

黄金科技丛书

南非黄金冶金学

R·J·阿达姆逊主编

内 容 简 介

本书根据南非矿业协会冶金顾问R.J. Adamson主编,并由该会于1973年组织出版的《Gold Metallurgy in South Africa》一书翻译的。

书中介绍了金矿石的磨碎、富集、提取以及尾矿的处理技术;对冶炼工艺的发展和现代化的改造实施,也作了有代表性的描述;最后对冶炼过程的控制和矿石分析进行了比较详细的探讨。

本书可供黄金生产、科研和设计方面的工程技术人员使用,也可作为高等和中等冶金专业教师 and 学生的教学参考书。

书内附表61个,插图171幅,参考书目74篇,参考文献18则。

黄金科技丛书

南非黄金冶金学

R.J.阿达姆逊主编

※ ※ ※

冶金工业部长黄金研究所

序 言

正值金融发展及自由市场金价猛涨，而使南非采金工业生机勃勃之际，欣逢《南非黄金冶金学》一书出版。

南非的黄金工业是举世闻名的。到1973年初，金的累积产量将达到10亿盎司。这笔巨大财富的赢得，主要是靠高超的技术与通力协作的结合。这些，本书均做了较完善的反映。我们这本教科书是为大专学生 and 研究人员编写的。本书为他们提供了金冶金进展的基调，但是他们还必须一如既往，勤奋不懈地做新的探索。

本书取代了由A·金(King)先生改编并编辑的，于1949年出版的《威特沃特斯兰(Witwatersrand)的金冶金学》。从那时以来，采金工作的活动中心已向较新的金矿区转移，新的大型金矿业已开发，并且继续不断地探求改进金的回收方法。一座最重要的炼金中心一位于哲米斯顿(Germiston)的兰德精炼厂已完全现代化了，并拥有当今世界最精良的炼金设备。

很明显，本书编入这些新的成就是极其需要的。但是需要并不能保证本书的高水平，其高水平是由于本书编者R·J阿达姆逊先生具有高的才能。该书作者前不久曾是英美公司的顾问冶金学家，他现在又在矿业协会任冶金顾问，在筹备本书中曾得到了协会的冶金出版委员会的大力协助。

为黄金矿业技术出版界增加这本有价值的书，我高兴地向阿达姆逊及他的同事们，致以南非矿业协会的衷心祝贺与真诚谢意。

南非矿业协会会长(1972—1973) R·C·J古迪

(Goode)

1972年11月于约翰内斯堡

前 言

金是一种极为贵重的金属，已发现地球上许多区域分布着不同的储量。金用于装饰和充做货币同样地受到珍爱，已为人们所探求和重视。因此，人们多方面地思考和广泛地探究如何从天然金矿石回收金的方法。特别在南非就是这种情形，在这里许多金矿区构成了无与伦比的，迄今发现最为广阔的矿省。当威特沃特斯兰金矿最初开发时，采用了与别处相同的既定的金的回收方法，并使之与当地条件相适应。随后利用有效的专门工艺设计，来保证品位较低的含金砾岩得到金的最大的提取率。

金的最初发现，是以自然金块或在矿脉岩层中找到，并用手选回收的。其后，伴随冲积矿床的发现，因为金常以细粒形式存在，所以，逐渐采用重选法富集之。如果是砾岩矿床，尚需以某种磨碎方式来分离其中所含的金粒，然后才能利用溜槽，淘金盘之类设备进行选矿富集。当时，发现了操作简易的混汞法，它既可取代重力选矿，也可作为重力富集的辅助作业。最后，从氰化液溶解，又以锌粉沉淀金的方法的出现，成为金回收的有效的湿法冶金工艺，重力富集，混汞和氰化，构成了南非金矿石提取金的最满意，最经济的方法。在本世纪之前，这三种方法都已用于生产，此后，仅是改进适于这些方法的机械，而本书的编写目的，则是主要地介绍这些近期的技术成就。

南非金的回收方法第一次记述于1912年出版的、以后又于1926年经H·A·怀特 (Whitte)修订再版的《兰德冶金实践》课本中。生产中使用的三种基本方法的不断发展，导致了于1949年由A·金编辑的《关于兰德的金冶炼》一书的出版。由于金矿石处理技术的进一步提高，推动了新矿山的开发。1951年开始开发奥兰治自由邦 (Orange Free State) 金矿区，1952年开发了克萊克斯多普 (Klarksdorp) 金矿，1958年又建立了伊凡达

