

Jishu Yu Shijian

黄金选冶 技术与实践

李琳 吕宪俊 主编



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

黄金选冶技术与实践

主 编 李 琳 吕宪俊
副主编 由晓芳 王来军

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

黄金选冶技术与实践 / 李琳, 吕宪俊主编. — 徐州:

中国矿业大学出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5646-3389-9

I. ①黄… II. ①李… ②吕… III. ①金矿物—选矿
②炼金 IV. ①TD953 ②TF831

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 313539 号

书 名 黄金选冶技术与实践

主 编 李 琳 吕宪俊

责任编辑 陈 慧

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516) 83885307 83884995

出版服务 (0516) 83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 7.5 字数 188 千字

版次/印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

前 言

黄金是人类最早发现和利用的金属之一,用途广泛。我国黄金资源丰富,也是世界产金大国,黄金产量自 2008 年开始连续保持全球第一。在黄金消费以及价格的刺激作用下,黄金的选冶技术也得到了迅速的发展。

为了满足我国黄金生产发展的需要,参考近年来的国内外文献资料,结合有关的科研与工程实践最新技术与成果,编写了本书。本书在系统阐述基本理论的基础上,总结了金矿石的选矿和浸出、难浸金矿石的预处理等典型提金技术,并对典型工艺的现场生产实践情况进行了详细介绍,力争反映出本领域国内外最新的发展动态。本书既可作为黄金选冶技术和科研人员的参考书,也可作为高等院校相关专业的教材。

本书由山东科技大学化学与环境工程学院李琳(第 1~6 章)、吕宪俊(第 7~8 章)、由晓芳(第 9~10 章),山东河西黄金集团有限公司王来军(第 11 章)共同编写,由李琳负责全书的统一整理和校核。参加编写的还有山东科技大学化学与环境工程学院贺萌、时杰和张伟。

在本书的编写过程中参考和引用了相关文献,谨向这些文献的作者致以真诚的谢意。

由于水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2016 年 10 月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 金的性质及用途	1
1.3 黄金资源和生产需求概况	2
1.4 金的矿床地质	6
1.5 金的工艺矿物学特性	8
2 金矿石的重选	11
2.1 概述	11
2.2 重力选金方法及设备	11
2.3 采金船及其选金工艺	16
3 金矿石的浮选	20
3.1 概述	20
3.2 金及含金矿物的浮选特性	20
3.3 浮选药剂	21
3.4 影响金浮选的工艺因素	22
3.5 金矿石的浮选流程	24
4 混汞法提金	27
4.1 混汞提金原理	27
4.2 混汞设备及操作	28
4.3 汞膏处理	31
4.4 影响混汞提金的主要因素	32
4.5 混汞生产实例	34
4.6 混汞提金的安全措施	35
5 氰化浸金原理	36
5.1 氰化法提金概述	36
5.2 金在氰化物中溶解机理	36
5.3 氰化浸出剂	40
5.4 金氰化浸出过程的主要影响因素	40

6 氰化浸出工艺	44
6.1 渗滤氰化堆浸法.....	44
6.2 渗滤氰化槽浸法.....	49
6.3 搅拌氰化浸出法.....	51
7 氰化溶液中金的吸附	55
7.1 活性炭吸附法.....	55
7.2 树脂吸附法.....	62
8 金的沉积	68
8.1 锌置换沉积法.....	68
8.2 电解沉积法.....	74
9 难浸矿石的预处理	80
9.1 焙烧氧化法.....	80
9.2 加压氧化法.....	83
9.3 细菌浸出法.....	85
9.4 硝酸氧化法.....	89
10 金的冶炼	91
10.1 金的粗炼.....	91
10.2 金的精炼.....	94
10.3 成品金锭的熔铸.....	99
11 黄金选冶实践	101
11.1 选矿-氰化工艺.....	101
11.2 全泥氰化工艺.....	107
参考文献	111

1 绪 论

1.1 概 述

金是人类最早开采和使用的一种贵金属。金具有可贵的抗蚀性、良好的物理力学性能和很强的稳定性,所以其用途十分广泛。长期以来,金主要用作货币和制造首饰及装饰品。20 世纪 60 年代后期,由于镀金技术的飞速发展,金及其合金在喷气发动机、火箭、超音速飞机、核反应堆、电子器械和宇宙航行等方面得到广泛应用,已成为发展高新科学技术不可缺少的原材料。由于金在现代尖端科学技术领域中日益发挥重要作用,所以世界各国都非常重视金的生产,大力进行勘探、开采及选矿、冶炼方面的研究、开发和利用工作。

