

# 国外矿石自磨技术

四川地质出版社

---

《国外金属矿选矿》编辑部

# 毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

外国一切好的经验，好的科学技术，我们都要吸收过来，为我们所用。拒绝向外国学习是不对的。当然，迷信外国认为外国的东西都是好的，也是不对的。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

# 目 录

1. 矿石自磨是选矿准备矿石的一种经济的方法.....В. К. Захваткин等 (1)
2. 波立登公司重金属矿石的自磨.....P. H. Fahlström (11)
3. 自磨的经济效果及其意义.....W. F. Medermort (33)
4. 金属矿选矿厂砾磨实践.....О. Фуксфегг (39)
5. 格劳杜斯的棒磨与砾磨磨矿.....W. C. Hellyer (57)
6. 利比里亚邦格铁选矿厂瀑落式自磨机的生产结果.....W. Jacobs 等 (63)
7. 加拿大西米尔卡米铜选厂投产情况.....R. W. Nice (74)
8. 波立登公司艾蒂克选矿厂的自磨.....P. H. Fahlström (84)
9. 自磨磨机流程改进的途径.....Ю. А. Хвѣтов (93)
10. 组织自磨工业试验和掌握自磨过程的新方向.....А. В. Бортников (98)

# 矿石自磨是选矿 准备矿石的一种经济的方法

В. К. Захваткин 等

随着矿石开采和加工规模的日益扩大及矿石品位不断的贫化，要求降低矿山选矿企业的建设投资和减少企业经营费用。为了解决这一问题，首先应着眼的是破碎和磨矿，因为破碎和磨矿在矿石加工过程中所用的费用最高。

采用瀑落式自磨机对粗碎后的矿石进行自磨是目前解决这个问题最有发展前途的方向<sup>(1)</sup>。

苏联国外试验的技术经济分析也证实了这一点。最近设计的许多铜矿和铜-钼矿选矿厂都采用矿石自磨。但有些选矿厂仍不用矿石自磨，是将细碎后矿石（10~13毫米）进行一段球磨。

选别铜矿和铜-钼矿常用的以棒磨和球磨进行的阶段磨矿已被上述两种磨矿方法所取代。在铜矿企业中矿石砾磨也没有得到发展，象美国的比尤特和特温一比尤特大型选矿厂，对于棒磨产品进行砾磨的工艺最近已停止使用了<sup>(2)</sup>；而瑞典的艾蒂克大型选矿厂采用的是棒磨和砾磨的两段磨矿，扩大了矿石自磨工艺<sup>(3)</sup>。

在1971~1973年间所建的两段磨矿流程的选矿厂的年处理量在1百万吨以上，比1961~1966年间所建的同类型选矿厂几乎减少了3/4。与此同时，采用矿石自磨选矿厂的建厂厂数却发生了急剧的变化，所建的自磨矿选矿厂的厂数几乎比前5年（1966~1970年）增加了9倍。

尽管矿石自磨这种工艺不是万能的，对于有些矿石，例如，象对于易破碎的矿石，矿石破碎之后不能得到足够数量的大块矿石<sup>(4)</sup>，以及对于矿石可磨性和粒度分布很不均匀、还需设置费用较高的混匀作业的矿床<sup>(5,6)</sup>，还不能采用或不够经济，但是矿石自磨的应用范围还是有显著的扩大。

如果按其矿床特点和矿石性质适合于矿石自磨的话，那么在适当的情况下（所用的流程合理，适合于所选的矿石和所用的粗碎设备以及方案经济可靠），从投资、工程项目建设 and 建设期限的角度来说，矿石自磨工艺比采用其他方法更为有利。

表1所列的资料是最近三年之内，在加拿大、美国和其他国家所建的采用矿石自磨的新的铜矿和铜钼矿选矿厂以及正在建设的大型钼矿选矿厂的基本情况<sup>(7-10)</sup>。

按总的设计生产能力是12.5万吨/日，自磨机电动机的总装机容量是10.0万瓩，这类选矿厂的数目已超过了黑色企业近13年来（1961~1973年）所设计的湿式矿石自磨选矿厂的总和（第一个建成的自磨铁矿选矿厂是加拿大的珍妮湖选矿厂，它是1961年建的，使用的是5.49×1.53米规格的瀑落式自磨机）。

