

# 现代黄金冶炼技术

XIANDAI HUANGJIN YELIAN JISHU

张亦飞 等编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 现代黄金冶炼技术

张亦飞 等编著

北 京

冶金工业出版社

2014

## 内 容 简 介

本书对金的性质、用途、金矿资源的分布及生产情况进行了介绍；并从金矿预处理、氰化提金、非氰化提金、金矿提取回收、金矿粗炼及精炼等角度对黄金冶炼技术进行了系统论述；对我国金矿分布最多的金矿伴生铜、金矿伴生铅锌的提取工艺以及广泛应用的烟气制酸技术进行了总结；对国外黄金冶炼技术进行相关介绍，并结合现有生产工艺，对黄金冶炼过程中的气体、水体、固体废弃物、噪声污染的末端治理技术进行了总结和评价，并提出了相应的综合治理技术；针对黄金冶炼过程的有害废气、重金属废水、重金属废渣总结出相关源头减排技术，并介绍了典型环境管理实例。

本书主要读者为黄金冶炼行业技术人员、相关科研人员以及环保工作者、高校师生等。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代黄金冶炼技术/张亦飞等编著. —北京:冶金工业出版社,  
2014. 10

ISBN 978-7-5024-6694-7

I. ①现… II. ①张… III. ①炼金 IV. ①TF831

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 236902 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjcs@cnmp.com.cn](mailto:yjcs@cnmp.com.cn)

责任编辑 杨盈园 陈慰萍 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6694-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 47.25 印张; 1145 千字; 738 页

170.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto:tougao@cnmp.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgy.tmall.com](http://yjgy.tmall.com)

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

近年来,随着世界经济的快速发展,黄金冶炼行业的生产规模大幅提高,生产技术不断进步。2013年,全球矿产黄金为3022t,其中我国黄金产量已达428.163t,连续7年居世界第一位。同时,易处理与富金矿资源日渐贫乏,复杂难处理金矿成为黄金冶炼的主要资源。采用传统黄金冶炼技术,生产成本低、资源利用率低、环境污染严重等瓶颈问题制约黄金冶炼行业的可持续发展。因此,对难处理复杂金矿利用以及黄金冶炼污染治理新技术的研发成为黄金生产行业必须解决的重要问题。近年来,在难处理贫矿、尾矿与废矿的低成本预处理或浸出、复杂矿的资源高效综合利用,以及黄金冶炼行业的废水与废渣的资源化综合利用或无害化处置等方向均取得了显著的技术进步,从各种电子废弃物等二次资源中回收黄金等贵金属的综合利用技术也日趋成熟,同时,更多的无毒或低毒非氰化黄金冶炼新技术实现了工业化应用。

中国科学院过程研究所在“十一五”至“十二五”期间承担国家环保部“黄金冶炼行业清洁生产与污染防治技术”项目时,系统调研了我国黄金冶炼行业的生产与污染防治技术,现根据公开文献与资料归纳整理编写了《现代黄金冶炼技术》一书。全书从系统性、先进性和实用性出发,全面阐述了黄金的性质、用途、金矿工艺学,以及从选矿到生产合格黄金产品的全部工序的各种生产方法,包括非氰化浸出技术,难处理矿、复杂矿的资源高效利用,从电子废弃物与其他含金废料中回收黄金,以及黄金冶炼行业的污染防治等技术的最新进展。同时在主要技术篇章后介绍了先进的典型应用实例,并附有主要工艺技术与设备的大量图表,以阐明其工艺与设备关键技术,便于参考应用。因此,本书对黄金冶炼工业的生产与技术研发,以及冶金相关专业的教学与科学研究具有重要的参考与指导意义。

全书共分五篇21章,由张亦飞统稿,执笔人分别为邓立聪(第12、15、

18~21章), 张芳芳(第1~4、10章), 江小舵(第9章), 游韶玮(第7~8章), 郭涛(第11章), 秦士跃(第13~14章), 殷保稳(第16~17章)与薄婧(第5~6章), 陈芳芳参与了第五篇初稿的编写。由于编者的水平所限, 不妥之处在所难免, 敬请广大同行与读者朋友批评指正。在进行黄金冶炼行业技术调研以及本书的编写出版过程中, 得到了我国主要黄金冶炼企业以及国家环保部水专项的大力支持, 在此表示衷心的感谢!

