

贵金属冶金学

卢 宜 源
宾 万 达 编著

中南大学出版社

内摇摇容摇摇简摇摇介

本书主要包括贵金属——金、银、铂族（钨、铼、铂、钌、铑、钯）金属的性质、用途、提取工艺原理、工艺设备以及再生贵金属生产工艺等内容。可作贵金属冶金专业本科教材，有色金属专业的选修教本，也可供从事科研、生产、管理的人员参考自学。

前 言

贵金属系指金、银、铂族（钨、铼、铂、钨、铼、钨）元素。它们之所以誉为贵金属是由于它们的物理、化学性质极其稳定，色泽瑰丽，在人类生活中常被用作贵重首饰的货币；在现代高科技中，它们因性质优良而广为应用；然而因资源少而散，故显得格外珍贵。

对于金、银，人类使用和提炼大约有 缘园园 余年的历史，被称之为古代金属；铂族元素则不然，人们从知道到应用，至今不过 圆园园 余年，是一个年轻有为的金属家族。

我国在世界上，是最早提炼和使用金、银的文明古国之一。黄金、白银生产在世界上也是名列前茅的。近百余年来，由于帝国主义的侵略和掠夺，我国金银大量外流，生产发展十分缓慢，而铂族金属生产更是白纸一张。解放后，特别是近十余年，我国贵金属生产，随着我国国际贸易往来的增多以及高科技领域的发展，出现了一派蒸蒸日上的兴旺景象。

科技要发展，生产要发展，都要求我们不断总结经验。对于贵金属生产也一样，无论是理论、还是工艺技术上，都有待于不断地更新知识，使生产、科技有所前进、发展。然而有关这方面的书籍一是少，二是旧，难以满足我国贵金属生产、科技的急需，特别是近年来科研、生产的经验，新技术、新工艺有待总结和介绍。因此，我们编写了《贵金属冶金学》一书。

该书共分三篇，第一、二篇主要介绍了金、银、铂族金属的物化性质，热力学知识以及提取工艺原理和工艺流程，其中既讲述了国内、外的传统工艺，又介绍了近年来的新工艺和新技术以及新设备。第三篇阐述了再生贵金属的生产工艺。废、旧物质中

贵金属的再生回收对于补充其矿产资源的不足，满足科技发展的日益俱增的需求有极重要意义，近年来倍受国内外的重视，发展也极快。总之本书收集整理各种工艺之多、之广是过去同类书籍中所没有的。

该书是我们二人合编的，但也倾注了许多人的心血和劳动。在编写过程中，为丰富内容，引用或摘录了许多科技工作者的文献；成稿后，赵天从教授不顾年高，不辞辛劳，对全书进行了审读和修改，提出了许多宝贵的意见，使本书增辉添彩；我系贵金属研究所的全体同志也为本书作了大量的工作……在此我们一并表示谢意。

本书编写分工是：绪论、员~员章由宾万达教授编写，第员缘~圆章由卢宜源副教授编写。本书是贵金属冶金专业的本科、大专教材，适当减少部分内容也可作中专教学用书，还可作现场生产技术人员的参考书。

由于我们水平有限，书中错误、疏漏、不足之处一定不少，敬请各位同仁指正。

编摇者

目 录

绪论	(员)
第 员篇摇金、银冶金	
第 员章摇金、银的性质和用途	(远)
摇员员摇金、银的物理性质	(远)
摇员圆摇金的化学性质	(苑)
摇员猿摇银的化学性质	(员源)
摇员源摇金、银的用途	(员愿)
第 圆章摇金、银的矿物资源	(圆原)
摇圆员摇矿石和矿床类型	(圆原)
摇圆圆摇金、银矿物	(圆苑)
摇圆猿摇提取金、银的一般原则	(圆愿)
摇圆源摇我国的金银资源及生产概况	(圆猡)
第 猿章摇金、银提取前的矿石准备及选矿	(猿)
摇猿员摇矿石准备	(猿)
摇猿圆摇金的重力选矿	(猿)
摇猿猿摇金的浮选	(猿)
第 源章摇混汞法提金	(源)
摇源员摇混汞法的基本原理	(源)
摇源圆摇混汞的实践	(源)
摇源猿摇汞膏的处理	(缘)
第 缘章摇氰化过程的物理化学	(缘)
摇缘员摇氰化过程热力学	(缘)
摇缘圆摇氰化过程动力学	(远)
摇缘猿摇工业条件下影响氰化速度的因素	(远)
摇缘源摇氰化物水解和保护碱	(苑)