有色金属企业采用矿石自磨的新建选矿厂

| 指 标                    | 加拿大的艾兰<br>铜选厂 <sup>(1)</sup> | 美国的皮马选<br>厂 <sup>(2)</sup>                 | 加拿大的洛<br>奈克斯选厂 <sup>(3)</sup>              | 加拿大的西<br>米尔斯选厂 <sup>(4)</sup> | 非洲扎伊尔<br>的卡莫托选<br>厂 <sup>(5)</sup> | 瑞典的艾帝<br>克选厂 <sup>(6)</sup> | 土耳其的布<br>列克-西选<br>厂 <sup>(7)</sup> | 印度尼西亚<br>的德尔蒙<br>选厂 <sup>(8)</sup> | 美国的根捷尔<br>松选厂 <sup>(9)</sup> |
|------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 矿石类型                   | 铜-铅矿石                        | 铜-铅矿石                                      | 铜-铅矿石                                      | 铜矿石                           | 铜-钴矿石                              | 铜矿石                         | 铜矿石                                | 铜矿石                                | 铜矿石                          |
| 矿床中金属的平均品位 %           | 含Cu 0.52<br>Mo 0.017         | 含Cu 0.5<br>Mo 0.014                        | 含Cu 0.44<br>Mo 0.014                       | 含Cu 0.53                      | 含Cu 1.98<br>Co 无资料                 | 含Cu 0.5                     | 无资料<br>Cu 无资料                      | 含Cu 2.5                            | 含Mo 0.295                    |
| 原设计的生产能力 (吨/日)         | 30000                        | 12700                                      | 34500                                      | 13800                         | 12000                              | 23000                       | 8900                               | 6500                               | 27000                        |
| 1973年达到的生产能力 (吨/日)     | 28500                        | 17200                                      | 34500                                      | 17000                         | 无资料                                | 17200                       | 无资料                                | 无资料                                | —                            |
| 投产时间                   | 1971                         | 1971~1972                                  | 1972                                       | 1972                          | 1968~1972                          | 1968~1973                   | 1973                               | 1973                               | 1975                         |
| 矿石破碎粒度 (毫米)            | ~300+0                       | ~250+0                                     | ~350+0                                     | ~300+0                        | ~250+0                             | ~250+0                      | 无资料                                | ~250+0                             | ~300+0                       |
| 磨矿产品细度                 | -0.074 毫米<br>占65 (70) %      | +0.208 毫米<br>级别占20%<br>-0.074 毫米<br>级别占55% | +0.208 毫米<br>级别占5 %<br>-0.074 毫米<br>级别占55% | -0.074 毫米<br>级别占65%           | 无资料                                | 无资料                         | 无资料                                | 无资料                                | -0.074 毫米<br>级别占40%          |
| 设计的磨矿段数                | 1                            | 2                                          | 2                                          | 1                             | 无资料                                | 2                           | 无资料                                | 1                                  | 1                            |
| 第一段磨矿机：台数和类型           | 6; 瀑落式                       | 2; 瀑落式                                     | 2; 瀑落式                                     | 3; 瀑落式                        | 4; 瀑落式                             | 无资料                         | 3; 罗克<br>锡带式                       | 2; 瀑落式                             | 3; 瀑落式                       |
| 规格 (米)                 | 9.76×4.27                    | 8.54×3.66                                  | 9.76×4.72                                  | 9.76×4.27                     | 8.24×3.05                          | 6.1×10.68                   | 7.93×3.05                          | 9.76×3.66                          | 8.85×4.27                    |
| 有效容积 (米 <sup>3</sup> ) | 320                          | 210                                        | 350                                        | 320                           | 185                                | 310                         | 155                                | 275                                | 265                          |
| 电动机台数和<br>功率 (千瓦)      | 2×2235                       | 2×2235                                     | 2×2980                                     | 2×2980                        | 2×1285                             | 1×3950                      | 1×2500                             | 2×2235                             | 2×2375                       |
| 第二段磨矿机：台数和类型           | 3; Mmu*                      | 2; Mmu*                                    | 4; Mmu                                     | —                             | 无资料                                | 球磨机                         | 无资料                                | —                                  | —                            |
| 规格 (米)                 | 5.03×6.71                    | 5.03×5.8                                   | 5.03×7.0                                   | —                             | —                                  | 无资料                         | —                                  | —                                  | —                            |
| 有效容积 (米 <sup>3</sup> ) | 125                          | 110                                        | 130                                        | —                             | —                                  | —                           | —                                  | —                                  | —                            |
| 电动机台数和<br>功率 (千瓦)      | 2600                         | 2235                                       | 2980                                       | —                             | —                                  | —                           | —                                  | —                                  | —                            |

\* 艾兰铜选厂第二段球磨机是在选厂投产前安装的 (原设计没有)

矿石自磨的过程，也就是矿石自身互磨的过程，它的生产能力、电耗和产品粒度特性都与矿石性质和矿床特点有关。典型的矿石自磨作业，也就是将较大块矿石磨碎成为中等和小块的矿石块的过程。

经研究和工业性试验表明，对于有色金属矿石，纯的矿石自磨作业不久即将消失。根据矿床特点和矿石性质，一般都需要某种方法的工艺调整和过程的强化。

在下面所考查的一些选矿厂中由于成功的采用了如下的一些措施，致使自磨机的工作效率有很大的提高和扩大了矿石自磨的应用范围：

在自磨机中补加占整个体积的钢球 8%（如皮马选厂、根捷尔松选厂、艾兰铜选厂、洛奈克斯选厂和西米尔卡米选厂，后三个选矿厂是属临时措施，只在处理矿床上部较松散的矿石时才使用）。

在矿石自磨作业中，将极限尺寸部分的矿石破碎到粒度 $\approx 25$ 毫米（如西米尔卡米选厂，在矿石过渡到硬矿石和粘性矿石时采用，这种矿石主要在俄尔茨堡）。

采用球磨机对矿石自磨产品进行再磨（如艾兰铜选厂、皮马选厂和洛奈克斯选厂）。

用于调整矿石自磨介质所补加的钢球有两种作用：弥补矿石中大块硬矿石的不足和用以研磨极限尺寸部分的矿块。其结果是大大提高了自磨机的生产效率（在个别情况之下可以提高 3 倍<sup>(13)</sup>），降低了处理每吨合格产品所需的电耗，改善了产品的粒度特性和减少泥化，对选矿厂的经济效果和浮选指标都有好处。

极限尺寸部分的矿块破碎到粒度小于极限尺寸，便可消除它在循环负荷中的聚集，调节了自然磨矿介质的粒度组成，确保得到浮选所需的筛析粒度特性，这就大大提高了自磨循环的生产能力和降低了电耗。对于硬矿石和粘性矿石自磨工艺的调整和强化的这种方法比补加钢球更为有效（在消除极限尺寸部分方面）<sup>(14)</sup>。

