

第十四届国际选矿会议文集

(第一卷第二卷)

国外金属矿选矿编辑部

一九八四年

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、学者译出这样大工作量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。全集由郑飞统一校对。

第一卷 磨 矿

目 录

一、亨德森矿的一段半自磨

Single stage semi-autogenous grinding at the Henderson mine, W. R. Hinken [美国] (1)

二、大型自磨机

Large grinding mills, R. Mapipuu et al [瑞典] (7)

三、铁矿石的磨矿——利比里亚邦格矿和巴西法布里卡矿的生产经验

Grinding of iron ore—operating experience at Bong Mine Liberia, and Fabrica Mine Brazil, K. Brenneck and W. Jacobs [联邦德国], E. Gschwindt (利比里亚) (16)

四、马坦佩克铜矿浮选厂的新磨矿工艺

New comminution technology in Majdanpek copper ore flotation plant, M. Grujic' et al [南斯拉夫] (26)

五、衬板结构对连续湿式球磨机性能的影响

The effect of liner design on the performance of a continuous wet ball mill, R. S. C. Roger, K. Shoji et al [美国] (33)

六、磨矿机处理能力的计算

Calculation throughput of ball mills, G. Roth, K. Schonert [西德] (44)

七、湿式溢流型球磨机物料运动模型

A model for mass transport in wet overflow ball mill, R. Hogg, Z. Rogovin [美国] (51)

八、湿式球磨机的模型和按比例放大

Simulation and scale-up of wet ball milling L. G. Austin [美国], K. A. Weller [澳大利亚] (62)

九、离心磨矿机——一种新磨矿系统的经验及其应用

The centrifugal mill, Experience with a new grinding system and its applications L. P. Kitsehen, P. J. D. Lloyd, R. Hartmann [西德] (78)

十、使用非金属介质的干式磨矿——邦德可磨度试验的扩大应用

Dry grinding with non-metallic media: An Extension of the Bond grindability test C. clerici, A. Frisa Morandini et al [意大利] (87)

第二卷 贵金属的回收

目 录

一、金和银回收的革新

Innovation in gold and silver recovery H. Von Michaelis [美国]..... (95)

二、现代金银回收实践

Current gold and silver recovery practice C. F. Acton, et al [美国]..... (115)

三、某些金选厂的工艺设计和费用考虑

Some process design and cost considerations for gold mills W. T.

Thoburn, I. C. Edwards, G. Wortmann [加拿大].....(126)

四、碳酸法处理粘土质金矿的研究

Valorisation D'Un Minerai D'Or Argileux parle proce'de' Charbon

En pulpe G. Bardery, Ollivier [法国].....(139)

五、碳浆法回路指标的预测和评价

Predicting and assessing carbon-in pulp circuit performance

D. Menne [南非].....(152)

六、碳浆法回收金的实验室及半工业试验评价

Aspects of laboratory and pilot plant evaluations of CIP with

relation to gold recovery R. J. Davidson et al [美国].....(162)

七、金银矿石的有效选矿方法

Effective methods of gold and silver bearing ore beneficiation

V. I. Zelenov, A. G. Ipatin et al [苏联].....(175)

八、利用硫脲从含碳泥质氧化金矿石中提取金的研究和展望(略)

The research and future about the extraction of gold from carbon

slime-containing oxidized gold ore by addition of thiourea

Chen Deng Wen [中国]

九、南非金矿尾矿中金和黄铁矿之浮选

The flotation of gold and pyrite from South African gold mine

residues S. A. Allison, R. C. Dunne, S. A. De Waal [南非].....(181)

十、从布什维尔德复合矿床铬铁矿脉中回收铂族金属

The recovery of platinum-group metals from the chromite reefs of
the Bushveld complex I. J. Corrins, R. C. Dunne, S. A.

Allison [南非].....(193)

第一卷 磨 矿

亨德森矿的一段半自磨

William R. Hinken

(美国科罗拉多州恩派尔阿马克斯
公司克莱麦克斯铂公司)*

提 要

1976年7月投产的位于科罗拉多州的亨德森矿只有一个大的一段半自磨回路,对原设计的磨矿回路作了许多变革。

为了控制磨矿细度和磨矿生产能力,不断发展了功率与球比例的设计思想。此外,为了提高磨矿机的性能和效率,还研究了给矿粒度、衬板设计、钢球尺寸、格栅开孔和磨机转速等因素。

一段半自磨回路生产费用起初较高,经不断改进后费用现已比姊妹矿使用常规磨矿回路的费用低。

前 言

亨德森 (Handerson) 矿和选矿厂联合体位于美国科罗拉多中部。矿山位于大陆分水岭东侧恩派尔 (Empire) 附近的勃色特 (Berthoud) 隘口; 选厂位于大陆分水岭西侧的威廉·福克 (William Fork) 沟谷, 距科罗拉多州帕歇耳 (Parshall) 东南 32 公里。矿山和选厂有 22.6 公里的铁路运矿系统连接。

