

第十四届国际选矿会议文集

(第 四 卷)

国外金属矿选矿编辑部

一九八四年

第四卷 模型与模拟

目 录

一、一些操作参数对自磨回路的影响及其用于控制时的意义

The effect of some operating variables on autogenous grinding circuits and their implication for control, G.R.Duckworth, A.J.Lynch [澳大利亚]…… (1)

二、工业磨碎-分级设备应用过程分析、模拟和最佳化的实际效果

Practical benefits obtained from Process analysis, simulation and optimization applied to industrial comminution and classification units, D.Hodouin, F.Fiamant, M.D.Everell [加拿大]…… (14)

三、浮选厂的单元作业、模型的建立和计算机辅助设计

Unit operations, modeling and computer aided design of flotation plants A.J.Niemi, S.Kurronen, et al [芬兰]…… (25)

四、磨矿-分级-浮选综合模型研究

The development of a combined comminution-classification flotation model, A.C.Apling, D.H.Montaldo, P.A.Young [英国]…… (39)

五、符诺斯选矿厂硫化矿磨矿多变量控制的经验

Experiences in multivariable control of sulphide ore grinding in Vuonos concentrator, A.Niemi et al [芬兰]…… (53)

六、圆锥破碎机过程性能模型

A process performance model for cone crushers V.K.Karra [美国]…… (65)

七、磨矿机-旋流分级机回路的改进—实例探讨

Improvement in mill-cyclone classifier circuit—A case study, T.C.Rao et al [印度]…… (75)

八、干式选矿回路的最佳控制

Optimal control of dry mineral processing circuit, P.Jacquemin et al [法国]…… (83)

九、一个微观的流体动力学的浮选模型及其在浮选中的应用

A micro-hydrodynamic flotation model and its application to bubble flotation Process, M.Nonaka et al [日本]…… (94)

十、铁矿石浮选回路的计算机模拟

The computer simulation of an iron ore flotation circuit, M.Nonaka [日本]…… (110)

十一、浮选槽动力学模型的建立兼评自动控制

Dynamic modeling of a flotation cell with a view toward automatic control,
O.A.Bascur, J.A.Herbst [美国]..... (122)

十二、论水泥磨机的控制工程模型

Dry grinding with non-metallic media: An extension of the bond grindability test, L. Keviczky et al [匈牙利] (139)

编 者 的 话

《第十四届国际选矿会议论文集》是根据1982年10月于加拿大多伦多市召开的第十四届国际选矿会议发行的英文版文集而译出出版的。全集共分七册出版。该文集涉及内容广泛,从各个方面反映了近年来国际选矿领域的重大技术进展,值得我国选矿界参考和学习。

《国外金属矿选矿》编辑部组织国内有关专家、学者译出这样大的会议全集是在我国选矿史上的初次尝试。全集出版得到一些单位赞助,在此谨向有关单位和同志表示谢意,由于我们水平有限,书中错误和不妥之处难免,敬请指正。全集由郑飞主编,统一校对。

一些操作参数对自磨回路的影响及其用于控制时的意义

G. A. Duckworth, A. J. Lynch

(澳大利亚昆士兰大学尤利斯·克鲁茨尼特矿物研究中心)*

提 要

自磨和半自磨回路的适应性差,其工作性能在很大程度上取决于给入的矿石特性。给矿特性的变化会在磨矿作业中产生很不利的变化,并且它还受其它操作参数,如磨矿机载荷、钢磨矿介质的含量以及磨矿机内固体含量百分数的影响。

本文介绍一种根据颗粒的碎裂速度和排出速度对工业规模磨矿回路进行分析的简单而系统的方法。用这种方法分析了四种不同的工业规模的回路,两个全自磨和两个半自磨。根据这种分析和对回路动态行为的研究表明,三个参数,即磨矿机的新给矿的粒度组成,磨矿机载荷和磨矿机内固体含量百分数,对回路的工作是重要的。

新给矿的粒度组成的控制对于自磨和半自磨回路的最佳工作性能都是很关键的。给矿粒度组成的大量变化对于要一段磨矿回路具有严重的影响,从经济上看就可能趋向于用两段磨矿或常规磨矿回路。如果能连续测量给矿的粒度组成,就可以用适当调整新给矿速度(即磨矿机载荷)和加水速度的方法补偿给矿粒度组成的小量变化。

本文还讨论了有关结果对于计算机帮助控制磨矿回路的意义。

前 言

第一段自磨回路,尤其是当设计用于接受原矿给矿时,由于降低了投资,提供了很大的经济效益,但是,它们对给矿特性的变化也很敏感。这些变化在常规磨矿回路里比较容易处理,而对第一段自磨磨机的操作就会出现严重困难。对自磨回路控制系统的开发研究落后于常规磨矿回路控制系统的研究,这是由于缺乏操作参数对磨矿工作性能影响的知识和不能在线测量主要操作参数,如磨矿机载荷和新给矿的粒度组成的结果。

第一段自磨回路的自动控制一直集中在磨矿机功率消耗上,对于通行的条件来说,或者保持磨矿机功率为最大值,或者由电动机额定值确定的最大值。这通常是通过调节一个参数,即磨矿机给矿速度来达到。已经很好地建立了按功率消耗的变化速度调节磨矿机新给矿速度的控制系统,并且由威廉森^[1] (Williamson) 和弗卢克^[2] (Flook) 介绍过了。自磨和半自磨控制的一个复杂特点是,超过某一临界载荷时,磨矿作业进入不稳定区,在这一区域里磨矿速度下降,磨矿机很快会“胀肚”。临界载荷通常发生在充填率从40%到50%之间。测量磨矿机功率消耗的变化速度(或者测量电动机电流的变化速度)不足以确定磨矿

* Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre University of Queensland.

机的工作制度是稳定的，还是不稳定的。在载荷不变的情况下，磨矿机载荷的固体含量百分数或者载荷的粒度组成在一个比较窄的范围内变化，会引起功率消耗的改变。矿石特性变得易于碎裂和载荷下降，或者矿石变得难磨而使载荷增加，超过临界载荷，都会引起功率消耗下降。在第一种情况下，要求提高磨矿机的给矿速度，而在第二种情况下，要求速降低磨矿机的给矿速度。为了克服这一问题，一些操作人员在控制系统中引入了对磨矿机载荷的测量，即压头，轴承压力或磨矿机音响。功率消耗的变化速度与磨矿机载荷的变化速度联合，就可以确定磨矿机的工作区域。然后，磨矿机的新给矿速度可以通过这些测量的简单反馈来控制。

