

自磨理论和实践

[苏] B.П.雅申 A.B.波尔特尼科夫

郑 飞 译

中国建筑工程出版社

自磨理论和实践

[苏] B.Π.雅申

A.B.波尔特尼科夫

郑 飞 译

中国建筑工业出版社

本书论述矿石自磨的理论和实践。书中阐述了磨矿工艺和磨机结构参数对自磨指标的影响及矿石自磨过程的强化。介绍了怎样进行确定自磨可能性的试验，研究了自磨对其后选别工艺指标的影响，还对标准的磨矿方法和自磨方法做了技术经济比较。

该书可供矿冶工业科研和设计部门的选矿工作者参考，也可供有关院校学生阅读。

本书由郑飞翻译。译稿的第一部分第一至第五章经王栋知、第一部分第六、七章及第三部分经贺德仁校阅。

В.П.ЯШИН

А.В.БОРТНИКОВ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

МОСКВА «НЕДРА» 1978

* * *

自磨理论和实践

郑飞译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：8¼ 字数：185千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷

印数：1—2,100册 定价：1.15元

统一书号：15040·4250

序 言

现代有用矿物的选矿特点是耗电量大，而且钢材、水、药剂和其它材料的消耗也大。

矿物原料中 useful 组分品位的下降与生产规模的扩大，都需要改进各个选矿作业和回路，首先是矿石准备作业（破碎和磨矿），它是费用最大的选矿工艺回路之一。

通过对平均数据的分析，以及从各选矿作业的费用比例^[55]来看，可以确定如下几点：

在选矿，例如有色金属矿石选矿总投资中，破碎与磨矿作业占55~70%，其中破碎设备占23~41%；

在生产总费用中，破碎与磨矿的费用为55~70%，其中破碎占15~22%；

在选矿厂的劳动总费用中，破碎-磨矿车间费用占30~40%。

上列数据说明改进矿石准备作业的必要性。

选矿厂的破碎和磨矿都按多段流程进行的：采用圆锥破碎机破碎和采用装有金属磨矿介质（棒、球和磨辊）的圆筒型磨矿机磨矿。这些工艺流程由于矿石破碎比不大，需要多段作业、金属消耗较大（钢球平均消耗约1.0~1.5公斤/吨矿石）、还不一定能保证连生体得到必要的解离，而且会使细粒分散的磨损铁进入成品，这在许多情况下会影响其后的选矿和导致成品质量下降。

鉴于以上原因，制订了矿石准备作业的新流程，该流程在某种程度上克服了现有破碎和磨矿方法的缺点。在矿石自磨过程方面，取得了最大的成功。属于这种方法磨矿的有各种形式的自磨机，在该种磨机内主要是以同一原料的大块物料作为磨矿介质。

自磨用于铁矿石、多金属矿石、铀矿石和含金矿石的选别，也用于水泥和其它材料的准备作业中。

书中引用了企业采用自磨过程的生产成果、以及作者和其他专家们的科学研究成果和理论探讨。

В.П.雅申(В.П.Яшин)撰写了本书序言，第一部分的第一、二、四、五、八章和第三章的第一节和第五节；第二部分的第四、五章。

А.В.波尔特尼科夫(А.В.Бортников)撰写了本书的第一部分的第六章、第三章第四节；第二部分的第一、二、三章，第三部分的第二、四章。书中其他章节是由两著者共同撰写的。

目 录

序 言

第一部分 自磨的理论和技術基础

第一章 自磨过程的分类	1
第二章 自磨机和自磨装置的作用原理	12
第一节 一段自磨机中物料的运动	12
第二节 现代圆筒型磨机中物料运动的研究结果	18
第三节 射流式磨机	29
第三章 工艺参数对自磨指标的影响	32
第一节 圆筒型自磨机的充填率 ϕ 和转速 ψ	32
第二节 圆筒型磨机自磨运送介质的流量、固相与 运送介质的比例	44
第三节 一段自磨机给矿粒度的影响	53
第四节 矿砾的粒度	56
第五节 利用气体介质加速颗粒自磨的工艺参数	61
第四章 设备结构参数对自磨指标的影响	69
第一节 圆筒型自磨机的结构参数	69
第二节 气体介质加速物料自磨的设备结构参数	81
第五章 强化自磨的途径	85
第一节 原料性质的改变	85
第二节 提高自磨机对被磨物料作用的能强和效率	94
第六章 低速磨机自磨过程参数的自动控制和调 节原理	100

