

黄金及二次资源 分选与提取技术

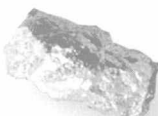


◎ 徐晓军 白荣林 张杰 等编著



化学工业出版社

黄金及二次资源 分选与提取技术



◎ 徐晓军 白荣林 张杰 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

为了满足我国黄金及含金二次资源的生产与发展需要,结合当前国内外有关科研与工程实践最新技术、成果以及发展趋势,特编写本书。本书重点介绍和总结了金矿石选矿与浸取,难浸金矿的预处理、液相中金的提取、含金二次资源提金等方面的技术和应用。

图书在版编目(CIP)数据

黄金及二次资源分选与提取技术/徐晓军等编著. —北京:化学工业出版社, 2009.1

ISBN 978-7-122-03845-6

I. 黄… II. 徐… III. ①金矿物-分选②金矿物-提取冶金 IV. TF831.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 154725 号

责任编辑:董琳

装帧设计:韩飞

责任校对:徐贞珍

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数366千字 2009年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言

黄金是人类最早发现和开采利用的金属之一，用途十分广泛，既具有消费和储备功能，又可广泛应用于现代高新技术产业中。20 世纪 90 年代以后黄金产量突破了 2500t，同时再生回收的金产量也得到了迅速增长。我国现已成为世界产金大国，2007 年黄金产量达到 270t，跃居世界第二；其中黄金矿山产金约占 80%，有色副产金约占 20%。随着现代黄金开采、选矿和提取等新技术的迅速发展与应用，以及世界黄金消费及价格的刺激作用，黄金及二次资源的选矿与提取技术将会得到更迅速的发展，黄金生产也将为社会发展作出更大的贡献。

为了满足我国黄金及含金二次资源的生产与发展需要，根据近年来的文献资料，结合当前国内外的有关科研与工程实践最新技术和成果以及发展趋势，组织国内有关专家，特地编写本书。本书重点总结和介绍了金矿石的选矿与浸取、难浸金矿的预处理、液相中金的提取、含金二次资源提金等方面的技术和应用，力求做到以理论为基础，以实践为指导，深浅结合，试图形成较为系统完整的黄金及二次资源的选矿与提取技术体系。本书可作为相关技术和科研人员的参考书，亦可作为相关专业人员的教材。

本书由徐晓军教授（博士生导师）组织定稿，第 1、3、6 章由徐晓军编写，第 2 章由刘先春高工、徐晓军编写，第 5、9 章由白荣林高工编写，第 4、7、10 章由张杰高工、徐晓军编写，第 8 章由白荣林、张杰、徐晓军编写，第 11 章由陈茂生高工、徐晓军编写。

由于作者水平有限，时间仓促，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。同时，某些引用和参考的文献可能被遗漏，敬请有关作者谅解。

作 者

2008 年 6 月于昆明理工大学

目 录

1 概述	1
1.1 国内外黄金资源、生产和消费概况	1
1.2 金的性质及用途	3
1.3 主要工业金矿物及金矿床类型	4
1.3.1 主要工业金矿物	4
1.3.2 主要工业金矿石类型	5
1.4 我国含金矿石产出特点	6
1.5 金矿石工艺矿物学特性与提金技术	8
2 金矿石的重选	12
2.1 概述	12
2.2 重力选金方法及设备	13
2.2.1 跳汰机选金	13
2.2.2 溜槽选金	14
2.2.3 摇床选金	15
2.2.4 圆筒选矿机选金	16
2.2.5 螺旋选矿机选金	16
2.2.6 圆锥选矿机选金	17
2.2.7 短锥水力旋流器选金	18
2.2.8 选金离心盘(盆)	19
2.2.9 复合力场离心选矿机选金	20
2.2.10 多层圆盘重选机	23
2.3 砂金矿重选原则工艺	25
2.4 采金船及选金工艺	26
2.5 砂金矿重选工艺及技术发展	27
2.6 砂金矿选金生产实例	27
2.6.1 采金船选金生产实例	27
2.6.2 砂金矿固定式选金厂的生产实例	28
3 金矿石的浮选	30
3.1 概述	30
3.2 浮选药剂	31
3.2.1 捕收剂	31
3.2.2 调整剂	32
3.2.3 起泡剂	32
3.3 金及含金矿物的浮选特性	33

3.4	影响金浮选的工艺因素	34
3.4.1	pH 值	34
3.4.2	矿浆电位 (Eh)	34
3.4.3	物理因素	35
3.4.4	矿石浮选的化学调浆	35
3.4.5	浮选工艺	36
3.4.6	浮选设备	36
3.5	金矿石的浮选综合流程	37
3.5.1	单一浮选流程	37
3.5.2	重选-浮选选别流程	37
3.5.3	混汞-浮选流程	38
3.5.4	浮选-氰化流程	38
3.5.5	多种复杂联合流程	39
4	金矿石及精矿的混汞提金	40
4.1	混汞提金基本原理	40
4.2	影响混汞提金效果的主要因素	41
4.3	内混汞设备及方法	43
4.3.1	碾盘混汞	43
4.3.2	捣矿机混汞	43
4.3.3	混汞筒混汞	44
4.3.4	球磨机混汞	45
4.4	外混汞设备及方法	46
4.4.1	混汞板	46
4.4.2	其他新型混汞设备	47
4.5	汞膏处理及汞毒的防护	48
4.5.1	汞膏处理	48
4.5.2	汞毒的防护	49
4.6	混汞提金实例	49
5	氰化法浸金	51
5.1	氰化浸金基本原理	51
5.2	氰化浸出剂	53
5.2.1	氰化物	53
5.2.2	空气和氧	54
5.2.3	过氧化物助浸剂	54
5.3	影响金氰化浸出的主要因素	56
5.3.1	氰化物及氧的浓度	56
5.3.2	温度	57
5.3.3	金的粒度	57
5.3.4	pH 值	57
5.3.5	矿浆浓度与矿泥	58
5.3.6	浸出时间	58