为了适应工业生产和科学发展的需要以及增加外汇储备,我国将大力发展黄金生产列为国策。国家不仅对黄金生产管理体制作了调整,并且大力开展金矿地质勘探、矿山建设和科研设计工作,目前在全国各地先后发现了一批新的金矿,不断扩大老企业的生产规模,积极研究、引进和消化新技术、新设备,使黄金生产工艺流程、机械装备和生产指标提高到了一个水平。

1.2 金的性质及用途

1.2.1 金的性质

(1) 物理性质

金,元素符号 Au,在元素周期表中原子序数为 79,原子量为 197。金的相对密度很大,密度为 19.32 g/cm^3 ,仅次于铂(21.15 g/cm^3)。金的熔点很高,为 $1\,064.43^\circ\text{C}$,沸点为 $2\,808^\circ\text{C}$,远高于常见的一些金属。金的挥发性很小,在 $1\,100\sim 1\,300^\circ\text{C}$ 之间挥发性微不足道。

纯金为黄色,含银和铂时颜色变淡,含铜时颜色变深。将金加工成超薄金箔时,可呈现红色、紫色、深褐色等。金具有极好的延展性(延展率为 $40\%\sim 50\%$),它的延展性在金属中排在第五位,但在压延下加工性能排在第一位,混入 0.01% 铅或 0.05% 铋时,变脆,延展性和可锻性都大大降低。金的硬度小、质软,用指甲可在金表面划出条痕。金的电阻率在 0°C 时是 $2.06 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,其导电性能仅次于银和铜,居于第三位。导热性能也很高,金的热导率为 $0.317 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(2) 化学性质

金的化学性质非常稳定,在低温或高温时都不会被氧直接氧化,在自然界中多呈自然金的形式,只与碲形成天然化合物——碲化金。

常温下,金不溶于单独的无机酸(如硝酸、盐酸、硫酸),但溶于王水(一份硝酸和三份盐酸)。因此,王水分解法是提取金的重要方法。在氧存在下,碱金属的氰化物溶液可以溶解金,这是氰化法从矿石中提取金的基础。金与氯气作用生成 AuCl_3 , AuCl_3 溶于水而生成一氧三氯金络阴离子 $[\text{AuCl}_3\text{O}]^{2-}$,在酸性条件下加入盐酸则转化为氯金酸,这就是水溶液氯化法提取金的原理。水溶液中的三价金离子可被某些电负性较低的金属(锌、铁等)还原为单质金。

金最易与汞形成合金。这主要是由于金粒表面不易氧化,从而有利于汞向金内部扩散,混汞法即采用这一原理。

1.2.2 金的用途

由于金的化学性质稳定,质量和外形不易发生变化以及良好的机械加工性能和夺目的颜色光泽等一系列特殊性能,自古以来就是制造装潢品和首饰的理想材料。

金又是理想的货币材料,因为金同时具有货币的“价值尺度、流通手段、储藏手段、支付手段和世界货币”这五种职能,所以到目前为止还没有一种商品可代替它作为“国际货币”。一个国家黄金储备多少,常常是这个国家财力大小的一种标志。

黄金具有熔点高、耐强酸、导电性能好等特点,加之它的合金(如金镍合金、金钴合金、金钯合金、金铂合金等)具有良好的抗拉和抗磨能力,因此,黄金被广泛用于电气—电子工业及宇航工业上。金及其合金能焊接对焊缝的强度及抗氧化性要求很高的耐热合金件,如:喷气发动机、火箭、热核反应堆、超音速飞机等的零件。1969年帮助人类首先登上月球的阿波罗11号火箭的通信器辑和电子计算机就使用了约1t的贵金属材料。各种镀金部件可在高温条件下或酸性介质中工作,广泛用于制造高速开关的电接触元件、高精度的电阻元件,还可包在绝缘材料如石英、压电石英、玻璃、塑料等表面,用作导电膜或导电层。

黄金色彩华丽,永不褪色,日常生活中常用于制造装饰品,其中主要用来制造工艺品,世界各国均有许多名贵的金质的或其合金的工艺装饰品,如我国出土文物中的“金缕玉衣”,现代的项链、耳环、戒指、头饰等。

金在医疗部门及一般工业上也得到普遍的应用:如镶牙,治疗风湿关节炎、皮肤溃疡,以及用金的放射性同位素 ^{198}Au 进行肝脏病的检查和治疗癌症方面都有所进展;在一般工业中广泛用于制造仪表零件、笔尖、光学仪器、刻度温度计及在人造纤维工业中用来制造金铂合金喷丝线头等。

1.3 黄金资源和生产需求概况

1.3.1 黄金资源

(1) 世界黄金资源

截至2006年全世界已开采出的黄金大约有15万t,每年大约以2%的速度增加。世界现查明的黄金资源量为8.9万t,储量基础为7.7万t,储量为4.8万t。黄金储量和储量基础的静态保证年限分别为19年和39年。

