球团焙烧过程工艺模拟研究及应用
——链算机—回转窑与带式焙烧机工艺模拟

储太山
(中冶长天国际工程有限责任公司,湖南 长沙 410007)

摘要: 工艺设计的合理性与先进性是球团厂达产达效的根本,而工艺模拟可让设计者对工艺系统中的质量流与能量流以及两者间的相互影响关系的认识更加清晰明了。基于球团料层热质传输模型开发了链算机—回转窑和带式焙烧机两种工艺模拟流程,并详细阐述了两种工艺模拟流程的步骤、控制策略以及应用方向,同时给出了实例流程的模拟结果以及与球团试验结果的对比。对比结果说明,模拟工艺可以使工艺设计从经验化转变到数字化,可为工艺优化和生产操作提供指导。

关键词: 链算机—回转窑; 带式焙烧机; 球团料层; 热质传输模型; 控制策略; 工艺模拟
中图分类号: TF046.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2023)06-0145-12
doi: 10.13403/j.sjqt.2023.06.096

Research and application of simulation for pelletizing roasting process
——Process simulation of grate-kiln and straight grate systems

CHU Taishan
(Zhongye Changtian International Engineering Co.,Ltd.,Changsha 410007,Hunan,China)

Abstract: Advanced and reasonable process design is the essential for a pelletizing plant to achieve production and efficiency. Understanding the heat & mass flow and its interaction can be more clearly utilizing process simulation. Based on bed mass-heat transfer models, the process simulation packages for grate-kiln and straight grate iron ore pelletizing systems are developed. The steps, essential control strategy and algorithm for simulation, as well as its applications, are described in the paper. Furthermore, the simulation examples as well as the comparisons with dedicated laboratory testing results for the illustrated typical grate-kiln and straight grate process are given in the paper. The comparison results show that the process simulation not only can transform process design from empirical to digital, but also can provide guidance for process optimization and production operation.

Key words: grate-kiln; straight grate; pelletizing bed of material; caloric transport model; control strategy; craft simulation

链算机—回转窑和带式焙烧机是目前球团生产的主流工艺。前者在我国发展已有20余年,生产经验丰富、操作水平高,是采用链算机对生球进行干燥和预热,具有相当强度的预热球在回转窑内高温焙烧以达到最终的强度要求,环冷机负责对回转窑排出的高温球团进行冷却并为回转窑和链算机提供热载体的一种工艺;后者在我国发展较晚,对其工艺的认知和生产操作经验还待进一步提升,其是在一台设备上完成生球干燥、预热、焙烧、均热和冷却全过程的一种工艺。

球团工艺设计对球团厂运行起着关键作用,先进合理的流程设计是实现低能耗和低排放生产

收稿日期: 2023-09-22; **修回日期:** 2023-10-22
作者简介: 储太山(1966—),男,正高级工程师,副总工程师,从事铁矿烧结球团工艺设计及相关技术研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的根本保证。目前工艺设计的主要问题是工艺参数的选取依赖经验，设备选型不够合理，风流系统优化不够，能耗与排放指标同国外先进水平相比仍有差距。其根本原因在于对系统的质量流和能量流及其相互影响关系的认知不够，没有开发自主技术的工艺包，尤其是带式焙烧工艺还停留在依赖国外技术的阶段。因此，开发工艺模拟流程是十分必要的。

本文以球团料层(包括链算机、环冷机和带式焙烧机上的静止料层以及回转窑内的滚动料层)热质传输模型[1]为基础，介绍了链算机—回转窑和带式焙烧机系统工艺模拟的步骤和关键的控制逻辑(原始数据输入、基础数据计算、焙烧过程模拟以及结果输出)，给出了两种工艺的模拟实例，并用试验数据对模拟进行验证，最后，对工艺模拟的应用方向进行了探讨。

1 原始数据输入及计算

作为已知条件需要由用户输入到模拟模型的原始数据：① 原料：铁原料、黏结剂、熔剂、内配碳的化学成分和/或配比等信息；② 燃料：种类、比例、成分等信息；③ 产品：设计规模、作业率或年作业时间、产品质量指标等信息；④ 现场条件：海拔、年平均大气温度、相对湿度；⑤ 工艺配置：算床/台车宽度、风箱规格、料层厚度等信息。

基础数据计算模块根据录入的原始数据①～④分别执行配料计算、湿空气计算、燃料燃烧计算，工艺配置数据⑤用于主机设备计算。

为了后面所述的模拟与验证，本文根据某工程A(链算机—回转窑工艺)和B(带式焙烧机工艺)的试验报告，其基础数据见表1～6。

表1 铁精矿主要化学成分(100%磁铁矿)(工程A/B)(质量分数)

Table 1 Main chemical components of iron concentrate(100% magnetite)(project A/B) %

TFe	FeO	$FeCO_3$	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S
67.61/69.74	20.06/20.80	0/0	2.00/1.80	0.65/0.07	0.80/0.09	0.44/0.13	0.01/0.007

表2 膨润土主要化学成分(工程A/B)(质量分数)

Table 2 Main chemical components of bentonite(project A/B) %

TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	水分	添加量
9.82/0.05	47.36/52.2	14.14/18.50	2.84/3.20	2.98/4.10	0.078/0.015	8.5/8.6	0.8/0.6

表3 石灰石主要化学成分(工程A/B)(质量分数)

Table 3 Main chemical components of limestone(project A/B) %

TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S
0.55/0.05	0.51/4.1	0.10/0.07	55.63/36.10	0.26/16.30	0.064/0.008

表4 天然气主要化学成分及热值(工程A/B)

Table 4 Main chemical components and calorific value of natural gas(project A/B)

主要化学成分(体积分数)/%							热值/($kJ \cdot Nm^{-3}$)
CH_4	C_2H_4	C_2H_6	H_2S	CO_2	N_2	O_2	
83.0/83.5	2.0/1.8	7.0/6.9	0/0	2.0/1.6	6.0/6.2	0/0	35 415/35 410

表5 球团工艺及产品相关参数(工程A/B)

Table 5 Related parameters of pellet process and product(project A/B)

CaO/SiO_2	MgO/%	规模/(10^6 $t \cdot a^{-1}$)	作业率/%
0.8/0.4	无要求	5.0/6.8	90.4/90.4

表6 现场其他条件参数(工程A/B)

Table 6 Parameters of other on-site condition parameters (project A/B)

