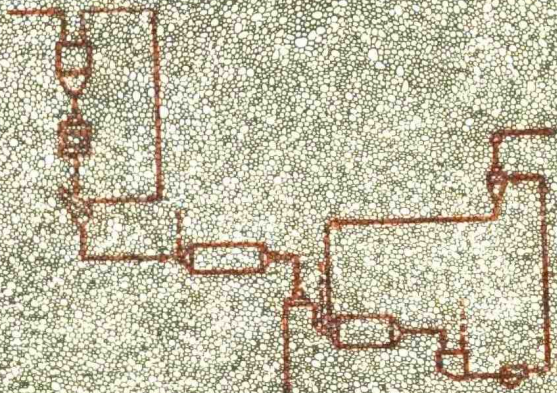


碎磨回路 的 设计和装备

A. L. 穆拉尔 G. V. 杰根森 合编

《碎磨回路的设计和装备》翻译组 译



冶金工业出版社

碎磨回路的设计和装备

A.I.穆拉尔
G.V.杰根森 合编

《碎磨回路的设计和装备》翻译组 译
责任编辑 黄淦祥

冶金工业出版社 出版发行

(北京朝阳区大屯黄杉树路11号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 39 1/4 字数 945 千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷

印数00,001~1,200册

ISBN 7-5024-0624-7

TD·103 定价22.60元

译者序

本书系根据美国矿冶石油工程师学会矿业工程师分会1982年出版的《碎磨回路的设计和装备》(Design and Installation of Comminution Circuits)一书译出的。

原书共61章,为节省篇幅将第4章粒状物料的粒度分布和表面积测量、第6章基建投资和经营费估算、第16章碎磨能量利用和材料磨损、第20章研制球磨机按比例放大模拟程序的一个事例、第34章收尘设备的选择和规格的确定和叙述历史、编写说明书、制图程序、各方面要求的安装特点、项目设计、仪表控制、操作人员的培训等内容的第44~60章,除保留第53章碎磨回路的节能、第59章碎磨回路衬板和磨矿介质的选择——实况研究外,共20章删去了。各章的参考文献和为纪念邦德而介绍其生平事迹的短文也未收入。

本书系统地总结了碎、磨工艺近几年来的科学技术成就,阐述了基本理论,试验研究的方法,设备类型、规格、性能、参数的选择与计算,数学模型及在回路模拟、最佳化和设计中的应用,最后都附有实例并汇集了生产厂的有用数据,是有关碎、磨工程设计的一本内容较全、资料较新、水平较高的专著。可供冶金、建材、化工等工业部门,从事碎、磨工作的工程技术人员以及大专院校师生参考。

本书由北京有色冶金设计研究总院选矿室组织翻译,参加翻译的有:谢纪元(第1、2、3章)、张远前(第4、11章及30章一部分)、徐赞生(第40章)、闵国伟(第5、21章)、刘文拯(第6、7、8、9章)、邢丽瑞(第10、11章)、王文敏(第12、13章)、刘起(第14、15章)、丁平衡(第16、32、33、34章)、卢荣富(第17、18章)、汪世阳(第19、20章)、于瑞华(第22、23、28、29章)、曲乃达(第24、25章)、喻谷新(第26、27、39章)、管趋庭(第30章)、董必祚(第31章)、朱国明(第35、36、37、38章)、杨松荣(第9章的一部分)。参加校对的有:陈贤书(第1、16、17、18、21、22、23、24、25、27、28、29、30、31、32、33、34、39章)、徐赞生(第2、3、4、14、15、41章)、陈登文(第40章)、苏耀广(第5章)、吴振祥(第6、7、8章)、丁平衡(第9章)、谢纪元(第10章及13章一部分)、王文敏(第11章)、邢丽瑞(第12章及13章一部分)、黄淦祥(第19、20章)、汪德忠(第26章)、周以瑛(第35、36、37、38章)。译稿最后由陈贤书同志统一校对整理,吴振祥同志审阅。本书在译校过程中凡能确定的一些技术性错误均予以订正,但由于我们水平有限,书中错误及不妥之处恳请读者批评指正。

本书出版得到了北京有色冶金设计研究总院、北京有色冶金设计研究总院德兴设计队、河北省金厂峪金矿、金川有色金属公司、化工部化工矿山设计研究院、河北黄金公司、沈阳重型机器厂、沈阳有色冶金机械总厂、张家口金矿等单位的支持与赞助,谨致以衷心的感谢。

译者

1987年12月

前 言

本书系统介绍了北美洲公认的碎、磨回路的设计和装备技术。已由美国矿冶和石油工程师学会矿业工程师学会选矿分会出版。本书敬献给磨矿设计的先驱者弗雷德·邦德(Fred Bond)。

本书原拟作为大学中设计课程的实践资料。然而,本书所包含的内容是如此详细,对选矿工业各部门都会是有用的。章节内容有:回路选择的因素,影响选择因素的规范,基建投资和经营费的估算,矿体取样,粒度分布的测定,典型的破碎、磨矿流程,物料平衡,实验室和半工业试验,回路模拟和设备选择计算的试验工作。提供了选择计算每种主要碎、磨设备和相应的单元输送设备的一整套方法。包括:破碎机,棒、球磨和砾磨,自磨和半自磨机,筛子,取样机,运输机,给料机,料仓,泵池,转运矿堆,收尘器,电动机、配电盘和传动装置,旋流器,重力分级机和泵。内容涉及设备规格,回路配置,各方面要求的安装特点,项目设计和仪表控制。最后,在书末还对培训和试运转应注意事项做了专题研究。

显然,本书是唯一的一本专著。每章都由章节编辑加以评审。全部荣誉应归功于这些编审的专家们。

章节著者为我们的利益贡献了时间和才智是应受到敬重的。他们是高度专业化选矿工业界的代表,包括私人顾问,设计公司,建设公司,设备制造、供应公司,生产厂矿,研究开发公司和高等院校。感谢赞助这部专著的公司。

