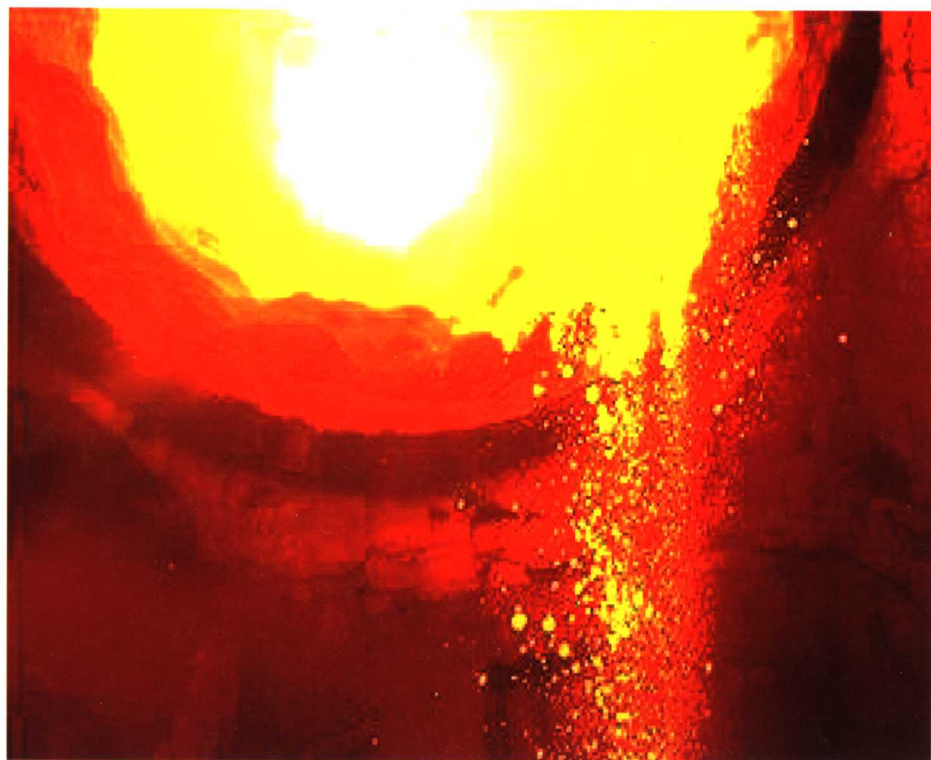


贵金属分离与 精炼工艺学

余建民 编著



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心

贵金属分离与 精炼工艺学

余建民 编著



化学工业出版社

化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

本书可供从事贵金属矿产资源及二次资源提取冶金、分离提纯、回收、分析、设计的研究人员和生产技术人员参考；同时也可供高等院校化学冶金专业的师生参阅。

贵金属分离与精炼工艺学/余建民编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 6
ISBN 7-5025-9008-0

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 071044 号

*

*

定 价：45.00 元

京化广临字 2006—41 号

前 言

贵金属精炼是贵金属冶金学的一个重要组成部分，它包括贵金属之间的相互分离以及使制取的贵金属达到用户要求纯度的一切技术操作与方法。

贵金属的精炼方法是根据贵金属及其化合物的性质和冶金过程的物理化学原理确定的。但是随着科学技术的发展，在不同时期对金属性质的认识不尽相同，特别是贵金属的应用范围不断扩大，对贵金属纯度和状态的要求亦有所不同，因而，分离和提纯技术也必然不断发展和变化。

