

某金矿矿石含金细粒级偏析特性研究

陈宏伟

中国黄金集团建设有限公司, 北京 101300

DOI:10.61369/ME.2025010022

摘 要 : 针对某金矿矿石含金细粒级偏析的特性, 从分析金在细粒级富集原因入手, 分别进行原矿石、浮选原矿、尾矿和废石选矿试验研究, 创新选矿技术新思路: 分级富集、碲金矿回收、快速浮选和柱浮选等, 达到优化产品质量、提高金回收率和矿产资源综合利用率试验目的。值得小秦岭及同类企业推广应用。

关 键 词 : 细粒级偏析; 碲化金; 筛分富集; 柱浮选; 快速浮选; 废石资源

Application of Ultra-Small-Scale Gold Beneficiation Experimental Technology in Jinqu Laboratory

Chen Hongwei

China National Gold Engineering Co., Ltd, Beijing 101300

Abstract : It is the eternal subject of the gold beneficiation to optimize product quality, improve gold recovery rate and the rate of comprehensive utilization of mineral. How to use small test equipment to find suitable beneficiation methods, process conditions, etc. through fast and effective methods, and provide reliable parameters for production, is the challenge for every engineer in beneficiation. Using the gold pan in gravity separation test, the Jinqu Laboratory integrated the gravity separation-flotation test process and achieved a technical breakthrough in total recovery rate of gold. In view of the gold fine-grained enrichment characteristics of Jinqu ore, the process of flash flotation, enhanced fine-grain grade gold recovery and comprehensive recovery of tellurium were tested and obtained good technical achievement. Considering its advantage of optimizing the beneficiation process and increasing economic benefits, it is worth to be promoted and applied.

Keywords : study on ore separability; calaverite; full-scale test analysis; flotation column; flash flotation; tellurium gold

前言

河南某金矿企业的生产规模1100t/d, 采用尼尔森重选-浮选联合工艺流程, 金回收率稳定在90.5%左右。生产28年来, 取得了较好的技术经济指标。近年来随着开采中段逐年下降, 金矿资源呈现出矿石贫化和性质复杂(贫、细、杂和泥化)的特点, 在目前金价高起的时代, 该矿的克金利润依然较低, 企业实现高质量发展难度较大。该金矿选矿技术人员围绕优化金精矿质量和提高选矿回收率2个试验研究主题, 创新、应用选矿新工艺。在试验研究中发现, 豫西小秦岭金矿石有明显的细粒级偏析现象: 金在细粒级相对富集。针对这一工艺特性, 试验探索出了多项选矿技术创新的新思路, 试验指标理想, 效果明显。

一、矿石性质

基本性质: 该金矿矿床工业类型为含金石英脉和构造蚀变岩型, 矿床成因类型为中-低温热液型金矿床。矿石自然类型主要为含金石英脉, 少量为构造蚀变岩型和多金属硫化物角砾岩。矿石中主要金属矿物有黄铁矿、自然金、银金矿、方铅矿, 少量黄铜矿、闪锌矿、白钨矿、铜蓝, 个别地方有褐铁矿。脉石矿物

主要是石英, 其次是斜长石、绢云母、钾长石、角闪石、铁白云石等。从原矿石金矿物特征看, 主要金矿物是自然金, 以粗粒为主, 大部分是粒间金, 与黄铁矿紧密伴生, 其次是银金矿等。

细粒级偏析原因分析: (1) 众所周知, 金是最稳定的金属元素, 在自然界中金除了以单质的自然金及银金矿产出外, 仅与碲形成天然化合物碲化金^[1], 有多种类型的碲化物形式存在, 如碲金矿、碲金银矿、板碲金银矿、针碲金银矿等。已知27种含金矿