编 者

2014年8月于北京

# 目 录

## 第一篇 概 述

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1 金的性质及用途 .....        | 1  |
| 1.1 金的基本性质 .....       | 1  |
| 1.1.1 金的物理性质 .....     | 1  |
| 1.1.2 金的化学性质 .....     | 2  |
| 1.2 金的用途 .....         | 9  |
| 1.2.1 金的货币价值 .....     | 9  |
| 1.2.2 金的装饰用途 .....     | 10 |
| 1.2.3 金的工业用途 .....     | 11 |
| 2 金矿资源及其生产 .....       | 16 |
| 2.1 金矿资源与矿床 .....      | 16 |
| 2.1.1 世界金矿资源 .....     | 16 |
| 2.1.2 世界金矿床的类型 .....   | 16 |
| 2.1.3 世界金矿床的分布 .....   | 21 |
| 2.1.4 我国金矿床的主要类型 ..... | 22 |
| 2.1.5 我国重要金矿的分布 .....  | 28 |
| 2.2 黄金生产概况 .....       | 30 |
| 2.2.1 世界黄金生产概况 .....   | 30 |
| 2.2.2 我国黄金生产概况 .....   | 32 |
| 3 金的矿石类型 .....         | 34 |
| 4 金的生产工艺及发展历史 .....    | 37 |
| 4.1 黄金生产技术的发展 .....    | 37 |
| 4.2 黄金生产工艺概述 .....     | 39 |
| 4.2.1 黄金生产单元工艺过程 ..... | 39 |
| 4.2.2 单元工艺方案的选择 .....  | 45 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 4.3 影响工艺选择的因素及冶金试验 ..... | 46 |
| 4.3.1 影响工艺选择的因素 .....    | 46 |
| 4.3.2 金矿石的冶金试验 .....     | 48 |
| 4.4 处理流程方案的选择 .....      | 49 |

