
环冷一段烟气温度/℃	R_7	0.030	4 000	0.200*
环冷二段烟气温度/℃	R_8	0.042	4 000	0.200*
环冷三段烟气温度/℃	R_9	0.142	4 000	0.120

注:* 代表真显著性的下限; a 代表里利式显著性修正。

冷机三段烟气温度的显著性最小为0.150和0.120，但是显著性依然大于0.050。因此，所有采集的工艺参数数据均符合正态分布，具有较好的统计学意义，能够用于回归模型的构建。

2.2 相关性分析

根据链算机—回转窑热风循环系统的风流路径，运用分析软件对热工参数数据进行相关性分析，结果如表2所示。

由表2可知: 三大主机热工参数之间的实际显著性水平均小于理论显著性水平0.010，表明皮尔逊相关系数不由偶然因素造成[14]，因此，三大主机热工参数样本之间的耦合关系很强。但结合实际工程生产对各参数的相关系数进行分析发现，只有燃料参数与回转窑窑头和窑尾温度、回转窑窑头温度与环冷一段烟气温度、回转窑窑尾温度与链算机预热二段烟罩温度、链算机预热二段烟罩段与抽风干燥段烟罩温度、环冷三段烟气温度与链算机鼓风干燥段风箱温度、链算机预热一段烟罩温度与环冷机二段烟气温度等三大主机热风循环系统中对应参数之间的皮尔逊相关系数最好，且基本都在0.900以上。

表2 各变量间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among variables

项目	指标	K_6	K_5	G_2	R_8	G_1
X_1	皮尔逊相关系数	0.937**	0.929**	0.736**	0.793**	0.637**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
X_2	皮尔逊相关系数	0.930**	0.929**	0.806**	0.840**	0.699**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
X_3	皮尔逊相关系数	0.976**	0.952**	0.848**	0.835**	0.645**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
G_4	皮尔逊相关系数	0.904**	0.963**	0.989**	0.849**	0.714**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R_7	皮尔逊相关系数	0.953**	0.867**	0.840**	1.000**	0.718**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
G_3	皮尔逊相关系数	0.875**	0.893**	0.912**	0.969**	0.810**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
R_9	皮尔逊相关系数	0.673**	0.679**	0.635**	0.729**	0.971**
	Sig 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **代表显著性小于0.01级别，相关性高度显著; * 代表显著性小于0.05级别，相关性显著。

因此，三大主机热风循环系统中变量之间相互影响的定量关系最强，且最能代表链算机—回转窑热工参数调整时参数之间的影响规律。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3　多元线性回归分析

根据热风循环路径中热工参数之间的影响关系可知，燃料量主要对回转窑窑内温度造成影响，所以以回转窑窑尾温度 K_5 和窑头温度 K_6 为因变量，高炉煤气量 X_1、焦炉煤气量 X_2 和助燃风机流量 X_3 为影响因子分别进行多元回归分析，结果如表 3 所示。由表 3 可知:

(1) 回归方程的显著性检验: 两个回归方程对应的 Sig 值都为 0.000 < 0.050，这说明从整体上判定回归方程是显著有效的。

(2) 回归方程 K_5 和 K_6 模型的相关系数 R^2 分别为 0.975 和 0.988，这说明逐步回归方程的因变量(回转窑窑尾温度和窑头温度) 能被自变量解释的占比为 97.5% 和 98.8%，而且回归模型的相关系数 R^2 越接近 1，说明回归方程的拟合程度越高。

(3) 模型当中高炉煤气量 X_1、焦炉煤气量 X_2 和助燃风机流量 X_3 各因子的犯错概率都小于 0.050，均为显著性因子，所以计算得到最优的回归方程如式(2) 和式(3) 所示。

$$K_5 = 858.534 + 0.027X_1 + 0.030X_2 + 0.027X_3 \quad (2)$$

$$K_6 = 337.735 + 0.047X_1 + 0.068X_2 + 0.124X_3 \quad (3)$$

式中: K_5 为回转窑窑尾温度，℃; K_6 为回转窑窑头温度，℃; X_1 为高炉煤气量，m^3/h; X_2 为焦炉煤气量，m^3/h; X_3 为助燃风机流量，m^3/h。

