



全国高协组织教材研究与编写委员会审定

Huangjin Xuanye yu Shoushi Jiagong

黄金选冶与首饰加工

罗梅 编著



中国科学文化出版社

本书由全国高协组织教材研究与编写委员会、香港教科文出版有限公司资助出版
全国高协组织教材研究与编写委员会审定

黄金选冶与首饰加工

罗 梅 编著
邓天龙 审

中国科学文化出版社

内 容 简 介

全书共分八章，具体内容如下：第一章为金的性质与金矿资源特点；第二章为黄金湿法冶金工艺基础；第三章为岩金选冶工艺；第四章为砂金资源特点与开发工艺；第五章为冶金副产品与含金废料中金的回收工艺；第六章为金矿的地浸开采；第七章为金的用途与黄金饰品加工工艺；第八章为金选冶厂建厂设计与技术经济评价。

为了加强实践环节，培养学生动手能力，配合本教材理论教学安排了 6 次实习课（实习指导书附书后）。实习内容包括：采样要求与试样准备、矿石物质组成研究与提金工艺选择、金矿石搅拌浸出试验与柱浸试验、金矿石及浸出液中金分析、氰化物溶液中 NaCN、CaO 分析。整个课程教学 50 学时（其中实习课 20 学时）。

本书为高等学校地质矿产资源与开发类专业学生的专业教材，也可作为兴趣广泛的大专院校学生的公共选修课教材，同时也可供湿法冶金、矿业开发与矿产综合利用有关专业的学生及工程技术人员、研究人员和教学人员参考。

黄金选冶与首饰加工

罗 梅 编著

出版发行：中国科学文化出版社
排 版：成都理工大学文印中心
印 刷：临沂市第二印刷厂
开 本：787mm×1092mm 1/16
印 张：10.2
字 数：201 千字
版 次：2003 年 8 月第 1 版
书 号：ISBN 962-8467-26-3/G · 343
定 价：14.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

黄金是人类最早发现和使用的金属之一，它以迷人的亮黄色金属光泽和其它许多优良特性赢得人们的喜爱。自古以来，黄金成了财富的同义词，在人类的政治、经济、文化生活中起着重要的作用。近 30 多年来，黄金在电子、通讯、仪器仪表、航空与宇航、医疗、光学、核工业、润滑材料、化学、装饰及玻璃等各个领域和行业得到了广泛的应用，日益显示出其在国民经济中的重要地位和作用。

世界黄金工业近 20 年来发展异常迅猛。据《世界经济统计手册》，在 1984-1993 年的 10 年间，世界黄金产金大国南非一直保持每年生产黄金 601-683t 的势头，独联体保持年产黄金 237-285t；美国黄金产量则由 1984 年的 66t 猛增到 1993 年的 336t，澳大利亚黄金产量由 39t 猛增到 247t，加拿大黄金产量也由 86t 增长到 176t。我国黄金产量在 1984 年至 1993 年的 10 年间，年产黄金由 59t 增长到 127t，到 1997 年，黄金产量达到 166.3t，使我国黄金产量在国际上的名次前移了 2 位，当年进入了世界前 5 名之列。

近 20 年来，世界黄金工业的迅猛发展是与此相关的提金工艺的快速发展分不开的，特别是与 20 世纪 70 年代先后发展起来的堆浸提金工艺、炭浆提金工艺和树脂矿浆法提金工艺等的发展有关。此外，生物氧化预处理提金工艺、原地浸出采矿工艺的发展，也为难选冶、低品位、复杂开采条件金矿的开发提供了良好的前景。

堆浸法是当今世界采矿业处理低品位矿石及废石等物料，提取金、银、铜、铀等金属的既简单又经济的一种有效方法。美国 1971 年第一个金矿堆浸厂科特茨(Cortez)投产以来，特别是 80 年代初推广制粒堆浸技术以来，黄金产率不断提高，生产成本显著降低，应用范围日益扩大，现在入堆矿石最低品位有的仅 0.275g/t。我国近年用堆浸法处理低品位金矿石方面已取得重要进展，全国现有 100 多个金矿堆浸矿山，分布遍及全国 20 多个省、市、自治区，全国冶金及地矿部门的野外地质大队普遍都建有金矿的堆浸点，使我国交通不发达偏远地区低品位金矿产资源的开发有了长足的发展。

炭浆法提金工艺自 1973 年在美国霍姆斯特克金矿成功地转化为现代黄金生产力以来，其提金工艺流程、设备以及不同规模的炭浆厂发展迅猛，该方法很快成为美国、南非、澳大利亚等主要产金国，以及中国乃至全世界主要的提金方法之一，到 90 年代末，用该方法生产的黄金量已占世界黄金总产量的一半以上。我国于 80 年代初引进美国当时最新的提金技术，与美国戴维·麦基工程公司合作设计、建成的张家口金矿大型现代化炭浆厂投产，有效地解决了我国含泥氧化金矿石的提金技术难题，不但使我国提金技术跨入国际先进水平，而且使我国的黄金产量持续高速发展。到 1998 年我国投入运营的炭浆厂达 100 个以上。

然而自然界的黄金矿产资源，随着人们对其日益增长的需求和长期开发利用，埋藏较浅、开采条件较好、品位高、矿物组成简单的金矿资源日益枯竭，贫矿、复杂矿及多金属共生矿已成为当前的主要开发对象；对于一些老矿山，富矿采完，还剩下低品位矿、留的矿柱及充填料中的矿石有待进一步开发。这些都为日益发展中的经济而高效的堆浸、炭浸提金技术、微生物氧化提金技术与原地采矿浸出技术的快速发展与矿业开发创造了条件，同时也是促使世界黄金产量迅猛增长的主要原因。随着经济技术的发展和人们对环境质量要求的进一步提高，新的提金工艺技术与设备的发展，非氰无毒无污染就地浸出提金工艺