用这种控制方式产生两个问题。一个涉及反馈控制的性质和自磨机在不稳定区的行为。这一问题可分成两部分考虑。首先，有一个反馈控制的共性问题，即被控制的参数的变化必须产生在采取校正作用之前。于是，对于与新给矿速度相比具有大载荷能力的自磨机，在新给矿的特性变化与在功率消耗上观测到其充分作用时间之间存在很大的时间滞后；其次，磨矿能力在不稳定区里下降得很快。因此，为了防止磨矿机过载，又要保持磨矿机的驱动功率接近最大值，需要给矿速度控制器具有很高的增益。给矿特性的变化对于磨矿机载荷的碎裂特性有很大影响，为了补偿这种变化，可能需要不断和显著改变给矿速度。给矿速度变化大，导致回路工作不稳定，而且这些变化会传递到分级机的给矿，然后到磨矿回路的产品。图1表示出在工业规模操作时的旋流器溢流粒度的典型变化，这里的给矿速度是用功率消耗控制的。

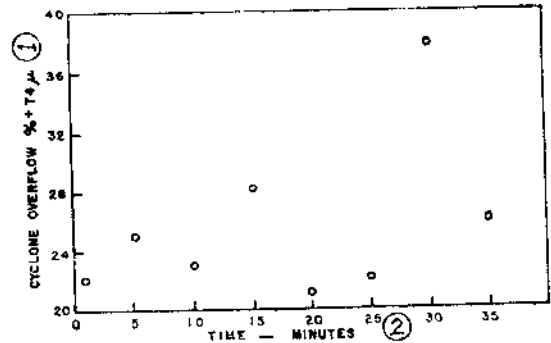


图1 当自磨机给矿速度用功率消耗控制时，旋流器溢流粒度的典型变化
1—旋流器溢流+74微米%；2—时间，分

第二个问题是更本质的，它涉及到回路的最佳控制目标。这不仅与磨矿回路的工作性能有关，而且还取决于下一阶段作业的性质，并且常常包括为了达到最高回收率的最大磨矿细度或者最大的处理能力。

如果要达到最佳目标，必须建立给矿特性（如矿石比重和给矿的粒度组成）与磨矿机参数（如磨矿机载荷，磨矿机内的固体含量百分数和钢磨矿介质的含量）之间的关系。因此，如果控制目标是最大的磨矿细度，并且给矿的粒度组成发生变化，磨矿机的给矿速度、磨矿机的加水速度以及可能的磨矿机的转速之间的组合就要用一个适当的数学模型来计算，以便在新的给矿条件下保持磨矿细度。这种概念的系统图示于图2。钢磨矿介质的含量只能作为长期控制参数来考虑，但是如果可以事先很好地预测到矿石的特性，那么它就是有用的。

用这种方式的自磨回路前馈控制，需要在线测量恰当的给矿特性以及适用于回路的适当数学模型。尽管现在还不是这种情况，但是在线测量仪表的现代发展和以计算机为基础的控制

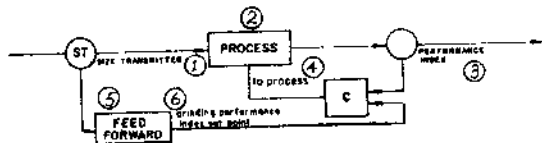


图2 引入给矿粒度测量时的前馈控制系统图
1—粒度传感器；2—生产过程；
3—工作性能指标；4—到生产过程；5—前馈；6—磨矿工作指标给定值

制系统用于磨矿回路，已经迅速促进实时最佳控制实现的可能。本文研究几个自磨和半自磨回路的工作性能，并介绍推导新给矿的特性与回路主要操作参数之间定量关系的方法。

给矿粒度组成变化的影响——回路的动态行为

长期以来，人们认识到给矿粒度组成是影响自磨和半自磨回路工作性能的一个重要参数。在这些回路中，磨矿介质必须不断地从给矿中再生，并且磨机给矿特性的变化会很快传递到磨矿机载荷和磨矿机产品。给矿里的大块起着中间粒级的磨矿介质的作用，以控制给矿粒度组成为目标的一般应用，是把给矿分成粗的和细的粒级，这些粒级按控制的比例给入磨矿机。迪格尔^[3] (Dgre) 建议在可能的地方使用这种方法，但是他强调需要仔细规定和控制生产指标。当矿山生产难以产生足够量的大矿块介质时，必须重新确定生产指标，或者由于细粒级的集结将会给生产带来损害。这种性质的问题已经导致在一些装置上放弃使用这种方式。

只是在近期才发展了一种在皮带运输机上连续测量大矿块粒度组成的方法。这种技术已经由加拉格尔^[4] (Gallagher) 详细介绍过，并且在一些工业规模的磨矿回路上已经装设了这种仪表的工业产品。现在有可能以定量的方式考察给矿粒度的变化对回路工作性能的影响。

给矿粒度组成的变化可能由于采矿工作的变化、储矿仓和料堆的偏析，粗碎作业的变化，设备故障以及流槽与给矿机被堵塞而引起。这种变化可能持续时间很长，如在采矿发生变化的情况下；也可能很短，如在矿仓里的偏析情况下。用下面两种情况的研究来说明粒度组成变化的影响。第一种情况表明采矿生产变化的结果。第二种情况表明由于料堆的偏析的结果引起粒度组成短时变化的影响。

全自磨回路时的给矿粒度变化

佩库-沃尔塞德 (Peko-Wallsend) 有限公司选矿厂位于澳大利亚北部 Territory 的 Tennant Creek 以西大约 35 英里的 Warrego。选矿厂使用一段自磨和浮选方法，每天处理铜—铋—金矿石 2400 吨。主要脉石矿物是石英—磁铁矿，矿石比重约为 4。矿石经过两台串联的颚式碎矿机在堆放地面上之前，破碎到规定的 152 毫米。一台皮带运输机把矿石从料堆处运回并送到两个 1000 吨的地下储矿仓。磨矿回路包括一台直径 5.11 米、长 5.18 米（内部尺寸）的第一段自磨机。该磨矿机用一台 2500 千瓦电动机驱动，转速为 13.9 转/分（临界转速的 72.8%），使用橡胶衬里。矿石通过间隔为 13.4 毫米的机内格条排出，然后到外面的一台滚筒筛。滚筒筛装有 10 毫米方形孔筛网，筛上产品用返回皮带运输机系

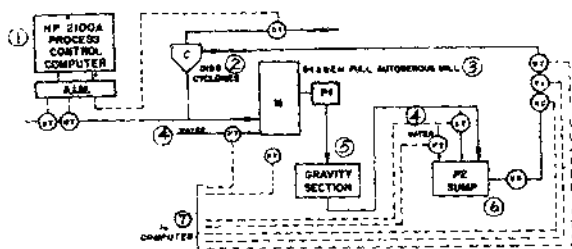


图3 Warrego 的磨矿回路和仪表的系统图。

磨矿机为 5.1×5.2 米全自磨，水力旋流器是 D15 B 型

1—HP2100A 过程控制计算机；2—D15B 型水力旋流器；

3—5.1×5.2 米全自磨磨矿机；4—水；5—重选车间；

6—P2 储液池；7—去计算机；RC—RAMSAY 线圈；

VS—变速电机；DT—密度变送器；FT—流量变送器；

L—T 液位变送器；PT—功率变送器；ST—粒度变送器；

WT—重量变送器；ATM—模拟量输入模块

统，返回到磨矿机的给矿端，筛下产品经过泵，送到重选厂回收粗粒黄金。从重选厂返回的矿浆用变速泵，送到一组 D15B 型水力旋流器。水力旋流器的溢流送去浮选。

磨矿机新给矿的粒度组成用一台 Foxboro PSD 型粒度仪连续监控。第一段磨矿回路的流程和仪表，示于图 3。

磨矿机的控制策略要求工作在有电动机额定值规定的固定驱动功率，并且要有适当的安全系数，驱动功率由磨矿机给矿速度控制。给矿粒度组成的变化对磨矿回路的影响，示于图 4。

