

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.03.009

矿渣立磨生产工艺的动态控制系统研究

朱全, 韩飞坡, 黄鲁

(马鞍山学院智造工程学院, 安徽 马鞍山 243100)

摘要:矿渣立磨是矿渣微粉生产线的关键设备,运行中由于料层厚度不稳定,经常出现振动过大和堵料等异常情况,而且立磨是一个多变量、强耦合、响应慢的非线性系统,难以建立准确的数学模型。提出利用模糊控制技术对立磨进行动态控制,设计了针对料层厚度和立磨压差的动态控制系统;计算机仿真实验及现场实际应用效果表明,矿渣立磨动态控制系统有效地提高了立磨运行的平稳性和连续性,立磨运行异常的问题得以解决。

关键词:矿渣立磨;模糊控制;立磨压差;料层厚度

中图分类号:TP273;TQ172.632.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2021)03-0043-05

Study on the Dynamic Control System of the Slag Vertical Mill Production Process

ZHU Quan, HAN Feipo, HUANG Lu

(School of Intelligent Manufacturing Engineering, Maanshan University, Maanshan, Anhui 243002, China)

Abstract: The slag vertical mill is the key equipment of slag powder production line. Due to uneven material layer thickness, abnormal situations such as excessive vibration and material blocking often occur in production. Moreover, the vertical mill is a nonlinear system with multivariable, strong coupling and slow response, and it is difficult to establish an accurate mathematical model. In this paper, we propose the fuzzy control technology be used to control the vertical mill dynamically, and the dynamic control system be designed with respect to the uneven material layer thickness and the vertical mill's pressure difference. The results of computer simulation and actual application show that the dynamic control system of the slag vertical mill can effectively improve the stability and continuity of vertical mill production, and the problem of abnormal operations of the vertical mill has been solved.

Keywords: slag vertical mill; fuzzy control; vertical mill pressure difference; material layer thickness

0 引言

矿渣微粉源于高炉水渣的二次利用,使原本为炼铁副产品的工业废弃物高炉水渣,经过矿渣立磨研磨后成为矿渣微粉,广泛应用于高层建筑、水利工程、交通基建等领域。矿渣立磨是矿渣微粉生产线的关键设备,集研磨、烘干、选粉、输送等一系列工序于一体,是一个多变量、强耦合、响应慢的非线性系统。矿渣立磨的运行受喂料量、料层厚度、磨辊压力、磨内压差、选粉机转速、出口气体温度等诸多因素的影响。目前,我国矿渣微粉生产线已基本实现了分布式控制系统(DCS)的自动化,可实时监测各个运行参数,而工艺参数仍然由人工控制,对

于现场操作人员的经验和水平依赖性较高。由于人工控制具有一定的主观性和随意性,矿渣微粉生产经常出现立磨振动过大、立磨吐渣、堵料等异常情况,严重影响生产的连续性。

国内外学者对矿渣立磨的生产模型已进行了若干研究。文献[1]提出了用PID模糊控制设计立磨料层厚度的智能控制方案;文献[2]利用最小二乘支持向量机的方法,对立磨系统建立了料层厚度的间接测量模型;文献[7]采用小波神经网络建立了立磨生料粉磨过程的生成指标预测模型,实现了对粉磨过程中关键变量的优化设定。以上研究仅限于研究某单一变量或局限于仿真设计阶段。实际上,矿渣立磨是一个多变量的非线性系统,难以

收稿日期:2021-04-15

基金项目:马鞍山学院校级科研基金项目(QS2020014)。

作者简介:朱全(1981—),男,安徽马鞍山人,讲师,硕士,研究方向:机械工程、冶金工程。

建立精确的数学模型,特别对立磨有直接影响的料层厚度更是难以准确测量。鉴于此,本文分析了矿渣微粉各工艺参数对立磨的影响,设计了基于压差模糊控制的矿渣立磨动态控制系统,以有效解决立磨运行异常的问题,提高立磨运行的平稳性和连续性。