黄金资源在世界各国的分布很不均衡,有80多个国家生产黄金,有38个国家的储量大

于 50 t,其中储量为 50~500 t 的有 27 个、500~1 000 t 的有 4 个、1 000 t 以上的有 7 个,这 7 个金矿资源大国依次是南非、俄罗斯、美国、巴西、加拿大、中国和澳大利亚。南非占世界查明黄金资源量和储量基础的 50%,占世界储量的 38%;美国占世界查明资源量的 12%,占世界储量基础的 8%,世界储量的 12%。在世界 80 多个黄金生产国中,美洲的产量占世界 33%,其中拉美 12%,加拿大 7%,美国 14%;非洲占 28%,其中南非 22%;亚太地区占 29%,其中澳大利亚占 13%,中国占 7%。

(2) 我国黄金资源

中国黄金协会发布的《中国黄金年鉴 2015》显示,截至 2014 年底,我国探明黄金资源储量达到 9 816.03 t,逼近万吨大关,其中岩金为 7 777.66 t,伴生金 1 548.76 t,砂金 489.61 t。

我国金矿资源比较丰富,已发现金矿床(点)11 000 多处,矿藏遍及全国 800 多个县(市),已探明的金矿储量按其赋存状态可分为脉金、砂金和伴生金三种类型,分别占储量的 59%、13%和 28%。我国金矿分布广泛,除上海市、香港特别行政区外,在全国各个省(区、市)都有金矿产出。已探明储量的矿区有 1 265 处。就省区论,山东省的独立金矿床最多,金矿储量占总储量 14.37%;江西伴生金矿最多,占总储量 12.6%;黑龙江、河南、湖北、陕西、四川等省金矿资源也较丰富。

我国金矿中一小型矿床多,大型一超大型矿床少;金矿品位偏低;微细浸染型金矿比例较大;伴生多;金银密切共生。金矿床(点)主要分布在华北地台、扬子地台和特提斯三大构造域中。中国难处理金矿资源比较丰富,现已探明的黄金地质储量中,这类资源分布广泛,约有 1 000 t 左右(金属量计)属于难处理金矿资源,约占探明储量的 1/4,在各个产金省份均有分布。

我国黄金资源在地区分布上是不平衡的,东部地区金矿分布广、类型多,砂金较为集中的地区是东北地区的北东部边缘地带,中国大陆三个巨型深断裂体系控制着岩金矿的总体分布格局,长江中下游有色金属集中区是伴(共)生金的主要产地。

1.3.2 黄金生产状况

(1) 世界黄金生产状况

21 世纪以来,随着全球经济的不景气,黄金价格非常低迷,这就导致全球黄金产量略有下降。从 2001 年的 2 645 t 下降到 2008 年的 2 415.6 t,下降绝对值达到了 229.4 t,平均年降幅 1.29%。然而,从 2009 年开始,全球黄金产量略有上升,2010 年达到 2 652 t,同比增长 2.63%。2011 年十大产金国共生产逾 2 660 t 黄金。2012 年,黄金企业生产的黄金总量为 2 690 t(据美国地质调查局),排名前 10 位的黄金生产国与 2011 年是相同的。

(2) 我国黄金生产状况

1949 年我国黄金产量仅为 4.07 t,到 1975 年也仅为 13.8 t,国内黄金总存量很少。从 20 世纪 70 年代开始,为解决外汇极度紧缺的问题,国家对黄金生产采取了一系列扶持政策,通过加大黄金企业的投入和改善技术装备,黄金工业逐步进入了发展的快车道。1995 年,我国黄金产量首次突破 100 t;2003 年突破 200 t;2007 年 270.491 t,首次超过连续 109 年世界产金之冠的南非,成为世界第一产金大国;2009 年突破 300 t;2012 年突破 400 t 大关,达到 403.047 t,比上年增加 42.090 t,增幅 11.66%,再创历史新高,连续 6 年位居世界

第一。据中国黄金协会最新统计数据显示,2013 年我国黄金产量达到428.163 t,同比增长6.23%,2014 年我国黄金产量达到 451.799 t,同比增长 5.52%,再创历史新高,连续八年位居世界第一。十大重点产金省(区)为山东、河南、江西、内蒙古、云南、湖南、甘肃、福建、湖北和新疆,这十个省(区)黄金产量占全国黄金总产量的 82.94%。十大重点黄金企业为中国黄金集团公司、山东黄金集团有限公司、紫金矿业集团股份有限公司、山东招金集团有限公司、湖南黄金集团有限公司、埃尔拉多黄金公司(中国)、云南黄金矿业集团股份有限公司、山东中矿集团有限公司、灵宝黄金股份有限公司和灵宝金源矿业股份有限公司,这十家企业矿产金产量占全国矿产金总产量的 45.65%。2013 年,上海黄金交易所各类黄金产品共成交 11 614.452 t,成交额共 32 133.844 亿元;上海期货交易所共成交黄金期货合约 4 017.565 万手,成交额共 107 090.620 亿元。我国黄金产量一直呈上升趋势,近年来黄金产量如表 1-1 所列。

