

金银矿石及废弃矿石 堆浸实践

美国采矿工程师协会1983年秋季会议

译文专集

核工业部第六研究所
“铀矿开采”编辑部

编印

目 录

美国金银堆浸矿山概况	J . B . 希斯基	(1)
阿利加特里奇矿的堆浸实践	T . J . 德穆尔等	(8)
裴加苏斯黄金有限公司在蒙大拿州佐特曼地区的金银生产	E . C . 罗珀	(17)
阿纳康达达尔文银回收工程中的造粒堆浸	D . A . 米利根等	(22)
内华达州汉博尔特县平森矿山的堆浸扩大试验	M . E . 史密斯	(34)
葛底矿山公司梅库尔矿山的堆浸方法	K . Y . 柯海等	(40)
粘土堆浸垫层的建造与研究	D . 范泽尔	(46)
堆浸操作中溶液管理的作用	W . J . 斯利特	(54)
从堆浸溶液中回收贵金属的工程设计	R . M . 南迪克	(66)
从氰化物浸出溶液中回收金的各种工艺流程的工艺比较	B . 迈克尔·穆伊曼等	(72)
锌沉淀参数的实验统计优化法	O . A . 穆塔迪	(87)
金氰化物浸取液中汞的去除	W . L . 斯塔克等	(96)
活性炭吸附金的最大吸附量及杂质离子对吸附速率的影响	W . R . 贝姆等	(104)
专家组讨论堆浸作业的水化学		(114)

美国金银堆浸矿山概况

J·B·希斯基

最近几年中，堆浸已发展成为金银加工的重要手段。目前，美国生产金的主要矿山，堆浸约占25%，而生产银的矿山堆浸占10%。本文回顾了美国金银堆浸实践并调查了一些主要矿山。

一、前言

七十年代，堆浸已被确立为处理氧化金银矿石的有效方法。这一加工技术是从小的浅成矿床提取贵金属的简便方法，但尤其适用于处理储量大、品位低的浸染矿床。与常规的加工方法相比，堆浸的基建投资与操作成本，通常较低，工程投产快，而且使用浸取法的矿山对环境更安全。但这些优点有时被堆浸金属回收率低所抵消。

首次用氰化物堆浸回收金银已难查其人。然而，第一次工业规模的成功堆浸是由卡林（Carlin）黄金开采公司在内华达州北部进行的边界品位矿物的堆浸。美国矿务局在发展堆浸技术方面的早期贡献为美国矿产工业发展堆浸技术提供了动力⁽¹⁻⁴⁾。金银的持续高价使人们保持了对堆浸技术的兴趣。

由于上述原因，堆浸技术不断取得新的进展和较大的进步。近年来，在诸如矿石制备（造粒）、堆的设计和结构、布液以及金属回收方面已出现了许多革新。

本论文集有专文⁽⁵⁾讨论这些革新如何改善堆浸性能和效率。随后还有文章⁽⁶⁾叙述了堆浸方面的某些开创性工作，即对低品位“矿”的限制重新作了定义。这方面大规模的堆浸作业正在处理含金仅为0.79克/吨的矿石。

堆浸除了可浸取开采的矿石以外，业已证明还可作为处理造粒浮选尾矿的有效途径⁽⁷⁾，而且还建议用堆浸处理来自SAG选矿厂磨矿系统的粗粒弃废物⁽⁸⁾。

二、操作描述

按照波特（Potter）和索尔兹伯里（Salisbury）的观点⁽⁹⁾，用作堆浸的金矿石应当是多孔，相对地无消除氰化物物质及含微细纯金粒的。同样的考虑，对于银矿的成功堆浸也是重要的。为了维持溶浸液有足够的渗透性以及矿物表面与浸取液良好地接触，矿石的粘土含量应当足够低。卡普斯（Kappes）讨论了哥斯达黎加在过分结块条件下的高粘土金矿的堆浸⁽¹⁰⁾。

由于各贵金属矿体在地质、矿物学以及冶金学方面变化很大，要概括流程的设计是困难的。然而，如同其它溶浸采矿方法一样，堆浸对诸如地形与空间、气候条件、结构材料（如衬底材料粘土）的可靠性，环境限制，水等地理因素更敏感。由于堆浸本身的简单和灵活性，因此理当能解决这些设计问题的。

1、浸出

用于工业规模的堆浸方法有两个不同的方案。一是以原矿浸出。这种浸出方法通常浸出周期较长。另一方案是基于破碎矿石的浸出，而这种浸出周期较短。对高品位矿料来说通常认为增加破碎成本是合算的，这时能提供矿物与浸出液良好的接触而达到金和银的最高回收率。低品位矿石通常就以采出的原矿石粒径处理。佐特曼-兰杜斯基(Zortman-Landusry)矿业公司在蒙大拿中部的小落矶山脉地区进行的堆浸作业就是一个很好的例子^[6]。

用破碎矿石堆浸的矿山，一般将矿石破碎到-19.1毫米，甚至可能小至6.35毫米。这种工厂的浸出周期从几个星期到几个月。不含过量粘土的多数矿石，粒度小至约10毫米。然而，如果堆浸的原料小于这一粒度或含有较高比例粘土的矿石，可采用对细颗粒起稳定作用的造粒技术处理。除了达到最大的渗透速率以外，将浸取剂与细料进行造粒，可使浓的浸取溶液与矿石密切接触。这常能获得快的浸出速率以及较高的金银回收率。

未经破碎的原矿石的浸出周期，一般以几个月或几年计。上述矿石粒度是由爆破或挖掘生产的。这种堆的矿石粒度达到-152毫米，且可以含些大的砾石是合理的。标准的造粒技术并非是稳定粗矿中细矿的有效方法。处理采出原矿与破碎矿的堆浸的基本特点比较于表1。

