

基于改进的灰色理论预测铅锌烧结过程综合透气性^①

丁 雷^{②*} 吴 敏^{③*} 余锦华^{***} 段 平^{*}

(* 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

(** 吉首大学物理科学与信息工程学院 吉首 416000)

(*** 东京工科大学计算机科学学院 东京 192-0982)

摘 要 针对铅锌烧结过程中影响烧结综合透气性的因素具有不确定性以及目前已知的预测模型存在建模过程复杂的特点,利用改进的灰色理论来建立其预测模型。首先,考虑到灰色理论能在一定程度上降低不确定性带来的影响以及建模过程简单,建立了基于灰色理论的综合透气性预测模型。接着,针对建模数据序列的单调性改变后传统灰色理论不能及时跟踪数据序列变化的情况,根据建模数据序列单调性改变后的数据个数以及结合具体的单调性改变情况,提出了相应的修正公式,对传统灰色理论的预测结果进行适当的修正。实验结果表明,所提出的改进灰色理论比传统的灰色理论能在一定程度上提高预测精度。

关键词 铅锌烧结过程, 综合透气性, 不确定性, 改进的灰色理论

0 引 言

铅锌烧结过程中,料层透气性决定了烧结过程的顺利程度和烧结矿的产量、质量。如果透气性不好,则烧结料燃烧不够充分,容易产生生料层,使烧结块的含硫量百分比高,导致鼓风炉熔炼结瘤;反之,透气性太好,会使烧结料过分燃烧,脱硫过于干净,缺少必要的熔融或凝固的成分。料层透气性关系模型的建立传统上是基于机理分析方法,如文献[1]用气体动力学的理论来分析料层透气性及工艺参数的关系,文献[2]基于物料平衡原理建立了透气性的数学模型。基于机理分析的关系模型是在严格的实验环境下建立的,而在实际烧结生产过程中机理模型所需要的很多物理量是无法准确测量或无法测量的。文献[3]指出基于机理分析的方法存在很大的局限性,需要在烧结理论研究和实践研究中寻找结合点。采用人工智能的方法建立透气性的关系模型已经成为新的研究方向,如文献[4-8]基于智能方法建立了透气性关系模型。但目前已知的文献都没有涉及到如何处理不确定性问题,文献[9]提出了基于模糊聚类方法(T-S)的透气性预测模型,在一定程度上降低了不确定性带来的影响,但其建模过

程复杂。目前已知的基于智能方法的关系模型都是在对大量的历史样本分析后建立的,但由于生产设备不断更新、生产工艺不断改进,且所提出的建模方法都是针对具体的烧结情况而言,因此,其提出的方法很难在实际生产中得到推广应用。

灰色理论着重外延明确,内涵不明的对象,因此利用灰色理论来建立综合透气性的预测模型,能在一定程度上降低那些不确定性因素所带来的影响^[10]。灰色理论建模过程简单、适应性强,已经被广泛应用到各种领域的预测中^[11-17]。由于综合透气性指数序列单调性发生改变的情况较多,传统的灰色理论对于建模数据序列的单调性发生改变后的预测误差较大,因此有必要对其进行适当的修正。本文首先建立了基于灰色理论的综合透气性预测模型,然后根据建模数据序列单调性发生改变后的数据个数,结合数据序列单调性的改变情况来对传统灰色理论的预测结果进行适当修正,最后给出了结论。

1 烧结过程机理分析

物料首先经过每 8h 一次的堆式配料,初步获得

① 863 计划(2008AA04Z128)和国家杰出青年科学基金(60425310)资助项目。

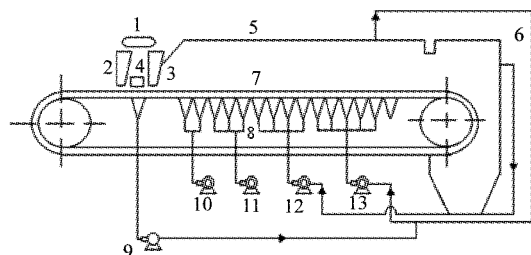
② 男,1972 年生,博士生;研究方向:过程控制,智能控制和软件工程。

③ 通讯作者, E-mail: min@csu.edu.cn

(收稿日期:2008-09-09)

具有合适化学成分的精矿,此时主要考虑的是含铅量、含锌量和二氧化硅含量等的配比。接着每 3min 通过皮带秤进行第二次配料工作,调整精矿流量和返粉流量的比例来获得合适含硫量的混合料,并下发其它的控制量,如水分、石灰石熔剂、台车速度、点火温度、风机风量等。最后粉状混合料经过混料圆筒和制粒圆筒成为具有合适混合料水分的混合料料球。