最后,在此对协助研究本书结构的编委会和矿业工程师学会出版经理玛丽安斯内德克女士表示感谢。采矿和选矿工程分会,不列颠哥伦比亚大学道义上的支持也是非常宝贵的。

A.L.穆拉尔

G.V.杰报森

目 录

第一章	影响碎磨流程选择的各种因素	1
第二章	与碎磨流程设计有关的规程及其影响	20
第三章	为设备和流程选择采取矿样	33
第四章	可行性研究需要的资料	37
第五章	常规碎磨与半自磨磨矿系统的经济比较	48
第六章	小厂的破碎与磨矿 (250~4000t/d规模)	58
第七章	常规破碎厂流程的类型及特点	68
第八章	常规磨矿流程的类型及特点	81
第九章	碎磨回路的物料平衡计算	89
第十章	用试验室普通小型球磨机测定邦德功指数	108
第十一章	汤普森方法——关于磨矿机尺寸选择的对比	130
第十二章	破碎机所需功率的预测及产品粒度分析	141
第十三章	为设备选择所做的标准小型试验和半工业试验	151
第十四章	布伦达矿山公司中、细碎车间的数模研究	173
第十五章	计算机辅助破碎回路设计	186
第十六章	磨矿回路设计的模拟	197
第十七章	破碎机的选型	219
第十八章	影响粗碎机生产能力的因素	262
第十九章	棒磨机、球磨机、砾磨机和再磨机的选择	268
第二十章	粗磨机的选择、计算和当代实践	306
第二十一章	第一段自磨机、半自磨机的选择设计及操作	344
第二十二章	大型磨机的模拟放大和动力学——事例研究	357
第二十三章	筛子的选择及其规格的确定	372
第二十四章	料仓及堆场的选择与计算	386
第二十五章	输送机 and 堆料机的选择与计算	399
第二十六章	矿浆管线、泵池和流槽的选择及计算	416
第二十七章	磨矿回路砂泵的选择与设计	427
第二十八章	水力旋流器的选择和规格确定	447
第二十九章	重力分级机的选择及其规格的确定	460
第三十章	碎磨回路的电动机、传动系统电路的选择	473
第三十一章	取样系统的选择和计算	489
第三十二章	碎矿回路的仪表与控制系统	501
第三十三章	磨矿回路的计算机控制	516
第三十四章	以粒度控制为基础的磨矿回路的仪表和控制系统的选择与定型	528
第三十五章	第一段球磨回路	544

第三十六章	半自磨磨矿回路的仪表选择及控制系统.....	552
第三十七章	自磨机磨矿回路的控制.....	570
第三十八章	自校正调节器对磨矿回路的控制.....	574
第三十九章	碎磨回路中的节能.....	583
第四十章	碎磨回路衬板和磨矿介质的选择——实况研究.....	593
第四十一章	火湖(Fire Lake)铁矿石全自磨同半自磨对比的评价.....	604
单位换算表		619

第一章 影响碎磨流程选择的 各种因素

D.J. 巴勒特 (Barratt) 赖特工程有限公司
加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华

M.A. 索德基 (Sochocky) 德拉沃设计公司
美国宾夕法尼亚州匹兹堡

绪 言

影响碎磨流程设计因素的摘要

对一种特定的矿石来说,选择合适的碎磨流程是选矿厂设计中最重要决策之一。它的重要性是基于破碎和磨矿车间的基建投资和生产成本占选矿厂费用的大部分这一众所周知的事实。因此,本章将尽可能多地列举影响选择碎磨流程的各种因素。

一个碎磨工程项目要考虑多少因素,这主要取决于该项目的类型。例如,如果这个项目完全是新建工程,那么,绝大多数被确定的因素都必须进行分析判断。如果这个项目是生产矿山的扩建工程,或是紧靠现有生产矿山的新矿体,那么,现有矿山的生产情况将会影响一些因素或设计上需要考虑的某些约束条件的选取。现有矿山的基础工程或辅助系统可能适应某些扩建或新的发展需要,那么这些因素可能就没有必要再加以考虑。但是,对绝大多数项目来说,特别是对完全新建的、非常复杂的项目来说,本章所列举的各种因素都是必须予以考虑的。

要考虑的因素就像矿石有许多种类型一样,其范围是相当广泛的。因此,每一个设计都必须个别地、细心地进行分析。设计上最重要的阶段是分析和了解矿石性质。在研究工作中,首先应分析矿石硬度、矿石磨蚀性、脆性、水分、品位、矿物组成和脉石成分、单体分离粒径、化学成分和其他特性。然后要确定的因素应当是工厂大小、生产能力、厂址、气候、交通和供水等。

为最初的小型试验以及进一步的试验研究(根据需要而定,可以从较大规模的试验室试验到半工业试验)采取取样是非常关键的。取样的重要性绝对不可忽视。

通过最初选矿工艺流程的编制,碎磨工程师将会得到关于矿石单体解离度的设计技术条件,他将决定破碎和磨矿流程的结构和中间选矿作业。如果试验证明能够以矿石做介质的自磨矿是可能的,那就要做各种碎磨流程试验,并且从经济上进行评价。在很多情况下,磨矿段数是由碎磨工程师决定的,而不是由选矿工程师决定的。各种碎磨流程都有许多优点和缺点,最终要根据生产实际条件和经济效果来判断。要考虑的各种生产实际问题,例如对边远地区,是要供应质量好的棒和球(100~125mm)或是用更熟练的工人去操作一个技术复杂的车间。

最后一个非常重要的问题,就是要真正了解类似企业和有关企业的生产实践,要知道

这些企业是怎么做的，它们为什么这样做，以便从它们那里学到更多的经验。

可能考虑的各种碎磨流程

各种各样的碎磨流程向碎磨工程师提供了越来越多的课题。在本章中，为了简化分析判断，只是考虑在矿业普遍使用和普遍被接受的最基本的流程，这些流程是：

- | | |
|--------------|--------------|
| ——破碎—棒磨—球磨流程 | ——自磨—球磨流程 |
| ——破碎—球磨—球磨流程 | ——自磨—砾磨流程 |
| ——破碎—棒磨—砾磨流程 | ——单段半自磨流程 |
| ——破碎—单段球磨流程 | ——半自磨球磨流程 |
| ——单段自磨流程 | ——自磨—球磨—碎矿流程 |