表1 金堆浸基本特点的比较

特 点	采 出 矿 石	破 碎 矿 石
粒 度	-150毫米	-20~-10毫米
品 位	低 到 中 等 1~1.7克/吨	中 等 1.7~3.4克/吨
造 粒	无 效	如 果 必 要
浸 出 周 期	几 月 ~ 几 年	几 天 至 几 月
金 回 收 率	50~70%	60~90%

将矿石运到经过特殊处理无渗漏并能排水的垫层上。堆浸场的衬底主要有两个重要目的：
(1) 收集和避免浸出液流失；(2) 保护环境。常用来构筑衬底的几类材料包括天然的和人造的材料（如合成膜和纤维）两种。仅使用一次的垫板则最好用沥青或钢筋混凝土构筑。无论哪种情况，构筑垫板都必须认真地准备基底。在垫板上铺设钻孔管子以收集富的浸出液，这些管线用保护性粗砾石层覆盖。

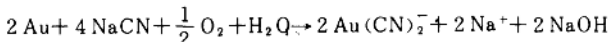
往浸出垫板上堆矿的技术有若干种。钱伯林 (Chamberlin)^[11] 讨论了一些有关最大渗透性及浸取效率的建堆方法。实际的建堆方法常取决于使用的堆的高度，而堆的高度又反过来影响浸出周期的长短与底部衬底面积的有效性。

布液对每一个堆浸作业来说都是一个重要问题。可采用不同的方法将溶浸液加到堆的表面，包括从塑料管喷雾、喷淋以及泡浸法。最常用的布液系统是脉冲喷淋器（雨滴型）或摆动型喷头。加溶液的速度是一个至关重要的参数。就一些典型的堆浸矿山而言，浸取液最大的有效施加速度为4厘米/小时（1加仑/平方呎·小时）^[12]。速度更高会限制氧在矿石中的移动，冲稀浸出液的浓度并增加泵送费用。堆浸溶液的施加速度通常在0.8~1.2厘米/小时（0.2~0.3加仑/平方呎·小时）的范围。

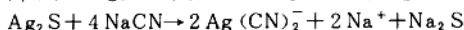
金堆浸溶解化学的详细分析必须包括有关矿石的地质和矿物关系的资料。为了简单起见，只考虑热液矿床地球化学作用得到的均匀氧化矿。金银主要出现在沿裂隙表面。破碎可

直接暴露金银，使之容易与溶剂接触。在这些表面上，被溶解了的有价值的金属，通过简单的表面冲洗回收，溶浸液将通过毛细作用穿透颗粒裂隙，在这个范围必然出现长距离的扩散。

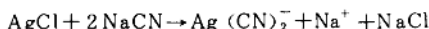
对金银浸出，有效的浸取剂是碱性氰化物溶液。如下反应式所示，氧（好的充气）也是反应所需要的。



描述自然银的溶解可以写出类似的反应式。银往往是以多种矿物形式，而不是以自然银的形式存在。辉银矿 (Ag_2S) 和角银矿 (AgCl) 的溶解按下面的反应进行：



以及



从反应式可以看出，这些矿物的溶解不需要氧化条件，直接氰化是非常便利的。

2、金和银的回收

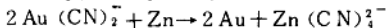
工业上以碱性氰化物堆浸溶液中回收金和银主要有两种方法，即锌粉沉淀（梅里尔-克劳）法和活性炭吸附法。除上述常规的回收方法（锌沉淀与炭吸附）外还出现了一些有希望的技术（树脂吸附，直接电解和溶剂浸取）⁽¹³⁾。

炭吸附和锌沉淀之间的选择取决于下面几个因素：

- 溶液浓度；
- 溶液体积；
- 溶液的澄清度。

正如波特⁽¹⁴⁾归纳的那样，体积非常大的、主要含金浓度低的溶液，可以用炭吸附法经济地处理。而对于体积小，浓度高，或溶液含大量银的溶液应当用锌沉淀法处理。进入炭吸附系统的溶液不一定要澄清，而对锌沉淀法来说，溶液澄清对得到最佳效率是至关重要的。

梅里尔-克劳锌粉沉淀法是一非常成熟并为人们熟知的技术。这个方法包括溶液澄清、脱气、贵金属沉淀以及沉淀物过滤。金置换沉淀到金属锌表面用下式表示：



在梅里尔-克劳流程的操作中，锌的消耗量是一个重要考虑因素。根据上反应式，按化学计算的理论耗锌量，相当于0.17克锌/克金沉淀。实际的耗锌量随溶液的化学性质而异。对于稀的堆浸溶液而言，其变化范围在10~30克锌/克金之间，过量的锌消耗于杂质和溶解氧。

锌沉淀法对于银矿石是优先考虑的工艺，这是因为银的浓度高以及炭吸附银的特性差。液量少时锌沉淀法也是理想的方法，这时可用标准的梅里尔-克劳装置处理。

连续多段炭吸附流程是从堆浸溶液中回收金银的有效而且便宜的方法。在典型的作业中，浸出富液用泵逆流地送入串联的5个或更多的活性炭柱。溶液上流速度为36—60米/小时（每分钟15—25加仑/英尺²），炭粒度为16×30目可得到合适的炭床流化。这种粒级时炭的吸附动力学不限制操作。炭以必要的速度经过吸附系统吸附容量可达到3430~6860克/吨。过高的吸附容量常导致金损失于贫液。

饱和炭从吸附体系第一级进行淋洗。淋洗方法在本文集第10章作了概括⁽¹⁵⁾。常用的淋洗

方法有以下几种:

- 加温、常压氢氧化钠、氰化钠;
- 加压氢氧化钠、氰化钠;
- 酒精淋洗。

淋洗富液通常用电解法使金银沉集到钢毛阴极,回收金银锭(dore)。在大多数回收作业中,为了除去表面污染物并恢复炭的内在化学活性,一般将炭进行再生。再生涉及到一系列化学和热处理:酸洗以除去象碳酸钙之类的表面沉积物,焙烧(750°C 间接加热)活化表面基因。然后炭经过筛除去过细的粉末后返回吸附流程。