鼓风烧结过程通常在 DL(Dwight-Liyod)型移动带式烧结机中进行,如图 1 所示。混合料料球被送入点火仓和主料仓,点火仓的混合料球被分布到烧结机的台车上形成约 3cm 厚的薄层矿料,称为点火层。通过调节煤气流量控制合适的点火温度,对点火层混合料进行点火。点火后的混合料跟随台车一起移动,在烧结机机头后部主料仓再布上混合料,形成约 30-40cm 厚的总料层。混合料随台车一起移动,经过干燥、加热、物料的氧化脱硫反应、烧结 4 个过程,混合料料球烧结成为具有一定结构的烧结块料,冷却后并在烧结机尾产出。不合格的烧结矿经过两级破碎后重新以返粉形式进入烧结机。



1. 梭式布料机 2. 点火仓 3. 主料仓 4. 点火炉 5. 烟罩
6. 尾部烟罩 7. 台车 8. 风箱 9. 点火吸风机 10. 1#新鲜风机
11. 2#新鲜风机 12. 2#返烟风机 13. 1#返烟风机

图 1 DL(Dwight-Liyod)型烧结机

炉料的透气性,是指在烧结机鼓风风箱上,每平方米炉篦面积每秒钟通过的气体体积(m^3)或气体速度(m/s),或者说以单位炉篦面积上一定厚度的料层,在单位时间内通过一定量空气体积时料层的阻力来衡量。目前单个风箱的计算公式采用 Voice 公式(沃伊斯公式)^[18],如式

$$Pe_i = \frac{Q_i}{F_i} \cdot \left(\frac{h^n}{\Delta P_i^m} \right) \quad (1)$$

所示。式中 Q_i 为第 i 个风箱上通过料层的气体体积(m^3/min), F_i 为第 i 个风箱的抽风面积(m^2), h 为料层厚度(mm), 料层厚度一般保持恒定, 取为 $h = 350mm$, ΔP_i 为第 i 个风箱在冷态下料层阻力损失(Pa), n, m 为气体特性常数, 取 $n = 0.985$, $m =$

0.537。

在实际烧结过程中 10#-15# 风箱没有支管流量检测值,无法计算其对应的透气性指数。1# 和 2# 风箱对应着 1# 新鲜风机,主要进行物料的干燥和加热,对整体透气性影响较小;3#-5# 风箱对应着 2# 新鲜风机,主要进行物料的氧化脱硫反应,是烧结过程最关键的环节,对整体透气性影响最大;6#-9# 风箱对应着 2# 返烟风机,主要进行物料的氧化脱硫和烧结,对整体透气性有较大的影响。因此,1#-9# 风箱的透气性指数基本上能反映出烧结过程的整体透气性,综合工艺机理分析和专家经验,得出如下综合透气性计算公式:

$$Pe = 0.075Pe_1 + 0.075Pe_2 + \sum_{i=3}^5 0.15Pe_i + \sum_{i=6}^9 0.1Pe_i \quad (2)$$

由于烧结矿每 2h 检测 1 次,每 3min 添加 1 次的返粉中含硫百分比不能被及时检测出来,此外,很多影响综合透气性的重要参数如制粒炉料的粒级分布、焙烧反应速度等无法检测,因此目前所建立的预测模型均存在模型不确定性以及输入变量不确定性的问题。

2 基于灰色理论的综合透气性预测

将等时距获得的综合透气性指数数列 $g^{(0)} = \{g^{(0)}(1), g^{(0)}(2), \dots, g^{(0)}(n)\}$, 进行一次累加生成处理:

$$g^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k g^{(0)}(i) \quad (k = 1, \dots, n) \quad (3)$$

根据 $g^{(1)}(k)$ 的发展趋势,建立一阶微分方程

$$\frac{dg^{(1)}(t)}{dt} + a \cdot g^{(1)}(t) = u \quad (4)$$

式中 a 为发展系数,反映了预测值的发展趋势, u 为灰作用量。以矩阵表示,则有

$$Y = a \cdot X + u \cdot E \quad (5)$$

其中 $Y = [g^{(0)}(2), g^{(0)}(3), g^{(0)}(4), \dots, g^{(0)}(n)]^T$,

$$X = \begin{bmatrix} -0.5(g^{(1)}(1) + g^{(1)}(2)) & 1 \\ -0.5(g^{(1)}(2) + g^{(1)}(3)) & 1 \\ -0.5(g^{(1)}(3) + g^{(1)}(4)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5(g^{(1)}(n-1) + g^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}。$$

a, u 可通过最小二乘法估计得到,则有

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

方程(4)的时间响应函数为

$$\hat{g}^{(1)}(t+1) = [g^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] \cdot e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

