

# 第二届全国金银选冶学术会议 论文集

中国有色金属学会选矿学术委员会

中国有色金属学会重有色金属冶金学术委员会

中国选矿科技情报网

1987年4月

## 目 录

1. 工艺矿物学在选冶工艺研究中的应用 ..... 广州有色金属研究院 许志华 (1)
2. 山东铜锡山矿金的工艺矿物学研究 ..... 广州有色金属研究院 张炜光 许志华 (8)
3. 凡口铅锌矿深部矿体矿石中银的选矿工艺特性及其可选性的评定  
..... 北京矿冶研究总院 红 钢 (15)
4. 氧化含金石英脉矿石的浮选 ..... 广州有色金属研究院 郭庆华 (20)
5. 全泥氰化法处理含金氧化矿石的研究 ..... 北京有色冶金设计研究总院 罗淑华 (24)
6. 黄沙坪铅锌矿中银的赋存状态及浮选结果  
..... 冶金部长沙矿冶研究院 汤新命 占哲明 田忠诚 刘 靖 (29)
7. 桐柏银矿选矿工艺流程的研究 ..... 北京有色金属研究总院 张秀华 (32)
8. 弋阳铜矿伴生银的走向及损失状态的研究  
..... 北京有色金属研究总院 杨奉兰 高洪山 (44)
9. 天台山银铅锌矿下部矿体银赋存状况研究 ..... 北京矿冶研究总院 汪淑芬 (53)
10. 金—砷黄铁矿—黄铁矿浮选分离 ..... 湖南有色金属研究所 温蔚龙 (60)
11. 安徽铜陵代家冲铁帽金的赋存状态及工艺性质研究  
..... 广州有色金属研究院 罗菊元 (67)
12. 重有色金属矿伴生金银的综合回收 ..... 长沙有色冶金设计研究院 李庆芬 (73)
13. 金矿石浮选的理论与实践 ..... 东北工学院 龚焕高 (82)
14. 强化含金黄铁矿浮选的研究  
..... 北京钢铁学院 张庆松 东北工学院 龚焕高 陈贵宾 (101)
15. 醚醇起泡剂在金矿的应用 ..... 北京有色金属研究总院 董振发 (109)
16. 煤焦炭吸附浮选法回收金工艺研究及生产实践 ..... 烟台黄金设计研究院 门忠义 (116)
17. 硫脲法从酸浸渣中提取银 ..... 四川冶金研究所 宁志刚 (120)
18. 国外树脂矿浆法提金综述 ..... 核工业部北京五所 蔡 存 孙 宇等 (131)
19. 国内堆浸法提金的现状及发展趋势 ..... 沈阳矿冶研究所 林国琪 (138)
20. 多金属含金精矿的硫脲提金试验研究 ..... 江西冶金学院 黄礼煌 (144)
21. 铜录山含金银 Cu—Fe 共生氧化矿综合利用的研究  
..... 广州有色金属研究院 周维志 (153)
22. 磨矿回路中的简单重选法 ..... 岫岩金矿新甸选厂 孙相连 徐振东 (161)
23. 我国黄金氰化厂发展综述 ..... 北京有色冶金设计总院 谢长春 谢纪元 (167)
24. 空气氧化预处理在金精矿氰化过程中的作用  
..... 核工业部北京五所 高锡珍 许根福 李玉莲 董淑琴 (179)
25. 杂质对氰化的影响——兼论金的提取流程  
..... 北京有色冶金设计研究总院 刘经纬 (184)
26. 砷锑对金氰化影响的研究 ..... 李健中 (192)

27. 金银矿石氰化的理论基础  
.....四川地矿局中心实验室 刘汉钊 四川冶金研究所 廖兴碧(200)
28. 高砷金精矿焙烧工艺研究.....湖南有色金属研究所 苏国辉(204)
29. 石油亚砷(PSO—Ⅱ)萃取金的机理的研究.....华南工学院 贺宗奇 龙锡吾(216)
30. 铜阳极泥有价金属的综合回收.....天津市电解铜厂 徐美冰(221)
- ✓31. 提高处理铜、铅阳极泥的金银回收率浅析.....株洲冶炼厂三分厂 王定良(226)
32. 铜阳极泥的湿法处理.....富春江冶炼厂 陈百年(230)
33. 减少金银在铜电解精炼过程中损失的途径.....沈阳冶炼厂 李振武(234)
34. 论大冶铜阳极泥处理工艺流程的选择.....大冶有色金属公司 施惟朴(241)
- ✓35. 铅阳极泥处理新工艺.....沈阳冶炼厂 陈芹胜 陈双陆 王俊义(246)
- ✓36. 低银高砷铅阳极泥火法熔炼工业试验  
.....株洲冶炼厂三分厂 朱慧仁 毛士杰 张明扬(258)
37. 改进铅鼓风炉渣型以增产黄金的研究.....沈阳冶炼厂 陈仕英(264)
38. 从磷镍铁电解阳极泥中提取贵金属的研究  
.....昆明贵金属研究所 熊宗国 上海冶炼厂 张树椿 秦章福 丁国荣(274)
39. 铜密闭鼓风炉高硅渣型的实验研究报告.....东北工学院 沈阳冶炼厂(281)
40. 提高电银质量的途径.....沈阳冶炼厂 吴瑞兰(297)
41. 湿法回收银—铜复合金属废料中的银和铜  
.....中国科学院化工冶金研究所 柯家骏 吴建国 李希明(304)
42. 银铜复合材料和镀银铜线废料中回收银、铜的新方法  
.....昆明贵金属研究所 沈兰英 李庆淑(306)
43. 从含银废料中回收银的研究.....北京矿冶研究总院 葛 锋(312)

## 编 者 按

中国有色金属学会选矿学术委员会、中国有色金属学会重有色金属冶金学术委员会和中国选矿科技情报网将于1987年5月联合召开第二届全国金银选冶学术会议。现将会议论文汇编成册出版，供参考。

1987年4月

# 工艺矿物学在金选冶工艺研究中的应用

广州有色金属研究院 许志华

黄金是人类最珍贵的金属，是一个国家财力的象征。按普里尼（公元23—79）说法，黄金又是人类第一种劳力伤神的蠢物。为了满足人们对黄金的欲望，历史上无数冒险家进行过远征和探险，其中为我们所熟知的有亚历山大、恺撒和哥伦布等。另一些人则希望“点石成金”，无休止的进行着毫无结果的炼丹试验。远征和探险发展了航海事业，发现了新大陆，促进了州际贸易和文化交流。古老的炼丹术无疑是现代化学和现代冶金学的基础。可见，黄金曾经给人类社会发展和进步以巨大影响。

