

从难处理矿石及其精矿中回收金

B. B. 罗杰希润夫教授

张 教 伍 翻译

金 昌 协 校对

冶金工业部长春黄金研究所 情报研究室

一九七九年十二月

目 录

绪 言	:	1
第 一 章	: 难处理含金矿石的特性	4
第一节	: 金与矿石组份的共生特点	4
第二节	: 金粒上的表面膜受其对氧化指标的影响	7
第三节	: 用某种矿石组份从氧化溶液中吸附金	9
第四节	: 氧化时金的化学抑制	10
第五节	: 难处理含金矿石的工艺类型	16
第 二 章	: 从矿石中回收微粒浸染金的工艺特点	19
第一节	: 用机械解离法解离与石英和 硫化物共生的金	19
第二节	: 用浮选法回收微粒浸染金和 含金硫化物	23
第三节	: 从难处理浮选精矿中回收金	29
第 三 章	: 含金矿石及其精矿在氧化之前的制备方法—— 氧化焙烧的理论基础	32
第一节	: 概 论	32
第二节	: 焙烧时含金硫化物的解离条件	33
第三节	: 金、银在氧化焙烧时的行为	54
第 四 章	: 用焙烧法处理含金硫化矿石及其 精矿的生产实践	69

第一节	: 焙烧的方法、设备和工艺指标	69
第二节	: 用平底炉焙烧含金精矿的工艺	79
第三节	: 用沸腾焙烧法处理含金矿石的工艺	83
第五章	: 用新的冶金方法处理微粒浸染的难处理 含金矿石及其精矿	103
第一节	: 氧化——氯化焙烧	103
第二节	: 金的氯化挥发	111
第三节	: 用湿法冶金方法解离含金硫化物	115
第六章	: 从金——磁黄铁矿矿石中回收金	123
第七章	: 从铁——金矿石中回收金	132
第一节	: 关于同铁的氧化物共生金的机械解离 和化学解离方法的评价	133
第二节	: 铁——金矿石的预先煅烧和氧化	137
第八章	: 从铜金矿石中回收金	149
第一节	: 用浮选法综合处理铜——金矿石的方法	149
第二节	: 用湿法冶金法从矿石中综合 回收金和铜	156
第三节	: 对含金矿石氧化时铜的中和处理方法	160
第九章	: 从锑——金矿石中回收金	163
第一节	: 锑对含金矿石氧化过程的影响	163
第二节	: 处理锑——金矿石及其精矿的工艺流程	167
第十章	: 从含金泥质矿石中回收金	186

第一节	: 矿泥对含金矿石氰化过程的影响	186
第二节	: 处理含金泥质矿石时, 提高氰化 效果的方法	188
第三节	: 湿法冶金处理含金矿石的无过滤法	194
第十一章	: 从含金碳质矿石中回收金	209
第一节	: 含金碳质矿石及其精矿的直接氰化	211
第二节	: 氰化时活性炭的纯化剂	214
第三节	: 从氰化尾矿中解吸金	218
第四节	: 在含金碳质矿石的工艺流程中浮 选法的应用	220
第五节	: 含金碳质矿石及其精矿的热处理	224
第六节	: 用有机氰化物从含金碳质矿石中回收金	231
参考文献		233

绪 论

苏联1906——1970年发展国民经济的五年计划中规定了贵金属的产量将有显著的增加。在苏联的国民经济中贵金属生产占有重要地位。国家对贵金属工业的发展也很重视。贵金属生产的发展速度在很大程度上取决于对难处理矿石的处理和利用情况。近二、三十年来，对金矿石物料结构上的变化情况的分析表明：用传统工艺能够有效处理的、物质组成较简单的金矿石的数量在逐年减少。与此同时，物质组成复杂的难处理的金矿石数量则不断增加。这就需要采用机械选矿、湿法冶金、苛选、焙烧、火法冶金、离子交换等多种方法相配合的工艺流程和处理能力较大、效果良好的选冶设备来处理这部分金矿石。