海拔/m	相对湿度/%	气温/℃
1 104/34	45/65	25/25

1.1 配料计算

根据产品质量指标要求的不同，配料计算模块建立质量方程、碱度方程、MgO平衡方程。生产自然碱度球团时用质量方程；生产熔剂性球团

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时，如果对 MgO 含量没有要求用质量方程和碱度方程求解，若对 MgO 含量有要求时则增加 MgO 平衡方程。根据产品碱度要求，碱度方程可以是二元(B_2) 、三元(B_3) 或四元(B_4) 碱度方程。模块的主要功能: ① 校核用户输入的数据，当出现数据溢出时则进行调整; ② 原料组分转换，如: 根据 w(TFe) 、w(FeO) 计算 w(Fe_3O_4) 和 w(Fe_2O_3) ，由 w(CaO) 、w(MgO) 计算 w($CaCO_3$) 、w($MgCO_3$) ; ③ 计算各种矿石配比: 当使用两种及两种以上铁原料时，将根据产品对 w(TFe) 、w(SiO_2) 、w(MgO) 等指标的要求，启动优化配矿方案，得到满足产品质量指标的最优配比。

计算出矿石配比后，最后计算混合料组分、生球组分和产品组分。在配料计算模块中，最多只有 3 个方程(质量方程、碱度方程、MgO 平衡方程) 。当铁原料品种超过 3 个时，此时存在无穷解，优化配矿方案需要根据产品质量指标寻求最优解。因此，配料计算模块应制定出合理的优化逻辑。工程 A 和 B 的配料计算运行结果见表 7。

表 7 配料计算结果(工程 A/B) (质量分数)

Table 7 Pellet stoich calculation results(project A/B) %

项目	混合矿	膨润土	石灰石	配合料	球团
Fe_3O_4	61.07/65.2	0/0	0/0	59.38/63.44	0.30/0.31
Fe_2O_3	33.41/32.11	14.03/5.40	0.77/0.07	32.61/31.25	93.70/95.64
FeOOH	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
$FeCO_3$	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
SiO_2	2.00/1.79	47.36/52.20	0.50/3.87	2.33/2.14	2.33/2.12
Al_2O_3	0.65/0.07	14.14/18.50	0.10/0.07	0.75/0.18	0.75/0.18
CaO	0/0	2.84/3.20	0/0	0.02/0.02	1.87/0.85
$CaCO_3$	1.43/0.16	0/0	96.74/60.88	3.29/1.49	0/0
MgO	0/0	2.98/4.10	0/0	0.02/0.02	0.46/0.48
$MgCO_3$	0.92/0.27	0/0	0.53/32.33	0.91/0.97	0/0
S	0.01/0.01	0.08/0.02	0.06/0.01	0.01/0.01	0.001/0.001
固定碳					
挥发分					
水	0/0	8.50/8.60	0/0	0.07/0.05	0/0
其他	0.51/0.32	10.07/7.99	1.31/2.78	0.60/0.42	0.60/0.42
合计	100.00/100.00	100.00/100.00	100.00/100.00	100.00/100.00	100.00/100.00
LOI	−0.97/−2.02	8.57/8.61	42.90/43.73	−0.03/−0.95	
TFe	67.61/69.74	9.82/3.78	0.55/0.05	65.83/67.82	65.81/67.18
配比	97.23/97.20	0.80/0.60	1.97/2.20	100.00/100.00	
B_2					0.80/0.40
B_3					0.61/0.37
B_4					0.75/0.58

注: 表中“空白”代表无此项。

1.2 湿空气计算

焙烧系统漏风、助燃风和冷却风都是来自生产现场环境的含湿空气，计算湿空气的组成是燃烧计算、传热计算和风平衡计算的基础。

湿空气计算模块根据当地海拔高度计算大气压，根据大气平均温度和相对湿度计算饱和蒸汽压，从而计算出湿空气中水蒸气、氮气和氧气的含量。

表 8 列出了根据当地大气数据计算出的湿空气组分含量、密度以及大气压。

1.3 燃烧计算

焙烧系统使用的燃料主要有固体燃料、液体

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表8 湿空气计算结果(工程A/B)

Table 8 Results of wet air calculation(project A/B)

大气压/Pa	密度/(kg·Nm^{-3})	密度/(kg·m^{-3})	H_2O(kg·kg^{-1})	O_2/(kg·kg^{-1})	N_2/(kg·kg^{-1})
89 072.50/100 924.17	1.280 8/1.2779	1.031 5/1.166 0	0.008 7/0.012 5	0.231 0/0.230 1	0.760 3/0.757 4

燃料和气体燃料3大类，每种类型的燃料又包含很多种。链算机和带式焙烧机可以使用气体燃料或液体燃料或两者同时有使用，回转窑则可使用任一类燃料或混合燃料。

在燃烧计算中，对于同一类型的多种燃料可先按其配比计算出该类的混合燃料，如：天然气+焦炉煤气+高炉煤气，按其配比计算出混合气体燃料。对每类燃料分别做理论燃烧计算，计算出理论需氧量和湿空气量以及燃烧产物量。在进行固体燃料的理论燃烧计算时，往往仅有其工业分析数据，而燃烧计算需要元素分析，因此需要根据工业分析来计算元素分析。

此外，鉴于有很多回转窑采用双燃料，如：烟煤+低热值煤气。为了保证混合燃料的热值满足高温焙烧的要求，需要对双燃料各自的比例进行校核和调整。

燃料燃烧会产生NO_x，其产生量跟燃料种类、燃烧方式等因素有关，可参照美国环保署发布的NO_x排放因子测算[2]计算，计算结果与测定值较接近。

燃烧计算是焙烧系统热量传输、热量平衡和风流参数的基础计算，该模块应完成：①各种成分表示方法(干燥基、收到基、无灰基等)的转换；②由固体燃料的工业分析推算其元素分析；③燃料热值校核及配比调整；④理论燃烧的需氧量、空气量、燃烧产物(CO_2，H_2O，N_2，SO_2，NO_x，灰分)量。燃料理论燃烧[空气过剩系数(EAC)=1]需氧量及燃烧产物见表9。

表9 燃料理论燃烧计算结果(工程A/B)

Table 9 Results of fuel combustion(EAC=1) calculation (project A/B)

项目	热值/(kg·GJ^{-1})	热值/(Nm^3·GJ^{-1})
理论燃烧需氧量	79.93/79.96	55.95/55.97
理论燃烧空气量	346.03/347.50	270.16/271.93
CO_2	57.13/56.86	29.08/28.95
H_2O	46.34/47.75	57.67/59.43
N_2	264.68/264.86	211.75/211.89
SO_2	0/0	0/0
NO_x	1.19/1.19	0.84/0.84
灰分	0/0	0/0
合计	369.35/370.67	299.35/301.11

2 焙烧过程模拟

以球团料层热质传输模型[1]为基础，可以对不同的工艺(链算机—回转窑和带式焙烧机)以及不同的气流系统分别建立工艺模拟模型。下面以实例工程A和B所采用的工艺流程为例，分别加以说明。