1755 年，法国人吉统·莫尔沃等制得了可锻性的铂；1790 年法国人扎契发明了制取纯铂的方法；1800 年英国的沃拉斯顿发明了用氯化铵沉淀精炼铂的经典方法，并于 19 世纪 50 年代开始了贵金属精炼的工业化生产。由于贵金属化学性质复杂且相似，因而其精炼工艺具有相当高的技术含量。从 19 世纪初到 20 世纪 60 年代，传统沉淀分离工艺是贵金属精炼工艺的主要方法，世界著名贵金属生产厂，如国际镍公司 (Inco) Acton 精炼厂、英国 Royston 的 Mathey-Rusterburg 精炼厂、英高克公司的新泽西州精炼厂、俄罗斯等国家的精炼厂均曾经或部分还在使用传统沉淀精炼工艺。但是随着近 20 年来生命科学和高新技术材料等领域的发展，对贵金属的纯度要求越来越高，对贵金属传统沉淀精炼工艺提出了新的挑战，自从 20 世纪 70 年代初，国际镍公司 Acton 精炼厂将二丁基卡必醇萃取分离金应用于实际工业生产以来，关于应用溶剂萃取分离技术、色谱分离技术、离子交换分离技术、分子识别技术分离精炼贵金属的研究日益活跃，一些研究成果已应用于实际生产中，近一二十年来，国际著名三大贵金属精炼厂，国际镍公司 (Inco) Acton 精炼厂、英国 Royston 的 Mathey-Rusterburg 精炼厂和南非 Lonrho 精炼厂，相继以现代溶剂萃取分离精炼技术、离子交换分离精炼技术代替了传统沉淀分离精炼工艺。中国自 21 世纪初，先后引进

并消化吸收了国外的最先进的贵金属精炼新工艺、设备、自动化仪器仪表，极大地提高了我国贵金属精炼工艺和装备的水平，也给我国贵金属精炼工艺的研究与开发带来了较大的机遇和挑战。关于贵金属精炼工艺在最近几年出版的贵金属专著中均有所论述，但均比较零散，不够系统、全面，笔者收集了大量国内外文献资料并结合自己生产实践经验，首次系统、全面总结了贵金属精炼工艺，希望对从事贵金属矿产资源、二次资源提取冶金、分离提纯、回收、分析、设计的研究人员、生产技术人员、高等院校化学冶金专业的师生有所裨益。

在编写过程中得到了许多同事、朋友的帮助和鼓励，家人给予了极大的支持，还得到了湖南省郴州市湘晨高科实业有限公司及其总经理谢成湘先生一如既往的资助。在出版过程中，得到了化学工业出版社的支持与帮助。笔者在此对他们均表示衷心的感谢。

余建民

2006年3月于春城昆明

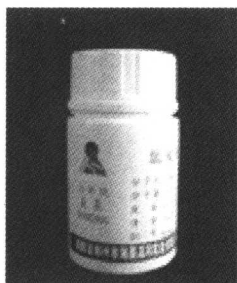
湖南省郴州市湘晨高科实业有限公司简介

湖南省郴州市湘晨高科实业有限公司创建于1985年，注册资金1510万元，是一家集研发、生产、销售和自营进出口为一体的国家级区外高新技术企业，公司拥有先进的生产工艺和检测设备，产品质量稳定，使用成本低，售前、售中、售后服务周全。公司主要业务：金、银、铂、钯、铑、钼、钨、钽等贵金属的回收、分离提纯。贵金属系列催化剂及其化合物的生产；稀贵金属超细粉末和纳米材料的生产；铜、铅、锌、镍、钴、锡、铋、锑等有色金属废渣、废水、阳极泥的回收、冶炼。公司主要产品：钯、铂、钨、铑等系列催化剂；金粉、海绵钯、海绵铂、铑粉、1#标准银锭、2#标准银锭、3#标准银锭；氯化钯、硝酸钯、氧化银、氯铂酸、氯铂酸钾、氯铂酸钠、氯铂酸铵、三氯化钨等贵金属化合物；草酸钴（镍）、碳酸钴（镍）、钴粉、氧化钴等有色金属产品；纳米球形银粉、片状银粉等。

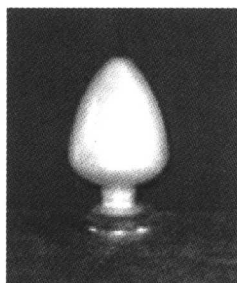
近年来，公司承担的纳米级片状银粉开发、钯炭系列催化剂开发项目均荣获郴州市科学技术进步一等奖。公司先后获得湖南省高新技术企业、郴州市先导型科技企业、郴州市优秀民营企业等称号。公司董事长兼总经理谢成湘先生，任全国贵金属深加工及应用委员会副主任委员，郴州市人大代表，被郴州市评为优秀民营企业家，获郴州市“五四青年奖章”。