表 1-1

我国近年黄金产量

年度	黄金产量/t	比上一年增长/%
2001	181.87	2.8
2002	189.80	4.4
2003	200.60	5.7
2004	212.33	5.9
2005	224.79	5.9
2006	240.49	7.7
2007	270.49	12.7
2008	282.00	4.3
2009	313.98	11.3
2010	340.88	8.57
2011	360.96	5.89
2012	403.05	11.66
2013	428.16	6.23
2014	451.80	5.52

1.3.3 价格

2005 年以来,受美元贬值、石油价格高涨带来通货膨胀等因素推动,黄金价格一路狂飙。自从 2005 年 11 月 29 日国际黄金价格达到 500 美元/盎司后,国际黄金价格就一路上扬,12 月 12 日国际现货黄金价格在纽约市场涨至 541 美元/盎司,刷新自 1981 年 4 月以来的历史新高。2006 年,在基金逢低买入以及原油价格高涨的带动下,金价持续上扬,并在 2 月初成功超越了 2005 年 12 月中旬的 24 年高点,达到了 575 美元/盎司。2 月下旬至 3 月下旬,金价经过了窄幅的波动,走出了一个双底形态。4 月初,价格突破双底,形成上涨之势。在基金大力推进下,金价疯狂上涨,从 4 月初的 580 美元/盎司直线上涨至 5 月中的 720 美元/盎司,涨幅达到了 24.13%。9 月初,受国际原油价格下跌的影响,金价也持续下跌,并在

10月初再次跌至560美元/盎司的低点。2007年1~8月,黄金价格在600~700美元/盎司之间振荡,从9月开始,黄金价格连破700美元/盎司和800美元/盎司大关,最高达到841.10美元/盎司,创28年新高。到2008年1月突破1980年创下的850美元/盎司的历史高位,到1月底已经突破900美元/盎司,3月中旬更创出1000美元/盎司的历史最高位,4~7月在900美元/盎司左右的高位运行。7月之后,美国次贷危机逐渐引起了全球性的金融危机,国际油价持续走低,加之美元升值等因素,使得国际金价震荡下行,但依旧在700美元/盎司以上的较高点位。2009年11月2日,国际金价轻松刷新了10月中旬创出的历史纪录,新的纪录被定格在1095.55美元/盎司,12月3日,黄金价格最高曾涨至1226.52美元/盎司。2010年国庆前黄金价格突破1300美元/盎司,在国际金价市场上引起一片惊呼,10月2日更高至1314美元/盎司。进入2011年,金价走势可谓波澜壮阔,飞速上涨,9月金价一度创下1920.94美元/盎司纪录最高水平。2012年黄金平均价格(以伦敦黄金定盘价为基准)为1667.91美元/盎司。2013年对于黄金而言注定是不平凡的一年,在过去十余年黄金牛市中,黄金价格从未像2013年这样大幅下跌。第一阶段是1月到3月,金价从1673.20美元/盎司降至1596.95美元/盎司,黄金市场开始出现缓慢下跌的现象,但是整体跌幅并不是很大,大约近5%。第二阶段是4月到6月,金价从1597.68美元/盎司跌至1234.07美元/盎司,市场出现断崖式下挫,空头力量来势凶猛,金价跌幅达26%,整个二季度成为全年跌幅最大的阶段。第三阶段是7月到8月,金价从1233.46美元/盎司上升至1394.73美元/盎司,市场出现了本年度唯一一波像样的反弹,上涨13%。截止到12月30日,国际金价的下跌幅度已达12%,价格在1197美元/盎司附近。

1.3.4 黄金需求消费状况

黄金兼具商品与金融工具的双重特点,其需求可分为黄金饰品、工业用金、投资品和各国官方当局黄金储备四大类。

(1) 饰品需求。随着经济的持续增长,民众收入水平持续提高、生活质量不断改善,将加大黄金饰品消费。全世界生产的黄金,几乎有90%是用于制造首饰。

(2) 投资需求。黄金具有储备和保值资产的特性,可以作为投资品赚取金价波动的差价。投资者对黄金投资品的需求除了与整个宏观经济相关之外,还受到资本市场、外汇市场等其他替代市场变化的影响。目前,国际经济复苏前景尚存在不确定性,世界局部地区政治局势动荡,石油、美元价格走势不明朗,而黄金现货及其依附于黄金的衍生品种众多,凸显黄金的投资价值,黄金的投资需求依然较为强劲。

