
金矿 || 堆浸工艺

提高堆浸回收率的关键是增强矿堆的渗透性，使浸出液与矿石中的游离金发生充分的接触和反应。在浸金过程中如何提高氧气的含量也是提高浸出率的重要条件，因此，为了改善堆浸过程中的技术指标，特别是对难浸金矿石，如细粒和多泥矿石的处理，对堆浸过程进行了矿石制粒、添加润湿剂和加氧浸出的工艺改造，以达到提高金回收率的目的。

1. 制粒堆浸

堆浸的核心问题是如何保证浸金液与矿石中的有价成分充分接触和有效反应。对于含粉矿和粘土多的矿石则难度更大。围绕此核心，近十余年已进行了大量研究工作并取得了突破。1975年，Holmes和Naruer公司提出了TL法并获得美国专利（US Pat.No.4017309），此法由智利SMP公司进一步完善并于1980年在Lo Aguire铜矿用于工业生产，从而为克服堆浸的固有缺点找到一条有效途径。

TL法全名应为制粒-预处理-薄层堆浸法，其实质是：①通过制粒以提高矿石本身和矿堆渗透性；②在制粒过程中加入溶浸剂使之与矿石提前接触并预先反应以加快浸出速度；③分薄层堆浸以保证布液均匀和有利于通氧。

其综合结果是由于改善了溶浸的渗透性从而有效地促进了反应动力学过程和内外扩散过程，大大提高了浸出回收率、缩短了堆浸周期、降低了溶浸剂消耗。这正是堆浸法要解决的关键技术问题。

1) 制粒过程

要想使堆浸生产获得成功，堆浸物料必须具有良好的渗透性以使氰化物溶液均匀地通过矿堆。因此，用制粒堆浸法也可以成功地处理一些较难处理的金矿石。。

在制粒之前绝大多数含贵金属的矿石和物料需要破碎到25.4mm或更细，以便暴露出矿石中所含的贵金属，提高贵金属的总收率。

在制粒过程中粘土和矿石中的粉矿粘附到粗颗粒上，形成了一层细粒包膜物。这种矿粒具有足够的湿态强度，固化后再润湿时很少破损。由于制粒能制得多孔和渗透性好的原料，从而可克服筑堆时矿石粒度偏析带来的主要问题，如细颗粒的迁移问题和浸取时溶液的沟流问题。

通过研究确定了三个重要制粒参数，即：①往干给料中加入粘结剂的数量；②往粘结剂和矿石混合物料中加入的水量；③形成硅酸钙连接键所需的固化时间。合理确定这三个参数，将可成功地预处理渗透性差的已碎矿石、含大量粘土质矿物和细粒尾矿及其他物料等。

通过实践和研究表明：多数已碎矿石（-25mm）通过下列工序都能有效地浸出。首先往每吨物料中混入4kg波兰特水泥，再用水或氰化物溶液湿润到最后的水分约为12%，机械滚动已湿润的混合物以便达到团矿的目的，再固化8h以上，然后进行常规堆浸处理。

制粒过程中加入的水泥为氰化物浸出提供了保护碱。筑堆后开始用常规工艺进

行浸出，当含少量细粒时，只需加溶液就会使细粒粘附到粗颗粒上。但当细粒即-200目含量超过10%时，就需加入粘结剂制粒。制出松散粘结（不密实）的类似矿团的聚合物。这些聚合物的渗透性高，浸出过程中力学强度稳定。试验结果是波兰特水泥最佳，加入量一般为每吨矿石0.9-4.4kg；石灰次之。但这两种粘结剂都能提供所需的保护碱，石灰在这方面更好些。

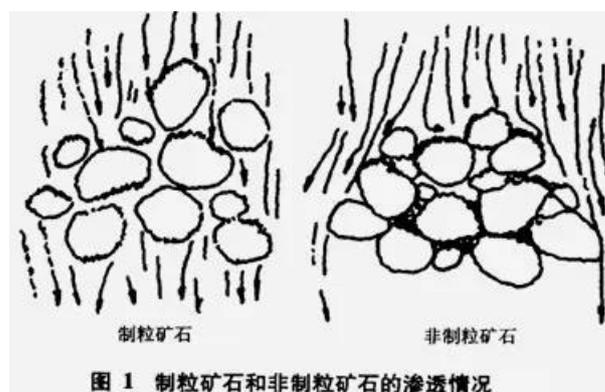
粘结剂必须加到比较干的矿石中，与矿石混合再湿润。粘结剂应在破碎回路中加入，随着矿石的破碎就与矿石混合了。而且它还可以吸收矿石中的过量水分，使矿石易于通过破碎设备，而不沾到筛上堵塞排放槽。把粘结剂加入到破碎回路中，它可与矿石紧密地混合在一起，特别是石灰充满整个矿堆，保证了碱度。