钯炭催化剂



三氯化钨



纳米银粉

法定代表人：谢成湘（13807354277；E-mail: xcx4277@163.net）

网址：<http://www.xcmetal.com.cn>

电话：0086-735-2184856/2184772；0086-735-2184772（传真）

销售热线：0735-2184872/2184856

厂址（地址）：湖南省郴州市开发区万华大道（邮编：423000）

目 录

1 贵金属元素化学	1
1.1 贵金属的电子层结构和氧化态	1
1.2 贵金属的主要物理性质	2
1.3 贵金属的主要化学性质	4
1.4 贵金属重要化合物	6
1.4.1 氧化物	6
1.4.2 氢氧化物	8
1.4.3 硫化物	8
1.4.4 卤化物	9
1.4.5 硝酸盐	13
1.4.6 氰化物	13
1.4.7 硫酸盐	13
1.5 贵金属重要配合物	14
1.5.1 金配合物	14
1.5.2 银配合物	15
1.5.3 钯配合物	17
1.5.4 铂配合物	18
1.5.5 铑配合物	20
1.5.6 铱配合物	22
1.5.7 钇配合物	23
1.5.8 钕配合物	24
1.6 贵金属在酸性氯化物介质中的主要存在形式	25
参考文献	26
2 贵金属分离方法与工艺	27
2.1 贵金属物料的溶解	27
2.1.1 易溶物料的溶解	27
2.1.2 难溶物料的溶解	30

2.1.3 贵金属物料溶解动力学	37
2.2 浓硫酸浸煮法分离贱金属	40
2.3 蒸馏法选择性分离钨、钼	41
2.3.1 钨、钼的化学性质	41
2.3.2 氯酸钠的性质、制备及有关反应	42
2.3.3 钨、钼的蒸馏方法	42
2.3.4 中国贵金属精矿蒸馏钨、钼的工艺流程	45
2.4 蒸残液的预处理	48
2.5 置换法	49
2.5.1 铜粉置换法从脱胶液中置换金、钯、铂	50
2.5.2 锌镁粉置换法从一次置换液中置换铑、铱	54
2.5.3 铜粉置换法分离铑、铱	55
2.6 还原法	56
2.6.1 还原法分离贵、贱金属	56
2.6.2 选择性还原法分离金	56
2.7 沉淀法	58
2.7.1 影响沉淀分离的因素	58
2.7.2 沉淀法分离贵、贱金属	59
2.7.3 选择性沉淀法分离金、钯	62
2.7.4 选择性沉淀钯	62
2.7.5 氯化铵沉淀法分离铂	64
2.7.6 贵金属传统沉淀分离工艺	67
2.8 水解法	67
2.8.1 氧化水解法分离铂	67
2.8.2 亚硝酸钠配合水解沉淀法	67
2.9 氨水配合法分离钯	68
2.10 无水二氯化钯结晶法分离钯	68
2.11 萃取法	68
2.11.1 溶剂萃取分离贵金属概况	68
2.11.2 贵金属萃取分离工艺	70
2.12 离子交换法	74
2.12.1 离子交换法分离贱金属精炼贵金属	74
2.12.2 离子交换树脂提取分离贵金属	74
2.13 分子识别技术 (MRT) 分离贵金属	78
2.13.1 分子识别法 (MRT) 分离贵金属的原理	78
2.13.2 分子识别法 (MRT) 分离贵金属的工艺	79