5.3.7	铅盐的作用	58
5.3.8	伴生矿物	58
5.4	搅拌氰化浸出	60
5.4.1	浸出工艺	60
5.4.2	搅拌氰化浸出槽	61
5.4.3	浸出矿浆的固液分离与洗涤	64
5.5	渗滤氰化槽浸	65
5.5.1	渗滤浸出槽	65
5.5.2	渗渣槽浸操作	66
5.5.3	渗滤氰化槽浸的主要影响因素	66
5.6	渗滤氰化堆浸	67
5.6.1	堆浸技术及工艺	67
5.6.2	一般渗滤氰化堆浸	68
5.6.3	制粒-渗滤氰化堆浸	70
5.6.4	影响堆浸的主要因素	70
6	难浸金矿的预处理技术	71
6.1	难处理金矿的工艺矿物学特点	71
6.1.1	难处理金矿的工艺矿物学特点	71
6.1.2	我国难处理金矿类型和特征	72
6.2	细菌氧化法	73
6.2.1	含金硫化矿物生物氧化的细菌	73
6.2.2	细菌氧化含金硫化矿的机理	73
6.2.3	细菌氧化工艺	75
6.2.4	影响细菌浸金效果的主要因素	77
6.2.5	细菌生物氧化生产实践	78
6.3	氧化焙烧法	81
6.3.1	概述	81
6.3.2	氧化焙烧原理	83
6.3.3	加石灰氧化焙烧法	85
6.3.4	其他焙烧方法	86
6.4	加压氧化法	87
6.4.1	概述	87
6.4.2	酸浸加压氧化	88
6.4.3	碱性加压氧化	92
6.4.4	硝酸盐催化氧化法	94
6.5	难浸金矿三种预处理方法的比较及评价	96
6.6	难处理金矿的其他预处理方法	98
6.6.1	超细磨浸与高效浸金反应器	98
6.6.2	Activox 法	99
6.6.3	电化学氧化浸出法	99
6.6.4	氯化氧化法	100
6.6.5	氨-氰体系浸出铜金矿石	101

6.6.6	加温加压-管道氰化浸出	102
7	非氰浸金技术	103
7.1	硫脲浸出	103
7.1.1	硫脲的物理化学性质	103
7.1.2	硫脲浸金溶液化学	104
7.1.3	影响硫脲浸出效果的因素	105
7.1.4	硫脲法浸金应用实例	106
7.2	硫代硫酸盐浸出法	109
7.2.1	硫代硫酸盐浸金溶液化学	109
7.2.2	硫代硫酸盐应用实例	111
7.3	其他浸金方法	112
7.3.1	氯化浸出法	112
7.3.2	溴化物浸出法	113
7.3.3	多硫化物浸出法	113
7.3.4	石硫合剂浸出法	114
7.3.5	氨浸法	115
8	液相中金的吸附与萃取	116
8.1	活性炭吸附提金法	116
8.1.1	概述	116
8.1.2	活性炭吸附提金原理	117
8.1.3	提金用活性炭及特性	118
8.1.4	影响活性炭提金效果的因素	119
8.1.5	活性炭提金工艺	123
8.1.6	活性炭提金设备	125
8.1.7	磁炭法 (MIP)	126
8.1.8	载金炭的解吸	128
8.1.9	活性炭的失活	133
8.1.10	炭的活化与再生方法	134
8.1.11	炭吸附提金厂实例	136
8.2	树脂吸附法	142
8.2.1	提金树脂类型	142
8.2.2	阴离子树脂吸附原理及特性	143
8.2.3	树脂吸附提金方法	149
8.2.4	载金树脂的解吸与再生	151
8.2.5	活性炭与树脂吸附法提金的比较	154
8.2.6	树脂提金厂实例	156
8.3	萃取剂萃取富集法	161
8.3.1	概述	161
8.3.2	原理	161
8.3.3	萃取剂及应用	161

9 金的沉积与提取	167
9.1 锌置换沉积法	167
9.1.1 锌置换沉积原理	167
9.1.2 影响锌置换沉积效果的因素	169
9.1.3 锌置换沉积方法	171
9.1.4 从氰化-炭吸附解吸液中置换提金	174
9.1.5 锌置换沉积法应用实例	175
9.2 电解沉积法	177
9.2.1 电积原理及影响因素	177
9.2.2 电积方法及应用	179
10 金的冶炼与提纯	184
10.1 金的粗炼	184
10.1.1 金的火法冶炼	184
10.1.2 金的湿法冶炼	187
10.2 金的精炼	189
10.2.1 概述	189
10.2.2 火法精炼	189
10.2.3 化学精炼法	189
10.2.4 电解精炼法	191
10.2.5 溶剂萃取精炼法	193
10.3 成品金锭的熔铸	194
11 含金二次资源的分选提金技术	195
11.1 含金有色金属二次资源的分选提金技术	195
11.1.1 从铜阳极泥中分选提取金	195
11.1.2 从铅阳极泥中分选提取金	197
11.1.3 从锑阳极泥中分选提取金	197
11.1.4 从银锌壳中分选提取金	198
11.2 从含金硫酸烧渣中分选提取金	198
11.3 从含金废旧料中分选提取金	200
11.3.1 含金废料来源和预处理	200
11.3.2 含金废旧料分选提取金方法	201
11.4 从电子工业含金废料及废旧电脑中分选提取金	205
11.4.1 电子工业含金废料分选提金方法	205
11.4.2 含金废旧电脑分选提金方法	206
11.4.3 含金废电脑生物处理提金技术与方法	209
参考文献	210