矿石、粘结剂和溶液的混合物必须固化8h，含大量细粒的矿石需大量的粘结剂，而且固化时间约需2-3d。如只用溶液制团，则不需固化时间，不需特殊的固化设备。

2) 制粒作用

①通过制粒，那些含大量细粒和粘土的矿石就能采用低费用的堆浸工艺处理，那些大型低品位金矿体有可能开采利用。

②提高了金的总回收率。因为细磨增加了游离金的暴露，而不产生离析现象。否则，不经制粒的物料在筑堆过程中会出现分层离析现象，致使细粒物料局部集中而阻碍浸液的渗透（见图1）。



③提高了渗透速度，缩短了浸出时间。这一点对那些能够扩大生产能力，而制备浸垫的基建投资却不会明显增加的矿山来讲，更具有经济意义。

④矿团的多孔性使矿堆“呼吸”，为金溶解提供了必需的氧，加速了金与氰化液的反应。这为增加矿堆的高度提供了可能性，相对降低了每吨待处理矿石的制垫成本，土地亦可以得到更有效的利用。

⑤由矿团组成的矿堆，其孔隙度高，因此，能有效地洗涤浸完的矿堆所残留的氰化物。当浸堆被废弃时，稳定的球团可使灰尘污染问题减少到最小程度。

⑥堆浸所得贵液中贵金属含量高，从中用置换或活性炭吸附法都可提高金的回收率。

但是，破碎系统和团矿系统的费用较高，除非绝对需要，否则它们不应设置在工业生产中。在开始工业生产之前，首先要确定用制粒堆浸给料的技术经济条件。

3) 制粒设备

①圆筒制粒机。最常用的制粒设备是圆筒制粒机（见图2），多数圆筒制粒机的

转速仅为临界速度的 20%~60%。筒长与直径的比例为 5:2.5。这种设备优于其他类型的设备，因它具有容量大的特点。该制粒机有三个作业参数：一是圆筒的转速，这可通过链轮、滑轮或一个变速驱动器来调整；二是筒的倾角应保持在 1° - 4° 之间；三是物料在圆筒制粒机内适当的滞留时间为 1-4min。传送装置应与筒的长度方向成直角以防物料溢出或堆积。在筒内沿其长度方向安装有橡胶刮板以防物料沾到筒壁上。



图 2 圆筒制粒机

②圆盘制粒机。这种制粒机有几个作业控制参数，这些参数可以变化以适应需处理的物料。圆盘的坡度一般与水平线成 40° - 65° 角，深度为 0.46~0.91m，圆盘转速为 30~50r/min，具体取决于圆盘直径和坡度，还取决于矿石粒度和盘的直径（见图 3）。一台直径为 6.1m 的圆盘制粒机每小时可处理矿石 90t。驱动这么大规模制粒机约需动力 95kW。

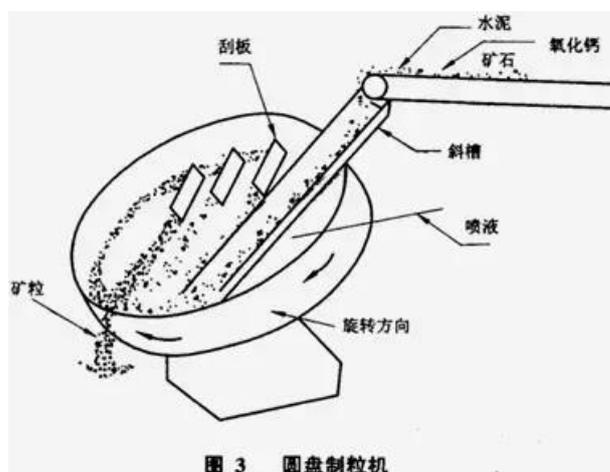


图 3 圆盘制粒机

圆筒式制粒机可用于户外，而圆盘制粒机则可设置在室内，以避免风砂粉尘等问题。

③筑堆制粒。如图 4 所示，这是一种最简单的制粒方法，适于处理较细的物料。与破碎设备相连的传送带的排料端离地面约 4.6~6.1m 高。这样矿堆会具有足够的高度以使物料沿其堆坡向下滚落并混合；从前面或后部可以湿润由传送带传下的矿石流。供液管或橡胶管都要接到传送带的框架上。喷射会产生较粗的液滴，不需要湿润装置。在喷射液的下面有一条或多个较重的混合棒，它们悬挂于下落矿石流中。其作用是使外层湿润的矿石与里面干燥的矿石混合。