参考文献	82
------------	----

3 金的精炼工艺	85
-----------------------	-----------

3.1 概述	85
3.2 金的火法精炼	86
3.2.1 火法氧化精炼法	86
3.2.2 氯化精炼法	88
3.2.3 温和氯化法	92
3.3 金的电解精炼	92
3.3.1 金电解精炼原理	92
3.3.2 金电解时杂质行为	94
3.3.3 金电解精炼实践	97
3.4 电解精炼制备 5N 高纯金	105
3.4.1 电解精炼制备高纯金的原理与工艺	105
3.4.2 电解过程中主要现象	106
3.4.3 金电解过程中杂质的行为	107
3.5 电解精炼金闭路循环新工艺——J 工艺	108
3.5.1 J 工艺流程	108
3.5.2 J 工艺的构成	108
3.5.3 J 工艺的物料平衡	110
3.5.4 J 工艺金的质量	111
3.6 金的化学精炼	111
3.6.1 硫酸浸煮法	111
3.6.2 硝酸分银法	112
3.6.3 王水分金法	112
3.6.4 草酸还原法	113
3.6.5 SO_2 还原法	118
3.6.6 H_2O_2 还原法	118
3.6.7 盐酸肼还原法	119
3.6.8 电解造液-控制电势还原法	120
3.6.9 还原精炼工艺的发展与电势监控	121
3.6.10 电势控制法提金在金精炼中的应用	122
3.7 Boliden 金精炼工艺	125
3.7.1 工艺流程	125
3.7.2 主要工艺技术条件	125
3.7.3 成本分析	128

3.7.4	Boliden 工艺特点	129
3.8	自动催化还原精炼法	130
3.9	氯氨净化法	131
3.10	金的萃取法精炼	132
3.10.1	乙醚 (Et_2O) 萃取精炼高纯金	133
3.10.2	王水溶解-DBC 萃取精炼法	136
3.10.3	南非 Minataur TM 溶剂萃取法精炼金新工艺	139
3.10.4	氰化浸出-三烷基甲基氯化铵萃取-电积法	144
3.10.5	王水溶解-二异辛基硫醚萃取精炼法	144
3.10.6	混合醇 ($\text{C}_7 \sim \text{C}_{10}$)-磷酸三丁酯 (TBP) 萃取精炼法	145
3.10.7	电解含金有机萃取相制备高纯金	147
3.11	黄金精炼技术展望	147
	参考文献	148
4	银的精炼工艺	149
4.1	概述	149
4.2	银的火法精炼	149
4.2.1	银的火法精炼原理	149
4.2.2	银的火法精炼方法	150
4.3	银的电解精炼	153
4.3.1	银电解精炼原理	153
4.3.2	银电解中杂质的行为	154
4.3.3	硝酸银电解液的组成及制备	155
4.3.4	银电解槽	157
4.3.5	银电解精炼实践	158
4.3.6	银电解主要技术经济指标	159
4.3.7	阳极泥及废电解液处理	161
4.4	银的化学法精炼	167
4.4.1	氯化银液相化学还原精炼法	167
4.4.2	氯化银高温熔炼还原精炼法	175
4.5	银的萃取法精炼	176
4.5.1	二异辛基硫醚 (S_{219}) 萃取精炼银	177
4.5.2	电解含银萃取有机相制备高纯银	178
	参考文献	179
5	钯的精炼工艺	180
5.1	概述	180

5.2 氯钼酸铵反复沉淀法	180
5.2.1 钼的溶解造液	180
5.2.2 氯化铵反复沉淀法	183
5.3 二氯二氨配亚钼法	184
5.3.1 造液	184
5.3.2 除银赶硝	184
5.3.3 氨水配合	185
5.3.4 酸化沉淀	186
5.3.5 煅烧与氢还原	186
5.3.6 水合肼还原	187
5.4 钼的萃取精炼工艺	191
5.4.1 二正辛基硫醚 (DOS) 萃取分离钼	192
5.4.2 二正庚基硫醚 (DNHS) 萃取分离钼	192
5.4.3 二异戊基硫醚 (DIAS 或 S ₂₀₁) 萃取分离钼	193
5.4.4 8-羟基喹啉类萃取剂 (HQ) 萃取分离钼	193
5.5 中国钼的精炼工艺	194
参考文献	195

6 铂的精炼工艺..... 196

6.1 概述	196
6.2 王水溶解-氯化铵反复沉淀法	196
6.2.1 原理	196
6.2.2 作业过程	197
6.3 还原溶解-氯化铵反复沉淀法	199
6.3.1 方法原理	199
6.3.2 作业过程	199
6.3.3 方法特点	200
6.4 铂的氧化水解法	201
6.4.1 铂的造液方法	201
6.4.2 氧化水解法精炼铂的原理	202
6.4.3 铂的水解作业过程	203
6.5 载体水解法	206
6.5.1 溶解造液	206
6.5.2 除金	207
6.5.3 除钼	207
6.5.4 载体水解	208