每一个流程都有它的优点和缺点，但是，对于任何一个特定的矿石来说，对它必须作出专门的评价，当这种评价显示出某种流程的优点大于缺点时，那就应当对这种特定的流程进行更多的工作。这当然不是说对上述每一种流程都要进行试验，因为大家都知道这些试验要用很长的时间和大量的费用。但是，初步的、比较简单的试验，如以矿石做介质的可能性试验，邦德破碎冲击试验等是可以做的。这些试验可以用来排除前述一些流程的可能性。

工程设计程序与各种因素的选择

对一个设计项目来说，被指派的碎磨工程师从一开始就应该与选矿工艺工程师很好地配合工作，这是成功地设计选矿厂的必不可少的先决条件。汇集设计条件和标准以及对这些资料的评价可以由甲方自己来完成，也可以由独立的咨询公司来完成。无论是哪种情况，都要首先从地质报告开始。地质报告要描述矿体，并为采取最初的矿样提供指导。在这个阶段，矿样的数量一般只限制在决定基本参数的小型试验的范围，这些小型试验再加上“经验因素”，就使选矿工程师能拟定出几种处理矿石的初步流程。

在这种情况下，可以编制出一个初步的能够算经济帐的研究方案，这个方案要把与厂址、矿石类型、产品数量和质量等有关因素计算进去，其中有些因素可能是设想的、甚至是猜想的也可以。我们只能靠这些资料设想出碎磨系统的设计。选矿流程将规定磨矿细度，也许还要规定采用在磨矿段间有选别作业的多段磨矿流程。根据这些资料，碎磨工程师应当进行邦德功指数试验。对于初步可行性研究来说，这时就可以设想出常规的破碎—棒磨—球磨流程。这是考虑各种方案时迈开的第一步，它有利于对工艺流程的评价。还应当尽快地向委托的研究所提供矿样，进行以矿石为介质的试验和磨损指数试验。当然，这是假定最初的经济评价是合理的。在此基础上，更详细、完整的可行性研究就可以开始工作了。

可行性研究必须对所有的影响因素进行详尽的研究和探讨。根据工厂的地理位置、工厂规模和矿床类型，设计上可能需要更多的或更有代表性的矿样做较详细的小型试验或许半工业试验。在这些问题上，碎磨工程师必须作出许多决定，他应当在取得以矿石为介质的磨矿试验结果以后，决定进行哪种类型的碎磨流程试验以及进行多大规模的碎磨试验。对所做的每一种碎磨流程试验都必须作出评价，把经济、选矿和有关设备选择方面的许多实际问题考虑进去，这样作出的最后选择应当是最合理的。

各种因素的鉴别

矿体特性或选用流程的原料特性

1. 钻孔岩芯和矿样的地质描述

原始资料的收集过程是从地质报告开始的。为可行性研究采取矿样的方法取决于矿床的地质特性。

取得最初的矿样的方法可能各不相同，它应当适应于各自的特定矿床。在可行性研究阶段，选矿工程师可以用金刚石钻孔的岩芯样以及地表手选样或者槽探样进行试验，以便制定设计参数。

对碎磨工程师来说，地质报告中最有意义的指标应当是矿物组成、它们的相对含量和嵌布粒度、各种矿带的数量和每个矿带的主要特征等。为了给进一步决定问题提供最基本的基础资料，应当对下面一些因素进行评价。

2. 矿物分析

鉴定矿物标本可以决定有用矿物种类、特性、粒度范围、中矿连生体以及脉石组成等。这些资料将能提供单体分离的粒度分析，为第一段磨矿、中间磨矿或再磨矿以及大概的选别段数提供参考。

矿物鉴定的方法基本上是用反光显微镜看磨片，用立体显微镜看矿粒。当某些矿物必须进行特殊的鉴定时，可以用X-射线衍射分析。有时候矿石中的矿物共生状态非常复杂，用简单的光学显微镜或X-射线衍射分析无法鉴定，这时可以用电子探针来决定矿物性质和存在哪些元素。

3. 化学分析

化学全分析一直是一种很有用的方法，它对选矿流程设计是必不可少的。同时，它也为碎磨工程师提供一些思路，例如考虑在碎磨流程设计中可能出现的问题以及对流程设计参数的一些补充要求等。

例如，如果有根据证明碱类或硫酸盐类矿物，那应当预计到矿石泥化可能是一个问题。硫酸盐还会形成酸性矿浆，造成介质消耗增高。预计在流程当中可能会增加洗矿作业。

4. 物理性质（硬度、脆性、粒度分布）

通过肉眼观察，人们立即可以得到矿石的硬度、块度、脆性等印象，以及原生矿泥或粘土型矿物含量和矿石的其他物理特性。这些观察可以在破碎、筛分、磨矿设计中提供一些可能出现问题的线索，并且可能会影响流程设计。例如，在选别锡、钨、铅、铬或钽矿时，要避免产生矿泥；在粗磨矿当中辉钼矿以块状花岗岩闪长岩上是沿着解理面而解离的；在处理粘土质矿石时，在细碎车间使用半自磨可以消除许多难以解决的问题等等，当然，为了做邦德可磨性试验、介质的磨损试验、自磨矿介质的性能试验等进一步采取矿样是很有用的。应当强调指出，前面提到的这几项试验需要矿样的数量很少。这些试验的结果显而易见是作为设计中的最终的定量参数，而且也能使选矿工程师更好地了解矿石的特性。仔细地分析这些资料最后将使可能选择的流程方案越来越集中。