物中，有11种是金的碲化物。大多数金矿床中都伴有微量的碲，只是因其矿物颗粒较小，而不为人们所注意^[2]。通过显微鉴定和应用电子探针微束分析，查明该金矿金矿石中碲化物主要为碲银矿和碲金银矿，少量碲铅矿和碲铋矿，它们呈密切共生的集合体或联生体产出在黄铁矿等硫化物及石英脉石矿物粒间或裂缝中，碲化物是金和银的重要载体，碲富集时金和银含量也高^[3]。但碲化物性脆易过粉碎，这是该金矿金矿石细粒级相对富集的主要原因。（2）黄铁矿、黄铜矿等载金体较脆，可碎性比石英、斜长石等脉石矿物要好得多，故在破碎过程中，矿石没黄铁矿、黄铜矿等矿物解离面破裂，使脉石和载体体分离，从而使这些载金体变为细粒级高品位矿石，金表现出明显细粒级偏析^[4]。

深部（中段标高200m）矿石样品多元素分析结果见表1。原矿石磨细到-0.074mm占90%左右时，-0.0374mm粒级金品位4.42g/t，金属分布率63.12%，金在细粒级富集特征明显^[5]。

表2 碎矿产品粒度筛析结果

坑口名称 / 取样时间	粒度 / mm	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	4505.00	55.05	0.68	0.68	3063.40	12.62
1250/2023.12.15	-1.70+1.00	1096.00	13.39	1.49	5.77	1633.04	6.73
	-1.00+0.150	1592.00	19.45	9.15		14566.80	59.98
	-0.150	990.00	12.11	5.07		5019.30	20.67
	合计	8183.00	100.00	2.97		24282.54	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	3760.00	55.32	0.44	0.44	1654.40	18.16
1403/2024.1.30	-1.70+1.00	897.00	13.20	1.97	2.46	1767.09	19.39
	-1.00+0.150	1477.00	21.73	1.77		2614.29	28.69
	-0.150	663.00	9.75	4.64		3076.32	33.76
	合计	6797.00	100.00	1.34		9112.10	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	5554.00	55.78	0.67	0.67	7312.68	27.91
1060/2024.3.22	-1.70+1.00	1262.00	12.67	2.15	4.29	3381.64	12.91
	-1.00+0.150	1918.00	19.26	3.06		10766.41	41.10
	-0.150	1224.00	12.29	5.63		4735.74	18.08
	合计	9958.00	100.00	2.63		26196.47	100.00
坑口名称 / 取样时间	粒度 / 目	样品质量 / g	质量占比 / %	品位 / (g.t ⁻¹)		金属量 / g	分布率 / %
	+1.70	6970.00	66.03	0.44	0.44	3066.80	23.43
950/2024.4.27	-1.70+1.00	1038.00	9.83	1.81	2.79	1878.78	14.35
	-1.00+0.150	1489.00	14.11	2.14		3186.46	24.35
	-0.150	1059.00	10.03	4.68		4956.12	37.87
	合计	10556.00	100.00	1.24		13088.16	100.00

从表2可见，-1.00mm粒级金品位明显偏高，是典型的细粒级偏析现象。+1.70mm粒级质量占到55%以上，原矿石如果分离出这部分矿石，金品位将有很大的提高。

原矿石偏析特性应用性分析：（1）利用矿石细粒级偏析特性，采用简易的筛分富集办法产出高质量金矿石；也可以使大量尚不能回收的矿产资源得以利用，相对增加了矿山储量，延长了企业服务年限。（2）对于小秦岭地表氧化矿石，碎矿后进行分级处理：粗粒堆浸，矿堆的渗透性和透气性较好，省去了制粒堆浸的烦琐和成本投入，增加堆体高度和缩短浸出时间都可以提高处理矿量^[4]；细粒级，金矿物得以有效富集，采用浮选或炭浆工艺

表1 深部矿石多元素分析结果

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	TFe	S
含量 / %	3.80	< 5.00	0.036	0.027	0.01	4.97	2.00
元素	As	C	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Mn
含量 / %	< 0.005	0.88	4.56	1.37	5.71	63.68	0.10

