

现代有色金属  
提取冶金技术

丛书

XIANDAI YOUSE JINSHU TIQU YEJIN JISHU CONGSHU

# 稀散金属提取冶金

周令治 陈少纯 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

中国矿业大学  
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES



# 稀散金属提取冶金

周中德 廖少明 编著



地质出版社  
GEOLOGICAL PUBLISHING HOUSE

现代有色金属 / 丛书  
提取冶金技术

# 稀散金属提取冶金

周令治 陈少纯 编著

北 京

冶金工业出版社

2008

## 内 容 提 要

本书以实用为目的,介绍了国内外稀散金属的工业生产工艺和科研成果。全书共分 14 章,主要内容包括镓、铟、锗、铊、硒、碲、铋等 7 种稀散金属的性质、用途、高纯金属的制备以及它们在环境中的作用,其中重点介绍了各种稀散金属的综合回收技术。本书特点是内容全面系统,实用性强。

本书可供从事有色金属科研、生产的工程技术人员参考,也适于高等院校本科生和研究生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

稀散金属提取冶金/周令治, 陈少纯编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2008. 11  
(现代有色金属提取冶金技术丛书)  
ISBN 978-7-5024-4639-0

I. 稀… II. ①周… ②陈… III. 稀散金属—有色  
金属冶金 IV. TF843

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 140981 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4639-0

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 11 月第 1 版; 2008 年 11 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 27 印张; 654 千字; 415 页; 1—3000 册

79.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

## 前 言

1985 年应冶金工业出版社之邀，加上我也想为稀散金属的发展呐喊一声，应命而写出了《稀散金属冶金》，并于 1988 年出版了。由于该书以稀散金属的综合回收技术为重点，内容较为丰富，具有较好的实用性与参考性，所以很快售罄。

19 年过去了，科技的飞速发展，该书的内容有待补充或删改，个别错误需要更正，加上常有人向我索取该书，或向院内同事索取该书个别章节的复印件，因此有人动员我再版该书或重写。1992 年我到期退休后仍参加了稀散金属的一些学术活动，关心与收集着稀散金属有关信息，也觉得最好能完善该书。但是，由于多种缘故而没能动手。后来出版社也向我约稿，我也多次建议由其他学者、专家动笔，而自己只想做点稀散金属信息工作以自娱，闲暇时在电脑上敲敲打打，跟踪与探索着稀散金属的点点滴滴罢了。今因广州有色金属研究院答应冶金工业出版社编写该书，只好否定前我而参与写书了。

今《稀散金属提取冶金》较原《稀散金属冶金》有些新进展，在努力添新、甄伪、纠错、补漏、删冗与扩大信息量的编写过程中，有再做学生之感，每当读着专家、学者及从事稀散金属的人们辛勤耕耘的文章时，为增获新知而喜悦，也为我国稀散金属工业的迅速发展而欢欣与自豪，更情不自禁地向为我国稀散金属工业的发展而作出贡献的人们肃然起敬，期望稀散金属工业再造辉煌。

本书力求点出理论，着眼实用，开拓思路，仍以稀散金属的综合回收技术为重点。本书较《稀散金属冶金》新增了稀散金属再生、稀散金属精炼、环境中稀散金属的行为与稀散金属标准等。我们试图着重对近半个世纪以来国内外稀散金属的工业生产工艺、有成效的科研成就做出尽可能全的总结，其中也涵盖了个人涉足稀散金属几十年实践经验的总结。

本书第12章与第13章由陈少纯编写,其余为周令治编写;大部分插图由周凡整理或重新绘制;部分打字及图表整理由周蓉完成;频繁的电脑维护,得力于邹勇与周凡的支援,他们保障了写书能顺利地进行。

衷心感谢宋玉林、褚乃林、仇振琢、康君笃诸位教授及其他专家的专业咨询、赐教与鼓励;深谢全国历届稀散金属学术会议同行专家的论文给予的丰富给养;谢谢众多人们的帮助与关心,使本书更加充实与倍增光彩。

期望此书能陪伴着从事稀散金属的科研、生产、应用、教学与管理工作中的人们,如能从旁给您一点有益的论点、想法与实用信息的支援,我们就欣慰了。更衷心地期望早见到您的创新在发展与繁荣稀散金属学科与工业中的重大贡献!