矿山调查

对美国西部较重要的堆浸矿山作了调查。这些矿山的地理位置如图1中的黑体符号所示。该图中还标出了本文会谈到的其它厂的位置(达尔文、梅库尔),但未作特别的调查。有关各堆浸矿山的资料和数据是通过人员接触以及有关文献得到的。这些资料归纳于表2。

坎德来利亚(Candelaria)无疑是最大的银堆浸生产地,每年产银81000公斤。阿利加特里奇矿(Alligator Ridge)与佐特曼-兰杜斯基(Zortman-Landusky)矿是最大的黄金堆浸生产地,每年各生产黄金约2200公斤。在佐特曼-兰杜斯基矿,银是重要的副产品,大约相当于3900公斤/年。



- 1、佐特曼-兰杜斯基,
- 2、塔斯卡罗拉, 3、平松,
- 4、马格尔, 5、博茨特拉,
- 6、金阿克里, 7、阿利加特里奇,
- 8、北于布南, 9、温德福尔,
- 10、博里利斯, 11、烟谷,
- 12、坎德来利亚, 13、奥提兹,
- 14、通布斯顿、耶里特坎场

图1 美国西部的主要堆浸矿山

由表2的数据可以估计,通常这些矿山每年生产金10640公斤,银94806公斤。根据这些

表2 堆浸厂操作参数

矿 山	开采速度 (公吨/ 年)	矿石品位(克/公吨)		浸出液 流速 (升/分)	分析结果(毫克/升)		产量(公斤/年)		回收技术
		金	银		金	银	金	银	
加利加特里奇	680,000	4.11	N/A	3,785	1.0	—	2,177	—	炭吸附/电解
博次特拉	200,000	1.51	N/A	950	1.0~3.7	—	187	—	炭吸附/电介
博里利斯	500,000	3.09	17.0	1,500	1.0	—	933	—	锌沉淀
塔德拉利亚	180,000	少量	108	9,085	—	26	—	81,000	锌沉淀
金阿克里	900,000	1.23	N/A	2,082	0.86	—	622	—	炭吸附/电解
马格拉克里克	450,000	1.0~2.1	N/A	1,136	0.68	—	—	—	炭吸附/电解
北于布兰	800,000	2.74	13.7	1,893	1.0	1.4	1,244	2,177	炭吸附/电解
奥提兹	630,000	1.82	少量	3,217	1.0	—	1,089	—	炭吸附/电解
平松(见另文)									
烟 谷	1,800,000	2.06	2.40	6,056	0.86	0.43	1,866	933	炭吸附/电解
通布斯顿	450,000	0.50	34.3	680	0.3~0.45	10~17	138	4,631	锌沉淀
塔斯卡罗拉	90,000	0.69	60.0	870	0.30	10~15	31	2,177	锌沉淀
温德福尔	200,000	0.96	少量	567	0.70	—	156	—	炭吸附/电解
佐特曼-兰杜斯基	3,270,000	1.03	N/A	4,921	2.00	—	2,177	3,888	锌沉淀

注: N/A 是 not available 的缩写, 意为未得到。

数字,由堆浸生产的黄金占国内矿山黄金产量的25%,银占10%。比较起来,据张伯伦(Chamberlain)和波贾(Pojar)报道,1979年从堆浸矿山回收黄金3390公斤,银4074公斤,这些数字占当时美国金产量的10.6%,银产量的0.3%。他们曾预计到1982年底,堆浸生产金将达到7775公斤/年,银年产量达到124400公斤。

黄金堆浸产量的增长已经超过了这些估计。另一方面,银堆浸产量实质上有所增长,但没有达到预期的产量。随着一些已安排的堆浸工程(内华达州的Relief Canyon和加利福尼亚州的Mesquite)和以后可能上的一些工程,这些增长趋势在今后几年还可能维持下去。由于我们在堆浸方面的经验更成熟,确定一个具体的矿体是否用堆浸取代常规的加工已变得更容易了。南迪克(Nendick)^[16]为这方面的评价提供了有一定价值的经验法则(rule-of-thumb)具体说来,他用生产能力与矿石品位之间的关系来说明堆浸对常规加工的相对范围。正如人们预料的那样,通常堆浸对于低品位及储量小的矿体是有利的。

根据描述矿体的基本量(储量及品位)来作这方面的研究是有益的。用6个运行的堆浸厂和6个常规加工厂的这些数据作图如图2。如果对所有这些数据进行线性回归,堆浸与常规加工之间形成清楚的分界线。加工方法的选择似乎与矿体的大小和品位有关,这已在本文前面作了讨论。图2

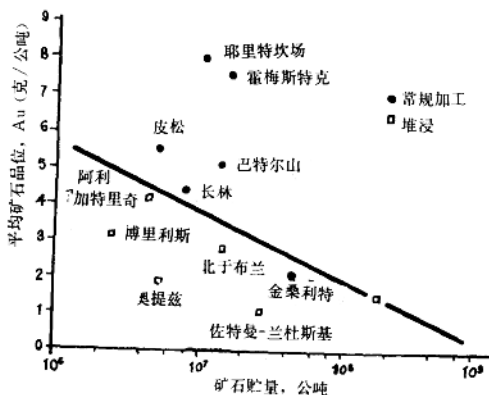


图2 部分金矿床的矿石品位与储量函数图

的数据定量地说明,一个储量为1亿吨的矿体,金的储量必须至少为200000公斤,这时建一座加工厂才是合理的。另一方面,一个1000万吨的矿体必须

含有38000公斤金才值得建一座加工厂。金桑利特(Golden Sunlight)厂似乎是一个处于边界线的例子。该矿估计有4600万吨品位为2.06克/公吨金的矿石似乎是理想的堆浸候选地。然而,评价该矿时排除了堆浸,因为粗矿石颗粒浸出时金的提取率低。

在确定常规加工与堆浸之间的选择时,冶金和工程因素是非常重要的。希望以后各章的讨论和给出的数据将有助于了解堆浸技术的诸技术问题。

参 考 文 献

- [1] Heinen, H. J. and Porter, B., 1969, "Experimental Leaching of Gold from Mine Waste," Bureau of Mines RI7250.
- [2] Potter, G. M., 1969 "Recovering Gold from Stripping Waste and Ore by Percolation Cyanide Leaching," Bureau of Mines TPR 20.
- [3] Heinen, H. J., Peterson, D. G., and Lindstrom, R. E., 1978 "Processing Gold Ores Using Heap Leach-Carbon Adsorption Methods," Bureau of Mines IC8770.