注：Au、Ag的单位是 g/t。

二、原矿石选矿试验研究

该金矿选矿品位呈逐年下降趋势，平均原矿品位3.94g/t，2024年末的原矿品位仅2.19g/t，低于盈亏平衡品位2.5g/t。原矿石最大粒度350mm，无论在矿山堆场，还是选矿原矿场矿堆取样，都存在着操作繁琐，工作量大且代表性不能保证的问题。原矿样采集以破碎产品（-10mm）为对象，取样点设在碎矿至细料仓胶带运输机皮带上。碎矿产品粒度筛析见表2。

生产时，入磨粒度小且较易磨碎，磨矿效率大大提高，可有效降低了生产成本。

三、浮选原矿选矿试验研究

（一）该金矿矿石金碲化物富集试验

地质资料显示，该金矿矿石中碲化物是金和银的重要载体，但金碲化物含量较少。富集金碲化物试验，主要根据金碲化物有性脆磨矿时易泥化的特点，选取在分级机溢流处采取矿样。试验工艺流程见图1。试验A条件指标：Na₂CO₃ 1105g/

t, 乙基黄药 4g/t, 2#油 30g/t。试验B条件指标: $[CN^{-1}]$: 0.02%, $[CaO]$:0.15%, 2#油 30g/t。用 Na_2CO_3 或 $NaCN$ 作抑制剂, 添加少量捕收剂或不加捕收剂, 均能有效捕集碲元素。

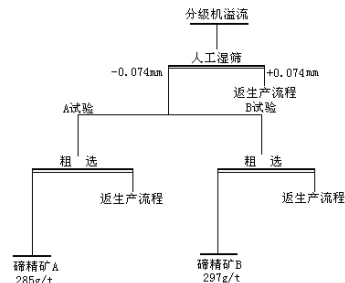


图1 碲富集工艺流程图

试验用选冶联合工艺, 采用优先浮选方法将碲金矿物富集为高品位金碲精矿, 用氰化法提取矿石中易浸金, 将金回收率从

90.50%提高到97.02%, 提高效果明显。同时, 综合回收了碲资源^[6]。

（二）浮选柱回收细粒级金选矿试验研究

浮选技术是矿物工程领域中应用最为广泛的一种方法。根据该金矿矿石金嵌布粒度特点, 需要将其细磨才能保证含金矿物的充分解离, 如该金矿矿石磨矿细度试验结果表明, 磨矿细度-0.074mm占85%时, 金回收率才能有较明显提高^[7]。另一方面, 磨矿细度增加致使原矿中细泥相应增加, 微细粒脉石与气泡粘附后后难以脱落, 因粘滞作用进入泡沫层, 甚至在有用矿物表面形成罩盖, 严重影响浮选技术指标。该金矿公司应用具有深槽型压气式浮选柱(区别于内叶轮主导的离心矿化方式的传统浮选机), 进行浮选柱半工业试验^[8-9], 试验从浮选搅拌桶获取原矿, 试验规模5t/d, 和生产同步进行, 1403、1060坑口矿石生产和试验产品筛析对比结果见表3。