第一节	自磨过程的调节特点	100
第二节	一段自磨过程的调节原理	101
第三节	砾磨过程的控制原理	111
第七章	圆筒型自磨机处理能力的计算	117
第一节	根据间接参数计算磨机的处理能力	118
第二节	用模拟法计算处理能力	128
第八章	采用气体载能体的自磨装置设备参数的 计算和选择	134

第二部分 采用自磨企业的生产实践

第一章	一段矿石自磨的实践	141
第一节	苏联处理粘土质含金矿石的选矿厂	141
第二节	加拿大卡略尔湖选矿厂	144
第三节	加拿大洛奈克斯选矿厂	146
第四节	美国皮马企业	149
第五节	加拿大瓦布什选矿厂	153
第六节	加拿大西米尔卡米选矿厂	155
第二章	一段自磨与砾磨联合使用的实践	159
第一节	苏联金选厂	159
第二节	苏联列别丁斯克采选联合企业选矿厂	165
第三节	加拿大格里菲斯选矿厂	169
第四节	瑞典艾蒂克选矿厂	173
第三章	砾磨生产实践	177
第一节	苏联金选厂	177
第二节	苏联南科罗布科夫斯克选矿厂	181
第三节	苏联列宁诺戈尔斯克选矿厂	183
第四节	铜-镍矿石的砾磨	185
第四章	采用自磨机的选矿厂工艺流程的发展和	

设计配置的现代趋势	190
第五章 采用气体载能体自磨装置的工作经验	204

第三部分 自磨应用的可能性和效率分析

第一章 自磨可能性和合理流程的确定	211
第二章 自磨过程对其后选别工艺指标的影响	217
第一节 磨碎的铁屑对工艺指标的影响	217
第二节 矿粒的解离	219
第三节 磨矿介质对产品粒度特性的影响	227
第三章 自磨和标准矿石准备方法的技术经济 比较	235
第四章 现有的选矿厂采用自磨代替标准的矿石 准备作业的经验	244
参考文献	250

第一部分 自磨的理论和技術基础

第一章 自磨过程的分类

在圆筒型磨机中的自磨方法 自磨的应用与金矿石处理工艺的改进密切相关。用氰化法回收金的过程和许多企业以氰化过程代替混汞过程，均需要将矿石磨得较细，这就要改进矿石准备作业的技术。

开始采用回转的圆筒型磨机代替碾磨机和汉丁顿型磨机（Huntington mill）^[114、108]。磨机的衬板由砾石制成，用波特兰水泥把砾石粘结在磨机的筒体上，砾石作为磨矿介质。

当以砾石代替钢球作为磨矿介质时，氰化过程中金的回收率提高了，这是因为减少了设备中细分散的铁（强还原剂）进入矿浆。这种铁会引起氰化物耗量增加，并使可溶的金还原。

最早有关在选矿厂（金回收厂）采用以砾石为磨矿介质的长圆筒型磨机的报道，是在1904年。然而，1907年K·格雷厄姆（K. Graham）在南非^①约翰内斯堡附近的格尔登许依斯·迪普有限公司（Geldenhuis Deep Ltd）矿山开始在三台管磨机（ $D \times L = 1.7 \times 6.8$ 米）中进行平行的试验，其中一台采用由丹麦运来的砾石作为磨矿介质，另一台磨机则添加大块含金石英作为磨矿介质。这些试验可以认为是矿石