现代黄金工业是以物理、化学、物理化学，生物工程和信息科学为基础的综合行业。随着黄金在工业部门的广泛应用，黄金工业将在第四次工业革命中起着举足轻重的作用。

在与黄金工业有关的信息科学中，令人注目的是金工艺矿物学。由于它所提供的信息具有微观性和直观性，以及所涉及的是决定矿山生产活动的本质问题，因而，应用的范围越来越广泛。在金矿开发的整个过程（地质探矿，提金试验和设计，矿山生产和产品销售）中，工艺矿物学均能作出自己的贡献。就矿山开发和生产而言，工艺矿物学的作用有：

（1）进行系统的矿物学研究，评价矿石的可处理性；（2）考察并评价生产流程的合理性，提出改善工艺的方向；（3）进行生产过程中的矿物学故障分析，保障车间的稳定操作。国内外生产实践证明，工艺矿物学是提金工艺学的基础，是黄金矿山技术管理的组成部分。

必须指出的是，作者如此强调工艺矿物学作用，并非广告宣传，而是总结工艺矿物学研究成果得出的结论。

## 一、矿石可处理性的矿物学评价

对影响金矿石可处理性的矿物学因素进行过系统归纳的作者或单位有吉林冶金研究所（1976），Addso（1980），Подзичков（1980），Gasparrini（1983），Lewis（1983），许德清（1983），王先入（1983），许志华（1983，1984）。对影响金矿石可处理性的矿物学因素比较一致的看法是：（一）由金的赋存状态、金粒粒度和嵌连性质所决定的自然金类矿物的解离或暴露程度，以及金粒表面覆膜情况；（二）能消耗氧和氧化物，以及能吸附已溶解金的有害矿物的种类和含量。一般地说，通过系统的工艺矿物学研究，能够提供一个清晰的矿物学概念，从而对矿石可处理性做出较为可靠的评价。

在沙特阿拉伯扎哈卜矿选冶试验之前，进行了以下内容的工艺矿物研究（Lewis，1983）：矿物种类；有价元素赋存状态；有价矿物的嵌布粒度和解离特性；绘制矿区矿物变化和需要不同方法处理的块段图；发现冶金处理过程中或产品销售中可能出现的矿物学问题。根据研究结果将矿石分为原生一次生和氧化矿石两类型。原生一次矿石中，60%的金为碲化物，40%为自然金。有大量妨碍氰化的矿物存在。自然金及金的碲化物主要嵌布在硫化

物内及其粒界。建议采用浮选—尾矿氰化工艺，预计回收率90%以上。氧化矿石中，金以自然金存在，粒度细小，难于解离。也存在妨碍氰化的孔雀石和残余硫化物。鉴于氧化矿石只占10%，建议仍采用同一流程处理，不过回收率要有所降低。选冶试验进行了各种方案对比。最后，考虑到矿区其它条件，采了上述流程设计建厂。选冶试验完全证明了工艺矿物学研究结果的可靠性。另外，工艺矿物学研究还提供了矿石性质稳定性的资料，服务年限内所采出的矿石性质稳定，不会冒矿石性质变化的风险。

作者(1982)应用包括超高压电镜在内的各种方法研究了鸡笼山角砾岩型金矿石中金的配分，自然金的粒度及载金矿物中金的赋存状态。结果发现约55%的金分布于载体矿物中，为粒度0.02—0.5微米的自然金类矿物，大部分被其它矿物严密包封。由此判断，全泥氰化的回收率不会很高，约60—70%。浮选—氰化回收率至多增加了方铅矿，黄铜矿及部分黄铁矿所负载的金，估计回收率不超过80%。选矿试验结果，全泥氰化回收率61.66%，浮选—氰化回收率约75%。

黑龙江红宝清混合岩型金—砷氧化矿石的研究结果(刘陶梅，1985)表明，金以自然金形式存在。金粒度大于10微米的占51.89%，磨矿后解离性良好，单体和暴露连生体已达92%以上。金粒表面洁净无膜。矿石中存在妨碍氢化臭葱石。可以看出，由于金粒粒度细小，单一机械选矿回收不会很高，预先处理—氰化工艺可获得高的回收率。选冶试验结果是：单一重选回收率42.71%，重选—氰化回收率92.92%，全泥氰化回收率96%以上。

系统的工艺矿物学研究需要花费大量的时间和经费，往往不能及地对地提供选、冶试验所需资料，于是人们试图通过简单快速的方法评价矿石的可处理性。唐肖玫(1978)曾介绍过用分步溶解、分步浸出的方法确定矿石中单体金粒、暴露连生金粒及包裹金粒之间的比例。Подзичков(1980)建议采用混汞、氰化、三段氰化、吸附氰化、盐酸溶解—氰化、硝酸溶解—氰化方法，并提出快速评价的流程。Gasparrini(1983)推荐的方法是：传统的浸金试验，浸渣分析砷，有砷则找砷矿物并研究它们的浸出行为；如果没有砷则分析银，银高就要检查银金矿及表面硫化银覆膜，并做消除覆膜试验；如果分析银低，就要寻找极细粒金粒并观察其嵌连的情况。

可以看出，唐肖玫的方法完全是化学方法，Подзичков是冶金和化学结合的方法，Gasparrini则是冶金、矿物和化学综合方法。这些方法的适应性还需进一步实践验证。

Подзичков还试图建立矿石可处理性的数学模型。

$$K_E = 1 - (K_\phi + K_{x_1} + K_{x_2})$$

$K_E$ 是氰化阶段的回收系数。 $K_\phi$ 为物理抑制系数，表征载金矿物中金的数量。 $K_{x_1}$ —第一化学抑制系数，矿石中能吸收氧和氰代物，或在金粒表面形成覆膜的组分对氰化影响程度。 $K_{x_2}$ —第二化学抑制系数，能从氰化物溶液中吸附金的组分对氰化的影响程度。

Подзичков的方向是正确的， $K_\phi$ 数据也易取得，但 $K_{x_1}$ 和 $K_{x_2}$ 的确定尚需进行大量试验并制定出相应的标准。可见，矿石易处理性数学模型的建立，还要走很长的路程。

## 二、磨矿过程中金粒的行为

自然金类矿物具有很好的延展性，在磨矿过程中金粒的行为十分引人注目。进行过此项研究的有Hallssauer和Joughin(1973)、Shilo等(1974)、Yecud(1975)、许志华和张炜光