(3) 工业需求。黄金在工业领域的应用越来越广泛:例如在微电子领域越来越多地采用黄金作为保护层;牙科诊疗中,越来越多地使用黄金修复牙体缺损、缺失或用于矫正。尽管黄金价格高昂,但随着经济的发展,黄金以其特殊的金属性质使其需求量仍然保持较高的水平。

(4) 官方储备需求。随着世界经济发展呈现多极化的趋势,以及经济复苏中的不确定因素对各国货币体系的冲击,传统的美元、欧元、日元等货币在世界各国外汇总储备中的重要性有所下降,加之黄金特有的保值抗通胀的功能,世界各国均开始重视黄金在外汇储备中的地位。在世界经济走势不稳定的环境下,很多国家中央银行亦在逐渐增加对黄金的需求。从各国央行官方储备来看,美国依然是持有黄金储备最多的国家,且在其总储备中占比最

大;我国的黄金储备在世界排名第 6,但由于我国外汇储备额较高,因此黄金储备占总储备的比重偏低。

从黄金的整体消费状况来看,印度是最大的黄金消费国,2004 年消费黄金 617.7 t;美国是第二大黄金消费国;中国在 2005 年的时候黄金消费量超过土耳其,跃居第三位。从近十年来中国黄金产业的供应与需求看,一直呈现供不应求的局面,生产量一直少于消费量,尤其是在 20 世纪 90 年代,供需缺口表现得更为明显。2000 年之后这一情况有所缓解,黄金生产量稳步增长。世界黄金协会(World Gold Council)发布数据显示,印度、中国、美国、德国、土耳其、瑞士、泰国、越南、俄罗斯、沙特阿拉伯是全球黄金总消费最大的 10 个国家;2012 年十大消费国黄金总消费量达到 2 734 t,占当年全球实物黄金总消费量的 62.06%。

据中国黄金协会最新统计数据显示,2011 年,全国黄金消费量 761.05 t,其中:黄金首饰 456.66 t,金条 213.85 t,金币 20.80 t,工业用金 53.22 t,其他用金 16.52 t。2012 年,全国黄金消费量 832.18 t,其中:黄金首饰 502.75 t,金条 239.98 t,金币 25.30 t,工业用金 48.85 t,其他用金 15.3 t。2013 年我国黄金消费量首次突破 1 000 t,达到 1 176.40 t,其中:首饰用金 716.50 t,金条用金 375.73 t,金币用金 25.03 t,工业用金 48.74 t,其他用金 10.40 t。

1.4 金的矿床地质

1.4.1 主要工业金矿物

目前世界上已发现的金矿物和含金矿物有 98 种,常见的有 47 种,而金的工业矿物仅有 10 多种,其中主要是自然金,常含有银并与银构成固溶体系列,如银金矿、银铜金矿和铜金矿等。金与铂族元素呈类质同象混入,有钯金矿、钼金矿、铂银金矿、钯铜金矿和钨铼金矿等。

金与铋结合的铋金矿,与碲结合的碲金矿、亮碲金矿、白碲金银矿、针碲金银矿、碲铜金矿和叶碲金矿等均有发现。

目前只发现一种金和银的硫化矿物——硫金银矿和一种金和银的硒化物矿物——硒金银矿物,没有发现单一的金和银的硫化矿物和金的硒化物矿物。

1.4.2 主要工业金矿石类型

金矿石类型的划分方案很多。根据矿石的物质组成及金的选矿工艺特点可做如下划分:

(1) 单一含金矿石。该类矿石中金是唯一的回收对象,常见的包括石英脉型金矿、含金氧化矿石等。主要根据金的嵌布粒度和赋存状态选择选矿工艺。

(2) 含金黄铁矿型矿石。除金矿物外,主要金属矿物为黄铁矿,金与黄铁矿伴生关系密切,常采用浮选—氰化联合工艺或混汞—浮选流程。

(3) 含砷金矿石。该类矿石中含有较多的砷黄铁矿、毒砂、雄黄等含砷矿物。由于砷对氰化过程有不利的影响,使之成为难处理金矿,因此选冶过程中要脱除砷,常采用浮选—浮精焙烧或预处理(细菌氧化或加压氧化)—氰化工艺。

(4) 含碳金矿石。含碳量高,如无定形活性炭、高分子碳氢化合物、腐植酸类有机物等,由于碳质物可以与金氰络合物发生作用,不利于氰化提金,因此,也需要采用化学氧化法、焙烧等预处理,使碳质物氧化分解,然后氰化。

(5) 含铜金矿石。该矿石中铜矿物含量较高,一般还伴有黄铁矿,铜矿物种类不同,对氰化过程的影响也不同。原生硫化铜矿物(黄铜矿)对氰化影响不大,易氧化的铜矿物(蓝铜矿、斑铜矿、辉铜矿、赤铜矿、孔雀石)将使矿浆中的铜离子增加,显著消耗氰化物。含铜金矿石通常采用浮选—氰化工艺回收金、铜两种有价金属。