复杂金矿石的物质组成各不相同，在自然界的分布亦甚广以及对最大限度地综合利用矿物原料的要求不同等，因此需要对这些难处理的金矿石进行分类。

金矿石的主要特点之一，就是矿石中主要价值组分——金的品位很低。目前开采的矿石中金品位一般为5~10克/吨。某些情况下，如果矿山地质条件较好，矿石的可选性也好，那么矿石的最低开采金品位可降至3——4克/吨。

金工业的最终产品是金品位为99.9%或更高的金合金。

因此，处理金矿石时的原料总富集比与非常高（10万—20万）。

典型的提金方法中包括下列三项工艺作业：

~ 2 ~

1. 用机械选矿法（主要是重选—浮选法）获得精矿（富金子品）和最终尾矿。

2. 初次用冶金方法（湿法 氧化、熔炼）处理含金精矿。

3. 再次用冶金方法处理（精炼）金子品。

选别含金矿石时，根据待处理物料的特性（即矿石的一般矿物组成、金的形态、金与矿石组份的共生程度等）不同，最佳的精矿产率波动在 2—5 到 10—15% 或稍高一些。在机械选矿循环中，物料的最大选矿比 S_1 为 10—20。

精炼作业的起始金子品是金品位相当高的物料（碎沉淀物—金泥、粗金等）。在此工艺处理中金子品的富集比 S_3 一般为 5—10。如果 S_1 、 S_3 和 S 的值相应为 20、10 和 2.103，那么用这些数据可以计算出初次冶金处理循环中矿石的近似富集比 S_2 ，即 $S_2 = 10^3$ 。

用机械选矿方法往往不能得到贫金的最终尾矿。它只能在下一步湿法冶金处理之前制备矿石方面起辅助作用。有时甚至根本不起作用。这时， S_2 的值可能大大超过前面列出的值。

因此，含金矿石的最大富集比 (10^3) 出现在精矿的初次冶金处理阶段。在这个阶段中基本上可以决定从矿石中提取金的技术—经济指标的好坏和确定待处理原料“难处理性”的典型特征。

现在所采用的含金矿石冶金处理方法中，氧化法的效果最好。由于此种溶剂（氧化剂）对金和银具有较好的选择性，又能将贵金属的溶解过程和沉淀过程有效地结合在一起，所以含金矿石的氧化工艺是一种切实可行的好方法。

在世界黄金生产实践中，氧化法应用得极为普遍。因此人们常以能否用氧化法进行处理这一尺度来评价处理某种含金物料的难度程度。

因此，我们的结论是：凡是由于某种原因而难以用氧化法处理的含金物料，均应列入《难处理含金矿石及其精矿》中。

我们在叙述从难处理含金矿石及其精矿中回收金的方法时，重点阐述了这些工艺过程的实质和在某种具体条件下采用这些工艺的可能性问题。苏联国立稀有金属科学研究所伊尔库茨克分所和其他科学研究单位在这方面进行了大量的科学研究工作并获得了许多最新数据，其中有一些科学研究工作是在本书作者的领导下或者是直接参加下完成的。

关于工艺设备的定型问题，本书只作了概略的研究。有许多新的处理含金矿石的方法，如弗腾焙烧法、离子交换法等是很有发展前途的，但是在国内黄金生产实践中还未被广泛采用，故未包括在此书内。

作者对于科学技术博士 И. К. СКОБЛЕВ 教授、候补科学技术博士 И. А. ЖУКОВ、研究员 В. Н. СМАГУНОВ、С. И. ХРАМЧЕНКО 以及国立稀有金属科学研究所伊尔库茨克分所的工程技术人员在研究难处理含金精矿的焙烧方面给予的巨大帮助表示衷心感谢。有关金精矿焙烧的部分研究结果已编入本书的第三、五、七和十一章内。