(1989)。综合分析这些资料可以得出金粒在磨矿过程中行为的概念。

### (一) 金粒发生破裂

自然金类矿物在磨矿过程中“变粗”还是“变细”，曾引起人们的种种推测。从金粒在磨矿机中的受力状态分析，挤压力和剪切力都可能作用于某个金粒。随着研磨时间的增长，金粒经受剪切力的机会也越多，那些被挤压或片状的金粒更易受到剪切力的作用而破裂。只有极个别粗大的颗粒才有可能幸免剪切力作用而保存下来。Yeend将十个金片与砾石和水一起翻滚，120小时后，片金分裂为68片可用淘洗回收的小片金粒，另有25%的金变成淘洗不能回收的细粒金。Yeend还将金粒分别与砂、砾石和砾石，砾石混合置于磨机研磨，在转速为0.5—0.845公里/小时条件下，金粒以0.015—0.007%/小时的速度磨损。他认为，使金破裂的是砾石而不是砂，因为金粒和砂混合研磨120小时后，其重量损失不到1%。他还认为，速度和距离（时间）相比，速度更为重要，速度增加4倍，金的磨损速度增加10倍。Shilo等进行模拟自然冲击试验，石英和砂金一起磨矿，砂金颗粒的平均磨损率为0.05—0.06%/小时。

显然Yeend和Shilo进行的试验是解决自然金在表生搬运过程中行为问题，所用的磨矿机的线速是很低的。一般选矿试验用的球磨机（ $\phi 240 \times 300$ mm，55转/分）线速度可达24公里/小时以上，这样速度条件下，按Yeend的算法，金粒的磨损速度可提高10倍左右。

模拟试验已证明了金粒在磨矿过程中发生破裂及破裂速度。对磨矿产品金粒粒度的测量数据进一步提供了金粒破裂的可靠证据。Hallssauer和Joughin所测定的Witwatersand几个矿脉磨矿前后金粒粒程分配的变化，见表1。可以看出，和人们预料相反，经磨矿后，金粒的相粗粒级并未增加，而是显著的降低。总的趋势是“变细”，但比脉石矿物滞后一点。各种磨矿方法产品金粒粒度分布基本一致，球磨产品中粗粒级比例稍高。作者和张炜光考察铜锡山金矿磨矿产品时，亦取得了金粒变细的资料（表2）。

### (二) 金粒形态变化

Hallssauer等发现，磨矿前金粒形状与连生矿物种类有关，磨矿后的形状与磨矿方法有关。球磨使金粒压扁，锤式破碎使金粒呈扁平圆形，振动磨使金粒略具圆柱形，盘磨的金粒多呈球形或圆柱形。金粒变形可能只发生在稍粗的颗粒上，细粒金的形变大概没有那样明显。铜锡山粉原矿，一段球磨溢流，二段球磨溢流中金粒延长率分别为71.2%、86.9%和86.8%。镜下观察、压扁现象不太明显。

表1 不同磨矿方法产品中金粒粒度分布（%）

| 磨矿方法           | 未磨<br>金粒 | 磨 矿 产 品 |     |     |     |     |    |      |
|----------------|----------|---------|-----|-----|-----|-----|----|------|
|                |          | 总样      | 金 粒 |     |     |     |    |      |
|                |          | 矿粉      | 干球磨 | 湿球磨 | 锤式磨 | 振动磨 | 盘磨 | 捣锤乳钵 |
| +0.15(mm)      | 17—42    | 少量—8    | 10  | 8   | 1   | 8   | 2  | 2    |
| 0.075—0.15(mm) | 14—72    | 2—24    | 34  | 34  | 28  | 28  | 43 | 28   |
| —0.075(mm)     | 9—43     | 72—86   | 53  | 58  | 71  | 64  | 55 | 70   |

表2

铜锡山磨矿中产品中金粒粒度分布 (%)

| 粒级(mm) | +0.074 | 0.074—0.04 | -0.04 |
|--------|--------|------------|-------|
| 未磨     | 69.76  | 20.27      | 9.56  |
| 一段球磨溢流 | 56.85  | 38.42      | 4.72  |
| 二段球磨溢流 | 6.6    | 34.9       | 58.48 |

### (三) 表面性质的变化

磨矿过程中,金粒表面变化主要表现在表面粗糙化、伴生矿物细颗粒的嵌入和原有的覆膜更加严重化,金粒表面嵌入细的伴生矿物颗粒,以球磨和盘磨最甚,振动磨矿最少。磨矿后金粒表面覆膜重到影响提金操作的矿山并不太多,资料极道过的有Witwaersrand地区若干矿山(Feather, 1973),广东廉江(丁怀民, 1981),白银厂(范锦森, 1983)以及国外某多金矿(黄金参考, 1985, No2)。

Feather 对金粒表面覆膜的成分和成因进行过详细的研究。他认为,金粒表面覆膜是成矿后长期地质作用的结果,并成为磨矿过程中覆膜进一步发育的籽晶。这个观点是能令人接受的。因为,已取得的上百个矿山的资料表明,即使含银和硫化物高的矿石,无论磨矿前还是磨矿后,金粒原有的覆膜或工艺成因(主要是磨矿)的覆膜并不普遍,严重影响提金效果的,为数更少。作者研究过的矿山磨矿产品,可以说,金粒表面仍然洁净。由此可见,金粒表面原来有覆膜的,才会在磨矿过程中严重化到影响金的提取,而这些原有的覆膜是在长期的成矿期后地质作用下形成的。单纯的工艺因素(磨矿、浮选)是否能形成足以影响提金效果的覆膜,尚待进一步研究。不过范锦森发现,二段硫脲浸金和焙烧氰化,金粒表面有一层银灰色覆膜,妨碍金的氰化。而一段硫脲浸出和全泥氰化,则未发生类似现象。

## 三、生产流程的工艺矿物学考察和评价

生产多年的矿山或者因开采范围的扩大和开采深度的增加,引起给矿性质的变化;或者由于运转时间的积累,那些工业试验甚至试生产过程未出现或虽出现尚不严重的问题,此时暴露无遗,影响稳定操作;还有,环境要求的提高,原料和产品质量及价格的变动,迫使生产者改善生产工艺,以便获得较高经济效益;最后,科学技术的进步,管理水平的提高,要求生产管理者掌握更多的信息,不断改进和成善工艺流程,实行科学管理。化学分析和工艺矿物学研究是矿山最基础、最重要的信息来源之一。可见,已经生产的矿山也要定期地进行工艺矿物学研究,以便解决上面提到的问题和其它可能出现的问题。