表3 1403、1060坑口矿石生产和试验产品筛析对比统计表

坑口	粒级/ μm		浮选原矿粒度组成			精矿粒度组成			尾矿粒度组成			粒级金回收率/%
			产率/%	品位 $g\cdot t^{-1}$	分布率/%	产率/%	品位 $g\cdot t^{-1}$	分布率/%	产率/%	品位 $g\cdot t^{-1}$	分布率/%	
1403	+74	试验	39.94	1.26	17.19	11.91	62.07	8.73	41.34	0.49	43.38	61.60
		生产				14.64	38.85	10.78	40.87	0.45	38.39	65.04
	-74	试验	20.03	1.71	11.70	22.91	40.84	11.05	20.43	0.34	14.87	80.79
		生产				21.78	42.04	17.35	20.68	0.33	14.25	81.34
	-38	试验	40.03	5.20	71.11	65.18	104.16	80.21	38.23	0.50	41.75	90.82
		生产				63.58	59.65	71.87	38.45	0.59	47.36	89.54
	合计	试验	100.00	2.93	100.00	100.00	84.64	100.00	100.00	0.47	100.00	84.43
		生产				100.00	52.77	100.00	100.00	0.48	100.00	84.39
1060	+74	试验	40.67	1.13	12.00	10.08	48.36	6.20	43.45	0.41	38.55	64.26
		生产				12.37	48.36	11.21	50.49	0.39	40.58	66.02
	-74	试验	19.62	3.13	16.03	20.14	57.34	14.69	24.82	0.39	20.95	88.14
		生产				20.57	48.01	18.50	17.73	0.39	14.25	88.26
	-38	试验	39.71	6.95	71.97	69.79	89.11	79.11	31.72	0.59	40.50	92.12
		生产				67.06	55.95	70.29	31.77	0.69	45.17	91.20
	合计	试验	100.00	3.83	100.00	100.00	78.61	100.00	100.00	0.46	100.00	88.51
		生产				100.00	53.38	100.00	100.00	0.49	100.00	88.34

从表3可以看出: (1) 浮选原矿出现明显的细粒级偏析现象, 有用矿物向细粒级集中, -38 μm 粒度级别产率占40%, 金分布率71%以上。(2) +74 μm 粒级生产金回收率显高于试验, -38 μm 粒级试验金回收率有优势。(3) 浮选机对微细粒金分选效果差是造成精矿品位偏低的主要原因, 也是浮选柱的优势所在。

柱浮选适于回收微细粒级金, 该金矿千吨规模选矿厂, 两个系列浮选机多达28台, 设备效能低, 操作难度大。利用柱、机浮选各自优势, 若采用柱机联合工艺流程, 通过装备优化, 强化浮选过程,

简化浮选工艺, 金回收率可提高1-1.5%以上, 经济效益显著^[10]。

（三）浮选原矿石快浮选矿试验研究

金碲化物可浮性较好, 仅用起泡剂即可将其浮起。但碲化金性脆, 易过粉碎, 宜采用优先浮选流程^[11]。试验得知该金矿矿石含有金碲化物, 非常适合快浮选矿工艺^[12]。该金矿公司选矿技术人员进行了快浮试验, 采样点: 浮选药剂搅拌桶(重选作业后); 生产浓细度: 浓度(34 $\pm$ 2)%, 磨矿细度(62 $\pm$ 2)%; 药剂: 11#油和异戊基黄药; 浮选时间1min。试验结果见表4。

表4 快浮试验结果

坑口名称	浮选原矿	浮选精矿			浮选尾矿	作业回收率/%
	品位/($g\cdot t^{-1}$)	品位/($g\cdot t^{-1}$)	精矿产率/%	金富集比	品位/ $g\cdot t^{-1}$	
1060	1.52	40.83	2.28	26.86	0.60	61.34
1250	1.86	40.12	3.24	28.25	0.58	69.83
1168	1.07	32.66	1.97	30.52	0.44	59.84
950	1.98	41.13	3.85	20.77	0.41	80.06

从表4可知，试验浮选1min，金回收率达55%以上，金富集比在20-30，远高于正常浮选14-16，快浮精矿完全可作为最终选矿产品。快速浮选实质也体现了浮选作业的“快金早收”选矿理念。目前，该金矿公司增加快速浮选的工艺改造正在实施进行中。

四、浮选尾矿再磨再选试验研究

该金矿公司选尾矿筛分分析显示，金流失呈现典型的“两头跑矿”现象。在实验室再磨再选试验基础上，将选一车间部分浮选尾矿泵入二车间再磨、浮选系统，进行尾矿的生产试验：试验精矿品位在18g/t以上，富集比35；不足之处是磨矿细度偏低影响了金回收率（30-35%）^[13]。