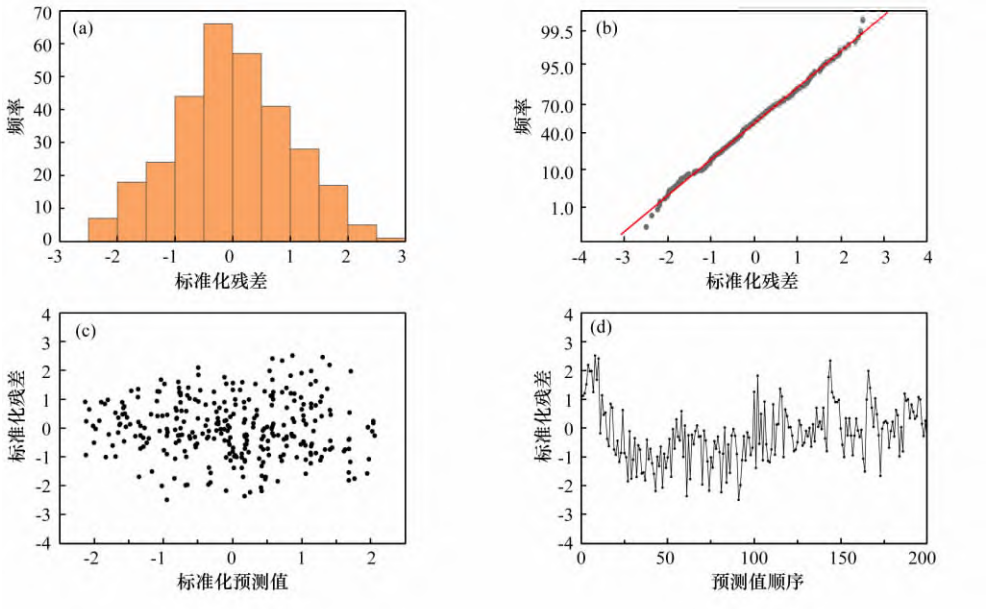
表 3　多元线性回归模型的统计量

Table 3　Statistics of multiple linear regression models

模型	变量	B	标准误差	Sig 值	相关系数 R^2
K_5	常量	858.534	0.303	0.000	0.975
	X_1	0.027	0.000	0.000	
	X_2	0.030	0.000	0.000	
	X_3	0.027	0.000	0.000	
K_6	常量	337.735	0.612	0.000	0.988
	X_1	0.047	0.000	0.000	
	X_2	0.068	0.001	0.000	
	X_3	0.124	0.000	0.000	

注: B 为回归方程的相关系数; R^2 为回归方程拟合度。

(4) 残差分析如图 3、4 所示，由图 3、4 可知: 残差的正态概率图正常，数据点基本在一条直线上，可认为残差服从正态分布; 同时，残差的正态分布图也显示了残差的正态性; 残

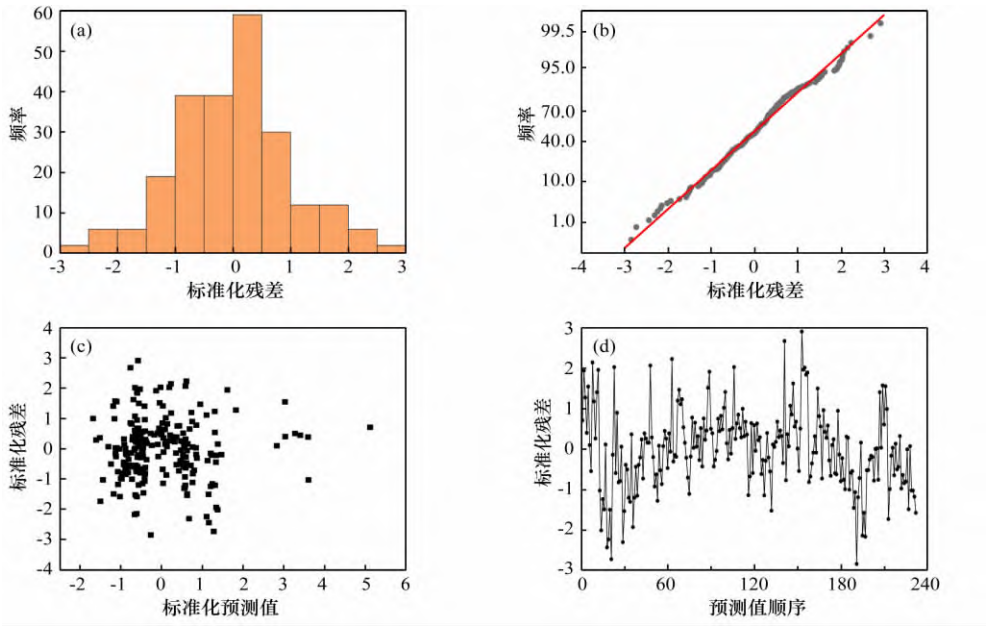


(a) 正态直方图; (b) 正态概率图; (c) 拟合图; (d) 顺序图

图 3　回转窑窑尾温度的回归残差值

Fig. 3　Regression residuals of temperature at the tail of rotary kiln

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 正态直方图; (b) 正态概率图; (c) 拟合图; (d) 顺序图