1

概述

1.1 国内外黄金资源、生产和消费概况

(1) 世界黄金资源 截止 2006 年全球已开采出的黄金大约有 15 万吨, 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 万吨, 储量基础为 7.7 万吨, 储量为 4.8 万吨。黄金储量和储量基础的静态保证年限分别为 19 年和 39 年。

金矿资源在世界各国的分布很不均衡, 有 80 多个国家生产金, 有 38 个国家的储量大于 50t, 其中储量 50~500t 的有 27 个、500~1000t 的有 4 个、1000t 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%。

我国金矿资源比较丰富, 根据金矿成矿地质条件, 预测潜在储量 15000t, 现已发现金矿床(点) 7148 处, 已探明的 1265 处, 全国除上海市、香港特别行政区外, 各省、直辖市、自治区均有探明的资源。2006 年, 在滇黔桂、陕甘川等地区探明黄金储量超过 650t; 2007 年至今, 国内陆续新发现五座大型、特大型金矿。分别为已探明储量 120t 的冈底斯雄村铜金矿、115t 的东昆仑青海大场金矿、308t 的秦岭甘肃省甘南地区阳山金矿、51.83t 的山东省莱州市寺庄金矿、158.26t 的海南抱伦金矿, 以及一些铅锌矿外围的金矿等。就省区论, 以山东独立金矿床最多, 金矿储量占总储量 14.37%; 江西伴生金矿最多, 占总储量 12.6%。

金矿床可划分为岩金矿床、砂金矿床和伴生金三大类, 其储量比大约为 70:15:15。全世界在 500t 以上储量的特大型金矿共有 25 个以上, 其占有的储量为全世界金矿床总储量的 70% 以上。

(2) 世界黄金生产 金是人类最早开采利用的金属之一, 但世界黄金产量的 90% 是近 500 年生产的, 25% 是近 20 年生产的。矿产金的生产是黄金供应的主要来源, 在 1900 年世界黄金产量每年 300t, 在 20 世纪早期最高年份产量达到每年 700t、20 世纪 30 年代最高产量年份达到每年 1300t、20 世纪 60 年代最高产量年份产量接近 1500t, 20 世纪 80 年代世界黄金年产量突破 2000t, 20 世纪 90 年代产量突破 2500t, 近十年世界矿产黄金的总量变化不大, 基本维持在 2500t 上下, 但地区的产量变化较大。再生金是指通过回收旧首饰及其他含金产品重新提炼的金, 再生金产量与金价高低成正相关关系; 2006 年全球再生金产量为

1107.6t,与2005年相比增加了25%。

近几年来,产金量在100t以上的国家有南非、美国、澳大利亚、中国、俄罗斯、秘鲁、加拿大、印度尼西亚,产金量约在50t的有乌兹别克斯坦、巴布亚新几内亚、加纳、坦桑尼亚、巴西等,产金量在20~50t的有马里、智利、菲律宾、阿根廷、津巴布韦、墨西哥、哥伦比亚等国。南非是世界第一产金大国,我国2006年全年累计产金240.078t,2007年达到270t,跃居世界第二。其中,黄金矿山产金约占80%;有色副产金约占20%。10个重点产金省(区)矿产金所占全国矿产金产量的78.4%,所占比重约为山东26.4%、河南14.0%、福建8.4%、湖南5.6%、陕西5.1%、辽宁4.4%、内蒙古3.8%、甘肃3.7%、新疆3.7%、吉林3.3%。有色副产金中5家企业占有有色副产金的86.4%以上,所占比重约为江西铜业公司占29.7%、云南铜业公司占24.4%、安徽铜陵有色公司占13.1%、湖北大冶有色公司占10.7%、上海鑫冶铜业有限公司占8.5%。

(3) 世界黄金消费 黄金在人类历史中的应用,从人类文明的初期至公元650年。黄金的应用主要局限于装饰、装潢及作为王室权势的显示。这段时期常被称作装饰或装潢时代。

公元前650年至1914年,称为货币时代。黄金已作为货币进入了全面应用时期,并能进行自由流通,但这段时间仍有不少黄金作为装饰品使用。长期以来,黄金又作为财富的储藏手段,2003年作为投资,人们购买黄金的数量增加了420t达888t,致使黄金的价格持续上升。

1914年第一次世界大战以后,黄金的流通及其作为货币应用大量削减,并在许多国家中最终受到限制,除了加工珍宝装饰物以外,大部分黄金都从铸锭厂直接进入国库,这种情况一直在许多国家持续到今天。