应当强调指出，如果矿体不是均一的（应搞清楚是什么类型的矿石），那么，不同类型的

矿石应当分别采样。对每一种类型的矿样都应做邦德可磨性试验、介质的磨损试验和自磨矿介质的性能试验。根据采矿计划,应当指出在什么时间选矿厂的给料是以哪种矿石为主。因此,建议对每一种类型的矿石都单独做试验,这个试验结果会显示出不同类型矿石之间的波动程度,从而就可以预计到选矿厂生产时的情况。组合矿样的试验可以在半工业试验阶段进行。

设计要求的各种条件

1. 流程给料参数的审查(矿山产量、生产进度表、通过能力和粒度分析)

碎磨工程师要全面了解工程情况,对工程有一个总的概念是非常重要的。他应当熟悉采矿布局、采矿进度、采矿生产能力、采矿方法和设备规格等等。这些会影响工艺设备规格的选择,特别会影响破碎和第一段磨矿。例如粗碎和细碎的工作时间、需要的矿仓容积、劳动定员、以及破碎和磨矿厂房的位置等。

通常在任何一个建议的碎磨车间中都有粗碎机,在大多数情况下,粗碎机是旋回破碎机,安装在地表。对坑内采矿来说,通常是颚式破碎机。这些破碎机的规格不仅要取决于采矿生产量和采矿的最大块度,而且还取决于要求的破碎产品粒度。例如,根据自磨机的规格不同,其给料粒度在15.25~30.5cm之间可能是合适的。

在设计开始阶段,碎磨工程师必须知道的另一个重要因素就是所要求的选矿处理能力。这是在经济可行性研究阶段要决定的问题,它要决定该项工程服务年限中的产品数量和质量。通过用原矿品位推算或根据经验可以预计出产品特性和所需要的原矿数量,这些数据是较快便可得到的,但是其精确程度可能差一些。

2. 审查各种流程试验所需要的矿样量

矿样的类型和数量可能变化,对任何一个给定的矿体而言,它的工艺流程的可靠性都是取决于矿样,这一点无论怎样强调都是不过分的。应当建议矿山花费一定时间和费用,以便取得合适的矿样。所需要的矿样数量不应限制太死,取样程序应根据矿床类型和矿物类型决定。

正如前部分所指出的,第一批矿样通常是从圈定矿体的钻探过程中取得的。一般是把岩芯劈成两半,其中一半作为选矿矿样。有时候也用地表手选样或地表探槽样进行初步的小型试验。一般做邦德球磨功指数和棒磨功指数需要22.7kg矿样,做冲击破碎试验需要7.7cm见方的块状矿样。如果已经证明一个矿床是有经济价值的,并且通过初步的小型试验证明其试验结果是可以的,那就需要进一步采样。如果初步的以矿石为介质的性能试验证明有可能采用自磨矿或半自磨矿,也必须为进一步做这样的试验而采取矿样。无论是露天采矿或是坑内采矿,矿山的初期开拓工作通常都有进入矿体的竖井或平硐。做一次标准的自磨工业试验,用直径1.7~1.8m的中间试验型自磨机,每种类型的矿石需要22.7~45.4t有代表性的原矿样。矿样应当用通常的凿岩和爆破这种采矿的方法采取,最大块度约为203mm。

在选择试验流程的时候,取样和试验所花费的费用和做试验所要的时间是一个很重要的因素。

3. 类似工艺流程的鉴别,它们的必要条件以及确定碎磨段数的内在联系

每一种碎磨设备都有它固有的特性。一般而论,棒磨机的产品比球磨机的产品中细级别含量要少一些;闭路磨矿可以减少过粉碎;自磨机可以使其沿矿物界面破碎,其结果是可

以在较粗磨的情况下达到矿物单体分离。这些基本原则和某种矿石的特性加在一起,就会影响碎磨工程师的思想。当他选择设备的时候,这种设备的产品适应下一步选矿工艺所要求的给矿特性。假若某种矿石容易泥化,在流程中就可以使其用高效分级设备和磨矿机构成闭路,这种高效分级设备可以用高速振动筛或者用两段水力旋流器分级。要除去容易引起麻烦的粘土质矿物,可能要干式磨矿,并且在矿石变湿之前进行预选。

反过来说,选矿工艺流程也必须适应碎磨设备能够达到的产品细度,这在自磨矿中是很重要的。

这种考虑可以用最新的铁镓岩选矿厂的流程来说明,就一般而言,对铁镓岩可以设计成两段磨矿,即棒磨—球磨流程或自磨—球磨流程。但是,最新的设计是采用单段自磨机与磁选机和水力旋流器构成闭路磨矿。尽管这种流程在耗能方面不象普通的两段磨矿流程那样有利,但它的流程简单,基建投资少,使整个经济效益更好。

很明显,破碎流程和选矿流程之间存在着不可分割的内部联系,在设计中必须把它们紧密地结合起来考虑。

4. 对工艺流程中的每段碎磨工序确定其给料和排料粒度特性

在制定工艺流程的最初阶段,就要确定给料和产品的粒度特性。首先要确定的是选矿厂给料或矿山来料的粒度分析,因为细级别含量的比例会影响粗碎后筛分作业的必要性。露天采矿可以调整它们的最大出矿块的大小,以适应粗碎机的要求。对坑内采矿,特别是粗碎机安装在坑内的情况,从坑内出来的矿石粒度可能要小得多,因为它要受提升和运输设备容量的限制。当然,工艺流程试验所提供的第一个指标可能就是磨矿产品粒度特性。

多数碎磨设备都是设计在一定的粒度范围内工作的,但是通常在这些设备之间存在有交叉区段,这就给碎磨工程师在解决问题和利害关系方面都带来了一定调整范围。

矿石在进入磨矿之前,应当破碎到多大粒度最好,就是这方面的一个问题。最近,在高效能破碎流程的设计中,越来越多地采用直接进球磨而不采用棒磨—球磨流程。因而也就不存在与棒磨—球磨流程一样的对产品粒度和设备规格的限制。如果使用棒磨机,也更愿意在棒磨前使用闭路破碎流程,以避免粒度偏析(即迫使棒与棒离开)。如果破碎是在坑内完成的,而其产品粒度又小到不能满足第一段自磨矿的要求,那就要象北美的生产实践一样,加大球磨机的长径比。南非和斯堪的纳维亚半岛的生产实践或许也可以回答这个问题。