用球磨机对矿石自磨产品进行再磨（第二段）能显著地提高矿石自磨机的生产能力（就矿石的通过能力而言），在洛奈克斯选厂和皮马选厂四期工程的自磨机都达到了很高的效率，根据这一点，在球磨机中进行磨矿的操作，在这种情况下，可以看做是调整或强化自磨矿循环的方法之一。

既然，在现代的有色金属选矿实践中，在很多情况下矿石自磨仍需添加一部分钢球，那么，在我们很早发表的技术资料中所采用的“无球磨矿”。这一术语，是不符合自磨过程的物理性质的，是不应这样用的。

无论是采用一段磨矿（西米尔卡米选厂）或两段磨矿（艾兰铜选厂、皮马选厂和洛奈克斯选厂等）其磨矿细度都能达到 $-0.074$ 毫米占 50~55% 到 60% 的浮选要求的粒度范围（根捷尔松选厂除外）。在以上两种情况下，矿石自磨机仅在闭路循环中工作的。在一段磨矿时，其循环负荷为 500%（在处理西米尔卡米选厂的硬矿石和粘性矿石时）。在两段磨矿的流程中，第二段是在球磨机中进行的（而不是象铁矿选厂在砾磨机中进行）。

图 1 是三个具有代表性的选矿厂（西米尔卡米选厂、皮马选厂和洛奈克斯选厂）的磨矿工艺流程。矿石粗碎后通常都堆贮于露天的贮矿场中，再从露天贮矿场进行自动配料、称量和直接给入矿石自磨机。将磨机所得产品再进行两段或三段分级（用筛分

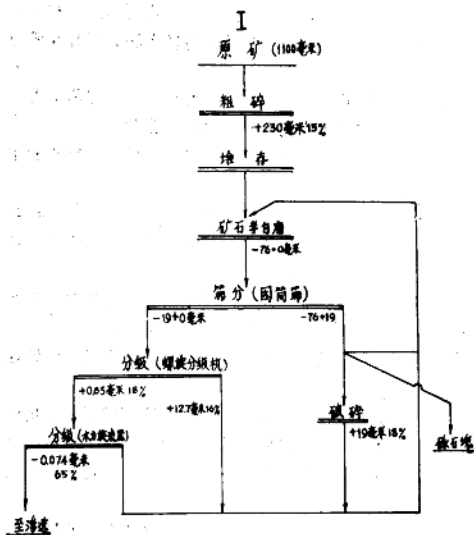
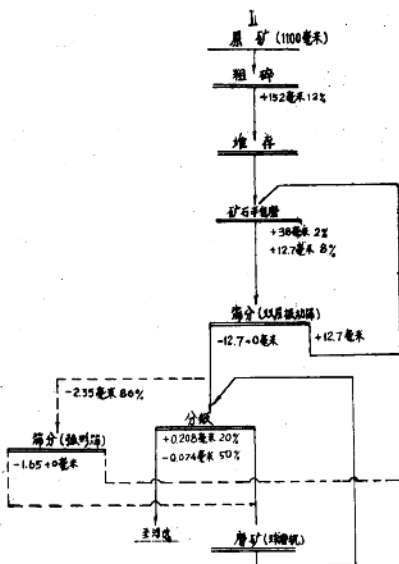
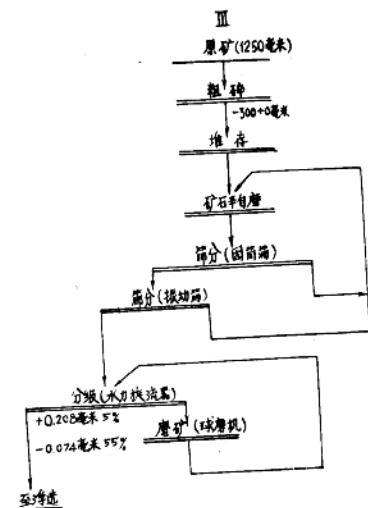


图 1 (I) 西米尔卡米选厂

图 1 (I) 皮马选厂





(II) 洛奈克斯选厂

图 1 采用矿石自磨的选厂的磨矿原则流程

级或水力分级)。

按其矿石自磨的磨矿段数和工艺调整方法或强化手段又分为如下的几种形式：

### 1. 一段或二段全自磨

采用一段自磨的选矿厂是：艾兰铜选厂（最先设计的）、西米尔卡米选厂和俄尔茨堡选厂（新设计的）。（后两个选厂应属于矿石半自磨，因为有一部分矿石比较难破碎，需在自磨机中补加部分钢球）。

两段自磨：在铁矿选矿厂采用的是第一段矿石全自磨，第二段是砾磨。

### 2. 一段和两段联合的矿石半自磨

在西米尔卡米选厂（处理的是矿床上部的矿石）和根捷尔松选矿厂都采用的是一段自磨（自磨机中补加部分钢球）。

两段磨矿：在洛奈克斯选厂和改建后的艾兰铜选厂（对主要矿石有两种情况）采用的是第一段矿石全自磨，第二段砾磨；在皮马选厂、洛奈克斯选厂和艾兰选厂（后两个选厂指的是处理矿床上部的矿石），第一段采用的是矿石半自磨（自磨机中加部分钢球），第二段采用的是球磨。