对于金-碲矿石最适宜采用阶段磨矿阶段浮选的选别流程^[14]。该金矿选矿厂在不改变选一车间现设备工艺前提下，将选二车间技术改造为相应的再磨再选（柱机联合）流程，形成阶段磨浮选矿生产工艺，1段重点在选矿产品提质增效上，2段主要控制流失提高回收率，这是该金矿选矿工艺优化又一思路。

五、废石资源综合利用试验研究

豫西小秦岭多为坑采岩金的石英脉型含金矿石，矿产资源开发过程中，产生了大量废石等固体废弃物。李建政等人试验通过简单的破碎筛分从0.43g/t品位的废石中预先富集出品位0.78g/t的金矿石，经常规浮选出品位24.16g/t的金精矿，金回收率83.11%；破碎筛分超前抛尾符合建筑碎石产品质量要求成为建筑材料^[15]。小秦岭废石作为二次资源综合利用主要基于其金细粒级富集和石英脉含金的性质。

案例一 矿石在鄂式破碎机粉碎时加入冲洗水，破碎产品直接进入摇动筛完成分级作业，共4个粒级的产品：-5mm、+5mm-10mm、+10mm-20mm、+20mm-30mm和+30mm。+30mm级别物料用装载机返回破碎，+4mm-10mm、+10mm-20mm和+20mm-30mm三个粒级物料可作为建筑骨料，-5mm物料经洗砂机后选矿回收金矿物。综合回收利用工艺流程见图2。

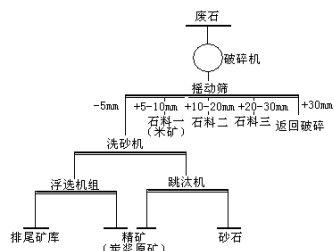


图2 案例一废石综合利用工艺流程图

案例一可用圆筒旋转筛替代摇动筛作业，适合于小规模废石生产，优点是投资少，湿式破碎和筛分省去除尘设施。缺点是自动化程度低，摇动筛动力平衡差、筛网磨损快，用水量大，生产效率低。

案例二 废石经2段1闭路碎矿流程，产出3个粒级的产品：-5mm、+5mm-20mm和+20mm-30mm。+5mm-20mm和+20mm-30mm两个粒级物料可作为建筑骨料，-5mm物料经洗砂机后选矿回收金矿物。综合回收利用工艺流程见图3。

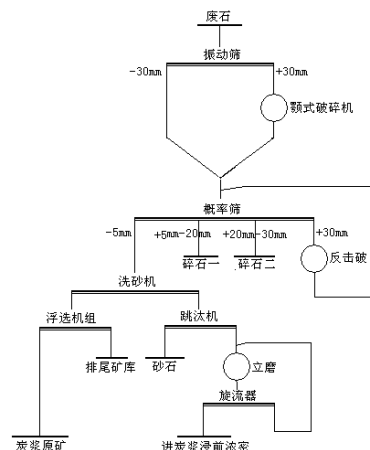


图3 案例二废石综合利用工艺流程图

案例二配合炭浆厂进行的废石生产，使用概率筛，是对中、细粒度物料的精细筛分，与普通筛机相比，筛分效率非常高。立式球磨机对细粒含金有一定的磨浸效果，适于性质复杂金矿石的浸出^[16]。

案例三 该金矿公司因小秦岭自然保护区生态环保形势需要，关闭绝大多数采矿坑口，余下的4个生产矿并仅能保证选矿厂生产半年时间。在不改变现生产工艺流程下，将现碎矿工段改造后进行废石制砂生产，同时回收其中的金矿物，是比较好的工艺思路。现破碎工艺流程：矿山原矿石（-400mm）经美卓诺德伯格C80鄂式破碎机粗碎、美卓诺德伯格HP200圆锥破碎机细碎和2YKER1545中心振动筛组成的2段1闭路碎矿流程，筛孔尺寸分别为20×22mm和10×10mm，碎矿产品粒度-10mm。改造后的机制砂石工艺流程见图4。主要产出2个粒级的产品：12石料和砂石，综合回收重砂精矿。