6.6	高纯铂的制取	208
6.6.1	载体水解-离子交换法	208
6.6.2	氧化载体水解-离子交换-氨气沉淀法	209
6.7	碱溶-还原法	210
6.8	二氯二氨合铂(Ⅱ)法	210
6.9	二亚硝基二氨合铂(Ⅱ)法	211
6.10	还原-溶解法	211
6.10.1	方法原理	211
6.10.2	工艺流程	212
6.10.3	作业过程	212
6.11	电解精炼法	214
6.12	铂的萃取精炼工艺	214
6.12.1	磷酸三丁酯(TBP)萃取精炼铂	215
6.12.2	三正辛胺(TOA)萃取精炼铂	215
6.12.3	三烷基胺(N_{235} 、7301)萃取精炼铂	215
6.12.4	氨基酸萃取精炼铂	216
6.13	中国铂的精炼工艺	217
	参考文献	218

7 铑的精炼工艺

7.1	概述	219
7.2	亚硝酸钠配合法	219
7.2.1	铑的造液	219
7.2.2	亚硝酸钠配合	220
7.2.3	硫化沉淀法除杂质	221
7.2.4	用亚硫酸铵精炼除铈	222
7.2.5	氯化铵沉淀	222
7.2.6	铑的还原	222
7.2.7	氢还原	223
7.3	氨化法	224
7.3.1	五氨化法	224
7.3.2	三氨化法	224
7.4	加压氢还原法	224
7.5	铑的萃取精炼工艺	225
7.5.1	离子交换-TBP萃取法	226
7.5.2	TRPO萃取-离子交换法	229

7.6 中国铈的精炼工艺	230
7.6.1 水解	230
7.6.2 TBP 萃取除铈	230
7.6.3 离子交换	231
7.6.4 中温氯化	231
7.6.5 氯仿萃取	232
7.6.6 氯铈酸铵煅烧-氢还原	232
参考文献	232

8 铈的精炼工艺..... 233

8.1 概述	233
8.2 硫化法	233
8.2.1 铈的造液	233
8.2.2 氯铈酸铵沉淀	234
8.2.3 氯铈酸铵的还原	234
8.2.4 硫化铵除杂质	234
8.2.5 氯铈酸铵再沉淀	235
8.2.6 煅烧-氢还原	235
8.3 亚硝酸钠配合法	236
8.4 加压氢还原法	237
8.5 萃取法精炼铈	237
8.5.1 三烷基氧化磷 (TRPO) 萃取精炼法	238
8.5.2 磷酸三丁酯 (TBP) 萃取精炼法	240
8.5.3 三烷基胺 (N ₂₃₅) 萃取精炼法	241
8.6 中国铈的精炼工艺	241
8.6.1 铈、铈溶液的净化	242
8.6.2 TBP 分离铈、铈	242
8.6.3 铈的精炼	243
参考文献	244