2.1 工艺流程

实例工程A采用链算机—回转窑工艺，球团的干燥预热、焙烧和冷却过程分别在链算机、回转窑和环冷机三大主机上完成，其工艺流程见图1。

实例工程B采用带式焙烧机工艺，工艺流程见图2所示。

2.2 链算机—回转窑—环冷机联合模型

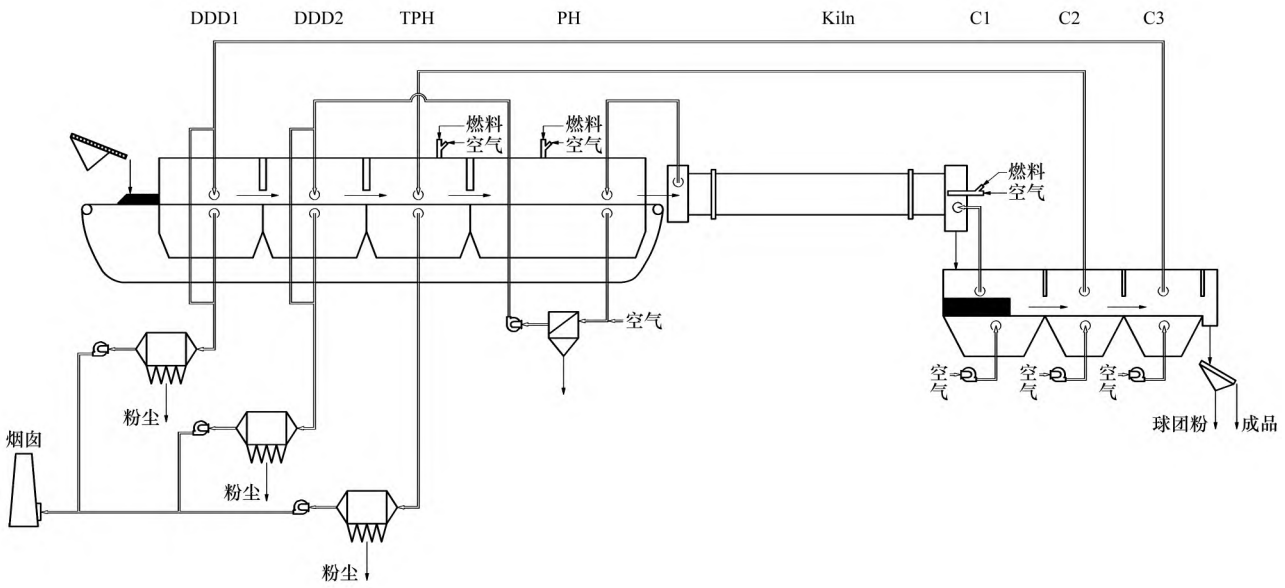
从图1可知，链算机—回转窑焙烧系统具有两个显著特点：①三大主机之间相互关联，处于流程最末端的环冷机3个冷却段排出的气体分别供给回转窑、TPH和DDD1段，窑尾气体供给PH段，PH段排气又供给DDD2段，亦即前端流程的初始条件需要依赖于后端流程的模拟结果；②回转窑内的传热方式不同于链算机和环冷机。

链算机和环冷机模型可利用静料层传热传质模型建立。由于环冷机料层仅存在磁铁矿氧化反应，故为链算机和环冷机分别建立各自的模型。

链算机算床既是料层的承载体，同时也是传热体，因此链算机模型还应包括算条传热模型，模拟气流穿过算条时温度和压力的变化。

虽然算床与料层、气流、环境之间的传热过程较为复杂，但仍然可以将算床看成多孔介质建立能量方程。气流与算床之间的传热系数可以通过试验测定，或采用Nusselt准数计算[3]：

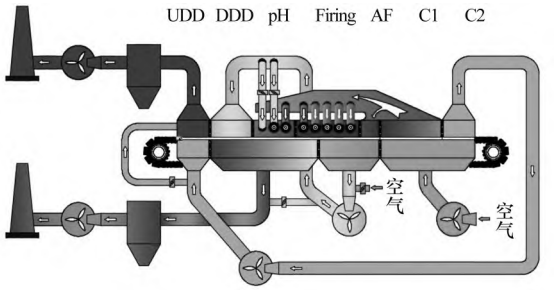
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



DDD1—抽风干燥一段；DDD2—抽风干燥二段；TPH—过渡预热段；PH—预热段；C1—冷却一段；C2—冷却二段；C3—冷却三段；Kiln—回转窑。

图 1 链算机—回转窑焙烧系统实例流程（工程 A）

Fig. 1 Example process of grate-kiln induration system (project A)



UDD—鼓风干燥段；DDD—抽风干燥段；PH—预热段；Firing—焙烧段；AF—均热段；C1—冷却一段；C2—冷却二段。

图 2 带式焙烧机系统实例流程（工程 B）

Fig. 2 Example process of straight grate induration system (project B)

$$Nu = 5.0Re^{1/2} \quad (1)$$

式中：Re 为雷诺准数。

本文在分别建立链算机、回转窑和环冷机模型后，就可以针对给定的工艺流程建立联合模型。

联合模型应根据流程特征（控制点）制定相应的控制逻辑，尽量减少循环迭代并保证程序快速收敛。在链算机—回转窑系统中主要控制点包括：干燥、预热、焙烧温度及速率，预热终点（氧化程度、预热球温度），回转窑焙烧温度（产品强度），冷却速度和冷却终点温度。

控制点的整定参数是工艺模拟的目标值，通常采用试验结果，当没有试验时需给出经验值。控制点决定了整个工艺模拟的控制逻辑。

由于冷却过程只有氧化反应发生，因此通常将回转窑排料温度作为第一控制参数，假定磁铁矿氧化率，先运行环冷机模型以取得各冷却段排气参数，作为链算机模型和回转窑模型的输入，这样可以减少循环。在环冷机模型中应重点考察 C1 冷却风量对焙烧能耗的影响、各冷却段的风量分配和面积分配，以保持各冷却段压力均衡。

然后运行链算机模型，根据工艺对干燥温度和速度的要求来决定是否需要调节进气温度（兑冷风或兑热风）和干燥时间，根据工艺对预热的要求调整供热量、氧化时间等，并根据各段压力降的模拟结果来调整预设的分段参数。

回转窑模型利用链算机模型的输出作为初始条件，其模拟结果用于对 PH 段做反馈修正。

最后，对进入冷却段球团氧化率假定值进行更新并循环，使假定值与模拟值趋于一致。

以图 1 所示的工艺流程为例，联合模型的主要控制逻辑见图 3。

2.3 带式焙烧机模型

与链算机—回转窑工艺类似，系统带有 C1、C2、风箱回热共3次热风循环，所不同的是它采用

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

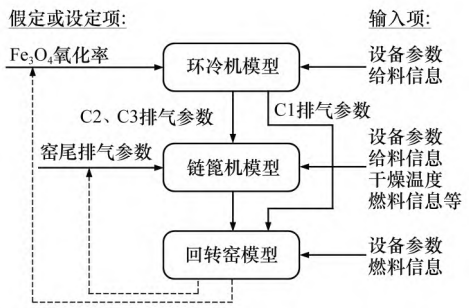


图3 链算机—回转窑—环冷机联合模型主要控制逻辑示意(虚线表示反馈调整)