三个选矿厂的设备联系图见图 2。



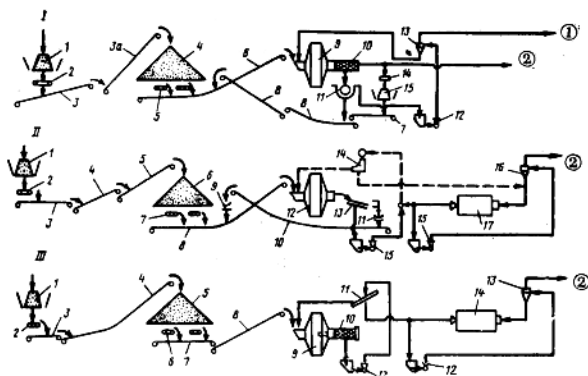


图 2 矿石自磨设备联系图：I—西米尔卡米选矿厂，II—皮马选矿厂，III—洛奈克斯选矿厂

I：1. 1370毫米圆锥破碎机（1台），2. 给矿机，3. 运输皮带，3a. 料堆卸载皮带，4. 粗碎矿石贮矿场（40800吨），5. 给矿机，6~8. 运输皮带，9.  $9.76 \times 4.27$  米自磨机， $V=320$ 米<sup>3</sup>， $N=5960$ 瓩（3台），10.  $2.75 \times 5.5$  米特殊结构的圆筒筛（3台），11. 2.4米直径的螺旋分级机（3台），12. 砂泵，13. 510毫米直径的水力旋流器（3组、每组7台），14. 短头型圆锥破碎机给矿机（装有电磁铁），15. 1220毫米短头型圆锥破碎机（3台）

II：1.  $1370 \times 1880$ 毫米圆锥破碎机， $N=350$ 瓩（1台），2. 板式给矿机，3. 4. 运输皮带，5. 1370毫米宽的运输皮带，6. 粗碎矿石贮矿场（21500吨），7. 板式给矿机，8~11. 运输皮带，12.  $8.54 \times 3.66$ 米规格的瀑落式自磨机， $V=210$ 米<sup>3</sup>， $N=4470$ 瓩（2台），13.  $1830 \times 4270$ 毫米规格振动筛（2台），14. DSM型弧形筛（8台），15. 砂泵，16. 510毫米直径的水力旋流器（20台），17.  $5.03 \times 5.8$ 米规格的球磨机， $V=108$ 米<sup>3</sup>， $N=2235$ 瓩（2台）

III：1.  $1525 \times 2260$ 毫米圆锥破碎机， $N=522$ 瓩（1台），2. 板式给矿机，3. 4. 皮带运输机，5. 粗碎矿石贮矿场（136000吨），6. 板式给矿机，7. 8. 运输皮带，9.  $9.76 \times 4.27$ 米规格自磨机， $V=353$ 米<sup>3</sup>， $N=5960$ 瓩（2台），10. 筛孔9毫米的具有特殊结构的圆筒筛（2台），11.  $2440 \times 6100$ 毫米规格的单层振动筛（4台），12. 砂泵，13. 510毫米直径的水力旋流器（64台），14.  $5.03 \times 7.0$ 米规格的球磨机， $V=131$ 米<sup>3</sup>， $N=2980$ 瓩（4台）

①一到浮选；②一供给粗精矿再磨的磨机机砾石块

对于采用两段磨矿的选矿厂，其第一段和第二段（矿石自磨和球磨）磨矿机的容积比是不同的，例如，对洛奈克斯选矿厂磨机的电耗和从原始粒度破碎到最终粒度所用的费用几乎是各占一半，然而，对艾兰铜选矿厂矿石自磨占75%强，球磨占25%弱。

在洛奈克斯选矿厂所采用的措施要比艾兰铜选矿厂（第二段磨矿是在选矿厂开工后才增添的）<sup>(17)</sup>要经济些。在洛奈克斯选矿厂磨矿阶段的工作分配，是将总负荷的60%的工作量转给球磨机，这时自磨循环能确保有很高的处理能力：对于360米<sup>3</sup>有效容积的自磨机处理能力可达到17000吨/日或700吨/时（2吨/米<sup>3</sup>·时）。因此，对于生产能力

为 34500 吨/日的大型选厂，只好选用两台自磨机，以使单位投资费用降低到最小的程度。

在处理同类矿石时，自磨矿选厂与采用球磨的选矿厂相比，在经济上表现的优越性，是以设计分析和按单位实物指标和费用指标的经营管理数据为基础确定的，具体是根据苏联现有的基建费用和设备价值进行计算的。

选下列选矿厂进行比较说明：

1) 采用矿石自磨的皮马选厂（扩建的四期工程、洛奈克斯选厂和西米尔卡米选厂）。

2) 采用三段一闭路破碎、一段球磨和两段棒磨或两段球磨的科朗选厂和皮马选厂（一、二、三期工程）。

为了比较单位实物指标和费用指标，在所比较的选矿厂中按其硬度和可磨性相同的标准矿石，以实际（达到的）生产率数值进行比较，以能表示矿石硬度和可磨性的电耗指标为基础，将实际生产率换算成相对生产率进行比较。

每个选矿厂的电耗都是以全部作业进行统计的，即从矿石卸到粗碎矿仓开始到最终产品给到浮选所用的水力旋流器搅拌槽的砂泵为止。自磨机的运转率与设备有关，采用 0.9（国外选厂达到的最高指标<sup>(13)</sup>），用标准方法磨矿的选厂的相对运转率是 0.97。

以采用两种方法准备矿石的皮马矿床的铜-钼矿石做标准。采用自磨矿的选厂第四期工程所计算的单位电耗是 14.6 瓩·时/吨。对于采用标准磨矿工艺的选厂 I—III 期工程（在棒磨机 and 球磨机中进行两段磨矿）单位电耗是 10.5 瓩·时/吨。