(6) 含金多金属硫化矿。该类矿石中硫化物组成复杂,含多种有价金属,如含金铜镍矿、含金铅铜矿、含金铜铅锌矿、含金铅锌矿等。这类矿石综合利用价值高,选矿工艺通常比较复杂。

1.4.3 主要金矿床类型

金矿床的工业分类可分为岩(脉)金矿床和砂金矿床。

(1) 岩(脉)金矿床

岩金矿床又称原生金、矿金,是指具有工业开采价值的含金矿脉,是目前产金的最重要的资源。国内目前对岩金矿床工业类型的划分尚无统一标准,一般参照岩(砂)金地质勘探规范如下:

① 石英脉型金矿床。该类矿床分布最为广泛,也是我国当前生产的重要工业类型。矿体围岩界限明显,矿床规模大小不等。金品位较富,常伴生有银。金属矿物以自然金、银金矿、黄铁矿为主,脉石矿物以石英为主。石英脉型金矿分布非常广泛,河南、陕西、吉林、河北、内蒙古、山东、山西和湖南都有分布。

② 破碎带蚀变岩型金矿床。该类矿床是我国近几年发现的重要工业类型,储量仅次于石英脉型金矿床。该矿床的规模一般较大,矿石金品位高且易采易选。金属矿物以自然金、银金矿、黄铁矿为主,脉石矿物以石英、绢云母和长石为主。该矿床主要分布在山东招远地区,如焦家、新城、三山岛、河东等。

③ 斑岩型金矿床。矿床规模大小不等,以大型为主。矿石中金属矿物主要为自然金、自然银、银金矿和黄铁矿,脉石矿物主要为石英、方解石和白云石。这类矿床主要分布在黑龙江、吉林等地。

④ 砾岩型金矿床。又称“兰德型金矿床”,是世界上目前储量和产量最大的金矿床。矿石中除金外,伴生有铀、钍、稀土等元素。南非、加拿大、巴西分布较多,我国尚无重大发现。

⑤ 沉积变质型金矿床(霍姆斯塔克型)。美国第一大金矿床。矿床具有明显的沉积变质特征,金矿体明显受地层层位控制,多形成中—大型矿床。

⑥ 微细粒浸染碳酸盐型金矿床(卡林型)。美国第二大金矿床。矿石含金品位较低,但矿床规模巨大。矿石中硫化物含量低,以碳酸盐、石英、黏土矿物为主。金主要呈微细次显微金、显微金的形式赋存于硫化物、碳酸盐和黏土矿物中。

⑦ 伴生金矿床。国外伴生金主要来源于斑岩型铜矿床,我国除此之外,在矽卡岩型铜矿床中伴生金的储量也很可观。

(2) 砂金矿床

砂金矿床按其形成条件和部位可划分为以下几种类型:

① 残积砂矿。形成于原地,由原生矿床上部的松散和破坏而成。

② 坡积砂矿。沿分布有原生矿床的斜坡受重力向下移动的残积砂矿物质,又分为原坡积砂矿和崩积砂矿两类。

③ 冲积砂矿。通常产在河谷,是破碎物质被水流搬运和沉积而成的。

④ 三角洲砂矿、湖泊砂矿和潟湖砂矿。借助于水流携带的碎屑物质在三角洲湖泊和潟湖中堆积而成的。

⑤ 滨岸砂矿。海滨砂矿和湖滨砂矿是碎屑物质被拍岸浪和沿岸水流不断搬运和堆积而形成的。

⑥ 冰川砂矿。流动冰川造成的碎屑物质经过搬运和堆积在山区形成的。

我国砂金资源也较丰富,从目前的生产情况看,主要以各种类型的冲积砂矿为主,分布于黑龙江、吉林、四川、陕西、新疆和甘肃等地。

1.5 金的工艺矿物学特性

工艺矿物学是指导和服务于选冶工艺研究的矿物学研究,其任务是确定选矿及处理方法、选择工艺流程和为确定工艺理论指标提供依据,并为预测、控制金属损失和评定工艺处理效果提供科学依据。主要的研究内容可以大致概括为以下几个方面:

(1) 化学组成和矿物组成。

(2) 有价值元素和有害元素的赋存形态以及各相态的含量。

(3) 矿物的晶体化学特性,物理、化学及表面物理化学性质,以及如何利用和改变这些性质为选冶服务。

(4) 矿物的结构构造,即矿物的形态、粒度、分布、相互关系、嵌布类型等以及它们被加工和利用过程中的特性及变化。

金矿石的工艺矿物学研究也不例外,但由于金在矿石中的含量低,金矿物类型较单一,加之金选冶工艺的特殊性,因此对金的粒度测定和统计,对金在不同矿物中的分布和存在状态的测定分析,对影响氰化和混汞的金粒表面性质的研究,对影响氰化和混汞的有害元素、有害矿物的研究和测定等,是金矿石工艺矿物学研究的重点。