5. 功指数和磨损指数的重要性

对碎磨工程师来说,邦德功指数是非常有用和方便的参数。把试验结果代入邦德功指数的公式当中,就能得出任何特定矿石磨矿所需要的单位功耗指标。另外,由于这种试验方法需要的矿样少,花钱也较少,所以在—项工程开发的初始阶段就可以用岩芯矿样很快地和准确地测定出磨矿所需要的单位功耗,这个资料在—项工程开发的早期阶段对于许多经济分析工作是非常有用的。根据碎磨工序不同的应用类型,应当测定不同的功指数,即破碎功指数,棒磨功指数和球磨功指数。在工艺流程当中,如果设想不论哪一段碎磨工序其功指数都是一样的,那就往往要犯错误。要理解功指数 W_i 是用来决定处理单位矿石功耗的一个参数。在目前普遍实行公制的情况下,功指数的报告仍然用短吨来表示,如果需要也可以调整为用公吨表示。

磨损试验可以作为在破碎和磨矿中金属磨损的预期指标,如果试验一旦显示出钢耗在

生产成本中所占比重较大时,那就应当研究采用自磨矿。

在配出整个矿区的组合矿样以后,应当用组合矿样做邦德功指数试验,以便得到组合矿样的单位功耗。用各种类型矿石的邦德功指数的数学平均值常常不能得到正确的平均单位功耗。不同的磨矿类型可以使每种矿石的磨矿产品产生不同的粒级分布,有的比数学平均值粗一些,有的比数学平均值细一些。如果由于流程复杂或矿床储量大,需要做半工业试验,则应当用邦德功指数去检验半工业磨矿所产生的数据。通常这种磨矿机的规格比选矿工艺半工业试验所需要的规格大,因而不得不间断运转,其结果不能恰当平衡。对于小球磨机而言,它很难测出矿石的功耗,因为大部分功都消耗在无用功的传动和固定负荷上了。对半工业试验的磨矿机来说,磨矿能力试验主要是在磨矿实际功耗和测定功耗之间建立一个相对的比例关系。这可以通过以下两种方法得到:

——用很精确的仪表来校准磨矿机;

——磨几种已知功耗的矿石,在半工业磨矿机测定功耗与实际功耗之间建立一个经验修正系数。

在这种性质的半工业磨矿机的标定工作不可能实现的情况下,邦德功指数法所提供的就是最好的功指数数据。

6. 所需功耗的确定

对于能够采用常规的破碎和磨矿流程的较小矿体或比较均质的矿体,确定矿石的功耗或只要测出邦德功指数就够了。但更普遍的情况是做一次半工业试验或者用其他方法来验证邦德功指数的数值。许多公司已经发展了与此有关的试验室操作技术,已经改正了一些现存操作方法,这些年来已出现了另外一些成功的方法来决定功耗。当使用半工业试验的磨机来获得具体的磨矿功耗时,一定要注意使磨机保持平衡,这些试验是专门用来取得磨矿数据的。特别是对于自磨机来说,要有一个详细的试验程序。现在多数试验磨机的直径是1.7~1.8m,一个试验程序需要22.7~45.4t矿样。这些试验也可以在矿山现场做,由于矿量大且矿床变化多,这样做可能更有意义。但是从经济角度考虑,还是把矿样运到试验室要更好些,那里有熟练的人员和现成的试验方法。

现在还有一种试验方法,就是用450mm的小磨机做第一段自磨机的单位功耗试验(自磨功指数),它也可以达到满负荷半工业试验的要求。用这种比较便宜的方法试验各种类型的矿石也不会出现不正常的情况。

综上所述,单位矿石的功耗对多数常规流程来说,可以用测定邦德功指数的程序进行测定,也可以用各种试验室的磨机进行测定,但这些磨机应是已经校定过的,并且与现有的某生产厂的数据有关系。如果需要的话,也可以进行半工业试验。对于自磨矿而言,它可以从450mm的磨机试验中获得数据,但一般还是应当做半工业试验。

流程选择

1. 各种流程的能耗与运转率、生产方式、生产成本及破碎、磨矿之间的划分等各种因素的关系

世界上除了极少数地区以外,能耗在评价任何磨矿流程当中,都占有最重要的地位。如前所述,在任何选矿厂内,碎磨是耗费能量最多的作业。从成本分析当中可以看出,使用能量越少,总的经济效果就越好。将来电费迅速上涨的可能性要求我们必须细心地检查

和研究如何才能使能耗维持在最低水平。如果能考虑到下面的一些数据是很重要的,即与常规的破碎、磨矿流程相比较,半自磨流程的单位能耗可能高出25%,全自磨流程可能高出100%。它们的金属消耗当然较低,但对第一段自磨机来说,只能实现理论节省数的60%左右,因为衬板的消耗和给矿溜槽的消耗都比常规流程要高。设备运转率对全自磨流程来说,大约是90%或更低一些,对半自磨来说已经可以达到92%。J.H巴萨瑞尔(Bassarar)报导,总结了塞浦路斯-皮马矿山公司的经验。该公司用常规流程和半自磨流程处理同样的矿石,从1974年到1977年共进行了四年的比较。这个比较表明,常规流程和半自磨流程相比,衬板消耗高6.7%,球的消耗高14.5%,平均钢耗高13.5%,但是电力消耗却低15.5%,这就是说一个流程多消耗钢铁的费用正好平衡了另一流程多消耗电力的费用。

如果把磨砾石的功率也考虑在内的话,砾磨的单位功耗大体上和球磨差不多。但是确切地说,如果把给定的磨机用做砾磨机,它的最大功耗只相当于该机用做球磨时的50%,而它的处理量也只是球磨机的一半。棒磨-球磨流程的单位电能的效益是最高的,它的运转率可以达到95%或更高。稍低于单段球磨或球磨-球磨流程(这些流程可达97%),因为棒磨机要停车装棒。以碎矿产品作为给料的第一段球磨流程和第二段球磨比较,它的效率要低,在标准的功率计算以外,要增加10~20%的系数。格子型球磨机的能量消耗要比效率相同的溢流型球磨机多15%,它的检修费用要高一些,运转率要低一些。