① 在白人种族主义者统治下，以下同。——译者注

自磨的开端^[114,108]。

在二十年代末，苏联在外贝加尔的一家选金企业中进行以砾石代替钢球的第一批试验。除了在管磨机中进行矿石自磨试验以外，稍后还采用了其他构造的磨机作了类似的研究。1962年，在苏联的巴列依金联合企业（Балейзолото）的试验厂，首次采用自磨（第二段、三段）^[8]。1965年，在黑色冶金库尔斯克磁力异常区矿石联合企业的南科罗布科夫斯克选矿厂也采用了自磨（第二段）^[51]。

加拿大的湖岸选矿厂（Lake shore）从1949年就开始机械拣选大块矿石作为第二段磨矿的介质进行磨矿^[121]。

1908年哈特赛尔（A.D.Hadsel）取得了用已破碎的大块矿石磨矿及其设备的专利。只是到了1932年才制成实现此过程的工业用磨机（图1）。

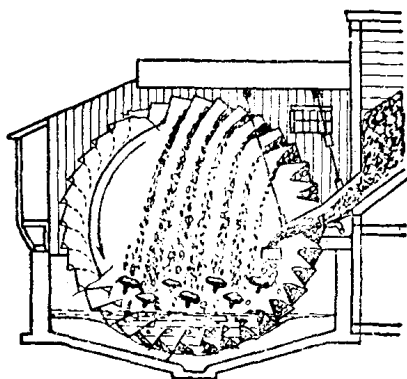


图1 哈特赛尔磨机（1932年）

在这种磨机中，将粒度为 -305 毫米的硫化矿石自磨至 -0.246 毫米。磨机的直径为 7320 毫米；圆筒长 900 毫米；传动装置功率为 100 千瓦；圆筒的转数为 2.66 转/分。在工业磨

机的运转过程中，发现了许多结构上的缺点^[114]。

为了消除所存在的缺点，磨机全部作了改装，但是磨机内仍保留着勺斗提升矿石。

战后，哈丁公司（Hardinge Co.）继续进行湿式自磨的研制，结果制造了工业用、处理能力高的磨机。

气落式磨机公司（Aerofall mill Co.）的D·韦斯顿（D. Weston）在加拿大和美国继续做了干式自磨的研究^[16,37]。

哈丁公司和气落式磨机公司的磨机筒体直径与长度之比为 $\approx 3:1$ 。最近几年，许多公司（多米尼恩、阿利斯·查尔默斯、施登·鲁布公司）生产了已破碎的大块矿石的自磨机，许多湿式自磨机的 $D:L$ 之比，不是 $3:1$ ，而是 $2.3(2.5):1$ ，大型干式自磨机的 $D:L > 3:1$ 。

在苏联自磨大块已碎矿石的研究始于1962至1964年。1964年第一台试验性工业磨机（直径5.7米）在“雅库特金刚石”（Якуталмаз）企业的一家工厂中开始工作。1964~1965年在中央采选联合企业（ЦГОК）做了克里沃罗格含铁石英岩的干式自磨试验（采用直径5.7米的试验性的工业磨机），而1966~1967年，在新克里沃罗格采选联合企业，采用直径为7.0米的试验性工业磨机进行了湿式自磨试验。苏联正在成批生产直径为2.1、5.0、7.0、9米的湿式自磨机，以及直径为5.7米的干式自磨机。

自磨大块已碎的矿石时，必须在磨机中添加钢球。紧固并加强磨机衬板，使磨机在该情况下达到处理能力。

在圆筒型磨机中自磨物料时，颗粒互撞的速度不超过15~20米/秒。

除了研究自磨过程和研制保证具有类似互撞速度的自磨机结构以外，还开始研制了使所磨物料颗粒的互撞速度大致

超过上述数据的磨机结构^[2,39]。

提高互撞速度，主要利用穿过磨矿室或在室内碰撞而携带饱和和被磨物料的气流能量来达到。

1944年制造了一台管形磨矿室的蒸气流磨机，用于细磨烟煤，磨碎到90%—0.074毫米。

经过一系列的结构改进以后，磨矿装置用于磨碎无烟

煤、沥青煤、焦炭，从—10毫米磨碎到90%—0.074毫米时，其处理能力达5吨/时。在表压为8工程大气压下，蒸汽耗量为0.1~0.12公斤/公斤（见图2）。以后，类似的磨矿装置在磨碎较软物料时，处理能力逐渐提高到20~30吨/小时。