- [4] Heinen, H .J ., McClelland, G .E ., and Lindstrom, R .E ., 1979 "Enhancing Percolation Rates in Heap Leaching of Gold-Silver," Bureau of Mines RI 8388.
- [5] DeMull, T .J .and Womack, R .A ., "Heap Leaching Practice at Alligator," Chapter 2, this volume .
- [6] Roper, E .C ., "Pegasus' Gold Ltd ., Gold/Silver Operations at Zortman, Montana," Chapter 3, this volume .
- [7] Milligan, D .A . and Englehardt, P .R ., "Agglomerated Heap Leaching Anaconda's Darwin Silver Recovery Project," Chapter 4, this volume .
- [8] Keuhey, K .Y .and Coughlin, W .E ., "Getty Mining Company's Approach to Heap Leaching of the Mercur Mine," Chapter 6, this volume .
- [9] Potter, G .M .and Salisbury, H .P ., 1974 "Innovations in Gold Metallurgy," Mining Congress Journal, July 1974.
- [10] Kappes, D .W ., 1983 "Heap Leaching a High Clay Gold Ore in a Tropical Setting at Minera Maclona, Costa," Paper presented at the Heap and Dump Leaching Symposium, SME F Fall Meeting, Salt Lake City , Utah, October 1983.
- [11] Chamberlin, P .D ., 19 "Heap Leaching and Pilot Testing of Gold Silver Ores," Mining Congress Journal , April 1981.
- [12] Schlitt, W .J ., "The Role of Solution Management in Heap and Dump Leaching," Chapter 8, this volume .
- [13] Mooiman, M .B ., Miller, J .D ., Hiskey, J .B ., and Hendriksz, A .R ., "Comparison of Process Alternatives for Gold Recovery from Cyanide Leach Solutions," Chapter 10 this volume .
- [14] Potter, G .M ., 1981 "Design Factors for Heap Leaching Operations," Min .Eng ., March 1981 p .280 .
- [15] Chamberlin, P .G .and Pojar, M .G ., 1981 "The Status of Gold and Silver Leaching Operations in the United States," Gold and Silver - Leaching, Recovery and Economics, eds .W .J . Schlitt, W .C .Larson, and J .B .Hiskey, SME - AIME, New York, p .1 .
- [16] Nendick, R .M ., "Engineering Design for the Recovery of Precious Metals from Heap Leach Solutions," Chapter 9 , this volume .

陈明阳译

陈 炎校

阿利加特里奇矿的堆浸实践

T. J. 德穆尔
R. A. 沃马克

在阿利加特里奇 (Alligator Ridge) 矿堆浸的低品位矿石已超过181万吨。自1980年开始堆浸以来, 在矿石造粒, 堆的结构以及浸出作业几个方面已作了改进。这些改进改善了矿石的渗透速率和矿石中金的回收率。本文论述了这几个方面的变化并讨论了这些变化带来的影响。

一、前言

阿利加特里奇矿位于内华达州白松县伊利西北70哩。该矿的开发始于七十年代, 当时由阿姆塞科矿业公司 (Ameseco) 和西洋矿业团体共同投资, 阿姆塞科作为经营伙伴。1983年初, 纳科 (Narco) 矿业公司获得了西洋矿业公司所享有的所有权。自1981年以来, 该矿的采矿和矿石加工设施的生产能力已达680,000吨/年, 年产黄金1900公斤。

阿利加特里奇的金矿床是由分散于硅质粉砂岩基质中的微细金粒所组成。矿体包括三个独立, 但邻近的矿带。这三个矿带的名称由矿带所在的地名vantage后分别加上1, 2, 3, 即Vantage 1, Vantage 2, Vantage 3构成。

矿体用露天开采。用炮孔岩粉取样分析将矿物分成矿石、低品位矿石、炭矿或废石。炭矿和低品位矿被堆存。矿石直接运往破碎厂。目前采出矿石的平均品位为4克金/吨并含有不等量的有害组分, 如粘土、硫化矿物和炭。

用堆浸法从矿石中回收金, 矿石经三级破碎, 达到-19毫米。破碎的矿石加水、氰化物和石灰经转鼓造粒机造粒。造好粒的矿石用卡车运到堆浸场, 稀的氰化物溶液从堆顶上喷淋, 渗透后, 从堆底部的排水系统收集。浸出富液流到贮池, 再用泵将富液送往五个串联的吸附塔, 在塔内金由活性炭吸附。饱和活性炭在加压容器中用浓的氰化物和苏打热溶液淋洗金。淋洗合格液经电解处理从钢毛阴极上回收金, 然后在该矿精炼厂将阴极上的金炼成粗金条。

阿利加特里奇矿从1980年开始处理矿石。自那时以来, 已破碎并上堆的矿石超过200万吨。改善堆浸金回收率的努力导致矿石制备, 堆结构和堆操作几个方面的变化。下面将讨论这些变化以及这些变化对溶液渗透性以及金提取率的影响。