1 矿渣微粉生产工艺流程

矿渣微粉由皮带输送机、中间仓、入磨皮带秤、立磨主机、收粉器、空气斜槽、斗提机、成品库、热风炉以及冷却润滑系统等组成。存放在原料堆场的矿渣经皮带机输送到中间料仓,再落入到入磨皮带秤上,按照设定的喂料量进入回转锁风阀,经立磨溜管落到磨盘中心,磨盘旋转产生的离心力将矿渣向外甩到磨盘中心区和磨边缘之间的磨床上,在磨床上形成一定厚度的料层。磨辊对磨床上的矿渣加压对矿渣产生碾压和剪切的作用,使之研磨成超细粉末,再由离心力甩到磨盘边缘的挡风环。在主排风机的作用下,磨内的高温气体快速上升,将研磨后的超细粉末带入磨机顶部的选粉机,同时进行筛选和烘干。通过选粉机的超细粉末作为成品进入收粉器,经空气斜槽和斗提机输送到成品库储存。未通过选粉机的粗粉再次落入到磨盘上继续研磨。没有被高温气体带起的矿渣,通过立磨的溢流装置排出,由外循环斗提机经除铁器筛除铁粉后与原料一起再次进入立磨研磨。磨内的高温气体由热风炉提供。矿渣微粉生产工艺流程如图 1 所示。

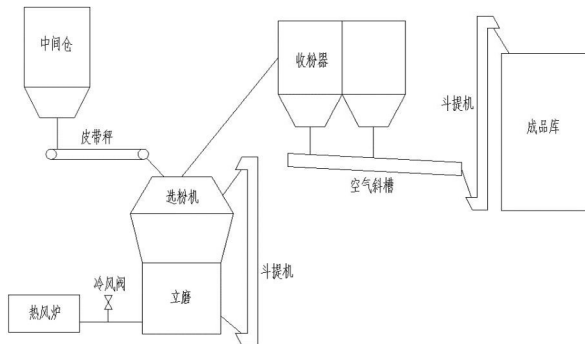


图 1 矿渣微粉生产工艺流程

2 矿渣微粉生产工艺参数的控制要求

矿渣微粉生产的主要工艺参数包括:进料量、立磨振动、立磨压差、入磨及出磨气体温度、磨辊压力、选粉机转速等。当工艺参数在合理范围内时,磨内则会形成动态平衡,立磨运行状态稳定连续,生产效率和产品质量才可得以保证;当其中某一种

或几种工艺参数超出合理范围时,磨内平衡被破坏,则会引起立磨工作异常,主要表现为立磨振动过大、立磨吐渣、堵料以及压差不稳定。尤其是料层厚度变化对立磨的平稳运行影响较大,立磨的振动值和磨内压差也随之产生较大波动。料层厚度在立磨工作时随着磨内工况不断发生变化,其数值难以准确检测。为了将料层厚度稳定在合理范围内,须根据磨内压差变化及时调整进料量,同时调节入磨冷风阀开度控制系统风量,使立磨压差与实际工况匹配。以下简述主要工艺参数对立磨的影响。

1) 进料量。稳定的进料量可在磨床上形成厚度均匀适宜的料层。料层太薄,立磨振动加大;料层太厚,立磨负荷增加,生产效率降低,容易引起饱磨、吐渣。以年产 60 万 t 立磨为例,合适的料层厚度为 55~65 mm,对应的进料量为 80~95 t/h。

2) 立磨压差。立磨压差指的是磨机出口压力与入口压力之差,主要受进料量、系统风量的影响。立磨压差大,表明磨内矿渣增多,磨机负荷过大,生产效率降低,容易引起吐渣、堵料;立磨压差小,表明磨床较薄,立磨振动加大。以年产 60 万 t 立磨为例,应当将立磨压差控制在 3 500~4 500 Pa 为宜。立磨压差主要通过进料量和入磨冷风阀进行控制。

3) 入磨及出磨气体温度。立磨的高温气体由热风炉提供,用于对矿渣中的水分进行烘干。一般入磨气体温度控制在 200~300 °C,出磨气体温度控制在 80~100 °C。温度太高,收粉器滤袋的使用寿命受影响;温度太低,矿渣中的水分无法充分烘干。气体温度主要由入磨冷风阀控制。

磨辊压力磨辊压力是指提供给磨辊碾压矿渣的液压系统压力,以年产 60 万 t 立磨为例,磨辊压力一般设定为 8~10 MPa。若料层较薄,磨辊压力较大,则会引起立磨振动加大;若料层较厚,磨辊压力较小,粉磨不充分,则会造成堵料、吐渣。

3 矿渣立磨动态控制方案与控制器设计

3.1 立磨总体控制方案

立磨控制系统包括手动模式和自动模式 2 种工作方式。手动模式即人工操作模式,用于立磨启动和处理异常工况;自动模式即动态控制系统,由数据采集模块、立磨压差设定模块、立磨压差控制模块组成,用于立磨启动后的连续运行。