第一章 难处理含金矿石的特性

第一节 金与矿石组份的共生特性

用碱性氰化物从矿石中提取金的现代湿法冶金工艺称为典型的氰化法，其工艺流程如图1所示。

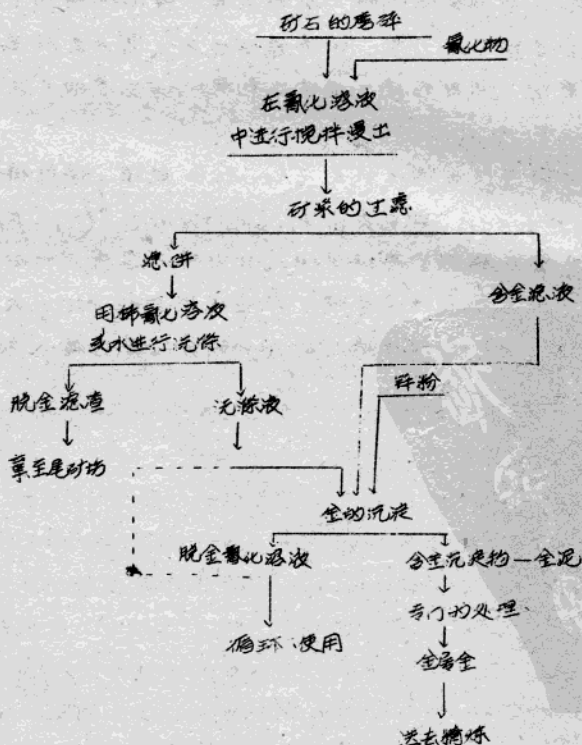


图1 典型的氰化工艺流程

用氰化液浸出矿石时，决定金回收率的因素很多，其中最主要因素是金粒与其共生的矿石组份和这些组份之间的亲分分离程度。

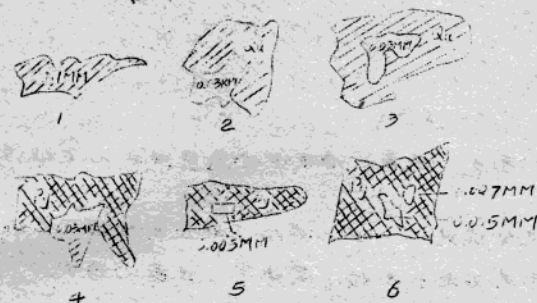


图2 金在原矿和精矿中的形态

1—游离金，2、3—与石英(SiO_2)共生之金；
4—与硫化物(主要的黄铁矿， Py)共生的金。

用氰化法处理含金矿石中主要含有下列三种形态的金(见图2)：

- 1) 游离金，
- 2) 与金属矿物呈：外部，共生状态的金(连生体)；
- 3) 微粒系浸于矿物中，主要是石英和硫化物中的金。

被表面薄膜包裹着的金粒(《隐包金》)属于特殊类型的金。

金属金在氰化液中的溶解过程具有明显的打散特性，所以金的溶解速度主要取决于金粒与溶液接触表面的大小。在最理想的条件下，金粒表面完全能与溶剂相互作用，结果就能使金粒早溶解。这一点与金同金属矿物的共生情况密切相关。

当与矿物一一体(铁的硫化物和氧化物等)连生的金溶解时，金粒与氧化剂(其中包括氧)之间的电子交换是一因素起

~ 6 ~

放大作用 (见图 3)。

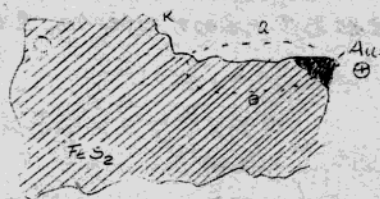
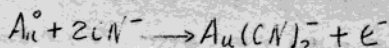


图3 在氰化溶液中金与黄铁矿的接触情况

在这种情况下，金的溶解过程是由金粒与夹杂着金粒的那种矿物形成的电子对的作用结果。在氰化溶液中，金常作为阳极，而电子对的另一组份 FeS_2 作为阴极，向着金进行扩散的阴离子 CN^- 按下列反应式使金溶解：