## 第二篇 金矿选矿及预处理

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 5 金矿选矿技术 .....          | 57  |
| 5.1 黄金选矿概述 .....        | 57  |
| 5.1.1 选矿常用术语 .....      | 57  |
| 5.1.2 黄金选矿的任务及过程 .....  | 58  |
| 5.2 选矿前准备 .....         | 59  |
| 5.2.1 砂金选矿前准备 .....     | 59  |
| 5.2.2 岩金选矿前准备 .....     | 63  |
| 5.3 重力选矿法 .....         | 72  |
| 5.3.1 重选概念与原理 .....     | 72  |
| 5.3.2 重选方法与机械设备 .....   | 75  |
| 5.3.3 金粒形状与重选法的选择 ..... | 83  |
| 5.3.4 重选工艺流程 .....      | 84  |
| 5.4 浮游选矿法 .....         | 86  |
| 5.4.1 浮选概念与原理 .....     | 86  |
| 5.4.2 浮选药剂 .....        | 89  |
| 5.4.3 浮选设备 .....        | 95  |
| 5.4.4 浮选工艺条件及工艺流程 ..... | 102 |
| 5.4.5 各类金矿石的浮选实例 .....  | 107 |
| 5.5 混汞法 .....           | 112 |
| 5.5.1 混汞法原理 .....       | 113 |
| 5.5.2 混汞方法与设备 .....     | 114 |
| 5.5.3 汞膏的处理 .....       | 119 |
| 5.5.4 混汞工艺的主要影响因素 ..... | 120 |
| 5.5.5 汞毒防护 .....        | 122 |
| 5.5.6 混汞法实例 .....       | 123 |
| 5.6 其他选矿技术 .....        | 125 |
| 5.6.1 石蜡法 .....         | 125 |
| 5.6.2 煤—油聚团法 .....      | 126 |
| 5.7 脱水 .....            | 129 |
| 5.7.1 浓缩 .....          | 129 |
| 5.7.2 过滤 .....          | 130 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 5.7.3 干燥 .....                  | 134        |
| <b>6 难处理金矿石氧化焙烧预处理技术 .....</b>  | <b>135</b> |
| 6.1 难处理金矿石概论 .....              | 135        |
| 6.1.1 金矿石难处理的原因与工艺矿物学研究 .....   | 135        |
| 6.1.2 难处理金矿石的类型 .....           | 137        |
| 6.1.3 难处理金矿举例 .....             | 138        |
| 6.1.4 难处理金矿石处理方案的选择 .....       | 140        |
| 6.1.5 难处理金矿石氰化提金效益的提高方案 .....   | 142        |
| 6.2 难处理金矿氧化焙烧过程理论基础 .....       | 149        |
| 6.2.1 矿物焙烧过程的热力学 .....          | 150        |
| 6.2.2 金精矿氧化焙烧的化学反应 .....        | 151        |
| 6.2.3 焙烧过程反应动力学 .....           | 152        |
| 6.3 氧化焙烧过程参数 .....              | 153        |
| 6.4 氧化焙烧与硫酸化焙烧 .....            | 154        |
| 6.5 焙烧工艺设备 .....                | 156        |
| 6.5.1 平底式焙烧炉 .....              | 156        |
| 6.5.2 回转窑 .....                 | 156        |
| 6.5.3 沸腾焙烧炉 .....               | 157        |
| 6.6 焙烧过程中的环境问题 .....            | 161        |
| 6.7 难处理金矿氧化焙烧工艺的现状与发展 .....     | 163        |
| <b>7 难处理金矿加压氧化浸出预处理技术 .....</b> | <b>166</b> |
| 7.1 难处理金矿加压氧化浸出发展概况 .....       | 166        |
| 7.2 金属硫化物矿的加压氧化机理 .....         | 167        |
| 7.2.1 酸法加压氧化 .....              | 168        |
| 7.2.2 碱法加压氧化 .....              | 169        |
| 7.2.3 加压氧氨浸 .....               | 170        |
| 7.3 矿物加压氧化过程的反应动力学 .....        | 173        |
| 7.4 金矿加压氧化工艺的适用性 .....          | 175        |
| 7.5 工艺流程与工业实践 .....             | 176        |
| 7.5.1 工艺流程 .....                | 176        |
| 7.5.2 工业实践 .....                | 178        |
| 7.6 加压设备的选择与计算 .....            | 180        |
| 7.6.1 加压釜的分类与选择 .....           | 180        |
| 7.6.2 加压设备的计算 .....             | 183        |
| 7.7 加压釜的安全知识 .....              | 185        |
| 7.7.1 加压釜的爆破事故 .....            | 185        |
| 7.7.2 加压釜运行的安全措施 .....          | 186        |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.7.3 加压釜的耐压试验 .....          | 187        |
| 7.7.4 加压釜的安全操作规程 .....        | 187        |
| 7.7.5 氧气的安全使用 .....           | 187        |
| 7.8 加压氧化过程中的环境问题 .....        | 188        |
| <b>8 难处理金矿生物氧化处理技术 .....</b>  | <b>190</b> |
| 8.1 难处理金矿生物氧化工艺发展概况 .....     | 190        |
| 8.2 浸矿微生物 .....               | 194        |
| 8.2.1 浸矿微生物的种类 .....          | 194        |
| 8.2.2 浸矿细菌的培养基 .....          | 199        |
| 8.2.3 细菌的生长曲线 .....           | 200        |
| 8.2.4 浸矿细菌的连续扩大培养 .....       | 201        |
| 8.2.5 浸矿细菌的驯化 .....           | 202        |
| 8.2.6 菌种的采集和分离培养 .....        | 203        |
| 8.2.7 菌种选育 .....              | 204        |
| 8.2.8 细菌的计量方法 .....           | 205        |
| 8.3 难处理金矿细菌氧化过程的反应机理 .....    | 206        |
| 8.4 细菌氧化工艺的影响因素与动力学 .....     | 208        |
| 8.4.1 细菌氧化工艺的影响因素 .....       | 208        |
| 8.4.2 细菌氧化工艺动力学 .....         | 212        |
| 8.5 难处理金矿细菌氧化工艺流程 .....       | 215        |
| 8.5.1 细菌堆浸预氧化工艺 .....         | 216        |
| 8.5.2 搅拌预氧化槽浸工艺 .....         | 222        |
| 8.6 难处理金矿细菌氧化工艺的优缺点 .....     | 231        |
| 8.7 难处理金矿细菌氧化工艺的技术经济分析 .....  | 232        |
| 8.7.1 难处理金矿氧化工艺指标 .....       | 232        |
| 8.7.2 难处理金矿氧化工艺工厂建设投资费用 ..... | 232        |
| 8.7.3 难处理金矿氧化工艺生产费用 .....     | 233        |
| 8.7.4 难处理金矿细菌氧化工艺生产费用 .....   | 234        |
| 8.7.5 不同工艺的经济效益对比 .....       | 235        |