9 铈、钕的精炼工艺..... 245

9.1 概述	245
9.2 铈的精炼工艺	245
9.2.1 还原沉淀法	245
9.2.2 硫化钠沉淀法	246
9.2.3 二次蒸馏法	246

9.2.4	氢直接还原 OsO_4 或 Na_2OsO_6 法	247
9.2.5	中国铱的精炼工艺	247
9.3	钌的精炼工艺	250
9.3.1	粗钌的精炼工艺	250
9.3.2	钌吸收液的二次蒸馏法	250
9.3.3	硝酸赶铱-二次蒸馏法	251
9.3.4	萃取法精炼钌	252
9.3.5	中国钌的精炼工艺	252
	参考文献	253
10	光谱分析用高纯贵金属基体的制备	254
10.1	概述	254
10.2	金基体的制备	255
10.2.1	金粉产品标准	255
10.2.2	光谱分析用高纯金基体的制备	255
10.3	钯基体的制备	256
10.3.1	海绵钯产品标准	256
10.3.2	光谱分析用高纯钯基体的制备	256
10.3.3	光谱分析用高纯钯基体国家标准 (YS/T 83—1994)	257
10.4	铂基体的制备	259
10.4.1	海绵铂产品标准	259
10.4.2	光谱分析用高纯铂基体的制备	259
10.4.3	光谱分析用高纯铂基体国家标准 (YS/T 82—1994)	261
10.5	铑基体的制备	261
10.5.1	铑粉产品标准	261
10.5.2	光谱分析用高纯铑基体的制备	262
10.5.3	光谱分析用高纯铑基体国家标准 (YS/T 85—1994)	263
10.6	铱基体的制备	264
10.6.1	铱粉产品标准	264
10.6.2	光谱分析用高纯铱基体的制备	265
10.6.3	光谱分析用高纯铱基体国家标准 (YS/T 83—1994)	266
10.7	钌基体的制备	266
10.7.1	钌粉产品标准	266
10.7.2	光谱分析用高纯钌基体的制备	267
	参考文献	268
附录 1	通过上海黄金交易所认证可提供标准金锭的企业	269
附录 2	美国材料与试验学会 (ASTM) 及俄罗斯贵金属产品标准	270

1

贵金属元素化学

1.1 贵金属的电子层结构和氧化态^[1]

贵金属在元素周期表中的位置及价电子层结构如表 1-1 所示。

表 1-1 贵金属在元素周期表中的位置及价电子层结构

族 周期	Ⅷ			I B
4	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu
	铁 $3d^6 4s^2$	钴 $3d^7 4s^2$	镍 $3d^8 4s^2$	铜 $3d^{10} 4s^1$
	55.84	58.93	58.69	63.54
5	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag
	钉 $4d^7 5s^1$	铑 $4d^8 5s^1$	钯 $4d^{10}$	银 $4d^{10} 5s^1$
	101.10	102.91	106.42	107.87
6	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au
	锇 $5d^6 6s^2$	铱 $5d^7 6s^2$	铂 $5d^9 6s^1$	金 $5d^{10} 6s^1$
	190.2	192.22	195.08	196.97

金、银和铜位于周期表 I B 族，统称为铜族元素，位于第Ⅷ族的 9 个元素中第四周期的铁、钴、镍称为铁系元素，第五、六周期的钉、铑、钯、锇、铱、铂称为铂族金属（或稀贵金属）。铂族金属中属第五周期的钉、铑、钯的密度约为 12，称为轻铂族金属；属于第六周期的锇、铱、铂的密度约为 $22\text{g}/\text{cm}^3$ ，称为重铂族金属。

从表 1-1 可以看出，所有贵金属元素均具有 d 电子层，ns 轨道电子有从 ns 轨道转移到 (n-1)d 轨道的强烈趋势，因此就决定了这些元素是多价态的，并有生成配合物的强烈趋势。贵金属的常见氧化态及电离势等性质如表 1-2 所示。

表 1-2 贵金属的常见氧化态及电离势等性质

元 素		Ru	Rh	Pd	Ag	Os	Ir	Pt	Au
价电子层结构		4d ⁷ 5s ¹	4d ⁸ 5s ¹	4d ¹⁰	4d ¹⁰ 5s ¹	5d ⁶ 6s ²	5d ⁷ 6s ²	5d ⁹ 6s ¹	5d ¹⁰ 6s ²
主要氧化态		+2, +4, +6, +7, +8	+3, +4	+2, +4	+1	+2, +3, +4, +6, +8	+3, +4, +6	+2, +4	+1, +3
稳定氧化态		+4	+3	+2	+1	+8	+3, +4	+2, +4	+3
离子半径/nm	M ⁺				0.126				0.137
	M ²⁺	0.081	0.080	0.085	0.089	0.088	0.092	0.124	—
	M ³⁺		0.068						
	M ⁴⁺	0.069		0.065		0.069	0.068	0.065	
电负性		1.42	1.45	1.35	1.42	1.52	1.55	1.44	1.42
第一电离势/(kJ/mol)		710.8	720.4	804.1	731.3	839.7	888.3	868.6	889.1
第二电离势/(kJ/mol)		1601.6	1536.7	1874.5	2073.3			1791.6	1978.7
第三电离势/(kJ/mol)					3465.6				2894.6
第四电离势/(kJ/mol)					5020				4200