在连续运行阶段,料层厚度和磨内负载主要通过立磨压差体现,所以立磨动态控制系统重点对磨内压差进行动态控制。系统实时监测立磨振动、立

磨压差、入磨及出磨气体温度、磨辊压力等工艺参数, 以一定的时间间隔为采样周期对这些数据进行采样。工艺参数在正常范围内, 启用自动模式, 若为异常则切换到手动模式。在自动模式下, 系统根据立磨压差设定值与监测值之差, 利用料层控制压差模糊控制器和压差控制模糊控制器进行模糊推理分析, 分别输出入磨进料量增量和入磨冷风阀开度增量, 作用于入磨皮带秤和入磨冷风阀, 将立磨料层厚度和磨内负载控制在正常范围内, 保证立磨系统的连续平稳运行。总体控制方案如图 2 所示。

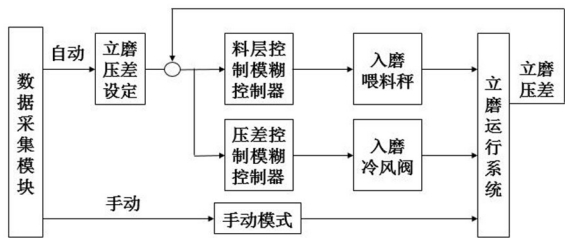


图 2 立磨动态控制总体方案

3.2 立磨压差设定模块

立磨压差设定的依据是进料量和入磨及出磨气体温差的实时数据, 根据现场操作经验, 将进料量和入磨及出磨气温温差的工作范围分为较小、正常、偏大 3 档, 再根据参数分档确定立磨压差的设定规则和量化值(表 1)。

表 1 压差设定值 Pa

进料量/(t · h ⁻¹)	入磨与出磨气温温差/℃		
	较小 (60~80)	正常 (80~100)	较大 (100~120)
较小(80~85)	4 500	4 250	4 000
正常(85~90)	4 250	4 000	3 750
较大(90~95)	4 000	3 750	3 500

3.3 立磨压差模糊控制器设计

立磨压差控制模块采用模糊控制算法, 通过 2 个模糊控制器分别调节入磨进料量和冷风阀开度, 将立磨料层厚度和磨内压差控制在合理范围内。以料层控制模糊控制为例, 说明该模糊控制器的设计过程。料层控制模糊控制器以系统偏差即压差设定值和现场反馈值之差 e 及其变化率 c 作为输入, 输出为进料量的增量, 作用于入磨皮带秤, 以此来调节料层厚度(图 3)。

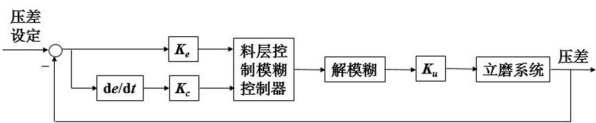


图 3 料层控制模糊控制系统结构

立磨压差波动范围为 3 500~4 500 Pa, 因此系

统偏差 e 的论域为 $[-500, 500]$, 偏差变化率 c 的论域为 $[-50, 50]$, 入磨皮带秤的调整幅值为 2.5 t/h, 所以进料量增量 u 的论域为 $[-2.5, 2.5]$ 。系统偏差、偏差变化率以及进料量增量语言变量分别为 E 、 C 和 U , 语言值分别定义为 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 记作 {NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL}, 输入和输出模糊子集量化论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 由此可得系统偏差 e 、偏差变化率 c 以及进料量增量 u 的量化因子分别为

$$K_e = \frac{N_e}{X_e} = \frac{6}{500} = 0.012 \quad (1)$$

$$K_c = \frac{N_c}{X_c} = \frac{6}{50} = 0.12 \quad (2)$$

$$K_u = \frac{N_u}{X_u} = \frac{6}{2.5} = 2.4 \quad (3)$$

根据现场操作经验以及控制目标, 对输入、输出语言值制定控制规则。例如: 如果系统偏差为“PL”, 且偏差变化为“NS”, 那么输出进料量增量为“NM”。按照控制规则的写法, 输入为 2 个语言变量, 每个变量有 7 个语言值, 对应 49 条控制规则, 如表 2 所示。

表 2 控制规则表

进料量增量	偏差						
	PL	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
偏差变化率	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZE
	NM	NL	NM	NM	NS	NS	ZE
	NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	PL	ZE	PS	PS	PM	PM	PB

根据玛达尼模糊推理合成规则以及模糊控制器的输入系统偏差 E 和偏差变化率 C , 求出输出语言变量在论域上的模糊集合 U , 即

$$U = (E \times C)^{\circ} R_{E \times C \rightarrow U} \quad (4)$$

式中: $R_{E \times C \rightarrow U}$ 表示按照控制规则从 $E \times C$ 到 U 的所有模糊关系的集合; “ \circ ” 表示合成运算。