Fig. 3 Main control logic diagram for grtae-kiln-cooler integration model(dotted lins for feedback)

静料层操作并设有铺底料，因此需要在静料层传热传质模型的基础上增加台车以及铺底料传热模型。

带式焙烧机模型在众多文献中均有报道[3-6]，其中文献[3]首先从C1段开始模拟以解决前面工艺段进气参数初始化的问题，但是文献并没有解决料层和台车层参数初始化的问题，因此这种方法有待商榷。

包括铺底料的球团料层和台车进入UDD段后立即与气流换热且生球料层发生物理化学反应，料层与气相的参数时刻发生变化，所以模拟过程直接从UDD段开始，对于未知的进气参数可以先假定再循环更新，这种方法对目前计算机运行速度的影响可以忽略不计。

台车在气固换热中扮演着重要角色，因此带式焙烧机模型应包括台车传热模型。台车一般应划分为不少于4层，其传热系数可采用式(1)计算，但是对箅条下方的台车梁，其传热系数应适当降低。

同样，在带式焙烧系统中主要的控制点有:干燥、预热、焙烧温度及速率，预热终点(氧化程度、预热球温度)，焙烧终点(焙烧球温度)，均热效果(上、中、下层球团温度差异)，冷却速度和冷却终点温度。控制点的整定参数通常采用试验结果，无试验时也要给出经验值，以此来制定工艺模拟的控制逻辑。

工艺模拟中另一个重点是压力控制。凡是采用同一台风机抽风的风箱，如:从DDD段到焙烧前段、焙烧后段到AF段、冷却段，其压力降(包括球团料层、铺底料层和箅条层的阻力)需保持均衡，这是由风机气体动力学特征所决定的。因此，除了UDD段采用独立风机供风以外，其余段的模拟过程都需要采用预设气流量来满足压力的循环迭代。从表象看，压力降的大小反应的是透过料层气流速度的高低，实际上压力降决定了焙烧设备的产率，亦即各工艺过程的速度，同时还对球团质量有影响。因此压力降的选取应合理，压力降过小则设备规格大、产率低，过大则可能导致生球爆裂、升温或冷却速度过快使产品质量降低等问题。

以图2所示的流程为例，带式焙烧机焙烧过程模拟控制逻辑见图4。

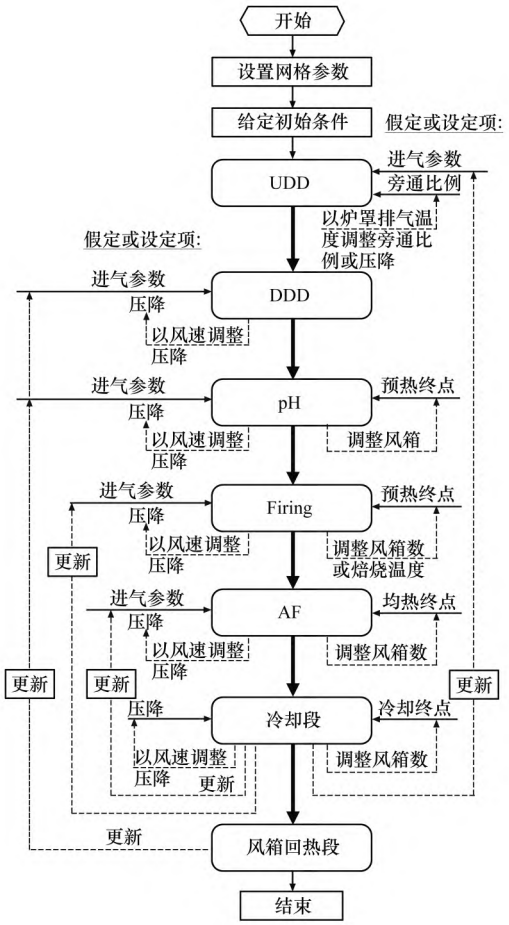


图4 带式焙烧机工艺模拟逻辑(虚线表示反馈调整或更新)

Fig. 4 Control logic diagram for straight grate process (dotted lines for feedback or updates)

3 模拟实例与验证

鉴于Matlab强大的矩阵运算和绘图功能，采用Matlab程序进行编程，其优点是代码量小，对计算机硬件要求不高，数据处理速度快。试验将原始数据输入到程序，程序运行约2 min后输出结

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

果，通常以数据表和图表的形式呈现出来。

数据表包括: 配料计算、燃料燃烧计算、各工艺段物料平衡和热平衡、风流数据、各工艺段参数、工艺风机参数等。

图表主要包括: 链算机、环冷机和带式焙烧机上不同球团料层温度随时间变化的关系曲线，链算机算条温度随时间变化的关系曲线，带式焙烧机上铺底料层和台车温度随时间变化的关系曲线，回转窑料层、内壁、外壳以及气流沿轴向温度变化曲线，窑内物料填充率和料层高度沿轴向变化关系曲线。此外，该程序还可以绘制不同料层球团和气流组分与时间的关系曲线，以及用伪彩图的方式来显示料层温度、干燥进程、氧化进程、气固相组分的变化等。

3.1 工程 A(链算机—回转窑工艺)

工程基本情况见表 1 ~ 6，产品为二元碱度 0.8 的 DR 级球团矿。

主要试验参数: 铁原料经高压辊磨后比表面积可达 1 989 cm^2/g，膨润土添加量为 0.8%，生球水分为 9.0%。推荐的热工制度: 采用全抽风干燥，DDD1 进气温度为 250 ~ 350 ℃、时间为2.0 ~ 2.5 min，DDD2 进气温度为 300 ~ 400 ℃、时间为 3 ~ 4 min，TPH 段温度为 800 ~ 1 000 ℃、时间为 2.0 ~ 2.5 min，PH 段温度为 1 100 ~ 1 150 ℃、时间为 3.5 ~ 4.5 min，预热球抗压强度达到 1 000 N/P，回转窑焙烧温度为 1 280 ~ 1 300 ℃、时间为 12 min，球团矿的物理性能和冶金性能均达到 DR 级球团质量要求。

工艺模拟流程输出的部分结果见表 10 ~ 12，链算机、回转窑和环冷机温度曲线见图 5。

图 6(a) 为焙烧杯试验绘出的温度曲线，在焙烧杯上安装了 7 支温度计，用于实时记录图示的 7 点温度，其中 T - 1 为焙烧杯顶部燃烧室排气温度，T - 2 为料层顶部进气温度，T - 3 ~ T - 5 分别为顶层、中层和底层球团温度，T - 6 为算条温度，T - 7 为料层排气温度。图 6(b) 为模拟软件绘制的链算机温度曲线，分别为料层进气、排气温度、算条温度和球团顶、中、底层温度。