技术的完善,中低品位难浸矿提金工艺的研究,以及低品位矿、边界废矿、高品位老尾矿、“呆矿”和弃矿区的再评价与利用研究等领域将成为今后相当时期攻关的重点。

现代生活中黄金饰品越来越为人们所喜爱,认为华丽的黄金饰品是一个人的社会地位和财富的象征。精美的黄金珠宝饰品来源于精美的首饰模具,国内首饰模具厂家不少,但中国福建金得利集团有限公司的“金得利首饰模具”最具特色。它改变了传统手工艺加工金饰的方式,创造了精密铸造的奇迹。本书在黄金用途及饰品加工工艺一章中,将较详细介绍黄金饰品类型、首饰保养鉴别方法、首饰加工设备及加工工艺技术与方法。

《黄金选冶与首饰加工》是在作者原有教材《地浸与堆浸湿法冶金工艺学》(成都理工学院,1995)和作者编著的另一本教材《矿产资源开发概论》(贵金属与稀有放射性矿产资源开发)的基础上,按《黄金选冶与首饰加工》教材要求的提纲经补充、修改,重新编著的。本书也是作者根据近十年来亲自承担并完成的多项省、部级黄金开发项目的基础上,查阅、收集并引用大量国内外最新相关文献资料编著而成的。本教材力图反映当今世界提金工艺发展的现状,并力求系统、全面,且又深入浅出地阐述现代各种提金工艺技术和黄金饰品加工工艺技术。

在本书编著过程中,笔者参阅并引用了以下著作者的文献资料:蒋汉赢编《湿法冶金过程物理化学》(冶金工业出版社,1984)、B. A. Г р а б о в н и к о в 著《溶浸采矿法的地质工艺研究》(原子能出版社,1991)、《浸矿技术》(原子能出版社,1994)、林国琪等主编的《堆浸法提金工艺与设计》(东北大学出版社,1993)、徐敏时等编著的《黄金生产知识》(冶金工业出版社,2000)、张明朴主编的《氰化炭浆法提金生产技术》(冶金工业出版社,1994)、王俊 张全祯编著的《炭浆提金工艺与实践》(冶金工业出版社,2001)、中国福建金得利集团有限公司《金得利珠宝世界》(香港印制,2001)等。

本教材的正式出版经得全国高协组织教材研究与编写委员会审定,并由全国高协组织教育发展中心、香港教科文出版有限公司资助出版。在出版前承蒙成都理工大学邓天龙教授审阅并提出许多宝贵修改意见,笔者在此对上述单位和个人表示衷心的感谢。

由于编写时间较仓促,编著者水平有限,书中难免有错误和遗漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003年6月25日

目 录

1 金的性质与金矿资源特点	1
1.1 金的物理化学性质	1
1.2 金的矿物学特征	5
1.3 金的矿床工业类型与矿石类型	9
1.4 金银矿产资源特点	11
1.5 金矿石物质组成研究	13
2 黄金湿法冶金工艺基础	18
2.1 矿石浸出方法	18
2.2 金属沉淀方法	27
2.3 金矿石浸出工艺试验	41
3 岩金选冶工艺	53
3.1 混汞法提金工艺	53
3.2 氰化法提金工艺	56
3.3 非氰化法提金工艺	69
4 砂金资源特点与开发工艺	74
4.1 砂金矿产资源特点	74
4.2 砂金开采工艺	79
5 冶金副产品与含金废料中金的回收工艺	82
5.1 冶金副产品中金的回收工艺	82
5.2 含金废料中金的回收工艺	83
6 金矿的地浸开发工艺	87
6.1 地浸的概念及其优越性	87
6.2 国内外地浸采矿现状及研究的主要内容	87
6.3 地浸采金主要工艺技术	88
7 金的用途及黄金饰品加工工艺	92
7.1 黄金的工业用途	92
7.2 黄金饰品类型及其特征	97
7.3 黄金饰品保养与鉴别方法论	106

7.4 黄金饰品加工设备与加工工艺·····	111
8 金选冶厂建厂设计与技术经济评价·····	116
8.1 概述·····	116
8.2 四川广元某金矿炭浸厂建厂设计·····	118
8.3 炭浸厂生产化验分析、给排水与环境保护·····	121
8.4 炭浸厂投资概算·····	123
8.5 炭浸厂建厂技术经济评价·····	125
提金工艺实习 ·····	130
实习一：采样要求与试样准备·····	130
实习二：矿石物质组成研究与提金工艺的选择·····	131
实习三：金矿石搅拌浸出试验·····	132
实习四：堆浸金矿石柱浸试验·····	133
实习五：金矿石及浸出液中金的分析·····	134
实习六：氰化物溶液中 NaCN、CaO 的分析·····	135
主要参考文献 ·····	137

1. 金的性质与金矿资源特点

1.1 金的物理化学性质

1.1.1 金的物理性质

1.1.1.1 金的原子结构

金是自然界化学性质最稳定的元素之一，这是与它在元素周期表中的位置及由此而来的物理化学性质分不开的。金在化学元素周期表中为 IB 族元素，原子序数为 79，即金的原子核有 79 个质子和 118 个中子，外层有 79 个电子。金的原子量为 196.967，金有质量数为 183~204 的同位素共 22 个，只有同位素 197 的金最稳定。