黄金可广泛用到重要的现代高新技术产业中,如电子技术、通讯技术、宇航技术、化工技术、医疗技术等行业,其中,黄金在电触点材料、导电材料、金基焊料和电子浆料等电子工业上的用量占到工业用金的90%以上,而且其用量还在年年增长。但黄金作为财富的储藏手段以及珠宝首饰用途掩盖了其工业上的用途。从1950年起,黄金的工业用量增加,人类进入了黄金应用史中的工业应用时代。随着黄金的更多新工业用途被发现,未来5~10年黄金的消费每年将增加300~400t。

(4) 中国金矿资源分布简述 根据金矿床与区域地质条件,我国主要金矿基本分布在9个金矿成矿区内。

① 东北北部砂金矿区。主要有黑河、呼玛、乌拉嘎和桦川一带的砂金矿,属于河流冲积砂矿。近年来在中生代侏罗纪火山—侵入体中找到团块式原生金矿床。

② 燕辽金矿区。包括吉林东部及河北东部的一些金矿床。大部分为产于前震旦纪的片麻岩、片岩及花岗闪长岩中的含金石英脉矿床,其中有夹皮沟、金厂峪、五龙、张家口等金矿床。

③ 山东金矿区。山东招远一带含金石英脉开采历史悠久,有玲珑金矿床。后来又发现蚀变花岗岩型,如三山岛、焦家、新城等大型金矿床。这一地区的金矿床储量和产量均居全国第一位。

④ 东南地区金矿区。包括湘、桂的脉金,多为板溪系的矿化板岩和连溪亚群中的含金石英脉。本地区金矿较多,但规模较小。湘西金矿是本区最大的金矿。

⑤ 秦岭—祁连山金矿区。本区以矿脉成群、品位高、多金属共生为其特点。代表性的矿山有秦岭、文峪、潼关等金矿。

⑥ 西南地区金沙江流域及四川盆地的一些河流的阶地砂金矿区。

⑦ 台湾金矿区。金瓜石金矿是与第三纪火山岩有关的大型金矿。

⑧ 新疆金矿区。自治区北部以及阿尔泰山区的西南部脉金和东南地区的砂金。

⑨ 西藏金矿区。分布于雅鲁藏布江以南各支流两侧的阶地之中。

1.2 金的性质及用途

(1) 金的物理和化学性质 金在化学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 19.32g/cm^3 。纯金的颜色为金黄色, 它随杂质的含量变化而变化: 银与铂能使金的颜色变淡; 铜能使金的颜色变深; 胶体状的金根据其分散程度的不同显现出不同的颜色。

金硬度为 2~3.7, 是一种很软的金属, 仅次于铝和锡, 用指甲可在纯金表面上划出条痕。但添加一定数量的银和铜后, 可增加其硬度。

金具有很好的延展性, 高于一般金属。1g 纯金可拉成 3420 多米长的细丝, 可压成厚度为 $0.23\text{mm} \times 10.8\text{mm}$ 的金箔。纯金中若混入少量杂质, 其力学性能就明显改变。如当纯金中混入 0.01% 的铅时, 变脆, 延展性和可锻性大大降低。

金的熔点为 1064.43°C , 同时挥发性很小, 在 $1000 \sim 3000^\circ\text{C}$ 时, 熔融金的挥发度很小, 但其挥发度随温度的升高而增加。金具有良好的导电导热性能, 金的电导率仅次于银和铜, 金的热导率为银的 74%, 在金属中居第三位。

金在低温或高温时不会被氧直接氧化, 化学性质非常稳定。金与单独的无机酸 (如盐酸、硝酸、硫酸) 在常温下不起作用, 但氰化物溶液和王水 (三份盐酸和一份硝酸) 都能溶解金。

金能与贵金属及许多其他金属组成合金或化合物, 也能在这些金属中富集。常见的合金有: 金银合金、金铜合金、金银铜合金和金汞合金等。其原因在于金的原子半径与这些金属的原子半径非常接近。

自然金是金常见的自然形态, 含有银和铜等杂质的自然金与这些金属的合金有本质的不同, 自然金则是由于物理化学条件的变化从水溶液中析出的。而合金是这些金属熔融后又凝固成的均质结构产物。

在自然金的表面常有一层氧化物或细粒脉石形成的薄膜, 称为包裹层, 这时表面颜色会呈褐色、深褐色, 甚至黑色。这种包裹层既影响了对金的视别, 又增加了选矿对其回收的困难。

(2) 金的用途 金具有良好的物理机械性能、抗蚀性能和很高的化学稳定性, 用途十分广泛。

首先, 金因有金黄的颜色和易加工性能, 始终被用于制作首饰和装饰品。据统计, 在发达工业国家首饰用金占 70.4%, 在发展中国家占 96.7%; 2006 年世界黄金消费量达到 3235.1t, 其中首饰用金达 2840.3t。

自古以来, 金一直作为制造货币的一种金属, 至今仍是国际上最重要的货币。货币具有五种职能, 即价值尺度、流通手段、支付手段、储藏手段和世界货币, 所有的货币中只有金同时具备这五种职能。所以金是世界货币, 是硬通货和保值金属。在国际上把黄金储备作为衡量一个国家支付能力和经济实力的重要标志之一。