表 10 主机设备信息

Table 10 Main equipment informations

项目	链算机				回转窑	环冷机		
规格	5.6 m × 60 m; 336 m^2				∅6.9 m × 46 m	∅28 m × 3.6 m; 243.5 m^2		
料层厚度/mm	180					760		
速度	5.46/(m·min^{-1})				1.74/(r·min^{-1})	1.37(r·h^{-1})		
分段	DDD1	DDD2	TPH	PH	Kiln	C1	C2	C3
风箱数/个	4	5	4	7				
面积/m^2	67.2	84.0	67.2	117.6		94.4	71.5	77.6
停留时间/min	2.20	2.75	2.20	3.85	18.80	12.92	9.75	10.45

注: 表中“空白”代表无此项。

表 11 累积反应进程

Table 11 Cumulative progress of physical-chemical reactions %

项目	DDD1	DDD2	TPH	PH	Kiln	C1	C2	C3
自由水蒸发	39.8	84.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
结晶水分解	—	—	—	—	—	—	—	—
$FeCO_3$ 分解	—	—	—	—	—	—	—	—
$CaCO_3$ 分解	0.0	0.0	34.0	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0
$MgCO_3$ 分解	0.0	0.0	60.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
硫氧化	0.0	0.0	58.9	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
Fe_3O_4 氧化	0.0	0.0	16.2	71.1	74.6	99.2	99.4	99.5
固定碳燃烧	—	—	—	—	—	—	—	—

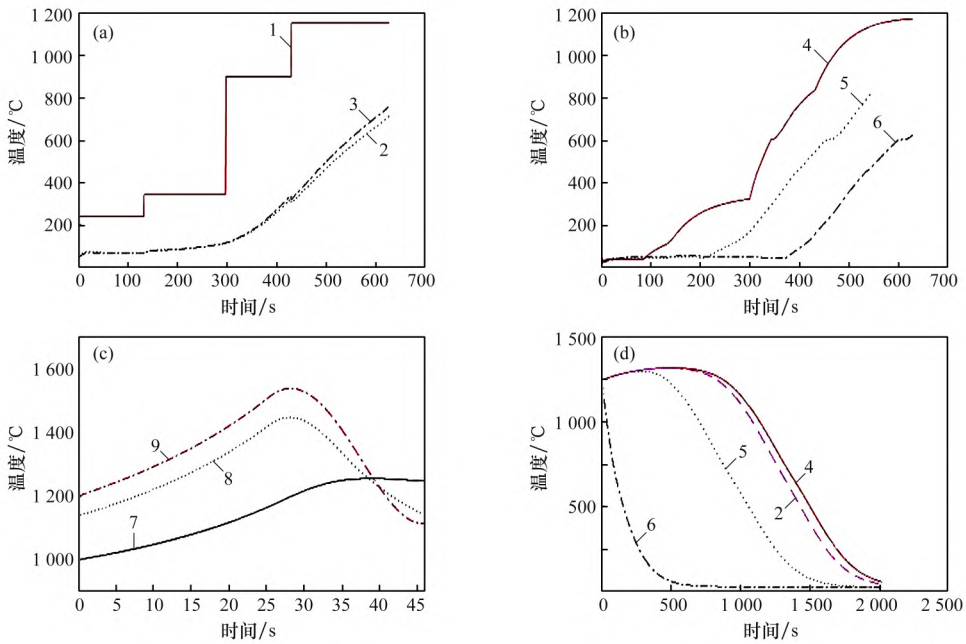
注: 表中“—”代表未发现。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 12 热平衡

Table 12 Heat balance sheet GJ/h

收入项	DDD1	DDD2	TPH	PH	Kiln	C1	C2	C3
物料带入	156. 57	177. 60	249. 84	508. 14	862. 71	1 062. 53	604. 90	188. 74
气体带入	359. 81	372. 52	463. 62	628. 53	602. 98	94. 69	104. 53	157. 01
氧化热	0. 00	0. 00	33. 22	111. 29	7. 00	49. 00	0. 39	0. 00
内配碳燃烧	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00
燃料燃烧	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	254. 89	0. 00	0. 00	0. 00
合计	516. 38	550. 13	746. 69	1 247. 97	1 727. 58	1 206. 22	709. 81	345. 75
支出项:	DDD1	DDD2	TPH	PH	Kiln	C1	C2	C3
球团带走	177. 60	249. 84	508. 14	862. 71	1 062. 53	604. 90	188. 74	69. 69
散料带走	0. 92	1. 64	2. 68	6. 90	0. 00	2. 21	0. 69	0. 26
气体带走	264. 82	218. 04	160. 62	316. 91	618. 01	598. 29	519. 44	274. 57
蒸发热	59. 06	66. 40	22. 27	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00
分解热	0. 00	0. 00	18. 18	28. 97	0. 03	0. 00	0. 00	0. 00
进气散热	11. 50	7. 90	26. 57	1. 04	5. 79	0. 00	0. 00	0. 00
排气散热	5. 30	7. 27	4. 66	11. 34	0. 00	0. 82	0. 93	1. 23
外壳散热	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	41. 22	0. 00	0. 00	0. 00
算床吸热	-2. 83	-0. 96	3. 57	20. 10	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00
合计	516. 38	550. 13	746. 69	1 247. 97	1 727. 58	1 206. 22	709. 81	345. 75

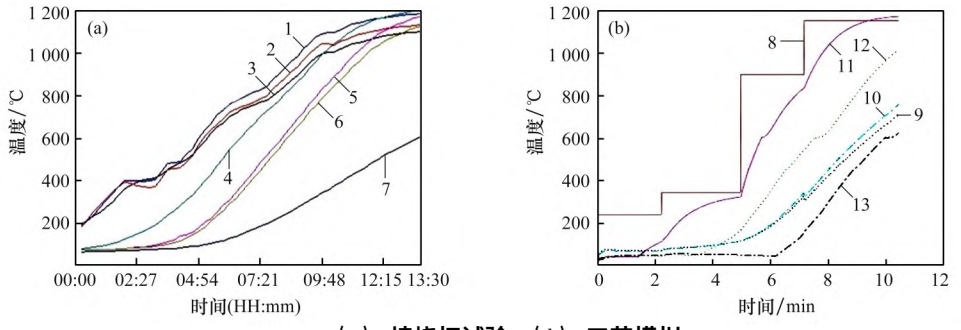


(a) 链算机进气、排气、算条温度; (b) 链算机顶层、中层、底层球团温度;
(c) 回转窑球团、内壁、气体温度; (d) 环冷机顶层、中层、底层、排气球团温度
1—进气; 2—排气; 3—算条; 4—顶层; 5—中层; 6—底层; 7—球团; 8—内壁; 9—气体。

图 5 链算机—回转窑—环冷机温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of grate rotary-kiln-annular cooler