在碎矿流程自动化方面最新的发展是把破磨之间的粒度分界向多碎少磨的方向变化。它可能淘汰棒磨,使整个操作系统更加完善。已经设计了双摆锤试验(the twin pendulum test)进行碎矿产品粒度分析和确定单位功耗。这样设计的破碎和筛分流程就可以减少基建投资和生产成本,并提高功效。当然,包括在电子计算机在内的更精确的系统控制将使选矿厂的生产效率更高,并将得到全面发展。

总的来说,单位电价取决于发电的方式和破碎厂的地理位置,为了使总的能耗的费用下降,从而使基建投资和生产成本下降到最低,电费可能是影响设备选择和选矿厂设计的最重要的因素。目前在北美,公共用电的价格是在1.5~6.5美分/kW·h的范围之内,在边远地区,需要用柴油发电,电费可能高达15美分/kW·h。对于不得不以高价支付电费的工程,一般不愿意采用有潜力节省衬板和钢球费用的自磨矿流程,因这种流程和传统的破碎-磨矿流程比较单位电能消耗高。

2. 选矿效率对流程选择的影响

对于标准的传统流程,主要问题是要确定每段磨机的磨矿量,是开路磨矿还是闭路磨矿。磨机给料的波动当然从来都是不希望发生的,但是,从碎磨流程设计的角度看,这种情况在一定程度上也是可以允许的。但是自磨矿就带来了许多新的复杂性,很多敏感性的问题都是从给矿波动引起的。矿石的特性会指出这种矿石希望怎样磨矿和磨到什么程度。如果这种矿石很容易沿着矿物和脉石晶粒界面而破碎,有用矿物就可以在粗磨矿的情况下单体分离,这样自磨矿就比有介质的磨矿效率高。另一个在自磨流程设计当中可能被忽视的事情,就是在给定的产品粒度特性下,磨机的给料量,由于给矿粒度、硬度和其他特性的变化可能有50~100%的波动。这种变动必须使下一步的选矿工序与之相适应。当然,将给矿更好地混合,保持给料的均一性,对自磨机来说,其必要性是很明显的,当然也需要对全流程的操作进行更密切的监测和控制。

一般来说,自磨矿或半自磨矿在对其操作技术和矿石特性充分了解之前,大概要有半

年到两年的适应阶段。另外,也可能对工艺流程进行某些调整。如果矿石很湿,很粘,对现有的破碎和筛分作业造成很大困难的话,用半自磨矿的方法可能很容易解决这些问题。当然,由此而引起的在时间上,产量上的得失必须予以足够的估计。

棒磨机能首先磨碎颗粒大的粒子,同时它的产品中细级别含量又不像第一段球磨机那么多,这两个固有的特性,使人们在很多情况下都选用棒磨机。这对铁燧岩选矿流程中的磁选回收率是有利的,因为该流程是在第一段磨矿以后,跟着便是粗粒湿式圆筒磁选机。选矿的一个重要原则就是在有用矿物一旦单体分离以后,就应该尽快地把它选出来。从理论上讲,进行多段磨矿,每段磨矿以后,都有选别作业,这种流程的选别效果要比单段磨矿,后面跟一段选矿作业的选别效果要好得多。但是这种流程不论从基建投资还是从生产成本方面都是不经济的。因此,在某些选别和磨矿功效方面不得不作一些牺牲,以求达到合理的平衡。选别锡、铁、钨、铬、铅和钽矿石的选矿流程就是这方面的典型。

与自磨或砾磨比较,用钢介质磨矿的常规磨矿系统处理复杂的硫化矿时,钼、铅、锌浮选的回收率要差一些。但是应当强调指出,在处理这种类型矿石时,这个影响并不总是那么明显。造成这种现象的物理化学机理还不是很清楚的。研究工作者认为,影响因素还有矿石类型、含铁量、脉石矿物性质(酸性或碱性)、所用捕收剂和调整剂的种类、硫化矿的氧化程度、矿浆中氧的含量等等。总的结论就是,如果这种矿石各方面都适合自磨矿的要求,那就应当用自磨矿流程,决定问题的关键当然是经济分析。

3. 各种流程总费用的研究

最近的实践已经可以看出,为了降低基建投资和生产成本,碎磨设备的规格越来越大。显然,自磨机一直在建造更大的设备,在这方面,对机械结构设计的注意力要比工艺设计多一些。对传统的磨机来说,棒磨机规格看来已经达到某个限度,目前考虑的重点是更大直径的球磨机的效率问题。

从结构和机械的角度来看,可以选出更大规格的球磨机,有迹象表明,如果把在要求的磨矿粒度下以发挥最大的功效为目的的话,大直径球磨机在这方面低于可能达到的最好指标。因此,在一定情况下,可能没有必要在设计选矿中采用较大规格的球磨机。经验表明,可能在球磨机内存在一个物料传动的问题,因为矿浆的流速与球磨机内的纵断面有关,纵断面和球磨机直径的平方成正比。而大直径球磨机驱动功率增加与直径的 $2.3 \sim 2.4$ 次方成正比。可能达到的生产能力与直径的 2.6 次方成正比。