(Evander) 金矿山, 结果, 使得A·金编辑出版的一书中所记述的选金方法, 已不再能反映当代的技术实践, 因而出版一本关于南非冶金学的修订课本, 已成为势在必行。

本书在内容安排上, 及时地记述了东德兰士瓦 (Transvaal) 所采取的, 用以处理难溶金矿石的浮选法和焙烧法。这些方法一般比南非主要金矿区所用的方法更为复杂。上述难溶矿石的处理方法, 虽然在本国仅小范围内应用, 但要比东德兰士瓦和奥兰自由邦的威特沃特斯兰系主矿体所用的比较传统方法, 有更大的冶金利益, 因而介绍这些方法, 有可能对除南非之外的其他地方是有意义的。

随着1971年兰德冶炼厂改造计划的完成, 已有可能对其最近的各个工艺给以全面地介绍。这些工艺不仅是金的最现代化提炼技术的代表, 而且他们的规模大和效率高, 为处理和提炼大量贵金属, 提供了精确冶金作业的典型实例。

因为没有关于南非金矿石矿物学的专著, 也考虑了需要较多地介绍有关这方面的资料。所以, 本书全面而又概括地提供了威特沃特斯兰系和巴伯顿 (Barberton) 山地的矿物学特征。

在本书编撰期间, 南非共和国采用了公制, 已把英制度量改成根据国际单位制建立的公制单位。因此, 在本书中的尺寸和重量使用了国际制系统单位。按照新术语, 基本的冶金质量单位为公吨 (1公吨等于1000公斤), 而当地惯用英吨。“比重”没有用“相对密度”来代替, 因为后者尚未被国际制系统采用, 所以两种表示法都在使用。对于确定公制前的单位换算, 英制长度单位尽可能地换算成相应的公制数值, 并准确到两位小数, 必要时, 将英制, 量度与其相当的公制量度列表附于有关的章节。

致 谢

对于国家冶金研究所所长R·E·罗宾逊 (Robinson) 博士的合作致以深切的谢意, 向研究所W·R·莱宾贝格 (Liebenberg)

博士与N·R芬克尔斯亭 (Finkerstein) 博士致以深切的谢意。他们分别编著了第十一章南非金矿石的矿物学和第十章提金工艺的化学。同样,感谢国家冶金研究所G·W·弗莱特彻 (Fletcher) 先生和南非试金与分析者协会E·A·D·路必及 (Rubidge) 先生,他们为本书提供了关于过程控制与金分析的资料,这对出版委员会编辑本书是很有价值的。出版委员会对于编写兰德冶炼厂作业一章的总经理W·W巴斯先生及其机构的全体同事表示感谢,并对冶炼厂厂长S·埃弗雷德 (Evered) 博士对本书的编辑致以谢意。

出版委员会还对矿业协会和各个采矿集团的许多公务人员,为本书的编印所给予的多方协助,一并致以感激之忱。

R·J·阿达姆逊

目 录

序言	I
前言	I

第一篇

第一章	手选与破碎	1
第二章	磨矿与分级	21
第三章	选矿方法	54
第四章	氰化法	84
第五章	沉淀与冶炼	112
第六章	脉石与尾矿	140
第七章	金分析	162

第二篇

第八章	兰德精炼厂	186
-----	-------	-----

第三篇

第九章	过程控制	237
第十章	金矿石提金化学	262

第四篇

第十一章	南非金矿石的矿物学特征	324
------	-------------	-----

第一篇

第一章 手选与破碎

在南非矿石中，金无论赋存于何种状态，总是与其围岩紧密连系着，所以无论用重选法、混汞法、氰化法或浮选法回收金，其前提都需把矿石进行粉碎，使金粒从所包裹的脉石中解离出来。对所要求的粉碎粒度，一般是通过破碎和磨矿两个阶段来完成。

破碎是用不同类型的破碎机——颚式破碎机，旋回破碎机和圆盘破碎机来实现的。作为磨矿的准备阶段，破碎的程度关系到下一阶段的磨矿方式。相应的磨矿方式有球磨，棒磨和自磨等三种。在自磨中，磨矿介质是由含金矿石的砾石来承担的。