直到时间 A 以前，该回路一直工作在稳定状态，具有恒定给矿粒度和循环负荷。到时间 A，给矿开始变得更细，循环负荷开始增加，而驱动功率开始下降，这表示磨矿机里的磨矿速度在降低。对这种情况的解释是，由于给矿中的粗矿块减少，磨矿机载荷中的粗矿块也减少，因为大矿块的表面积减少使磨剥碎裂速度下降。由于磨矿介质减少，细颗粒的劈裂擦洗速度下降。在恒定给矿速度情况下，愈来愈多的细颗粒进入磨矿机，但不能被磨碎，小于格条筛孔尺寸的物料迅速从磨矿机里被冲出去，但由于太粗还不能到旋流器的溢流中去。这种物料本身对于进行有效磨矿来说，又太细，于是很快在循环负荷和磨矿机载荷里集结。在时间 B 处，操作人员增加向磨矿机的给水速度，试图使磨矿机返回到被控制的状态。这种做法有从磨矿机里把细粒矿石冲出去的作用，也许会有助于把问题限制在比较短的时间内。在给矿继续是细的情况下，这种方法将不起作用。在时间 C 处，操作人员已经降低了磨矿机的给矿速度。在常规磨矿回路中，当循环负荷增加的情况下，通常使用这种方法，这里的磨矿介质在数量和质量上都基本上是恒定的。在目前情况下，这种方法不可能校正这种状态，因为这种措施不能改变给入磨矿机的大矿块介质的数量。现在，操作工进退两难，如果往磨矿机中添加钢介质，当矿石特性又变得有利于全自磨时，就不容易把钢介质取出来。钢介质的存在很可能使磨矿变粗，会异致黄金的回收率下降。另外，除非具有早已准备好的钢介质，否则在钢介质变得充分有效以前，有一个“磨损”时间。另一方面，在现在的给矿粒度组成情况下，回路工作是不经济的。

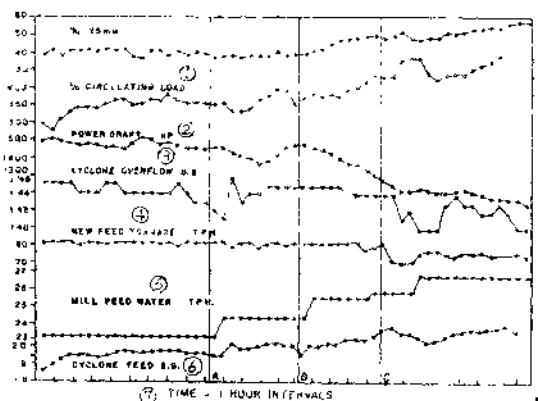


图 4 给矿粒度持续变化对磨矿回路的影响

- 1—循环负荷，%；2—驱动功率，马力；
- 3—水力旋流器矿流比重；4—新给矿吨数，吨/时；
- 5—磨矿机给水，吨/时；6—水力旋流器给矿比重；
- 7—时间，间隔为 1 小时

半自磨回路时的给矿粒度变化

矿石在料堆和储矿仓中的偏析，能使磨矿机给矿的粒度组成产生很大的短期波动。在美国科罗拉多州的 AMAX Henderson 选矿厂观测到这种类型粒度变化的影响的实例。该厂每天处理 25000 吨钼矿石，主要脉石矿物是石英/花岗岩。矿石经铁路运到选矿厂，用一台 1.37×2.13 米旋回碎矿机，破碎到规定的 -170 毫米。经过破碎后的矿石堆放成三个料堆，每个料堆供给一台磨矿机。磨矿段包括三台内部尺寸为 8.53 米直径，4.27 米长的单段半自磨磨

矿机。磨矿机工作在临界转速的75%，每分钟10.9转，球的充填率为10%，最大钢球直径是127毫米。第3号磨矿回路用于产生浮选再磨回路所需的砾石，其内部装有间距为70毫米的格条。矿浆从中空轴提升装置排给12.7毫米振动筛。筛上产品送到砾石堆或由返回皮带运输机返回到磨矿机的给矿端。筛下产品到一组并列的8台D26B型水力旋流器。水力旋流器的溢流送到浮选，其底流返回到磨矿机。磨矿机新给矿的粒度组成用一台Foxboro PSD型粒度仪连续监控，用两个测量信道连续记录-25毫米%和-75毫米%。回路的流程和仪表示于图5。

在Henderson的控制策略是，控制磨矿机的新给矿速度使磨矿机工作在恒定的功率给定值。料堆高度的变化会导致给矿粒度组成的变化。回路处于自动控制下的给矿粒度变化的影响示于图6。

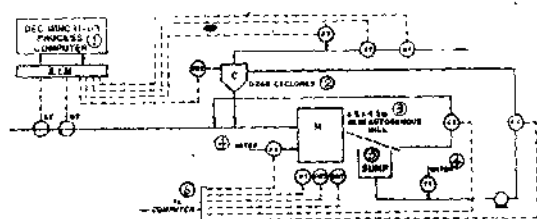


图5 Henderson的磨矿回路和仪表图(磨矿机是

8.5×4.3米半自磨，旋流器是D26B型)

1—DEC11—03过程控制计算机；2—D26B水力旋流器；
3—8.5×4.3米半自磨磨矿机；4—水；5—储液池；
6—接计算机；CT—电流变送器；DT—密度变送器；
FT—流量变送器；PT—功率变送器；PRT—压力变送器；
ST—粒度变送器；SOT—音响变送器；WT—重量变送器；
AIM—模拟量输入模块

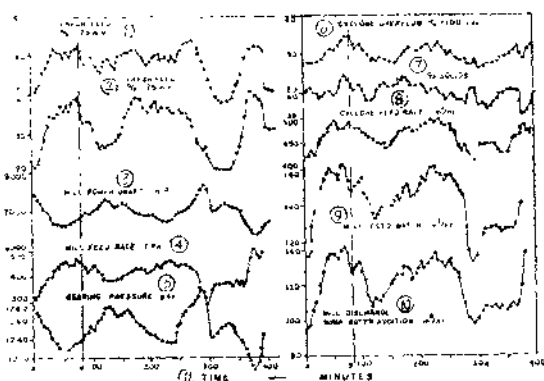


图6 半自磨在自动控制下的给矿粒度变化的影响

1—新给矿—75毫米%；2—新给矿—25毫米%；3—磨矿机驱动功率，马力；4—磨矿机给矿速度，吨/时；5—轴承压力，磅/英寸²；
6—旋流器溢流+100目%；7—固体含量%；
8—旋流器给矿速度，米³/时；9—磨矿机给水，米³/时；10—磨矿机排矿泵池添加水，米³/时；11—时间，分