矿石自磨的电耗比一般磨矿方法的电耗约高出 0.4 倍或 4 瓩·时/吨。这个数值刚好与半工业性试验以及皮马选厂四期工程最初试验阶段的资料相吻合<sup>(13)</sup>。

对生产能力基本相近的两个铜-钼矿选厂设备配置流程（见图 3、4）进行比较看出，采用自磨矿选厂的优越性在于减少了生产车间的数目，皮带走廊的长度，厂区的面积，因而也就减少了工程线路、管道和操作人员。

由于消除了中、细碎车间、许多皮带走廊和转运站及细碎矿仓等粉尘的来源，从而改善了矿石自磨矿选厂的劳动卫生条件。

仅对直接关系到矿石准备作业的主要生产工程项目进行了投资对比结果列于表 2。

自磨矿选厂构筑物 and 建筑物的单位投资趋于下降。与皮马一至三期工程和科朗选厂相比，皮马四期工程破碎-磨矿单位总投资下降 30%，洛奈克斯选厂下降 43%。

矿石自磨矿选厂构筑物和建筑物单位投资下降的主要原因是：

1) 以地面式露天贮矿场做为单一的缓冲容器。这种贮矿场的单位造价（1 米<sup>3</sup>的有效容积）要比有屋顶的细碎矿仓低 2/3~4/5；

2) 省掉了第二和第三段破碎车间厂房和与其相连的皮带走廊以及闭路循环需用的转运站。

按以上两个工程项目所减少的投资大大地超过由于自磨矿选厂增加磨矿机计算容积而导致磨矿车间增加的费用。在骨架式建筑物容积增加的条件下（磨矿车间），建筑物和构筑物投资的减少主要是靠省掉在建筑容积比例上最复杂和建造困难的项目。

主要生产用的工程项目投资费用比较 (千卢布)

表 2

| 工程项目名称及费用项目                |           | 矿            |              |              | 石            |               | 自    |          | 磨 |  | 球 |  | 磨 |
|----------------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------|----------|---|--|---|--|---|
|                            |           | 皮马四期工程       |              | 洛奈克斯选厂       | 西米尔卡米选厂      |               | 科朗选厂 | 皮马一、三期工程 |   |  |   |  |   |
| 组碎矿石贮矿场                    | 设         | 41.2         | 155.5        | 61.8         | 97.65        | 14.8          |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | 530.0        | 980.5        | 715.0        | 280.0        | 405.0         |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | 571.2        | 1135.5       | 776.8        | 377.65       | 419.8         |      |          |   |  |   |  |   |
| I、II段碎矿车间                  | 设         | —            | —            | —            | 757.62       | 1131.9        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | —            | —            | —            | 980.00       | 1600.0        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | —            | —            | —            | 1717.62      | 2731.9        |      |          |   |  |   |  |   |
| 破碎矿石的矿仓或贮矿场                | 设         | —            | —            | —            | 207.10       | 141.54        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | —            | —            | —            | 1750.0       | 2520.0        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | —            | —            | —            | 1957.10      | 2661.54       |      |          |   |  |   |  |   |
| 磨矿车间                       | 设         | 1975.8       | 3330.0       | 3046.0       | 1674.0       | 3168.8        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | 1240         | 1620.0       | 1335.0       | 1070.00      | 1960.0        |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | 3215.8       | 4950.0       | 4161.0       | 2744.0       | 5128.0        |      |          |   |  |   |  |   |
| 皮带走廊                       | 费用        | 240.0        | 360.0        | 360.0        | 700.00       | 380.0         |      |          |   |  |   |  |   |
| 总计                         | 设         | 2017.0(50)   | 3485.5(54.0) | 3107.8(56.4) | 2736.4(36.4) | 4457.04(39.3) |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | 2010.0(50)   | 2960.0(46.0) | 2410.0(43.9) | 4760.0(63.8) | 6865.0(60.7)  |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | 4027.0(100)  | 6445.5(100)  | 5517.8(100)  | 7496.4(100)  | 11322.04(100) |      |          |   |  |   |  |   |
| 以年处理能力计<br>1吨矿石的单位<br>投资费用 | 设         | 0.357(109.2) | 0.339(103.0) | 0.41(125.3)  | 0.289(88.5)  | 0.327(100)    |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 建筑物和构筑物费用 | 0.355(70.8)  | 0.287(57.1)  | 0.317(83.1)  | 0.504(100.2) | 0.503(100)    |      |          |   |  |   |  |   |
|                            | 合 计       | 0.713(86)    | 0.626(75.6)  | 0.727(87.6)  | 0.793(95.5)  | 0.83(100)     |      |          |   |  |   |  |   |