热液充填铂矿以辉铂矿存在, 矿体中其它少量矿物有萤石、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和钨锰矿。目前这些矿物都未回收。热液熔浆的入侵, 不但沉淀辉铂矿, 而且强烈蚀变侵入周围的岩石, 可以辨认出有八个各以特定矿物结集为其特征的变质区。

亨德森矿正常的日产量为 28500 吨, 由于经济原因, 其日产量降低至 24000 吨。矿石用盘区自然崩落法开采, 先在矿块底层爆破, 形成一个大空区, 使得不能承受矿块体重, 从而在其压力下矿石被破碎、塌落, 并充填空区。破碎的矿石经放矿漏斗放出。为了控制好出矿品位和处理好空区, 放矿是在小心控制的条件下进行的。放出矿石用装运设备送至放矿溜井, 在出矿巷道内装车。

重车通过 15.4 公里的大陆分水岭下的隧道 (上坡坡度为 3%), 到达地面标高为 2720 米的隧道西口, 再以大部分为 1.5% 的上坡地面铁道继续 7.2 公里送至破碎机。

* Climax Molybdenum Company, AMAX Inc. Empire, Colorado USA.

破碎机为 1.37×2.13 米的旋回破碎机, 其排矿缓冲仓可容纳一列车的矿石, 破碎的矿石以皮带运输机运至 217000 吨的大贮矿堆。

粗磨包括四台一段半自磨。三台为 8.5×4.26 米, 另一台为 9.14×3.35 米。磨矿回路用计算机监控。

半自磨的排矿经分级后进行粗浮选, 粗选精矿给入独立的再磨回路, 它包括三段磨矿和四段浮选。再磨精矿经溶浸方铅矿后加以过滤和干燥。

粗磨回路概述

亨德森粗磨回路经过充分的中间厂试验才选用了一段半自磨闭路流程。三台 8.5×4.26 米磨机各配两台 3500 马力的绕线型转子电动机。设计磨机的排矿通过 9.5 毫米的长孔格栅给入筒筛, 筒筛是防止格栅万一损坏用来保护水力旋流器的给矿泵的。磨机排矿用 660 毫米水力旋流器分级, 其溢流给入粗浮选。

选厂建设的全部竣工期是和矿山产量相对应的, 因此, 一号粗磨机首先投入运转, 几乎立刻发现了设计中的几个问题, 因为敲击变形 (Peening) 以致格栅孔眼太小, 磨机不能粗磨 (35% 大于 100 目)。三号磨机的改进包括扩大格栅开孔至 63.5×15.25 毫米和采用筛及磁铁的再回路皮带输送系统, 这样一、二号磨机的一些缺点得到克服。增加再回路系统的三号磨机却比一、二号磨机运行较好, 但由于添加了设备, 作业率降低, 导致实际产量的损失。

10.9×4.01 米的第四号磨机配以 700 马力的电动机, 以 75% 临界速度运行, 于 1980 年 11 月投入生产, 增加生产选厂生产能力至 31700 吨/日。四号磨机的底座配件和一、二磨机很相似, 有互相更换的可能性, 选用的直径与长度之比也较大, 更近似地模拟了中间试验厂。缩短磨机长度有利于粗磨, 同时也相应增加了生产能力。

亨德森选矿厂一段半自磨的综合标志

亨德森选厂是唯一采用一段半自磨的主要选厂, 不列颠哥伦比亚的艾兰铜选厂 (Island Copper Mill) 起初有一段半自磨的设想, 但放弃了, 以二段回路代替。亨德森一段回路自 1976 年起开始运转, 现在证实了这一磨矿概念是有生存力的。

目前亨德森选厂的钢球消耗指标相当好, 达到 0.75 公斤/吨, 而生产初期是 1.15 公斤/吨。磨矿细度已经可以控制, 而开始完全取决于磨机自身的性能。经过六年的生产, 每吨矿石的破碎磨矿费用与姊妹矿克莱麦克斯不相上下, 或者更优于该矿。磨机作业率超过 92% 时, 衬板使用寿命延长一倍。磨机功率以邦德功指数衡量, 则从 22 千瓦·小时/吨降至 18 千瓦·小时/吨。磨机性能的这些改进是经过大量劳动的, 当然也经历过一些错误。

为了了解和适应半自磨的原则, 重视第四号粗磨机的试验是有益的。磨机建成后进行了 17 天的自磨运转, 此后在磨机中添加一定量的钢球, 并逐渐增加球量, 这一试验的结果列于表 1。

表 1 所列数据是一个好的例证, 表明加入钢球明显地促进磨机的功效, 仅仅由于添加钢球, 这个磨机的邦德功指数从 26 改进至 19。大家都知道, 磨机中添加钢球可以增加磨矿的粗粒级, 这一事实虽然都知道, 但未被大多数选厂有效地用来取得高的磨机效率和磨矿细度的控制。