在时间A处，给矿变得更细，驱动功率明显下降。不像在Warrego那样，Henderson的磨矿机装有许多钢磨矿介质，由于大矿块介质不足，磨剥速度比劈裂磨擦速度下降较大。磨矿细度由于磨擦碎裂作用而迅速减小，同时由于冲击和磨碎的作用，使大矿块物料比其给出磨矿机的速度更快地被破碎。磨矿机载荷(用排矿端轴承压力测量)由于已经磨碎的物料从磨矿机排出去而开始下降。控制系统对驱动功率的下降做出响应，提高磨矿机新给矿的速度。在时间B，给矿又变粗，驱动功率和磨矿机载荷迅速增加，反映出较高的给矿速度和较粗的给矿粒度。向磨矿机给矿端和排矿端的加水速度是与磨矿机新给矿的速度成比例的，于是旋流器的给矿速度就反映了新给矿。这就会使旋流器的溢流变粗，同时对浮选回路的回收率产生影响。

磨矿回路处于手动控制时的工作性能，示于图7，唯一的自动控制是给水速度与新给矿速度成比例。直到时间A，磨矿机给矿速度、磨矿机驱动功率和磨矿机载荷是恒定的，但新

给矿粒度在逐渐变粗。在时间A处,轴承压力开始上升,这表示虽然磨矿机给矿速度未提高,但是磨矿机载荷在增加。由于磨矿机载荷增加,使磨矿机驱动功率上升。在时间B处,磨矿机操作人员减少了磨矿机的给矿速度,以便控制磨矿机的驱动功率,但是磨矿机的给矿继续变粗。在较低的给矿速度条件下,驱动功率和轴承压力稳定在较高的数值。于是,较粗的给矿的影响是增加了磨矿机的载荷。在时间C,细粒给矿粒度和给矿吨数的脉冲扰动加到磨矿机。这使磨矿机的载荷立即增加了,虽然驱动功率未发生变化。由于降低了载荷的粒度而使磨矿机载荷的增加对驱动功率表现为负的影响,可能是由于降低了载荷的内磨擦的结果。

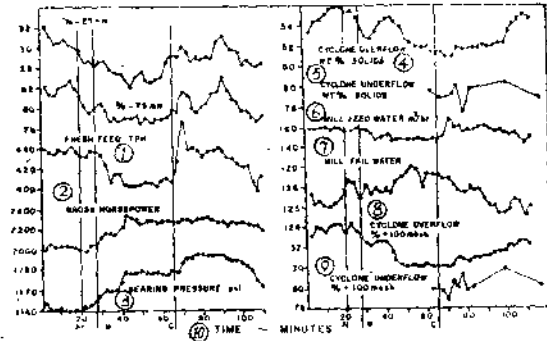


图7 在Handerson厂的给矿粒度变化对半自磨回路的影响,回路处于手动控制下

1—新给矿,吨/时; 2—总功率,马力; 3—轴承压力,磅/英寸²; 4—水力旋流器溢流,固体重量%; 5—水力旋流器底流,固体重量%; 6—磨矿机给水,米³/时; 7—磨矿机排矿端加水; 8—水力旋流器溢流,干100目%; 9—水力旋流器底流,干100目%; 10—时间,分

对过程控制的意义

从上述可以看出,磨矿机给矿粒度组成的变化对自磨和半自磨回路具有重要影响。给矿粒度组成的控制是非常需要的,但在许多情况下是不现实的。在给矿粒度很可能产生持续的不利变化的情况下,就要考虑矿石混匀的设施。麦克马纳斯^[5] (Mc Manus)介绍了在露天采矿场成功地应用大型前端式装载机来混匀矿石,用于半自磨磨矿机的给矿。但是,矿石混匀的费用,由于其有利于常规碎矿和磨矿,在经济上得到很好的补偿。为了保证选择最好的磨矿回路,需要做大量的试验工作和准确预测在整个矿山使用寿命期间,期望的给矿粒度组成。

如果给矿粒度组成对磨矿回路工作性能的影响,可以用一个回路的适当的数学模型来预测,就有可能通过调节回路的其它参数,如磨矿机的给矿速度(即磨矿机的载荷),磨矿机给水速度(即磨矿机内矿浆的液固比)和如果可能时还有磨矿机的转速,来补偿给矿粒度组成在某种范围的变化。这种数学模型的建立需要把控制目标,例如最大磨矿细度或者最大处理量,同回路的主要操作参数定量地联系起来。在以下几节介绍一种经验方法,用这种方法可以为工业规模的磨矿回路建立这种联系。

自磨回路的数学模拟

在文献中已经大量讨论了关于磨矿过程适当的数学模型的研究和发展,建立了各种近似模型,但是最有用的可能是建立在把碎裂的概念看成是一种概率的基础上的模型。模型的最基本的型式只是在整个磨矿机内物料的质量平衡。这种模型采用碎裂速度 r 和碎裂分布 B 的概念。另外,由于磨矿工作性能的信息通常是以不连续的方式获得(例如筛析的粒度组成),用这种型式表达物料质量平衡是方便的。对于批次磨矿,方程式为

$$\frac{d\omega_i}{dt} = -r_i \cdot \omega_i + \sum_{j=1}^{i-1} B_{ji} \cdot r_j \cdot \omega_j \quad (1)$$

式中 w_i 是磨矿机内, 粒度为 i 的颗粒重量; r_i 是粒度 i 的碎裂频率, 以单位时间内被破碎的粒度 i 含量的倍数来表示; B_{ij} 是碎裂分布函数, 以在每次碎裂事件中, 粒度 j 碎裂到粒度 i 的分数表示。

方程式 1 则表示粒级 i 的矿石随着时间而消失的速度。在模拟连续磨矿系统时, 必须考虑到矿石在磨矿机内的流动, 这通常是通过假定在规定的充分混合器数量之间, 矿石不流动来做的。如果假定是单个理想的混合器, 用于连续磨矿过程的基本方程式变成, (2)

$$\frac{d\omega_i}{dt} = f_i - p_i + \sum_{j=1}^{i-1} B_{ji} \cdot r_j \cdot \omega_j - r_i \cdot \omega_i \quad (2)$$

式中 f_i 是进入磨矿机的总给矿中, 粒度 i 的质量流量 (新给矿加循环负荷); p_i 是磨矿机排矿里, 粒度 i 的质量流量。

考虑磨矿机内部的分级是规定一个任意的排矿函数, 如

$$p_i = d_i \cdot \omega_i \quad (3)$$

式中 d_i 是粒度为 i 的颗粒的排矿频率, 以单位时间排出的粒度 i 的含量的倍数来表示。

方程式 (2) 和 (3) 用三个参数 r , B 和 d 说明穿过磨矿机的物料质量平衡。选择用于 B_{ij} 的一种适当型式是一个主要问题, 为了推导出碎裂分布函数的理论表达式, 已经做了很多努力, 但是没有一种是与机器特性无关的。