生产流程的工艺矿物学考察和评价是通过通过对生产过程各工序的产品系统取样研究来实现的。收集到有关资料的作者有Feather等(1973)范锦森(1983)、以及《黄金参考》(1985, No4)转载的资料。作者与张炜光合作对铜锡山矿选矿流程进行了考察和评价。

Feather等人系统地研究了Witwaersrand地区四个矿山车间给矿、磨矿、分级、重选、混汞,氰化的产品和残渣,得出了两条重要的结论。(一)金粒优先解离,在球磨之前约50%的金已解离。这些金粒保持了原来的形状,稍许有点变形。建议提前回收这部分金。球磨机溢流和返砂中金粒的粒度十分近似,且被包裹的金粒数量均微不足道。(二)磨矿循环几乎是所有的金粒表面有覆膜或失去光泽。建议减少磨矿循环,并采用酸洗清除覆膜。后者

已被采用，混汞效率提高到99.46%。对各种残渣的研究发现，混汞渣中的金是失去光泽的单体金粒和混汞不完全的金粒。重选尾矿、氰化渣、焙烧渣中碳铈钼矿是主要载金矿物，次为各种硫化物中的包裹金粒。单体金粒可见，其粒度细小，覆膜严重，多被压平且嵌有其它矿物粒子。由此他们得出结论：残渣中单体金的损失主要原因是形成覆膜和过磨。

必须指出的是，金粒优先解离可能具有普遍意义。在比较多的矿山，金粒主要嵌连在矿石力学上薄弱的部位，如裂隙、孔洞和粒界等。毫无疑问，这些金粒将在大于它们尺寸的磨矿粒度下解离。在今后的工艺矿物学考察时，应该重视这一问题。

范锦森对白银厂综合回收试验流程和选厂磨矿返砂进行了较为深入的研究。原矿中金粒粒度大于0.074mm者占60%。磨矿细度35-40-200目时，已解离的金粒达到85%，在路磨矿循环中明显累积和富集，建议提早回收这一部分金。硫精矿中损失的金粒，约24%为单体，80%以上的金粒粒度>0.04mm。对磨矿后的金粒观察表面发现，表面洁净的金粒只占1.99%，不同程度地失去光泽，粗糙化、其它矿物嵌入的金粒占60.68%，表面有红色铁质表膜的金粒占37.33%。可见，混汞和化学提金之前，酸洗是必要的。酸洗后的混汞、氰化、硫脲浸出的提取率分别为：95.87%；97.28%和98.03%。

国外某多金属矿山选厂曾进行过破碎、磨矿、跳汰、摇床、浮选产品的工艺矿物学考察。破碎的矿粉中单体金粒占49%，其中有覆膜的为2.4%，表面干净的为46.6%。通过（回收率考察得出如下结论：（一）跳汰作业回收率太低（6.1%），跳汰尾矿摇床作业操作不佳15%）。（二）一段浮选充分地回收了表面干净的单体金粒，二段浮选充分地回收了表面有覆膜的金粒；（三）混选尾矿连生体金粒占45—50%，被金属矿物包裹的金粒占25—30%，再磨可进一步回收。再选尾矿中约80%的残留金在+44微米粒级，其中60%为连生体。（四）将混合浮选尾矿旋流器溢流以及混合浮选尾矿沉砂再选尾矿一起送入尾矿坝是不合理的，因其中含有粗粒金粒，建议再选尾矿分级，沉砂返回再磨作业。

作者和张炜光对铜锡山选厂流程中的粉原矿，一段球磨排矿，溢流和返砂、混合浮选尾矿和精矿，分离浮选铜精矿和硫精矿，混合浮选尾矿以及最终尾矿进行了系统研究，得出后面的结果。（一）一段磨矿溢流中金粒50%解离，返砂中金粒60%解离。由于返砂中硫化物与脉石解离不高，返回磨矿是必要的。然而提前回收返砂中的单体金粒也是可能的。（二）混合浮选作业中约17%的金损失于最终尾矿中。其中48.48%为黄铁矿负载的金，11.4%为黄铜矿负载的金，约20%为单体金粒，粒度大于40微米的占80%，金粒表面无污染。可见，混合浮选作业尚未最佳。（三）在分离浮选操作中，金铜精矿金的回收率64.77%，约20%的金进入硫精矿中。硫精矿中，87.8%的金粒被黄铁矿包裹，粒度均小于10微米。进入硫精矿中的黄铜矿负载的金只占1.94%，硫精矿中的单体金粒不到10%，粒度10—40微米。由此可见，用机械选矿方法深选硫精矿不会使金的总回收率显著提高。氧化—浸出法，因硫精矿含金只有5克/吨，经济上可能不合算。与小化工厂制酸结合，渣中浸出金可能较为可行。

#### 四、生产过程的矿物学故障分析

与生产流程的工艺矿物学考察和评价不同，生产过程矿物学故障分析无须在流程中系统取样研究。它的主要任务是：查明引起矿山操作故障的矿物学因素，提出排除故障的方案；进行生产超前的矿物学研究，预测或预报可能出现的问题，制定预防措施或预防方案；进行

定期的矿物学测试和研究,实行操作的矿物学监督。卡林金矿生产过程中的工艺过程中的工艺矿物学研究为矿物学故障分析树立了典范。

卡林金矿主要开采地段为易处理的氧化矿石,用单一的氰化流程处理。矿体的局部有未风化的碳质矿石矿囊和硅质矿石、属于难处理矿石。按矿石可处理性分别叫做A、B、C矿石。最近几年来,来自南卡林和北卡林若干矿山的矿石掺入处理,增加了问题的复杂性。然而,定期的工艺矿物学研究排除和防止了一系列操作故障,保障了各车间的稳定操作。

(一) 预报采出矿石性质的变化,A类矿石送氰化车间,B类矿石则进入氧化或双氧化的氯化车间,C类矿石堆浸。

(二) 发现多孔状黄铁矿与黄铁矿总量的比值决定金提取率的规律,随时测定多孔状黄铁矿的比刻,预测矿石可达到的提取率。

(三) 1981年氧化系统给料含泥量高,浓度低和流速慢,澄清困难,影响正常操作。工艺矿物学研究结果稳定是由于掺入含有约40的粘土的Maggie Creek的矿石所引起的。调整该矿石掺入量,使澄清问题减少到最小程度。