决定元素氧化态稳定性的因素当然是很复杂的，考虑其完整的能量循环是必要的，但由于许多化合物缺乏所需的数据，只能把电离势作为一般指导性判据。例如银的第二电离势相对较高，决定了它的稳定氧化态是+1，而金的第三电离势相对较低，导致金易生成稳定的+3 氧化态。在周期表中贵金属元素的主要氧化态及其稳定性的递变规律为：同族中从上到下高氧化态稳定性逐渐增加，同一周期中从左到右高氧化态稳定性逐渐降低。

1.2 贵金属的主要物理性质^[2,3]

贵金属的颜色除金为金黄色，钨为蓝灰色外，其余 6 种金属均为银白色；除金、银外它们均为难熔的金属；都具有较大的密度，其中铱的密度最大；均是热和电的良导体，其中银是最好的导体；均易生成合金，金、银还有良好的延展性，1g 金能拉成长 3km 的细丝，可碾压成厚度为 0.001mm 的金箔；铂、钯易于机械加工，纯铂可冷轧成厚为 0.0025mm 的箔，铑、铱可以加工（但很困难），钨钨硬度高且脆，不能承受机械加工。图 1-1 所示为贵金属物理性质的变化规律。

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 20 倍的氧，但凝固时又逸出。450℃时，金能吸收约为其体积 40 倍的氧，在熔化状态下吸收的氧更多。铂可制成碎粒或海绵体，能吸附气体，常温时可吸收超过其本身体积 114 倍

表 1-3 贵金属的主要物理性质

金属元素	钨	钼	银	钨	钨	钨	钨	钨
原子序数	44	45	46	47	476	77	78	79
相对原子质量	101.7	102.9055	106.42	107.8682	190.2	192.22	195.08	196.6882
最近的原子距离/nm	0.27056	0.2689	0.2751	0.2889	0.27341	0.2715	0.2774	0.2884
晶体结构	密集六方	面心立方	面心立方	面心立方	密集六方	面心立方	面心立方	面心立方
晶格常数 a (25℃)/nm	0.27056	0.38031	0.32898	0.40862	0.27340	0.38392	0.39229	0.40786
晶格常数 c/a	1.5825	—	—	—	1.5799	—	—	—
原子半径/nm	0.125	0.125	0.128	0.134	0.126	0.127	0.130	0.134
原子体积	8.3	8.5	8.9	10.21	8.5	8.6	9.12	10.11
硬度(金刚石=10)	6.5	—	5	2.5	7	6.5	4.5	2.5
密度(20℃)/(g/cm ³)	12.450	12.410	12.020	10.49	22.610	22.650	21.450	19.32
熔点/℃	2427	1966	1550	961	3027	2454	1770	1063
沸点/℃	4119	3727	2900	2164	5020±100	4500	3824	2808
比热容/[J/(g·K)]	0.231	0.247	0.245	0.234	0.129	0.129	0.131	0.129
导热率(10~100℃)/[J/(cm ² ·s)]	1.047	1.507	0.754	4.187	0.879	1.465	0.712	3.098
线膨胀系数/10 ⁻⁶ ℃	9.1	8.3	11.1	19.68	6.1	6.8	9.1	14.16
电阻率/ $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	6.80	4.33	9.93	1.59	8.12	4.71	9.85	2.86
电阻温度系数(0~100℃)/℃ ⁻¹	0.0042	0.00463	0.0038	0.0041	0.0042	0.00427	0.003927	0.004
1000℃时与铂连接的电动势/mV	9.760	14.12	-11.491	0.80 ^②	—	12.750	—	12.35 ^②
物质磁化率/10 ⁻⁶	0.427	0.9903	5.231	-0.195	0.052	0.133	0.9712	-0.15
蒸气压(1500℃)/Pa	1.333×10 ⁻⁶	1.333	1.333×10 ⁻⁶	34.663	1.333×10 ⁻⁴	1.333×10 ⁻¹⁰	1.333×10 ⁻⁴	9.066×10 ⁻²

① 800℃。

② 700℃。