图4 筑堆制粒

用前端装载机将矿堆的物料装到卡车上送去重新筑堆或者直接筑堆，这样使矿石再次混合；也可将物料卸入一个储矿仓，由堆积机筑堆。

④带式传机制粒。把水喷到筛下-9.5mm 矿石上。将筛下的所有产品都送到一个普通的传送带上。然后通过四条传送带混合物料，传送点处有很重的金属棒悬浮于下落的矿石流中（如图 5 所示）。



图5 带式传机制粒

进行混料的传送带的数量取决于矿石中的细粒量。-100 目占 5%的硬硅质矿石仅需两条或三条传送带，但是比例达到 10%或 15%则需四条或五条传送带，如果超过 15%就需要用圆筒或圆盘制粒机处理。

每个传送点都需设喷头和混合棒。传送带的传动速度 76~91m/min。带宽 0.61m 的每小时能处理矿石 136t，0.76m 宽的每小时处理 227t 矿石。注意喷液不能直接湿润传送带。所有的溶液都应喷洒到矿石上。传送带的倾角为 1500 排料端的滑轮与下一个传送带接料端的垂直空间距离约 1.8m。这样可以安装喷头和混合棒，使矿石有机会混合。只要矿石不滑到带下，其倾斜坡度可以再陡些。

⑤倾斜振动台阶式溜槽制粒。这种制粒设备内有 12 个约 7.6cm 高的台阶，矿石从台阶上滚落下滑并混合。每个台阶与水平面约成 35° 角。槽的振动幅度和频率可以变化。通过振动槽顶端的喷水棒加水，矿石随着阶梯或滑下溜槽而成粒。对于这种制粒设备重要的是保持不变的供矿速度。槽上物料的滞留时间不足 10s。如果需要加粘结剂，必须先用一个单独的装置使其与干矿石混合，然后再送到台阶式溜槽制粒机上。

⑥逆向带式制粒机。图 6 所示是一种陡峭倾斜传送带式制粒机，在上端给矿石。传送带的速度试图将矿石送到传送带的顶端，但是带的陡坡却使矿石下滑。

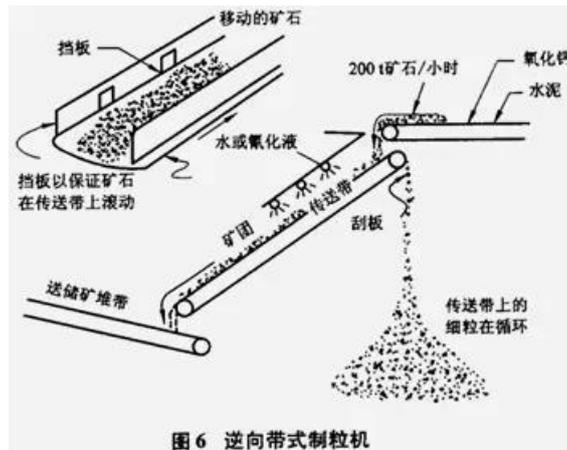


图6 逆向带式制粒机

经过制粒处理的矿团浸出周期短，浸出率高。用制粒工艺来处理那些含泥多、渗透性差的矿石和尾矿可以获得较好的回收率和经济效益。

2. 润湿作用

用润湿剂增加堆浸贵金属回收率的基本原理正得到很大重视。在理论上，把特殊表面活性剂即润湿剂加到浸出液中可以降低它们的表面张力，使矿石和浸金剂更完全接触。从而提高渗透性和回收率。提高渗透性可以缩短浸出时间、降低氰化物及抽送费用、减少堆浸场的干区、增强对单个矿粒的渗透。最后达到提高金属回收率的目的。润湿剂是一种强化浸取的物料，它不仅可以增加浸出速度和最终回收率，同时也应保证润湿剂在贵金属吸附和解吸中不会产生不良影响。

1) 润湿剂类型

用于堆浸中有能力增加浸出剂的润湿效率的一般化学试剂叫做表面活性剂。这些药剂可能有多种化学衍生物、电荷特性和相对分子质量。表面活性剂的分类列于表1。

表1 表面活性剂的分类

表1 表面活性剂的分类	
1.阳离子型	2.阴离子型
A) 羧酸	A) 简单的胺盐
1) 肥皂、脂肪酸、松香酸、环烷酸	B) 季铵盐
2) 其他	C) 氨基酰胺和咪唑啉
B) 硫酸酯	D) 氧化胺
1) 烷基硫酸盐	E) 其他
2) 硫酸盐化油	3.两性的
3) 硫酸盐酯、乙醚和胺	A) 烷基加羧基或磺基或硫酸酯基

