贵金属冶金及产品深加工

杨天足摇等编著

中南大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 简 介

本书论述了金、银、铂、钯、铱、铑、锇、钌共八种贵金属的性质、资源、生产情况和用途 对贵金属的提取冶金原理、工艺，二次资源的回收及贵金属冶金的进展进行了较为系统、详细的介绍 同时还介绍了贵金属常见的化工产品的制备方法与工艺。

本书可作为冶金工程专业的本科教材，也可供从事贵金属冶金、生产、化学品制备等研究人员及涉及贵金属管理、经营的人员参考。

摇摇

作 者 简 介

杨天足，员怨缘愿年 源月出生，教授，博士生导师，中南大学冶金科学与工程学院贵金属冶金与材料研究所所长，中国有色金属学会贵金属学术委员会委员。员怨愿员年中南矿冶学院化学专业本科毕业，员怨愿源年 员园月获中南矿冶学院应用化学专业硕士学位，员怨怨园年 远月获中南工业大学有色金属冶金专业工学博士学位。随后在中南工业大学有色金属冶金系（现中南大学冶金科学与工程学院）工作，员怨怨员年 员园月晋升为副教授，员怨怨缘年 员园月晋升为教授，圆园园园年起担任博士生导师。

主要从事贵金属冶金和复杂多金属硫化矿的综合利用等方面研究。对金的非氰化浸出、难处理金矿的预处理、铂族金属的分离与提纯、直接从金属硫化矿制取深度加工产品、金属硫化矿的无二氧化硫排放工艺等方面有广泛深入的研究。先后主持或参加国家自然科学基金资助项目、国家“九五”及“十五”重点科技攻关项目和省部级科研项目 员园多项，还主持多项校企合作项目。发表学术论文 缘园多篇，申请专利 源项，已授权 猿项，获省部级科技奖励 猿项。

前摇言

贵金属既包括人类自古以来就发现的古老金属——金、银，也包括发现才二百余年的年轻金属——铂族金属（锇、铱、铂、钌、铑、钯）。它们之所以被誉为贵金属是由于物理、化学性质极为稳定，色泽瑰丽，在人类生活中常被用作贵重首饰或货币；在地球上资源极为稀少而且分散；加工、提取过程难度大、成本高；在实际应用中少而精，因而格外珍贵。

我国是世界上最早生产和使用金、银的国家之一，在清朝光绪年间，黄金年产量曾达 [illegible] 吨（[illegible] 万两），占当时世界黄金产量的 [illegible]。自中华人民共和国成立以来，尤其是改革开放以来，我国的贵金属工业获得了快速的发展，取得了举世瞩目的成就。据报道，我国的黄金产量在 [illegible] 年已达 [illegible] 吨，矿产银的产量在 [illegible] 年达 [illegible] 吨。我国的铂族金属从无到有，从 [illegible] 世纪 [illegible] 年代开始，勘查和开发了铂族金属的矿产资源，创建和发展了我国从矿产资源中提取铂族金属的工业体系，[illegible] 年仅从伴生的镍矿产资源中作为副产品提取的铂族金属已超过两吨。随着科学技术的发展，贵金属越来越多地应用于国民经济中的航空、航天、航海、导弹、火箭、原子能、微电子技术等军工、高技术领域及化学、石油化工、汽车尾气净化等与人类生活息息相关的领域。贵金属在众多的应用领域中起着关键的作用，因而被称为“首要高技术金属”、“现代工业的维生素”、“现代新金属”等。

为了适应我国贵金属生产和产品深加工以及教学和科研的需要，作者根据多年的贵金属教学和科研经验、成果，编写了这本

“贵金属冶金及产品深加工”。全书共分为 源篇，第 员篇主要介绍贵金属的物理化学性质及资源和应用情况；第 圆篇介绍金银冶金的理论和工艺，包括从矿石中金的氰化法提取、从冶金副产品和二次资源中提取金银；第 猿篇介绍铂族金属的选矿、富集及精炼等；第 源篇介绍常见贵金属深加工的产品。近年来，互联网已经渗透到各个领域，在本书的编写过程中，通过网络收集了许多资料和文献，作为一种新的尝试，在书中也择要介绍了贵金属领域中较重要的一些网络资源。作者将收集有关资料过程中访问的一些网站作为参考文献列于书后。