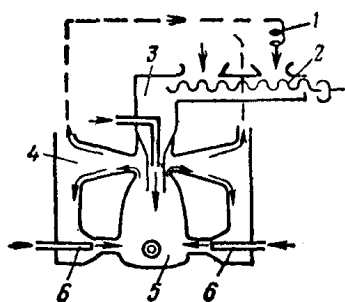


图2 布劳乌·霍克斯对流射流式磨机略图

- 1—分尘器；2—螺旋给料机；
3—给料喷射器；4—预先分尘室；5—磨碎室；6—喷射器

1955年苏联开始进行射流磨的研究工作，1964年开始由苏联新建筑材料科学研究所（ВНИИНСМ）研制的一些样机投入成批生产。

除了射流式磨机之外，在骤然解除压力（爆破磨矿）下的磨碎，也可部分达到自磨效果；在斯奈德（Snyder）法中，特别是双枪的对流装置中，也是如此工作的（图3）^[118]。

在这种装置中，自磨分两段进行。第一段是在突然解除压力下携带饱和磨料的气流载能体从“爆破”室迅速抽出；第二段是从爆破室排出的气流在磨碎室中相撞，实现了射流自磨。

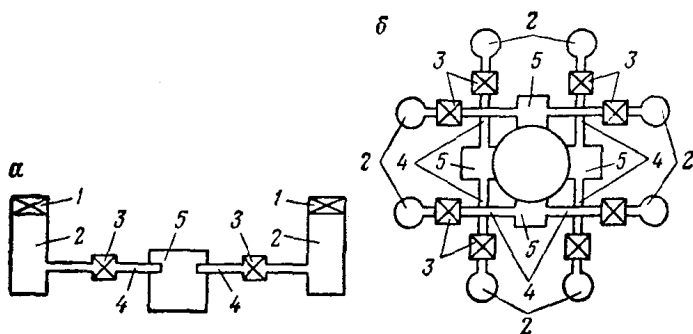


图 3 斯奈德法磨碎装置的原则示意图

а—双枪对流装置；б—装置中各部件的配置

1—给料阀，2—高压室（爆破室），3—快速阀，4—喷射导管，5—射流磨碎室

选矿厂广泛使用低速磨机自磨。可以根据所用的自磨设备、结构的特征，对各种自磨过程进行分类。

根据А·Ф·塔加尔特^[92]所提出的以后又被В·И·阿库诺夫（В.И.Акунов）^[2]、Е·Е·谢尔果（Е.Е.Серго）^[86]及其他研究人员^[39]所确证的分类因素，即磨矿介质的相对运动速度或被磨物料颗粒的加荷特性，自磨可作如下分类：

低作用速度（ $v < 20$ 米/秒）下的自磨，即颗粒在机械加速条件下，在低速圆筒型磨机中自磨；

用压缩蒸汽或气体加速颗粒（ $v > 100$ 米/秒）条件下的中速和高速自磨。

考虑到采矿工业中大部分采用低速磨机自磨，故应对这种分类予以很大注意。

1950～1970年，在苏联的文献中，以“无球磨矿”的术语表示自磨，据我们看来是不确切的^[15,39]。这一术语的出现和应用只表示所研究的磨碎过程的一个重要方面，即表示

可以在圆筒型磨机中不用金属磨矿介质进行磨矿。

用“自磨”这一术语来解释所研究的现象是较恰当的。根据1962年苏联选矿研究设计院（Механообр）的建议，将自磨分为瀑落式自磨（Cascade mill）、气落式自磨（Aerofall mill）和砾磨等三类。