(四) 花费了一年左右的时间研究了金的沉淀物和粗金锭中的成分,状态和来源,以及这些成份在矿体内的分布和变化规律。铜主要来于Blue star矿山,存在的形式为氢氧化物、金属铜和铜锌合金。银主要来自Bootsrap矿山。处理卡林本身矿石时,沉淀含汞最高来自Bootsrap和Blue、star矿山时沉淀物含汞最低;碳质矿石的氯化产生富含汞的沉淀物;汞以 $\text{AuAg}_2$ 和 $\text{Au}_3\text{Hg}$ 的形式存在。在沉淀物中的锌、硅、硅酸钙和含水碳酸盐均为工艺加入物引起,在精炼过程中可以排除。

(五) 通过X射线衍射和差热分析确定了金沉淀物中 $\text{Au}_3\text{Hg}$ 和 $\text{AuHg}_2$ 的相变温度,据此参数设计安装了汞蒸馏塔。

(六) 查明吸附探表面和裂隙中的污染物为碳酸钙,据此建立了一个酸洗车间,消除吸附碳的污染。

(七) Maggie Creek矿石堆浸回收率不高的原因是矿床晚期的硅化封闭了早期形位金矿的空隙,使细粒不能与浸液接触。

## 五、难处理金的工艺矿物学研究

提金工艺学家和矿山管理部门长期烦恼的问题是黄铁矿和毒砂中金的提取。这两种矿物所负载的金有时所占比例甚大。例如,我国五场坡金矿毒砂和黄铁矿石含金300克/吨,占总金量的95%以上。黄金矿山如果不能很好利用黄铁矿中黄铁矿和毒砂,不仅影响提金效率,而且会引起环境方面的麻烦。

令人费解的是,有些黄铁矿中的金能够直接浸出,有黄铁矿中的金经过氧化破坏矿物晶格之后才能提取。目前为止的工艺矿物学研究成果已能对上述问题进行合理地解释,并初步揭示了予氧化的本质。

含金黄铁矿和毒砂的可处理性取于它们所负载的金的赋存状态和性质。关于金的赋存状态,目前有两种观点:固溶体(类质同象)和显微一次显微粒矿包裹体。

### (一) 固溶体

金在黄铁矿和毒砂里固溶的可能性,不少学者进行过实验。Burg (1930, 1935) 将含

金黄铁矿在真空中加热到600℃,发现金与硫蒸气反应形成金的硫化物。Maslenitsky

(1944)合成了含金黄铁矿,加热这种黄铁矿看到了其中的硫化金包裹体,而且他还合成了 $Au_2S_3$ 。Kurauti发现多达2000克/吨的金可以置换到黄铁矿的晶格里,且黄铁矿的晶格常数随含金量而变化。Clark发现金在毒砂里的溶解度,600℃时,是不足以对毒砂[131]间距起多大影响。Barton (1969)的实验证明,在600—700℃范围内,金在黄铁矿,磁黄铁矿和毒砂中溶解度均低于或大大低于0.1%。korobushkin (1970)用选择的化学方法测定出哈萨克斯坦一个矿床含金黄铁矿和毒砂里的金呈两种形式,金的阳离子置换了铁和金的阴离子置换了砷。Amosov等(1975)研究了黄铁矿和自然金的共结晶作用,认为这种现象不是黄铁矿把金粒捕获起来,而是金沉积在正在长大的黄铁矿晶面上。Воиинесховский等(1975)将毒砂加热到450℃未见金粒,加热到702℃时,看到几微米大小的金粒出现,他认为这是矿物晶格破坏时释放出晶格中的金的结果。对含金和不含金毒砂的顺磁共振谱分析发现,矿物中存在着某种顺磁中心,信号强度与晶格空位有关,后者又与金的含量有关。

上面的实验均在450℃以上进行,此温度相当高温矿床形成温度。而金的成矿则从高温到低温的广阔范围内进行。在中、低温成矿过程中金是否仍能进入黄铁矿和毒砂的晶格,研究的较少。Tyurin (1965)的实验发现,和黄铁矿一起沉淀的金是以大小不超过3微米的互不相连的颗粒存在。kirilov等(1970)试图在低温再合成含金黄铁矿,结果表明,金进入了FeS颗粒的 $FeS_2$ 表膜。Barton发现650°时黄铜矿能溶解1.4%的金,冷却时金大部分析离出来。可见,黄铁矿和毒砂中金固溶体确实存在,但是只有高温成因矿物才有可能。即使这些高温下形成的矿物在温度降低时,可能大部分金的固溶体溶出,形成显微一次显微自然金类矿物颗粒。只有在特殊情况下,那些高温形成的金固溶体才能保留到矿石采出之前的地质环境里。金的固溶体确实存在,但范围相当有限。

## (二) 显微一次显微自然金类矿物包裹体

大多数矿山的黄铁矿和毒砂矿里均能看到金粒,看起来似乎是固溶体析离产物。不过,有些矿物中看到的金粒数量与化学分析值相适应,有些相差悬殊。这个事实几乎不必论证,只要阅读一下Boyle (1979)对世界资总的总结以及黄祖梁(1983)和乔瑞兰(1985)对我国资料总结,或者回忆一自己对黄铁矿中金的赋存状态研究成果,便可一目了然。

黄铁矿和毒砂矿中看到很少,或看不到金粒时,选区电子衍射能够找到小于光学显微镜检查尺寸的金粒。进行过此项工作的有Mepheat (1969)、Welles和Mullens (1973)、张振入(1978)、载瑞格和刘成刚(1982)等。这些研究结果无疑证明了次显微金粒的存在。现在的问题是,选区衍射的有效视场有限,超高压电镜也有零点几微米,难于发现更细的金粒。另一方面,定量分析次显微金尚有困难。因此不能判断,次显微金粒是不是构成了黄铁矿和毒砂中所有看不到的金。

## (三) 两种存在形式的金的可处理性

两种存在形式的金,均不能用机械方法回收,多数也不能直接浸出,一般需要预先处理。预先处理的方法主要是水氧化、氯化 and 焙烧。两种状态的金在预先处理中行为和能够转入溶液的机理不同。次显金粒状态不变,只需要载金矿相变、局部溶解,从而形成人工空隙,使金粒能够与浸液接触。固溶体的金则需要完全破坏矿物的晶格,使离子状态的金转变为自然金类矿物颗粒,在与外界导通的情况下与浸液接触。卡林金矿是研究比较清楚的以次显微金为主的矿山。水氧化过程中,黄铁矿平均溶掉50%,氯化损失了黄铁矿73%。在扫描镜下,观