4) 其他	B) 其他
C) 磷酸酯	4.非离子型
1) 单、双、三酯	A) 烷基醚、烷化醚、硫醚
2) 其他	B) 酯和酰胺
	C) 聚硅氧烷
	D) 其他

2) 液体表面特征

水的内聚性是表面活性剂工艺的关键。由于水分子是偶极的，图 7 以三角形形式描绘水分子。氧原子占据一个角，氢原子占据其他两个角。虽然分子是电中性的，但是，负电荷场包围了氧原子，正电荷场包围了氢原子。水分子的这些区域相距较远影响了水的性质。水的偶极性和在最高点的负电荷吸引底部的正电荷区，说明水本身粘结的趋势。每个水分子的这个趋势对它附近的分子则产生水的表面张力。

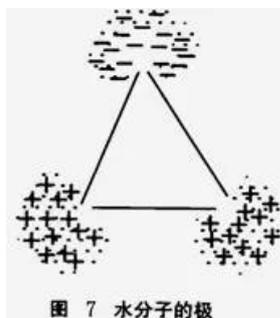
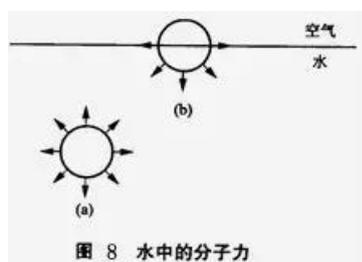


图 8 中的 (a) 表示分子在液体中，(b) 表示分子在液体空气界面时，应考虑作用于水中的一个分子的力的来源，在液体中，粘结力在各方面均匀地吸引分子。对于表面上的分子而言，吸引力向下指向液体中，以致表面作用像在压缩。



这种现象减少了水的润湿性，使浸出液均匀地与矿石的接触面减小。表面张力减少使所有固体表面更完全润湿。好的表面活性剂在其相当低的浓度下(100 μ g/g 或更小)，可使水的表面张力从 0.72N/m 减少到 0.3N/m。典型表面活性剂的范例示于图 9。

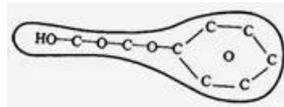


图9 典型的表面活性剂分子

就减少表面张力的表面活性剂的能力而言，在很大程度上，一个特征是在同一个分子上存在亲水基团和疏水基团。当它们溶于水时，润湿剂的这些部分有各自不同的性质。表面活性剂的亲水端有吸引本身到水中的亲和力，并且易溶于水中。表面活性剂的疏水端对水无亲和力，本身在水的表面上定向排列。

如果把低浓度表面活性剂加到水中，它们往往聚集在水表面上。分子的疏水端被排挤出来，在水表面上排成一排，如图 10 所示。由于更多分子聚集在表面，其表面张力被减少到表面完全覆盖为止。表面张力不再进一步减少的浓度叫临界胶态离子浓度。当在表面上不额外增加表面活性剂的浓度时，过量的活化剂必然留在溶液中。

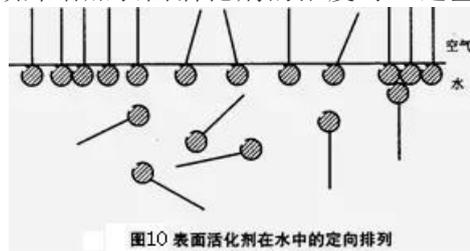


图10 表面活性剂在水中的定向排列

减少表面张力的这种情况同样也有助于增加浸出过程中的金属回收率，因为处理矿石时必须使更多的液体紧密地与矿石的很多不规律表面接触以达到溶金效果。

3) 润湿剂的作用

润湿剂在堆浸中实际上起到理想的表面活性剂的作用。对于润湿剂提高浸金回收率的作用，现今仍处于试验研究阶段。1984 年，S. R. Josph 和 H. N. James 提出一项利用润湿剂提高矿堆浸透性和回收率的计划，在新墨西哥州的 Ortiz 矿的实验室柱浸和生产堆浸场上分别进行了试验。试验工作是为了查明下面几个问题：