表 1

	周 期 天	加 球 量 %	磨 矿 细 度 %+100目	处 理 量 吨/小时	功 率 千瓦	千瓦-小时	功 指 数
自 磨	17	0	2.8	101	3734	37.1	26.8
半 自 磨	3	1.1	3.4	119	4231	35.6	30.0
半 自 磨	6	2.8	5.3	150	4510	30.1	26.3
半 自 磨	9	4.5	8.8	181	4730	26.1	24.1
半 自 磨	12	6.0	14.1	218	4780	22.0	22.1
半 自 磨	15	7.2	11.8	240	4910	20.5	21.2
半 自 磨	18	8.2	24.8	282	4659	16.5	19.6
半 自 磨	21	9.1	26.7	301	4906	16.3	19.9
半 自 磨	24	9.8	30.1	300	4670	15.6	20.2
半 自 磨	27	10.2	34.7	324	4607	14.2	19.9

功率与装球量之比

半自磨机的矿量与其装球量的关系对磨机的功效、磨矿细度和每吨矿石的球耗,影响十分明显。在亨德森功率与装球量之比用千瓦-小时/公斤表示,这个关系是亨德森磨机唯一的最重要的控制因素。图 1 表明如何利用这个比值有效地控制磨机的磨矿细度。附录表明如何利用功率与装球量之比计算磨机的各个参数。

有些人对利用功率与装球量之比控制磨矿细度的适用性有疑问,此法之所以胜过只控制水力旋流器水量是因为它是控制磨矿细度的最有效的办法,也是使磨矿细度得到控制的最正确的办法。一段半自磨的磨矿细度完全取决于磨机的情况,如装球量、电动机牵引力、衬板状况等,改变水力旋流器水量可能不会改变磨矿细度,因为产品是磨机生产的。此外,球耗与钢球占据的磨机容积成正比,如果操作工选择加更多水而不选用减少装球量的办法来磨细粒度,则球耗费用将增高。

半自磨机的功效受装球量容积百分数的影响。表 1 是添加钢球改进邦德功指数的一个标志。功效并非不断地改进的,因为功率与装球量之比降至 17 千瓦-小时/公斤后功效开始变坏。图 2 用图形表示亨德森磨机功效在功率与装球量比变化后的经验。

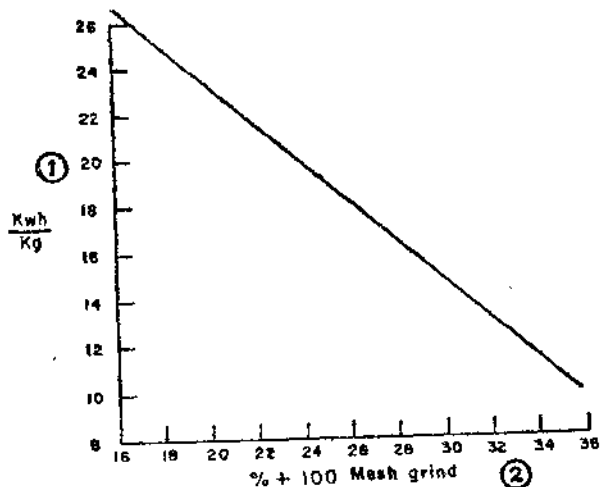


图 1 功率与装球量之比和磨矿细度关系

1—功率与装球量之比与磨矿细度的关系; 2—%+100网目
(测定的标准偏差)

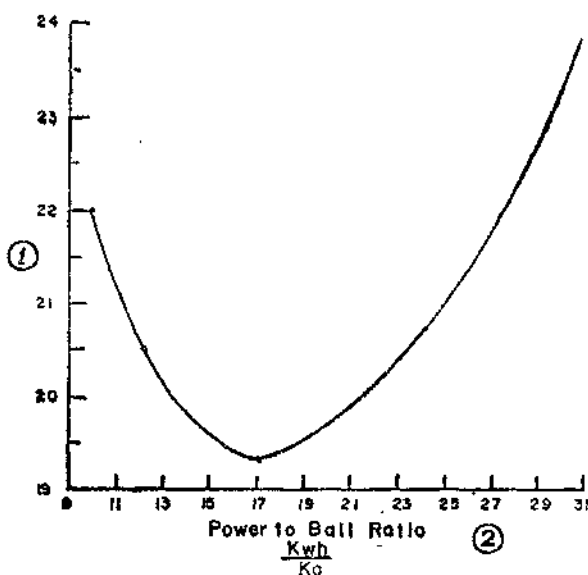


图2 功指数和功率与装球量之比的关系

1—功指数； 2—功率与装球量之比，千瓦-小时/公斤
(测定的标准偏差=0.80 20; 0)