金在现代工业中应用最多的是电子工业。1968 年, 西方国家电子工业的黄金消耗量为 82t, 1973 年为 127t, 1975 年降低至 67t。从 1978 年起, 西方国家电子工业的黄金消耗量保持在每年 80t 水平。金在电子工业主要以键合金丝、电接触材料、金基焊料、电阻材料及金基浆料等形式应用。在现代接触式电话系统的电路中每部就有 33 个黄金触点。在电路上的触点中, 应用黄金涂上一层很薄的金膜, 就可在较低的电压下获得较高的效率, 这是其他金属不可能实现的, 如在现在世界流行的瞬时显像相机中就采用了这种电路。黄金在电子工

业上的用量占工业用金的90%以上,而且用量年年增长。

在航空工业中,用金铂合金制造发动机的火花电极塞。由于金对黄色吸光性好,反射率仅为94.4%,在军事上可用来防御导弹和防御来自普通热源的热辐射。金膜的热反射作用也可应用在太阳能聚集器上。

在化学工业中,金用作钢管的镀层,以输送腐蚀性物质。在建筑业中,金被用来作现代楼房窗户的一种高级绝热介质。玻璃表面镀上一层 $0.13\mu\text{m}$ 的金膜,可反射掉98%以上的红外线、红光和黄光,并可以最大限度地使自然光通过,并可电防尘。在冬季能保温,在夏季能反射阳光。这种玻璃在火车、汽车和大型客机也得到了应用。金膜通电后还可以保持不被污染而又透明的性能。

金的包金不仅可用来制造仪器仪表的零件和触头;还可用来制成表壳和笔尖。金的合金制品可靠性高,而且寿命长。金在医疗等方面也存在广泛的应用,例如可以用金盐治疗肺结核,用金的蒸气激光治疗胃癌、肺癌等。

1.3 主要工业金矿物及金矿床类型

1.3.1 主要工业金矿物

目前在自然界中发现的金矿物约70余种。矿物中金的含量小于5%时,则称其为含金矿物或载金矿物。常见的为自然金、银金矿和金银矿,其次是碲金矿和碲金银矿等。金矿物虽种类较多,分布较广,但数量不多;至于金的铋化物、硒化物、锑化物和硫化物则较为少见。几种常见的金矿物如下。

(1) 自然金(Au) 是最有工业意义的最常见的矿物,大多含有银、铜等杂质,含金量一般为70%~100%。自然金的晶体常呈不规则块状、树枝状、粒状、片状、网络状或粉末状等。自然金按粒度大小分为巨粒金($>0.295\text{mm}$)、粗粒金($0.295\sim0.074\text{mm}$)、中粒金($0.074\sim0.037\text{mm}$)、细粒金($0.037\sim0.001\text{mm}$)、微粒金($\leq 0.001\text{mm}$)、胶体金($1\text{nm}\sim1\mu\text{m}$)和晶格金($\leq 3\text{nm}$)。一般砂金颗粒较粗大,脉金(岩金)粒度较小,自然金的粒径一般小于 0.2mm ,微粒金可在透射电子显微镜下观察到,而胶体金和晶格金则分别需要超高压透射电镜和电子显微镜才能观察到。

自然金硬度为2~3,用小刀或大头针可以刻划,用牙能咬出痕印。密度为 $15\sim19\text{g}/\text{cm}^3$ (纯金为 $19.3\text{g}/\text{cm}^3$)。自然金多呈金黄色,且具有强烈的金属光泽,含银、铜杂质较多者为黄白色。

(2) 银金矿(Ag、Au) 一般含Au 80%~50%及Ag 20%~50%,实际上是金银两种元素的自然合金,并常与自然金、辉银矿、碲金银矿等矿物密切共生。形状一般呈粉状或树枝状,颜色呈黄至浅黄,条痕为淡黄至乳黄色,金属光泽,硬度为2~3,密度为 $12.5\sim15.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(3) 金银矿(Au、Ag) 一般含Au 50%~20%及Ag 50%~80%和少量其他元素。形态呈粒状、块状、薄片状、树枝状和网状,颜色为黄铜色与银白色,条痕为黄色至绿灰色,金属光泽,硬度为2~3,密度为 $10.5\sim12.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(4) 碲金矿(AuTe_2) 理论上金碲含量为Au 43.5%、Te 56.41%。形态多呈粒状集合,颜色为黄铜色至银白色,硬度为2.5~3,密度为 $9.1\sim9.4\text{g}/\text{cm}^3$ 。

含金矿物(载金矿物)是指金矿床中某种带有或含有金的有用矿物或脉石矿物。如黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、铜矿、钒矿、毒砂等,这些矿物一般含金量较高,并且金常呈裂隙金、晶隙金、包裹金或吸附金的形态被某种矿物所携带,所以在含金矿

物中的金的赋存状态较为复杂。

金的矿石类型划分尚无统一标准,一般根据矿石组成的复杂性及选矿难易程度分为贫硫化物金矿石,高硫化物金矿石,多金属硫化物含金矿石、含金氧化矿石、含金钨锑矿石。

1.3.2 主要工业金矿石类型

金矿床的工业类型可划分为三大类:岩(脉)金矿床、砂金矿床和伴生金矿床。

(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)金地质勘探规范划分如下。

① 石英脉型金矿床。该类型矿床分布广,数量多,赋存条件多种多样,是当前我国黄金生产主要的岩金矿床类型。石英脉的形态可分为单脉型、复脉型和石英网脉型金矿床。围岩主要为变质岩、中酸性岩浆岩。石英脉常成群成带分布,脉长由数米至数千米不等,厚度由几厘米至几十米,一般为零点几米至几米,沿断裂呈透镜状、脉状连续分布。围岩蚀变因岩性不同而有区别,较常见的有硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化等。脉石矿物除石英外,有少量长石、绿泥石、绢云母、方解石、重晶石等;金属矿物以黄铁矿为主,其次有黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、黑钨矿、白钨矿、磁铁矿等。金常与一定的硫化物有关,矿床规模大小不一,往往由几个矿床组成矿田,形成重要的产金地。