与破碎工艺相伴随的，是矿石的筛分或矿石的分粒，以确保破碎的高效率。而全部或部分矿石的洗矿，可以达到有利于手选，破碎和筛分的三重目的。

1892年采用手选废石。但直到现在，矿石还是在地下用炸药进行爆破，在很多情况下，由于脉石造成的大量贫化，所以南非大部分金矿山仍然采用手选废石。1967年开始试验研究岩石切割机，可能免去从采矿后的矿石中手选废石（或拣选矿石）来提高品位，但是需要等到岩石切割机的试验成功。在矿石和废石分离的意义上，手选和拣选这两个名词的含意是一样的。习惯上说，手选废石也称做手选脉石；拣选矿石也称做拣选含金矿石。

当手选或拣选时，岩块必须洗去堆着的砂泥，使矿石和废石显露清楚。由于采矿采用水力除尘设备，全部运到地表的岩矿都复盖泥浆，使矿石与脉石难于辨认，为此必须用水喷洗直到分清

为止。洗矿的另一好处是对洁净的矿石进行破碎和筛分效率高，同时对破碎机的另件和筛网的磨损也小。

在一些实例中，原矿提升到地表前，要在采区进行二次破碎。在地下采场爆破一般的窄矿脉产生的矿块，把它装入矿斗并卸于运输带上，通常并无困难。然而，作为预防措施，一般要在采区使矿石通过间隙为0.3米的棒条格筛，并对筛上偶然出现的大块矿石用大锤加以击碎。

一、矿石的储存和运输

为了顺利处理南非金矿山大量开采的矿石，其重要的特点是在破碎和磨矿工段的一些适当地点，提供适当的缓冲能力。在地表的提升竖井和破碎工段之间，首先要保证适宜的大容量的储存，为此在竖井上端设置矿石接受仓或堆放场。用9~13.5吨容量的矿斗供给矿石，然后用运输带把矿石运至矿仓、筒仓或堆放场。矿仓一般为钢木结构，能容200~1000吨矿石。筒仓是钢筋混凝土结构，每个可储1000~4000吨矿石。堆放场的有效容量为1500~15000吨。虽然堆放场的投资费远比矿仓或筒仓低，但是堆放场有两大缺点：一是堆存矿石时，会发生明显的偏析；二是直接可利用的容量低，即有效容量仅为总堆量的一半。

受矿仓是接收从竖井运来的矿石而不是容纳从破碎车间运来的矿石。受矿仓为钢和混凝土结构，它部分或全部设于地表面下，这样，矿石能用底卸式铁路货车或轮胎式翻斗卡车将矿石卸入受矿仓。卸下的矿石，以后运至主储仓或直接运到破碎工段。

用合成纤维复以橡胶的运输带，把矿石从储矿仓运送到破碎工段，其运输速度为每分钟75~90米，运输能力为每小时100~500吨。倾斜运输机可与水平面成 18° 角，但所运输的矿石应为中等粒度且无泥浆。另有一些实例，当倾斜运输机与水平面成 15° 角时，即使运输园砾石或泥浆也不会倒流，证明结果满意。