分离出的电子将其电荷传给阴极，去极化作用也发生在阴极表面上，也就是说溶液中存在的氧化剂使电子产生了中和作用。

因此，在尾矿物料中呈单体颗粒和亚单体状态存在的金，完全可以在浸出循环中加以回收。这时，金的损失量则取决于微粒浸染金的多少（见图 2）或者完全不与溶剂接触的金的确化物数量。换言之，氰化时转入溶液中的金最高回收率，可用下列简单公式表示：

$$E = \frac{a - b}{a} \text{ \%}$$

式中：a — 尾矿的金品位

b — 尾矿中微粒浸染金的数量，b 和 a 用同一个单位来表示。

当矿石的磨矿细度相同时， b 值可用金的粒度特性加以测定，而金的粒度特性首先取决于金矿床形成的地质条件。

在处理组成复杂的含金矿石及其精矿时，氧化尾矿中金的实际品位一般超过用以表示矿石中微粒浸染金数量的 b 值。

产生这种差异的主要原因有：

- 1) 在游离金颗粒表面有妨碍金粒与溶剂（氰化物）相接触的矿物薄膜。
- 2) 尾矿中存在着表面活性物质。这些活性物质在氧化溶液中能起金的天然吸附剂的作用；
- 3) 某些矿石组份对金有化学抑制作用。

第二节 金粒上的表面膜及其对氰化指标的影响

矿石中存在着以表面膜所包裹的金是极为普遍的现象。在所谓“铁帽”类型的铁的氧化矿石中常常遇到这种金。在这种情况下，金粒上的表面膜主要成分铁的含水（水合）氧化物，后者使金粒上具有一种类似锈铁（“锈”金）的深棕色。有时在表面膜中还有一些铁和铁的无水氧化物以及原生含金矿石氧化带所特有的化合物。

除了有上述的原生膜外，在含金矿石选别和冶金工程中也常会在金粒表面上生成次生膜，这也是造成氰化时回收率不高的一个原因。

在每一金矿石的氰化过程中，金粒上也能生成由酸的化合物所组成的次生薄膜。碱性氰化溶液中一般都含有这种化合物。

~ 8 ~

如果溶液中铜、锌和某些金属的含氧化合物浓度很高，那么金表面上也会生成化学膜。

对含金硫化矿物进行焙烧时，金粒上形成的表面膜对氧化指标有很大的有害影响。这些表面膜的产生与焙烧时矿石中某些易熔组分（砷、锑、铅等的矿物和化合物）的氧化密切相关。因为这些易熔的矿石组分氧化后能敷在金粒表面，使金粒在普通的氧化剂中无法溶解。

金粒上存在表面膜也是金随氧化尾矿损失量多的主要原因。所以必须采取特殊措施来防止产生这种表面膜。或者采用一些经济可行的办法来破坏已生成的薄膜。煅烧（热处理）法，有时在氧化之前对矿石或精矿进行烘干等都是为了防止破坏薄膜的有效方法。例如，苏联某金厂将浮选精矿在 $120-150^{\circ}\text{C}$ 温度条件下进行烘干。结果，随氧化尾矿损失的金由20克/吨降低到4克/吨。这是因为通过烘干使覆在单体金粒表面上并阻碍金粒与氧化剂接触的浮选药剂薄膜遭到了破坏。

在黄金工业中，对含有“糖”金的矿石进行热处理是众所周知的。在煅烧过程中，铁的水合氧化物薄膜被分解并析出结晶水，从而生成多孔状的氧化物 Fe_2O_3 。这种多孔氧化物已不再能阻碍金在氧化物中的继续溶解。长期以来，匈牙利西拉「KOHNEMLAP TOLNA MZHH」金厂就是用这一方法处理矿石。该厂用滚筒干燥机对矿石进行预先煅烧。煅烧温度为 $200-300^{\circ}\text{C}$ ，结果使金总回收率由60%提高到70%。

第三节 用某种矿石组份从 氰化溶液中吸附金

很早以前，人们就知道用表面活性物质从碱性氰化溶液中吸附沉淀金。在此基础上产生了用活性炭和高分子交换树脂从氰化溶液和矿浆中吸附金的方法。近几年来，这些方法在工业上已得到应用。

碳质页岩是金的天然吸附剂，其活性最高。

下列例子可以说明碳质页岩对金-氰络合物具有很高的吸附性能。

选别金-碳质矿石所得已淋洗精矿（含金约为50克/吨，沥青页岩状活性炭7.4%）与纯金-氰化溶液（ Al_4-100 毫克/升）一起搅拌，6小时。这时精矿中的金品位由50克/吨提高到300克/吨，即提高了6倍多。