② 破碎带蚀变岩型金矿床。这是我国近年来岩金矿床的重要工业类型,总储量仅次于石英脉型金矿床。围岩为中-酸性岩浆岩、变质岩、混合岩。矿体严格受断裂构造控制,既产于较大的断裂带,也见于小的断裂带中。围岩蚀变以硅化为主,以黄铁绢英岩型为特征。矿体主要赋存于黄铁绢英矿石中,脉石矿物以石英、绢云母为主,金属矿物以黄铁矿为主,矿石多呈细脉浸染状,金多与硫化物连生。构造程度高的,矿体规模大,长几百米至千米,厚几米至几十米,形态较简单,多为中至特大型,如山东省招平断裂带的一些金矿就属于这种类型的金矿床。

③ 细脉浸染型金矿床。又称为班岩型或次火山岩型金矿床。围岩以中-酸性浅成侵入岩、次火山岩、角砾岩为主。矿体多赋存于此类岩体的顶部、边部或超出边部进入围岩中,形成饼状、筒状、漏斗状等不规则形态。围岩蚀变有硅化、青盘岩化;因岩性不同可出现白云岩化、高岭土化、绢云母化等。常见低温石英及胶状黄铁矿。金银比小于1,金属矿物以黄铁矿为主,有少量黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等。矿石主要呈细脉浸染状、角砾状。矿床规模为小型至特大型,黑龙江省团结沟金矿床就是这种类型。

④ 石英-方解石脉型金矿床。产于中、新生代火山岩中或在碳酸盐岩层及少量碎屑岩中的矿床。脉由石英、方解石组成。围岩蚀变有广泛的青磐岩化。近矿有硅化、冰长石化、碳酸盐化,个别矿床蚀变很弱难以识别。脉石矿物为一水或低温石英、冰长石、蛋白石、方解石。脉内梳状、晶簇状构造发育,复脉多,两脉交叉处常形成矿柱。矿化极不均匀,金属矿物组合随成因不同而不同。矿床规模多为中小型。如吉林省鹈鹕砬子金矿床、广西壮族自治区叫曼金矿床。

(2) 砂金矿床 砂金矿床又称为次生金矿床,由含金的岩石(岩金)经风化和机械富集而形成,由砂、砾石、金、其他有用矿物及残积物组成。国内目前对砂金矿床工业类型的划分尚无统一标准,一般参照岩(砂)金地质勘探规范划分如下。

① 河床砂金矿。分布在现代河床水体底部,矿体呈层状、似层状和带状沿河床分布。砂金主要富集于河床砂砾层底部。由于分布于水体底部,探采技术较为复杂。如黑龙江呼玛

和湖南汨罗等地有此类砂金矿。

② 河谷砂矿。矿床分布在河漫滩底部,是河床砂矿演化的产物,二者常在一起密切共生。一般规模大而稳定,品位较均匀,是我国冲积砂金矿的重要类型和主要开采对象。

③ 漫滩砂金矿。主要产于较大江河中上游区段,砂金富集于沙洲或河曲内湾浅滩的上部,金粒细小多呈片状。长江、黄河及黑龙江上游均产有此类砂金矿,但其品位较低,粒度过细,难于勘探和采选,目前还不是主要工业类型。

④ 阶地砂金矿。多产于河谷斜坡阶地上,成因复杂,规模较小,不是主要开采对象。

⑤ 支谷砂金矿。产于细谷、细流、间歇性水流的沟谷、沟坡、沟顶等处,成因有残积、坡积、洪积、冲积及其过渡型。一般泥沙层和矿砂层无明显界线,含金层中黏土较高,砂金分布不均匀,常见大粒明金。一般埋藏浅,品位高,含水少,曾是主要开采对象。黑龙江瑗珲、呼玛、漠河等地都有此类砂金矿。

⑥ 岩溶充填砂金矿。基底为岩溶的砂金矿,产于岩溶漏斗和溶洞中。成因有冲积、洪积及其他原因。这种矿床规模小且难选。湖南、四川有此类砂金矿床。

(3) 伴生金矿床。金的含量较低,并与其他有用矿物共生,其矿床又不能列为金的独立矿床类型,但其中的金具有一定的工业价值,可在开采和选冶过程中回收利用。这些金即称伴生金,这种矿床称为伴生金矿床。

国外较著名的金矿床类型很多,如卡林型、霍姆斯塔克型、兰德型等金矿床,同时我国现在也发现了很多不同类型的金矿床,但是就世界范围而言,黄金储量主要来自以下金矿床类型。