棒磨机的尺寸目前受最长的笔直的棒的限制,现在能够供应的这种棒长为 6.1 m 。为了避免搅棒,建议棒磨机的长径比为 $1.3:1$ 。目前最大规格棒磨机的净有效容积为 $\phi 4.7 \times 6.25\text{ m}$ 。球磨机的规格可以更大些,这样所需的生产系列就可以很少,这是考虑第一段磨矿回路时的最引人注意的一个问题。考虑到单位能量所发挥的最大效益,建议最大球磨机直径为 5 m 。比这个规格更大即直径为 5.5 m 的球磨机已经在第一段磨矿中使用了,经验表明,这种球磨机具有不同程度的内在缺陷,包括装球率、速度、给料粒度、球的直径、衬板结构形状、物料在球磨机内停留时间和物料的混合程度等等。现在有一台直径 5.5 m 的球磨机安装在新墨西哥州希尔斯伯勒 13600 t/d 铜钼选矿厂里,再磨从半自磨回路出来的产品。这是一个只有一个系列的选矿厂,选择这台设备就是为了降低基建投资和操作费用。这台球磨的生产操作效率还有待于同相同直径的球磨机进行比较。

其他值得考虑的费用的问题还有:

——多台单段磨矿机的选矿厂的基建投资要比两段磨矿的选矿厂高,因为第一段磨矿需要昂贵的给料和贮料系统,一般还要有更多系列的细碎机和筛子。但是单段磨矿的成本低,因为操作工人少维修工作量也少。

——由于砾磨机的砾石密度小,所以与同样功率的球磨机相比,它的体积大,投资高,但是单位生产成本一般要低一些。

——半自磨的安装功率要比同样规格的自磨机大,因此,对于同样生产能力来说,半自磨的投资要小。D.J巴勒特(Barratt)曾经论证过,当生产能力大于72600t/d时,半自磨流程和传统流程在基建投资、生产成本、占地面积等方面的比较。比较时,两者都使用典型设计流程和设备规格。在这篇文章当中,需要及时反映目前使用的更大的设备规格和更高的电费。论证了半自磨流程在处理规模很大时,在磨矿设备费用和占地面积方面具有优越性,两方面的对比,实际上已经证明半自磨—球磨流程是一种成功的和流行的流程。这种流程对给矿变化有比较好的承受能力。半自磨缺点之一是必须保持满负荷。否则,将可能出现钢球和衬板损坏的问题。由于矿石变软或变细,处理量就会出现波动,除非下一个作业的设备规格很大,否则负荷波动问题是不可避免的。

4. 工艺要求与水资源利用和供水费用的关系

水是物理选矿当中最常用的介质,只有极少数的矿石是在干式作业的情况下进行选矿的。但是,世界上有的地区缺水,水费昂贵、甚至根本没有水。有的矿石位于海边,可以使用海水。另外,有时用干式预选也是可能的。第一段干式磨矿要带有干燥手段,下一步可能是干式磁性滚筒或干式重力选矿,把经过初步富集的精矿运到有水的地区进行最终的选别。

曾经使用过干式自磨、干式球磨和干式棒磨,这些设备需要的功率比较大,必须有严格的控制水分和控制温度的手段,需要有完善的收尘控制设备。不能润湿的物料,如水泥烧块,滑石和直接装运的针铁矿化铁矿石,也还有许多干式磨碎装置,这些铁矿石要磨到制球团的粒度,如采用湿式磨碎也不可能进行过滤。即使水是很丰富,这些物料也应干式处理。

5. 细磨矿的概念

经过试验证明,产品经过再磨增加表面积可以提高产品质量时,有些中矿或最终精矿需要进行再磨矿。这项任务看起来相当容易,因为实际上只能使用球磨机(最近在美国西南部一个铜矿在这个作业选用了塔式磨矿机)。但是在功率计算上可能是任人误解的,它可以使用邦德功指数计算,但必须给予特别注意,因为邦德功指数试验要求磨碎比要达到6:1才能得到准确的数据。必须进行专门的试验,并且补充一些数据。多数情况是用试验室的球形球磨机或阿贝球磨机做出一个磨矿时间和矿石表面积的关系曲线。可以用这种试验室的球磨机和已知的矿石进行标定来决定具体的磨矿功率。究竟采用开路磨矿还是闭路磨矿,要根据对产品特性的要求并参照目前类似企业的生产实践而定。

6. 大型和小型选矿厂对厂址位置、厂址地形、总体布置、交通、气候、降雨量、物料运输和提升、基建投资、生产成本、经济价值、备品备件库存等方面的考虑

在设计碎磨车间的时候,真正地熟悉厂址地形、气候、矿区特点、交通和降雨量等是非常重要的。既然矿体的位置是不能变动的,那末,选矿厂的具体布置和设备选择就应当创造更多的条件来适应这些情况。

例如,在北极圈把整个工厂紧凑地布置在一个建筑物之内,就创造了节约能源的条件并提供了舒适的工作环境,福克斯矿(Fox mine)和奥尔夫克(Arvik)就是这样布置的。在有雪崩的高寒山区,奇林(Chilean)铜矿是把粗碎与中细碎及选矿厂分开,粗碎紧靠矿山,然后用地下带式输送机把矿石运到比较低的安全地点。在荒凉地区或交通不便的地区,要避免采用大型设备,要使用能拆开的破碎机机架和磨矿机筒体,要能把它们分解为较小的部件以便通过公路路基和铁路隧道。

破碎后的矿石或粗精矿是用火车运到几百英里以外港口的最终选矿厂去,在这样的铁矿企业里,当把矿石或粗精矿运往再处理厂或精选厂之前,先在矿山进行破碎或粗选是很普遍的。如果由于水质会对磨矿介质发生化学侵蚀作用或由于水源紧张,可能需要采用干式磨矿。设备运转率和人员质量的因素,可能会要求设计和控制采用更先进的技术。大选矿厂可能要采用这些技术,小选矿厂就不一定。但对每一个具体项目而言,这是一个经济问题。小选矿厂是一个相对的概念,它必须大到在经济上有足够的生命力,这可能由许多因素来决定,碎磨流程设计也是一个影响因素。对于大选矿厂来说,许多辅助设施如公路、铁路、仓库等都是设计中的主要组成部分,没有这些辅助设施,大选矿厂的设计是不可设想的。在客观上存在这样一个经济的规模。对小选矿厂来说,它的交通和位置是影响成本的重要因素。维持日常生产所需要的关键项目,如特定的浮选药剂,高质量的棒的供应,半自磨流程的100~127mm球的供应等,这些都可能是影响流程选择的决定性因素。特别是对经济规模进行过研究的项目更是如此。对大型矿山,制造商普遍有专门的机构向矿山供应物品,而对于小矿山,就没有这种条件。对于小于4536t/d的小型选矿厂,选择设备的规格和数量可能对基建投资和生产成本有很大影响。例如,生产同样多破碎产品的球磨或棒磨,破碎车间采用每周5班工作或每周10班工作,在占地面积和人员需要上就相差很大。为大型选矿厂制造的设备与它的生产能力的增长是相适应的,它在碎矿每星期的作业班数上就不像小选矿厂那么灵活。