第 远章摇氰化物溶液与伴生矿物的作用	(远源)
摇远愿摇铁矿物	(远源)
摇远愿摇铜矿物	(远苑)
摇远愿摇砷和锑的矿物	(愿园)
摇远愿摇锌、铅、汞矿物	(愿园)
摇远愿摇其他矿物	(愿源)
摇远愿摇氰化物溶液的疲劳	(愿缘)
第 苑章摇氰化实践	(愿苑)
摇苑愿摇氰化方法	(愿苑)
摇苑愿摇渗滤浸出	(愿愿)
摇苑愿摇堆浸	(怨园)
摇苑愿摇搅拌氰化	(怨源)
摇苑愿摇洗涤与固液分离	(员园)
摇苑愿摇生产实例	(员苑)
第 愿章摇从氰化物溶液中沉淀金、银	(员苑)
摇愿愿摇锌置换沉淀的物理化学	(员苑)
摇愿愿摇加锌沉淀金的实践	(员愿)
摇愿愿摇金泥处理	(员缘)
摇愿愿摇锌置换生产实例	(员怨)
第 怨章摇炭浆法	(员源)
摇怨愿摇活性炭	(员源)
摇怨愿摇活性炭吸附金的机理	(员苑)
摇怨愿摇从氰化物溶液中吸附金	(员怨)
摇怨愿摇炭浆工艺	(员园)
第 员园章摇树脂矿浆法	(员猿)
摇员园愿摇离子交换树脂及交换反应	(员猿)
摇员园愿摇吸附流程	(员缘)
摇员园愿摇树脂再生	(员愿)
摇员园愿摇金、银电积	(员园)

摇员源章摇树脂矿浆法与炭浆法的比较	(员源)
第 员章摇氰化厂污水处理	(员源)
摇员源章摇氰化厂污水及排放标准	(员源)
摇员源章摇净化方法	(员源)
摇员源章摇回收法	(员源)
第 员章摇从事汞和氰化物工作的安全技术	(员源)
摇员源章摇混汞工作的主要防预措施	(员源)
摇员源章摇氰化物工作的主要预防措施	(员源)
第 员章摇非氰浸金方法	(员源)
摇员源章摇硫脲法	(员源)
摇员源章摇水氯化法	(员源)
摇员源章摇微生物提金	(员源)
第 员章摇从顽固矿中提金	(员源)
摇员源章摇顽固金矿的一般特征	(员源)
摇员源章摇含微细粒包裹金的矿石	(员源)
摇员源章摇含铜的矿石	(员源)
摇员源章摇含锑的矿石	(员源)
摇员源章摇含碳矿石	(员源)
摇员源章摇铁金矿石	(员源)
第 员章摇从阳极泥中提取金银	(员源)
摇员源章摇阳极泥的处理	(员源)
摇员源章摇阳极泥火法处理工艺	(员源)
摇员源章摇阳极泥湿法处理工艺	(员源)
第 员章摇金银的提炼	(员源)
摇员源章摇氯化精炼法	(员源)
摇员源章摇金银的化学法精炼	(员源)
摇员源章摇银的电解精炼	(员源)
摇员源章摇金的电解精炼	(员源)