1.1.1.2 金的熔点与密度特征

1) 金的熔点及其特征

金的熔点是 1064.43°C （熔点在 $1062.7\sim 1067.4^{\circ}\text{C}$ 范围内变化），金的沸点是 2808°C 。熔融的液态金会随着温度的升高而挥发，金的挥发速度与加热时周围的气氛有关，如在煤气中蒸发，金的损失量为空气中的六倍，在一氧化碳中蒸发金的损失量为空气中的两倍。金的挥发速度和金中杂质的性质也有极大的关系。金粉在温度低于其熔点的条件下，必须加压才能使之熔接在一起。金会因渗入杂质而变脆，如铅、砷、铂、镉、碲都会使它变脆，以含铅最为明显。含铅达 1% 的金合金，如冲压一下就会变成碎块。纯金中加入 0.01% 的铅，就会使金的良好延展性完全丧失。

2) 金的密度及其特征

金的密度很大，在 20°C 时金的密度是 $19.32\text{g}/\text{cm}^3$ 。但在不同的温度下其密度略有差异，如在 18°C 时金的密度为 $19.31\text{g}/\text{cm}^3$ ，在 1063°C 金熔化时密度为 $17.3\text{g}/\text{cm}^3$ ， 1063°C 凝固状态时为 $18.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。直径 46mm 的金球或边长 3.71cm 的立方体金重 1kg。

1.1.1.3 金的结晶习性、韧性与延展性特征

1) 金的结晶习性与形状特征

金的结晶体属等轴晶系，原子呈立方最紧密堆积。晶体的形状多呈立方体、菱形十二面体、八面体、四六面体及四角三八面体等。金结晶冷却得越慢，其晶体就越大。金的结晶体有时可见平行连生双晶。金的晶体经熔化后再凝结时，常呈不规则的多角形。在自然界中，金一般多呈不规则粒状出现，粒度大小不一，可见的其它形状有块状、薄片状、鳞片状、网状、树枝状、纤维状及海绵状集合体等。

2) 金的韧性及导电性能特征

金的韧性很好，很柔软。金的矿物学硬度为 3.7，布氏硬度为 $18.5\text{kg}/\text{mm}^2$ 。金的延伸率为 40~50%，横断面收缩率为 90~94%。由于金具很好的韧性，因此金可以制成极薄（通常可达十万分之一厘米）的金箔，1 盎司黄金（31.103481g）制成的金箔可以贴满约 3m^2 的面积。在现代加工技术条件下，纯金可加工成厚度为 $0.23\times 10^{-8}\text{mm}$ 的金箔，这样薄的金箔在显微镜下观察仍然致密。

金是热和电的良导体，其传导性能仅次于铂、汞、铅和银。

3) 金的延展性及其特征

金的延展性非常好，通常 1g 金可拉成 320m 长的金丝。在现代工艺条件下金丝可拉长到 3420m 以上。用金丝和丝线可交织成各种图案，即所谓的“织金”和“锈金”，用作古代帝王和贵族的服饰。如河北满城出土的西汉（公元前二世纪）金缕玉衣就是用很细（直径为 0.14mm）的金丝合股编成的。

1.1.1.4 金的合金与颜色特征

1) 金的合金及其特征

金的合金主要有金银合金、金铜合金、金铂合金、金钯合金、金铼合金以及和其他金属形成的合金等。金的上述合金都不是化合物，而是固熔体，这些合金与含有银、铜等杂质的自然金有本质的不同。前者是金属熔化后又凝固了的固熔体，具有均质的结构，而含银、铜等杂质的自然金则是从水溶液中析出的。这许多金属能和金形成合金的原因是这些金属的原子半径与金的原子半径很接近，如金的原子半径为 0.144nm；银为 0.144nm；铂为 0.138nm；钯为 0.137nm；铼为 0.147nm；铜为 0.127nm。

金很容易被磨损，变成极细的粉末，特别是纯金首饰常年配带会减轻质量而成为不可挽回的损失。因此，金首饰和金币一般都要添加银和铜，以提高硬度而且会使其色泽更加绚丽。

2) 金的光泽与颜色特征

金有悦目的草黄色金属光泽，金在所有金属中颜色是最黄的。在自然界中见到的金都不纯，含有杂质的自然金及含有其他元素的金合金，颜色变化很大。如钯含量高时使金呈灰白色；铜金合金的颜色呈红色；含银会使金变成淡黄色至浅绿色，含银量超过 25%，银金合金呈土白色；同时含有约 12.5%银和铜的金合金呈鲜黄色（表 1-1）；含镍、铜、锌的金合金呈铂的颜色。这种颜色变化是由于含有其它元素的金的波长起了变化之故。人的眼睛对光谱的黄绿区域（0.55 μ m）十分敏感，因此金合金的反射能力有微小的变化，都能使人感到颜色发生了变化。

金的不寻常的颜色的本质是直接和它的电子结构特性相联系的。常用金合金的颜色列入下表（表 1-1）。

表 1-1 常用金合金的颜色

合 金 颜 色	合金中金属含量		
	金	银	铜
绿 色	75	25	0
浅绿黄色	75	21.4	3.6
浅 黄 色	75	16.7	8.3
鲜 黄 色	75	12.5	12.5
浅 红 色	75	8.3	16.7
橙 黄 色	75	3.6	21.4
红 色	75	0	25

1.1.2 金的化学性质

1.1.2.1 金的一般化学特征

金在化学元素周期表中与银、铜是同族元素，但它的化学性质却和铂族金属十分接近。金和 3 价金间的电极电位为 1.5V。由于这个值很高，无论是稀的或浓的盐酸、硝酸、硫酸单独使用都不能溶解它。在盐酸中如有氧化剂（二氧化锰、氯化铁和铜等）存在以及有氧存在又在高温高压下也可使金溶解。金易溶于王水（参见表 1-2）。