磨 机 衬 板

装球量和电动机牵引力对半自磨的作业有影响，但几乎同样重要的另一因素是衬板型式的设计。图3表示亨德森三种衬板式样的总结。标准衬板“A”是最先使用的，作业初期良

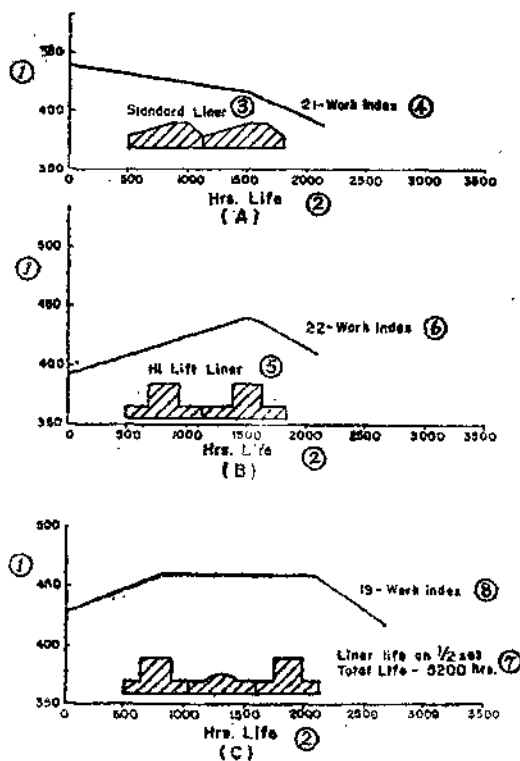


图3 亨德森衬板参数

- 1—处理量，吨/小时；
- 2—亨德森衬板使用寿命；
- 3—标准衬板；
- 4—21-功指数；
- 5—凸头镍衬板
- 6—22-功指数；
- 7—衬板总使用寿命52000小时；
- 8—19-功指数

好，但当衬板凸头 (lift) 磨失，作业就一直变坏。高凸头衬板“B”有足够的凸头，但它们之间的间距太小，在整个衬板使用寿命期间，经常发生充填，这一衬板式样的改革是失败的。第三种试验的是高低衬板“C”，它大大改进了磨机作业和寿命，这种衬板式样是现在被采用的。衬板开始有充填，但经过近 500 小时后运行就很好，还有一个优点是每次只需要更换一半衬板，因为原来是高凸头的衬板，当磨损后就成为低凸头的，这种更替周期始终不断。

“C”式衬板是珠球体铸钢，淬火后布氏硬度在 350 左右，这种衬板的设计使功指数较式样“A”衬板改进 10%，它除了具有良好的寿命和作业外，还有专门设计的胶垫 (inserts) 易于拆卸，在 24 小时内可以拆除半套衬板和安装新衬板。

磨机给矿准备

有些讨论必然涉及给矿粒度和半自磨的磨矿作业。粗磨的给矿粒度设计为 230 毫米，不久发现减小给矿粒度能改善磨机效率。这一发现促使碎矿的上限粒度缩小至 127 毫米，减小粗磨回路的上限给矿粒度造成粗碎费用的增加，但粗磨回路的优越产量和效率是值得互相替换的。必须指出，如果从贮矿场只取出大块的矿石，那么功指数将从 19 千瓦-小时/吨升至 26 千瓦-小时/吨，这表明半自磨的给矿准备同球磨一样重要。

球 径

曾试验了球径为 76、102、114、127 和 140 毫米大(小)的钢球，结果是增大球径提高效率，但是超过 140 毫米的钢球应考虑它的供应条件和碰撞损害，还是选用 127 毫米为宜。亨德森的经验是球径愈大，磨机愈适应较粗的给矿范围。表 2 是磨机功指数与不同球径的对照。

表 2

球径, 毫米	功指数
76	20.7
102	19.3
127	18.8

格 栅 开 孔

对格栅开孔的大小和它如何改进磨机矿流畅通、增加回路负载以及改进磨机效率曾展开了很多争论。在一号和二号磨机上进行了各种格栅开孔尺寸的试验，做了各种格栅开孔和它的空区面积的磨机性能 (吨/小时计) 的比较。表 3 是这些试验的总结。

表 3 所列的试验结果表明空区面积和格栅开孔对磨机作业并无影响，但这是一个有保留的说明，因为 19 毫米的格栅作业优于 9.5 毫米的格栅，同时 9.5 毫米格栅有被敲击堵塞 (peenclosed) 之趋势，使每块格栅的空区面积减少到 300 厘米² 以下。

三号磨机有关较大的 63.5×15 毫米的长孔格栅和再回路系统及排除钢屑的磁铁装置，其作业情况比其它磨机稍好，但从再回路系统的可靠性考虑，这一回路对生产并不好。三号磨机依靠磁铁排除钢屑使产量略胜一筹，如果不用磁铁，钢屑在磨机中积累，作业恶化，情

况与其它磨机不相上下。在磁铁系统中被排除的小钢球,它只耗费电能而对磨矿无显著作用。

表 3 格栅尺寸和空区面积

格栅尺寸, 毫米	每块格栅的空区面积, 厘米 ²	平均小时处理量, 吨	标准偏差
9.5	890	223	9.6
19.0	1150	272	24.05
19.0	1150(二排)	382.7	15.4
19.0	1150(一排)	391.3	11.6
19.0	1150	402.4	17.81
25.4	1290	404.4	15.62
25.4	1290	395.9	14.85
19.0	1150	412.4	17.41