第 四篇 摇铂族金属的提取

第 九章 摇铂族金属资源和生产	(四九)
摇九章摇铂族金属资源	(四九)
摇九章摇铂族金属生产	(四九)
摇九章摇铂族金属的性质	(四九)
摇九章摇铂族金属的用途	(四九)
摇九章摇铂族金属的主要化合物	(四九)
摇九章摇铂族金属产品标准	(四九)
第 十章 摇提取铂族金属的原料及其富集处理	(四九)
摇十章摇砂铂矿的处理	(四九)
摇十章摇脉铂矿的处理	(四九)
摇十章摇从铜镍硫化矿中回收铂族金属	(四九)
摇十章摇从镍电解阳极泥提取铂族金属精矿	(四九)
第 十章 摇铂族金属的分离与提纯	(四九)
摇十章摇铂族金属分离的传统工艺流程	(四九)
摇十章摇蒸馏分离钨钼	(四九)
摇十章摇选择沉淀金、钯	(四九)
摇十章摇铂与钨、钼分离	(四九)
摇十章摇钨、钼分离	(四九)
第 十章 摇铂族金属精炼	(四九)
摇十章摇铂的精炼	(四九)
摇十章摇钯的精炼	(四九)
摇十章摇钨的精炼	(四九)
摇十章摇钼的精选	(四九)
第 十章 摇贵金属的溶剂萃取	(四九)
摇十章摇贵金属的水溶液化学与溶剂萃取	(四九)
摇十章摇贵金属的萃取体系	(四九)
摇十章摇贵金属萃取分离流程	(四九)

第 猿篇 摇贵金属二次资源的综合利用

第 圆章 摇贵金属二次资源的回收	③猿猿
摇圆章圆员 摇贵金属二次资源的特点与价值	③猿猿
摇圆章圆圆 摇贵金属废料的预处理和取样方法	③猿缘
第 圆章 摇贵金属废料中的贵金属含量	③猿圆
摇圆章圆员 摇各种含金废中的含金量	③猿圆
摇圆章圆圆 摇各种含银废中的含银量	③猿猿
摇圆章圆猿 摇铂族金属废料中金属含量	③猿圆
第 圆章 摇金的回收	③猿缘
摇圆章圆员 摇从含金废液中回收金	③猿缘
摇圆章圆圆 摇从含金废料中回收金	③猿怨
摇圆章圆猿 摇从镀金废料中回收金	③猿原
摇圆章圆源 摇从其他废料中回收金	③猿愿
第 圆章 摇银的回收	③猿圆
摇圆章圆员 摇从含银废液中回收银	③猿圆
摇圆章圆圆 摇从感光胶片、相纸回收银	③猿苑
摇圆章圆猿 摇从镀银件、银镜片中回收银	③猿圆
摇圆章圆源 摇从含银的废合金中回收银	③猿圆
摇圆章圆缘 摇从银 原铜复合金属废料中回收银	③猿源
第 圆章 摇铂族金属的回收	③猿苑
摇圆章圆员 摇铂的回收	③猿苑
摇圆章圆圆 摇从含铂废合金中回收铂	③猿怨
摇圆章圆猿 摇钯的回收	③猿源
摇圆章圆源 摇铱的回收	③猿愿
摇圆章圆缘 摇铑的回收	③猿愿
摇参考文献	③猿怨

绪 论

金 (粤: 金)、银 (粤: 银)、铂 (粤: 铂)、钯 (粤: 钯)、铑 (粤: 铑)、铱 (粤: 铱)、钇 (粤: 钇)、镱 (粤: 镱) 等八个元素, 通称为贵金属。这八个元素在周期表上的位置如下:

周摇期	族			
	Ⅷ			Ⅸ
源	圆远 云藻 铁 缘	圆苑 悦藻 钴 缘	圆愿 晕藻 镍 缘	圆玖 悦藻 铜 远
缘	源源 砸藻 钉 员	源缘 砸藻 铈 员	源远 马藻 钡 员	源苑 粤藻 银 员
远	苑远 韵藻 钼 员	苑苑 隰藻 铟 员	苑愿 马藻 铂 员	苑玖 粤藻 金 员

