

序

黄金是人类有史以来最早利用的金属之一。鉴于其“永不变质”的自然基本特性及稀缺可获得性，黄金被视为财富的象征。马克思在其著作《资本论》中指出：“金银天然不是货币，但货币天然金银。”虽然黄金的属性随着时代的变迁有所变化，但其金融属性和商品属性仍然是当今世界的基本属性。由于各国央行货币超发滥发，黄金仍然是衡量货币价值及稳定金融市场的“锚”。同时，黄金的饰品消费和工业应用不断拓展，黄金需求不断增长，价格也随之不断攀升，而容易开采的高品位黄金资源大部分已经被开发，低品位、难处理金矿逐步成为主要开采对象，这对黄金资源的开发利用提出了更高的技术要求。因此，黄金资源的高效选冶新技术及高纯含金新原料的制备至关重要。

《黄金选冶加工》的第一作者袁水平教授在博士毕业后就职于紫金矿业集团股份有限公司，主要在紫金矿冶设计研究院从事研发工作，后期出任紫金铜业有限公司总工程师、紫金矿冶设计研究院院长、厦门紫金矿冶技术有限公司总经理、新疆紫金有色金属有限公司总经理；2021年年底任福州大学紫金地质与矿业学院院长，参与紫金矿业集团股份有限公司诸多低品位难选冶黄金资源的研究工作，为紫金矿业集团股份有限公司黄金等产业的技术突破和发展做出了重要贡献；作者具有较好的理论基础、丰富的科研和实践解决问题的经验。

该书融合黄金冶炼基本工艺原理与最新的工艺实践经验及黄金新用途；涵盖了黄金基础知识、生产技术及最新科研成果，特别在低品位、难处理黄金资源的选冶、伴生贵金属的回收等方面有较多的阐述，体现了专业基础知识与生产实践的良好融合。

该书大部分案例及主要工艺流程均来自紫金矿业集团股份有限公司的生产实践，将紫金矿业集团股份有限公司大量生产实践案例与黄金提取经典的物理化学原理相融合；内容全面，贯通黄金全产业链上下游工艺，提供全面的黄金冶炼技术知识体系；涵盖黄金地质成矿、采矿、选矿及提取加工，以及高纯黄金的精制、二次资源及占黄金产量近 50%的阳极泥的提取工艺等相关知识。

陈景河

2025 年 5 月

前 言

纵观人类文明史，黄金始终闪耀着独特的光芒——既是跨越时空的财富象征，也是推动经济社会发展的战略要素。作为全球最早开发黄金资源的文明古国之一，我国黄金产量已连续近二十年位居世界首位。辉煌成就的背后难掩资源禀赋的天然制约：矿床类型复杂、富矿少而贫矿多。破解低品位资源开发困境，已成为我国黄金产业实现可持续发展的关键命题。

紫金矿业集团股份有限公司的发展历程恰恰是一部以科技创新改写资源价值的奋斗史。从一个名不见经传的县属小企业，发展成为金属矿业领域的世界 500 强企业，从紫金山低品位金矿的破茧成蝶到全球 20 余个国家的资源布局，三十多载栉风沐雨中，紫金矿业集团股份有限公司创始人陈景河教授开创了“矿石流五环归一”工程管理体系，在低品位难处理金、铜资源开发领域树立了行业标杆。

作者在多年黄金选冶生产实践的基础上，结合最新的提金工艺撰写了本书，旨在为读者提供一本兼具“黄金选冶专业知识”和“生产实践成功案例”双重特色的参考资料：①全面的黄金选冶加工专业知识体系。本书内容涵盖黄金的工艺矿物学及选矿工艺、难处理金矿的预处理、氰化浸金及非氰提金工艺、含金溶液提金及金精炼、铜阳极泥提金、高纯金制备与应用等内容，贯通黄金全产业链上下游。②注重“实践”与“专业知识”的融合。本书通过大量生产实践案例的介绍，辅助读者理解黄金资源选冶过程涉及的基础物理化学知识，以期促进“实践”与“专业知识”的无缝连接。

最后，感谢紫金矿业集团股份有限公司的领导及相关权属企业领导、技术人员的大力支持，感谢福建省本科高校教育教学改革研究项目(FBJY20230077)、福州大学研究生教育教学改革项目的资助，感谢福州大学紫金矿冶研究创新团队成员(迟晓鹏、谭文、陈俊南、蔡教忠、曾广圣)及博士研究生(张君杰、陈江濠、何守兴)的辛苦付出。