金的化学性质非常稳定。除砷、硒、氯等几种元素外，金与其他元素在通常条件下不容易发生化学反应而生成化合物。这一性质使金长期暴露于空气中而不改变它的颜色和光彩。常见的伪金是铜和锌合金制成的。首饰业使用这种合金制成亚金首饰，其颜色类似 18K 金的颜色，短时候内与金的外表很相似，但时间一长被氧化而原形毕露。特定的条件下，金也可以制成多种化合物，如金的硫化物、氧化物、氰化物、卤化物、硫氰化物、硫酸盐、硝酸盐、氨合物、烷基金、芳基金、雷酸金等均可制成。

表 1-2 金在各种介质中的行为一览表（徐敏时等，2000）

介 质	温度/℃	评 价	介 质	温度/℃	评 价
H ₂ SO ₄	室 温	几乎没有影响	氰氢酸溶液（有氧时）		腐蚀严重
H ₂ SO ₄	100	几乎没有影响	磷 酸	100	几乎没有影响
发烟硫酸	室 温	几乎没有影响	氟	室 温	几乎没有影响
过二硫酸	室 温	几乎没有影响	氟	100	几乎没有影响
硒 酸	室 温	几乎没有影响	干 氯	室 温	微量影响
硒 酸	100	几乎没有影响	湿 氯	室 温	腐蚀很快
70%的硝酸	室 温	几乎没有影响	氯 水	室 温	腐蚀很快
70%的硝酸	100	几乎没有影响	干溴（溴液）	室 温	腐蚀很快
发烟硝酸	室 温	轻微影响	溴 水	室 温	腐蚀很快
王 水	室 温	腐蚀很快	碘	室 温	微量影响
40%的 HF	室 温	几乎没有影响	碘化钾中的碘溶液	室 温	腐蚀很快
36%的盐酸	室 温	几乎没有影响	醇中的碘溶液	室 温	腐蚀严重
36%的盐酸	100	几乎没有影响	氯化铁溶液	室 温	微量作用
溴氢酸 （密度为 1.7g·cm ⁻³ ）	室 温	几乎没有影响	硫化钠（有氧时）	室 温	腐蚀
碘氢酸 （密度为 1.7g·cm ⁻³ ）	室 温	几乎没有影响	氰化钾	室 温	腐蚀快
氯 酸	室 温	几乎没有影响	硒	100	几乎没有影响
氯 酸	100	几乎没有影响	硫	100	几乎没有影响
醋 酸		几乎没有影响	湿硫化氢	室 温	几乎没有影响
柠檬酸		几乎没有影响	阳极金在含氰卤酸 或氰化物的溶液内	室 温	腐蚀严重或腐 蚀很快
酒石酸		几乎没有影响			

1.1.2.2 与金相互作用的试剂

1) 与金无相互作用的试剂

金与下列酸、碱、盐等试剂无相互作用：硝酸（HNO₃）、硫酸（H₂SO₄）、盐酸（HCl）、

硒酸 (H_2SeO_4)、高氯酸 (温度低于 97°C)、酒石酸、柠檬酸、醋酸、硫化氢、碱溶液 (NaOH 或 KOH)、氯 (温度为 $137\sim 147^\circ\text{C}$ 以下) 及空气等 (表 1-2)。

2) 与金有相互作用的试剂

金与下列试剂有相互作用：氯水、溴水、溴化氢 (HBr 在室温下作用不大)、碘溶液 ($\text{KI}+\text{I}_2$, 室温)、酒精碘溶液 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}+\text{I}_2$, 室温)、盐酸氯化铁溶液 (FeCl_3+HCl , 在室温下作用不大)、氰化物溶液 (在有氧和氧化剂时)、氯 (温度高于 147°C)、王水、乙炔 (C_2H_2 , 温度为 480°C 时)、硫脲 (硫代尿素, $\text{NH}_2 \cdot \text{CS} \cdot \text{NH}_2$)、硒酸与碲酸和硫酸的混合酸等。

在一定条件下, 某些酸、碱、熔化的各种盐类及卤素介质也会对金产生腐蚀现象。现将各种介质对金的腐蚀情况列于表 1-3, 金在一些溶盐中的腐蚀结果列于表 1-4。

表 1-3 各种介质对金的腐蚀表 (徐敏时等, 2000)

介 质	温 度 ℃	试 验 时 间 h	腐 蚀 速 度 $\text{mg} \cdot (\text{dm}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
HF	室 温		0
10%的磷酸	100	5	2.4
冰醋酸	100	4	1.4
10%的硫酸铜	100	5	0.0
干 氯		23	7.6
湿 氯	100		865.0
饱和氯水	100	18	1510.0
干 溴	100	21	1770.0
湿 溴	100	21	672
饱和溴水		23	1750
干 碘	室 温		微 量
湿 碘	室 温		0.0
醇中的含碘溶液 (浓度 5%)	室 温	24	12.0
王 水	22		腐蚀很快
王 水	100		腐蚀很快
湿硫化氢	室 温	1080	0

1. 1. 2. 3 金及其化合物的还原性特征

1) 能使金还原的金属元素

金的化合物很容易被还原为金属金。使金还原能力最强的金属有镁、锌、铁和铝等, 在氰化法提金工艺中就是利用这一性质使用锌粉置换沉淀金的。还原能力较差的有铋、砷、汞、镍和钴等, 而金属元素铬、钼、钨、钛和铂不能还原金。通常情况下还原后的金不纯, 还原沉淀的金是混合晶体或含有金属还原剂的金化合物, 如用镉还原金时就会析出 AuCd 。