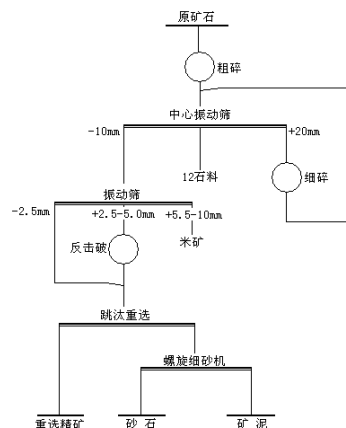


图4 金集公司废石生产砂石工艺流程图

该金矿公司改造生产砂石对原工艺流程改动小，投入少、上马见效快。缺点：原矿石破碎前缺少预先筛分，制约生产矿石

量；装机容量750kw，动力费用高；适应现场条件生产线拉长，不利于生产管理。

六、结语

（1）矿产资源是人类赖以生存的主要物质基础之一，中国85%的原材料和95%的能源来自矿产资源。其开发过程中丢弃的大量废石带来的环境污染，也已成为当今世界持续发展面临的最主要问题之一。基于对该金矿矿石石英脉型含金及金在细粒级偏析特性研究，原矿石或废石均能在破碎筛分时有有效富集金矿物，

渣石用作建筑骨料。对于综合利用、绿色矿山（环境治理和生态恢复）有着重要意义。

（2）碲是有较高应用价值的稀有分散元素，被誉为“现代工业、国防与尖端技术的维生素，创造人间奇迹的桥梁”。强化碲资源综合回收利用同时，促进金回收率的提高，是非常好的选矿思路。

（3）该金矿矿石适宜快速浮选，柱浮选对细粒矿物选别独特优势等，为选矿工艺、装备优化，提高矿产资源开发利用水平提供了科学理论依据。

参考文献

- [1]孙骥.金银冶金（第2版）[M].北京：冶金工业出版社，2005.
- [2]《贵金属生产技术实用手册》编委会.贵金属生产技术实用手册[M].北京：冶金工业出版社，2011.
- [3]宋庆双，符岩.金银提取冶金[M].北京：冶金工业出版社，2012.
- [4]焦瑞琦.低品位氧化金矿石选矿工艺的优化与改进[J].中国矿山工程，2014，43(1):33-34.
- [5]石吉友，刘宁，陈兵，等.深部含金矿石选矿试验报告[R].长春：长春黄金研究院，2014.
- [6]焦瑞琦，杨玮，张志伟，等.豫西小秦岭碲金矿选矿回收试验[J].现代矿业，2018(5):88-91.
- [7]焦瑞琦.某金矿选矿厂“扩能优化”研究及试验探索[J].中国矿山工程，2015，44(4):53-54.
- [8]沈郑昌.柱浮选技术[M].北京：冶金工业出版社，2015.
- [9]吴荣，石南南.旋流-静态微泡浮选柱在某微细粒金矿浮选中的应用[J].现代矿业，2017(6):124-126.
- [10]焦瑞琦，王德明，张长昆，等.某金矿选矿厂优化生产工艺试验研究[J].黄金，2017，38(12):44-45.
- [11]黄礼煌.金银提取技术（第2版）[M].北京：冶金工业出版社，2005.
- [12]焦瑞琦，薛敬营.某金矿矿石无氰法选矿回收金试验研究[J].有色金属设计，2017，44(1):13.
- [13]焦瑞琦，王德明，张志伟.某金矿尾矿库扩容改造工艺优化及尾矿资源综合回收试验[J].现代矿业，2018(1):142-143.
- [14]《黄金生产工艺指南》编委会.黄金生产工艺指南[M].北京：地质出版社，2000.
- [15]李建政，王安理，范尚立，等.小秦岭金矿区废石资源综合利用试验研究[J].矿冶工程，2010(12):51-53.
- [16]孟宇群，吴敏杰，段礼锁.TW型塔式磨浸机在处理含砷难浸金精矿中的应用[J].黄金，1999，20(7):40-41.