### 第三篇 金的提取与精炼

|                      |            |
|----------------------|------------|
| <b>9 氰化法提金 .....</b> | <b>237</b> |
| 9.1 概述 .....         | 237        |
| 9.2 氰化提金原理 .....     | 239        |
| 9.2.1 热力学 .....      | 239        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 9.2.2 动力学 .....           | 240 |
| 9.3 氰化浸金影响因素 .....        | 243 |
| 9.3.1 氰浓度、氧浓度 .....       | 244 |
| 9.3.2 伴生矿物的作用 .....       | 245 |
| 9.3.3 其他影响因素 .....        | 252 |
| 9.4 搅拌氰化浸出提金 .....        | 258 |
| 9.4.1 搅拌法概述 .....         | 258 |
| 9.4.2 常规搅拌氰化 .....        | 259 |
| 9.4.3 常规氰化浸出的两种工艺组合 ..... | 267 |
| 9.4.4 高效氰化搅拌法 .....       | 268 |
| 9.4.5 搅拌氰化法设备 .....       | 271 |
| 9.4.6 生产实例 .....          | 276 |
| 9.5 堆浸法提金 .....           | 278 |
| 9.5.1 概述 .....            | 278 |
| 9.5.2 工艺流程 .....          | 278 |
| 9.5.3 堆浸矿石类型 .....        | 283 |
| 9.5.4 矿样堆浸试验 .....        | 284 |
| 9.5.5 堆浸法特点 .....         | 287 |
| 9.5.6 堆浸法工艺改善 .....       | 289 |
| 9.6 炭吸附法 .....            | 292 |
| 9.6.1 概述 .....            | 292 |
| 9.6.2 活性炭性质与种类 .....      | 293 |
| 9.6.3 吸附机理 .....          | 297 |
| 9.6.4 活性炭的选择 .....        | 301 |
| 9.6.5 炭浆法工艺 .....         | 305 |
| 9.6.6 炭浸法工艺 .....         | 310 |
| 9.6.7 活性炭吸附 .....         | 315 |
| 9.6.8 吸附影响因素 .....        | 316 |
| 9.6.9 贵液电积 .....          | 318 |
| 9.6.10 载金炭的解吸 .....       | 322 |
| 9.6.11 炭的活化再生 .....       | 323 |
| 9.7 树脂法提金 .....           | 328 |
| 9.7.1 树脂法概述 .....         | 328 |
| 9.7.2 树脂性质与种类 .....       | 328 |
| 9.7.3 树脂吸附提金机理 .....      | 331 |
| 9.7.4 树脂选择试验 .....        | 333 |
| 9.7.5 树脂法提金工艺 .....       | 335 |
| 9.7.6 生产实例 .....          | 346 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 10 非氰化提金技术 .....                        | 351 |
| 10.1 硫脲法 .....                          | 351 |
| 10.1.1 硫脲法浸出金的基本原理 .....                | 351 |
| 10.1.2 硫脲溶解金的影响因素 .....                 | 353 |
| 10.1.3 硫脲浸出液中金的提取方法 .....               | 357 |
| 10.1.4 硫脲法提金的研究现状 .....                 | 358 |
| 10.1.5 硫脲法的优缺点 .....                    | 358 |
| 10.1.6 硫脲法浸出金的试验案例 .....                | 359 |
| 10.2 硫代硫酸盐法 .....                       | 361 |
| 10.2.1 硫代硫酸盐法浸出金的基本原理 .....             | 361 |
| 10.2.2 硫代硫酸盐法浸出金的研究试验 .....             | 367 |
| 10.3 石硫合剂法 .....                        | 368 |