用于将矿石从储矿仓转运的给矿机有多种类型，如犁式，链

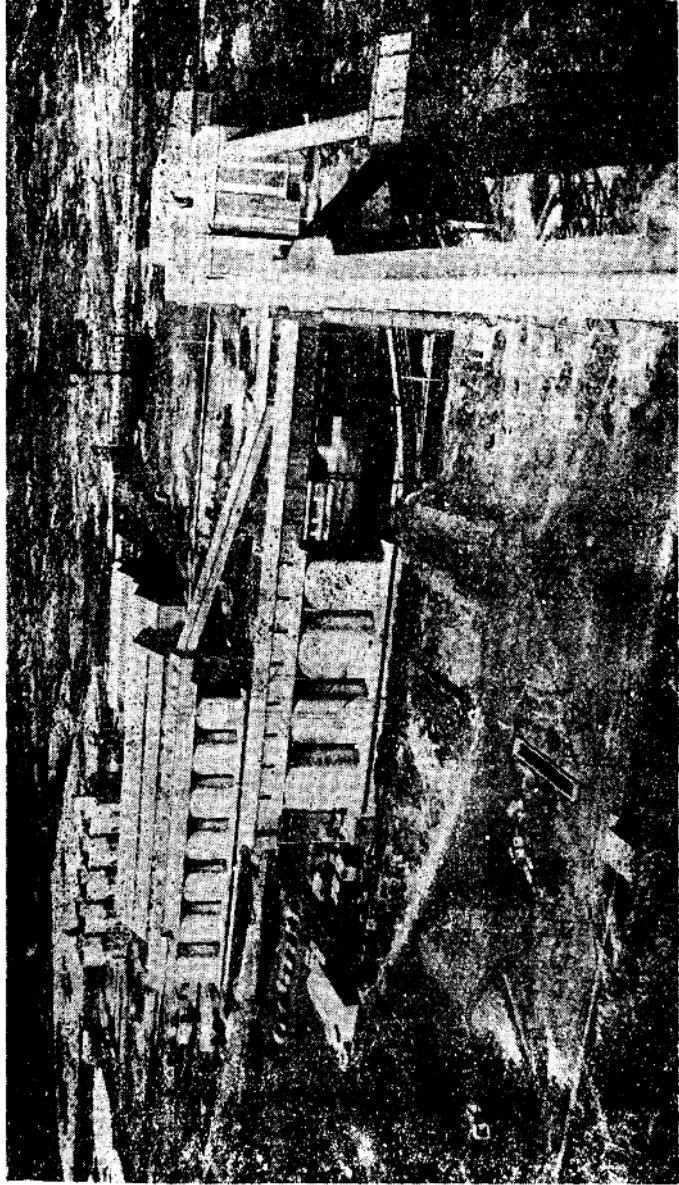


图1-1 破碎车间，右边为破碎工段前有四个储矿筒仓后有七个粉矿筒仓

式、摇动式和振动式，用途各异，但都得到广泛使用。图 1—2 为浪格拉格特 (Langlaagte) 斜槽和 B.I. 型式给矿机，它特别适合于从储矿仓给出矿石，并有合理的稳定的速度，只需偶而的调正。

振动给矿机与料秤连接，因而给矿速度能迅速地准确调节，使操作满意。然而，当不连接料秤控制时，无论矿石粒度或所含水分有变化，振动给矿机的给矿量总是明显地不稳定。摇动给矿机的给矿速度虽很稳定，但有磨损大及调正处理缓慢的缺点。型式给矿机特别适于排放粗粒矿石；而链式给矿机对控制已除去细粒的粗粒矿石的稳定供矿特别好，同时它对处理原矿也有效。