尽管如此,三号磨机再回路系统的建设并不浪费,因为它为再磨矿回路提供了合适的卵石。

磨 机 转 速

为了增加处理量,磨机转速从69%临界速度提高至75%,这一变更在较低的装球量时,改善了电能的利用和提高了8%的磨机生产能力,其效率不变,也就是磨机的功指数不变。提高磨机转速,成功地增加了磨机处理量,但缩短了衬板寿命约20%。由于对钨的需要减少,现在正逐步降低磨机转速至原来的69%临界速度,以便减少衬板磨损。

磨 矿 费 用

对半自磨的逐渐认识也不断地改善了生产成本,很难选择一个传统的磨矿作业费用和它直接对比。亨德森矿生产费用的改进到目前与克莱麦克斯矿相比几乎相等了。表4是费用的总合。

表 4 亨德森矿破碎磨矿每吨矿石费用与克莱麦克斯相对比的费用百分数

年 度	破 碎	粗 磨	合 计
1979	10.9	104.2	115.1
1980	11.2	97.2	108.3
1981	13.0	90.2	103.2
1982(三月)	11.7	78.1	89.8

结 语

亨德森半自磨磨矿已经知道的不少了,每当有一个新认识就带来许多渠道促进更多的知识。新的计算机装备已经成功地补充和被第一流地用来作磨机的控制和最佳化。计算机装置结合磨机各种可变因素的数据日志,对亨德森矿一段半自磨回路将能更加全面了解。

操作工和设计工作者对半自磨机的设计和操作实际经验很少,绝大部分磨矿回路的知识

是经过试验和在缺少有效地操作磨机办法所犯错误中发展起来的。亨德森矿经历所有这些问题，现在，经过 5 年多的运转，它对一段半自磨回路开始树立了信心。

附 录

功率与装球量比可以被用来计算一个特定磨矿细度的参数。举例，设磨机装球率为 230 公斤/小时，磨矿细度为 24 % + 100 目，从图 1 中得知需要功率与球量比为 20.1 千瓦-小时/公斤，所以

$$20.1 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} / \text{公斤} \times 230 \text{ 公斤} / \text{小时} = 4623 \text{ 千瓦}$$

磨机的电动机拖引力调置在 4623 千瓦，即可达到 24 % + 100 网目的磨矿细度。

另举例，使磨机最大电能为 5000 千瓦，操作者想在功率与球量比为 17 千瓦-小时/公斤的工作条件下取得最好的磨机功效，因此

$$\frac{5000 \text{ 千瓦}}{17 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} / \text{公斤}} = 294 \text{ 公斤} / \text{小时}$$

当电动机拖引力为 5000 千瓦，磨机装球率为 264 公斤/小时，则磨机的工作将最有效。

(张卯均 译)

大型自磨机

Ravio Maripuu, Ovie Marklund,

Lars-Sune Nystrom

(瑞典波立登矿物公司) *

提 要

瑞典波立登矿物公司现年处理低品位硫化矿约 1,500~1,600 万吨，有 8 座选矿厂处理来自 15 座矿山的矿石。

由于矿石品位低，选矿厂一直是公司一个重要环节，不断进行革新和扩建。

早在 1954 年该公司就首先研究了自磨技术。五十年代初，开始了基本的试验工作，从而有可能对自磨做出评价。1959 年安装了一台瀑落式磨机。经长期的工业和半工业试验，加深了对自磨过程的理解。

从 1972 年开始，波立登公司的所有磨矿回路均用自磨技术。最近一台自磨机于 1981 年投产。艾蒂克选矿厂经扩建，日处理能力达 1 万吨矿石。采用两段全自磨回路，安装了一台 22×40 英尺的粗磨机和 1 台 18×24 英尺的第二段砾磨机。

* * *

* Boliden Mineral AB, Sweden.

前 言

波立登集团业务的主要范围是矿业、有色金属熔炼和精炼，以及工农业用无机化工产品。业务还包括承包和咨询矿业和重工业工程项目设计、工业初级原料和化学制品的国际贸易、石油产品精炼和分馏以及出售工艺诀窍。

1981年，整个波立登集团的营业额接近 10 亿瑞典克朗，雇用人员约一万人。

波立登矿物公司从事集团的国内外的矿业活动。在经营的 55 年期间公司已经开采大约 40 个矿山的矿石。现在波立登在 8 个选厂里年处理 15~16 百万吨 15 个矿山的低品位硫化矿。

波立登磨矿的发展

长期以来已经说明，不仅瑞典而且全世界开采的矿石品位逐渐降低同时开采量增加。因此，很明显总费用分配的变化有增加磨矿成本的趋势。

上面提到的因素能源价格以及其它与能源有关的费用诸如磨矿介质、衬板、维修等也逐渐增加，刺激公司改进磨矿技术。

砾磨研究成功之后，在五十年代期间使大多数的波立登选厂由棒磨和球磨改为棒磨和砾磨回路。同时为了评价一段自磨的优点作了很大的努力。

由于这个有希望的发展工作，决定在中心试验厂装备相当大的试验磨机准备自磨试验。1956 年在磨矿系统装了一台灵活性很高的 10×3 英尺的瀑落式自磨机。此瀑落式磨机的安装功率为 150 千瓦，回路生产能力 5—7 吨/小时。