1.5.1 金的赋存状态

金的赋存状态是指金在矿石中的存在形式,主要是确定金究竟是以何种矿物存在,或以分散状态存在于何种矿物中,并作定量和尽可能查清分散相的性状。金的赋存状态是由原子结构和晶体化学性质及伴生元素的种类、数量和性质决定的。金在矿石中可呈以下三种赋存状态:

(1) 夹杂金。矿石中不同尺寸的金矿物颗粒或粒子,与其相邻矿物中元素无化学键关系,只是一种伴生关系,即“独立矿物”是矿石中金赋存的主要状态。

(2) 类质同象金。类质同象金是指矿石中金的部分构造位置被其他元素所占据。如金与银的原子半径相近,分别为 144.2 pm 和 144.5 pm,所以它们可互相替换进入对方矿物晶格,构成类质同象金,即固溶体状态。类质同象金是矿石中金赋存的主要状态。

(3) 吸附金。吸附金以离子或离子团的形式被符号相反的离子团所吸附。如贵州黔西

南金矿,分布面积大,含金品位较高,属大型金矿床。但未发现可见的自然金和其他金的独立矿物。而且该矿床金在硫化物中的分布率仅占原矿的 5.83%,实际上占总量 93.71% 的金赋存在以水云母为主的黏土矿物中,研究认为粒度约为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的胶体金被云母为主的黏土矿物所吸附,是一种新类型金矿。

查清矿石中金矿物种类是重要的。虽然已经知道在自然界中金多呈自然金和金银系列的矿物存在,但有的金矿床也存在一些金与半金属元素如碲、铋等形成的天然化合物,它们不能用混汞和氰化提取,应采用其他相应的工艺,否则会造成金属流失,同时也不能正确地评价选冶工艺的合理性。即使是金—银系列的矿物,也应根据其金、银含量定出亚种类为宜,因为银含量高的矿物表面容易形成一层薄膜,影响混汞和氰化效果。使用电子探针或化学物相分析均能查清金矿物种类。

1.5.2 金粒嵌连关系

金粒是指不同尺寸的各种金矿物颗粒的总称。金粒的嵌连关系是指金粒的空间位置,可用金粒其他矿物的相互关系来表征,金粒嵌连关系分为裂隙金粒、粒间金粒和包裹金粒三类。裂隙金粒中金矿物颗粒界线被裂隙壁所限制,即金粒位于一种矿物的裂隙中。粒间金粒是指金粒界线与两种或两种以上矿物颗粒相邻或相切,也就是金粒处于两种或更多种矿物颗粒之间。包裹金粒界线被其他矿物颗粒界线所限制,但不相切,即金颗粒被一种矿物颗粒完全封闭。

处于矿石力学上薄弱部位的金,如裂隙金、孔洞中或是弱化了矿物颗粒界面中的金粒,在破磨过程中将会优先解离,溶液可通过这些结构的部位扩散后与金粒接触作用。而包裹金尤其呈微—亚微粒包裹的金粒由于被封闭而难以与溶液接触,所以氰化提金或混汞提金效果都不会令人满意。

1.5.3 金粒粒度

金粒的粒度测定和金粒嵌连性质测定一样是选择金矿处理工艺的重要依据。金粒的粒度是指金粒所占空间的大小,用其能通过的筛孔的最小尺寸表示,或用金粒短径方向上能通过筛孔的最大截距表示。当用镜下测定时多用粒子直径或宽 $\times$ 长尺寸来表示单个金粒大小。

金粒粒级范围的划分方法很多,国内学者结合选矿工艺特征将金粒分类。一般认为 $0.3\ \text{mm}$ 是浮选和混汞的上限, $0.1\ \text{mm}$ 是机械选矿的下限,而 $0.074\ \text{mm}$ 是氰化提金粒度上限,也是通常磨矿细度的标准界限。 $0.5\ \mu\text{m}$ 则是光学显微镜所能检测的限度。依此可将金粒划分为:巨粒金(大于 $2.0\ \text{mm}$)、粗粒金($0.3\sim 2.0\ \text{mm}$)、中粒金($0.074\sim 0.3\ \text{mm}$)、细粒金($0.01\sim 0.074\ \text{mm}$)和微粒金($0.0005\sim 0.01\ \text{mm}$),粒度小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的金粒为次(亚)显微金,只有借助电子显微镜方可判定。

巨粒金和粗粒金只能用重选法富集,中、细粒金可用混汞法提取,细粒金应用浮选法或氰化回收最有效,而微粒金及次显微金由于难以甚至不可能单体解离或暴露,只能在载体矿物精矿的冶炼过程中提取。