2) 能使金还原的其它物质

金化合物的还原剂很多, 除了电位序在金之前的金属外, 还有高压下的氢、过氧化氢、氯化亚锡、硫酸铁、三氯化钛、氧化铅、二氧化锰、强碱和碱土金属的过氧化物等。还有某些有机物质能还原金, 如甲酸、草酸、对苯二酚、联氨、乙炔等。

表 1-4 金在一些溶盐中的腐蚀结果表（徐敏时等，2000）

溶 盐	t (℃)	质 量 损 失 mg • (dm ² • d) ⁻¹	溶 盐	t (℃)	质 量 损 失 mg • (dm ² • d) ⁻¹
KHSO ₄	440	0.0	NaNO ₃	350	0.1
KCN	700	3600	NaOH ^①	350	9.6
NaCN	700	384	Na ₂ O ₂	350	2000
1KCN+2 NaCN	550	480	NaCO ₃ ^①	920	48
KNO ₃	350	0.0			

注：① 在还原气氛中

金微粒在胶状溶液中带负电，在电解过程中，金的微粒沉积到阳极上形成黑色膜。

1.1.3 金的其它特殊性质

金的放射性同位素特征是金的另一重要特殊性质。金有 22 个放射性同位素，这些同位素可用中子、质子、重氢核、α 粒子和 γ 射线轰击稳定的同位素 ¹⁹⁷Au 或铂、铀、汞的靶子取得。从科技应用角度看，金的放射性同位素 ¹⁹⁸Au 和 ¹⁹⁹Au 是最有价值的。自然界只有原子量为 197 的这种金同位素才是最稳当的，其原子核有 79 个质子和 118 个中子，外层有 79 个电子。

金的放射性同位素在医学诊断和治疗某些疾病方面应用广泛，其中包括对恶性肿瘤的治疗以及对生理系统的功能状态和治疗代谢过程方面的研究。金同位素治疗肿瘤基于它具有的放射线能力，同位素 ¹⁹⁸Au 具有 2.69d 的半衰期，这样一来患者便可在两个半衰期内（约 5.5d）获得全部射线的 3/4。同位素 ¹⁹⁸Au 放在肿瘤上照射的时间，其射线量足以破坏对射线最敏感的癌细胞。

1.1.4 金的计量和成色

当今世界黄金的计量单位是盎司，1 盎司等于 31.104g，我国的黄金计量单位是 kg 或 t，但多年来习惯于用“两”计量，1 两等于 31.25g。

黄金制成品的纯度常见有三种表示方法：

- 1) 百分率表示法 即在黄金制品每 100 份中纯金所占的比例；
- 2) 成色表示法 即在黄金制品每 1000 份中纯金所占的比例；
- 3) K 金表示法 即在黄金制品每 24 份中纯金所占的比例；

我国黄金制品（如各种首饰等）常用 K 金表示法，24K 金即饰品含金 100%，18K 金的饰品含金 75%。自然金纯度常用成色表示法，自然金成色与其中杂质含量有关，常见杂质主要是银，其它杂质（如铜、铁、铂等）很少，所以自然金的成色计算可以表示为：

金的成色 — Au/(Au+Ag) × 1000‰

1.2 金的矿物学特征

目前在自然界已发现的金矿物有 98 种，但常见的只有 47 种，而工业金矿物仅有十多种（表 1-5）。最主要的具工业意义的金矿物是自然金、银金矿和金银矿；其次是金的碲化物，如碲金矿、碲金银矿，虽种类较多且分布广，但数量不多，经济价值不大。

表 1-5 主要金矿物特征一览表

类别	矿物名称	化学式	金 矿 物 主 要 特 征
金银系列矿物	自然金	Au	含 Au>80%, Ag<20%, 含少量 Cu 及 Pt 族元素, 密度 15.6~19.3 g/cm ³ , 硬度 2~3
	银金矿	Au·Ag	含 Au80~50%, Ag20~50%, 少量 Cu 及 Pt 族元素, 密度 12.5~16.5g/cm ³ , 硬度 2~3
	金银矿	Ag·Au	含 Au50~10%, Ag50~90%, 呈固溶体, 密度 11.3~13.1g/cm ³ , 硬度 2~2.5
	自然银	Ag	含 Au≤10%, 含 Ag>90%, 密度 10.1~11.1g/cm ³ , 硬度 2.5~3, 有展性, 溶于 HNO ₃
金铂族互化物	铂金矿	Au·Pt	含 Au84.6~86%, Pt10.5~15.9%, 密度 19.53 g/cm ³
	铑金矿	Au·Rh	含 Rh11.6~43%, 密度 15.5~16.8 g/cm ³ , 性脆
	钯金矿	Au·Pd	含 Au85.2~91.1%, Pd5.8~12.3%, 密度 15.7~12.5 g/cm ³
	铱金矿	Au·Ir	含 Au62.1%, Ir30%, 密度 21.6g/cm ³
	金铱铑矿	AuIrOs	含 Au19.3%, Ir30%, Os25.5%, 密度 20g/cm ³
金与其他金属互化物	围山矿	(AuAg) ₃ Hg ₂	含 Au56.91%, Hg39.92%, Ag3.17%, 密度 18.17g/cm ³
	黑铋金矿	Au ₂ Bi	含 Au65.36%, Bi34.64%, 密度 15.5g/cm ³ , 硬度 1.5~2.0
	铜金矿	AuCu	含 Au75.18%, Cu23.74%, 密度 14.7g/cm ³ , 硬度 3
碲化物	碲金矿	AuTe ₂	含 Au43.59%, Te56.41%, 密度 9.2~9.3g/cm ³ , 硬度 2.5~3
	碲金银矿	AgAuTe ₂	含 Au25.42%, Ag41.7%, Te32.87%, 密度 8.7~9.4g/cm ³ , 硬度 2.5~3
	针碲金银矿	AuAgTe ₄	含 Au24.19%, Ag13.22%, Te62.59%, 密度 8.17g/cm ³ , 硬度 1.5~2
	白碲金银矿	AuAgTe	含 Au43.95%, Te56.41%, 密度 8.62g/cm ³ , 硬度 2.5
	板碲金银矿	AuAgTe	含 Au22.9%, Ag16.69~26.36%, Te39.14~46.44%, 硬度 2.5
	亮碲金矿	Au ₂ Te ₃	含 Au50.77%, Te49.23%, 硬度 2.5
	碲铜金矿	AuCuTe ₄	含 Au25.5%, Cu8.3%, Te66.2%, 硬度 3.5~4.3
	叶碲金矿	Pb ₅ AuSbTe ₃ S ₆	密度 7.5g/cm ³ , 硬度 1.5
硫碲化物	方碲金矿	AuSb ₂	含 Au44.74%, Sb55.26%, 密度 9.91g/cm ³ , 硬度 3~4
	硫金银矿	Ag ₃ AuS ₂	含 Au35.9%, Ag52.7%, S10.7%, 密度 7.94g/cm ³