| 10.3.1 石硫合剂法浸出金的基本原理 .....              | 368 |
| 10.3.2 石硫合剂法浸出金的案例 .....                | 372 |
| 10.4 氯化法 .....                          | 373 |
| 10.4.1 液氯化法浸出金 .....                    | 373 |
| 10.4.2 电氯化法浸出金 .....                    | 377 |
| 10.4.3 高温氯化法挥发法提金 .....                 | 379 |
| 10.5 溴化法提金 .....                        | 383 |
| 10.5.1 溴化法浸出金的原理 .....                  | 383 |
| 10.5.2 溴化法浸出金的动力学 .....                 | 385 |
| 10.5.3 溴化法浸出金的工艺特点 .....                | 386 |
| 10.5.4 溴的电化学 .....                      | 387 |
| 10.5.5 溴化法浸金案例 .....                    | 388 |
| 10.6 类氰化物法 .....                        | 389 |
| 10.6.1 丙二腈法浸出金 .....                    | 389 |
| 10.6.2 氰溴酸法浸出金和 $\alpha$ -羟基腈法浸出金 ..... | 390 |
| 10.6.3 硫氰酸盐法浸出金 .....                   | 390 |
| 10.7 硝酸预氧化法 .....                       | 394 |
| 10.7.1 Nitrox 法 .....                   | 394 |
| 10.7.2 Arseno 法 .....                   | 399 |
| 10.7.3 还原氧化法 (Redox 法) .....            | 401 |
| 10.7.4 稀硝酸/氯化钠氧化浸出金 .....               | 403 |
| 10.7.5 催化氧化酸浸法 .....                    | 405 |
| 10.8 其他非氰法 .....                        | 407 |
| 10.8.1 多硫化物法 .....                      | 407 |
| 10.8.2 碘化法 .....                        | 409 |
| 10.8.3 生物制剂法 .....                      | 411 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 10.8.4 非极性溶剂法 .....        | 412        |
| 10.8.5 超声波强化浸金 .....       | 413        |
| <b>11 金的粗炼及精炼工艺 .....</b>  | <b>415</b> |
| 11.1 金的粗炼 .....            | 415        |
| 11.1.1 氰化金泥来源——锌置换沉淀 ..... | 415        |
| 11.1.2 锌置换沉淀的物理化学作用 .....  | 417        |
| 11.1.3 影响锌置换沉金的因素 .....    | 419        |
| 11.1.4 氰化金泥的冶炼 .....       | 425        |
| 11.1.5 硫脲金泥的冶炼 .....       | 437        |
| 11.1.6 汞膏的冶炼 .....         | 439        |
| 11.1.7 钢绵的冶炼 .....         | 442        |
| 11.2 金的精炼概述 .....          | 444        |
| 11.2.1 精炼系统 .....          | 444        |
| 11.2.2 精炼原料 .....          | 445        |
| 11.2.3 精炼方法 .....          | 445        |
| 11.2.4 金银成品标准 .....        | 446        |
| 11.2.5 熔铸成品金锭 .....        | 446        |
| 11.3 金的精炼方法 .....          | 447        |
| 11.3.1 火法精炼 .....          | 447        |
| 11.3.2 化学精炼 .....          | 448        |
| 11.3.3 电解精炼 .....          | 450        |
| 11.3.4 溶剂萃取精炼 .....        | 459        |
| 11.3.5 精炼工艺比较 .....        | 489        |