察到黄铁矿表面及微孔壁有一层氢氧化铁、厚度0.5—1.0微米 (Hause, 1981)。

黄铁矿和毒砂的焙烧有两个作用：(1)加速金的扩散作用，使晶格中金和次显微金粒中的金扩散到矿物表面，裂隙和粒界，并重新凝聚为较大的粒子。(2)硫的析出和热膨胀使矿物部分地或全部地向磁黄铁矿，近而向赤铁矿转变。矿物本身产生了新的裂隙和孔洞，其中金粒能与浸液反应。以上过程可以较低的温度下实现。sakharaova等 (1972) 对磨光先进行250℃—300℃处理，细分散的金粒团聚成了较大的颗粒。Narseev和Starova (1974) 将黄铁矿在250℃加热20分钟，发生了金粒增大和黄铁矿晶胞参数减小的现象。看到同样现象的还有Kalitkina (1971)、Klermert等 (1973) 和Clark (1960)。焙烧的第二个作用的研究也取得令人信服的证据。FilMer (1982) 测定了未焙烧黄铁矿、中间焙砂和最终焙砂的比表面分别0.9、2.1和3.0米<sup>2</sup>/克，相应的氰化浸出率为17%、40%和82%。Arriagad (等研究了400℃—750℃氧化焙烧总表面积，发现450—500℃时焙砂表面积最大，温度升高表面积很快减少。扫描电镜观察，温度过高时针状末稍变粗，封闭了孔隙。黄国忠和冯国臣的试验进一步证明了暴露金粒的数量随温度升高而降低的事实，温度由低到高的A、B、C三组焙烧系，暴露金粒的比例分别为82.58%、75.85%和71.4%。

以上分析看出，工艺矿物研究不仅解决了黄铁矿和毒砂中金的存在形式，而且对矿石预先处理的机理进行了探讨。研究中所使用的低温焙烧凝聚金粒的方法对提金工艺有一定参考价值。

## 结 束 语

黄金矿山有大量的矿物学问题，其中大部分能够通过工艺矿物学研究到解得决。然而，金的工艺矿物学是以 ppm 级品位的矿石或产品为研究对象，这就需要花费大量的时间和精力，需要现代仪器和足够的经费，需要研究人员的坚韧不拔的精神。由于众所周知的原因，在我国的工艺矿物学特别是生产过程中的工艺矿物学研究和应用相当有限。

金的工艺矿物学资料之多足令生畏的，近万字的文章不能包括所有发表文献，只能列举少量代表性的资料。供大家参考。

# 山东铜锡山矿金的工艺矿物学研究

广州有色金属研究院 张炜光 许志华

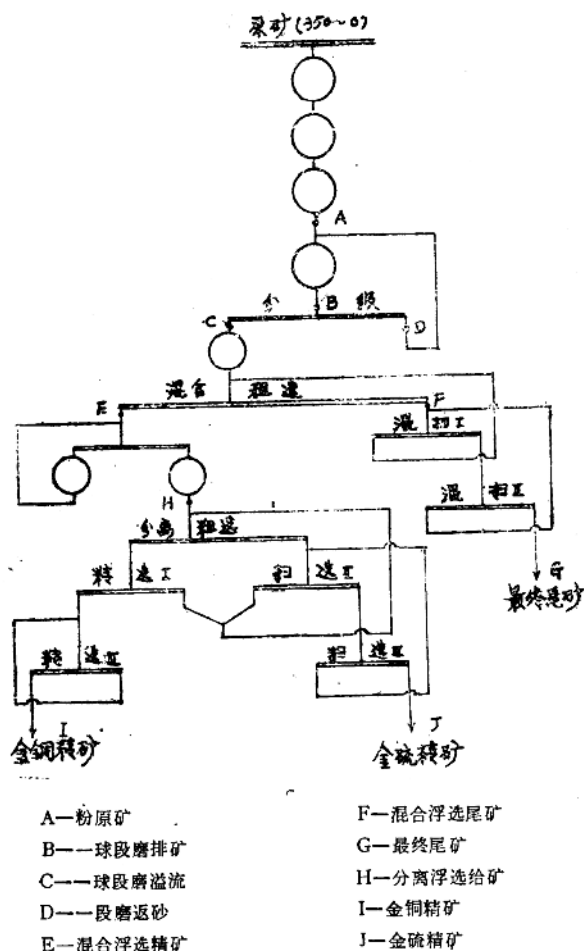
## 前 言

山东铜锡山矿为中温热液裂隙充填石英脉型金矿床。矿石类型可分为含金贫黄铁矿和含金富黄铁矿石英脉。该矿于76年投产，目前存在的主要问题是金硫分离效果差、尾矿损失多，影响选矿回收率的提高。本次研究工作采样原矿品位Au3.2g/T，精矿品位119.25g/T，回收率66.4%。为进一步改善选矿技术指标，对选厂磨浮流程各工序的10个样品（采样位置见图1）进行了金的工艺矿物学研究以及对金在磨浮流程中的行为进行考察，探讨提高选矿

指标的合理途径。

本次研究基本查清了金的存在状态、金矿物的工艺性质及在选矿流程中的行为，为全面评价现有流程提供了矿物学依据。

磨浮工段工艺流程及采样位置图



图—1

## 一、矿石的物质组成

粒原矿是本次研究工作的重点样品之一对此进行了较详细的矿物学特征考察。

### (一) 矿物组成

矿石中矿物组成较简单，金属矿物以黄铁矿、黄铜矿和菱铁矿为主、少量矿物有方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、赤铁矿、褐铁矿等。非金属矿物以石英、白云石、方解石及长石的主要脉石矿物。

## (二) 化学组成

粉原矿化学全分析见表1, 有用元素物相分析见表2~表4。

表1

| Ag(g/T)                | Ag(g/T)  | Cu(g/T)  | S(g/T)                               | Fe(g/T) | As(g/T) | Pb(g/T) | Zn(g/T) |
|------------------------|----------|----------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 3.20                   | 13.75    | 0.16     | 9.79                                 | 18.32   | 0.07    | 0.02    | 0.035   |
| SiO <sub>2</sub> (g/T) | MgO(g/T) | CaO(g/T) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/T) | C       |         |         |         |
| 46.48                  | 2.50     | 4.00     | 1.72                                 | 1.25    |         |         |         |

表2

| 自由金     |        | 包裹金     |        | 总金品位<br>(g/T) |
|---------|--------|---------|--------|---------------|
| 品位(g/T) | 占有率(%) | 品位(g/T) | 占有率(%) |               |
| 2.25    | 72.60  | 0.85    | 27.40  | 3.10          |