图 4 回转窑窑头温度的回归残差值

Fig. 4 Regression residuals of temperature at the head of rotary kiln

差与数据顺序图正常，对于标准化预测值残差顺序随机波动，彼此间独立；残差与标准化预测值图中，未见“漏斗型”、“喇叭型”分布，图形正常，表明线性模型可以接受[15]。

文中依次以回转窑窑尾温度和窑头温度等热工参数为自变量，然后采用相同的回归方法分别对后续热风循环路径中对应变量之间的模型进行分析，发现如下规律。

1) 经过线性回归分析，发现自变量回转窑窑尾温度(K_5)与因变量链算机预热二段烟罩温度 G_4 有显著线性关系。回归方程的相关系数 R^2 为 0.963，且显著性都小于 0.010，则回归方程高度显著有效，计算得到回归方程式见式(4)。

$$G_4 = -1\,846.105 + 2.239K_5 \quad (4)$$

式中：G_4 为链算机预热二段烟罩温度，℃；K_5 为回转窑窑尾温度，℃。

2) 对自变量链算机预热二段烟罩温度 G_4 与因变量链算机抽干段烟罩温度 G_2 进行线性回归分析。回归方程的相关系数 R^2 为 0.989，且显著性都小于 0.010，则回归方程高度显著有效，计算得到回归方程见式(5)。

$$G_2 = 23.562 + 0.315G_4 \quad (5)$$

式中：G_2 为链算机抽干段烟罩温度，℃；G_4 为链算机预热二段烟罩温度，℃。

3) 依次对剩余变量组进行线性回归分析，计算结果见表 4 所示。由表 4 可知，这些回归方程的相关系数 R^2 基本都在 0.900 以上，且显著性都小于 0.010，则回归方程高度显著有效。

表 4 线性回归模型

Table 4 Linear regression model

模型	自变量/℃	回归方程	Sig 值	R^2
R_7	环冷机一段烟气温度	$R_7 = -329.938 + 1.036K_6$	0.000	0.953
R_8	环冷机二段烟气温度	$R_8 = 5.149 \times 10^{-5} + 0.707R_7$	0.000	1.000
R_9	环冷机三段烟气温度	$R_9 = 10.769 + 0.255R_8$	0.000	0.729
G_3	链算机预热一段烟罩温度	$G_3 = 98.343 + 0.775R_8$	0.000	0.969
G_1	链算机鼓干段风箱温度	$G_1 = 18.285 + 0.715R_9$	0.000	0.971

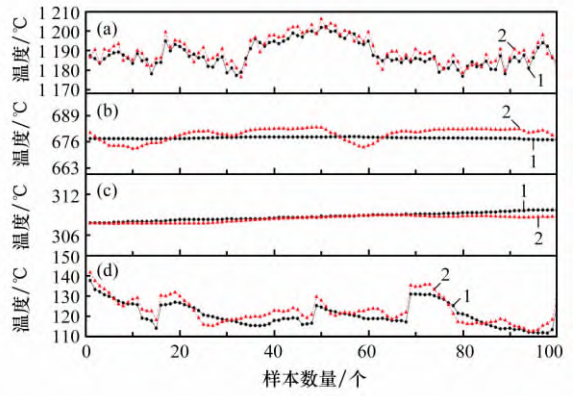
2.4 控制模型应用分析

本文将上述回归模型用于指导现场工艺的调节控制，然后结合现场近期的生产结果检验各回归方程的合理性。按照时间顺序随机采集

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生产中各段热工参数样本 100 个，然后通过模型 G_1、G_2、G_3、G_4、K_5、K_6、R_7、R_8、R_9 分别计算出三大主机各段热工参数的预测值进行对照检验，所得链算机、回转窑和环冷机三大主机热工参数的仿真结果分别如图 5 ~7 所示。