## 第四篇 金的综合提取技术

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>12 金铜矿火法处理工艺 .....</b>  | <b>491</b> |
| 12.1 铜金矿石资源 .....          | 491        |
| 12.1.1 铜矿石 .....           | 491        |
| 12.1.2 铜金矿石 .....          | 492        |
| 12.2 金铜矿的火法冶炼过程 .....      | 492        |
| 12.2.1 铜精矿造钼熔炼基本原理 .....   | 493        |
| 12.2.2 铜精矿火法冶炼主要流程 .....   | 507        |
| 12.3 金铜矿提取工艺及其应用实践 .....   | 515        |
| 12.3.1 富氧底吹造钼捕金原理 .....    | 515        |
| 12.3.2 富氧底吹造钼捕金工艺及实践 ..... | 516        |
| 12.3.3 富氧底吹炉比较 .....       | 518        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 12.4 铜阳极泥的处理 .....                 | 520 |
| 12.4.1 铜阳极泥的组成和性质 .....            | 520 |
| 12.4.2 铜阳极泥综合处理工艺 .....            | 521 |
| 12.4.3 铜阳极泥中金属利用文献进展 .....         | 543 |
| 13 高银金矿处理工艺 .....                  | 550 |
| 13.1 高银金矿的资源及特征 .....              | 550 |
| 13.2 高银金矿的选矿预处理 .....              | 550 |
| 13.3 高银金矿提取工艺实践 .....              | 552 |
| 13.3.1 新疆伊犁河地区某金矿 .....            | 552 |
| 13.3.2 吉林宝力格银金矿 .....              | 553 |
| 13.3.3 万年银金矿 .....                 | 555 |
| 13.3.4 某银金矿 .....                  | 558 |
| 13.3.5 山东金洲矿业集团有限公司 .....          | 559 |
| 13.3.6 遂昌金矿 .....                  | 563 |
| 14 其他类型金矿处理工艺 .....                | 567 |
| 14.1 铅锌伴生金矿提取工艺 .....              | 567 |
| 14.1.1 铅锌伴生金矿的资源 .....             | 567 |
| 14.1.2 铅锌伴生金矿的选矿预处理 .....          | 567 |
| 14.1.3 铅锌伴生金矿的冶炼过程 .....           | 569 |
| 14.1.4 从铅阳极泥提取金 .....              | 581 |
| 14.1.5 从铅阳极泥提取金工艺实践 .....          | 587 |
| 14.2 碳质劫金矿处理 .....                 | 588 |
| 14.2.1 碳质劫金矿的资源 .....              | 588 |
| 14.2.2 碳质劫金矿的选矿预处理 .....           | 589 |
| 14.2.3 碳质劫金矿冶炼工艺 .....             | 590 |
| 14.2.4 含碳质矿石处理工艺实践 .....           | 601 |
| 14.3 铋化物金矿处理 .....                 | 604 |
| 14.3.1 金—铋矿的资源 and 选矿 .....        | 604 |
| 14.3.2 金—铋矿的选矿预处理 .....            | 604 |
| 14.3.3 铋冶炼工艺 (铋冶炼过程中金的富集与走向) ..... | 606 |
| 14.3.4 从铋阳极泥提取金 .....              | 621 |
| 14.3.5 铋化物金矿石处理工艺实践 .....          | 622 |
| 14.4 碲化物金矿处理 .....                 | 626 |
| 14.4.1 碲矿的资源 .....                 | 626 |
| 14.4.2 碲矿的选矿预处理 .....              | 627 |
| 14.4.3 碲冶炼工艺 .....                 | 628 |
| 14.4.4 碲化物金矿石处理工艺实践 .....          | 635 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 15 金的综合回收处理 .....              | 641 |
| 15.1 黄铁矿烧渣的回收利用 .....          | 641 |
| 15.1.1 黄铁矿烧渣的性质及组成 .....       | 641 |
| 15.1.2 烧渣中浸出金的主要影响因素 .....     | 641 |
| 15.1.3 从黄铁矿烧渣提金的工业实例 .....     | 645 |
| 15.1.4 黄铁矿烧渣综合利用现状 .....       | 647 |
| 15.2 氰化尾渣的性质与处理 .....          | 650 |
| 15.2.1 氰化尾渣的性质 .....           | 650 |
| 15.2.2 氰化尾渣的处理现状 .....         | 651 |
| 15.3 其他阳极泥中回收金 .....           | 653 |
| 15.3.1 镍阳极泥 .....              | 653 |
| 15.3.2 磷镍铁电解阳极泥 .....          | 654 |
| 16 电子废弃物中金的回收 .....            | 657 |
| 16.1 电子废弃物中金的资源分布 .....        | 657 |
| 16.2 含金电子废弃物的回收处理流程 .....      | 658 |
| 16.3 含金电子废弃物的火法处理 .....        | 659 |
| 16.3.1 含金电子废弃物的火法处理流程 .....    | 659 |
| 16.3.2 含金电子废弃物火法处理的特点 .....    | 661 |
| 16.4 含金电子废弃物的湿法处理 .....        | 661 |
| 16.4.1 含金电子废弃物的湿法处理流程与方法 ..... | 661 |
| 16.4.2 含金电子废弃物湿法冶金技术应用实例 ..... | 668 |
| 16.4.3 含金电子废弃物的生物湿法处理技术 .....  | 668 |
| 16.5 含金电子废弃物处理新技术 .....        | 668 |
| 16.6 含金电子废弃物火湿法联合生产技术 .....    | 669 |
| 17 其他含金废料中金的回收技术 .....         | 671 |
| 17.1 厚膜涂层产品中金的回收 .....         | 671 |
| 17.2 含金合金废料中金的回收 .....         | 671 |
| 17.3 镀金废件中金的回收 .....           | 671 |
| 17.3.1 火法退镀金 .....             | 672 |
| 17.3.2 化学法退镀金 .....            | 673 |
| 17.3.3 电解法退镀金 .....            | 676 |
| 17.3.4 碘化法 .....               | 676 |
| 17.3.5 碘—碘化钾溶液法退镀金 .....       | 678 |
| 17.3.6 酸碱法退镀金 .....            | 679 |
| 17.3.7 镀金废件回收实例 .....          | 679 |