由于作者水平有限，书中如有疏漏之处，恳请业界同仁不吝指正。

袁水平

2025 年 5 月

目 录

序

前言

第 1 章 金的性质及主要资源分布	1
1.1 金的历史	1
1.1.1 金的起源	1
1.1.2 金的发现	1
1.2 金的性质及用途	2
1.2.1 物理性质	2
1.2.2 化学性质	3
1.2.3 金的化合物	4
1.2.4 金的用途	6
1.3 金成矿特征及分布特点	8
1.3.1 金的成矿特征	8
1.3.2 世界黄金资源分布特点	11
1.3.3 中国黄金资源分布特点	13
参考文献	14
第 2 章 含金资源及富集工艺	15
2.1 金矿资源概况	15
2.1.1 金矿产状	15
2.1.2 金矿类型	16
2.1.3 金的赋存特征	16
2.1.4 金的嵌布特性	18
2.2 金矿富集工艺	20
2.2.1 重选法	20
2.2.2 浮选法	39
2.3 其他含金物料	64
2.3.1 阳极泥	64
2.3.2 电子垃圾	65
参考文献	65

第3章 难处理金矿的预处理	67
3.1 难处理金矿概述	67
3.1.1 难处理金矿的类型	67
3.1.2 难处理金矿的成因分析	68
3.1.3 难处理金矿常用预处理方法	69
3.2 难处理金矿焙烧氧化预处理	70
3.2.1 焙烧氧化预处理基本原理	71
3.2.2 焙烧氧化预处理工艺特点	75
3.2.3 典型案例	76
3.3 难处理金矿加压氧化预处理	80
3.3.1 加压氧化预处理基本原理	80
3.3.2 加压氧化预处理工艺特点	84
3.3.3 典型案例	89
3.4 难处理金矿生物氧化预处理	95
3.4.1 生物氧化预处理基本原理	95
3.4.2 生物氧化预处理工艺特点	96
3.4.3 典型案例	97
参考文献	102
第4章 氰化浸金工艺	104
4.1 氰化物浸金原理	104
4.1.1 氰化物浸金热力学	107
4.1.2 氰化物浸金动力学	110
4.2 影响氰化浸出的因素	114
4.2.1 氰化物与氧浓度的影响	114
4.2.2 温度的影响	115
4.2.3 浸出时间的影响	115
4.2.4 保护碱的影响	115
4.2.5 金粒度的影响	116
4.2.6 搅拌强度的影响	117
4.2.7 伴生矿物的影响	118
4.3 氰化浸出工艺类型	120
4.3.1 渗滤氰化槽浸	120
4.3.2 渗滤氰化堆浸	121
4.3.3 搅拌氰化浸出	122
4.4 堆浸工艺及实践	123
4.4.1 堆浸法提金发展历程	123

4.4.2 堆浸法提金工艺特点	126
4.4.3 国内金矿堆浸实践	126
4.4.4 国外金矿堆浸实践	140
4.5 槽浸工艺及实践	144
4.6 其他浸金工艺	147
4.6.1 硫代硫酸盐法	147
4.6.2 氯化法	150
4.6.3 溴化法	153
4.6.4 碘化法	154
4.6.5 硫脲法	156
4.6.6 石硫合剂法	158
4.6.7 新型环保药剂	160
参考文献	161
第5章 含金溶液提金及金精炼	163
5.1 炭吸附法提金	163
5.1.1 活性炭吸附金	163
5.1.2 载金炭提金	168
5.1.3 活性炭再生	172
5.1.4 典型案例	176
5.2 锌粉置换法提金	179
5.2.1 锌粉置换金的原理	180
5.2.2 锌粉置换影响因素	180
5.2.3 锌粉置换关键工艺	181
5.3 粗金提纯	183
5.3.1 火法	183
5.3.2 化学法	183
5.3.3 电解法	186
5.3.4 萃取法	194
5.3.5 典型案例	198
参考文献	199
第6章 铜阳极泥提金	201
6.1 铜阳极泥来源	201
6.2 铜阳极泥物化特征	201
6.3 铜阳极泥提金技术	203
6.3.1 电解法回收金	204
6.3.2 化学法回收金	209

6.3.3 萃取法回收金	213
6.4 卡尔多炉工艺	215
6.4.1 阳极泥浸出预处理	215
6.4.2 卡尔多炉熔炼	233
6.4.3 银电解精炼工艺	253
参考文献	267
第7章 高纯金制备与应用	268
7.1 高纯金的性质及应用	268
7.2 高纯金制备技术进展	269
7.2.1 电解法	269
7.2.2 化学还原法	276
7.2.3 溶剂萃取法	278
7.3 高纯金制备案例	280
7.3.1 王水溶金	281
7.3.2 水解脱杂	282
7.3.3 萃取还原	284
7.3.4 退火熔铸	285
7.4 高纯金应用案例	286
7.4.1 键合金丝	286
7.4.2 溅射靶材	289
7.4.3 蒸镀颗粒	292
7.4.4 导电金球	298
7.4.5 氰化亚金钾	300
7.4.6 亚硫酸金钠	303
7.4.7 泡泡金	305
参考文献	306
附录 黄金选冶加工案例视频分析	309
附录一 金精矿焙烧-氰化提金工艺	309
附录二 加压预氧化-氰化提金工艺	311
附录三 载金炭解吸-湿法提金工艺	313