注：括号内的数字是占总费用的百分数。

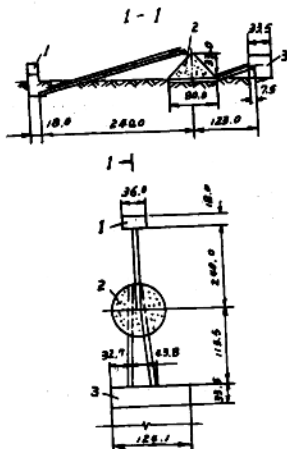


图 3 洛克斯选厂建筑物配置图

1—粗碎车间； 2—粗碎矿石贮矿场；  
3—选矿车间； 4—浮选车间

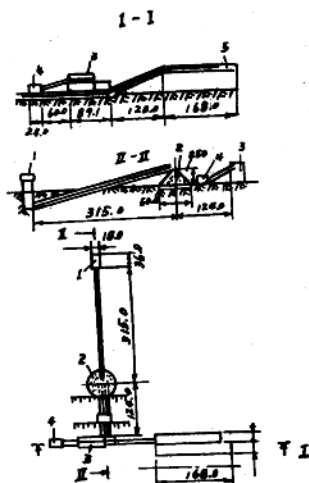


图 4 采用三段一闭路破碎和采用大型球磨机（西耶里塔型）一段磨选厂建筑物配置图

1—粗碎车间； 2—粗碎矿石贮矿场（露天），有效容积是 36000 吨； 3—中、细碎车间； 4—转运站； 5—选矿车间； 6—浮选车间

自磨选矿厂的建筑费用之所以下降，还靠简化设备配置流程、减少占地面积、减少地下管路以及其它一些在这里没有进行比较的因素。

自磨选矿厂的设备投资都有些增加，皮马选厂四期工程增加 9.2%，西米尔卡米选厂增加 25.3%。这是因为增加了磨矿机的总设计容积和磨矿机的重量（瀑落式自磨机 and 球磨机），而且所省掉的第二、三段破碎的破碎设备（破碎机和筛分机等），没有能补偿磨矿机所增加的重量和费用（9.76×4.72 米规格的瀑落式自磨机的重量和费用比 8~9 台 2135 毫米直径的西蒙斯破碎机还多些）。

在用矿石自磨的条件下，增加磨机的总容积和重量是很合理的，但增加大直径的磨机单位成本（磨机 1 吨金属）的原因还不十分清楚。由于瀑落式自磨机的单位成本增加，自磨选矿厂的“设备”项目投资费也增加了。

在自磨机的结构加工上和工艺制造上，大直径磨机的成本应比较低。应该指出，在经济计算时应采用苏联国外资料中的磨矿机的重量，在苏联国外 9.76×4.72 米规格的自磨机有效容积是 350 米<sup>3</sup>，机重只有 760 吨，而苏联生产的 6.0×3.0 米规格的自磨机的有效容积仅为 160 米<sup>3</sup>，机重却已达 670 吨。

矿石自磨选矿厂的总投资(按比较的工程和项目费用计算)同皮马选厂一、三期工程和科朗选厂相比降低12~24%。之所以得到下降是因为减少了构筑物和建筑物的投资,而且此投资减少的费用超过设备增加的费用。

应该着重指出,由于去掉了细碎矿仓和粗碎矿石采用露天堆存,在选厂进行单一的贮存(原矿不分级和不分级贮存),这项投资费用节省的最多。

很明显,这种现代和国外选矿厂利用的两种矿石准备方法的投资对比资料,可供解决类似的具体问题时参考研究之用。

本文没有分析和比较企业经营费用,因为如要进行这种比较还缺少一些具体的资料,如电耗、衬板消耗、磨矿介质消耗等的定额以及单价、工资和折旧费等。

经粗略的计算指出,采用矿石自磨的企业经营费用约比一般的破碎和磨矿的经营费低10%。

采用矿石自磨还能提高劳动生产率,降低工资开支,因为采用自磨矿,操作人员比破碎-磨矿工艺减少30~35%。

#### 参 考 文 献

- [1] Зызуваткин В. К. — «Обогащение руд» (Вулн. ин-та «Механообр»), 1973, №4, С. 46~50.
- [2] Frohling E. S., Lewis F. M. — «Mining Congr. J.», 1973, №2, p45—46.
- [3] Fahlstrom P. H. — «Canad. Mining and Metallurg. Bull.», 1973, Vol. 66, №731, P. 62.
- [4] Espie F. F. — «Austalas. Inst. Mining Metallurgy Proc.», 1971, №238, P. 1—10.
- [5] Caldwell A. B. — «Mining Engng.», 1969, №12, P. 29—36.
- [6] Bachman W. D. et al. — «Trans. Soc. Mining Engrs. AIME», 1970, Vol. 247, №3, P. 251—255.
- [7] Mamen C. — «Canad. Mining J.», 1973, July, P. 31—33.
- [8] Skillings D. N. — «Skillings' Mining Review», 1972, Vol. 61, №12, P. 1, 16—19.
- [9] Mamen C. — «Canad. Mining J.», 1973, August, P. 23—26.
- [10] Parliament J. H. — «Canad. Mining and Metallurg. Bull.», 1973 Vol. 65, №736, P. 58—64.
- [11] «Mining Mag.» 1973, Vol. 128, №1, P. 34—35.
- [12] «Mining Mag.» 1973, Vol. 129, №4, frontcover.
- [13] «Engng. and Mining J.», 1973, №4, P. 25.
- [14] Caldwell A. B. — «Mining Engng.», 1970, №3, P. 57—61.
- [15] Vincent J. D., Weyler P. A. — «Mining Engng.», 1972, №5, P. 42—44.
- [16] Bassarear S. H., Sorstokke H. W. — «Mining Engng.», 1973, №5, P. 37—39.
- [17] Hellyer W. C., Campbell R. A. — «Trans. Soc. Mining Engrs. AIME», 1970, Vol. 247, №4, P. 304—308.
- [18] «World Mining», 1973, №3, P. 100.

高鹏义 译白, «Цветные металлы» 1974, №7, 84—91.