## 第五篇 黄金冶炼过程污染治理技术

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 18 黄金冶炼过程的污染 .....                      | 681 |
| 18.1 含氰废水及其环境污染 .....                   | 681 |
| 18.2 酸性废水及其环境污染 .....                   | 681 |
| 18.3 重金属及其环境污染 .....                    | 682 |
| 18.4 固体废弃物及其环境污染 .....                  | 682 |
| 18.5 废气及其环境污染 .....                     | 682 |
| 19 废水治理技术 .....                         | 683 |
| 19.1 含氰废水治理技术 .....                     | 683 |
| 19.1.1 氯化法处理含氰废水 .....                  | 684 |
| 19.1.2 空气-SO <sub>2</sub> 法处理含氰废水 ..... | 690 |
| 19.1.3 过氧化氢氧化法 .....                    | 697 |
| 19.1.4 臭氧氧化法 .....                      | 697 |
| 19.1.5 硫酸亚铁法 .....                      | 698 |
| 19.1.6 电解氧化法 .....                      | 698 |
| 19.1.7 酸化回收法 .....                      | 699 |
| 19.1.8 SART 法 + 酸化沉淀法 (半酸化法) .....      | 700 |
| 19.1.9 吸附法 .....                        | 701 |
| 19.1.10 离子交换法 .....                     | 703 |
| 19.1.11 催化氧化法 .....                     | 703 |
| 19.1.12 溶剂萃取法 .....                     | 704 |
| 19.1.13 膜处理法 .....                      | 704 |
| 19.1.14 微生物法 .....                      | 705 |
| 19.1.15 自然降解法 .....                     | 705 |
| 19.1.16 氰化废水全循环工艺 .....                 | 706 |
| 19.2 酸性废水治理技术 .....                     | 707 |
| 19.3 含汞废水处理 .....                       | 709 |
| 19.4 含砷废水处理 .....                       | 711 |
| 19.5 含浮选药剂废水处理 .....                    | 713 |
| 20 烟气治理技术 .....                         | 715 |
| 20.1 烟气治理技术概述 .....                     | 715 |
| 20.2 汞气处理和回收 .....                      | 715 |
| 20.3 砷及粉尘的处理和回收 .....                   | 717 |
| 20.3.1 含砷烟尘的处理与回收 .....                 | 717 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 20.3.2 含砷和汞气的处理与回收 ..... | 718 |
| 20.4 二氧化硫处理 .....        | 718 |
| 20.4.1 二氧化硫气体性质 .....    | 718 |
| 20.4.2 二氧化硫烟气的净化 .....   | 719 |
| 20.4.3 二氧化硫烟气制酸 .....    | 722 |
| 20.5 氮氧化物治理技术 .....      | 722 |
| 21 黄金尾矿利用技术 .....        | 724 |
| 21.1 从尾矿中回收金及有价金属 .....  | 724 |
| 21.2 砂金尾矿综合利用 .....      | 725 |
| 参考文献 .....               | 727 |