原《稀散金属冶金》的若干文献,由于个别原因未列入本书中,读者欲深入研究,可查《稀散金属冶金》文献。

热忱地感谢您的一阅,敬请批评和指正。

周令治  
2007年6月于广州

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>1  分散金属概论</b>       | 1  |
| 1.1  分散金属              | 1  |
| 1.2  国内外 SM 的产销态势      | 2  |
| 1.2.1  世界的 SM 生产量与生产能力 | 2  |
| 1.2.2  世界消耗 SM 的态势与展望  | 5  |
| 1.2.3  历年来国外的 SM 价格    | 11 |
| 1.3  国内外主要 SM 厂家       | 13 |
| 1.4  世界的 SM 储量         | 16 |
| <b>2  分散金属的地球化学与资源</b> | 18 |
| 2.1  SM 的地球化学          | 18 |
| 2.1.1  镓、铟、锗组          | 19 |
| 2.1.2  铊组              | 22 |
| 2.1.3  硒、碲组            | 23 |
| 2.1.4  铍组              | 24 |
| 2.2  SM 的矿产资源          | 25 |
| 2.2.1  含 SM 的主要矿物      | 25 |
| 2.2.2  含 SM 的主要矿床      | 27 |
| 2.3  SM——中国的优势产业       | 44 |
| 2.3.1  中国的 SM 优势       | 44 |
| 2.3.2  中国优势的 SM 矿藏     | 44 |
| 2.3.3  我国新发现的 SM 矿物与矿床 | 45 |
| <b>3  分散金属的用途</b>      | 47 |
| 3.1  当代高新技术的支撑材料       | 47 |
| 3.2  镓的用途              | 50 |
| 3.2.1  电子工业            | 50 |
| 3.2.2  低熔点合金及合金添加剂     | 52 |
| 3.2.3  冷焊剂             | 52 |
| 3.2.4  催化剂             | 52 |
| 3.2.5  仪器工业            | 53 |