第1章 金的性质及主要资源分布

1.1 金的历史

金的化学符号为 Au，源自其拉丁文名称 *Aurum*，意为“灿烂的黎明”。作为人类最早认知和利用的贵金属之一，金凭借其独特的物理化学特性和广泛的应用价值，在人类文明发展进程中扮演着不可替代的角色。从经济金融到科学技术，从工业制造到艺术创作，黄金始终占据着重要地位。其起源、开采、利用及传播的历史轨迹，不仅深刻影响了世界文明进程，更成为人类社会发展史中不可或缺的重要组成部分。

1.1.1 金的起源

金的起源可追溯至宇宙大爆炸后数十亿年的天体演化过程。现代天体物理学研究表明，金元素的形成与高能天体物理事件密切相关。在超新星爆发或中子星并合等极端宇宙环境中，剧烈的核合成过程促使原子核发生重组，从而形成金等重元素。然而，此类高能事件在宇宙中发生频率较低，导致金在宇宙元素丰度分布中相对稀缺。

地球系统中的金矿床主要源于复杂的地质动力学过程。根据现代地质学理论，金的地质富集主要与以下机制相关：首先，火山活动是金元素迁移富集的重要途径，岩浆在上升过程中携带金元素，通过火山喷发或次火山作用形成含金火山岩系；其次，板块构造运动引发的造山作用、变质作用以及岩浆侵入活动，促使地壳深部的金元素活化迁移，在有利的构造部位沉淀富集，形成具有经济价值的金矿床。然而，金矿床的形成往往需要经历漫长的地质年代（通常为数百万年至数亿年），这一特性决定了地球金资源的有限性。此外，金具有极高的化学惰性，在自然界中多以单质形式存在，这使得原生金矿石通常具有较高的纯度。

1.1.2 金的发现

金的发现时间可追溯至远古时代。早在公元前 4000 年，古埃及文明就已开始系统性地采集和利用黄金，并将其视为太阳神的神圣象征。随着人类文明的发展，黄金在古希腊、古罗马以及古印度等主要文明中心均扮演着重要角色，其用途涵盖宗教祭祀、货币流通、权力象征及艺术装饰等多个领域。

在古埃及文明中，黄金被广泛应用于法老墓葬品的制作，其中最具代表性的

是图坦卡蒙法老的黄金面具。古希腊文明则将黄金与不朽和荣誉相联系，用于奥林匹克优胜者的奖励。古罗马帝国时期，黄金的货币功能得到充分发展，奥里斯(Aureus)金币的广泛流通标志着黄金成为古罗马帝国经济体系的重要支柱。中世纪后期，随着地理大发现时代的到来，欧洲殖民者在非洲和美洲发现了大规模金矿资源，由此引发的全球性淘金热潮不仅重塑了世界经济格局，更为欧洲资本主义的兴起提供了重要的资本积累。

在中国文明发展史上，黄金同样具有深远的文化内涵和经济价值。早在商朝(公元前 16 世纪)，黄金已被用于制作祭祀礼器和贵族饰品，并开始具备货币功能。至周朝，黄金成为王权象征，被广泛用于制作礼仪器具。春秋战国时期，黄金在诸侯国间的贸易和外交活动中扮演着重要角色。秦始皇统一六国后，正式确立黄金的法定货币地位，这一制度在汉代得到进一步巩固和发展。随着冶金技术的进步，汉代黄金产量显著提升，其应用范围扩展至建筑装饰和艺术品制作领域。唐代以来，黄金在佛教艺术和贵族生活中占据重要地位，成为身份与财富的象征。

在现代社会，黄金依然保持着其独特的战略地位。作为国际货币体系的重要组成部分，黄金储备量是衡量国家经济实力的关键指标之一。同时，凭借其优异的物理化学特性，黄金在珠宝首饰、航空航天、医疗设备及电子工业等高科技领域发挥着不可替代的作用，持续推动着现代科技文明的发展。