方程(7)的时间离散响应函数为

$$\hat{g}^{(1)}(k+1) = [g^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] \cdot e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (k=1, \dots, n) \quad (8)$$

将(8)式得出的输出值进行累减得到真实的输出值。累减生成的基本关系为

$$\begin{cases} \hat{g}^{(0)}(1) = g^{(0)}(1) \\ \hat{g}^{(0)}(k) = \hat{g}^{(1)}(k) - \hat{g}^{(1)}(k-1) \end{cases} \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (9)$$

则根据灰色系统理论得到铅锌烧结过程的综合透气性预测模型为

$$p_e(k+1) = [g^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] \cdot [e^{-a \cdot k} - e^{-a \cdot (k-1)}] \quad (10)$$

灰色预测模型(GM(1,1))模型的预测精度与原始数据列的分布有关,自然也与建模维数有关。旧的信息太多往往会淹没新信息的特点,使预测对系统的波动反应迟缓,跟踪性变差。为了使得模型具有较强的在线修正能力,采用等维新息动态预测方法,即在保持原始建模数据序列的维数不变的前提下,及时补充新的信息,同时去掉最老的信息。此外,GM(1,1)建模可延伸性(预测性)的充分必要条件是数列维数 $n \geq 4$,一般取 4~6 个数据建模。因此,本文中的 n 取为 5。

利用某烧结冶炼厂 2# 烧结机的现场数据进行综合透气性预测实验,其实验结果如图 2 所示,其平均相对误差为 2.5%。

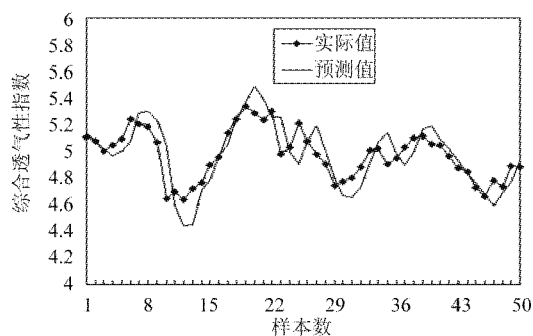


图 2 灰色理论预测结果

3 基于改进的灰色理论的透气性预测

从图 2 中可以看出,当建模数据序列单调性发生变化后,预测值和实际值之间的误差较大,而没有

变化时,预测值和实际值之间的误差较小,因此有必要对数据序列单调性发生改变后的预测结果进行适当的修正。

当数据序列的单调性只发生一次变化时,且其单调性是从单调递增变为单调递减时,则按照式

$$p_e' = p_e - \frac{\alpha}{j} \quad (11)$$

进行修正。式中, p_e 为传统灰色理论的预测值, j 为建模数据序列单调性改变后的数据个数, α 为修正系数,根据实验,取 $\alpha = 0.1$ 。如果原始建模数据序列的单调性从单调递减变为单调递增时,则按照式

$$p_e' = p_e + \frac{\alpha}{j} \quad (12)$$

进行修正。根据以上分析,采用改进的灰色理论的预测方法的步骤如下:

步骤 1:首先,判断建模数据序列的 5 个数据的单调性是否有变化,如果没有变化的情况,则利用传统的灰色理论进行预测。如果建模数据序列的单调性发生了变化,则判断单调性是从单调递增变化为单调递减,还是从单调递减变化为单调递增,以及单调性发生变化后的数据个数。

步骤 2:如果数据序列的单调性是从单调递增变为单调递减,则对传统灰色理论预测结果按照式(11)进行修正,反之,按照式(12)进行修正。考虑到建模数据序列中单调性可能出现 2 次变化的情况,只根据最后一次改变的情况来对预测值进行修正。

利用所提出的改进的灰色理论,对以上现场数据进行综合透气性预测实验,其实验结果如图 3 所示,其平均相对误差为 1.8%。

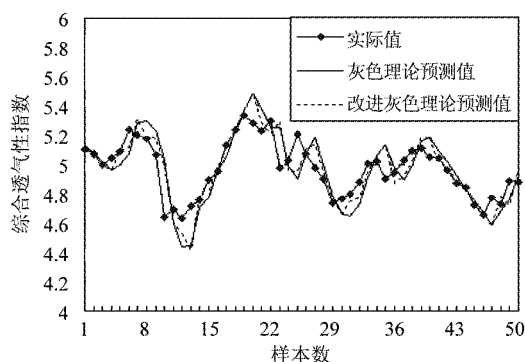


图 3 改进灰色理论的预测结果

相对于传统灰色理论,改进的灰色理论的预测精度提高了 $(2.5 - 1.8)/1.8 = 39\%$ 。因此采用改进的灰色理论比传统灰色理论能在一定程度上提高预测精度。

