DOI：10.13732/j.issn.1008-5548.2001.01.006

第7卷第1期
2001年2月

中 国 粉 体 技 术
China Powder Science and Technology

Vol.1 No.1
February 2001

作者介绍：王泽红(1969—)，男。1992年7月毕业于西安建筑科技大学(原西安冶金建筑学院)选矿专业，1995年3月获东北大学矿物加工工程专业工学硕士学位。现为东北大学资源与土木工程学院讲师，在职博士研究生。主要研究方向为粉体工艺、矿物材料合成、非金属矿深加工等。在国内外共发表论文10余篇。

球磨机负荷检测的现状与发展趋势

王泽红，陈炳辰

(东北大学资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110006)

摘　要：根据球磨机负荷的检测在球磨过程自动控制中的重要作用，论述了球磨机负荷检测的现状，指出了未来的发展趋势。

关键词：球磨机；负荷检测；现状

中图分类号：TD453，TQ172.6^{+}32.1　　**文献标识码**：A

文章编号：1008—5548(2001)01—0019—05

磨矿作业是整个选矿厂生产工艺流程中最关键的环节，它起着承上启下的作用。磨矿作业在选矿厂的基建投资和生产费用(主要是电耗、钢耗)中占有很大的比例，同时磨矿作业是整个选矿厂的“瓶颈”作业，直接关系到选矿生产的处理能力、磨矿产品的质量(粒度特性、单体解离度、磨矿产品的浓度等)，对后续作业(特别是浮选作业)的指标乃至整个选矿厂的经济技术指标有很大的影响。

影响磨矿过程作业指标的因素很多，属于物料性质方面的有：矿石可磨度、给料粒度、产品细度等；属于磨机结构方面的有：磨机规格、型式、衬板形状等；属于操作方面的有：介质形状、尺寸配比及材质、介质充填率、磨机转速率、加球制度、料球比和磨矿浓度等。这些因素本身又相互影响。在上述因素中，第一类和第二类因素被确定以后通常就不改变了；如果设备维修以及添加钢球的材质都是正常的，则其可改变的条件就是磨机转速率、介质充填率、料球比和磨矿浓度。一旦磨机转速率固定，则只有其余3个因素是可变的。

球磨机负荷是指磨机中球负荷、物料负荷以及水量的总和，它是磨矿过程一个重要参数，直接影响到磨矿的效果。在实际生产过程中，由于矿石性质的波动以及一系列外界因素的干扰和操作水平的差异等，使球磨机的负荷难以维持在最佳水平，不能充分发挥球磨机的功效。因此，在磨矿过程自动控制中，球磨机负荷的检测和控制是球磨机自动控制最重要的内容。能否准确地检测出球磨机的负荷(包括球负荷、物料负荷以及水量的各自数值)是整个球磨机优化控制成败的关键。

1　球磨机负荷的直接检测方法

这种方法在1973年第十届国际选矿会议上由捷克斯洛伐克布拉格矿山研究院B·Lanštiak报道过[1]。作者认为球磨机中的矿浆面和球磨机的产量之间存在着函数关系，矿浆面与球磨机的负荷率有着密切的关系。

测量球磨机内矿浆面的线路图如图1所示。原则上，由几个不同长度的电极组成，通常是4个。在电极浸入半导电的矿浆中时，电流形成闭路。通过加法放大器将电极电流增量放大。在稳定条件下，当探测装置逐次地浸入矿浆时，输出电压形成“阶

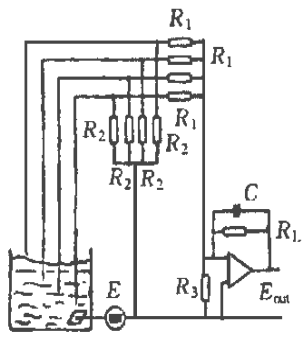


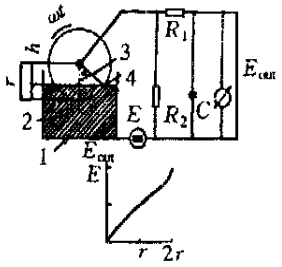
图1　球磨机矿浆面高度测定原理

收稿日期：2000—10—11

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

梯”型，阶梯数目与电极的数目相同，由此可以判断出球磨机内的矿浆面高度。

测定格子型球磨机中的矿浆面可以采用如图 2 所示的原理。在一个以角速度 ωt 旋转的臂上放一个探测装置，它分成两种状态——浸没到矿浆中和从矿浆中露出。通过探测器浸没在矿浆中的时间计算出矿浆面的高度。在测量矿浆时，可以采用电极作探测器。