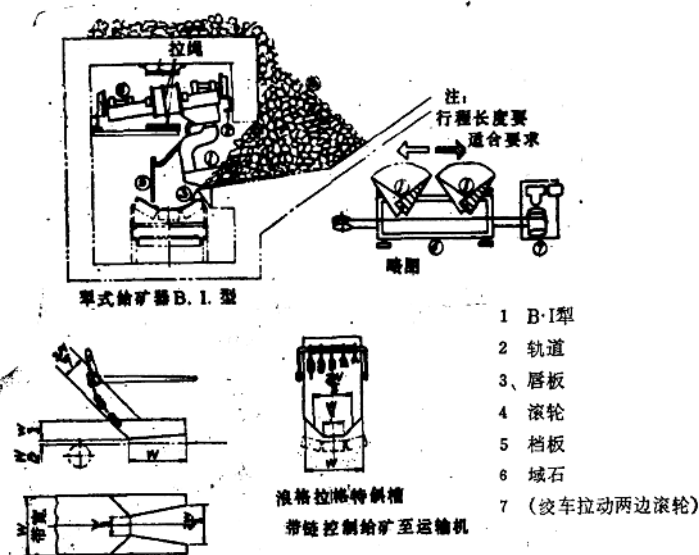


图 1—2 B.I. 给矿机和浪格拉格特斜槽

在自磨矿中（以大块矿石，组成粗磨矿的磨矿介质），通常用条筛、有些实例是用重型振动筛，分离出最粗的矿石（一般

为 +100毫米) 作为磨矿介质。当以条筛或振动筛处理粒度大于 0.3米 (系井下条筛间距) 且每小时500吨以上的原矿时, 这两种筛子的结构都必须坚固。

条筛可由固定棒条或可动棒条构成, 棒条可平行排列或幅散型排列, 或用波形双辊。

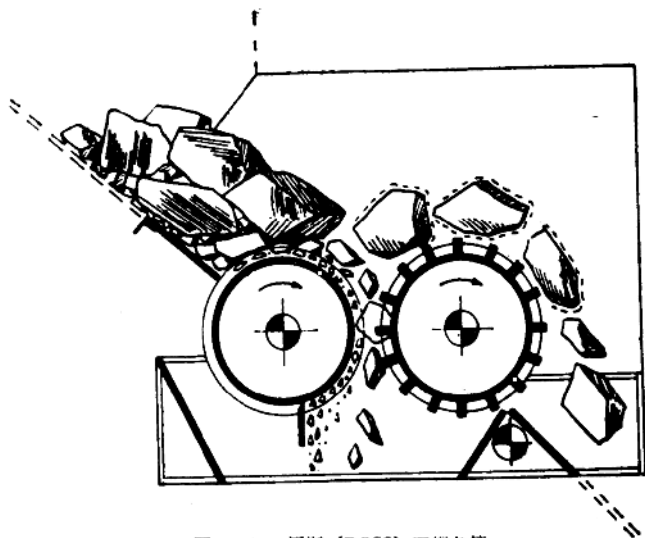


图 1—3 罗斯 (ROSS) 双辊条筛

二、初 碎

进行自磨时, 一般在矿石手选前不宜破碎目的是保证合适的磨矿介质, 即粗块矿石的充分供应, 其粒度通常为 +100 毫米。然而, 如果粗磨设备是球磨机或棒磨机, 则手选前要进行初碎。将原矿通过筛孔约 0.15 米的条筛, 筛上产物经斜槽自流进入颚式破碎机。颚式破碎机的排矿口相应也为 0.15 米。破碎后的产物与条筛筛下产物一起运送到洗矿车间。这种工艺的优点是矿石进入手选和破碎工段之前, 先破碎大块矿石, 从而消除斜槽或给矿机

产生阻塞的危险。另外，给矿经过分粒。对主要的破碎机，能改善其破碎效率。然而如果大块矿石多为废石时，则每个手选工的产量将会减少。颚式破碎机的主要用途是确保矿石抵达手选和破碎工段之前，消除坑下失于控制的粒度，从而避免在斜槽，矿仓和破碎机中发生“悬料”。

三、洗矿和分粒

矿石进入破碎工段之后，借条筛和振动筛分成几个粒级。通常原矿进入的缝隙为0.1米平行棒条筛，或进入棒条缝隙由0.09米扩张到0.12米的条筛。由于矿石通过条筛的过程很快，所以通常在矿石转载到运输带处（运输带负有矿石，慢慢移动通过手选车间），用水冲洗+0.1米的矿石。或不用条筛，而仅在振动筛上进行洗矿。如果用条筛，其筛下自流到一组振动筛（振动筛可为单层或为双层筛网）。把矿石分成四个粒级，就是-100+50毫米，-50+10毫米，-10+3毫米及-3毫米，同时在筛网上，用高压水喷淋装置冲洗矿石。

用与+100毫米*粗粒矿石带式输送机相平行的低速带式输送机，输送-100+50毫米粒级矿石至手选区，然后再运至主破碎工段。因将-50+10毫米粒级矿石用手选除去废石不经济，所以另用带式输送机直接将其送至主破碎工段。至于-10+3毫米粒级矿石，因颗粒细小不宜手选或破碎，所以将它转到主输送机，由主输送机同已破碎了的矿石供给磨矿车间，最后，-3毫米矿粒因呈矿浆状态，用泵汲送或自流至适宜的分级设备中（如机械分级机或水力旋流器），分离成粗砂和矿泥。粗砂需磨细，所以将它与破碎过的主矿流混合一起，再送至磨矿车间。矿泥部分自流至浓缩机，或用泵直接送至处理车间提取金。如需浓缩机回收水，则其溢流可再用于洗矿。为此，必要时对溢流除加石灰