1.2 金的性质及用途

1.2.1 物理性质

金位于元素周期表中第六周期、第 I B 族，与铜、银同属铜族元素。其电子构型为 $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^1$ ，常见氧化态为+1 价和+3 价。金的原子序数为 79，相对原子质量为 196.97。金具有较大的密度，其密度随物相转变呈规律性变化。在常温(20℃)下，金的密度为 19.32g/cm^3 ；当温度升至熔点(1064℃)时，固态金的密度降至 18.47g/cm^3 ，液态金的密度进一步降低至 17.36g/cm^3 。这种密度变化规律与金属原子热运动加剧导致的晶格膨胀密切相关。金的熔点为 1064℃，沸点为 2808℃，莫氏硬度为 2.5~3。此外，金具有较高的电负性(2.54)、电离势(890.1kJ/mol)和标准电极电位(+1.692V)，这些特性共同决定了金在热力学上的惰性特征，使其在自然界中主要以单质形式存在。

金展现出优异的机械加工性能，其延展性在金属材料中尤为突出。现代材料加工技术可将黄金轧制成厚度仅 10nm(0.00001mm)的超薄薄膜，同时 1g 高纯金可拉制成长度达 3.5km、直径 $4.3\mu\text{m}$ (0.0043mm)的极细金丝(图 1-1)。然而，金的力学性能对杂质元素极为敏感，当金中含有微量铅(Pb)、铋(Bi)、碲(Te)、镉(Cd)、

锑(Sb)、砷(As)、锡(Sn)等杂质时,其机械性能显著劣化。具体而言,当金丝中铅含量达到 0.01%时,材料即表现出明显的脆性特征;若铋含量增至 0.05%,材料的机械强度将严重降低,用手即可将其粉碎。这种性能劣化现象主要归因于杂质元素在晶界处的偏析及其导致的晶界脆化效应。

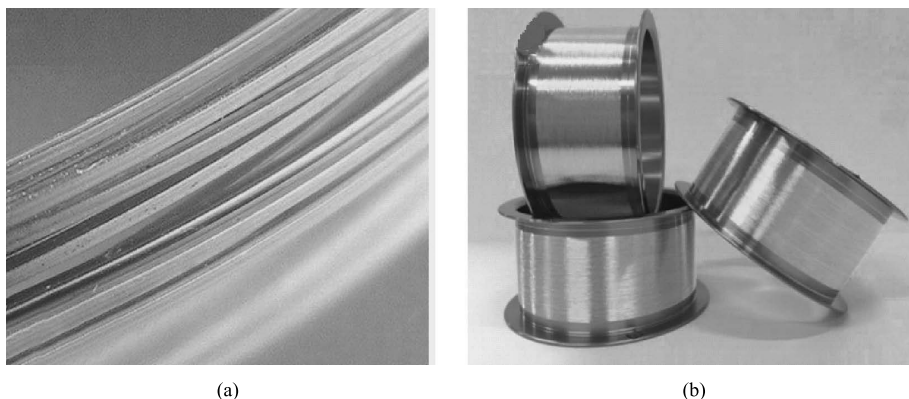


图 1-1 金丝

金具有优异的导电和导热性能。金的电导率仅次于银和铜,其电导率为银的 76.7%,位列金属电导率第三位。金的电阻率表现出明显的温度依赖性:在 0℃时为 $2.06 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, 20℃时升至 $2.25 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, 25℃时达到 $2.42 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$,呈现出正温度系数特性。在导热性方面,金的热导率为 $315 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,约为银热导率的 74%,位居金属热导率第二位。

金在常温下具有极低的蒸气压,表现出极小的挥发性,但其表面具有较强的气体吸附能力。研究表明,在 450℃条件下,金可吸附相当于其体积 40 倍的氧气。在熔炼过程中,金的挥发损失主要源于其对气体的强吸附特性,同时受炉料成分和气氛环境的显著影响^[1]。在 1000~1300℃的熔炼温度范围内,金的挥发损失率为 0.01%~0.25%。当熔炼合金中含有 5%的锑或汞时,金的挥发损失率可增至 0.2%。此外,在不同气氛环境下,金的挥发损失率差异显著:在煤气环境中的挥发损失率是空气中的 6 倍,而在 CO 气氛中的挥发损失率则是空气中的 2 倍。这些现象与金在不同气体环境中的表面活性和化学反应特性密切相关。

1.2.2 化学性质

金的化学性质非常稳定,常温或高温条件下,金不与空气中的水、硫、氧等发生反应,具有良好的耐腐蚀性。在常温条件下,金对单一酸、碱介质均表现出惰性,包括无机酸(如 HNO_3 、 HCl 、 H_2SO_4 、 HF)和有机酸体系。然而,在混合酸体系中,金可发生溶解反应,特别是在浓硝酸-浓盐酸(王水)和硫酸-硝酸混合体

系中。值得注意的是,在强氧化剂(如 H_5IO_6 、 MnO_2)存在下,金可溶于浓硫酸体系;在高温条件下,金还可溶于无水硒酸(H_2SeO_4)。尽管金在高温下对 H_2 、 O_2 、 N_2 、 S 、 C 等保持惰性,但可与卤素元素发生化学反应:在加热条件下可与 F_2 、 Cl_2 、 I_2 发生反应,在高温下可与 Br_2 发生反应。