金、银与铜位于周期表Ⅲ族，通常称为铜族元素；位于第Ⅷ族的九个元素中第四周期的铁、钴、镍，称为铁系元素，第五、六周期的钌、铑、钯、铑、铱、铂等六个元素，称为铂系元素，或称铂族金属。铂族金属，又称稀贵金属。铂族金属中属第五周期的钌、铑、钯的密度约为 19.3，称轻铂族金属；属于第六周期的铑、铱、铂的密度约为 21.5，称重铂族金属。

陨陨金属的命名

金、银及铂族金属之所以命名为贵金属，主要依据下列几点：

(4) 这些金属，特别是金，化学性能稳定，不易氧化，不易与一般试剂起作用，能较长时间地保持其性质及瑰丽的色泽，

是理想的首饰品、美术工艺品及货币的材料。

(圆 地壳中含量少, 平均含量如下:

元素	粵	早	孕	碱	粵	怎	砸	燥	隕	怎	韵	泽
克	輓	圆	圆	圆	圆	圆	圆	圆	圆	圆	圆	圆

摇摇它们不仅含量少, 而且非常分散, 很少有集中矿床, 这就使开采、提炼这些金属相当困难, 因而成本高, 价格贵。

(猿 有特殊的使用性能。除了前述的化学性能稳定外, 贵金属及其合金中, 有的对电、热、光有特殊的效应, 有的对某些气体有很大的吸收能力, 有的具有在某些特定条件下所要求的优良性能。所以, 在现代科学、尖端技术领域, 得到广泛应用, 成为十分贵重的金属材料。铂族金属被誉为“先驱材料”。

(源 有良好的加工性能。贵金属中多数能轧成极薄的箔, 极细的丝, 可加工成任何形状的零件, 还可制成各种浆料, 且在加工过程中不改变其使用性能。

当然, 上述各点是相对的, 如化学性能稳定, 但也有些贵金属较易氧化; 有些贵金属在地壳中的含量也不算少; 也有些贵金属的加工性能也不太好。但从总的来说, 贵金属是因其具有宝贵的使用性能和价格昂贵而得名的。

圆 贵金属的发现

贵金属中的金、银, 早就被人类所发现, 被称为古代金属; 铂族金属, 则从十八世纪才陆续被发现, 故称为近代金属。

金, 素有“百金之王”、“五金之长”之称。这一方面说明金是各种金属的贵重者, 另一方面说明是发现最早者。马克思说过: “金实际上是人所发现的第一种金属” (《马克思全集》圆卷圆页)。公元前猿圆年, 埃及人已经采集金、银, 制成饰物。我国古代就认识金、银, 黄金的淘洗和加工技术, 在商代前就有所发展。这一切都说明, 金、银的发现, 距今已有缘圆年。

至于铂族金属, 则发现较晚, 只有圆圆多年的历史。公元员缘年, 西班牙人尤罗阿 (哉) 作为科学考察团赴秘鲁, 在

那里的平托（~~平托~~ 河地方金矿中发现了铂，给它起了一个名字叫“~~平托~~”（天然铂），意为“平托地方的银”。但铂作为新元素，是尤罗阿将这种“平托地方的银”带回欧洲，经英国人华生（~~华生~~）的研究，于1800年被确认的。

1803年，英国人沃拉斯顿（~~沃拉斯顿~~）在处理铂矿时，将粗制得到的铂块，用王水溶解，然后蒸去多余的酸，再滴入氰化亚汞，发现乳黄色沉淀[~~乳黄色~~]，将它洗涤灼烧后，得到一种银白色海绵状金属，它的性质与铂不同，被认定为新元素。他为纪念当时新发现的小行星—武女星（~~武女星~~），将这个新元素命名为钯（~~钯~~）。

同年，沃拉斯顿在处理铂矿过程中，得到一种鲜艳的玫瑰红色的结晶，他把这种结晶放在氢气流中还原，得到一种金属粉末。他借用希腊文玫瑰花之意，命名这种新元素为铑（~~铑~~）。