二、堆浸—背景

堆浸定义为“堆置或堆放在经特殊制备的不透水的能收集浸出液的衬垫上面的低品位矿石堆的渗滤浸出”(海宁, H. J., 彼得森, D. G. 和林斯特龙, R. E., 1978)。本文的目的是补充前面的定义即浸取溶液是通过喷雾或喷淋加到堆上。具有适当孔隙率的物料允许浸取剂进入和扩散出矿石颗粒。成功的堆浸取决于矿石颗粒最大限度暴露在流过堆的溶液中。为确保最大限度地暴露矿石于浸取剂中, 必须满足两条原则: (1) 矿堆必须能均匀地

渗透溶液流，(2) 溶液必须均匀地分布于堆的表面。

矿堆的渗透性受矿石制备技术及堆矿方法的影响。低堆或不均匀的堆，浸出时其渗透性可能出现下列问题：堆顶部积液，溶液在堆中产生沟流，或在堆的一边产生偏流。大多数堆浸的矿石制备采用破碎。破碎时要控制，以求得产生的粉矿量最少，由于过多的粉矿会降低整个矿堆的渗透性。如果粉矿的产生不可避免，那么粉矿的造粒将改善堆的渗透性。堆矿时由于矿石粒度不同引起的离析将导致矿堆的渗透性不均匀。矿石上堆前经过造粒就减少了矿石离析的可能。堆矿期间矿石的压实也会降低整个堆的渗透性，因此，堆矿的方法应使矿石压实减到最小程度。

保持溶液在堆顶部的均匀分布如同提供渗透性均匀的堆一样重要。布液不均时在堆顶可以看到干堆或溶液坑。为得到良好的布液，必须适当选择喷头设计、喷淋空间以及操作压力。

用 Yantage 矿体的矿样作的台架试验及半工业规模的试验证明，用堆浸法从该矿矿石中提取金是可行的。有关半工业规模堆浸试验的详细情况以前曾有过报道(钱伯林, P. D., 1981)，在台架试验及中间规模试验中已得到成功的技术，如矿石制备、堆结构以及浸出操作技术等，有许多被写进了阿利加特里奇矿的实际规模堆浸的设计说明书和操作规程。然而，由于矿石类型改变引起的事先未曾料到的问题，使浸出性能不一致，经常性地令人失望，因而有必要改进矿石制备、堆结构以及浸取操作的实践。

三、矿石制备

图1描绘了1983年6月以前完成的所有堆的矿石制备细节的概要。初期的几个堆从堆A到堆E上的矿石制备是由临时破碎设备破碎的。矿石经临时破碎机破碎至一32毫米或一13毫米，不造粒。其它堆上的矿石是在永久破碎设施中制备的。

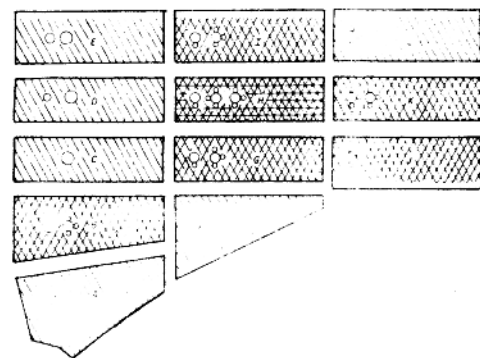


图1 1983年6月以前上堆矿石的制备方法概要

矿石经永久破碎机破碎至-19毫米并且几乎所有的矿石都经过造粒。造粒用的添加剂包括水、氰化钠、水泥和石灰。破碎粒度以及造粒粒度会引起浸出性能的变化。

1、破碎粒度

如图1所示，阿利加特里奇矿的矿石破碎加工成三种不同的粒度。为了研究三种粒度对浸出性能的影响，对堆B、D和F所得的结果进行比较。堆B的矿石破碎至-32毫米，堆D的矿石破碎至-13毫米，堆F的矿石破碎至-19毫米，上述各堆都用未造粒的矿石，并且采用相同的堆矿方法。

堆B和F浸出性能良好，两者均未出现异常的渗透性问题。金的提取速率及最终提取率都是令人满意的。1982年间，堆B与F浸出中断以后，用钻孔的办法从堆中取出渣样，经过粒度分析和钻孔样品分析表明，这两个堆的渣金品位及粒度分布差别很小。堆B的渣样原来以为呈现较粗的粒度分布，但浸出期间淤积矿石出现明显的结块。矿石破碎的较大粒度不影响浸出性能。

堆D的矿石很多破碎至-13毫米，堆D金的提取速率非常慢，因为过细的矿引起严重的渗透性问题。该堆渗透性一直不好，即使在两个浸出循环之间用D-9履带式松土机松过后也是如此。在松堆D时，碰上大而紧密的团块使推土机行动困难。大结块的形成可能是由于堆矿时，未造粒的粒度不同的矿石，形成粗矿与细矿区。浸出期间，由于细颗粒随浸取液迁移并积累在离析出来的不渗透的细颗粒区域周围，使不渗透的团块增大。这些团块的存在使溶液流过堆时产生沟流，降低矿石的金提取率。在不渗透区域经松土建立新的流道可暂时增加金的提取速率。堆D经过松土并反复淋浸四次以后，实际上最终的提取率还是满意的。

2、造粒

放在开始的堆，即堆A到堆F的矿石是未经造粒的。而其余堆上的矿石是经过造粒的。水、氰化钠、水泥和石灰都用作造粒的添加剂。由于造粒条件有所变化，浸出时观察了浸出性能的差异。

(1)、未造粒的矿石

这些堆的浸出性能变化很大，从好到非常令人失望。堆B、E、F均呈现足够的渗透性，而且这些堆的金提取率也是令人满意的。相反，堆A、C和D浸出期间遇到渗透性问题。堆A出现的问题最严重。浸出堆A时，堆顶部形成溶液坑，矿堆边上矿石塌陷，溶液产生沟流。堆A的浸出性能差，不单是由于矿石未造粒，堆矿方法以及粘土含量高也是导致浸出性能不好的原因。