但是, 在分析从工业磨矿回路收集的试验数据时, B_{ij} 型式的选择是任意的。 B_{ij} 型式的误差由 r_{ij} 的计算值的误差准确地补偿。如果 r_i 的变化可以准确地与磨矿机操作参数相联系, 就不会损害我们预测回路行为的能力。

d_i 值的大小随磨矿机的总给矿速度而改变。为了排除给矿速度的影响, 通常是乘以伪滞留时间 (pseudo-residence time) 使 d_i 值标准化, 如下式

$$d_i^* = d_i \times \frac{\pi D^2 L}{4 v} \quad (4)$$

r_i , d_i 和 d_i^* 的各个数值只能从方程式 2 和 3 得到, 如果磨矿机内物料的粒度组成是已知的。因为自磨机载荷的粒度组成通常是不知道的, 并且要取得这种数据的费用是很贵的, 所以很需要得到与载荷的粒度组成无关的磨矿机工作性能的测量。

如果 B_{ij} 是已知的或设定了的, 那么不需要知道磨矿机载荷的粒度组成, 也可以从试验数据得到 $r_i \cdot \omega_i$, $d_i \cdot \omega_i$ 和 $d_i \cdot r_i^{-1}$ 的数值。联合参数 $d_i r_i^{-1}$ 与磨矿机内粒度 i 的碎裂概率有关, 它可以用下式表示 (7)

$$1 + d_i / r_i = \frac{1}{P_B} \quad (5)$$

于是, 联合参数 $d_i r_i^{-1}$ 直接与磨矿性能的基本测量相联系。而且如果 $d_i r_i^{-1}$ 可以由磨矿机操作参数和给矿特性的瞬时值预测, 则磨矿产品的粒度组成可以直接从方程式 2 和 3 中消去 ω_i 项计算出来,

$$P_i = \frac{f_i + \sum B_{ji} P_j \frac{r_j}{d_j}}{r_i / d_i + 1} \quad (6)$$

方程式(6)可对小于格条筛孔尺寸的全部粒度求解, 式中 $P_i \neq 0$ 。

联合参数 $d_i r_i^{-1}$ 是利用磨矿工作性能表达磨矿机工作状态的一个常用的参数, 并且在以前已经成功地应用于球磨机 [8], 和自磨 [9]。

高尔特 [9] (Gault) 发现, $d_i r_i^{-1}$ 的数值对颗粒粒度的对数绘图时, 形成一组平行的曲线, 并且改变每条曲线的位置可以满意地与磨矿机的单位功耗相联系, 是给矿粗细度的一种度量, 但并不总是这种情况 [10], 从在工业规模自磨机上进行试验工作中所包括的许多问题来看, 这并不使人感到意外。通常, 可以认为 $d_i r_i^{-1}$ 值对每种粒度是操作参数的某种函数。在不具备已建立的模型情况下, 作为一种起始的方法, 假定是一个简单线性方程式是足够的:

$$d_i \cdot r_i^{-1} = K + C_1 \cdot O_1 + C_2 \cdot O_2 + \dots + C_n \cdot O_n \quad (7)$$

当然, 也可以用磨矿效率, 如每生产一吨细粒产品的功耗, 或者磨矿机处理能力以吨/时为单位来度量。但是, 这些度量本身又取决于更基本的度量, 如碎裂频率和排矿频率。

使用 $d_i r_i^{-1}$ 参数的一个问题是, 它只能说明小于格条筛孔尺寸的物料的碎裂行为。一个完整的自磨的数学模型必须能够预测磨矿机的总载荷, 这就需要预报大于格条筛孔尺寸物料的碎裂速度的一些方法。这又需要知道磨矿机载荷里粗颗粒粒度组成的试验数据。

$d_i r_i^{-1}$ 的定量关系

一组 $d_i r_i^{-1}$ 的曲线示于图 8。数据是从南非联合公司的 St. Helena 选矿厂的一台自磨机上得到的。磨矿机内径是 4.9 米, 内部长为 9.15 米, 转速为 17.4 转/分。它和一组三台 Krebs D26B 型水力旋流器闭路工作。曾发现, 当 $d_i r_i^{-1}$ 对粒度的对数绘制曲线时, 在特定的装置上多次试验, 都具有相同的形式。对一台特定的磨矿机的每条曲线位置的变化, 可以认为是给矿特性和磨矿操作条件变化以及试验误差的结果。

假定对于粒度 i 的 $d_i \cdot r_i^{-1}$ 值是主要操作参数的函数, 并且主要操作参数的数值对于每次试验都是已知的, 那么就可以用多元回归线性方法求出方程式 7 中的系数。

对自磨回路现行自动控制实践的考察 [7] 表明, 认为重要的磨矿机操作参数是驱动功率 (P); 载荷 (J)·固体含量百分数 (ρ); 给矿粒度组成 (F); 转速 (N); 和钢磨矿介质的添加量 (S)。磨矿机转速通常是不能用做控制变量的, 方程式 7 可以写成

$$d_i r_i^{-1} = K + C_1 P + C_2 J + C_3 S + C_4 P + C_5 F \quad (8)$$

在 Henderson 厂第 3 号磨矿机中得到的六种相邻粒度的最优拟合方程式示于表 1。如文献 [7] 所述, 这些方程式是 Henderson 厂其它粒级以及其它磨矿机矿石粒级的类似方程式的代表。

一般对于接近格条筛孔尺寸的粒度会得到最差的数据拟合, 因为接近格条筛孔尺寸的颗粒的排矿行为受实体格条筛孔尺寸的强烈影响。当已知给矿粒度组成和磨矿机操作条件时, 以现行数据为基础, 可以对每台磨矿机以适当的精确度预报 $d_i r_i^{-1}$ 曲线的形状和位置。