* 原文误为100米 译注

外，还可利用一些絮凝剂来改善水质的澄清晰度。

为保证运输皮带返回的空段表面干净，不粘附粗砂和矿泥，正常做法是当矿石离开主动皮带轮后，立即对一切运输带进行洗涤。洗涤是在主动皮带轮和缓冲轮之间，用喷水装置进行的，接着用刷子或橡胶擦子进行擦刷。洗下的砂泥自流或用泵送至处理-3毫米矿石的分级回路。在某些实例中，有关的主动皮带轮远离分级回路，这时则在主动轮附近安装小型螺旋分级机接受所洗的砂泥。螺旋分级机的粗砂再与那皮带运输机的卸矿相结合，而螺旋分级机的溢流，自流或用泵汲送至-3毫米矿石的分级回路中。

四 手 选

如前所述，南非大多数金矿在磨矿之前以尽量除去废石来提高矿石品位。在很多类型的矿脉开采中，手选没有困难，雇用班图工人*，其训练和监督都很容易，并且他们易于完成手选操作。斑点状含金矿石与伴生废石易于区分废石主要是白石英，灰石英岩，黑页岩或绿页岩。然而某些矿石，其含金矿石与废石的区别不清晰，在这种情况下，手选工人需要十分小心，从而使班图工时的手选速度大大降低。对新训练的手选工人，要求他们将所挑出的脉石放进特定的容器中，选分监督员计时并监督，以确定每个工人的手选效率。全部脉石的精确度可由有熟练技巧的手选工对拣出的脉石再次进行手选核对，核对后再丢到废石场中。在氧化铀和金矿石伴生的地方核对挑选含金矿石时，可借助闪烁计数器测定其放射性。用触发音响信号装置，在脉石送往废石场的途中进行监视，有规律和充分地采样并分析其含金量，可使手选效率得到更进一步的，比较定量的鉴定。这些样品最好用自动取样机采取。每个手选班最少采10吨样品。装置适当的破碎，筛分

* 一班图工人，指南非统治者对当地民族工人的诬称。

和缩分设备，把每个-10毫米的样品缩到大约2公斤，以备做正副两个分析样品。图1—4是其典型的设计图。

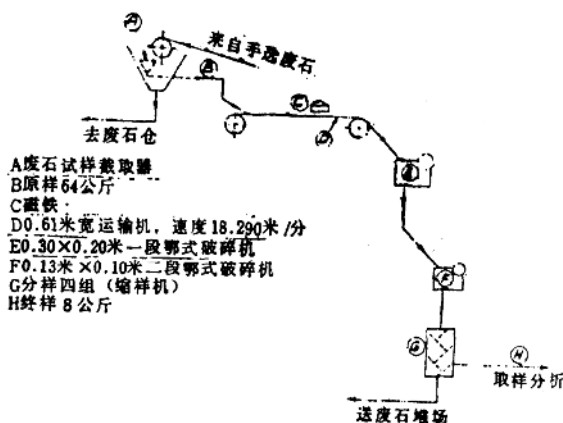


图1—4 废石取样系统图

有效的手选当然要依靠提供适当的设备（水平移动的带式运输机），其速度每分钟不超过20米，带宽不大于1.25米。带面应稍凹，带面的负荷应是一层矿石。沿运输机的手选部分，要安装偏心托辊或垂直振动器，可使运输带上的矿石自动翻转，并使原来在大块矿石下的扁平废石得以显露。彻底的洗矿和充分的照明，对于有效的手选是重要的。专用照明，例如水银灯或钠蒸汽灯业已被尝试，但最满意的是用冷阴极荧光灯。荧光灯要适当遮盖，并悬挂在视线平面以下，如此可消除强光和阴影。在一些特别中，在运输机的橡胶带上涂以水红色，黄色或绿色，以利废石与矿石的区分。

各手选工人选出的岩石量的差别很大，主要是和被手选的块矿量有关系。手选工人成行地配置在大块矿石运输带旁，运输带运输的矿石经过洗矿（易于与废石区分），每行第一个工人因为容易辨认废石，为此在每班八小时工作中能选出20吨以上，但最