1.2.1 金银系列金矿物

自然界中纯金极少, 常言道: “金无足赤”。这是因为金与银或与铂等金属元素可形成类质同象置换的缘故。为表征自然金的纯度, 1979 年博伊尔提出用公式 $[Au/(Au+Ag+其它$

元素 $] \times 100\%$ 表征其成色。由矿相学研究可知，自然金的成色与其反射率和颜色指数均有相关性，因此在镜下借助其光常数也可简便求出其金的成色。根据成色的不同，Au-Ag 系列矿物定名不同。若含 Ag $<20\%$ 即成色 800 以上，则定名含银自然金；若含金 Ag $20\sim50\%$ 之间，而成色为 800 $\sim$ 500 之间，则定名为银金矿，含 Ag $50\sim80\%$ 之间，则定名为金银矿，若含 Ag $80\sim85\%$ 之间，则定名为含金自然银。

由工艺矿物学可知，自然金的成色影响其加工回收，如混汞法加工以金的成色高者为好，若自然金中含 Ag 达 10%以上时，则金被汞的润湿能力明显降低。另外，自然金的粒度对加工影响很大，混汞法要求粒度下限值为 0.015mm（最佳粒度为 0.03 $\sim$ 0.2mm）。若要机械选矿（非化学提取），粒度必须在 400 目以上，若粒度在 400 目以下，只能用氰化法处理。此外，金粒形状对金的加工也有影响，一般树枝状、片状金在水中降落速度比球粒状小，因此树枝状、片状的金适合于化学浸取，球粒状的金适合于重选。金粒表面薄膜对金的选冶工艺也有较大影响，若金粒表面覆盖有其它金属薄膜，不仅使氰化法不易对金进行回收，而且对混汞法乃至浮选法也都不利。

1) 自然金

自然金 (Au)，通常是指含金大于 80%、含银小于 20%的金矿物。除含银外，常含的少量元素有铜、铅、铁、钯、铑等混入物，所以又称“毛金”。自然金的颜色与条痕均为黄色，且随其成份中银含量的增加而逐渐变为淡黄色。自然金呈金属光泽，无解理、不透明，硬度 2 $\sim$ 3，密度 15.6 $\sim$ 19.3（随含银量的增加而变小）。自然金具有很好的延展性，可压成薄片和抽成金丝。自然金具有极高的导热、导电性。自然金的化学稳定性强，在空气中不氧化，不溶于酸，但能溶于王水。王水微浸可染成棕色，遇氰化钾可染成黑色。

2) 银金矿

银金矿 (Au·Ag)，属自然金的亚种，其含金量为 80 $\sim$ 50%，含银量为 20 $\sim$ 50%，颜色为黄色至乳黄色，金属光泽，无解理，其他性质与自然金基本相近。银金矿的硬度 2 $\sim$ 3，密度 12.5 $\sim$ 16.5，遇氰化钾呈棕黑色，含银多时作用微弱。

3) 金银矿

金银矿 (Ag·Au)，与银金矿不同的是金银矿是自然银的亚种，其含金量为 10 $\sim$ 50%，含银量为 90 $\sim$ 50%。金银矿呈浅黄至亮黄色，金属光泽、无解理，硬度 2 $\sim$ 2.5，密度 11.3 $\sim$ 13.1，富延展性，导热及导电性能好。自然界这种矿物较为罕见。

金与银关系密切、两种金属常互化形成完全类质同象系列矿物。其原因是两种金属的原子半径极相似 (Au=0.1439nm，Ag=0.144nm)，结晶构造类型相同，物理化学性质相近。

1.2.2 金铂族互化物

金的铂族互化物有：铂金矿、铑金矿、钯金矿、铱金矿和金铱矿等。铂金矿 (Au·Pt) 含 Au84.6 $\sim$ 86%，Pt10.5 $\sim$ 15.9%，密度 19.53 g/cm³。铑金矿 (Au·Rh) 含 Rh11.6 $\sim$ 43%，密度 15.5 $\sim$ 16.8 g/cm³。钯金矿 (Au·Pd) 含 Au85.2 $\sim$ 91.1%，Pd5.8 $\sim$ 12.3%，密度 15.7 $\sim$ 12.5 g/cm³，硬度 3。铱金矿 (Au·Ir) 含 Au62.1%，Ir30%，密度 21.6g/cm³。金铱矿 (AuIrOs) 含 Au19.3%，Ir30%，Os25.5%，密度 20g/cm³。