1—容器；2—液体；3—臂；4—探测装置(电极)

图 2　格子型磨矿机中矿浆面测定原理

直接检测法是通过测定球磨机内矿浆的液面高度来确定球磨机的负荷。虽然这种方法能够获得比较满意的结果，但具有以下缺点：

(1)只能检测出球磨机中的矿浆面，而介质充填率、料球比和磨矿浓度则不能检测出来；

(2)电极的安装位置需要解决；

(3)电极需要保护以免遭受落球的机械破坏，因此，电极不易拆除，为检修和更换带来了困难；

(4)检测数据传递方法需要解决。

正是因为这些缺点的存在，这种方法一直未能得到推广应用。

2　球磨机负荷的间接检测方法

球磨机负荷的间接检测是目前工业生产中的常用方法。

2.1　单因素检测

2.1.1　*声响法*

工业生产实践表明：球磨机的声响与其物料负荷具有一定的关系，这种方法的实质就是根据球磨机所产生噪音的不同来确定球磨机内的物料负荷。当球磨机中物料负荷增加时，球磨机噪音强度减小；反之，当球磨机中物料负荷减少时，球磨机噪音强度就增加，即在球磨机噪音强度和球磨机中物料负荷之间存在着关系。因此，可以利用球磨机的噪音强度来评估球磨机中的物料负荷。

声响法检测球磨机负荷既可以用于湿式磨矿又可以用于干式磨矿，可以提高磨矿处理能力及其产品的细度，并能节省钢耗和能耗；相对其它方法来说，测量信号比较灵敏。这种方法遇到的主要问题是其它磨机所产生的干扰，传感器的位置必须选择正确，以避免这种干扰现象。另外，声响法只能确定料球比，而不能确定介质充填率，也不能确定磨矿浓度。国内梅山选矿厂、河北金厂峪选矿厂、安庆铜矿选矿厂、攀枝花选矿厂、大孤山选矿厂、桃林铅锌矿选矿厂、大冶铁矿选矿厂等，都使用的是电耳检测和控制系统.

2.1.2　*有用功率法*

在磨矿过程中，用于带动磨机筒体内磨矿介质和矿浆一起转动的功率称为有用功率。

湿式球磨机的工作特性可以直接用消耗的有用功率来描述，如下列方程所示

$$P = F(D, v, N, W) \qquad (1)$$

式中　D ——磨机几何尺寸；v ——磨机转速；N ——矿石性质；W ——球磨机负荷。

对于一定的球磨机而言，D 和 v 是常数值。因此，对于某一矿石而言，功率为球磨机负荷的函数，即

$$P = f(W) \qquad (2)$$

当磨机及其转速均固定时，根据理论推算和实际检测结果表明：球磨机电机有用功率和球磨机负荷之间的关系如图 3 所示。由图 3 可以知道：随着球磨机负荷的增加，开始时球磨机电机的有用功率明显上升，到达某一极值后，随着球磨机负荷的增加，有用功率值反而下降，此极值可以认为是球磨机负荷的最佳点。因此，有用功率直接与球磨机负荷有关。

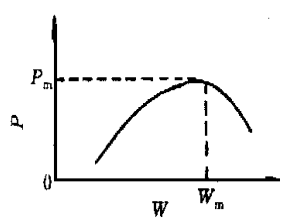


图 3　磨机工作特性

有用功率法检测信号受周围环境的影响比较小，检测结果比较准确。但检测信号灵敏度不高，影响控制效果，而且影响有功功率的因素较多，因此，单靠球磨机的有用功率信号既不能确切判断球磨机中介质充填率的水平，也不能确切判断球料比的水平。另外，由于 $P-W$ 曲线有一极大值，因此当功

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

率降低时难以根据检测信号来判断球磨机负荷是增大还是减小。我国云南易门铜矿木奔选矿厂、铜陵凤凰山铜矿选矿厂、云南大姚铜矿选矿厂、德兴铜矿选矿厂等,都使用的是有功功率法进行检测。