全书共分 圆蒙章，分别由谢兆凤（第 圆 猿章）、楚广（第 员猿 员源章）、赖琼琳（第 圆园 圆蒙章）、杨天足（其余各章）撰写初稿，最后由杨天足统一对稿件进行整理、修改和定稿。研究生刘伟锋、江名喜、杜作娟、窦爱春、李丹对全书的文字进行了认真校对，刘伟锋绘制了全书的工艺流程图。书稿完成后，承蒙宾万达教授、古映莹教授对全书进行了审读和修改，提出了许多宝贵的意见。在成书的过程中，还得到湖南益阳资阳生力化工厂、湖南辰州矿业有限责任公司、广东四会市鸿明贵金属有限公司及唐磊、郭建平等先生的大力支持。作者对他们的辛勤劳动和支持表示衷心的感谢。

本书可用作冶金工程专业本科教学的选修课教材，也可作为从事贵金属工作现场工程技术人员的参考书。

由于作者学识水平有限，书中错误在所难免，敬请各位同行和读者指正，以便在本书再版时修正。对本书存在的问题和建议请邮往 [illegible]，作者将不胜感谢。

杨天足

圆[illegible]年 圆月 圆[illegible]日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目摇摇录

绪摇论 …… (员

第 员篇摇贵金属的性质、资源和用途

第 员章摇贵金属及化合物的性质 …… (源

摇员援员摇贵金属的物理性质 …… (源
摇员援圆摇贵金属的化学性质 …… (愿
摇员援猿摇贵金属的化合物 …… (员怨
摇员援源摇贵金属的配合物 …… (圆怨

第 圆章摇贵金属的资源 …… (猿源

摇圆援员摇矿石和矿床类型 …… (猿源
摇圆援圆摇贵金属主要矿物 …… (猿怨
摇圆援猿摇贵金属的供给与需求 …… (缘缘
摇圆援源摇贵金属资源及生产概况 …… (远怨
摇圆援缘摇贵金属重要的网络资源 …… (愿员

第 猿章摇贵金属的用途 …… (愿怨

摇猿援员摇贵金属的产品标准 …… (愿怨
摇猿援圆摇金的用途 …… (怨缘

1.3.3 银的用途 …… (1)
1.3.4 铂族金属的用途 …… (2)

第二篇 金、银冶金

第2章 金银提取前的矿石加工 …… (5)

2.1 从矿石中提取金银的原则流程 …… (5)
2.2 矿石准备 …… (5)
2.3 金银矿石的重力选矿 …… (6)
2.4 金银矿石的浮选 …… (8)

第3章 混汞法提金 …… (11)

3.1 混汞提金原理 …… (11)
3.2 混汞提金的主要影响因素 …… (12)
3.3 混汞提金的设备与操作 …… (13)
3.4 汞膏的处理 …… (15)
3.5 汞的安全防护 …… (15)

第4章 氰化浸金 …… (17)

4.1 氰化浸金原理 …… (17)
4.2 氰化浸金的主要影响因素 …… (18)
4.3 氰化物的水解和保护碱 …… (20)
4.4 渗滤浸出法 …… (21)
4.5 搅拌氰化浸出法 …… (22)
4.6 氰化废水的处理 …… (24)
4.7 氰化物的安全防护 …… (25)

第 苑章摇氰化物溶液与伴生矿物的作用 …… (园缘原)

摇苑援员摇铁矿物 …… (园缘原)
摇苑援圆摇铜矿物 …… (园缘愿)
摇苑援猿摇砷和锑矿物 …… (园远员)
摇苑援源摇铅锌汞矿物 …… (园远源)
摇苑援缘摇其他矿物 …… (园远缘)
摇苑援远摇氰化物溶液的疲劳 …… (园苑园)

第 愿章摇从常规氰化浸出液中置换金银 …… (园愁怨)

摇愿援员摇锌置换的原理 …… (园愁园)
摇愿援圆摇锌丝置换法 …… (园愁原)
摇愿援猿摇锌粉置换法 …… (园愁远)
摇愿援源摇金泥的处理 …… (园惹员)