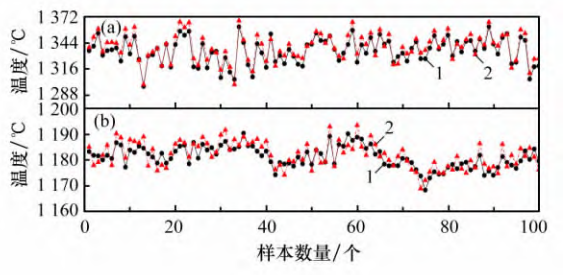
由图 5 ~7 可知：链算机、回转窑和环冷机各段的实测温度与回归模型计算出的预测温度之间存在的误差较小，基本都在 10% 以下，其中链算机鼓干段风箱温度、抽干段烟罩温度、预热一段和预热二段烟罩温度的预测值误差分别为 5.7%、2.2%、6.1% 和 7.3%；回转窑窑头温度和回转窑窑尾温度的预测值误差分别为 4.9% 和 2.4%；环冷机一段、二段和三段烟气温度的预测值误差分别为 9.2%、0.1% 和 14.7%。除环冷三段烟气温度的回归模型误差较大外，其它回归模型都拥有较高的命中率，



(a)　预热二段烟罩温度；(b)　预热一段烟罩温度；
(c)　抽风烟罩温度；(d)　鼓风烟罩温度

图 5　链算机各段回归模型的仿真结果

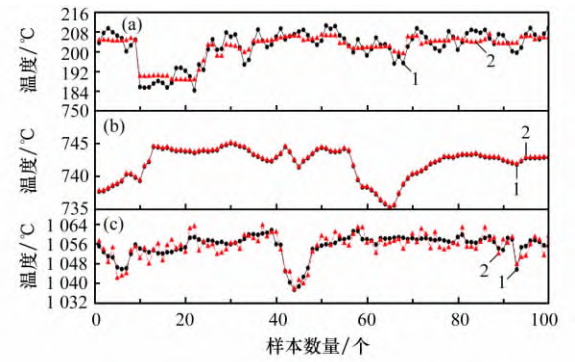
Fig. 5　Simulation results of the regression model for each section of grate



(a)　窑头温度；(b)　窑尾温度

图 6　回转窑各段回归模型的仿真结果

Fig. 6　Simulation results of regression model for each section of rotary kiln



(a)　环冷机三段烟气温度；(b)　环冷机二段烟气温度；
(c)　环冷机一段烟气温度

图 7　环冷机各段回归模型的仿真结果

Fig. 7　Simulation results of regression model for each section of ring cooler

能够满足工业上的生产要求。

已知现场回转窑内添加的焦炉煤气流量、高炉煤气流量和助燃风流量的配比为 4∶3∶5，在回归模型的指导下调节热工参数，如果要使回转窑窑尾温度从 1 100 ℃调整到 1 150 ℃，就需要把焦炉煤气流量、高炉煤气流量和助燃风流量分别提高 20.1%、15.0% 和 25.1%，同时还可以预测出回转窑窑头温度会上升 162 ℃左右，而链算机预热二段烟罩温度和抽干段烟罩温度大约会上升 112 ℃和 35 ℃，环冷机一段、二段和三段的烟气温度也会分别上升 168 ℃、119 ℃和 30 ℃左右，其中环冷机二段和三段烟气温度的变化又会造成链算机预热一段烟罩和鼓干段风箱温度分别升高 92 ℃和 21 ℃。

3　结　论

(1)　链算机—回转窑—环冷机热风循环系统中对应变量之间的相关性都为高度显著(Sig 值 <0.010)，各皮尔逊相关系数也非常接近 1.000，因此可以建立误差较小的线性回归模型。

(2)　采用多元线性回归方法对变量之间的关系进行统计与分析，建立了链算机—回转窑—环冷机各热工参数的关系函数，而且经实际工艺生产的检验，链算机、回转窑和环冷机各段的实测温度与回归模型计算出的预测温度之间存在的误差基本都在 10% 以下，能够满足

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现场工业生产的要求。

(3) 在回归模型的指导下能够实现热工参数调整的可视化以及热工参数变化过程的透明化，维持链算机—回转窑—环冷机热工系统调整时参数的稳定性，并保证球团生产的稳定。在正常生产过程中，如果要将回转窑窑尾温度从1 100 ℃提升到1 150 ℃，经模型计算，焦炉煤气流量、高炉煤气流量和助燃风流量需要的提升值分别为20.1%、15.0%和25.1%。

参考文献:

[1] 闫素杰,翟明,王哲. 球团矿焙烧过程温度智能化控制技术[J]. 山东冶金,2022,44(1):62-65.
YAN Sujie, ZHAI Ming, WANG Zhe. Intelligent temperature control technology of pelletizing roasting process [J]. Shandong Metallurgy,222,44(1):62-65.