2.1.3　振动法

所有的机械设备在运转过程中都可能产生或大或小的振动。振动信号诊断技术已经被广泛用于设备运行情况的监测。

球磨机运转时,研磨体和物料偏于磨机的一侧,并不断地滚滑和下落,冲击研磨物料,磨机的转动部分处于严重的不平衡状态,造成不平衡的离心力,使磨机系统振动。在磨机转速不变时其振动强度与被磨物料的多少有关,检测出磨机的振动强度就可间接反映出磨机中物料负荷的情况。

振动法检测信号的灵敏度比较高,能随时显示球磨机内物料的变化。这对检测球磨机物料负荷非常有利,而且不受周围噪声源的影响,传感器密封好,能有效防水、防尘,因而可以适应选矿厂的恶劣工作环境。但是当电网电压特别是电网频率发生变化时,磨机转速的微小波动,或者磨机内研磨体的损耗等的影响会使物料负荷控制点产生漂移,影响检测和控制质量;不能检测出磨矿浓度的大小以及介质充填率。

我国山东招远罗山金矿选矿厂使用了这种方法检测磨机负荷。

2.1.4　压力传感器法

(1)利用一种负荷传感器安装在球磨机的给矿端和排矿端的轴承下连续对磨机称重,从而确定球磨机内球介质、矿石和水的总量,确定磨机的负荷。这种方法的优点是简单,其缺点是检测精度不高,不能准确检测出球磨机中球介质、矿石和水各自的量。另外,球磨机衬板的磨损、矿石性质的变化、钢球添加前后质量的变化等都会对检测结果产生比较大的影响。国内河东金矿使用的是荷重传感器。

(2)南非某研究所通过在磨机内安装压力传感器的方法来测定磨机内负荷的情况,为确定磨机的负荷提供了一种新方法[2]。该方法是在磨机内衬上安装了一个能测定径向压力和切向压力的传感器,由压力传感器测量得到的信息通过传导引入微机,微机可以将信号进行处理,得到频谱图。通过分析可以知道球负荷和物料负荷的比例。通过这个压力传感器的传递,掌握了大量磨机内运行的状态。该检测系统的数据传递是一大难题。国际控制公司根据这种原理生产的磨机监控系统可以将磨机内的信息通过无线电发射到微机进行接收,微机进行全面的分析并进行控制,据报价该系统大约价格为 30 万美元左右。

(3)J·Kolacz 采用一个压电应力传感器来测量磨机壳体应力的变化[3]。传感器安装在磨机壳体应力变化最大的中间部位,如图 4 所示。当传感器位于磨机筒体顶部时,测量的是压力,而位于筒体底部时则测量的是张力,根据读数的变化来计算总压力的变化,该压力变化与磨机负荷成比例。

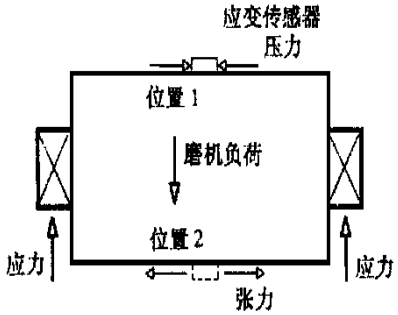


图 4　应力传感器安装简图

2.1.5　差动电磁传感器法[4]

差动电磁传感器法由保加利亚中央综合自动化科学研究所研究,并已经获得专利。它仅测量磨机壳体振动的有用信号部分,并消除一般的干扰信号。该传感器可安装在距离球磨机机壳 70～80mm 处,在该距离范围内,输出信号几乎与距离变化无关。传感器的可靠性和灵敏度高,信号输送延迟较小。但这种检测系统不能检测出球磨机的介质充填率、料球比以及磨矿浓度的具体数值。

2.1.6　霍尔功率变送器法[5]

在球磨机—双螺旋分级机组成的闭路磨矿系统中,球磨机负荷难以直接测量。因此采用了测量分级机返砂量的方法间接反映球磨机负荷。在磨矿的生产过程中,当球磨机的负荷超过正常值时,球磨机排矿粗粒成分增加,这必将使返砂量增大;反之返砂量减少。另外,按磨矿工艺的要求,返砂量一般应为给入球磨机矿量的 2～3 倍,因此,认为用测量返砂量的方法间接反映球磨机负荷是可行的。