①添加表面活性剂是否提高回收率和渗透率？②如果回收率提高，其机理是什么？③需使用多大剂量才能达到上述要求？④添加表面活性剂能否获得足以补偿化学剂费用的收益？⑤施加化学剂的最佳方法是什么？③化学剂应在浸出开始时添加还是在整个喷淋过程中添加？

从实验结果（表 2）中可以看到，两个试验的结果很有希望。这两个堆场（堆场号为 E-22 和 G-22）的回收率与其前后相邻的两个堆浸场相比，使用 Drew739 和 Nalco 2DA-375 分别增加 7.7%和 9.5%。后来将 2DA-375 换为 85DA-059，又进行了两个试验。85DA-059 是一种脂肪酸和烷氧化物的混合物。这第二轮试验没有什么前途，使用 Nalco85DA-059 者回收率提高 1.0%，使用 Drew739 者实际上下降 2.3%。年末，又进行了最后两个试验，这次均使用 Nalco 85DA-059。这次回收率分别提高 4.7%和 5.0%。这 6 次试验的总回收率平均提高 4.3%。6 次试验给药量均保持为 16 μ g/g。

表 2 Qrtiz 矿现场试验结果

试验开始日	堆场号	润湿剂	原矿品位	回收率/%				
				前堆	后堆	平均	试验堆	差值
1985年4月18	E-22	Drew739	1.18	72	68	70.7	77.7	7.7
1985年5月7	G-22	Nalco2DA-375	2.02	68	76.1	72.1	81.6	9.5
1985年7月5	E-23	Drew739	1.71	75	86.2	80.6	78.3	-2.3
1985年8月6	H-23	Nalco 85DA-059	1.87	73	82.7	77.9	78.9	1
1985年12月16	E-25	Nalco 85DA-059	2.21	79.1	69.4	74.3	79	4.7
1986年1月23	A-26	Nalco 85DA-059	2.02	68.2	73	70.6	75.6	5

Ortiz 矿平均年产金 50000 盎司，对这样规模的矿山，回收率提高 4.3%，可使每年产金量增加 2750 盎司以上（金价为 480 美元/盎司时合 130 万美元）。每吨矿石增加的表面活性剂成本不到 2 美分，Ortiz 矿年处理矿石 90 万吨，这样规模的矿山的年成本增加不到 2 万美元，所以投资的利润率是颇有吸引力的。

与大多数药剂一样，润湿剂与不同的矿石起不同反应。在 Ortiz 矿，使用三种表面活性剂中的一种，回收率明显提高达 4.3%。但在其他矿区，如 Mesquite 矿却无明显的提高，这表明润湿剂对回收率提高的机理还有许多工作要做。总之，在 Ortiz 矿的试验表明，对反应有利的矿石使用润湿剂所获得的金的利润是巨大的。

3. 充氧浸取

据 C. M. Kenney (1987) 报导，Hazen 为 Kamyra 公司完成的氰化柱浸试验的结果表明，氧对加利福尼亚州低品位金矿 (1.3g/t) 堆浸有好的影响，制成粒度为 25.4mm 的矿石粒，在直径 14cm，高 1.8m 柱内进行了 6 个柱浸试验。把氧喷入 4 个柱内，其中 2 个柱加盖；剩下的 2 个柱不加盖，也不喷氧。氰化物溶液通过浸出柱 34d，紧接着用水洗涤 2d。柱浸试验结果总结如表 3。

为了确定对其他矿石的影响和对特殊堆浸添加氧的经济性，虽然还需要试验和进一步研究，但是，在目前研究中证明的趋势是令人鼓舞的。

以上说明试验中发现用富氧空气对金浸出的速度比用空气的有很大提高。在滚瓶试验中，用氧和用空气进行 24h 的试验，用富氧空气进行浸出试验，金浸出率达 93.3%。因此，氧增加金溶解的速度，但不影响最终回收率。

在 $\Phi 14\text{m}$ 柱内的柱浸试验中，用氧也提高金浸出率。浸出 36d，用氧的 4 个柱的浸出率在 89.4%~92.3% 之间，平均为 91.1%，而用空气的两个普通柱浸试验的金浸出率仅在 78.2% 和 85.4% 之间。浸出 15d 以后，充氧的浸柱中金浸出率平均为 86%，而采

用空气的普通柱的金平均浸出率仅为 76%。所有试验的氰化钠消耗量小于 0.23kg/t，与普通柱相比，充氧柱的氰化钠消耗量稍低一些。

为解决堆浸生产中充氧作业的实施，kenney 提出了如图 11, 12 的加氧堆浸装置。