金的溶解特性具有显著的选择性。除王水和卤素溶液外,在氧化条件下,金可溶于碱金属或碱土金属氰化物溶液。此外,金还可溶于多种介质,包括碱金属硫化物、酸性硫脲、硫代硫酸盐、多硫化物溶液,以及在碱金属氯化物/溴化物存在下的铬酸-硒酸-碲酸-硫酸混合体系,以及任何能够产生新生氯的混合溶液。

金可形成多种价态的化合物,主要包括+1价和+3价两种氧化态。其化合物体系涵盖硫化物、氧化物、氰化物、卤化物、硫氰化物、硫酸盐、硝酸盐、氨化物等无机化合物,以及烷基金、芳基金等有机金属化合物。然而,金的化合物普遍存在热稳定性差的特点,在受热或光照条件下易发生分解。这些化合物易被还原,可被电负性更强的金属(如 Mg 、 Zn 、 Fe 、 Al 等)、特定有机酸(如甲酸、草酸等)以及还原性气体(如 H_2 、 CO 、 SO_2 等)还原为单质金。

1.2.3 金的化合物

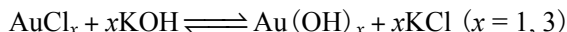
1. 氧化物

(1) 一价氧化物:氧化亚金(Au_2O)。 Au_2O 不能由 Au 直接氧化获得,而是将 AuOH 小心加热至 208°C 脱水而得。 Au_2O 为紫灰色粉末,不溶于水,易溶于盐酸和王水,受热分解成单质金;在氨水溶液中反应生成爆炸性金的氮化物 $\text{Au}_3\text{N}\cdot\text{NH}_3$ 。 Au_2O 还可以用氧化金和硫代硫酸钠(俗称大苏打)溶液反应制得,反应式为



(2) 三价氧化物:氧化金(Au_2O_3)。 Au_2O_3 是两性化合物,可由热分解 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 制得,为棕黑色粉末,不溶于水,溶于无机酸,也溶于 KOH 溶液。 Au_2O_3 很容易被 H_2 或 CO 还原为 Au ,与氨水反应生成易爆化合物雷金。

(3) 氢氧化物:氢氧化亚金(AuOH)、氢氧化金 $[\text{Au}(\text{OH})_3]$ 。金的氢氧化物可由下列反应制得。



AuOH 是将 KOH 加到 AuCl 溶液中,制得深紫色沉淀 AuOH ,不溶于水,溶于 KOH 溶液,生成 $\text{K}[\text{Au}(\text{OH})_2]$ 。 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 是将苛性碱溶液加入 HAuCl_4 沉出黄褐色 $\text{Au}(\text{OH})_3$,实际上是水合金酸 $\text{HAuO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$,为两性化合物。 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 溶于

浓 HNO_3 ，稀释溶液，又生成 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 沉淀，用此法可精制 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 。与氨水反应生成雷金， H_2 或 CO 在低温时即可将 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 还原为单质金。向沸腾的 AuCl_3 溶液中加入 K_2CO_3 也可制得 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 。

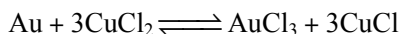
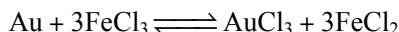
2. 硫化物

金的硫化物有 Au_2S 、 Au_2S_2 和 Au_2S_3 。黑色的硫化亚金可通过向酸化的 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 溶液中通入 H_2S 得到。将 H_2S 通入 Au_2Cl_6 乙醚溶液可制得 Au_2S_3 ，它是不溶于水的黑色固体，加热到 $197\sim 240^\circ\text{C}$ 时分解。 Au_2S 能溶于碱金属氰化物或多硫化物溶液。

3. 卤化物

卤素 (F 、 Cl 、 Br 、 I) 均能与金形成化合物。氟化金 (AuF_3) 是一种很强的氟化剂，是在 300°C 下用 Au_2Cl_6 氟化而成的橙色结晶，为吸水性物质，可溶于水和乙醇，易挥发， $150\sim 180^\circ\text{C}$ 温度下升华，在 500°C 时分解。

无水氯化金(Ⅲ)和溴化金(Ⅲ)都是红色结晶，而 $\text{AuCl}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为橙黄色。其可在 200°C 下由金与 Cl_2 、 Br_2 直接作用制得。 AuCl_3 和 AuBr_3 在固体和蒸气时均为二聚体 Au_2X_6 。氯化金也可由金粉与氯化铁或氯化铜作用制得。