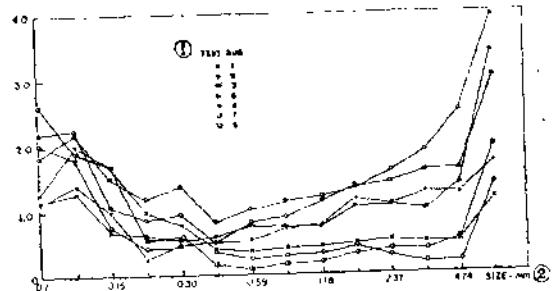


图8 $d_i r_i^{-1}$ 粒度曲线的形状不变的图例, 数据取自 St. Helena 选矿厂第一台磨矿机
1—试验次数; 2—粒度, 毫米

表1 对每种粒度的 $d_i r_i^{-1}$ 的回归方程

粒度, 毫米	最 优 拟 合 方 程	复归系数效
6.698	$0.02212 \times (J) + 0.1363 \times (S) - 0.09829 \times (\rho) - 0.01872 \times (F) + 7.503$	0.855
4.736	$0.06302 \times (J) + 0.3109 \times (S) - 0.0009087 \times (\rho) - 0.08316 \times (\rho) + 8.701$	0.922
3.490	$0.05745 \times (J) + 0.2695 \times (S) - 0.0006376 \times (\rho) - 0.0994 \times (\rho) + 8.649$	0.917
2.368	$0.06294 \times (J) + 0.2875 \times (S) - 0.0009393 \times (\rho) - 0.1181 \times (\rho) + 11.94$	0.929
1.674	$0.05653 \times (J) + 0.2476 \times (S) - 0.0007961 \times (\rho) - 0.08428 \times (\rho) + 8.811$	0.918
1.184	$0.09279 \times (J) + 0.4210 \times (S) - 0.001496 \times (\rho) - 0.1548 \times (\rho) + 16.93$	0.988

由于篇幅有限, 没有给出方程式的全表, 但是值得指出的是, 对于 Henderson 厂的半自磨磨矿机和 St. Helena 厂的全自磨磨矿机, 磨矿机载荷随着中间粒级的 $d_i r_i^{-1}$ 值的提高而增加, 但是功率消耗对于 Henderson 厂半自磨磨矿机, 却随着大多数粒度的 $d_i r_i^{-1}$ 值的降低而增加, 而对于 St. Helena 厂的磨矿机的中间粒级却出现相反情况。

在澳大利亚西部 Pinjarra 的 Alcoa 厂的铝土矿半自磨磨矿回路上也收集了适合用于数学模拟的数据。用于试验的磨矿机的内径是 7.0 米, 内部长度为 3.0 米。磨矿是在 NaOH 热溶液中的进行的。磨矿机转速 12 转/分, 它与模型筛组成闭路磨矿。在这一作业中, 由于磨矿机功率读数和磨矿机载荷的标定存在困难, 妨碍了对数据进行充分的分析, 但是取得的足够的数据使得有可能求出需要研究的 $d_i r_i^{-1}$ 与磨矿机排矿浓度之间的相关关系, 发现下面的简单的线性关系是较为适当的

$$d_i^* \cdot r_i^{-1} = A + B (\rho) \quad (9)$$

在 Pinjarra 和 St. Helena, 试验工作包含磨矿机排矿浓度的宽范围 (在 St. Helena 固体含量是 55~82%, Pinjarra 固体含量是 56~67%), 磨矿机排矿浓度表现出对每种粒度的 $d_i r_i^{-1}$ 值具有重要影响。在 Pinjarra 厂, 对于粗粒矿石 (小于格条筛孔), 排矿浓度变化可以使 $d_i r_i^{-1}$ 的数值变化 70%, 但对于小于 0.5 毫米的粒度的矿石, 其影响不明显。对这种现象的一种可能的解释是, NaOH 矿浆的粘度足以在正常的磨矿机给矿的空间速度情况下, 把小于 0.5 毫米的颗粒带走。于是, 小于这一粒度的大多数颗粒已经被带走并提高了矿浆的相对粘度, 不能有效地提高夹带速度。由于矿浆的相对粘度增加, 较粗颗粒的夹带速度也增加, 因此它们未被破碎就排出去的概率也增加了。

增加在 St. Helena 厂的全自磨磨矿机给矿中的大于 25 毫米物料的数量, 导致 $d_i r_i^{-1}$ 值的下降, 即由于给矿变粗使颗粒未经碎裂就被排出去的概率降低。其它一些观测也说明了这一结果, 例如伯格斯特德 (Bergsted) 和费格雷蒙 (Fagremo) 指出^[11], 全自磨的处理能力与最大的给矿粒度成正比, 斯坦利^[10] (Stanley) 指出: 在自磨机里的磨剥速度正比于新给矿中的粗颗粒的含量。从 Warrego 全自磨磨矿机提供的动态数据也可看出同样的行为。该厂由于粗矿石在给矿中的减少而使磨矿能力下降。

对于 Henderson 厂的半自磨磨矿机却出现了相反的情况。给矿粒度提高导致 $d_i r_i^{-1}$ 值的提高。以前曾报导过的 Henderson 厂的动态数据中也曾发现这种作用, 在该厂由于给矿粒度提高使磨矿机载荷以恒定速度增加。这就意味着在这类磨矿机中, 粗颗粒不是细粒级的好磨矿介质, 并且磨矿作用在很大程度上取决于钢磨矿介质的作用。

总磨矿机载荷与载荷粒度组成的预报

已经说明过, $d_i r_i^{-1}$ 的数值与磨矿机载荷, 磨矿机功率消耗, 磨矿机排矿浓度, 磨矿机给矿粒度组成和钢介质含量 (对半自磨操作) 有关。一旦知道 $d_i r_i^{-1}$ 值, 就可从任何给矿速度和给矿粒度组成直接计算出所得到的产品粒度组成。

从自动控制的观点看, 要求在线测量给矿的粒度组成和决定正确地改变给矿速度, 保持驱动功率在要求的水平上, 或者使产品粒度组成的变化最小。问题并不这么简单, 因为磨矿机载荷与给矿速度, 给矿粒度组成和载荷的碎裂特性有关。因此, 对于任一计划的给矿速度、给矿粒度组成和操作条件, 为了确定磨矿机的工作性能必须知道 $d_i r_i^{-1}$ 值和磨矿机载荷。由于这些参数是互相依存的, 所以需利用迭代法求解。

为了计算总磨矿机载荷 $\Sigma \omega_i$, 必需把 $d_i r_i^{-1}$ 参数分离为单独的 d_i 和 r_i 数值, 并且能够预报大于格条筛孔尺寸物料的碎裂频率 $R_{G,i}$ 。如果能够做到这样, 就会有足够的数据对磨矿机工作性能在所研究的范围进行模拟, 步骤如下。

第一步 规定磨矿机给矿速度, 给矿粒度组成, 给水速度和钢磨矿介质添加量 (只用于半自磨)。给出稳态磨矿机载荷的初始值 (只给出矿石的)。

第二步 假定, 已经得到大于格条筛孔的物料的碎裂频率的关系式为:

$$R_{G,i} = f(\text{操作参数})$$

计算每种粒度的 $R_{G,i}$ 数值的第一次估计值。

第三步 从已建立的方程式计算 $d_i^* r_i^{-1}$ 的估计值, 并且由已知的磨矿机尺寸和体积计的给矿速度, 用方程式 (4) 转换为 $d_i r_i^{-1}$ 数值。