除了碳质矿物外，一些硅酸盐、铝酸盐、高岭土、石英以及其它矿石组份都能起到从氰化溶液中吸附金和银的天然吸附剂的作用。

用下列几种主要方法可以中和某些天然吸附剂对金和氰化物的有害影响：

用肥皂、油和其它药剂能使吸附剂，其中包括碳质物质的表面钝化。因为这些药剂能在表面活性矿物颗粒上形成保护膜，从而防止金在这些矿物上沉淀。

用吸附浸出法，即往氰化矿浆中加入活性炭粒或者高分子交换树脂。因为它们对金的吸附能力比现有的许多天然吸附剂高

得多。在这种情况下，被氰化物溶解的金就沉淀在活性炭或者树脂上。然后用筛子使活性炭或者树脂与脱金后的矿浆分离。经过进一步处理以回收金。

用能起解吸金作用的药剂对氰化后的矿石和矿物表面吸附有金的矿石进行辅助化学处理。例如，在处理含碳质物质的矿石时，可用稀硫化钠溶液作为金的解吸剂。然后用鞣质或其它方法从硫化钠溶液中置换沉淀金。

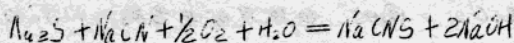
处理含有大量天然吸附剂的矿石时，普遍采用的工艺是降低氰化物料中吸附剂的含量。为此，应在矿石处理工艺中增设矿泥的洗涤、磁选、氧化焙烧等准备作业。这时得到的吸附剂含量高的中间产品可根据其中所含金和其它有价值组份的多少，或是排弃尾矿场，或是在单独的循环中进行冶金处理。

第四节 氰化金的化学抑制

在含金矿石和精矿中常常含有严重阻碍氰化物溶解金的物料和化合物。这种现象称为氰化时金的抑制。

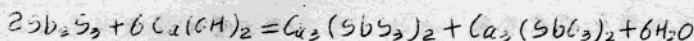
溶液中缺氧是金受到化学抑制作用的最主要原因。引起缺氧的原因在于矿矿中存在有物质——还原剂或者在氰化过程中直接生成还原剂所致。

湿法冶金处理含金矿石及其精矿的生产实践表明，铁的矿物和化合物（ FeS 、 FeSO_4 等）是氰化溶液中氧的最强的吸附剂。可溶的碱性硫化物（ Na_2S 、 K_2S ）也是氧的最强的吸附剂。这些吸附剂对生成原因是：在氰化溶液中铁和铜的硫化物与碱子生反应的结果。有时，碱性硫化物就包含在湿法冶金过程中使用的原始试剂（氰化物）中。在加有氧的情况下，可溶性硫化物与碱性氰化物相作用而生成硫化氰酸根

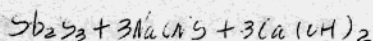
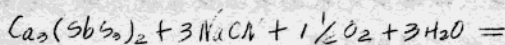


当矿石中存在有硫化锑矿物(辉锑矿、锑与银和其它金属的复硫化物 $nMeS \cdot mSb_2S_3$) 时, 也会产生类似情况。

当硫化锑与石灰或苛性碱相互作用时, 会生成硫化亚锑酸盐和氧化亚锑酸盐 (сульфидо- и окислосодержащие) :



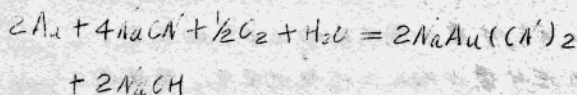
在存在氧的条件下, 硫化亚锑酸盐被氧化物分解, 其反应式如下:



因此, 就生成相应的硫化亚锑酸盐和次生硫化锑 Sb_2S_3 , 后者在溶液中沉淀。硫化锑与碱和氧化物重新起反应并吸收氧。这一反应一直进行到全部硫化锑完全变成亚锑酸盐 (окислосодержащие) 为止。当矿石中存在锑的简单硫化物(雄黄 As_2S_3 、雌黄 AsS_3) 时, 也会发生同样情况。