多年来，这个自磨回路已经试验了大量的多金属矿石。这些试验与满载运转相比较为我们提供了许多经验并知道了自磨机的原理。

波立登的自磨实践

在磨矿的领域有时同样的技术叫法不同。我们波立登规定，在磨矿过程中不外加如棒、球等磨矿介质称为自磨。

自从自磨推广以来和根据 25 年多的发展与生产经验，波立登已研究了它的两段全自磨系统。正确地应用这个系统将有助于利用低品位矿石的进展。

今天不同的波立登的不同磨矿工艺之间的分布状况如下：

磨矿工艺	百万吨/年	分布，%
棒磨和砾磨或棒磨和球磨磨矿	7.5	48
自磨两段磨矿	8.0	52

瓦斯堡选矿厂（见图 1）

瓦斯堡厂于 1960 投产，到 1982 年止当时采出的矿石是石英砂岩，含方铅矿和少量闪锌矿，铅品位为 4~5%。

六十年代期间 22×7 英尺瀑落式自磨机是波立登进一步研究和了解一段自磨技术的来源^(1,2)。

最初，此自磨回路是具有两段水力旋流器分级的一段自磨回路。在改进机械的头几年里

加上橡胶衬板成功地应用，自磨技术的发展使选矿厂纳入它的生产轨道。钢衬的一段自磨机回路改成橡胶衬两段自磨机回路后，生产能力比原来增加100%以上，使选矿厂的生产更加可靠。

英尺水平下。

六十年代中期做了使矿山投产的研究和设计工作。进行了大量的不同回路的试验工作。虽然一段自磨的回路很有可能，但由于对矿体性质、开采方法的影响和自磨工厂放大的因素了解不够，矿山不能开采。

虽然传统的棒磨和砾磨回路可以满足工程的要求，但决定在新厂的设计和计划中用这个磨矿系统。

A系统：初期的棒磨—砾磨机磨矿车间

设计一座日处理 8000 吨的选厂，安装了一台 54 英寸的旋回圆锥粗碎机。采用一台 7 英尺塞蒙斯圆锥破碎机的破碎车间布置在矿仓上面。破碎到 1 英寸的细碎矿石给到两台 10.5×15 英尺的棒磨机，每台 600 千瓦。用两台 15×15 英尺砾磨机进行第二段磨矿，每台 800 千瓦。在破碎车间筛出的砾石经由磨机马达控制的皮带送给砾磨机。

1968 年该车间投入生产。磨矿系统很符合它的预计。生产含 27—28 % 铜，92 % 回收率的铜精矿。

B系统：第一次扩建用两段自磨

1972 年工厂的生产能力扩建到 23000 吨/日。

这时全部露天开采的矿体已经剥离并可采样。安排了广泛的自磨试验计划并在中心试验工厂处理了来自矿山不同区域的 7000 多吨的矿石。

可比较的可行性研究表明，两段自磨系统与现有传统磨矿系统比较，工厂投资可减少 20 %。生产费用可更低些。

这些研究结合瓦斯堡厂自磨回路的多年生产经验（此时该厂已达到成功阶段），以及 A 系统砾磨头两年生产所得到的经验形成了工厂扩建安装两段自磨回路决定的基础。

给入扩建磨矿车间的矿石用两台平行的 8 英寸排矿口的 54 英寸的旋回破碎机破碎。碎矿仓由于矿石量大，配制成棚形，堆放容量为 40000 吨。这个矿仓供矿 2000 吨，料面控制，第一段磨机的给矿仓供两台 20×34.5 英尺第一段磨机（70 % 临界转速）。每一台磨机有两台 1800 千瓦高速马达通过减速机驱动。

自磨机的排矿通过橡胶格筛送给两台 15×16 英尺砾磨机（750 千瓦）。加入这些磨机的砾石从 A 系统的贮槽中排出。砾磨机排矿经螺旋分级机分级，沉砂和砾石碎块返回送给第一段磨机，溢流送旋流器组。旋流器底流返回第二段磨机，旋流器溢流送浮选。

安排生产前的八个月头两个生产线中第一生产线投入试验。1972 年底，磨矿回路能够全面试验，并对第一段磨机衬板做了改进，可以加快矿浆的排出，回路额定生产能力达到了 250 吨/小时^[2,3]。现在每个磨矿回路的平均生产水平为 280 吨/小时。

史蒂根约克 (Stekenjokk) 厂(见图3)