随着自磨使用范围的扩大，这种分类已不能包罗实践中所遇到的所有情况。

在对各种低速自磨进行比较详细的分类时，将使用范围、结构特点、原料和成品的粒度和粒度组成，作为分类的标准^[88,108]。为此提出如下的分类：

在抽风的气落式磨机中的一段干式自磨（图4）；和在瀑落式磨机中的湿式自磨（图5）；

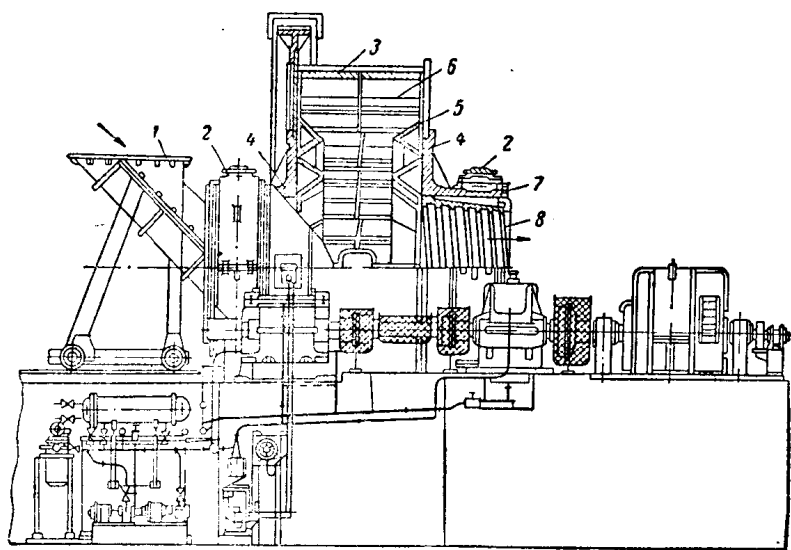


图4 干式自磨机（Y3TM）

1—可移动的漏斗；2—轴承；3—筒体；4—端盖；5—楔形衬板；6—提升板；7—排矿端；8—螺旋

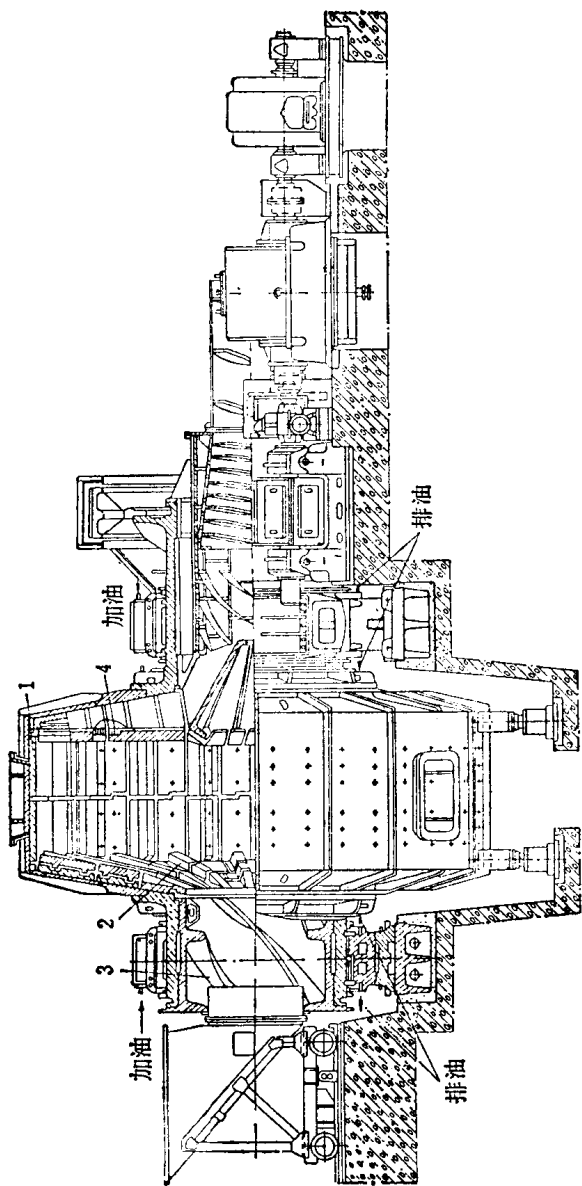


图 5 MMC-70-23 瀑落式湿式自磨机
1—筒体，2—给矿端盖提升板，3—给矿螺旋，4—格子

一段砾磨（在第一段砾磨）；

二段砾磨（在第二段和以后各段砾磨）。

一段自磨的特点是：

1. 磨机给料是粒度为 -250 （ 350 ）毫米的井下采出的原矿，或是露天开采又经粗碎后的原矿。还有给矿中最大矿块达 500 （ 600 ）毫米的矿石。

2. 磨矿是在筒体直径和长度之比（ $D:L$ ）为 $4:1$ 至 $2:1$ 的磨机中自磨；干式自磨机增大直径时， $D:L$ 之比值增大，而湿式自磨机却减小。

干式自磨机的结构与湿式自磨机的结构略有不同：主要在排矿方式上。干式自磨机是通过空心排矿轴颈排矿的。

3. 一段自磨，特别是湿式自磨的成品粒度变动范围较大。

一段干式自磨时，成品粒度为 -6 毫米或更细。通常对成品粒度的增大给予以一定的限制，以便不显著增大风力运输的能量消耗。

在一段湿式自磨时没有这样的限制。

一般湿式自磨的成品粒度在 $0.5 \div 0.2$ 毫米范围内。当需要时，增大格子板上的孔径，可获得达 -100 （ 150 ）毫米的磨矿产品。

苏联国外，在添加金属磨矿介质的情况下就使用“半自磨”这一术语（Semiautogenous grinding）。