---

|               |    |
|---------------|----|
| 3.2.6 医学      | 53 |
| 3.2.7 其他      | 53 |
| 3.3 铟的用途      | 53 |
| 3.3.1 电子及能源工业 | 54 |
| 3.3.2 涂层及防腐合金 | 55 |
| 3.3.3 低熔点合金   | 55 |
| 3.3.4 焊接剂     | 56 |
| 3.3.5 化工      | 57 |
| 3.3.6 其他      | 57 |
| 3.4 铊的用途      | 58 |
| 3.4.1 超导材料    | 58 |
| 3.4.2 医学      | 58 |
| 3.4.3 电子工业    | 58 |
| 3.4.4 玻璃与仪表工业 | 58 |
| 3.4.5 化工      | 59 |
| 3.4.6 其他      | 59 |
| 3.5 锗的用途      | 60 |
| 3.5.1 光学仪器    | 61 |
| 3.5.2 超导体     | 61 |
| 3.5.3 电子工业    | 61 |
| 3.5.4 光纤通讯    | 62 |
| 3.5.5 化工      | 62 |
| 3.5.6 医学      | 63 |
| 3.5.7 其他      | 64 |
| 3.6 硒的用途      | 64 |
| 3.6.1 静电复印    | 65 |
| 3.6.2 电子工业    | 66 |
| 3.6.3 玻璃工业    | 66 |
| 3.6.4 医学与环境   | 66 |
| 3.6.5 化工      | 67 |
| 3.6.6 冶金      | 68 |
| 3.6.7 其他      | 69 |
| 3.7 碲的用途      | 69 |
| 3.7.1 冶金      | 70 |
| 3.7.2 电子工业    | 70 |
| 3.7.3 化工      | 70 |
| 3.7.4 玻璃工业    | 71 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 3.7.5 其他 .....           | 71  |
| 3.8 铈的用途 .....           | 71  |
| 3.8.1 催化剂 .....          | 72  |
| 3.8.2 特殊合金 .....         | 73  |
| 3.8.3 涂层 .....           | 73  |
| 3.8.4 电子工业 .....         | 73  |
| 3.8.5 其他 .....           | 74  |
| 4 稀土金属的物理化学性质 .....      | 75  |
| 4.1 镧及其化合物的物理与化学性质 ..... | 80  |
| 4.1.1 金属镧 .....          | 80  |
| 4.1.2 镧的硫化物 .....        | 82  |
| 4.1.3 镧的氧化物 .....        | 83  |
| 4.1.4 镧的氢氧化物 .....       | 86  |
| 4.1.5 镧的卤化物 .....        | 88  |
| 4.1.6 镧酸盐 .....          | 88  |
| 4.1.7 镧的硫酸盐 .....        | 89  |
| 4.1.8 镧的氢化物 .....        | 91  |
| 4.1.9 镧的氮化物 .....        | 91  |
| 4.1.10 镧的有机化合物 .....     | 91  |
| 4.2 铈及其化合物的物理与化学性质 ..... | 91  |
| 4.2.1 金属铈 .....          | 91  |
| 4.2.2 铈的硫化物 .....        | 93  |
| 4.2.3 铈的氧化物 .....        | 97  |
| 4.2.4 铈的氢氧化物 .....       | 99  |
| 4.2.5 铈的卤化物 .....        | 100 |
| 4.2.6 铈酸盐 .....          | 103 |
| 4.2.7 铈的硫酸盐 .....        | 103 |
| 4.2.8 铈的有机化合物 .....      | 106 |
| 4.3 铈及其化合物的物理与化学性质 ..... | 106 |
| 4.3.1 金属铈 .....          | 106 |
| 4.3.2 铈的硫化物 .....        | 107 |
| 4.3.3 铈的氧化物 .....        | 108 |
| 4.3.4 铈的氢氧化物 .....       | 109 |
| 4.3.5 铈的卤化物 .....        | 110 |
| 4.3.6 铈酸盐 .....          | 112 |
| 4.3.7 铈的硫酸盐 .....        | 112 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 4.3.8 铊的有机化合物 .....        | 113 |
| 4.4 锗及其化合物的物理与化学性质 .....   | 113 |
| 4.4.1 金属锗 .....            | 113 |
| 4.4.2 锗的硫化物 .....          | 115 |
| 4.4.3 锗的氧化物 .....          | 119 |
| 4.4.4 锗的卤化物 .....          | 124 |
| 4.4.5 锗酸与锗酸盐 .....         | 126 |
| 4.4.6 锗的氢化物 .....          | 127 |
| 4.4.7 锗的有机化合物 .....        | 127 |
| 4.5 硒与碲及其化合物的物理与化学性质 ..... | 128 |
| 4.5.1 金属硒与碲 .....          | 128 |
| 4.5.2 硒与碲的硫化物 .....        | 132 |
| 4.5.3 硒与碲的氧化物 .....        | 133 |
| 4.5.4 硒(碲)酸与硒(碲)酸盐 .....   | 136 |
| 4.5.5 硒化物与碲化物 .....        | 139 |
| 4.5.6 硒与碲的卤化物 .....        | 140 |
| 4.5.7 硒与碲的有机化合物 .....      | 141 |
| 4.6 铈及其化合物的物理与化学性质 .....   | 141 |
| 4.6.1 金属铈 .....            | 141 |
| 4.6.2 铈的硫化物 .....          | 142 |
| 4.6.3 铈的氧化物 .....          | 143 |
| 4.6.4 铈酸与铈酸盐 .....         | 146 |
| 4.6.5 铈的卤化物 .....          | 148 |