注: 1. 样品全部磨至-0.2mm。

2. 自由金系指单体金、连生体金以及矿物内部与外界有裂隙导通的包裹金。

3. 包裹金系指严密包封在矿物中与外界无裂隙导通的金粒。

表3

| 氧化铜    |        | 硫化铜   |        | 总铜品位<br>(%) |
|--------|--------|-------|--------|-------------|
| 品位(%)  | 占有率(%) | 品位(%) | 占有率(%) |             |
| <0.004 | <2.44  | 0.16  | 97.56  | 0.164       |

表4

| 单质硫   |        | 硫酸盐中硫 |        | 硫化物中硫 |        | 总硫品位<br>(%) |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------------|
| 品位(%) | 占有率(%) | 品位(%) | 占有率(%) | 品位(%) | 占有率(%) |             |
| 0.01  | 0.104  | 0.077 | 0.80   | 9.543 | 99.10  | 9.63        |

## 二、金的工艺矿物学特征

### (一) 金矿物种类、成分

经光电和人工重砂量是, 除自然金类矿物外, 未发现其它含金矿物。可以认为矿石中金主要以自然金类矿物形式存在。22颗金粒电子探针分析, 金粒的最高含金量为Au90.08%,

最低者Au39.61%。个别金粒中含有少量的铜。根据金粒的金含量，以银金矿为主，金银矿为辅。22颗金粒平均含金量Au68.9%，Ag31.02%。

## (二) 金在主要矿物中含量和配矿

### 1. 金在主要矿物中的含量

将样品全部磨至-60 $\mu$ 后提取单矿物做金含量分析，结果见表5。

表5

| 矿物名称 | 连生体金品位(g/T) | 包裹金品位(g/T) | 总金品位(g/T) |
|------|-------------|------------|-----------|
| 黄铜矿  | 68          | 20         | 88        |
| 黄铁矿  | 0.95        | 5.00       | 5.95      |
| 菱铁矿  | 0.23        | 0.25       | 0.48      |
| 脉石   | 0.08        | 0.07       | 0.15      |

注：连生体金即为暴露的连生体金粒和与外界导通的包裹金。

上述表明，金与黄铁矿、黄铜矿关系密切。黄铜矿中以连生体金为主，黄铁矿中以包裹金为主。

### 2. 金在矿物中的配分

经计算，金在上述四种矿物中的配分见表6

表6

| 矿物名称 | 矿物含量<br>(%) | 连生体金 + 包裹金 |          | 对粉原矿<br>配分率(%) |
|------|-------------|------------|----------|----------------|
|      |             | 品位(g/T)    | 金属量(g/T) |                |
| 黄铜矿  | 0.5         | 88         | 0.44     | 13.75          |
| 黄铁矿  | 18          | 5.95       | 1.07     | 33.44          |
| 菱铁矿  | 13          | 0.48       | 0.062    | 1.94           |
| 脉石   | 65          | 0.15       | 0.098    | 3.06           |
| 其它   | 35          | 未分析        | —        | —              |
| 合计   | 10000       |            | 1.67     | 52.19          |

粉原矿金品位3.2g/T，经差减单体金粒的金为47.81%。可见，粉原矿磨至100%-60 $\mu$ 时，金的解离度为47.81%。52.19%的金嵌布在上述四种矿物中。黄铜矿、黄铁矿是金的主要载体矿物。经计算，在金铜精矿和金硫精矿两个样品里，黄铜矿中的金占总金量的10.5%，黄铁矿中的金占总金量的21.5%。若将单体金粒回收80%，金的回收率约70%左右。

## (三) 金粒的嵌连特性

金粒的嵌连特性研究在矿相显微镜下进行。结果见表7。

表中前三种嵌连类型的金粒较粗，且多数矿物沿粒间接触间隙充填，可能较易解离。后三种类型的金粒多呈浑圆状、乳滴状嵌布，粒度细小，约在10 $\mu$ 以下，估计细磨也难以解离。

表7

| 金粒嵌连类型       | 金粒嵌连形态    | 占有金粒态体积的百分率(%) |
|--------------|-----------|----------------|
| 黄铁矿裂隙中的金粒    | 不规则粒状     | 13.4           |
| 黄铁矿—脉石粒间的金粒  | 不规则粒状、枝叉状 | 67.8           |
| 脉石中的金粒       | 棱角状、不规则粒状 | 14.4           |
| 黄铁矿—黄铜矿粒间的金粒 | 浑圆粒状      | 1.0            |
| 黄铜矿中的金粒      | 椭圆状、点滴状   | 2.7            |
| 黄铁矿中的金粒      | 乳滴状、乳虫状   | 0.7            |
| 合 计          |           | 10.000         |

#### (四) 金粒粒度组成

将-2mm的粉原矿用酸溶解，残渣中可见金粒在实体镜下测量（量测长和宽）。所见最大金粒 $0.35 \times 0.12\text{mm}$ （罕见）。加数平均粒度 $0.038\text{mm}$ 。统计见表8。

| 粒级(mm)   |    | -2+0.3 | -0.3+0.2 | -0.2+0.074 | -0.074+0.04 | -0.04+0.02 | -0.02+0.01 | -0.01 |
|----------|----|--------|----------|------------|-------------|------------|------------|-------|
| 面积分布率(%) | 个别 | 17.03  | 15.85    | 36.88      | 20.70       | 9.12       | 0.42       | —     |
|          | 累计 |        | 32.88    | 69.76      | 90.46       | 99.58      | 100.00     |       |

#### (五) 金粒的形态特征和表面特征

金粒边缘不平直，呈角粒状和尖角粒状， $-30\mu$ 者多呈枝叉状和板片状。70%的金粒延长率（长/宽）在1~2之间，表明以粒状为主。

绝大多数金粒表面洁净、光泽鲜艳。

### 三、金在选矿流程中行为的考察

选厂采用两段磨矿、金硫化物混合浮选铜硫分离浮选工艺流程（流程见图1），金最后序集在金铜精矿中。生产中主要问题是金硫分离效果差、尾矿损失多。根据存在问题，在系统中解金于生产全过程行为的基础上，重点考察金在金硫精矿和最终尾矿的存在状态。