1.5.4 金的化学成分

自然界中金粒的成分主要是金和银。按颗粒中金银比例不同将自然金与金银系列矿物

分类见表 1-2。

表 1-2 金粒的化学成分(%)

金矿物	自然金	含银自然金	银金矿	金银矿	含金自然银	自然银
Au	>90	80~90	50~80	20~50	10~20	<10
Ag	<10	20~10	50~20	80~50	90~80	>90

电子探针是目前确定单个金粒成分最有效的方法。如要确定金矿物的平均成分,最好采用重砂提取—化学分析方法或化学溶矿—残渣分析方法。只有知道金矿物的平均成分才会对了解选冶过程及产品质量起一定作用。

通常谈及金的品质时多用“成色”一词,这是个商业术语,主要用于描述冶炼产品、金制品中金的含量和杂质含量。常用含金的千分数或开制数表示,两者的关系见表 1-3。

表 1-3 含金千分数与开制数的关系

含金百分数/%	含金千分数/‰	开制数/K
100	1 000	24
91.7	917	22
75.0	750	18
58.5	585	14
41.6	416	10

1.5.5 金粒表面薄膜

金粒表面覆盖膜是指表面有一层薄膜或失去光泽的金粒,按表面薄膜覆盖的程度可划分为无膜、不完全表膜和完全表膜。

(1) 无膜:表面清洁,光滑。

(2) 不完全表膜:表面没有完全覆盖或虽被完全覆盖,但表膜具有多孔性质。

(3) 完全表膜:金粒被完全覆盖或完全失去光泽。据其结构疏松程度,又可分为两个亚类。一个亚类是疏松的膜,4 h 机械搅拌能使部分或全部脱除;另一个亚类是微密的覆膜,只能用化学方法除去。

薄膜的覆盖隔离了药剂与金粒的作用,对混汞、浮选及氰化提金等都有不利的影响。金粒表面覆膜可通过各种仪器分析和测定其结构和成分。

2 金矿石的重选

2.1 概 述

重选法是利用矿粒的密度和粒度的差异,借助于介质流体动力和外界产生的各种机械力的联合作用,造成适宜的松散分层和分离条件,从而获得不同密度或不同粒度产品的工艺过程。在国内外的选金厂中,采用重选是极为普遍的。

重选不仅是砂金矿石的传统提金方法,而且是最基本的选矿方法,又是目前含有游离金、品位极低的含金矿石及尾矿等进行粗选的唯一方法,也是回收难溶金最优先采用的方法。

大多数含金矿石中都含有一定数量的粗粒游离金($+0.1\text{ mm}$),用浮选法、湿法冶金处理都难以回收,因此重选多用于选别砂金。重选常用于脉金在浮选和浸出前后回收单体解离的粗粒金,并常与混汞法配合使用。

在氰化选厂中,原生矿床的含金矿石中含有足够多的粗粒金,而这些粗粒金能在矿石准备回路中从连生体中解离出来,可用重选进行预先回收,而有助于简化氰化流程。

在从金矿石中选金的现代化生产实践中,广泛应用的重选设备有跳汰机、溜槽、摇床、螺旋选矿机、圆锥选矿机、短锥水力旋流器、圆筒选矿机和新型离心选矿机等。

2.2 重力选金方法及设备

2.2.1 跳汰机

跳汰选别原理可简述为被分离的矿物颗粒在振动(脉冲)的垂直交流介质中,依其相对密度的不同沿垂直面分层而得到分离,最常用的介质为水,而介质的脉冲由专门的传动机构产生。分选过程大致为将待分选的矿石给到跳汰室筛板上构成床层。水流上升时床层就被推动松散,密度大的颗粒滞后于密度小的颗粒,相对留在了下面;接着水流下降,床层趋于紧密,重矿物颗粒又首先进入底层。如此经过反复的松散—紧密,最后达到矿物按密度分层。将上层和下层矿物按一定方式分别排出后,即得到精矿和尾矿。

跳汰机有多种结构形式,按推动水流运动机构的不同可分为以下五类:活塞跳汰机、隔膜跳汰机、无活塞跳汰机、水力鼓动跳汰机和动筛跳汰机。

选金常用的跳汰机主要为各种类型的隔膜跳汰机。隔膜跳汰机按隔膜安装位置的不同,分为三种类型:①旁动(或上动)式隔膜跳汰机,隔膜位于跳汰室旁侧;②下动式隔膜跳汰机,隔膜水平地设在跳汰室下方,并有可动锥底形式和将隔膜安装在筛板下方两种形式;③侧动式隔膜跳汰机,隔膜垂直安装在机箱筛下侧壁上,分为内隔膜和外隔膜两种。