对模糊集合 U 采用重心法进行解模糊, 即

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^{13} \mu(u_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^{13} \mu(u_i)} \quad (5)$$

式中: u_i 为在量化论域上的输出值; $\mu(u_i)$ 为隶属度函数值; u^* 为解模糊结果。最终作用于喂料秤的是模糊控制器的输出值与比例因子 k_u^* 的乘积, 即

$$u = k_u^* \cdot u^* \tag{6}$$

式中:比例因子 k_u^* 与进料量增量 u 的量化因子 K_u 互为倒数。

压差控制模糊控制器主要通过入磨冷风阀调节系统风量,对立磨压差进行动态控制,该控制器的设计方法与料层控制模糊控制器基本一致。

4 矿渣立磨动态控制系统仿真研究

立磨连续稳定喂料时,喂料量可视为阶跃函数作为系统输入,立磨压差作为系统输出,对矿渣立磨采集工艺参数进行分析,结合现场操作经验,系统输入和输出可以看作比例环节、惯性环节和延迟环节的组合,其传递函数近似为

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{0.85}{60s + 1} e^{-15s} \tag{7}$$

式中: K 为比例系数; T 为惯性时间常数; τ 为延迟时间常数。

利用 Matlab 模糊逻辑工具箱在 Simulink 环境下设计系统仿真框图(图 4),对 FLC 模糊控制器设定相应的量化因子和模糊控制规则,建立近似的仿真模型。通过 Matlab 提供的 OPC 接口程序,将现场采集的工况数据从 SQL 历史数据库导入到 Matlab 程序中,对仿真模型和实际工况进行比较验证。仿真模型验证输出参考图 5。

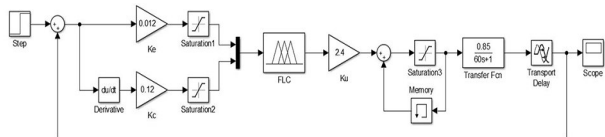


图 4 系统仿真框图

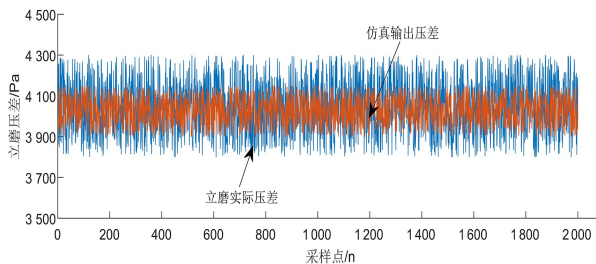


图 5 仿真模型验证输出

以现场实际喂料量作为仿真模型的基点,根据压差的变化对喂料量进行实时调节,将立磨压差变化控制在 3 500~4 500 Pa。在同一历史时间段内观察立磨实际压差、模糊控制器输出压差的变化,比较发现,在模糊控制器的作用下,系统输出压差与立磨历史数据压差处于同一范围内,并且仿真系统输出压差的变化幅度更小,仿真模型输出可近似替代实际输出。

5 矿渣立磨动态控制系统的工程应用

矿渣立磨动态控制系统的控制规则是根据现场操作人员的经验而制定的,由于各个生产现场矿渣立磨的实际工况存在一定差异,因此在正式启用控制系统之前须根据生产现场的实际工况对控制规则做适当调整,使控制规则与实际工况相匹配。

矿渣立磨动态控制系统的输出为入磨皮带秤和入磨冷风阀的增量,最终转化为喂料量和冷风阀开度的给定值。为避免某些时刻控制系统输出的突变影响系统给定值的平稳性,对系统输出给定值设定阈值,滤除不合理的输出,保证系统运行的平稳性。

将矿渣立磨动态控制系统投入到某钢厂矿渣微粉生产线,从实际效果来看,控制系统能根据立磨实时工况及时调整矿渣喂料量和磨内压差,立磨振动和磨内压差较为稳定(图 6、7),未出现因振动过大和堵料而强制停机的现象。