① 兰德型金矿床。为古老变质的金铀砾岩矿床,主要产于南非,占世界黄金储量的50%以上。

② 近代砂金矿床。占黄金总产量的15%~20%。

③ 石英脉金矿床。在我国储量表中占很大比例,在世界上分布广泛。

④ 新金银矿床。铅太平洋火山岩带分布,矿石富含银(为金的5~200倍甚至更多)。

⑤ 伴生金矿床。主要有斑岩铜矿床,是重要的铅矿来源,也是伴生金的最重要来源。含铜黄铁型矿床。硫化铜镍矿床,如甘肃的铜镍矿床。矽卡岩铜矿和矽卡岩型多金属矿床。

⑥ 霍姆斯塔克型金矿床。首先发现于美国霍姆斯塔克,并且研究得较多,因此得名。

⑦ 卡林型金矿床。在美国卡林首次发现,且研究较多,因此得名。产于含碳质碳酸盐岩层,受裂构造控制;含砷,金银比高;含硫化物约5%,普遍与重晶石共生,围岩蚀变以硅化和黄铁矿化为主;矿化浸染状,金粒微细,矿体多呈平伏状。

1.4 我国含金矿石产出特点

我国金矿物的产出与矿床类型有着密切的联系,即不同赋矿岩石中的金矿,其金矿物组成和性质有着明显的差异。

在超基性岩体及其接触带中产出的脉状-浸染型、蚀变岩型和石英脉-石英岩浸染型金矿床,其金矿物主要是金矿物及金-银系列矿物(多为银金矿),可出现金-铂族元素矿物及金-铜、金-汞矿物。金-银系列矿物常含Pt、Pd、Rh、Cu、Bi、Co和Ni等微量元素,而且铂族元素含量可高达百分之零点几到百分之十几。共(伴)生矿物以黄铁矿、磁黄铁矿、铬尖晶石、磁铁矿、黄铜矿、方黄铜矿、紫硫镍铁矿、墨铜矿及铂族元素矿物为主。

在中性岩体及其接触带中产出的细脉-浸染型、石英脉型、蚀变岩型、角砾岩型、块状

硫化物型和矽卡岩型金矿床,其金矿物主要是金-银系列矿物,最主要是自然金和银金矿,少数有金银矿和自然银,个别矿床可出现少量碲化物,在某些矿床中,如胶东地区某些蚀变岩型金矿床,银金矿可为最主要的经济矿物。

金-银系列矿物中的微量元素可有 Fe、Cu、As、Sb、Bi、Hg、Pb、Zn、Cd、Sr、Ba、S 和 Te 等。共(伴)生矿物颇多,金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿、黝铜矿-砷黝铜矿、银的硫化物、辉锑矿和磁铁矿等。

在火山岩、次火山岩及其接触带产出的细脉-浸染型(斑岩型)、角砾岩型、块状硫化物型、石英脉型和蚀变岩型金矿床中,其金矿物,除金-银系列矿物外,常见有金的砷化物,个别矿床中可出现硫金银矿,但主要还是自然金和银金矿。一些银金矿床则以金银矿为主,个别矿床,硫化物可成为金的主要经济矿物。金-银系列矿物中的微量元素可有 Cu、Fe、Pb、Zn、Mo、Co、Ni、Ti、Bi、W、Ca、Mg、Al、Si、Ba、Pt、Pd、Rh、Os、Te、Se、As、Sb、Hg 和 S 等。共(伴)生金属矿物主要是黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、斑铜矿、硫砷铜矿、方铅矿、闪锌矿、黑钨矿、白钨矿、磁黄铁矿、毒砂、磁铁矿、辉锑矿、雌黄和雄黄等,但碲化物也较为常见。

在沉积岩中产出的氟镁石脉型和微细粒浸染型金矿床中,其金矿物几乎都是自然金,而且均具有较高的成色($>90\%$),个别矿床见有方锑金矿。在氟镁石脉型金矿床中还常见有自然金的含铬变种——铬质自然金,微量出现的还有杂碲金银矿等。自然金的粒度比其他类型更为细微,很少大于 0.01mm ,大部分为次显微金($<0.2\mu\text{m}$),部分为离子态金。共(伴)生金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、辉锑矿、白铁矿、闪锌矿、方铅矿、雄黄和雌黄,在含金氟镁石脉中还见有砷硫锑铅矿、砷黝铜矿等。

砂泥质岩中和浅变质碳酸盐岩——黏土岩中石英脉型、石英-方解石脉型、菱铁矿型和角砾岩型金矿床,其金矿物构成与沉积岩中金矿床的特征基本类似,主要是自然金,成色一般高于 90% 。在金-锑元素组合的矿床中见有极少量方锑金矿。

在泥质板岩和钠长板岩构造破碎带产出的角砾岩型金矿床中,除自然金外,还含有较多的碲金矿和铋碲金矿,个别矿区见有银金矿。自然金中可含少到微量 Fe、Bi、Cu、W、Zn、Pb、As、Sb、Hg、Se 和 Ba 等元素,金矿物粒径很微细,甚至为次显微金。共(伴)生金属矿物主要是黄铁矿、辉锑矿、白钨矿、黑钨矿和毒砂等。