| 4.6.6 铈的氢化物 .....          | 150 |
| 4.6.7 铈的有机化合物 .....        | 150 |
| 5 稀散金属的选矿 .....            | 151 |
| 5.1 选矿中 SM 的走向 .....       | 151 |
| 5.2 SM 在选矿中的行为 .....       | 151 |
| 5.2.1 镓在选矿中的行为 .....       | 151 |
| 5.2.2 铟在选矿中的行为 .....       | 151 |
| 5.2.3 铊在选矿中的行为 .....       | 151 |
| 5.2.4 锗在选矿中的行为 .....       | 155 |
| 5.2.5 硒与碲在选矿中的行为 .....     | 156 |
| 5.2.6 铈在选矿中的行为 .....       | 158 |
| 6 镓的综合回收技术 .....           | 159 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 6.1 提镓原料 .....               | 159 |
| 6.1.1 铝生产过程中的提镓原料 .....      | 159 |
| 6.1.2 Pb-Zn 生产过程中的提镓原料 ..... | 162 |
| 6.1.3 燃煤发电及炼焦过程中的提镓原料 .....  | 163 |
| 6.1.4 钒钛磁铁矿冶炼过程中的提镓原料 .....  | 163 |
| 6.2 水冶镓 .....                | 163 |
| 6.2.1 P-M 法提镓、铟、锗 .....      | 163 |
| 6.2.2 综合法提镓、铟、锗 .....        | 164 |
| 6.2.3 全萃法提镓、铟、锗 .....        | 168 |
| 6.2.4 高压还原浸出—萃取法提镓和铟 .....   | 171 |
| 6.2.5 合金法提镓、铟、锗 .....        | 173 |
| 6.2.6 Kelex 100 萃镓法 .....    | 179 |
| 6.2.7 萃淋树脂提镓法 .....          | 181 |
| 6.2.8 石灰乳提镓法 .....           | 181 |
| 6.2.9 溶解提镓法 .....            | 183 |
| 6.2.10 碳酸化提镓法 .....          | 184 |
| 6.2.11 汞齐电解镓法 .....          | 186 |
| 6.2.12 直接电解镓法 .....          | 188 |
| 6.2.13 生化法提镓、锗 .....         | 189 |
| 6.2.14 硫酸化焙烧—离子交换提镓法 .....   | 190 |
| 6.2.15 Ga-Al 置换提镓法 .....     | 190 |
| 6.2.16 从铝生产副产物中水冶提镓法 .....   | 191 |
| 6.2.17 液膜法提镓 .....           | 192 |
| 6.3 火冶镓 .....                | 193 |
| 6.3.1 选冶联合法提镓 .....          | 193 |
| 6.3.2 氯化烟化法提镓 .....          | 194 |
| 6.3.3 焙烧—氯化蒸馏分锗提镓法 .....     | 195 |
| 6.3.4 熔炼—萃取提镓法 .....         | 195 |
| 6.3.5 钒钛磁铁矿中镓的回收 .....       | 197 |
| 6.3.6 刚玉中镓的回收 .....          | 197 |
| 7 铟的综合回收技术 .....             | 199 |
| 7.1 提铟原料 .....               | 199 |
| 7.1.1 铅冶炼中提铟原料 .....         | 199 |
| 7.1.2 湿法炼锌中提铟原料 .....        | 199 |
| 7.1.3 火法炼锌中提铟原料 .....        | 199 |
| 7.1.4 铜冶炼中提铟原料 .....         | 200 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 7.1.5 锡冶炼中提铟原料 .....               | 201 |
| 7.1.6 其他提铟原料 .....                 | 202 |
| 7.2 水冶铟 .....                      | 202 |
| 7.2.1 置换铟法 .....                   | 202 |
| 7.2.2 硫酸化提铟法 .....                 | 203 |
| 7.2.3 电解铟法 .....                   | 205 |
| 7.2.4 萃取铟法 .....                   | 207 |
| 7.2.5 离子交换提铟法 .....                | 210 |
| 7.2.6 中和溶解提铟法 .....                | 212 |
| 7.2.7 水冶锌新工艺中铟、锗、镓的回收 .....        | 212 |
| 7.2.8 液膜提铟法 .....                  | 223 |
| 7.2.9 氧压浸出提铟法 .....                | 223 |
| 7.3 火冶铟 .....                      | 223 |
| 7.3.1 氧化造渣提铟法 .....                | 223 |
| 7.3.2 氯化造渣提铟法 .....                | 224 |
| 7.3.3 合金—电解铟法 .....                | 225 |
| 7.3.4 选冶联合提铟法 .....                | 227 |
| 7.3.5 氯化挥铟法 .....                  | 227 |
| 7.3.6 烟化提铟法 .....                  | 228 |
| 7.3.7 真空蒸馏提铟法 .....                | 229 |
| 7.3.8 碱熔—汞齐法提铟 .....               | 230 |
| 8 铊的综合回收技术 .....                   | 231 |
| 8.1 提铊原料 .....                     | 231 |
| 8.1.1 铅冶炼中提铊原料 .....               | 231 |
| 8.1.2 水冶锌中提铊原料 .....               | 231 |
| 8.1.3 火法炼锌中提铊原料 .....              | 231 |