# 第一篇 概述

## 1 金的性质及用途

### 1.1 金的基本性质

#### 1.1.1 金的物理性质

金 (Au) 的原子序数为 79, 属于 IB 族, 相对原子质量为 196.967, 原子半径为 0.1442nm, 与银、钌、铑、钐、铕、铈、铉等统称为贵金属。

金的密度为  $19.32\text{g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ), 直径仅为 46mm 的金球, 其重量就有 1kg。这里的密度指的是化学上纯金的密度, 自然界中并不存在这样的纯金。在不同的温度下金的密度也略有差异, 例如  $18^\circ\text{C}$  时为  $19.31\text{g/cm}^3$ ,  $1063^\circ\text{C}$  开始融化时为  $17.3\text{g/cm}^3$ 、凝固状态时为  $18.2\text{g/cm}^3$ 。

金的颜色随所含杂质的变化而改变, 如加入银、铂可使金的颜色变浅, 加入铜时颜色则变深。金的颜色同时也取决于金属块的厚度及其聚集状态, 例如, 金破碎成粉末或碾成金箔时, 其颜色可呈青紫色、红色、紫色乃至深褐色至黑色; 很薄的金箔对着亮光看是发绿色的; 熔化的金也是这种颜色, 而未熔化的金则呈黄绿色; 细粒分散金一般为深红色或暗紫色, 自然金有时会覆盖一层铁的氧化物薄膜, 在这种情况下, 黄金的颜色可能呈褐色、深褐色甚至黑色。

金在所有的金属中延展性最好, 1g 纯金可拉成长达 420m 以上的细丝, 可加工成厚度仅为  $0.23 \times 10^{-3}\text{mm}$  的金箔, 并且这样薄的金箔在显微镜下观察仍然致密。金的拉长极限强度为  $11.95\text{kg/mm}^2$ , 伸长率为 68% ~ 73%。金的横断面面积收缩率为 90% ~ 94%, 在现有的加工条件下可拉长到 3420m 以上。但若金中含有铅、铋、碲、镉、铟、砷、锡等杂质, 其力学性能将明显下降。例如, 金中含有 0.01% 的铅时, 性变脆, 还有 0.05% 的铋时, 甚至可用手搓碎。

金的导电性仅次于银和铜, 电导率为银的 76.7%。金的电阻系数在  $0^\circ\text{C}$  时为  $2.065 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $20^\circ\text{C}$  时为  $2.42 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}$ , 温度越高系数愈大。金的导热性仅次于银, 热导率为银的 74%。在  $25^\circ\text{C}$  时, 金的导热系数为  $315\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。金的熔点为  $1064.43^\circ\text{C}$ , 沸点为  $2808^\circ\text{C}$ , 具有常数为 0.407nm 的面心立方体晶体晶格。纯金的抗压强度为  $10\text{kg/mm}^2$ , 其抗拉强度与预处理的方法有关。