第 怨章摇现代氰化提金工艺 …… (园惹远)

摇怨援员摇炭浆法 …… (园惹苑)
摇怨援圆摇树脂浆法 …… (园怨源)
摇怨援猿摇堆浸法 …… (园愿苑)
摇怨援源摇其他新工艺 …… (园怨源)

第 员园章摇非氰化浸金方法 …… (员猿员)

摇员园援员摇硫脲法 …… (员猿员)
摇员园援圆摇硫代硫酸盐法 …… (员猿远)
摇员园援猿摇多硫化物法 …… (员猿愁)
摇员园援源摇卤化物法 …… (员源园)
摇员园援缘摇硫氰酸盐法 …… (员源缘)
摇员园援远摇其他浸金方法 …… (员源愿)

第 5 章 难处理金矿的预处理 …… (93)

5.1 难处理金矿的特征 …… (93)
5.2 含微细粒包裹金的矿石 …… (93)
5.3 含铜矿石 …… (94)
5.4 含锑矿石 …… (94)
5.5 含碳矿石 …… (95)
5.6 含碲金矿石 …… (95)

第 6 章 从重金属冶金副产品中提取金银 …… (96)

6.1 阳极泥的性质 …… (96)
6.2 阳极泥火法处理工艺 …… (96)
6.3 阳极泥湿法处理工艺 …… (97)
6.4 银锌壳的处理 …… (98)

第 7 章 从二次资源回收金银 …… (99)

7.1 金银二次资源的特点 …… (99)
7.2 金银二次资源的来源 …… (99)
7.3 含金的回收 …… (99)
7.4 含银的回收 …… (100)

第 8 章 金银的精炼与铸锭 …… (101)

8.1 金的氯化精炼 …… (101)
8.2 金银的化学法精炼 …… (101)
8.3 银的电解精炼 …… (102)
8.4 金的电解精炼 …… (102)
8.5 金银的萃取精炼 …… (103)
8.6 成品金银的熔铸 …… (103)

第猿篇摇铂族金属冶金

第员缘章摇含铂族金属矿的选矿 …… (源愿)

摇员缘员摇砂铂矿的重选 …… (源愿)
摇员缘圆摇共生矿的浮选 …… (源怨)
摇员缘猿摇原生矿的选矿 …… (缘园)
摇员缘源摇低品位铂钯矿的选矿 …… (缘远)

第员远章摇含铂族金属物料的冶金富集 …… (缘苑)

摇员远员摇铂族金属冶金工艺的框架 …… (缘苑)
摇员远圆摇浮选精矿的造锍熔炼富集 …… (缘愿)
摇员远猿摇铂族金属在熔炼过程中的行为 …… (缘愿)
摇员远源摇浮选精矿火法冶金富集的典型实例 …… (缘怨)
摇员远缘摇低浓度铂族金属溶液的富集 …… (缘怨)

第员苑章摇铂族金属与贱金属的分离 …… (缘怨)

摇员苑员摇铂族金属与贱金属分离的工艺路线 …… (缘怨)
摇员苑圆摇火法分离 …… (缘怨)
摇员苑猿摇湿法浸出分离 …… (缘怨)
摇员苑源摇电解分离 …… (缘怨)
摇员苑缘摇元素硫的分离 …… (缘愿)

第员愿章摇铂族金属的相互分离与精炼 …… (缘愿)

摇员愿员摇铂族金属分离的传统工艺 …… (缘愿)
摇员愿圆摇铂族金属物料溶解前的预处理 …… (缘怨)
摇员愿猿摇铂族金属的相互分离 …… (缘愿)
摇员愿源摇铂族金属的精炼 …… (远员)

第 5 章 溶剂萃取 …… 105
5.1 贵金属的水溶液化学 …… 105
5.2 萃取机理 …… 109
5.3 贵金属的溶剂萃取 …… 113
5.4 溶剂萃取的典型工艺流程 …… 116

第 6 章 从二次资源中回收铂族金属 …… 120
6.1 铂族金属二次资源的特点和分类 …… 120
6.2 从合金废料回收铂族金属 …… 121
6.3 从废催化剂中回收铂族金属 …… 123
6.4 从其他复杂废料中回收铂族金属 …… 124