铱和铱的主要发现者是英国人坦内特（~~坦内特~~）。1803年，他将粗铂溶于王水中，发现有一些黑色沉淀物。这一现象，前人也发现过，但均误认为是石墨而未加研究。而坦内特于1803年进行了研究，用酸和碱交替处理该黑色沉淀物，分离出两种元素。他把从红色沉淀物提取出来的元素，借希腊文“虹”之意，命名为铱（~~铱~~）；把提取过程发生臭气的元素，借希腊文“臭味”之意，命名为铱（~~铱~~）。

钌是铂族金属中发现最晚者，在铂被发现后一百年，即1844年，俄国人克劳斯（Кларс）在研究用王水处理铂矿的残渣时，将蒸馏所得的残渣，用氯化铵处理，则得了氯钌化铵，煅烧之后得到海绵状金属。他把这个金属，借用“俄罗斯”之意，命名为钌（~~钌~~）。

贵金属的使用

金、银被人类使用，最早不是用作货币，而是用于首饰，美术工艺，后来才大量用于货币。

早在公元前2500年，埃及人已会镀金、包金、镶金和错金

等工艺；还能用金拉成很细的金丝作刺绣。我国商代古墓中发现有金叶。这些都足以说明，古人最早把金用于制作首饰。

金、银用于货币则较晚。据说用金条作货币，最早的是巴比伦。最早流通的银币，据说是 公元前 3 世纪 罗马帝国泰勒尔省的大公西格斯蒙德命令铸造的。直至今天，金、银仍然是天然的货币材料。但总的趋势是金币排挤银币，纸币代替金币。金、银主要是用做储备和支付手段。

到本世纪，金、银除仍传统地用于首饰、美术工艺、货币之外，还用于医药、工业和科学技术上。用于工业、科技上的比重，日益增加。

铂族金属发现较晚，作为首饰、工艺美术、货币的功能亦远逊于金、银。所以铂族金属主要用于工业、科技上。19 世纪多年来，铂族金属在工业、科技上的使用领域不断扩大与变化，用量猛增，因而刺激了铂族金属的发展。18 世纪年代初，世界铂族金属的产量只有 1 吨左右，19 世纪年代，增加到 100 吨。根据英国最近统计，美国的铂，有 50% 用作净化汽车废气的催化剂，10% 用于石油化工，10% 用于电气电子工业；钯的 50% 用作催化剂，10% 用于电气电子工业；铑主要用作催化剂；钌则主要用于电气电子工业。铂族金属的使用领域，估计 10 年后还要发生较大的变化，很可能从催化剂转向太阳能的转换和储备方面。

贵金属的生产

贵金属不仅在地壳中含量少，且比较分散，除金、银外，几乎没有集中矿床，多数与其它金属矿（主要是重有色金属矿）共生，故其开采和提炼过程，都比较复杂。

金在自然界中多以自然金存在。在古代，富集的自然金矿（主要是砂矿）较多，所以只要稍加淘洗富集，即可提炼出黄金。但对一些金粒较细的金矿，就不能单靠简单的重力选矿法富集，于是在 18 世纪多年前，便出现了混汞法提金；至 19 世纪 60 年，又出现了氰化法提金；近年来，还试验了硫脲法提金。

银在自然界中，以自然银存在的很少，多数以化合物存在，辉银矿、角银矿便是主要的银矿，且较多地与铅矿共生。

银一般与金共生，所以提金的过程，也多有提银的过程。

金、银矿大量地与重有色金属矿，特别是铜矿和铅矿共生，在重有色金属生产过程中，往往副产金、银等贵金属。我国目前相当数量的金、银是重冶工厂的副产品。

铂族金属很少有单独的矿床，它主要与硫化镍共生。我国目前生产的铂族金属，主要是炼镍厂副产的。

第一篇摇金、银冶金

第 1 章

金、银的性质和用途

摇金、银的物理性质

金、银——黄色和白色金属。金的纯度，可用试金石鉴定，称“条痕比色”。所谓“七青、八黄、九紫、十赤”，意思是条痕呈青、黄、紫和赤色的金含量分别为 $\frac{7}{10}$ 、 $\frac{8}{10}$ 、 $\frac{9}{10}$ 和纯金。