矿石未经造粒的堆浸出性能的变化和不可意料的现象不能单从造粒来解释。矿石粒度与堆矿方法的不同导致堆A至F浸出性能的变化。对浸出性能差异的最好解释是矿石特征的变化。

(2)、用水造粒

堆G和H第一次上堆的矿石是用水造粒，这些堆的浸出性能非常好，未遇到渗透性问题，并且金的回收率也不错。

经验证明，造粒时最佳的加水比例范围是20~40公斤/吨，典型的造粒矿石本身含水量为8%，加水速度由造粒机操作人员，通过破碎系统的可见指示，人工控制。加水太少，引起运输时过量的粉尘，而加水过多时粘性矿在输送溜槽中过快地积累。

(3)、用氰化物造粒

对Vantage矿石进行的冶金可行性研究的有关结果表明，每吨矿石用250克氰化钠造粒，可改善浸出时金的初始提取率。在阿利加特矿，矿石经过用氰化钠预处理的堆性能，总的来说证实了实验结果。实验结果表明，氰化物的用量250克/吨是过量的。用少至25克/吨氰化物对矿石进行预处理的堆，同样得到好的浸出性能，通常造粒时氰化物的加入比例控制在大约50克/吨矿。起初，用氰化物造粒是通过加浸取液而不是加水到造粒机来实现的，放在堆I和第二次堆在堆H的矿石是用浸取液造粒的，两者的性能优于仅用水造粒的堆。用浸取液造粒时，氰化钠的用量比大约为25克/吨左右。后来的堆，由于喷射浓的氰化钠溶液进入造粒机，氰化钠的用量有所增加，堆K的氰化钠为125克/吨，堆J为250克/吨，堆K和堆J的浸出性能不如堆H和堆I的浸出性能好（部分由于矿石种类变化引起）堆K和J的总氰化物消耗量要高得多。浸出前，堆K和堆J的矿石基本上已经消耗了造粒时加的所有氰化钠。浸出期间，这些矿石又消耗从浸取液加进去的氰化物。根据经验，氰化钠的添加比例通常控制在50克/吨，这个用量已足够提高金的浸取率，而且能保持总的氰化钠消耗量在合理的水平。

(4)、用水泥造粒

堆H第二次上堆的矿石，造粒时加了2.5公斤水泥/吨。浸出开始时，堆的渗透性好，但浸出后期渗透性降低。渗透性降低的原因还未最后肯定。浸出快结束时，堆的东边形成水坑，由于溶液不能流过堆而积累在堆的周围，形成大的水坑，堆的周边未塌陷，也许是因为造粒时加的水泥稳定了矿石。用水泥造粒的矿石，金的提取率是满意的。

(5)、石灰造粒

在阿利加特里奇矿的实践还包括用石灰取代水泥造粒。石灰虽不是象水泥那样强的粘合剂，但能促使颗粒间的结合，从而改善矿石的渗透性。（麦克莱兰，G.E.，希尔，S.D.，1981）。

石灰有一附带的优点，就是对浸出液的碱度提供了保护。在阿利加特里奇处理的一些矿石含有大量耗碱的酸性硫化矿物。这类矿物的实验表明，碱的消耗速度可以超过碱补充系统的补加能力。通常造粒时，石灰的加入量由人工控制在1.5~5公斤/吨，视矿石的需要确定。由于造粒时加了石灰，pH控制有了改善，并且实际上弥补了浸出液中碱的消耗。

堆B、G、I、J、K第二次上堆的矿石都是用石灰和氰化钠造粒。这些堆都呈现出良好的渗透性，即使浸取液的喷淋速度达到以前速度的两倍，在这些第二次堆矿的堆中，没有发现任何显示渗透性差的特征。金的提取率有差别，由于上堆的矿石有些已经严重炭化和含硫化物，但是一般地比以前观察到的堆的提取速率更快。虽然用石灰和氰化物造粒有利于得到好的结果，但堆矿方法的改进（将在后面讨论）也对堆的性能好坏产生影响。

(6)、造粒实践的总结

一些由未造粒矿石构成的堆呈现出差的渗透性和慢的金提取速率，而有些堆又呈现出足够的渗透性和满意的金提取率。用水造粒的矿堆性能良好，用氰化物造粒的矿石增加了金的

提取率。加入大量的氰化物造粒导致氰化物的无效利用和过高消耗。用水泥造粒产生力学稳定的堆，浸出时性能好。加石灰造粒有两个优点：造粒中石灰作为粘合剂并作为保护性碱度的廉价来源。石灰加入比例，可视矿石的特殊要求而改变。在阿利加特里奇矿的造粒实践包括用20~40公斤水/吨，50克氰化钠/吨，1.5~5.0公斤石灰/吨。水及石灰的用量可在这个范围内人为地调节，以满足不同矿石的要求。用这种混合添加剂造粒有助于改善堆的渗透性和金的提取率，使堆的性能更一致以及更好预测。

四、矿堆的结构

图2是开始建造的12个堆底部面积的轮廓图。浸出衬底面积大约0.3平方公里。它靠近永久性破碎厂，挖成5%坡度，（从北到南和从西向东的斜率）。便于浸出液的排放和收集。衬底材料包括30厘米厚的压实淤泥。如图2所示，淤泥地被分成梯田形成12个独立的堆浸场底。开沟放置排水管线，用粗砂砾覆盖。这些排水管线将浸出液引到沿各浸出场东边安装的主收集管。富液经主收集管排到沿浸出场南端的衬有硫化塑料的沟里流走。