常常在干式自磨中添加钢球以强化自磨过程，在湿式自磨中，除了为同样目的添加钢球以外，部分循环负荷还需返回磨机进行再磨，或是从自磨循环中分出。

主要在水介质中进行的一段矿石自磨，其特点是采用筒体直径与长度之比（ $D:L$ ）为 $2:1$ 至 $1:1$ 的磨机。

磨机给矿是细碎至—20毫米或更细的矿石；以—350+100（150）毫米的大块矿石作为磨矿介质，这是从粗碎后矿流中选出的， $\tau - 350 + 100 \approx 30 \sim 35\%$ 。

南非的选金厂，常常不经中碎和细碎，而用手选的方法，从磨机的原给矿中选出部分的硬脉石^[122、130]。一段砾磨自磨时成品粒度为—0.3毫米。

为了提高磨机的处理能力，添加钢球，并分出矿砾的残屑。

二段砾磨，常常采用筒体直径与长度之比（ $D:L$ ）为1:1至1:4的磨机。

其给矿粒度比棒磨机的产品细。磨矿介质是从中碎或细碎产品中筛出的大块矿石，以及从一段湿式自磨机排矿中选出的矿砾。成品粒度一般小于0.2毫米。为了提高磨机的处理能力，常常采取分出矿砾碎屑这一措施。

砾磨机的结构与格子型排矿球磨机的结构相似，后者已众所周知而且在专门的著作中有相当详细的叙述^[5、60]。

谈到以气体加速破坏颗粒的高速自磨时，最好分为射流式自磨和爆破式自磨。

根据B·И·阿库诺夫所提出的射流式磨机的分类^[2]，可分为：带分尘器的磨机（细磨用的）及磨碎和分尘同时进行的磨机（超细粒磨矿用的）两种。

带分尘室的磨机中，最有效的是带对流室的磨机，在此室中，颗粒撞击的速度加倍，从而保证颗粒有效地达到破坏。这种类型的工业磨机的给料粒度达—20（25）毫米，但通常是给入粒度为—6（8）毫米的物料。成品粒度一般为—200÷60微米，很少为—20÷10微米，在后一情况下，磨机处理能力会产生不合理地降低^[2]。这些磨机中颗粒的作用