铂、钯、金三种元素可以被王水溶解，在选冶流程中一般用王水溶解铂族金属精矿，

使 Au、Pt、Pd 呈络合物进入溶液。含金、铂、钯的溶液用硫酸亚铁、氯化铵等进行沉淀，再经电解等方法得到纯金属，过程的废液用锌粉还原回收贵金属。但 Rh、Ir、Os、Ru、Ag 元素不能溶解而残留于渣中，其回收方法是，不溶残渣用铅富集熔炼，用硝酸溶液分离铅、银；硫酸氢钠熔融水浸分离铑；过氧化钠熔融水浸分离钌、钨；最后从不溶渣中王水溶解提取铱。各个金属的精炼均用反复沉淀为纯盐类后再煅烧氢还原的方法产出海绵状金属。

1.2.3 金与其他金属互化物

金与其他金属互化物主要有：围山矿、黑铋金矿、铜金矿等。这些矿物在自然界分布较少而不具工业意义。上述三种矿物的主要特征是：围山矿 $[(AuAg)_3Hg_2]$ ，含 Au56.91%，Hg39.92%，Ag3.17%，密度 $18.17g/cm^3$ 。黑铋金矿 (Au_2Bi) ，含 Au65.36%，Bi34.64%，密度 $15.5g/cm^3$ ，硬度 1.5~2.0。铜金矿 $(AuCu)$ ，含 Au75.18%，Cu23.74%，密度 $14.7g/cm^3$ 。

1.2.4 金的碲化物

金的碲化物有：碲金矿、碲金银矿、针碲金银矿、白碲金银矿、板碲金银矿、亮碲金矿、碲铜金矿、叶碲金矿。金的碲化物种类虽多，但分布和数量很少，一般不具有工业价值。上述金碲化物主要特征如下：

碲金矿 $(AuTe_2)$ ，含 Au43.59%，Te56.41%，密度 $9.2\sim 9.3g/cm^3$ ，硬度 2.5~3。碲金银矿 (Ag_3AuTe_2) ，含 Au25.42%，Ag41.71%，Te32.87%，密度 $8.7\sim 9.4g/cm^3$ ，硬度 2.5~3。针碲金银矿 $(AuAgTe_4)$ ，含 Au24.19%，Ag13.22%，Te62.59%，密度 $8.17g/cm^3$ ，硬度 1.5~2。白碲金银矿 $(AuAgTe)$ 含 Au43.95%，Te56.41%，密度 $8.62g/cm^3$ ，硬度 2.5。板碲金银矿 $(AuAgTe)$ ，含 Au22.9~31%，Ag16.69~26.36%，Te39.14~46.44%，硬度 2.5。亮碲金矿 (Au_2Te_3) ，含 Au50.77%，Te49.23%，密度 $9.94g/cm^3$ ，硬度 2.5。碲铜金矿 $(AuCuTe_4)$ ，含 Au25.5%，Cu8.3%，Te66.2%，硬度 3.5~4.3。叶碲金矿 $(Pb_5AuSbTe_3S_6)$ ，密度 $7.5g/cm^3$ ，硬度 1.5。

1.2.5 金的硫锑化物

金的硫锑化物主要有方锑金矿和硫金银矿。金的硫锑化物在自然界分布和数量很少，不具有工业价值。方锑金矿和硫金银矿的主要特征如下：

方锑金矿 $(AuSb_2)$ ，含 Au44.74%，Sb55.26%，密度 $9.91g/cm^3$ ，硬度 3~4。硫金银矿 (Ag_3AuS_2) ，含 Au35.9%，Ag52.7%，S 10.7%，密度 $7.94g/cm^3$ 。

1.2.6 金矿物的其它特征

金是亲硫亲铁元素，但在自然界金从不与硫化合形成硫化物，更不与氧等元素化合。金在自然界常与黄铁矿、毒砂、黄铜矿、黝铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿等矿物共生，或呈微细金分别于上述矿物中（称载金矿物）。金银矿石的处理，通常是在常压下用氰化钠溶液浸出，但银的浸出则需要较浓的氰化物和较长的时间。

对于复杂硫化物金矿石和含碳质高的微细浸染型金矿来说，直接氰化浸出比较困难（称难处理金矿石）。因为金或银多呈微细粒浸染状被黄铁矿、砷黄铁矿等硫化物包裹，阻碍了

金的浸出。同时不经预处理的直接氰化浸出过程中，碳质物和有机物质会优先吸附金或与金化合并消耗氰和氧，这样都会使金和银的浸出率大大降低。对于这种难处理金矿石一般须进行预处理，如焙烧氧化、生物氧化、加压氧化等，使硫化物氧化成氧化物，使金和银离子析出来，并消除各种耗氰物质的影响，然后再进行氰化浸出。

金矿物的粒度在不同类型的金矿床中是不同的，即使在同一个矿床的不同矿石类型中，金的粒度差异也往往很大，由大粒金（ $>0.5\text{mm}$ ）到微细粒金（ $<0.001\text{mm}$ ）都有。