对含金矿石进行氧化时, 某些铜化合物、有机物质和其它物质(其中包括浮选药剂)同时能吸收溶液中的氧。

在含金矿石的氧化过程中, 氧的总耗量通常会超过反应时理论上所需 O_2 量的几百倍, 甚至上百倍。



例如, 为使含金 10 克/吨的矿石中的金完全溶解, 就需

~12~

要 0.1 克/吨 O_2 。同时，如果尾矿中含有 0.01% 的磁矿 FeS_2 ，要使它按反应式 $FeS_2 + 2O_2 = FeSO_4 + S$ 进行氧化，那么就需要耗用 53 克/吨 O_2 。进行氧化时，在合金矿石及其精矿中存在的矿物—还原剂对转入溶液中的金回收率将产生有害影响，为要消除这些矿物在氧化过程中的有害作用，必须对氧化溶液或矿浆进行渗氧。

在某些情况下，应当在氧化溶液与要处理矿石接触之前对原始氧化溶液渗氧。为此，应在储液槽的溶液中加入 6 大气压空气。这样就能增加溶液中 O_2 的浓度。但是，当压力降到大气的压力之后，溶液中 O_2 的浓度更降低到 $0-8$ 毫克/升。因此，这种方法只能解决尾矿溶液中缺氧的问题，而不能强化整个氧化阶段中金的溶解过程。

往矿浆中直接充气（特别是加入重）的办法效果较好。在空气搅拌浸出槽（霍尔型，乌斯列斯型，带有空气升液口的搅拌浸出槽等）中利用这一原理时效果更好。上述搅拌浸出槽除了对矿浆进行机械搅拌外，还能重在一个或几个安装在槽内的空气升液管往矿浆中通入压缩空气并使矿浆中的空气达到饱和。在这种情况下，经常和均衡地在矿浆中给入空气具有重要的作用。

在这方面，非洲《B2H 73HK》选金厂的生产经验是一个很好的例子。该选金厂对氧化矿浆（ 0.62% KCN）搅拌浸出工程的研究结果表明：如果矿浆中缺少足够的氧，就会使尾矿中的金品位提高 $0.016-0.031$ 克/吨。所以，该选金厂现在是每分钟往 1000 米³矿浆中固定地给 6 米³的空气。

为了往矿浆中给入上述量的空气，曾使用了二段空气压缩机的一段。由于改用了新的充气方法，使矿浆中未溶解的单质金品位实际上降到零（17）。

对具有高“还原性能”的含金矿石进行氧化时，可以采用空气搅拌浸出槽（帕尔卡槽）。用这种设备对矿浆进行搅拌浸出时，不需要另外通入压缩空气。

目前，空气搅拌浸出槽已经在不同规模的冶金厂中广泛而有效地使用着。例如，南罗得西亚《Питчхейл》矿山的—个氧化厂（其处理能力150吨/日）从1960年就采用了四台依次排列的帕尔卡搅拌浸出槽对矿浆进行搅拌浸出。每台搅拌浸出槽高0.4米，直径3米。四台搅拌浸出槽可以保证矿石与溶液的总接触时间达到7小时。南非《Латгронтейн Майн Лимитсд》公司—些大型冶金厂用的帕尔卡搅拌浸出槽高20米，直径4.6米。搅拌浸出槽内可装入含固本14%的矿浆700吨。

在高压空气或氧的条件下进行氧化，尽管其方法比较复杂，但是它却是提高氧化溶液中金溶解速度的—个最好办法。苏联某些矿区矿石的试验研究证明：在空气压力为7个大气压的压热浸出过程中对矿石进行氧化时，金溶解的速度将大大加快。处理石英—泥质矿石（巴列伊矿区）时，金溶解速度提高了9倍。处理黏土质矿石（明加克斯克矿区）时提高了23倍。处理难溶的矿石（巴克—乌萨克斯克矿区）时，金溶解速度提高了35倍[2]。

在空气或氧的压力作用下，对金矿矿石及黄铁矿进行氧化的效果很好。在这种情况下可以加快金的浸出过程并能辅助回收一部分金，而在通常条件下这部分金是无法回收的。

在氧化过程中，氰酸还原剂吸收并不是金受到化学抑制的唯一原因。消耗氰化物的物质也受金受到类似的化学抑制，即 NaCN 及氰化物相应的矿物或化合物状态存在于矿中。属于这类矿物组份的有：所有的氯化铜矿物和大部分硫化铜矿物