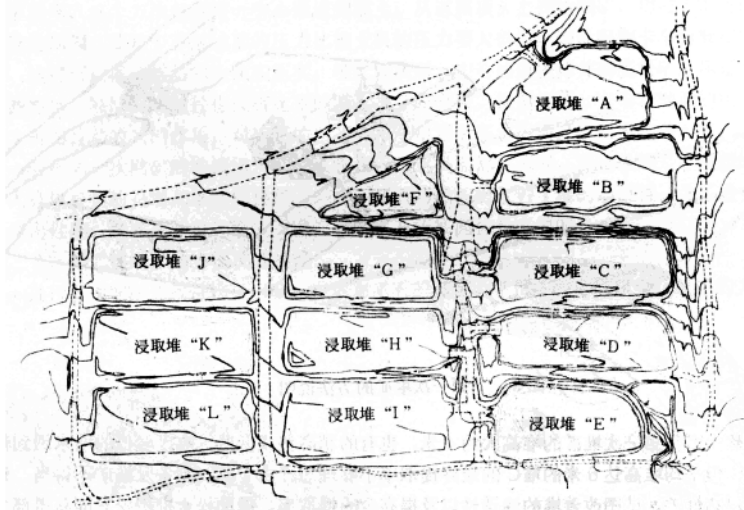


图2 第一次堆矿的矿堆底部垫层平面布置及等高线图

堆浸场底一开始是按使用一次考虑的，即堆的浸出结束后，已经浸过的残渣留在原地方，而浸出又从另一个堆开始。图2所示的放矿空间足够生产两年。按矿山的开采年限估计，还要补充1.0平方公里的补充堆矿面积。

鉴于Vantage盆地的空间限制，加上堆底部构造的昂贵投资，授权考虑重复利用原来的

底部面积。当时预计到1982年下半年，有效的衬底空间将全部用完。当年春季委托一个咨询公司研究在原有堆上多次加矿的可行性。开展这项研究的目的在于考察堆的渗透性及衬底的稳定性，以及由于加矿到原有堆上增加的压力对堆及底部结构可能出现的影响。有人曾断言，加矿到原有矿堆上会降低堆的渗透性以及损坏底部结构。但矿堆呈现出足够的渗透性，并且经受了增加矿石的压力对排水系统的影响。为了进行这项研究，当时决定推迟准备新的浸出场地面积并决定增加现有堆的高度。

大多数第二次堆矿采用的方法与第一次堆矿用的方法不同。第一次堆矿的矿堆呈现出性能不一致并常常效果差，第二次堆矿的矿堆性能总是优于第一次堆矿的矿堆性能。

1、第一次堆矿的结构及其性能

图3表示第一次堆矿的技术。在各个堆浸场一端建一条外斜坡道一直到堆的高度。矿石由卡车从场地顶头开始倒。从斜坡道向前推进到达整个场地宽度。堆矿期间用一台推土机将矿石推到要求的地点。堆矿结束时，堆表面全部耙松一次，在顶部周围建一截水沟以防止溶液跑掉和侵蚀堆边。

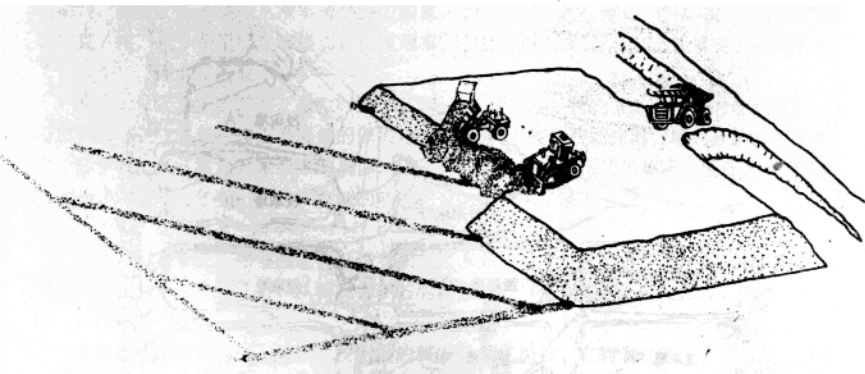


图3 第一次堆矿的方法说明

虽然大多数第一次堆矿的堆高大约4米，也有的稍高些或低些。高度较低的堆未遇到什么问题，但平均堆高达6米的堆C的最终提取率不够理想。由于矿石制备及堆矿不得当，这个堆的浸透性差。试图改善堆的渗透性以及提高金的提取率，借助松土机耙松只能获得部分成功。该堆用带3米长松土刀的D-9L履带式推土机松过6次。后来用奥格（Auger）钻孔从堆里取样证明，松土机达到的地方矿石浸出完全，而深度超过3米的矿石品位仍然较高。松土的办法虽对堆C的性能有所改善，但并不是完全成功的，因为矿石堆得太高。

第一次堆矿的矿堆大多数渗透溶液的速度达不到设计的喷淋速度。设计 0.003 升/秒·米²的喷淋速度，导致浸取液在堆顶部的积累。为了避免堆顶部积液，必须将喷淋速度减至设计速度的一半左右。即使减小了喷淋速度，沿堆边附近仍存在积液的问题，在这些地方会塌

方或冲垮堆边。

从图2可以看出，堆顶建成不同的构型和坡度，企图避免堆边附近积水。而最有效的堆构型是堆L所采用的构型，即从北到南，从西到东的坡度为2%，并且沿堆内侧建了一系列排水沟。在堆L顶部未发现大的溶液坑，堆边也从未受到过威胁。

第一次堆矿存在的另一个问题是，溶液从堆边坡冲出，或从斜坡道附近冲出。堆矿期间，运输设备引起斜坡道的矿石严重压实以及斜坡道尽头矿石被压到堆外边。通过松矿可以减轻压实的影响。松矿后，浸取溶液可以渗透到松土机达到的深度。松土机未达到的地方，溶液遇到渗透性极差的密实区域。因此，溶液只能横向流，否则就会冲破堆边或经斜坡道流出。

虽然压实的不利影响在坡道附近是明显的。但压实的影响不限于这些地方。由于运输设备引起的矿石下陷与压实，在不同程度上影响所有第一次堆矿的堆的渗透性及金的回收率。浸出期间，即使降低溶液的喷淋速度，堆顶部仍有水坑形成，这为运输设备的压实降低了堆的渗透性提供了确实的证据。加之，堆的性能是不可预料的，压实对一个堆的浸出性能的影响，只有到浸出开始以后才能作出估价。