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 焙烧杯试验；(b) 工艺模拟

1—T－1；2—T－2；3—T－3；4—T－4；5—T－5；6—T－6；7—T－7；8—料层进气；9—料层排气；10—箅条；11—顶层球团；12—中层球团；13—底层球团。

图 6 焙烧杯试验与工艺模拟的温度曲线

Fig. 6 Traveling grate temperature curves of pot grate test and simulation

从图 6 中可以看出，由于焙烧杯进气升温需要一定的时间，所以其曲线相对较平缓，而工艺模拟是按照工业生产的条件模拟料层传热情况，所以料层的升温速度更快，尤其是在干燥段以后。两者的温度曲线趋势完全一致，拟合度较高。

3.2 工程 B(带式焙烧机工艺)

工程 B 的基本情况见表 1～6，产品为二元碱度 0.4 的 DR 级球团矿。

主要试验参数：铁原料比表面积为 2 180 cm^2/g，膨润土添加量为 0.6%，生球水分为 8.9%。焙烧制度：UDD 进气温度为 280～300 ℃、时间为 2.5～3.0 min，DDD 进气温度为 330 ℃、时间为 4.4～4.8 min，PH 段温度为 330～1 315 ℃、时间为 6.5～8 min，Firing 段温度为 1 315 ℃、时间为 8～10 min，AF 段温度为 1 100 ℃、时间为 2 min，UDD 段料层压力为 4 kPa，冷却段为 4.5 kPa，其余段为 －3 kPa，利用系数为 25.3～31.1 t/(m^2·d)，球团矿的物理性能和冶金性能均达到 DR 级球团质量要求。

部分模拟结果见表 13～15，温度曲线见图 7。

工程 B 的球团扩大试验采用直径为 500 mm(耐火内衬直径为 260 mm)的可移动箅式罐来模拟带式焙烧机的连续生产过程(图 8)，燃烧室在箅式罐的顶部，可以通入氧气调节进气的含氧量，箅式罐底部有三个风箱，位置 I 和位置 III 为鼓风，位置II为抽风，风箱配有温度、流量和压力检测。

表 13 焙烧机分段信息

Table 13 Process zone informations of straight grate

参数	UDD	DDD	PH	Firing	AF	C1	C2	总计
长度/m	15	24	39	48	9	51	18	204
面积/m^2	60	96	156	192	36	204	72	816
停留时间/min	2.6	4.1	6.7	8.3	1.6	8.8	3.1	35.2

表 14 累积反应进程

Table 14 Cumulative progress of physical-chemical reactions %

项目	Fe_3O_4 氧化	结晶水分解	$FeCO_3$ 分解	$CaCO_3$ 分解	$MgCO_3$ 分解	硫氧化	内配碳燃烧	自由水蒸发
UDD	0.0	—	—	0.0	0.0	0.0	—	21.1
DDD	0.0	—	—	0.0	0.0	0.0	—	92.4
PH	51.3	—	—	88.8	100.0	90.0	—	100.0
Firing	86.7	—	—	100.0	100.0	90.0	—	100.0
AF	90.7	—	—	100.0	100.0	90.0	—	100.0
C1	99.5	—	—	100.0	100.0	90.0	—	100.0
C2	99.5	—	—	100.0	100.0	90.0	—	100.0

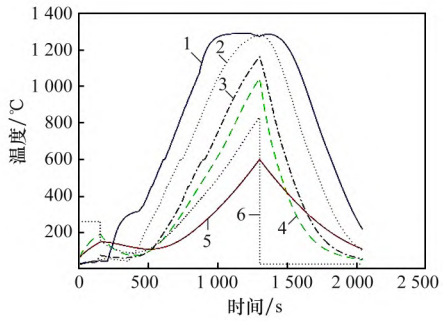
注：表中“—”代表未发现。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 15 热平衡

Table 15 Heat balance sheet GJ/h

收入项	热值	支出项	热值
生球带入	200.76	炉罩排气带走	340.98
铺底铺边料带入	81.19	风箱排气带走	800.24
台车带入	73.97	物料带走	348.19
冷却风和漏风带入	831.80	台车带走	86.74
氧化放热	282.64	蒸发热	205.47
内配碳供热	0	分解耗	34.40
燃料供热	401.84	风箱/炉罩/管道散热	56.17
合计	1 872.19	合计	1 872.19



1—顶层；2—中层；3—底层；4—铺底料；5—算条；6—风箱气流。

图 7 带式焙烧机温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of straight grate

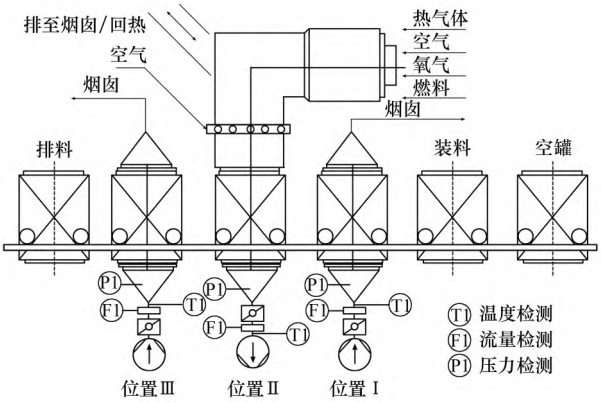


图 8 模拟带式焙烧机的可移动算式管

Fig. 8 Movable pot grate for simulation of pellet induration on straight grate

图 8 中，空罐装料后移动到位置 I 模拟鼓风干燥，移动到位置 II 可连续模拟抽风干燥、预热、焙烧和均热过程，然后再移动到位置 III 模拟鼓风冷却。

算式罐上测温热电偶的布置见图 9，其中 T_1 紧贴着料层顶面用于测量料层进气温度；T_4 位于料层上部 1/3 高度处，测量顶层球团温度；T_2 位于料层高度的中部，测量中层球团温度；T_3 测量料层底部温度；T_7 测量铺底料层中部温度；T_5 插在算条的中部，测量算条中部温度；T_6 位于风箱内，测量的是排气温度。

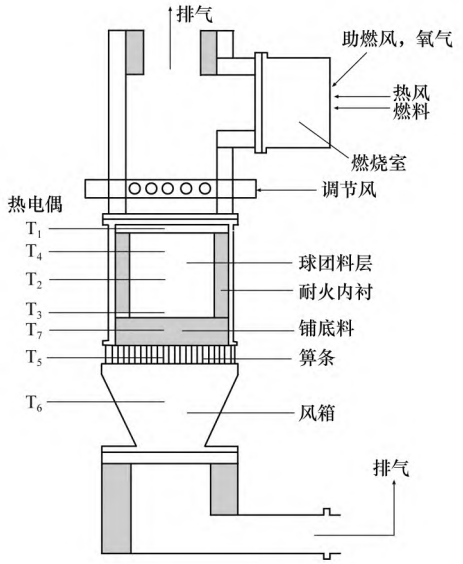
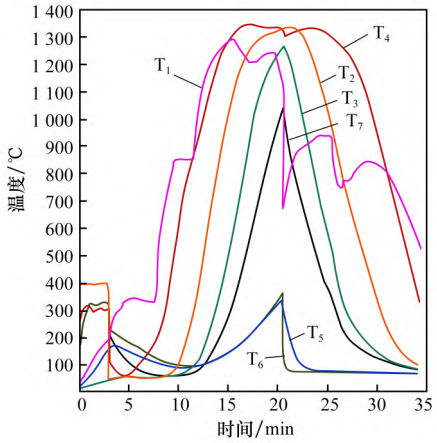