张兴仁 校

# 波立登公司重金属矿石的自磨

P. H. Fahlström

## 提 要

波立登公司一九六〇年在瓦斯堡铅矿 (Vassbo) 的一段碎磨流程中引进了第一台自磨机, 即  $22 \times 7$  呎瀑落式无介质自磨机 (Cascade mill)。其后, 对许多变化因素如转速、直径、矿石破碎以及磨矿流程进行了研究并已成功地采用了全橡胶衬板。同样, 在波立登公司的实验工厂中, 也对许多其它的重金属矿石 (base metal ores) 进行过自磨的半工业试验。

本文叙述几年内所获得的最重要的结果。其结果, 已对二段自磨流程取得了基本的概念。最近这已用于艾蒂克矿 (Aitik) 由 10000 吨/日增至 23000 吨/日的选矿扩建上。第一段自磨机是尺寸约为  $20 \times 35$  呎的管型磨机, 每台驱动功率为 4900 马力。

自磨流程是同先前设置的棒磨-砾磨流程平行运行的。这里提供了对二段自磨流程和棒磨-砾磨流程的初步比较。

+ + +

## 引 言

波立登公司是瑞典主要的重金属矿业公司, 在它的八个选厂中每年处理约 1000~1100 万吨的硫化矿。该公司最初的浮选厂是在三十年代初期为处理波立登公司复杂的矿石而建立的。其后, 一些矿山和选厂逐渐增多。对于探矿、采矿、选矿、冶炼和精炼等工艺技术的所有各个方面都做了很大的努力, 由于处理的是复杂的低品位矿石, 这些研究工作是必要的。

几年来, 选矿已成为全公司的基石。这些选厂的不断更新和扩大, 以及采用低成本、高效率的生产技术, 已使其矿石处理量日益增大, 以最高的回收率产出高品位的精矿。

选矿的发展一直是磨浮技术为主要方向。在四十年代和五十年代, 开路细碎之后就在棒磨和球磨机中二段磨矿并进行旋流器分级的流程已在所有的选厂中被成功地应用。

早在 1945 年, 由于磨矿介质的成本增高而导致研究自磨技术。在莱斯瓦尔选厂 (Laisvall) 成功地进行了工业性的砾磨机磨矿试验。这种方法因为磨矿能力不足而被放弃。

基本的试验工作是在五十年代初期开始的, 以多种矿石做了砾磨试验。在 1956 年, 建设了一座新的实验工厂, 装备了砾磨设备进行连续试验, 后来又用于原矿的自磨。加强的试验工作说明砾磨在几乎所有的选厂中都是可行的。然而在此初期的试验中, 对自磨的优越性尚未能充分地作出评价。

随后,波立登公司的克里斯蒂纳贝格(Kristneberg)、莱斯瓦尔和萨克斯贝格特(Saxberget)等选厂都由棒磨-球磨流程转变为棒磨-砾磨磨矿流程。在最近十年,这已成为标准的磨矿作业方法,现在在各个选厂中已有十个棒磨-砾磨系列,每年磨矿650万吨,节约近1900万磅钢球。

砾磨的引用已产生重要的连锁反应。在这种磨矿中很快显示出钢衬板的不利,即筒体衬板很快磨损且排矿格子板被碎片堵塞。这一事实促使在瑞典开始极其成功地发展橡胶格子板,继之砾磨机也采用全橡胶衬板。这也为橡胶衬板在球磨机、棒磨机筒体以及后来在自磨机上所有磨损部位的进一步应用奠定了基础。

在初期发展阶段,在估价自磨的优点方面做了许多努力,第一个主要的实际步骤是1969年在瓦斯堡铅矿一台22×7呎瀑落式无介质自磨机投入生产。瓦斯堡选厂和实验工厂中进行的长期试验,使对于重金属矿石的自磨的原理有了逐步理解,这样,在1972年末和1973年初,二段自磨已被大规模地用在艾蒂克铜矿,该矿选厂在很短的时间内达到了它的额定生产能力,其实践结果证明是很有希望的。

### 自 磨 系 统

自磨系统的分类在世界各地很不相同。在较早的文献<sup>[1]</sup>中,著者曾叙述过波立登公司所用的一种类型。已经发展的最重要的系统流程涉及原矿自磨原理和砾磨原理。前者原矿是在筒磨机中进行湿磨或干磨,给矿是从粗到细连续粒度分布的物料,甚至可以经过粗碎处理的矿石。可以在给料中加入密集的钢质磨矿介质形成矿石和钢料的混合磨矿介质。

在这一流程中,通常免除二段或三段细碎。流程的简单方案只需由一台粗碎机和一台自磨的筒磨机构成。进一步的细磨可以在二段和三段球磨机或在砾磨机中进行。

原矿的自磨优点已详细地论述过,在这里不再赘述,但对重金属矿石已经建立这种系统的仅有少数几家选厂。因此,对阻碍成功地选择自磨机及其运转过程的难关了解得还不太清楚。本文的目的之一就是阐述在波立登公司已经发展的对于这些问题的探索和处理方式。

以前砾磨曾在湖滨矿山公司(Lake Shore Mines Ltd)且后来又在加拿大的几个铀矿中得到应用。不久之后,芬兰和瑞典也相继采用了这项技术。利用从矿石筛出的岩块已使球磨机转变成砾磨机。加到磨机中就形成一种砾石磨矿介质。从磨矿能量角度看,它们比钢球的比重小,故需要较大的磨机容积。

砾磨已证明是自磨系统最简单和可靠的一种。现在已经充分了解一些主要因素,因而能够选厂的设计达到象球磨机那样很有把握。在选厂设计中需要避免一些容易疏忽的地方,如砾石性质、磨机直径和磨机转速等。砾磨机也可以用混合磨矿介质运转以获得功率和能力。