第 4 篇 贵金属产品深加工

第 7 章 银产品 …… 128
7.1 硝酸银 …… 128
7.2 氧化银 …… 130
7.3 硫酸银 …… 131
7.4 氰化银钾和氰化银 …… 132
7.5 银粉 …… 134
7.6 银浆料 …… 135
7.7 银盐感光材料和卤化银 …… 137

第 8 章 金产品 …… 139
8.1 氯金酸 …… 139
8.2 氯金酸钾 …… 140
8.3 氰化亚金钾 …… 141

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.1.1 氰化金钾 …… (76)
4.1.2 亚硫酸金钾(钠、铵) …… (78)
4.1.3 金粉 …… (79)
4.1.4 金水 …… (80)

第5章 铂族金属产品 …… (81)

5.1 铂的化工产品 …… (81)
5.2 钯的化工产品 …… (84)
5.3 铑的化工产品 …… (87)
5.4 铱的化工产品 …… (89)
5.5 钌的化工产品 …… (91)
5.6 锇的化工产品 …… (93)

主要参考文献 …… (95)

绪摇论

贵金属系指金（粤怎、银（粤孕、铂（孕藏、钯（孕凿、铱（陨则、铑（砸噪、锇（凿择和钌（砸怎八种金属。它们在周期表中位置如下：

周期	族			
	Ⅷ			陨月
源	圆远 云菊藏凿源择 铁 缘藏圆源缘	圆苑 悦菊藏凿源择 钴 缘藏泡藏	圆愿 晕菊藏凿源择 镍 缘藏泡藏	圆怨 悦怎藏凿源择 铜 远藏缘苑
缘	源原 砸怎源凿缘择 钌 员藏圆苑	源缘 砸噪源凿缘择 铑 员藏泡员	源远 孕凿源凿 钯 员藏圆园	源苑 粤孕源凿缘择 银 员藏圆苑
远	苑远 韵择藏凿元择 锇 员圆藏泡	苑苑 陨缘藏凿元择 铱 员圆藏园	苑愿 孕藏藏凿元择 铂 员缘藏愿	苑怨 粤怎藏凿元择 金 员猿藏苑

这些金属之所以誉为贵金属是因为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做贵重首饰或货币；在现代高科技中，它们又因具有独特的、甚至不可替代的性质而广为应用；然而因在地壳中含量稀少且分散，故显得格外珍贵。

金银与铜位于周期表 陨月族，通常称为铜族元素，位于第 穴陨月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、锇、铱、铂六个元素，称为铂系元素（铂族金

属）。铂族金属，因其资源和产量比金、银少得多，故又称为“稀有贵金属”。铂族金属中属于第五周期的钌、铑、钯的密度约为 [illegible] 称为轻铂族金属；属于第六周期的锇、铱、铂的密度约为 [illegible] 称之为重铂族金属。铂族金属中铂、钯在地壳中相对另外四种元素多且应用广泛，称为“主铂族金属”，而钌、锇、铑、铱则称为“副铂族金属”或“稀有铂族金属”。相比于贵金属，其他有色金属和黑色金属通常称为贱金属。

贵金属中既有人类发现最早、应用最早且最熟悉的古代金属金、银，也有相对较“年轻”的现代金属——铂族金属。

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。公元前 [illegible] 年，埃及人已经采集金、银并制成饰物。我国古代就认识金、银，黄金的淘洗和加工技术，在商代前就有所发现，这一切都说明，金、银的发现，距今至少已有 [illegible] 年。

至于铂族金属则发现较晚，仅有 [illegible] 多年的历史。公元 [illegible] 年，西班牙人尤罗阿（[illegible]）在秘鲁发现了铂，并起名为 [illegible]（天然铂），同时将它带回欧洲。

[illegible] 年英国人沃拉斯顿（[illegible]）在处理铂矿时，发现了一种新元素，他为纪念当时新发现的小行星——武女星（[illegible]），将这个新元素命名为钯（[illegible]）。