[2] FAN X H, WANG Y, CHEN X L. Mathematical models and expert system for grate-kiln process of iron ore oxide pellet production. Part Ⅱ: Rotary kiln process control [J]. Journal of Central South University,2012,19(6):1724-1727.

[3] 李洋,李伯全,张西良,等. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):33-39.
LI Yang, LI Boquan, ZHANG Xiliang, et al. Study on mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):33-39.

[4] 潘姝静,宋彦坡,彭小奇,等. 链算机球团矿干燥过程多场耦合数值模拟[J]. 钢铁研究,2012,40(6):11-13;15;26.
PAN Shujing, SONG Yanpo, PENG Xiaoqi, et al. Multi-field coupling numerical simulation of grate pellet drying process [J]. Iron and steel research,2012,40(6):11-13;15;26.

[5] 王文煜,刘星安,赵魏,等. 球团矿在链算机中预热过程的数值模拟[J]. 现代制造技术与装备,2016(7):91-92;94.
WANG Wenyu, LIU Xingan, ZHAO Wei, et al. Numerical simulation of preheating process of pellets in grate [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment,2016(7):91-92;94.

[6] 孙红星,刘东昆,高宝威,等. 关于链算机焙烧温度场优化控制仿真研究[J]. 计算机仿真,2016,33(9):350-353;384.
SUN Hongxing, LIU Dongkun, GAO Baowei, et al. Simulation study on optimal control of grate roasting temperature field [J]. Computer simulation,2016,33(9):350-353;384.

[7] 范晓慧,舒方华,杨桂明,等. 武钢鄂州球团厂链算机—回转窑氧化球团生产优化专家系统的开发及应用[J]. 烧结球团,2014,39(2):18-21;26.
FAN Xiaohui, SHU Fanghua, YANG Guiming, et al. Development and application of an expert system for optimizing the production of oxidized pellets from chain grate machine to rotary kiln in Ezhou pellet plant of WISCO [J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(2):18-21;26.

[8] GAO Q J, ZHANG Y Y, JIANG X, et al. Prediction Model of Iron Ore Pellet Ambien-t Strength and Sensitivity Analysis on the Influence Factors [J]. Metals,2018,8(8):593-593.

[9] 崔桂梅,徐朝伟,陈智辉. 基于主成分分析法的球团矿质量综合评价[J]. 烧结球团,2017,42(5):29-34,50.
CUI Guimei, XU Zhaowei, CHEN Zhihui. Comprehensive evaluation of pellet quality based on principal component analysis [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(5):29-34,50.

[10] 张静静,马林转,张运澥,等. 基于逐步回归法对钢铁企业球团工序二氧化硫的影响因素分析[J]. 云南民族大学学报(自然科学版):2023(3):1-7.
ZHANG Jingjing, MA Lingzhuan, ZHANG Yunhan, et al. Analysis of Influencing factors of sulfur dioxide in pelletizing process of Iron and Steel Enterprises based on Stepwise regression method [J]. Journal of Yunnan Minzu University(Natural Science Edition):2023(3):1-7.

[11] LEE J, KIM J, WANG H, et al. Modeling of slag foaming height of electric arc furnace usin-g stepwise regression analysis [J]. Metallurgical Research&Technology,2020,117(1):114-119.

[12] 陈金鸿,张柳叶,贾学勇,等. 基于遗传算法建立球团矿配料寻优模型的研究[J]. 烧结球团,2019,44(5):43-49.
CHEN Jinhon, ZHANG Liuye, JIA Xueyong, et al. Study on the optimization model of pelletizing based on genetic algorithm [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(5):43-49.

[13] 罗文海,王玖,韩春蕾,等. 基于SPSS的正态性检验方法的选择[J]. 中国医院统计,2015(1):48-51.
LUO Wenhai, WANG Jiu, HAN Chunlei, et al. Selection of normality test method based on SPSS [J]. Chinese Hospital Statistics,2015(1):48-51.

[14] AMANI H, ALAMDARI E K, EBRAHIM H A, et al. Mathematical modeling of thermal behavior of single iron ore pellet during heat hardening oxidation [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2021,147(3):2293-2303.

[15] 武轶,李帮平,张晓萍. 球团质量与膨润土理化性能的关系研究[C]//2021年全国烧结球团技术交流年会论文集. 长沙: 烧结球团信息网,2021: 168-172.
WU Yi, LI Bangping, ZHANG Xiaoping. Study on the relationship between pellet quality and physical and chemical properties of bentonite [C]//Proceedings of 2021 National Sinter Pelletizing Technology Exchange Annual Conference. Changsha: Sintering and Pelletizing,2021: 168-172.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net