因为砾磨在一些国家里差不多是一种标准的磨矿方法,故不拟详述。然而,已发现自磨和砾磨的联合使用于重金属矿石具有一定的优越性,因此,将在本文中予以评述。

我们还应当提及瓦滕魏勒(F. Wantenweiler)、杰克逊(O. A. E. Jackson)、克洛克(B. S. Crocker)、哈丁(H. Hardinge)和韦斯顿(D. Weston)等人对于促进

在矿山工业中应用自磨和砾磨的兴趣所做的工作。

## 瓦斯堡选厂的自磨

### 初建的选厂

瓦斯堡的矿石(图1)是石英岩状砂岩,含有方铅矿和一些闪锌矿,含5.5% Pb和0.6% Zn。矿石极其坚硬且成细粒,在磨到50~55%为-325目时获得最好的单体解离。方铅矿充填于石英之间且浸染石英颗粒,后者平均粒度为100~200微米,而方铅矿颗粒的平均粒度是20~40微米。矿石的可磨性低,约为40磅<325目/吨·时。破碎和磨矿消耗功率极大,从而引起与矿石接触的材料高度磨损。

瓦斯堡矿是在五十年代末建成投产的。当时,已通过在半工业实验厂的一台10×3呎瀑落式无介质自磨机的试验工作取得一些有关矿石自磨的经验。试验工作表明,一段自磨机最好,虽然这倾向于把未经试生产的流程引进工业性规模的选厂。因此,本着发展技术的意向,瓦斯堡选厂设计为自磨磨矿,并在1960年元月投入生产。

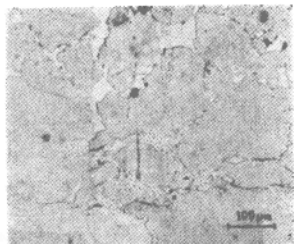


图1 瓦斯堡矿石的显微组织。灰色表面是石英,白色为方铅矿,点影为闪锌矿(放大135×)

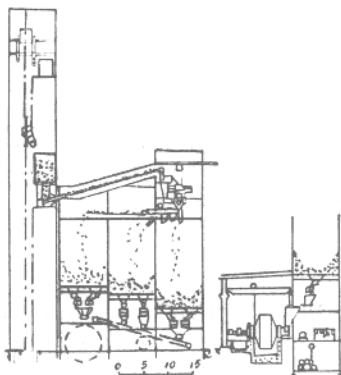
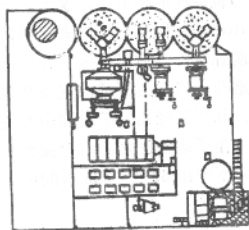


图2 瓦斯堡选厂



早期瓦斯堡选厂的装备和生产运行已有叙述<sup>(3)</sup>。正如所预见的,在最近十年中,瓦斯堡选厂成了该公司进一步发展和了解自磨技术的主要基地。

在选厂设计时,采取了一些办法使它能够进行几个变化因素的试验,因为当初缺少



今天具有的许多知识。

选用了瀑落式无介质自磨机，因为看来它具有为自磨设计和磨矿功效所需要的性能。根据半工业实验工厂确定的可磨性和额定处理量，选择22×7呎的磨机筒体。选用了一套连续高速传动装置，它可使磨机在660瓦功率的电动机满载下，在50~10%的临界转速(Nc)范围内运转。选厂(图2、3、4、5)装备有二段湿式旋流器分级系统，以及浓度和物料流量的控制。矿石在井下的一台颚式破碎机中破碎到-8吋，提升上来，然后筛分为-1½吋、-3½吋和+3½吋的粒级。三种粒级的矿石可以由不同的矿仓再混合以及克服给矿粒度上的不匀。另也设置了二次破碎机，能用于校整矿石的上限粒级的粒度。预留有空场地以便往后设置二段砾磨机。

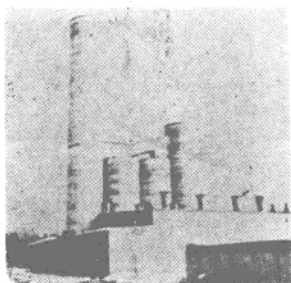


图3 瓦斯堡矿的井架和粗矿、中矿及细矿仓

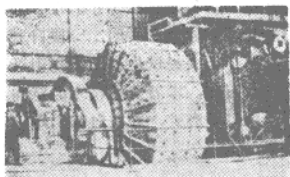


图4 瓦斯堡选厂的22×7呎瀑落式无介质自磨机

开始生产的头几年，虽然对矿石的年处理量是足以胜任的，但力量用在完善磨机轴承的机械性能和分级系统上。上端润滑轴承被改为高压套筒进给轴承(Sleeve-fed bearings)，自从变更以来证明情况良好。开始时，是用空气升液泵将磨机排料泵送到第一段旋流器，后来换为一台可变速的卧式砂泵，为了防止太粗的物料排出，设计了一台鼓型分级器并用螺栓固定在磨机排矿中空轴上。此分级器通过沉降作用使较粗的物料分离，并使其经由排矿尾端中心处的勺斗加料器而返回磨机。

作了这些改进，这个流程可按23吨/时的预定处理能力，在27.5瓦·时吨矿石的效率下产出52%<325目的磨矿产品。在浮选阶段，得到71%Pb的精矿和0.32%Pb的尾矿。

## 改 革

经过周密的研究之后，很明显，使用二次破碎机是没有必要的。相反，磨机的功效在很大程度上取决于所有时间内使矿石中的粗料保持某一最小量。矿石平均为20~30%+3½吋时看来适合于磨机的正常运行性能。然而，当矿山采用房柱式采矿法时则会产生不均匀的粗块矿石夹带以相当细的碎料。在这样的情况下，磨机的磨矿能力减小。这