4 结 论

本文针对影响铅锌烧结综合透气性的因素具有不确定性,以及目前已知的预测方法建模过程复杂、适应性不强的特点,利用灰色理论来预测综合透气性。针对灰色理论在预测时存在的问题,提出了相应的修正公式。实验结果表明,本文所提出的改进的灰色理论方法为实际烧结生产的综合透气性预测提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 袁熙志,周取定. 铁矿石烧结过程基本理论的研究. 见:中国铁矿石烧结研究——周取定教授论文集. 北京:冶金工业出版社,1997. 203-211
- [2] Desai B, Ramna R V, Dey A. Effect of casting parameters on permeability in lower part of blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 2007, 34(3):248-252
- [3] Upadhyaya G S. Some issues in sintering science and technology. *Materials chemistry and physics*, 2001, 67: 1-5
- [4] Wu M, Xu C H, Du Y X. Intelligent optimal control for lead-zinc sintering process state. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (4): 975-981
- [5] 袁晓红,何花. 烧结系统终点温度与透气性算法神经网络模型. 计算机工程与设计, 2006, 27(6): 1028-1029
- [6] 王介生. 烧结过程软测量建模综述. 烧结球团, 2007, 32(4): 31-36
- [7] 常亮,王介生. 以透气性为中心的链篦机过程智能优化控制. 鞍山科技大学学报, 2006, 29(6): 599-602
- [8] 滕金玉,于洋. 烧结过程透气性指数的神经网络软测量模型的研究. 沈阳航空工业学院学报 2006, 23(1): 55-56
- [9] 丁雷,吴敏,曹卫华. 基于 T-S 模型的透气性鲁棒预测. 湖南工业大学学报, 2007, 21(6): 56-59
- [10] 邓聚龙. 灰理论基础. 武汉:华中科技大学出版社, 2002. 13-20
- [11] Thananchai L. Grey prediction on indoor comfort temperature for HVAC systems. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(4): 2284-2289
- [12] Wang C H, Hsu L C. Using genetic algorithms grey theory to forecast high technology industrial output. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 195(1): 256-263
- [13] Lo S P, Chang D Y, Lin Y Y. Quality prediction model of the sheet blanking process for thin phosphorous bronze. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192 (1-3): 126-133
- [14] Kung C Y, Wen K L. Applying grey relational analysis and grey decision-making to evaluate the relationship between company attributes and its financial performance—a case study of venture capital enterprises in Taiwan. *Decision Support Systems*, 2007, 43(3): 842-852
- [15] Ma F Y, Wang W H. Prediction of pitting corrosion behavior for stainless SUS 630 based on grey system theory. *Materials Letters*, 2007, 61(4-5): 998-1001
- [16] Wu A X, Xi Y, Yang B H, et al. Study on grey forecasting model of copper extraction rate with bioleaching of primary sulfide ore. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2007, 20(2): 117-128
- [17] Karmakar S, Mujumdar P P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 1088-1105
- [18] 周取定,孔令坛. 铁矿石造块理论及工艺. 北京:冶金工业出版社,1989. 76-79

Synthetic permeability prediction for lead-zinc sintering process based on the improved gray theory

Ding Lei^{* **}, Wu Min^{*}, She Jinhua^{***}, Duan Ping^{*}

(^{*} School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(^{**} School of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000)

(^{***} School of Computer Science, Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo, Japan 192-0982)

Abstract

Considering the uncertainties of the factors affecting the synthetic permeability during the lead-zinc sintering process and the complexity of the present prediction models, this paper proposes a new prediction model using the improved gray theory. Firstly, the gray theory is applied to building a prediction model for the synthetic permeability, because the gray theory not only can reduce the negative effects of the uncertainties to some extent, but also can easily build a prediction model. Then, to overcome the disadvantage of the gray theory that, after the monotonicity of data sequence is changed, it can not follow the changes of data sequence in time, the corresponding formulas are proposed to modify the prediction results of the conventional gray theory according to both the number of data after sequence monotonicity is changed and the specific changes of monotonicity. The experiment has verified the improved gray theory's better prediction accuracy.

Key words: lead-zinc sintering process, synthetic permeability, uncertainties, improved gray theory