#### (一) 金粒在各样品中的工艺矿物学特征

##### 1. 金的粒度

表9列出各样金粒粒度的大致分布情况。

由表可见，两个尾矿产品金的粒度较粗，可定性说明损失在尾矿中的部分金粒不是因为粒度过细造成。因金硫精矿中金粒度较细，多数不能解离，影响金硫分离。

##### 2. 金粒形态特征和表面特征

流程各样品单体金粒形状定量测定表明：金粒在磨矿过程中尽管粒度变细，但形态变化不大，延长率多在1~2范围内，以不规则粒状为主。各样品淘洗的单体金粒表面洁净，光泽鲜艳，表面性质没有明显变化。金粒形态和表面性质大概不会影响金粒的浮游性质。

表9

| 样品名称   | 金粒面积分布率 (%) |         | 样品名称   | 金粒面积分布率 (%) |         |
|--------|-------------|---------|--------|-------------|---------|
|        | +0.04mm     | -0.04mm |        | +0.04mm     | -0.04mm |
| 粉原矿    | 99.46       | 0.54    | 混合浮选尾矿 | 87.2        | 12.8    |
| 一段球磨排矿 | 95.28       | 4.72    | 最终尾矿   | 84.7        | 15.3    |
| 一段球磨溢流 | 68.75       | 31.25   | 分离浮选给矿 | 41.5        | 58.5    |
| 一段球磨返砂 | 94.77       | 5.23    | 金铜精矿   | 40.35       | 59.65   |
| 混合浮选精矿 | 83          | 17      | 金硫精矿   | 35.4        | 64.6    |

注：由于混合浮选尾矿和最终尾矿金品位低，用化学溶解法难以得到足够的金粒，故用重砂淘洗法获得金粒，其余样品均采用化学溶解法取得金粒。

## (二) 金在金硫精矿中的存在状态

### 1. 金的分布和解离

经物相分析，该样品金品位5g/T，其中包裹金4g/T。根据主要矿物含金品位和矿物量计算金在金硫精矿中的大致分布，见表10。

表10

| 矿物种类 | 金属量<br>(g/T) | 占有率<br>(%) | 其中包裹金    |        |
|------|--------------|------------|----------|--------|
|      |              |            | 金属量(g/T) | 占有率(%) |
| 黄铁矿  | 4.39         | 87.8       | 3.86     | 77.2   |
| 黄铜矿  | 0.097        | 1.94       | 0.022    | 0.44   |
| 菱铁矿  | 0.029        | 0.58       | 0.015    | 0.3    |
| 脉石矿物 | 0.025        | 0.50       | 0.012    | 0.24   |
| 合计   | 4.541        | 90.82      | 3.91     | 78.18  |

由表可见，包裹金金属量3.91g/T，计算占有率为78.18%，与物相分析结果吻合。87.8%的金分布在黄铁矿中，见以包裹金为主。在黄铜矿中金为1.94%。经差减，约9.2%的金为单体金，这部分单体金粒35%大于0.04mm。在铜硫分离过程中，按理想情况，单体金和单体黄铜矿应进入金铜精矿（这部分金占总金量的11.2%），但实际上难于实现。从目前的分离指标来看，加强铜硫分离提高金回收率潜力不大。

### 2. 金的存在状态

表11

将金硫精矿分别磨至-40 $\mu$ 、-20 $\mu$ 、-10 $\mu$ 分析自由金品位，结果见表11。试验结果表明，随看黄铁矿粒度变细，自由金品位没有提高，说明包裹在黄铁矿中的金粒很细小，以至在镜下观察黄铁矿见及金粒很少，与其在黄铁矿中的含量很大相符。估计金粒呈微粒状和次显微粒状（小于2 $\mu$ ）。一般光学显微镜难于分辨。

| 粒度( $\mu$ ) | 自由金品位(g/T) |
|-------------|------------|
| -40         | <0.5       |
| -20         | 0.5        |
| -10         | 0.5        |

上述结果可以反映出,金粒主要嵌布在黄铁矿中,而且嵌布粒度很细,多呈包裹金形式存在,这是影响金硫分离的主要原因。由于黄铁矿中包裹的金粒多小于 $10\mu$ 细磨也难以解离。因此,通过深选黄铁矿提高回收率潜力不大。采取湿法处理,回收黄铁矿中的金是比较适宜的。

### (三) 金在最终尾矿中的存在状态

样品金品位 $0.63\text{g/T}$ ,其中包裹金占50%。根据样品的主要矿物含量以及金在矿物中的含量,可大致反映金的存在状态,见表12。

表12

| 矿物种类 | 金属量(g/T) | 占有率(%) | 其中包裹金    |        |
|------|----------|--------|----------|--------|
|      |          |        | 金属量(g/T) | 占有率(%) |
| 黄铁矿  | 0.32     | 48.48  | 0.269    | 40.76  |
| 黄铜矿  | 0.075    | 11.40  | 0.017    | 2.58   |
| 脉石矿物 | 0.134    | 20.30  | 0.0625   | 9.47   |
| 合计   | 0.529    | 80.18  | 0.348    | 52.80  |

上表可见,嵌布在上述三种矿物中金的金属量为 $0.529\text{g/T}$ ,占有率80.08%。单体金占有率约为20%左右。金在最终尾矿中的存在状态可分为三种情况:

1. 随黄铜矿、黄铁矿进入最终尾矿。这部分金的占有率约30%。最终尾矿中黄铜矿解离度35%,黄铁矿解离度55%。连生体中黄铜矿、黄铁矿多以 $20\sim 30\mu$ 的细粒和小脉成群嵌在脉石中。

2. 约20%的金嵌布在脉石等矿物中,这部分金回收不易

3. 约20%的金呈单体金粒存在,这部分金粒粒度不细,大于 $0.04\text{mm}$ 者占80%,适合于浮选工艺回收。

上述三种情况,第(1)(3)种可通过进一步强化浮选,将单体黄铜矿,黄铁矿以及单体金粒回收。这部分金约占尾矿损失金量的50%左右。而黄铜矿、黄铁矿与脉石的连生体及嵌在脉石中的金粒由于嵌银复杂、粒度细,回收是困难的。

## 四、几点建议

通过本次研究工作,仅从工艺矿物学的角度提几点建议:

(一) 在成本允许的情况下,提高一段磨矿细度以改善混合浮选的回收率。同时注意浮选操作的稳定性,减少尾矿金的损失。

(二) 如提高一段磨矿细度经济上不合算,可考虑采用重选捕金作业。鉴于损失的金粒粒度多大于 $0.04\text{mm}$ ,重选设备可采用螺旋流槽。

(三) 金硫精矿深选不会有较大的效果。采用焙烧—浸出或其它湿法冶金方法较适宜。鉴于黄铁矿中金含量较低,单独处理可能不合算。要与小型化工厂联合处理,可能会有一定的经济效果。