图 9 算式罐测温热电偶布置

Fig. 9 Arrangement of the thermocouples installed on the pot grate

试验绘制的温度曲线见图 10。由于缺乏试验记录的详细数据，无法对图 10 和图 7 给出的曲线进行拟合。比较图 10 与图 7，料层与气体温度曲线非常拟合，工艺模拟的算条温度要高于试验曲线。



T_1—进气；T_2—中层；T_3—底层；T_4—顶层；T_5—算条；T_6—排气；T_7—铺底料。

图 10 算式罐试验温度曲线

Fig. 10 Test temperature curves pot grate

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 工艺模拟的应用

工艺模拟模型可以从“微观”的视角更加透彻地了解球团焙烧过程，有利于设计中优化工艺流程和参数，从而达到节能减排的目的。例如：采用多目标评价体系优化链算机[7]，改变关键工艺参数以查明其对燃料和电力消耗的影响等[8]。此外，工艺模拟模型还可帮助工作者制定试验方案、实现在线自动控制等。

4.1 制定试验方案

目前球团试验普遍采用的流程是先以小型管炉进行探索试验，然后以烧结杯做扩大验证试验，这种流程的缺点是试验工作量大、准确度偏低。国外大型实验室结合工艺模拟则可以避免这些问题。

首先将基础数据输入模型进行模拟，得到干燥、预热、焙烧和冷却阶段的工艺参数，据此预先制定出试验方案，再根据扩大试验结果适当修正模型。因此国外的一些试验结果仅需考虑 10% 的余量就可以直接用于工程设计。

4.2 工艺优化

借助工艺模拟手段，工作者可以更清晰的认识焙烧过程的普遍规律。例如：

干燥阶段：鼓风、抽风干燥方式对干燥速率和料层过湿的影响，料层厚度对干燥速率的影响，介质温度对过湿层的影响等。

预热焙烧阶段：介质温度、过滤速度对料层加热速度的影响，料层厚度对热质交换程度、热耗以及产率的影响，均热时间对料层纵向温度梯度的影响等。

冷却阶段：料层厚度、过滤速度和介质温度对冷却时间、风量、平均排料温度以及排气温度的影响等。

借助工艺模拟，工作者可以取得优化的料层厚度、料层压力降等参数。此外，利用工艺模拟还可以对工艺流程进行优化，如：选取带式焙烧机 C2 段大部分排气作为 UDD 的热源，可以降低热耗和电耗。带式焙烧机 DDD 段采用梯级干燥，可以强化干燥、降低热耗和电耗。这些优化工作只需要改变程序的初始条件就能很快得到结果。

4.3 系统诊断

工艺模拟还可以结合球团厂实际生产数据，将关键的操作参数如干燥温度、焙烧温度等作为控制参数输入到模型，模拟出球团厂的热质平衡和风量分配，并根据模拟结果提出设计优化改进建议。

4.4 自动控制

球团焙烧过程具有耦合性强、关键参数无法直接检测等特点，因此对于关键的预热和焙烧终点只能通过间接检测数据如风箱气体温度水平、依靠操作人员的经验来进行控制。工艺气流与料层之间的换热程度取决于气体温度和流通量，而进出料层的气流温度和压力可以实现在线连续检测，那么利用料层入口的在线数据作为模型的输入，再将料层出口数据与检测数据做比较并实时修正模型的相关参数，就可以获得无法直接检测的关键参数(如预热终点和焙烧终点的球团温度)，再与整定值(试验得到的结果)进行比对，及时对供热系统做出调节，可以实现在线自动控制，从而可避免人为操作的误差，节约能耗。

近年来大规模带焙生产线在我国相继建成投产，因此许多学者对带焙预热焙烧控制进行了研究。如：刘丕亮等[9]采用相关性分析和回归分析的方法建立了焙烧温度控制系统；周卫[10]采用拟合风箱气体温度的方法确定预热结束点等。这些方法都是将风箱气体温度作为终点判定的间接依据，发生密封损坏、料层管壁效应、段与段之间串风等现象时都会影响系统的判断，从而发出错误的调节指令，且不能实现真正意义上的闭环控制。

如果将工艺模拟嵌入到控制系统中进行过程模拟，实现控制对象(预热、焙烧终点球团温度)的“软测量”，就可以实现真正意义上的闭环在线自动控制。下面以带式焙烧机焙烧终点控制为例加以说明。

假定根据原料试验结果，焙烧终点处与铺底料接触的底层球团温度必须不低于 1 200 ℃才能满足强度要求，利用工艺模拟自动控制烧嘴燃气流量：以在线检测的炉罩和风箱的气体温度和压力作为模型的输入量，用模拟出的压降与测定值作

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

比较，得到热载体流量；用模拟出的排气温度与测定值作比较，反馈修正传热强度；模拟过程经过两层循环后得到的排气温度和压力可以无限接近测量值，因此保证了焙烧终点温度模拟值的准确性。然后，系统通过比较焙烧终点温度模拟值与焙烧终点温度设定值，用偏差来自动调节燃烧系统的燃气流量(图11)。