返砂量的测量,采用霍尔功率变送器测量分级机的电功率。同时这个测量不要求测量功率的绝对值,故仅测双螺旋分级机内旋三相电动机的单相功率变化值,以反映返砂量的相对变化,以此实现球磨机负荷的自动控制。国内河北铜矿选矿厂使用这种传感器测量磨机负荷。

2.1.7　示踪原子法

(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

国外曾经进行过这种方法的研究。其主要原理就是利用示踪原子来确定物料在球磨机中的滞留时间，从而计算出被磨物料滞留在球磨机中的量。但这种方法由于精确度不高，实施困难而未能在实际中得到应用。

2.2 双因素检测

2.2.1 功率—声响双信号检测[6]

东北大学研究生杨小生提出了采用功率—声响双因素联合，来检测和控制球磨机负荷。具体方法如下：

(1) 由于在实际生产应用的转速率 Ψ 范围内(Ψ =60%～85%)，无论介质充填率为何值，料球比增加，声强都有所下降，因此，根据声强的下降值可以判断出料球比的范围值。

(2) 根据判断的料球比值 ϕ_m 和检测到的有用功率值，按 $N_{有} = F(\Psi, \phi_m)$ 关系求得磨机中介质的充填率值。

这样，根据有功功率—声响双信号就可以比较准确地判断出球磨机生产中介质充填率和料球比值，然后根据需要来调整介质加入量和返砂量或磨机的新给料量，使得球磨机的效率最高。

这种检测和控制系统具有以下特点：

(1)能够比较准确地控制球磨机中物料量和球介质的充填量，但未考虑磨矿浓度即加水量的影响，也就是说，不能确定磨矿浓度。因此，采用功率—声响双信号自动控制也不能使磨机运行在最佳磨矿点上，还应该加上矿浆浓度(或粘度)以及钢球配比的信号。

(2)与单一信号相比，双信号检测和控制更加及时、准确。

国内大石河选矿厂、尖山铁矿选矿厂等使用了这种检测方法。

2.2.2 声响—振动双信号检测[7]

机械磨矿发出的振动信号，可以用一些仪器或仪表将其检测出来，振动信号的变化取决于磨矿状态的变化。曾义根在工业球磨机上对其振动信号进行了初步研究，测量系统如图 5 所示。球磨机的机械振动用加速度仪进行测定，声压的变化用麦克风进行测量(麦克风安装在球体降落的一侧)。考察的磨矿参数主要有：功率消耗、给矿速率、矿浆浓度、给料粒度和产品粒度。通过信号处理和参数标识，作者建立了磨矿参数与信号特征之间的关系，大多数相对预测误差在 5%以内。研究结果表明，振动信号的变化与磨矿操作参数的变化紧密相关，球磨机的功耗和产品粒度主要与机械振动信号有关，而其它因素则主要与声音振动信号有关；并指出，通过振动信号的测量，可以监测磨矿操作参数的变化情况。

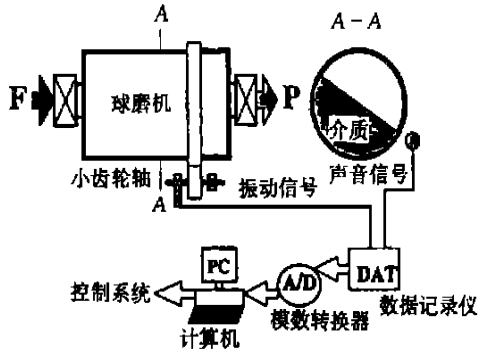


图 5　球磨机系统以及检测信号的获取和处理

另外，还有功率—振动双信号检测球磨机负荷等方法(如昆钢罗茨铁矿、山东焦家金矿、金川公司选矿厂等)。但总体来说，双信号检测球磨机负荷仍然不能确定球磨机的内部状态。

3 结论与展望

球磨机负荷是磨矿过程中的一个重要参数，球磨机负荷的检测是球磨机自动控制的一项重要内容，直接关系到控制的成败。

球磨机负荷包括球负荷、物料负荷以及球磨机中的水量，靠单因素检测不能实现球磨机负荷的准确检测，更无法判断球磨机的介质充填率、料球比和磨矿浓度；双因素检测虽然较单因素检测前进了一步，但仍无法判断球磨机的磨矿浓度。综上所述，单因素检测和双因素检测都无法准确判断球磨机的内部工作状态(即介质充填率、料球比和磨矿浓度)，因此难以实现球磨机的最优控制。