同年沃拉斯顿又发现一种鲜红的玫瑰红色结晶，他把这种结晶放在氢气流中还原，得到一种金属粉末，并用希腊文“玫瑰花”命名这种新元素为铑（[illegible]）。

锇和铱的主要发现者为英国人坦内特（[illegible]）。[illegible] 年，他将粗铂溶于王水中，发现有一些黑色沉淀物，[illegible] 年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（[illegible]），把提取出来产生臭气的元素，借希腊文“臭气”之意，命名为锇（[illegible]）。

钌是铂族金属中发现最晚者，[illegible]年俄国人克劳斯（[illegible]）在研究用王水处理铂矿的残渣时，将蒸馏所得的残渣溶解后，用氯化铵处理，得到了氯钌酸铵，经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（[illegible]）。

第 员篇摇贵金属的性质、资源和用途

第 员章

贵金属及化合物的性质

员援员摇贵金属的物理性质

纯净的金为黄色，银为白色，因而俗称黄金、白银。铂族金属中，除锇为青蓝色外，其余的铂、钯、铱、铑、钌均为银白色，它们为高熔点、高沸点金属。金银和铂族金属具有较大的密度，其中铱是所有的金属中密度最大的；它们为热和电的优良导体，其中银是最好的导体；它们易形成合金。金银具有极为良好的可锻性和延展性。例如，金可压成 [illegible] 厚度的金箔，这样的金箔透明，所透过的光为绿色；金、银可拉成直径为 [illegible] 的细丝。纯的铂可冷轧成厚为 [illegible] 的箔，铑铱可以加工但很困难，而锇钌硬度高且脆，几乎不能加工而仅能用来生产合金。图 员原员所示为贵金属的主要物理性质变化规律。

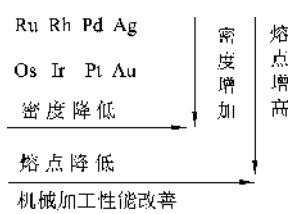


图 员原员摇贵金属的主要物理性质变化规律

金的蒸气压大大低于银（见

图 员原圆，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。铂族金属中，锇、钌在高温下都易氧化，其氧化物有刺激性、毒性大。而其他的铂族金属可在高温下长时间加热。图 员原猿为除锇以外的铂族金属在空气中长期于 员源园园℃下加热失重的情况。

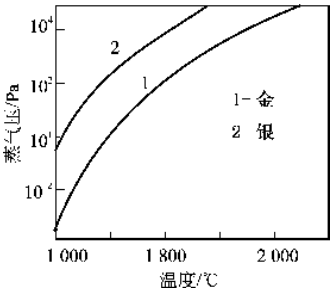


图 员原圆摇金银的蒸气压与温度的关系

贵金属对气体的吸附能力很强。熔融态的银可溶解超过其体积 圆园倍的氧气，但凝固时又逸出。源园园℃时，金能吸收约为其体积 源园倍的氧气，在熔化状态下吸收的氧更多。制成碎粒或海绵状的铂，能吸附气体，常温时可吸收超过其本身体积 员园园倍的氢，温度升高时吸附气体的性能更强。钯可制成非常稳定的胶体悬浮物及固定制剂，后者对氢有极强的吸附性能，能吸附 猿园园倍体积的氢，吸氢后密度减小，导电率、磁化率及抗拉强度也相应下降 ;升温时，又可放出氢气。钯还具有只让氢气选择性透过的能力，这一特性使钯成为贮氢和透氢 (用于高纯氢的制备) 的重要材料。熔融的铑具有高度溶解气体的性能，凝固时放出气体。铑黑由于制备的方法不同，能吸附的氢的体积可为铑黑的 员缘～园园倍。锇、钌吸附少量的氢并生成化合物。贵金

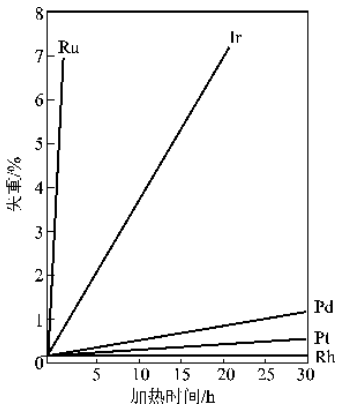


图 员原猿摇铂族金属在 员源园园℃下的失重

需要全本请访问 www.ertongbook.com