史蒂根约克矿石是浸染的黄铜矿和闪锌矿的非晶质黄铁矿，含 1.4 % 的铜和 3.2 % 的锌。矿山位于瑞典和挪威之间的山脉^[4,5]。

各种采矿方法和选矿工艺的研究在六十年代期间完成。1973 年着手施工设计，1976 年矿山投入生产。目前的生产是 2000 吨/年。

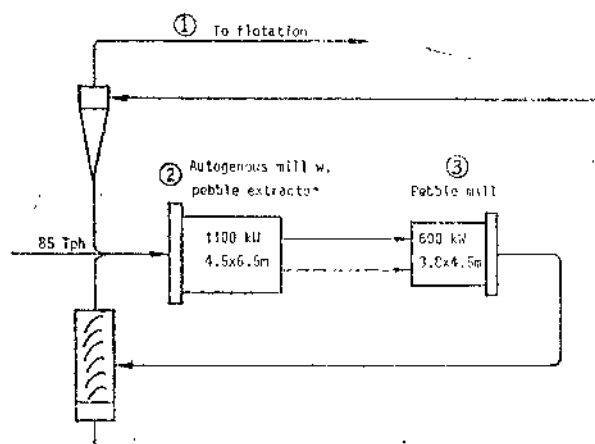


图3 史蒂根约克磨矿回路流程

1—送浮选； 2—自磨机；砾石分离器； 3—砾磨机

根据实验厂试验和瓦斯堡和艾蒂克的经验，决定在史蒂根约克厂安装两段自磨系统。

矿石给到磨矿车间是通过一台 40×48 英寸颚式破碎机（8 英寸排矿口）。粗碎的矿石给到第一段 15×22 英尺自磨机，磨机有两台 600 千瓦传动系统通过减速机工作。

第一段磨机的排矿轴颈装有波立登发明的砾石分离器（图 4）。这个分离器和它的给矿系统自动给 13×15 英尺第二段磨机添加砾石而不外加任何筛子、运输机或者贮槽。砾石分离器由第二段磨机的传动功率控制。

砾磨排矿用螺旋分级机分级，沉砂和砾石碎块返回给第一段磨机。浮选前溢流经旋流器分级。

艾蒂克厂扩建（图2）

C系统：二次扩建用两段自磨

根据矿体勘探的结果，1979 年决定艾蒂克厂的生产能力增加到 34000 吨/天[7]。

新系统的给矿是由 B 系统现有的中间配矿仓供给 22×40 英尺第一段自磨机给矿，

它装有两台 3000 千瓦包括高速马达和减速机的传动系统。原来这个磨机的排矿泵送到旋流器组，底流送给 1600 千瓦的 18×24 英尺第二段砾磨机。供给这个第二段磨机的砾石是史蒂根约克型砾石分离器从第一段磨机中分出的。浮选之前砾磨排矿先进行旋流器分级。

1981 年初 C 系统投产。生产的第一年因机械问题效率低。而且粗的碎石块从第一段水力旋流器进入浮选。为了改进分级第一段旋流器现已拆除，在第二段磨机旋流器之前安装螺旋分级机。

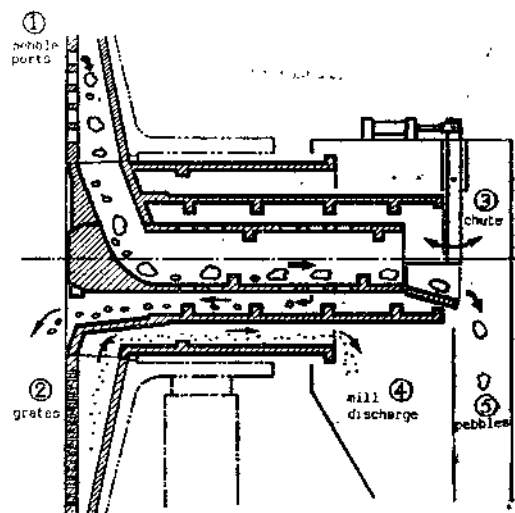


图4 波立登砾石分离器示意图

1—砾石投入口； 2—格子；
3—斜槽； 4—磨机排矿； 5—砾石

C 系统设计为 470 吨/小时。至今平均生产能力一直接近 400 吨/小时，表明有提高产量的问题。正继续集中解决这些问题。

生 产 经 验

由于增加生产的需要以及尽量减少投资，碎磨技术已向自磨的方向发展，结果磨机向大型化发展。

一般来说，这个进展意味着处理矿石的设备用的少，但对每一台设备依赖性大。这当然要强调设备要极可靠，停车检修时间须最少。

根据我们操作大型自磨机的经验，以下几个方面可能是关键性的：

轴 承

由于第一段自磨机需要轴颈直径大以及轴承负荷大，所有我们所装的大型磨机装有液压动力型或液压静力型套筒轴承。

瓦斯堡选厂生产的头几年对不断发生问题的液压动力型轴承进行改进。轴承改为液压静力型以后问题得到解决，后来轴承已经运转得很成功。

采用液压静力型轴承的缺点是取决于液压系统（油的压力），当液压系统发生毛病时，可能由于损坏轴颈造成磨机大的破坏。但是根据长时间的的经验，从来没有因为这个发生重大事故。

和这个轴承型式有联系的过去经常有现在仍然有问题的另一原因是密封系统。对于这样公差大不精的大直径磨机而且磨机运动，研制一个很好的密封系统似乎是一项很复杂的任务。而用精密公差配合的可塑环式密封已达到了很好的效果。