第四步 假定, 已经得到小于格条筛孔的物料的排出频率的关系式为:

$$d_i = f(\text{操作参数})$$

计算 d_i 值的第一次估计值。

第五步 根据第三和第四步得到的结果, 计算单个 d_i 和 r_i 的数值。

第六步 采用第五步得到的 d_i 和 r_i 值, 计算磨矿机载荷的粒度向量 ω_i , 总磨矿机载荷吨数 (只计算矿石) $\Sigma \omega_i$ 和产品粒度向量 P_i , 即

$$\omega_i = \frac{f_i + \Sigma B_{1,j} r_j \omega_j}{r_i + d_i} \quad (10)$$

必须从最粗的粒度开始, 顺次地对每种粒级求解方程式 (10), 为此,

$$\Sigma a_{1,j} \cdot r_j \cdot \omega_j = 0$$

然后

$$P_i = d_i \cdot \omega_i$$

第七步 用在第六步求得的 $\Sigma \omega_i$ 值与第一步中的载荷初始估计值进行比较, 并重复这种计算, 直到得到的 $\Sigma \omega_i$ 值收敛于一稳定值为止。

在实践中, 第一段磨矿回路通常是与分级机闭路工作。在这种情况下, 在第六步中求得的产品粒度组成和产品的流速必须提供给分级机模型。分级机的返砂量加上磨矿回路的新给矿量就可给出回路的总给矿速度的新估计值。然后, 必须从第一步到第六步重复进行, 直到回路的给矿速度在速度和粒度组成两者都收敛为止。于是, 模型进行到第七步并计算磨矿机载荷。然后, 重复进行第一到第七步, 直到方程式的解在磨矿机给矿速度, 给矿粒度和磨矿

机总载荷上收敛为止。

对于 Henderson 厂的磨矿机, 通过对磨矿机载荷取样和对载荷表面照像^[7], 已经得到了近似的磨矿机载荷的粒度组成。所得到的载荷粒度组成示于图 9。不可能得到对每次试验的载荷粒度组成的测量结果, 因此必须假定对每台磨矿机来说, 载荷的粒度组成是恒定的。利用载荷粒度组成是恒定的这一假设, 可以计算出每次试验排矿频率。在 Henderson 厂第三号磨矿机得到的结果, 示于图 10。

Henderson 厂磨矿机的排矿曲线表明, 排矿函数的一般形状与怀特^[8] (White) 提出的相似, 例外的是中间粒级的排矿频率超过了预期的最大值。这种异常, 看来是由于磨矿机粒度组成估计值中的误差面产生的。对于全部三台磨矿机, 最大的排矿频率都发生在 6.7 毫米粒度 (忽略在 13.4 毫米处的高数值)。

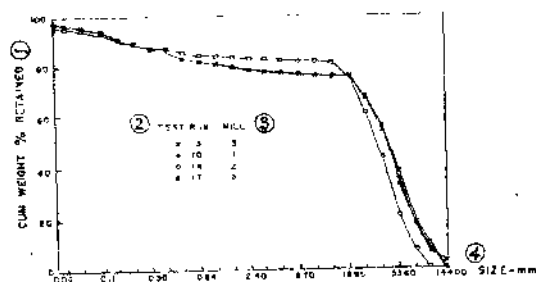
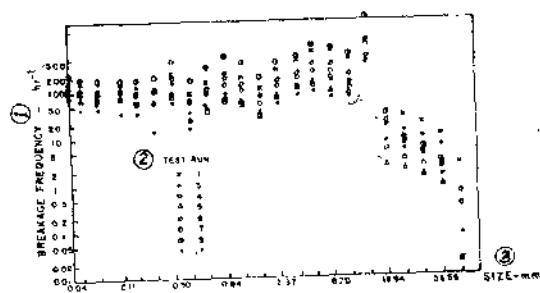


图 9 计算的 Henderson 厂磨矿机载荷的粒度组成

1—筛上累计重量, % 2—试验次数; 3—磨矿机;
4—粒度, 毫米。



Recovery Rate of Water C_w
(m^3/s)/ 10^3 (1)

图10 排矿频率对颗粒粒度的座标关系—Henderson 厂的磨矿机

1—排矿频率, 时⁻¹; 2—试验次数;
3—粒度, 毫米

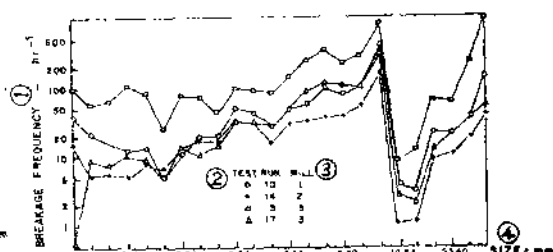


图11 碎裂频率对颗粒粒度的座标关系—Henderson 厂的磨矿机

1—破裂频率, 时⁻¹; 2—试验次数;
3—试验的磨矿机; 4—粒度, 毫米。

假设, 最大排矿频率是操作参数的某一函数, 于是

$$d_{max} = f(P, J, S, \rho, F)$$

并且用回归分析方法, 对 Henderson 厂的第三号磨矿机得到的最优拟合关系式为

$$d_{max} = \frac{3445}{Lw} + 3.88 \quad (11)$$

式中 Lw 是磨矿机载荷重量, 以吨为单位 (只计矿石的)。

对应于图 9 的载荷粒度组成的碎裂频率示于图 11。曲线的不连续性发生在大约 25 毫米处, 它符合碎裂分布函数中所使用的从粉碎到劈裂碎裂的转换。

在 Henderson 厂第三号磨矿机的情况下, 只有一种粒级超过格条筛孔尺寸, 在这种情况下发现, 碎裂频率可以近似地用下面的方程式确定:

$$R_G = 65.023 \times \frac{F}{L_w} - 0.77 \quad (12)$$

在一般情况下,大于格条筛孔的粒级不止一个,对每一种粒级 R_G 的确定更为复杂。在这种情况下,有可能研究出类似于方程式 (12) 的方程式,更详细的计算可用参考文献[7]给出的方法。

仿真模型的结构

$d_i r_i^{-1}$ 与操作条件之间的关系方程式含有磨矿机功率消耗。为了在每次迭代中计算 $d_i r_i^{-1}$ 的值,还必须预测磨矿机功率消耗。对于一台特定的磨矿机,其功率消耗受一系列参数,如载荷量、磨矿机内钢介质量、载荷的粒度组成以及排矿浓度的影响。对于 Hender-son 厂第三号磨矿机,在所研究的整个操作条件的范围里,最重要的参数有磨矿机载荷和钢介质重量。对这一数据得到的最优拟合方程式(复相关系数=0.91)为

$$P = 76.62 \times J + 383.5 \times S + 1126.0$$

另外,为了能够对闭路作业的工作性能进行仿真,辅助设备,如圆筒筛,振动筛和旋流器分级机的工作性能也必须包括进去。作为第一次近似,筛子的工作性能可以用单位效率曲线来表达。对于水力旋流器分级机的模型化技术已经得到很好地建立[12, 13, 14]。