球磨机负荷检测的发展趋势应该是多因素联合检测(至少应该是三因素)，建立相应的数学模型，用以判断球磨机的介质充填率、料球比和磨矿浓度，实现球磨机负荷的准确、及时检测，为磨矿过程的优化适时控制奠定基础。

本文作者目前正在进行球磨机负荷三因素检测的研究工作。采用荷重传感器、声音传感器和功率传感器作为检测仪表，研究了球磨机转速率、介质充填率、料球比以及磨矿浓度对输出信号的影响，并建立了相应的数学模型。在球磨机转速率已知时，将检测数据输入计算机，利用编制好的软件，即可迅速求解出球磨机的介质充填率、料球比和磨矿浓度(即可求解出球负荷、物料负荷和水量)，然后根据需要

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

来调整介质加入量、返砂量或磨机新给矿量以及水量，从而实现球磨机的优化适时控制。

[参考文献]

[1] Lanštiak B·球磨机负荷的测定方法[J]·国外金属矿选矿，1975，(5～6)：64－68.

[2] 陈子鸣·数模及计算机在选矿中的应用年评[A]·第七届选矿年评报告文集[C]·1994(北京)·

[3] Kolacz J·Measurement system of the mill charge in grinding ball mill circuits[J]·Minerals Engineering，1997，10(12)：1329－1338.

[4] 马里诺夫 D·用于球磨机控制的新型传感系统[J]·国外金属矿山，1992，(7)：74－76.

[5] 河北铜矿选矿厂，北京矿冶研究院自动化室·球磨机负荷测量及报警装置——霍尔功率变送器[J]·有色金属(选矿)，1978，(2)：12－16，54.

[6] 陈炳辰，刘其瑞，杨小生·磨机的功率－声响双信号自动控制的探讨[J]·矿业科技，1987，(5)：21－30.

[7] Zeng Yigen，Forssberg E·Technical note monitoring grinding parameters by vibration signal measurement——a primary application[J]·Minerals Engineering，1994，7(4)：495－501.

Present State and Development Trend for Ball Mill Load Measurement

WANG Ze-hong，CHEN Bing-chen

(Northeastern University Liaoning Shenyang，110006，China)

Abstract：Measuring the load of ball mill is very important for grinding automationm，the present state for ball mill load measurement is discussed and the development trend is presented·

Key words：ball mill；load measurement；present state

信息之窗

全国性建材科技期刊《建材技术与应用》杂志

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

《建材技术与应用》(原《山西建材》)是经新闻出版署和科学技术部批准国内外公开发行的建材科技期刊，也是《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊和《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊。国内统一刊号：CN 14－1291/TU。

《建材技术与应用》主要报道国内外建筑材料领域的进展和动向，介绍建材工业的新技术、新工艺、新装备，交流生产技术和管理经验。主要栏目：政策法规、热点话题、试验研究、综述、技术交流、工程应用、管理之道、专题报道、信息动态等。本刊宗旨：开展学术交流，推动科技进步，竭诚为建材企业和相关企业服务。

《建材技术与应用》为季刊，大 16 开本，国内定价：每期 5 元，全年 20 元(含邮寄费)。本刊自办发行，订阅者可向本刊编辑部函索订单或通过邮局直接汇款至本刊编辑部收。

《建材技术与应用》承接各类广告业务，广告经营许可证号：1400004000073。有意刊登广告的客户，请与本刊编辑部联系。

地址：太原市坞城路 665 号《建材技术与应用》编辑部　**邮编**：030006

联系人：盛晋生　**电话**：(0351)7015706　**传真**：(0351)7015346

E-mail：sxjc@public·ty·sx·cn　http：www·sx-bm·com

户名：山西省建筑材料工业学校　**帐号**：0218－00826300526

开户行：工行太原市分行大营盘办事处

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