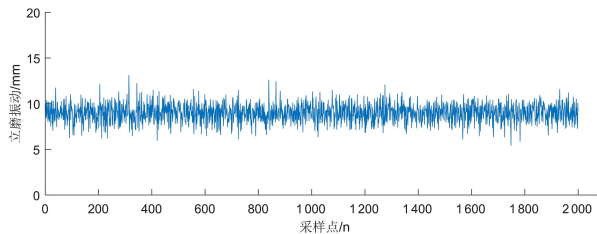


图 6 动态控制下的立磨振动

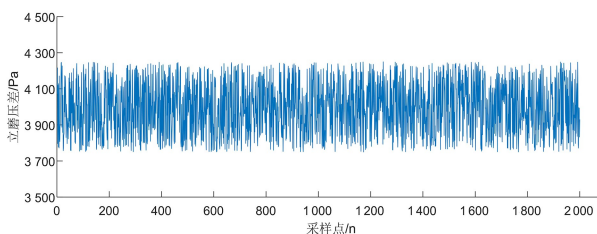


图 7 动态控制下的磨内压差

6 结语

本文深入分析了矿渣微粉生产工艺流程以及主要工艺参数对矿渣立磨运行的影响,针对矿渣立磨“多变量、强耦合、响应慢、非线性”的特点,提出了利用模糊控制技术对立磨进行动态控制,设计了针对料层厚度和立磨压差的动态控制系统,通过对矿渣喂料量和入磨冷风阀进行动态调节,保证立磨平稳连续运行。计算机仿真试验及现场实际应用效果表明,矿渣立磨动态控制系统有效地提高了立磨运行的平稳性和连续性,立磨因振动过大而强制停机的的问题得以解决,摆脱了过去只能依靠人工操作的束缚,对矿渣微粉全过程生产自动化具有参考价值。

参考文献:

- [1] 王立佳,李勇.矿渣微粉立磨料层厚度智能控制系统的研究[J].科技与创新,2016(5):70-71.
- [2] CAI X,MENG Q,LUAN W. Soft sensor of vertical mill material layer based on LS-SVM[C]//2nd International Conference on Measurement,Information and Control. Harbin:Harbin University Science & Technology,2013:22-25.
- [3] 王孝红,刘钊,王卓,等.矿渣粉磨智能控制系统的研究及应用[J].控制工程,2012,19(2):240-244+248.
- [4] LIU W,HUI L,XU P, et al. Intelligent simulation computation and finite element intelligence analysis for key component of low-vibration vertical mill[J]. Acta Microscopica,2019,28(2):230-240.
- [5] 席爱民.模糊控制技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [6] 李睿,万安平.矿渣粉磨生产工艺智能调控系统研究与应用[J].科学技术与工程,2020,20(11):4279-4287.
- [7] 林小峰,钱哲,梁金波.立磨生料粉磨过程建模与优化设定[J].化工自动化及仪表,2016,43(2):154-158.
- [8] 黄超,李绍铭.矿渣微粉智能控制系统的研究[J].科技与创新,2016(4):68+70.

(上接第42页)

10月开展旅游活动;而甘洛和越西则可以重点打造十一月旅游,例如“彝历年”假期。

3)从全年数据来看,综合人体舒适度气象指数和度假气候指数分布可以得出每年的9月份属于凉山州北部最佳的旅游月,此时人体舒适度气象指数在0级左右,并且度假气候指数达到适宜等级及以

上的天数占到全月的60%以上。

本文中的度假气候指数仅计算了2009—2011年的逐日数据,时间较短,不能更准确地反映北部4县的度假气候指数分布;此外,为方便计算度假气候指数,采用了日最高气温代替有效温度,这也造成了度假气候指数的精准度还有待提高。

参考文献:

- [1] 郑自君,高笃鸣,王建婧,等.西昌养生休闲气象舒适度气候评价[EB/OL].(2015-10-23)[2021-01-02]. <http://www.doc88.com/p-3807763307838.html>.
- [2] 向红琼,谷晓平,郑小波.贵州省旅游气候研究与应用[M].北京:气象出版社,2014.
- [3] 黄茜,鲍文.凉山州乡村旅游发展的气候影响因素分析[J].农业技术与装备,2018,342(6):78-80.
- [4] 中国气象服务协会.T/CMSA—0008—2018:养生气候类型划分[S].北京:气象出版社,2018.
- [5] 四川省质量技术监督局.DB51/T583—2006:气象生活指数[S].成都:四川质量技术监督出版社,2006.
- [6] 钱妙芬,叶梅.旅游气候宜人度评价方法研究[J].成都气象学院学报,1996(3):128-134.
- [7] 郭成香,石风云.四川省夏季气候舒适度的探讨[J].成都气象学院学报,1997(3):234-240.
- [8] 鲍美香.云南省临沧市临翔区旅游气候资源分析[J].中低纬山地气象,2018,42(4):69-73.
- [9] 谢东志.越西县水观音旅游景区气候舒适度研究[J].中低纬山地气象,2021,45(1):105-107