仿真模型的结构,以系统图的方式,示于图 12。

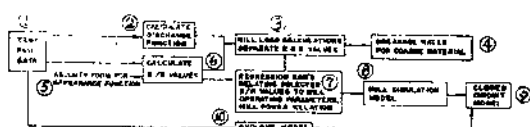


图12 仿真模型的结构

- 1—试验次数数据; 2—计算排矿函数; 3—磨矿机载荷计算, 分开 R 和 D 的数值; 4—粗粒物料的碎裂速度; 5—设定的显函数型式; 6—计算 D/R 值; 7—选定的 D/R 值与磨矿机操作参数、磨矿机功率之间的回归方程式; 8—磨矿机仿真模型; 9—闭路模型; 10—旋流器模型;

仿真模型用于回路最佳化和控制

上述结构的仿真模型可以计算出产生一种变化(如给矿粒度组成)以后的磨矿机的稳态条件。如果,全部主要操作参数是在仿真模型包含的回归方程的适用范围里,计算的结果就会是可靠的。

利用以适当方式建立的模型,可以用仿真方法预测正确的稳态给矿速度和磨矿机加水速度,以便

1. 保持旋流器溢流粒度恒定;
2. 保持磨矿机驱动功率恒定;
3. 在主要条件下,使磨矿机处理量达到最大。

这种稳态分析,在离线最佳化研究和实时控制的应用中都非常有用,在这些情况下的给矿粒度组成的变化速度比磨矿机停留时间慢。但是,这项技术不能用于给矿粒度组成的变化比磨矿机停留时间快的情况,在这种情况下,磨矿机始终没有达到稳定状态的机会。在这种情况下,需要磨矿机行为的动态表达式。

符 号 名 称

- ω_i 在磨矿机内粒度 i 的颗粒的重量, 吨。
- r_i 以单位时间内破碎的粒度 i 的含量的份数表示的粒度 i 的碎裂频率。于是, r_i 的单位为 时^{-1} 。
- B_{ij} 碎裂分布函数, 它表示在每次碎裂事件中, 粒度 j 碎裂成粒度 i 的份数。
- f_i 向磨矿机给矿中, 粒度 i 的质量流量, 吨/时。
- p_i 从磨矿机出来的产品中, 粒度 i 的质量流量, 吨/时。
- d_i 粒度为 i 的颗粒的排矿频率, 以单位时间内排出去的粒度 i 的含量的份数(乘系数)表示。因此, d_i 的单位是 时^{-1} 。
- d_i^* 标准化了的排矿频率, 无单位。
- L 磨矿机长度, 米。
- D 磨矿机直径, 米。
- v 以体积计的矿浆给矿速度, $\text{米}^3/\text{时}$ 。
- P_B 碎裂概率, 无单位。
- $O_1, O_2, \dots, O_n$ 在简单线性方程式中的主要操作参数值。
- $C_1, C_2, \dots, C_n$ 线性系数。
- K 任意常数。
- P 磨矿机驱动功率, 马力。
- J 磨矿机总载荷(矿石和钢介质), 充填体积%。
- ρ 磨矿机内矿浆中的固体含量, %。
- F 磨矿机给矿粒度组成, 重量%。
- N 磨矿机转速, 转/分。
- S 磨矿机内钢介质含量, 充填体积%。
- R_G 大于格条筛孔尺寸的物料的碎裂频率, 时^{-1} 。
- L_w 磨矿机载荷重量(只计矿石), 吨。

参 考 文 献

- (1) Williamson, J.E. "The Automatic Control of Grinding Medium in Pebble Mills", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 60, 1960, pp. 335—345.
- (2) Flook, W.K., "Automatic Control of Feed or Autogenous Grinding Media", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 75, 1975, pp. 60—64.
- (3) Digre, M. "Autogenous Grinding Testing and Scale-up", Proceedings of the Autogenous Grinding Seminar, Trondheim, 1979, Paper F5.
- (4) Gallagher, E. "Optoelectronic Coarse Particle Size Analysers for Industrial Measurement and Control", Ph. D. Thesis, University of Queensland, 1976.
- (5) McManus, J. "Grinding Copper Ores in British Columbia", Proceedings of the Autogenous Grinding Seminar, Trondheim, 1979, Paper G1.
- (6) Whiten, W.J., "A Matrix Theory of Comminution Machines", Chemical Engineering Science, Vol. 29, 1974, pp. 589—600.
- (7) Duckworth, G.A., "Simulation of Autogenous Mills" Ph. D. Thesis, University of Queensland, 1981.
- (8) Whiten, W.J., "Ball Mill Simulation Using Small Simulation Using Small Calculators", Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 258, 197C, PP. 47—53.

(下转38页)

工业磨碎—分级设备应用过程分析、 模拟和最佳化的实际效果

D. Hodouin, F. Piamont*

M. D. Everell**

(加拿大魁北克拉瓦尔大学矿冶系矿业自动化应用研究小组) *

(加拿大魁北克省政府能源矿物研究部) **

提 要

本文表明过程模拟方法如何导致对于过程的更好理解,并使得我们能够更有效地改进操作。讨论了资料获取、物料平衡计算、过程模型化、稳态和动态模拟、最优回路调整和设计等方面的实际优越性。使用作者在碎磨、分级和脱泥操作等领域中所作的工业实例研究对于各种应用进行说明。

本文表明,研究的每一步都有巨大的效益,此研究的最终目的是通过模拟回路操作的办法来实现最优化。原始数据的获取和调整阶段导致对于回路操作的更好理解,而且是过程诊断和消除功能失调的工具。以物理机理为基础的模型参数可以用于过程工作情况的评价,从而可以用于选择过程变量的最佳设定值。最后,模拟本身导致过程的微调,而且对于回路构型的最优化是极为有力的。

前 言

十五年来,发表了许多研究磨矿—分级过程计算机模拟的文章,这些文章大致可以分为三类。第一类,一般性和综合性的文章,主要叙述改进过程设计和操作的模拟方法的主要用途[1-4];第二类,大部分是技术性的文章,主要研究新概念、模型和数据处理方法,一般使用纯矿物的实验室小型试验数据[5-8]来说明;第三类,这些文章介绍在工业过程中模拟方法的实际应用[9,10,11,12,13]。后者数量很少。关于所得到的实际收益的叙述经常含糊不清,阅读这方面的文献评述,过程分析和模拟方法给人很深刻的印象,但是没有使人信服の説明实际效果的数据。因此与改进生产过程的传统方法相比较,对于是否值得对计算机最佳设计和冶金生产过程的调节进行很大的努力仍不太清楚。

有一些理由可以解释模拟设计取得的工业效果较少的原因。尽管矿业生产公司一般可公开发表他们的模拟研究,但是工程和顾问公司不愿意向他们的竞争者公开模拟技术。除此之外,有时在科学杂志上发表工程结果存在困难,因为许多因素在工程研究时互相影响,(流

* GRALM (Groupe de Recherche en Automatisation appliquée à l'Industrie Minérale). Dép. de Mines et Métallurgie, Université Laval, Québec, Canada.

**Centre de Recherches minérales, Ministère de l'Énergie et des ressources, Gouvernement du Québec, Québec, Canada.