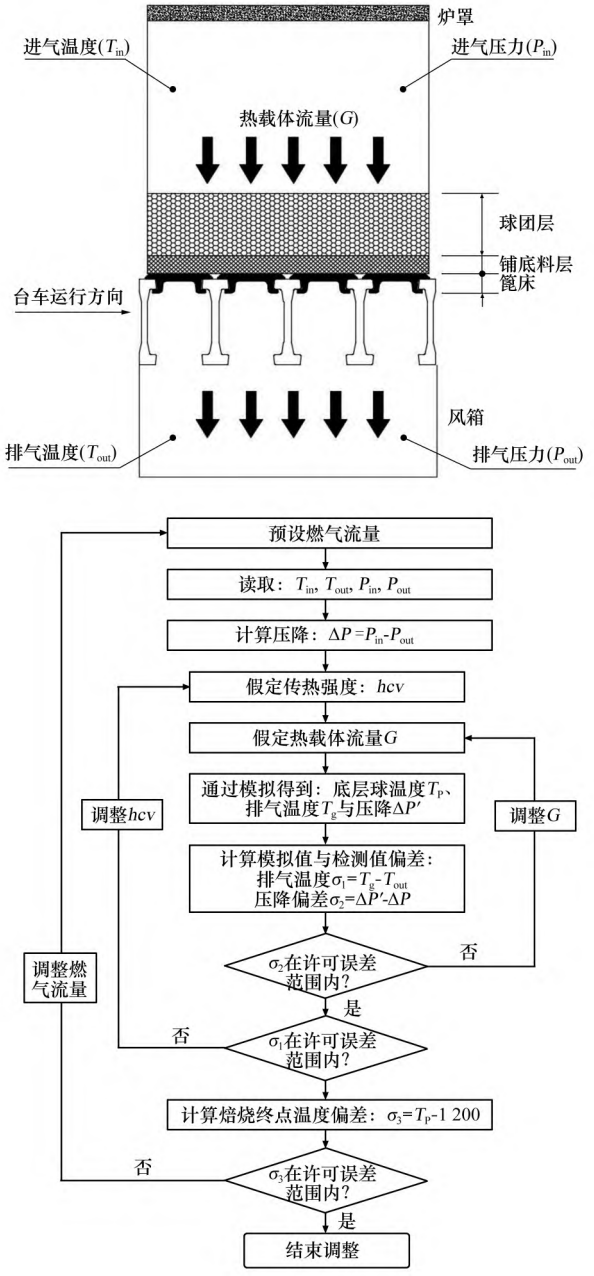


图11 带式焙烧机焙烧终点控制示意

Fig. 11 Schematic diagram of burn-through-point control for pellet induration on a straight grate

5 结 语

链算机—回转窑和带式焙烧机工艺模拟基于球团料层焙烧过程的热质传输模型，包含了球团焙烧过程中的物理化学变化，形成了完整的工艺模拟流程，使工艺设计从经验化迈入到数字化，让计算机取代了工艺设计师大量的手工数据计算，成为工艺优化、方案对比的快捷工具。此外，工艺模拟还可应用于优化试验方案、球团厂诊断，嵌入到球团专家系统中可实现在线自动闭环控制。

参考文献:

[1] 储太山. 球团焙烧过程工艺模拟研究及应用:料层热质传输模型[J]. 烧结球团,2023,48(2):61-71.
CHU Taishan. Research and application of simulation for roasting process of pellets: Heat-mass transfer model of material bed. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(2): 61-71.

[2] U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factor and Inventory Group. Emission factor documentation for AP-42, Section 11.23 [R]. Taconite ore process final report, 1997.

[3] THURLBY J A, BATTERHAM R J, TURNER R E. Development and validation of a mathematical model for the moving grate induration of iron ore pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 1979(6): 43-64.

[4] BARATI M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system [J]. International Journal of Mineral Processing, 2008, 89(1): 30-39.

[5] MAJUMDER S, NATEKAR PV, RUNKANA V. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate [J]. Computers and chemical engineering, 2009(33), 1141-1152.

[6] SADMEZHAAD S K, FERDOWSI A, PAYAB H. Mathematical model for a straight grate iron ore pellet induration process of industrial scale [J]. Computational materials science, 2008(44), 296-302.

[7] 储太山:基于过程模拟和多目标评价的氧化球团链算机优化计算[J]. 烧结球团,2015,40(4),24-27.
CHU Taishan. Optimized computation of oxidized pellet traveling grate based on a combination of process simulation and multi-criterion evaluation [J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(4), 24-27.

(下转第172页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

al surface and air leakage rate of sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):18 – 21;34.

[7] 吴颖,金永龙. 烧结机本体漏风率在线测量技术及应用 [J]. 烧结球团,2008,33(4):9 – 12.
WU Ying,JIN Yonglong. The on-line measuring technology about the leakage ratio of sinterstrand body and its application [J]. Sintering and Pelletizing,2008,33(4):9 – 12.

[8] 姜丽娟. 烧结漏风率在线软测量模型及诊断专家系统的研究 [D]. 长沙:中南大学,2013.
JIANG Lijun. Research on on-line soft-sensing model and diagnostic expert system of air leakage rate during sintering [D]. Changsha: Central South University,2013.

[9] 何志军,李金莲,张立国,等. 烧结机系统漏风综合治理技术 [J]. 鞍钢技术,2016(5):1 – 7;25.
HE Zhijun, LI Jinlian, ZHANG Liguo, et al. Comprehensive improving technology for air leakage on sintering system [J]. Angang Technology,2016(5):1 – 7;25.

[10] 张安煜. 烧结机漏风控制技术研究 [D]. 山东:青岛大学,2020.
ZHANG Anyu. Research on air leakage control technology of sintering machine [D]. Shandong: Qingdao University,2020.

[11] 郝永寿. 太钢烧结机漏风率检测与漏风治理实践 [J]. 山西冶金,2016,39(5):78 – 80.
HAO Yongshou. Leakage rate detection and governance of TISCO sintering machine [J]. Shanxi Metallurgy,2016,39(5):78 – 80.

[12] 程翠花,范兰涛,甄常亮,等. 唐钢烧结机漏风率的测定与漏风治理 [J]. 河北冶金,2017(6):36 – 38.
CHENG Cuihua,FAN Lantao,ZHEN Changliang,et al. Air leakage rate detection and air leakage treatment of sintering machine in Tangsteel [J]. Hebei Metallurgy,2017(6):36 – 38.

[13] 张士超,仪垂杰,郭健翔,等. 一种分布式监控系统的设计与实现 [J]. 微计算机信息,2007(7):98 – 100.
ZHANG Shichao, YI Chuijie, GUO Jianxiang, et al. Design and realization of distributed monitoring system [J]. Microcomputer Information,2007(7):98 – 100.

[14] 陈少飞,刘小杰,李宏扬,等. 高炉炼铁数据缺失处理研究初探 [J]. 中国冶金,2021,31(2):17 – 23.
CHEN Shaofei,LIU Xiaojie,LI Hongyang,et al. Preliminary study on missing data processing of blast furnace ironmaking [J]. China Metallurgy,2021,31(2):17 – 23.

[15] 张峰,申理仁,曹胜年,等. 降低烧结机漏风率的制造工艺研究 [J]. 烧结球团,2013,38(5):8 – 10.
ZHANG Feng,SHEN Liren,CAO Shengnian,et al. Study on manufacturing process for reducing sinter machine air leakage [J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(5):8 – 10.

(上接第156页)

[8] THURLBY J A. Energy cost minimization in grate/kiln induration [J]. Metallurgical transactions B,1988,19:123 – 132.

[9] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 带式焙烧机焙烧温度分析研究 [J]. 烧结球团,2018,43(2):29 – 32;36.
LIU Piliang,ZANG Rihao,CUI Guimei,et al. Analysis and research on roasting temperature of travelling grate [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(2):29 – 32;36.

[10] 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(3):72 – 75.
ZHOU Wei. Optimal control of preheating and firing process of the traveling grate [J]. Metallurgical Industry Automation,2014,38(3):72 – 75.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net