堆K采用其他文献介绍的方法堆矿（钱伯林，P. D.，1981）。力图减轻对矿石的压实。简单说来，这个方法包括建一中心通道到堆上，从道路顶头上开始倒矿，用推土机将矿石推到堆的周围。载重卡车对地面的压力比推土机的压力要大得多，因此限制卡车行驶在窄的地段，这样可以减轻矿石的大面积压实。堆矿完成后，中心通道挖掉并彻底松矿。尽管采取了这些措施，堆K的渗透性也没有比别的堆有显著的改善。根据推测，卡车对地面的压力加上推土机的振动的共同作用，对矿石的压实作用与单用卡车运输所产生的影响差不多。

有些第一次堆矿的堆浸出性能很不错，但对这类堆总体来看，浸出性能是不理想的。最令人难以捉摸的是堆与堆之间性能不一样。矿石的造粒已改善了堆的渗透性。为了进一步改善浸出性能，堆矿期间改进堆矿方法，减少矿石压实同样是必要的。

2、第二次堆矿的方法及其性能

进行多次堆矿为改进堆矿方法，减轻对矿石的压实，提供了良好的机会。改进的方法用

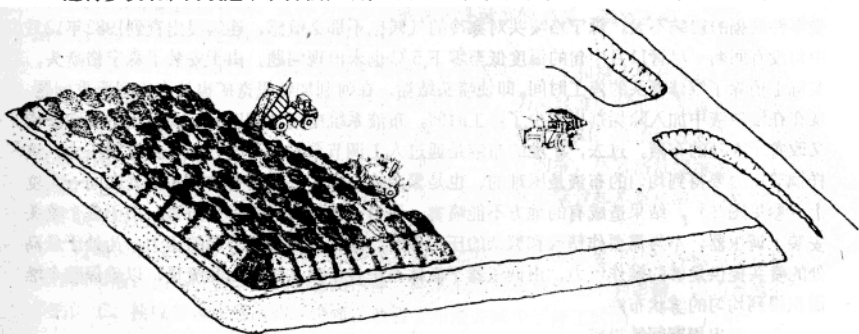


图4 第二次堆矿的改进方法说明

图4说明。斜坡道建到原有的堆高度，堆顶推平并彻底松砂。矿石从堆顶头开始倒成行，直到布满整个堆的宽度。矿石用推土机推到一起形成新的矿堆。倒每一排矿石至新堆前，原有的浸出渣需要耙松，以减轻运输设备引起的任何压实。新堆的最终高度达到两米，而且堆表面形成不规则的小矿堆和槽沟。与过去用的堆矿方法不同之处在于新的堆矿方法，不存在运输设备的压实。作者写本文的时候，第二次堆矿已经堆了五个堆，这些堆的浸出性能是良好的。接受溶液的速度可以达到设计的速度，而且没有发现形成水坑。金的提取速率快，30~40天可以完成金的浸取。相比之下，以前的堆矿方法需要60~90天，甚至更长，金的浸取才能完全。第二次堆的矿石经过了用矿石和氰化物造粒，造粒的优点加上堆矿方法的改进得到了良好的浸出性能。

五、浸取操作

在阿里加特里奇矿头两年的堆浸操作中，用灌溉型脉冲喷头对堆进行喷淋，将脉冲喷头改成西尼格（Senninger）摇头喷头改善了布液并减少了因维修喷头的停工时间。从前一些堆曾遇到渗透性差以及由此引起的金回收率低问题导致堆浸作业的改进。遇到问题的堆，通过改变浸出周期，排水松矿以及多次浸出，部分地减轻了内在的渗透性差的问题并提高了金的最终提取率。

1、喷头

阿利加特里奇矿原来用的脉冲喷头，只要不发生故障，矿堆的布液是均匀的。这种喷头停转始终是一个问题，因为常可能出现下列之一的情形：操作压力太低、喷头小孔因结垢或碎片堵塞、喷头运动部件的磨损、寒冷天气喷头结冰。脉冲喷头发生故障导致堆顶出现干块，而且如果喷头小孔不堵塞，引起堆顶形成水坑维修喷淋器的停工对金的提取有不利影响。

1982年下半年的浸出季节，用带单独调压器的森宁格旋转喷头取代了脉冲喷头。这种喷头减少了故障，并且发生故障时重新启动比较容易。即使旋转喷头发生故障时，溶液也是呈雾状喷出而不是喷出水柱，这样就减少了形成水坑的可能。由于这种喷头只有一个运动部件，受零件磨损的影响不大。森宁格喷头对寒冷的气候也不那么敏感，连续浸出直到1982年12月中旬没有间断。尽管11月中旬的温度低至零下5℃也未出现问题。由于安装了森宁格喷头，实际上消除了维修喷头的停工时间。即使喷头结垢，在阿利加特里奇矿也从未出现严重问题。现在在浸取液中加入除垢剂也减少了停工时间。布液系统中增加调压器，既简化了浸取操作又改善了堆顶的布液。过去，矿堆的布液是通过人工调节泵的压力与各个堆的管线压力。这样调节压力要得到均匀的布液是困难的，也是繁杂的，因为并非所有的喷头都处在同一高度上（参见图2）。结果造成有的地方不能喷雾，而另一些地方又喷得太厉害。由于各个喷头安装了调压器，不再需要作精确和繁杂的压力调节。通常只需要调节泵的压力，为处于最高处的喷头提供足够的操作压力。由调压器平衡体系中各个喷头的压力和流量，以确保整个堆面积得到均匀的雾状布液。

2、浸出周期期间的松矿

本文前边已经叙述了关于矿堆在浸出周期之间松堆的有利影响。矿堆浸出周期之间的松矿可以打通原有的溶液流通通道并建立新的流道。将新鲜矿石暴露到浸取剂中。实践证明，所