4. 配合物

一价金离子 $\text{Au}(\text{I})$ 在水溶液中能生成多种稳定的配合物，最主要的是 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 、 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$ 、 $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ 和 $[\text{Au}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_2]^+$ 等。金氰配合物 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 非常稳定，平衡常数 ($\lg\beta$) 达 38.3。蒸发含 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 的溶液可以游离出金氰酸 $\text{HAu}(\text{CN})_2$ ，或得到结晶状的化合物，如 $\text{KAu}(\text{CN})_2$ 。

金溶解在王水或 Au_2Cl_6 溶解在盐酸中可生成稳定的平面正方形结构的 $[\text{AuCl}_4]^-$ 配合物。蒸发 $[\text{AuCl}_4]^-$ 的水溶液得到氯金酸的黄色结晶 $[\text{H}_3\text{O}][\text{AuCl}_4]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。当溶液中存在 K^+ 、 Na^+ 时，也能得到其水溶性盐，如 $\text{KAuCl}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 与 $\text{NaAuCl}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

在工业应用中，氰化亚金钾 $[\text{KAu}(\text{CN})_2]$ 和氰化亚金钠 $[\text{NaAu}(\text{CN})_2]$ 是氰化镀金的主要原料。这些化合物可通过将 AuCN 溶于 KCN 或 NaCN 溶液，或在氧化剂存在下将金溶解于 KCN 或 NaCN 溶液后浓缩结晶制得。此外，亚硫酸金钠 ($\text{Na}_3[\text{Au}(\text{SO}_3)_2]$) 是无氰电镀金的主要原料之一。其典型制备方法如下：先采用王

水溶解金颗粒，随后通过添加氢氧化钠(NaOH)调节溶液 pH 至弱碱性，使金以 $\text{Au}(\text{OH})_3$ 形式沉淀析出。经热水洗涤去除表面杂质后，加入亚硫酸钠(Na_2SO_3)进行络合反应并控制溶液 pH 为弱碱性，最终得到 $\text{Na}_3[\text{Au}(\text{SO}_3)_2]$ 溶液。

1.2.4 金的用途

黄金作为人类早期发现并广泛应用的贵金属，因稀缺性、独特性和珍贵性，在历史上长期占据着金属领域的首要地位，被誉为“金属之王”。这种独特的“贵族”地位使其成为财富与尊贵的象征，在金融储备、货币流通、珠宝首饰和工业材料等领域发挥着重要作用，如图 1-2 所示。

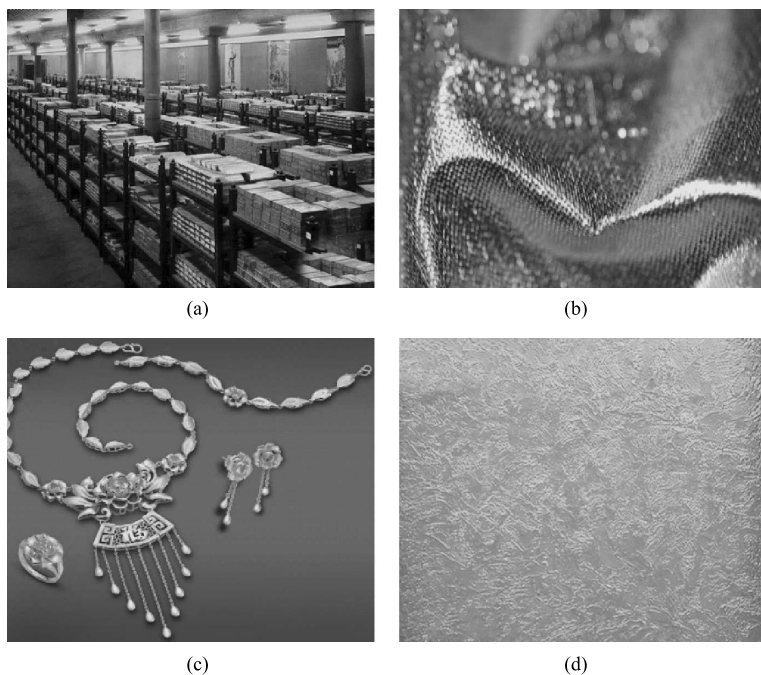


图 1-2 黄金的各种用途
(a) 货币储备；(b) 金浆料；(c) 首饰装饰；(d) 金箔

1. 经济用途

从货币职能的角度来看，黄金在历史上承担了价值尺度、流通手段、储藏手段、支付手段和世界货币等多重职能。即使在现代金融体系中，黄金仍在众多国家的货币储备中占据重要地位，这主要归因于其固有的金融属性。在装饰领域，黄金因其独特的色泽和稳定的化学性质，被广泛应用于珠宝制作，成为美学价值和财富地位的象征。