1.3 金的矿床工业类型与矿石类型

1.3.1 金矿床的工业类型

金矿床的工业类型划分有不同方法，张明朴（1994）主要根据金矿床的地质特征，并结合工业利用情况进行，按此原则将世界金矿床分为下列 10 种工业类型：

1.3.1.1 石英脉型金矿床

石英脉型金矿床分布广且数量多，赋存条件多种多样，是我国当前黄金生产重要的资源基础。石英脉型金矿床常成群成带分布，脉长由几米至几千米不等，厚度由几厘米至几十米，沿断裂呈透镜状、脉状断续分布。石英脉型金矿床的矿体形态多呈脉状、网脉状、复脉状产出。矿石中金品位一般较富，常伴生银可综合回收。脉矿两侧的围岩也常因蚀变而矿化，成为可采矿石。石英脉型金矿床的金属矿物有自然金、银金矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂，有时有方铅矿、闪锌矿、自然银、辉铜矿、辉铋矿、白钨矿和磁铁矿等。脉石矿物主要是石英，其它为方解石、绢云母、绿泥石、重晶石、阳起石、斜长石等。矿床规模由小型至大型均有，往往由几个矿床组成矿田而有较大远景，形成重要的产金地，如河南灵宝、吉林夹皮沟等金矿床。

1.3.1.2 破碎带蚀变岩型金矿床

该类矿床是我国近年来发现并确定的重要工业类型，总储量仅次于石英脉型金矿床而居第二位。具有规模大、矿体形态稳定、矿化均匀、品位较富和易采易选等特点。金属矿物主要有自然金、银金矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿，其次为褐铁矿、铜蓝、孔雀石等。脉石矿物以石英、绢云母和长石为主，其次为方解石、绿泥石和重晶石。矿床规模多为中型至特大型。例如山东焦家、河南老湾等金矿床。

1.3.1.3 斑岩型金矿床

该类矿床是我国重要的金矿床类型之一。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、边部或超出其边部进入围岩中，形成饼状、筒状、漏斗状等不规则形态。围岩蚀变主要有硅化，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。金矿物主要有银金矿（银金比大于 1）。其它金属矿物以黄铁矿为主，有少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿、磁黄铁矿等。矿石主要呈细脉浸染状、角砾状。矿床规模由小型至特大型，如黑龙江乌拉嘎等金矿床。

1.3.1.4 火山岩型金-银矿床

这类矿床因产出时代较新，矿石组分中富含银，所以又称“新金银矿床”。矿床埋藏较

浅，延伸小，多呈矿囊产出。矿床规模一般以中小型为主。矿石金品位变化大，矿化极不均匀，贫富悬殊，但银含量较高，最高时为金品位的 20 倍。金属矿物主要有低成色的自然金、银金矿、碲金矿、深红银矿、辉银矿、辉锑矿、砷铜矿、黄铁矿、白铁矿等。脉石为玉石状石英、蛋白石、冰长石、方解石、重晶石、明矾石、沸石和绿泥石等。较典型的该类金矿床有吉林刺猬沟等金矿床。

1.3.1.5 砂卡岩型金（铜）矿床

这类矿床分布不多，主要成砂卡岩型铜铁矿床的伴生金矿，独立金矿床很少。金与铜铁可以综合回收。矿床规模多以中小型为主。例如山东沂南金矿床。

1.3.1.6 沉积变质层状型金矿床

美国著名的霍姆斯特克金矿床属此类型。该类型金矿在国外是一个重要的金矿床类型，在我国黑龙江省东风山已有发现，矿床具有沉积变质的特点，矿石除含金、铁外，还富含钴，是我国金矿的新类型。

1.3.1.7 碳酸盐微细浸染型金矿床

美国著名的卡林金矿床属此类型。该类型金矿在国外是一个重要的金矿床类型，但在我国所见不多。该类型矿床矿石中的金多呈微细粒浸染状分布，矿床规模在我国多为中小型，例如河南柘子堂、辽宁小北沟、贵州板其等金矿床。

1.3.1.8 变质砾岩型金矿床

该类型金矿床是世界上最重要的金矿床类型，占世界黄金储量 50% 以上，主要是南非的维特瓦特斯兰德矿床。其次加拿大的盲河矿床和巴西的雅柯宾娜矿床也属这类矿床。这种类型金矿床的矿石除含金外，矿石中的铀常具有重要的工业价值。这类金矿床在我国未有重大发现，黑龙江小金山矿床，河南祁雨沟金矿床与之类似，但没有经过变质作用。

1.3.1.9 伴生金矿床

伴生金矿床是我国目前产金量的重要来源之一。比较重要的有斑岩型铜钼矿床、砂卡岩型铜铁矿床、岩浆型铜镍矿床、黄铁矿型铜矿床、热液裂隙充填交代型铅锌矿床。例如甘肃川铜镍矿、山西中条山铜矿等均属这类矿床。

1.3.1.10 砂金矿床

人类历史上全世界已采出约九万余吨金，其中 2/3 以上来自砂金矿。但由于砂金资源耗量大，目前世界砂金年产量已缩减到总产量的 20% 左右。砂金矿床分残积型和冲积型两种，有价值的是冲积型砂金矿床，它包括河床砂金矿、阶地砂金矿和海成砂金矿。这种类型的金矿床在我国分布广泛，如长江上游的金沙江流域、黑龙江黑河一带、藏北高原湖区等。

1.3.2 金的矿石类型

金的矿石类型划分目前还没有一个统一的方法，张明朴（1994）主要根据矿石组成复杂性及选矿工艺要求，将金的矿石类型划分为以下 6 类：

1.3.2.1 含少量硫化物金矿石

这类矿石多为石英脉型或破碎蚀变岩型金矿石。硫化物主要是黄铁矿，含量 1~5%，有