金、银为面心立方晶格，特点是具有极为良好的可锻性和延展性。金可压成 $\frac{1}{1000000}$ 厚的箔，这样的金箔透明，所透过的光为绿色。金、银可拉成直径为 $\frac{1}{1000000}$ 的细丝。

金、银的导热、导电性能非常好。银的导电性胜过所有其他金属，金仅次于银和铜。

这两个金属的晶格大小接近，二者可形成一系列的连续固

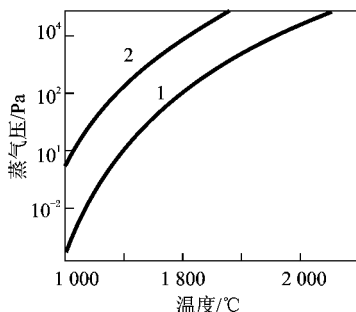


图 1-1 摇金 (1) 银 (2) 蒸气压

溶体。

金的蒸气压大大低于银（见图 15-10）。银的挥发性在高温下相当高，且在氧化气氛下比还原气氛下更高。这一特性在火法冶金中必须重视。

金、银主要物理性质列入表 15-11
表 15-11 金和银的主要物理性质

性 质	金	银
原子量	196.967	107.868
密度 (g/cm ³)	19.30	10.49
晶格常数 nm	0.40856	0.40959
原子半径 nm	0.144	0.144
熔点 °C	1063	961
沸点 °C	2856	2162
热熔潜热 J/g	12.6	11.3
熔化热 J/g	12.6	11.3
导热系数 (W/m·K)	317	429
电阻系数 (μΩ·cm)	2.2	1.6
莫氏硬度 (金刚石 10)	2.5	2.5

15-2 金的化学性质

15-2-1 金

金作为贵金属，金最重要的特征是化学活性低。在空气中，即使在潮湿的环境下金也不起变化，故古代制成的金制品可保存到今天。在高温下，金也不与氢、氧、氮、硫和碳反应。

金和溴在室温下可起反应，而和氟、氯、碘要在加热下才反应。

金在水溶液中的电极电位很高：

摇摇粤^ㄣ→粤^ㄣ垣藻 摇摇摇の毅越垣^ㄣ鄢^ㄣ欽

摇摇粤[→]粤^垣垣藻 摇摇摇毅越垣夷缘灾

因此，无论在碱中还是在硫酸、硝酸、盐酸、氟氢酸以及有机酸中，金都不溶解。

在有强氧化剂存在时，金能溶解于某些无机酸中，如碘酸（匀_匀）、硝酸；有二氧化锰存在时金溶于浓硫酸。金也熔于加热的无水硒酸匀_匀（非常强的氧化剂）中。

金易溶于王水、饱和氯的盐酸、含有氧的碱金属和碱土金属的氰化物水溶液中。

含 CN^- 的硫脲酸性水溶液也是金的好溶剂。此外，金的其他溶剂还有氯水、溴水、 HNO_3 和 H_2SO_4 中的碘液等。在所有场合下金溶解都是形成相应的配合物，而不是以 Au^{3+} 或 Au^{+} 这样的简单离子出现的。

金的化合物有两种氧化形态，即一价金和三价金。金的所有化合物都相当不稳定，易还原成金属，甚至灼烧即可成金。

摇摇金的一价化合物

氧化亚金 Au_2O_3 是紫红色粉末，可由苛性钾的冷水溶液与 AuCl_3 作用制得：

摇摇粤造越造匀越粤造匀↓ 垣造

得到的沉淀小心加热 (约 400°C) 可转变成 Cu_2O , 加热到 1000°C 以上温度, 它分解成元素:

摇摇圆粤怎韵越鹏怎蛩

粵_原韵实际上不溶于水，但在潮湿条件下产生歧化反应生成 粵_原和 粵_原韵：

摇摇猿_韵越鹏_良鹏_良猿_韵

粵_國鈾明显地溶于强碱并生成亚金酸盐，例如 NaAuO_2 ，但不能制出固态亚金酸盐。

卤化亚金摇粤忽陨的卤化物是很不稳定的化合物。它们可由