2. 工业用途

黄金具有优异的抗腐蚀性、良好的导电性和导热性，广泛用于现代高新技术产业，包括电子、通信、航空航天、化工和医疗等领域^[2,3]。

1) 电子工业应用

(1) 电触点材料。在现代通信系统、控制系统及电子计算机系统中，触点材料需要具备优异的导电性、低电阻、耐腐蚀性、可加工性和热稳定性。金及其合金凭借这些优良特性，在电子工业触点制造中得到广泛应用。即使在复杂多变的环境条件下，金基触点材料仍能确保在微弱电流转换和小接触压力下保持可靠的接触性能。

(2) 导电材料。金基导电材料包括金丝、金箔、金粉压制成型部件、金合金以及包金复合材料(如包金玻璃、包金陶瓷、包金石英)等，这些材料广泛应用于电子设备、半导体器件和微型电路中^[4,5]。以半导体集成电路制造为例，其生产过程涉及引线框架的高速冲压成型，随后经过清洗、局部镀金(镀金层厚度 $\geq 1\mu\text{m}$)、芯片装配、引线键合和封装等工序。金及其合金在电子行业中主要用于内引线和外引线的制造，如半导体器件键合金丝[符合国家标准《半导体器件键合金丝》(GB/T 8750—2022)]。

(3) 金基焊料。金基焊料具有诸多优异特性，尽管其高昂的成本限制了大规模工业应用，但随着电子工业、真空技术、核能装置、航空航天发动机等新型结构材料的发展，金基焊料的应用范围不断扩大。在半导体集成电路装配过程中，金基焊料被广泛用于钎焊工艺^[6,7]。

(4) 电子浆料。金基电子浆料中金粉的粒径分布范围为 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ (主要集中在 $0.5\sim 5\mu\text{m}$)，其形态以球形、片状和鳞片状为主。高品质金基电子浆料通常采用化学还原法或有机化合物分解法制备。金基电子浆料种类繁多，包括新型片式电子元件电极浆料、多层布线导体浆料、印刷电路板导体浆料和电磁屏蔽膜浆料等^[8]。

2) 化学工业应用

在核化工和化学工业领域，金合金被用于制造管道、板材和线材等部件，以满足防腐、防辐射和耐高温等特殊要求。其中，金-铂合金凭借其优异的耐腐蚀性和高强度特性，被广泛应用于人造纤维生产中的喷丝头制造^[9,10]。

研究表明，负载于氧化铝或氧化硅载体上的高分散金纳米颗粒对有机化学加氢反应表现出优异的催化性能。此外，金催化剂不仅可用于碳氢化合物的异构化和裂解反应，还对某些含氧反应具有催化作用，如甲醇氧化制甲醛反应^[11]。

3) 航空航天工业应用

金凭借其优异的抗腐蚀性、耐热性、良好的导热导电性以及独特的化学性质，在航空航天领域占据重要地位。其在航天器和运载工具中的应用范围广泛，涉及电子元件、仪表设备和特种材料的制造。随着航空航天技术的不断发展，金在该领域的应用前景仍在持续拓展和深化。

1.3 金成矿特征及分布特点

1.3.1 金的成矿特征

金矿床的主要成因类型可划分为以下七类：变质热液型(太古代绿岩型)金矿床、岩浆热液型(中温热液脉型)金矿床、斑岩型金(铜)矿床、浅成低温热液型金矿床、卡林型金矿床、古沉积砾岩型(含金-铀砾岩型)金矿床以及现代沉积砂金矿床。

1) 变质热液型(太古代绿岩型)金矿床

该类矿床形成于区域变质作用过程中的热液活动，以中温热液成矿为主。全球范围内产于太古代绿岩带的中温热液脉型金矿床普遍具有超大型规模，其储量规模仅次于古沉积砾岩型金矿床。该类型金矿床常形成大规模的矿化集中区，单个矿区金储量可达 1000t 以上。典型实例包括加拿大安大略省阿伯蒂比(Abitibi)绿岩带的蒂明斯(Timmins)金矿床,以及西澳大利亚伊尔岗(Yilgarn)地块卡尔古利(Kalgoorlie)矿田中的高登麦尔(Golden Mile)金矿床,两者的累计黄金产量均已超过 1000t。

2) 岩浆热液型(中温热液脉型)金矿床

在成因上与岩浆热液有关的中温热液脉型金矿，主要分为石英脉型矿床和蚀变岩型矿床。该类型矿床储量居世界第三位，在全球分布十分广泛，如俄罗斯一些金矿类型为此类，如乌拉尔、远东南部等地金矿。我国这类金矿主要形成于中生代，分布在具有古老的前寒武纪基底地区，储量居全球首位，广泛分布于胶东招掖金矿带和小秦岭金矿带。