轴颈与端盖

磨机结构已经产生问题的下一个部件是轴颈和端盖之间用螺柱联接的法兰。因为在这个地方从磨机到轴承传递巨大的力，很容易出故障。

经历过因法兰联接螺柱松紧不当造成很大的麻烦。结果是法兰面活动，联接破坏。为了解决问题，我们不得不停下磨机把轴颈和端盖拆除，重新制造。

这次经历之后，我们建议应该用加预应力紧固螺柱的成熟方法。这可以用控制螺栓加热的方法进行，但是最好用液压预紧工具。

在这方面与其它有关的是，为了避免在衬板底下循环物料（矿浆）损坏法兰面，轴颈和端盖之间的联接处要密封。对所有规格的磨机这点是大家都知道的，而对于有很大力量的大型磨机就应更加注意，应该强调要特别当心这个联接的密封，安装衬板之前要全面检查。

齿 圈

因为磨机的尺寸以及传动功率已经增加，齿圈的尺寸（宽度）也增加了。因此在机加工和制造以及安装时找正有一高要求。根据说明书进行找正和安装，这方面还包括很多预防性的保养和监护工作。

我们所有的自磨机，大部分配备双驱动装置，以便使用小齿圈。

齿轮减速机和马达

我们所有的设备都选择绕线式转子高速马达（滑环式）和齿轮减速机。这样在世界上我们的地区使用能降低投资，现已经通用，也是为慢速起动系统的简化配置创造机会。

齿轮减速机是根据 AGMA（美国齿轮制造者协会）标准设计，它规定自磨机齿面寿命和齿的强度的负荷系数最小为 1.5。我们的经验认为这些数值对大型磨机太小。我们的意见是最小的负荷系数分别应为 2.0 和 2.5。如果选择齿面负荷系数低，齿将磨损，本身就成问题，而且还导致提高噪音。

因为磨机传动系统很重要，我们的意见是值得花钱购置工具以减轻包括小齿轮、齿轮减速机和马达等部件的找正安装工作。我们发现这个最好安装垂直和水平两个方向活动的起重螺旋千斤顶。缩短找正的时间，还能进行全面的安装，特别有时装配备件。

新 设 备

下一次大型自磨机组装时我们将认真研究在磨机筒体上装配液压静力型或液动力型轴承和用绕线式转子马达的无齿轮传动的可行性。采用这个结构似乎可能避免曾经遇到过的问题。

磨机的按比例放大问题

艾蒂克 C 系统的产量和可磨性至今没有达到设计能力和要求，说明有按比例放大的问题。曾报道过大型第一段球磨机类似的按比例放大的问题〔8〕。

艾蒂克 C 系统第一段磨机与 B 系统旧磨机比较直径扩大 2 英尺，长度扩大 7.5 英尺。L/D 比（长度与直径之比）两种情况几乎相同。

目前的研究表明，比以前更加认识到矿石的可磨性和自磨机直径之间的关系。

两种矿石曾用实验室用的和工业用的不同规格的磨机磨矿。这些结果画成可磨性与磨矿直径关系的曲线图，它表明，可磨性随着直径增大而降低（图 5）。用磨机总功耗计算产生某一磨矿产品的可磨性，以公斤/千瓦·小时表示。

另一种矿石用两台不同直径的瀑落式磨机磨矿，表明也存在相应的关系。

认为磨矿机直径与可磨性比较出现偏差的原因是在所加的滚动负荷的形状和磨机周边速度上。我们假设全部滚动负荷有个中心区，这个区对磨矿很小影响或者不重要。这个

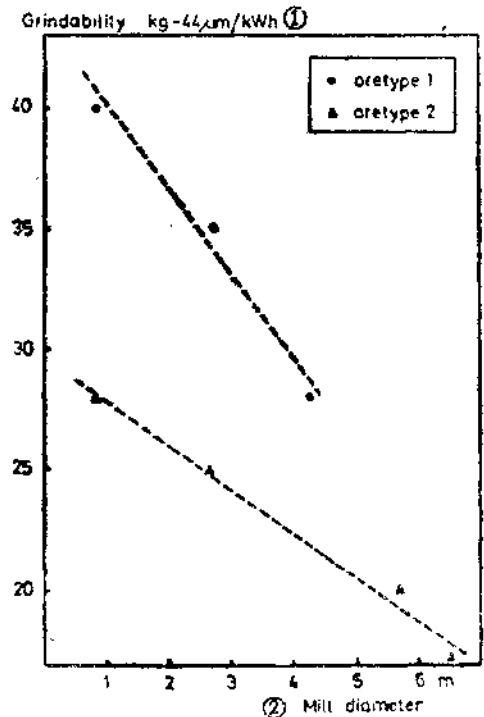


图 5 可磨性与磨机直径的关系
1—可磨性，44微米公斤/千瓦·小时； 2—磨机直径，米；
●—第一种矿石； ▲—第二种矿石