后一个工人在输送100~50毫米矿石的运输带旁，每班选出的不会多于2吨。手选粒度下限问题，一般应比较，承担除去细粒废石的费用，与允许细粒废石经过磨矿和一些处理过程的费用，何者更为经济来决定的。初看起来，决定矿块的问题，是要把多大粒度手选和堆置每吨的费用，与破碎、磨矿、浓缩、浸出、过滤和滤渣处理的每吨费用相比较。然而其它一些因素也必须加以考虑。手选废石的含金量便是一个重要的需要考虑的问题。正常操作条件下，手选效率为98~99%，损失的是由于偶然产生的零星含金碎矿。其原因：或与含金矿石相接触的废石被误挑出，或含金矿石偶然地被撞，落入废石部分。这样每月一次的取样中，导致手选废石含金量每吨可达0.30克或甚至为0.40克。在含量如此低的范围内，虽不能提取其全部金，但可用氰化法回收每吨0.4克金的75%，或者每吨0.3克金的60%。所以，如果这样的含金品位在一个月中相当一致时，则可考虑免去废石的手选，或全部免去或免去较细粒的废石手选，从而增加一点金产量，并在某种程度上尚可减少地面劳动力，然而，这种工艺要看磨矿和选分处理工段是否有处理附加矿量的多余能力而定。这种情况常发生于一个矿山投产的头一年，以及必然发生于一个矿山生产年限的最后几年。然而满负荷生产期间，是否有额外投资用于装备附加磨矿和氰化厂来处理废石也是很可疑的。显而易见，需要对实行选分废石的有关因素进行可行性研究，它包括：矿山产出的废石及矿石的数量及品位，工作效率和手选劳动费用，每个工人的手选废石量，手选废石含金量、磨矿能力、作业成本、废石出售的可能性和金价。尽管如此，在工厂原设计中应提出洗矿和手选措施，以便确定这些因素中的某些因素，同时也为矿山管理，提供坑下回采和废石充填效率的真实数据，这些都是很重要的。洗矿和手选的好处，还有它能事先除去废料，如木楔块、碎木板、铁丝、废金属以及破钻杆等，以免在筛分，破碎和分级工段造成破坏或事故。对所有的磁性钢铁碎料，一般的做法是用安装适当的磁铁来除掉，通常不手选杂铁。

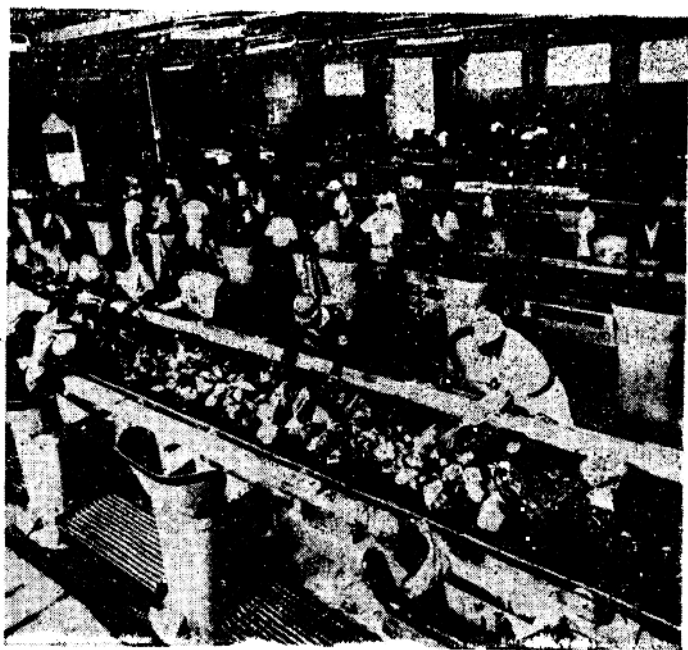


图1—5 手选废石

在很多实例中，需要考虑氧化铀的生产。这是因为某些类型的废石含有铀，所以不能把它挑出；相反在铀厂中另外一些类型的废石对药剂消耗，过滤速度有着有害影响，所以在这些情况下，极宜强化手选。手选废石的百分比，因不同的金矿山而有很大差别，其范围为4~40%。这取决于一些因素的变化，如脉幅和采幅的比率，爆破产生的破碎作用，坑下废石充填范围，所雇用的班图手选工人的工作效率以及上述可行性研究成果等。所有矿山手选废石的百分比的平均数约为15%等。

五、废石处理

在许多装置中，一种是将手选废石通过斜溜槽（位于手选工