3) 斑岩型金(铜)矿床

富金斑岩铜矿是指金品位大于 0.1g/t 的斑岩铜矿。该类矿床以规模较大、埋藏浅、易开采，且伴生铂族元素(PGE)而成为综合开采铜金及 PGE 的重要工业类型，该类矿床板块构造成矿模式如图 1-3 所示^[12]。此类矿床发育于大陆和岛弧造山带，主要形成于新生代和中生代，金主要以自然金和银金矿形式赋存。典型富

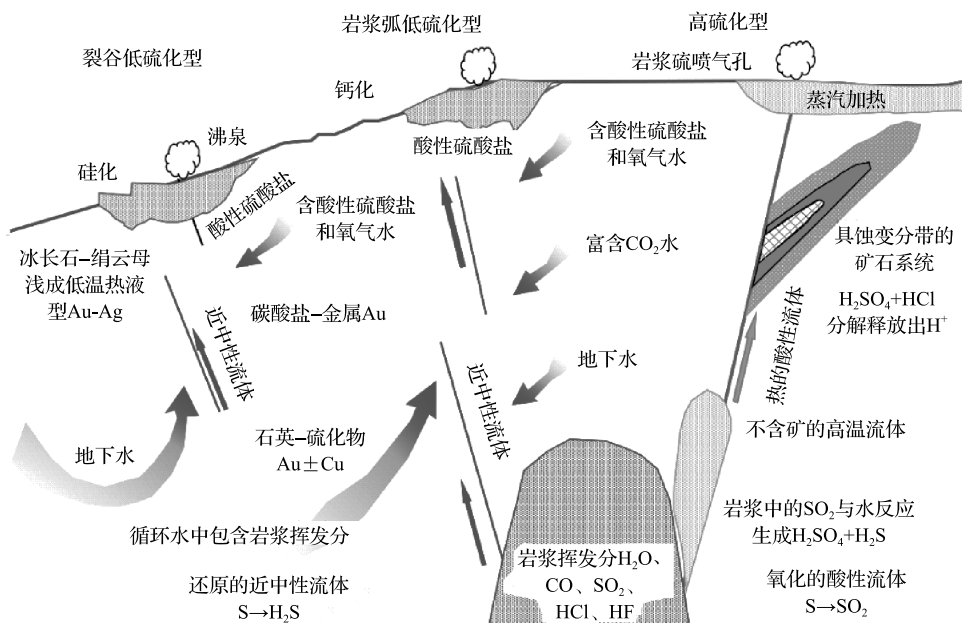
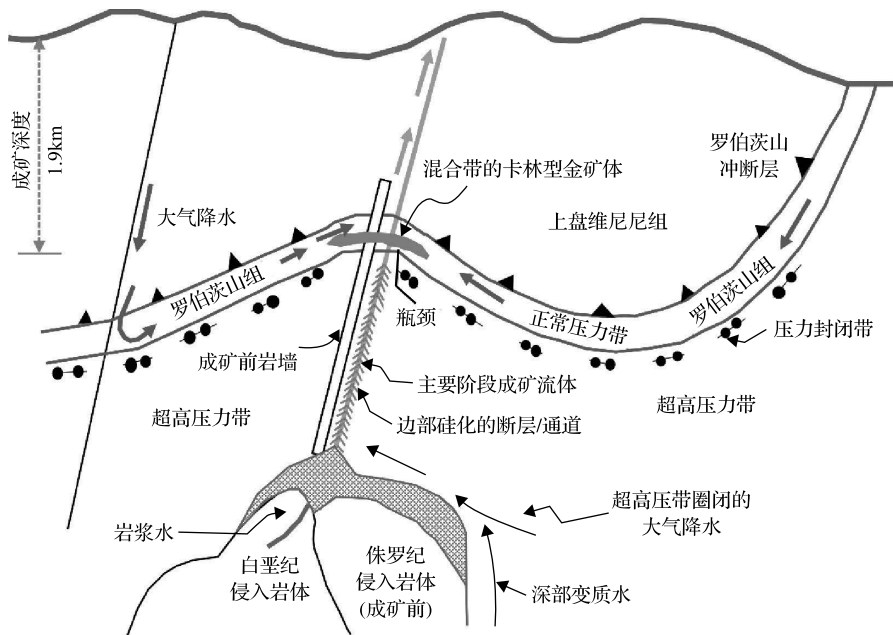


图 1-4 低硫化型与高硫化型浅成低温热液型金矿床产出环境与成矿流体演化



卡林型金矿床的矿石在超高压带和正常静水压力带的瓶颈段深积

图 1-5 卡林型金矿床“综合成因模式图”