还有一个经常被忽视的问题就是:在破碎和磨矿设备选择上考虑将来扩建计划的因素,大型选矿厂常常是增加几个系列,而对很小的选矿厂来说增加球的装入量和增加球磨机转速可以在很大程度上增加产量。

各类矿石碎磨流程的特点

铀

在北美,铀矿的碎磨实践加拿大和美国是不相同的。这种不同主要是由于在两个国家所发现的矿石类型不同而造成的。

加拿大的矿石可以分为赋存在萨斯喀彻温省比弗洛奇(Beaverlodge)、阿萨巴斯卡(Athabasca)盆地和伍拉斯顿(Wollaston)褶皱的以脉状产出的硬质岩(hard rock)以及在安大略省埃利奥特湖(Elliot Lake)和阿格纽湖(Agnew Lake)地区的砾岩。加拿大砾岩的特点是粘着力很强,所含的是石英砾石。因此,为了把赋存在胶结物中铀的有价矿物分离出来,必须进行磨矿。一般解离粒度为50%小于200目。

另一方面,美国的铀矿是以砂岩的形式赋存在怀俄明州、得克萨斯州、新墨西哥州和科罗拉多高原。砂砾含铀很低,并且可以用中等的磨矿使含铀的颗粒胶结物与砂砾分离。

这些矿石典型的磨矿细度是80%小于35 μ 。

加拿大最早的选矿厂是在萨斯喀彻温省的比弗洛奇地区和安大略省的班克罗夫特(Bancroft)和埃利奥特湖地区。它们的工艺流程是常规的多段破碎和磨矿。虽然埃利奥特湖地区的砾岩能够产出砾石,但是直到最近扩建的选矿厂即奎克(Quirke)选矿厂时才采用砾磨。从而,全部矿石都进行破碎和磨矿、磨到母岩中铀矿物的单体分离粒度。在班克罗夫特的马达沃斯卡(Madawaska)选矿厂在1978年使用了砾磨机,在处理伟晶岩矿石时,它做为活化矿物表面的一个组成部分。

采用半自磨是一种最新的趋向,因为它可以消除在破碎过程中向大气中释放可能产生公害的氢气。在湿式磨矿作业中,并且尽可能地加大给料粒度,氢气就可以溶解在水中。1964年,在比弗洛奇首先使用了两室 $\phi 5.8 \times 5.2\text{m}$ 带有中央周边排矿格子的半自磨机,安装功率1470kW,接受颚式破碎机的排矿(宽边排矿口152mm),使用152mm钢球,消耗量0.75kg/t,半自磨机与一台固定筛构成闭路。其他利用这种概念的选矿厂还有拉比特莱克(Rabbit Lake从前属加拿大格尔夫矿物公司)它也是采用半自磨流程。还有阿纳康达(Anaconda)矿物公司的布卢沃特(Bluewater)选矿厂、舍夫龙(Chevron)资源公司的彭纳玛利亚(Panna Maria)选矿厂、克尔麦吉(Kerr McGee)核子公司的彻奇罗克(Church Rock)选矿厂、落基山(Rocky Mountain)能源公司的贝尔克里克(Bear Creek)选矿厂和Sohio公司的巴尔(L-Bar)选矿厂,所有这些选矿厂都采用和筛子或旋流器构成闭路的一段半自磨。

在美国的怀俄明州和新墨西哥州,其他一些选矿厂采用粗碎后进反击式破碎,然后是一段棒磨进行粗磨矿。加拿大萨斯喀彻温省的克拉夫莱克(Cluff Lake)选矿厂用常规破碎流程和一段棒磨。在新墨西哥州的格兰茨(Grants),用两段球磨代替棒磨,磨矿细度根据所处理的矿石是砂岩还是石灰岩而定。在加拿大萨斯喀彻温省北部的基莱克(Key Lake)工程设计中,将使用旋回破碎机、锤碎机和一段球磨流程。

政府、工业健康监督机构和工人的要求将继续是铀矿石破磨流程设计的影响因素。

铁

铁矿石工业的碎磨实践变化比较大。铁矿石根据它的性质划分,可以从类似明尼苏达州的铁燧岩那样的块状磁铁矿开始,到类似拉布拉多(Labrador)的镜铁矿和加拿大魁北克省的镜铁矿,再到类似委内瑞拉和西澳大利亚的风化的针铁矿或褐铁矿,这些矿从其物理性质看,属于红土矿类型。每种特定的矿石都要用某种特定的碎磨方法。但是尽管如此,如明尼苏达州处理磁性铁燧岩选厂的例证那样。生产实践仍然是有很大变化的。这种铁矿平均含铁25~35%,其中60~70%是磁铁矿。这种矿石非常硬,非常难磨,而且必须磨到 $-44\mu\text{m}$ 占80~95%才能单体分离。共有8个球团厂,它们是巴特勒铁燧岩矿(Butler Taconite)、国家钢铁公司(National steel)、希宾铁燧岩矿(Hibbing Taconite)、明塔克(Minntac)、埃弗莱思(Eveleth)、梅诺卡(Minorca)、伊利(Erie)和里瑟夫(Reserve)。

里瑟夫和伊利是使用棒磨、球磨流程的老厂。但是当自磨矿普遍被人们接受的时候,一些新厂在建设或扩建当中,有三个厂采用了不同类型的自磨流程,有三个仍然采用传统的棒磨、球磨流程。