在中-高变质火山沉积岩系(古老绿色岩系)和中-浅变质火山沉积岩系中产出的细脉-浸染型、石英脉型和块状硫化物型金矿床,其金矿物构成与火山、次火山岩中金矿床的相似。金-银系列矿物主要是自然金和银金矿,次要或少量有金银矿。此外,常出现碲金矿、碲金银矿和针碲金银矿等金的碲化物。金-银系列矿物中可含少到微量的 Mn、Fe、Cr、Co、Cu、Ni、Zn、Sn、Pb、Bi、As、Sb、Hg、Cd、Sr、Ba、Se、Te、S、Pt、Pd 和 Rh 等元素。共(伴)生矿物颇多,金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉银矿、辉铋矿、铜硫铋铅矿、白钨矿、黑钨矿、磁铁矿和菱铁矿等。

在混合岩中产出的蚀变岩型和石英脉型金矿床,其金矿物构成则与中酸性侵入体中金矿床的金矿物相似,主要为金-银系列矿物,最主要是自然金和银金矿,仅在小型金矿床中见有硫金银矿。金-银系列矿物中可含微量 Pb、Sb、Bi、Cu、Fe、Mn、Ti、As、B、Si、Al、Mg、Ca 和 Na 等元素。共(伴)生金属矿物主要是黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂和菱铁矿等。

风化壳中铁帽型和残-坡积黏土型金矿床,其金矿物主要为自然金,次为银金矿,个别矿床见有金银矿、碲金矿和碲金银矿。自然金中可含 Fe、Cu 等微量元素,部分金为次显微金或呈离子状态。

各种类型砂金矿床中的金矿物主要是自然金,次为银金矿,少见有金银矿,个别地区有

四方铜金矿、铁质铜金矿及某些金-汞、金-锡互化物等。某些砂金矿，银金矿为最主要经济矿物。金-银系列矿物的特点是，同一颗粒往往中心金成色低，含 Ag 高；边部金成色高，含 Ag 低，甚至出现金镶边（由于 Ag 被淋失），其中也可含有多种微量元素，见有 Zn、Sn、Ba、Cd、Pb、Ni、Cu、As、Bi、Hg、Se 和 Te 等。有的矿区还可出现较高的铂族元素（含量达百分之零点几至百分之几）。

砂金表面常由于铁质、锰质等被包裹而带褐，甚至呈黑色，光泽变暗。颗粒表面多溶蚀孔穴，其中常被铁锰质、硅质、黏土质等充填。我国的海滨砂金矿其金矿物目前仅发现自然金。

1.5 金矿石工艺矿物学特性与提金技术

金的工艺矿物学主要研究对象是金矿石，重点研究金矿物的成因、产状、形态、化学组成、嵌布特性、晶体结构、物理性质、选矿过程中的行为、分配的规律及产品之间的关系、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根据，并为预测、控制金属损失和评定工艺处理效果提供科学根据。

金在矿石中的赋存状态是金的工艺矿物学的重要特性，也是影响提金技术方案的重要因素。金的赋存状态实质上是矿物种类或金粒嵌布特性问题。从矿物化学角度出发，金可分为自然金类和碲化物两种形式。按嵌布特性分，可分为包裹金，它呈显微颗粒金及超显微颗粒金被包裹于载金矿物中；裂隙金指产于某些载金矿物颗粒之间的裂隙中；吸附金指被胶体载金矿物吸附；晶隙金指以类质同象形式进入某些载金矿物的晶格中。

另外从金粒解离特征出发，分为独立的自然金、包裹金和固溶体金；而从金的粒度来分，则为明金、显微金和次显微金。

含金矿物在选矿过程中的行为取决于它们的工艺矿物学特性，特别是成分与浸染粒度。当自然金粒表面为铁的氧化物薄膜、脉石矿物（夹套金）所覆盖，这样的金很难用混汞法和氰化法回收。同时金中含有外来杂质时也会明显影响其性质。砷、铅、镉、铋、碲等元素都会使金增大脆性，使金在矿石准备过程中很易产生过磨与泥化。粗粒浸染矿物、粗粒与细粒的自然金都能很好地用重选法进行回收，但浮选回收的效果很差，用氰化法处理时浸出速度很慢。粉末状金和部分细粒金都能很好地用浮选回收，但用重选法处理的效果很差；如果它们与碲化物共生，则可用氰化法处理，效果也很好。如果微细粒分散金不与载体矿物结合在一起，那么用重选法和浮选法回收的效果都很差；这些金只能用湿法冶金的方法进行回收。与硫化矿紧密共生的金，可很好地用回收硫化矿的选矿方法进行回收。从硫化矿产品中提取金，一般都是在用预处理的氧化法使硫化矿分散后进行的。

处理含金矿石的工艺流程与制度，在很大程度上取决于矿物成分、矿石的碎解性、是否存在会干扰金回收过程的杂质，并且还取决于金粒的大小。这些情况以及矿石的其他性质基本上都是由它们的成因所决定的，并且根据成因可将含金矿床分为内成、外成和变质矿床。就选矿过程来说，外成矿床最为有利。在非洲、亚洲和拉丁美洲都已找到一这类矿床，并已成为小型企业和个体采金者的矿源。

砂金矿一般都是露天开采，常采用挖泥、采掘或水力开采的方法，最常用的是采金船。在开采急倾斜砂矿时，常使用水力冲采机进行水力开采。在开采小型矿床时常采用采掘机和推土机，采出的矿砂由水力输送机或皮带运输机运输。开采深埋的砂矿时一般采用井下开采法。砂金矿的选矿一般采用重选、重选-浮选或重选-氰化处理等联合流程，利用选矿方法回收或进行精选时获得的金和伴生矿物，送往专门处理厂以提纯或最终回