| 8.1.4 铜冶炼中提铊原料 .....               | 232 |
| 8.1.5 处理含铊的黄铁矿、砷矿及锑矿等过程中提铊原料 ..... | 232 |
| 8.2 水冶铊 .....                      | 233 |
| 8.2.1 置换铊法 .....                   | 233 |
| 8.2.2 铬盐沉淀—锌置换提铊法 .....            | 235 |
| 8.2.3 硫酸化—多次沉铊法 .....              | 236 |
| 8.2.4 碱浸—硫化沉铊法 .....               | 237 |
| 8.2.5 氯化沉铊法 .....                  | 239 |
| 8.2.6 酸浸—结晶提铊法 .....               | 240 |
| 8.2.7 酸浸—萃取铊法 .....                | 242 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 8.2.8 离子交换铈法 .....       | 245 |
| 8.2.9 电解铈法 .....         | 246 |
| 8.2.10 液膜提铈法 .....       | 246 |
| 8.3 火冶铈 .....            | 246 |
| 8.3.1 烟化提铈法 .....        | 246 |
| 8.3.2 氯化挥发提铈法 .....      | 246 |
| 8.3.3 真空蒸馏提铈法 .....      | 248 |
| 8.3.4 氧化焙烧提铈法 .....      | 248 |
| 9 锆的综合回收技术 .....         | 249 |
| 9.1 提锆原料 .....           | 249 |
| 9.1.1 锌、铅冶炼中的提锆原料 .....  | 249 |
| 9.1.2 综合利用煤时的提锆原料 .....  | 250 |
| 9.1.3 高炉炼铁时的提锆原料 .....   | 252 |
| 9.2 水冶锆 .....            | 252 |
| 9.2.1 经典氯化蒸馏锆法 .....     | 252 |
| 9.2.2 碱土金属氯化蒸馏锆法 .....   | 253 |
| 9.2.3 溶剂萃取锆法 .....       | 254 |
| 9.2.4 离子交换锆法 .....       | 260 |
| 9.2.5 沉锆法 .....          | 260 |
| 9.2.6 Musto 法提锆、锆 .....  | 263 |
| 9.2.7 氢氟酸溶解提锆法 .....     | 263 |
| 9.2.8 碱浸提锆法 .....        | 264 |
| 9.2.9 生化提锆法 .....        | 267 |
| 9.3 火冶锆 .....            | 267 |
| 9.3.1 优先挥锆法 .....        | 267 |
| 9.3.2 烟化提锆法 .....        | 270 |
| 9.3.3 合金法提锆 .....        | 273 |
| 9.3.4 二次挥锆法 .....        | 274 |
| 9.3.5 一步挥锆法 .....        | 276 |
| 9.3.6 氧化一氯（或硫）化挥锆法 ..... | 276 |
| 9.3.7 高炉炼铁提锆法 .....      | 278 |
| 9.3.8 碱熔炼铅富集锆法 .....     | 280 |
| 9.3.9 中性、还原挥发提锆法 .....   | 280 |
| 9.3.10 真空蒸馏提锆法 .....     | 280 |
| 10 硒与碲的综合回收技术 .....      | 281 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 10.1 提硒、碲原料·····             | 281 |
| 10.1.1 有色金属冶炼的阳极泥及其他副产物····· | 281 |
| 10.1.2 有色冶炼与化工厂的酸泥·····      | 283 |
| 10.2 水冶硒、碲·····              | 285 |
| 10.2.1 硫酸化提硒、碲法·····         | 285 |
| 10.2.2 氧化焙烧—碱浸提硒、碲法·····     | 293 |
| 10.2.3 氧压浸煮提硒、碲法·····        | 294 |
| 10.2.4 碲化铜法提碲·····           | 295 |
| 10.2.5 水溶液氯化提硒、碲法·····       | 296 |
| 10.2.6 碱土金属氯化硒、碲法·····       | 297 |
| 10.2.7 选冶提硒、碲法·····          | 299 |
| 10.2.8 斐济帝国碲化物浸出法·····       | 300 |
| 10.2.9 萃取硒、碲法·····           | 300 |
| 10.2.10 离子交换树脂吸附硒、碲法·····    | 302 |
| 10.2.11 生化法提硒、碲·····         | 303 |
| 10.2.12 硫化提硒、碲法·····         | 303 |
| 10.2.13 液膜法提碲·····           | 304 |
| 10.3 火冶硒、碲·····              | 304 |
| 10.3.1 苏打法提硒、碲·····          | 304 |
| 10.3.2 加钙提硒法·····            | 310 |
| 10.3.3 氯化硒(碲)法·····          | 312 |
| 10.3.4 热滤脱硫—精馏硒法·····        | 312 |
| 10.3.5 加铝富集法从锑矿中回收硒·····     | 314 |
| 10.3.6 真空蒸馏提硒法·····          | 315 |
| 10.3.7 造冰铜提硒法·····           | 315 |
| 10.3.8 灰吹提硒法·····            | 315 |
| 10.3.9 汞灸中硒的回收·····          | 316 |
| 11 铍的综合回收技术·····             | 317 |
| 11.1 提铍原料·····               | 317 |
| 11.2 水冶铍·····                | 317 |
| 11.2.1 氧化挥发—沉淀铍法·····        | 317 |
| 11.2.2 挥发—硫化沉淀铍法·····        | 321 |
| 11.2.3 特效试剂沉淀铍法·····         | 321 |
| 11.2.4 硫酸化—沉淀铍法·····         | 322 |
| 11.2.5 萃取铍法·····             | 322 |
| 11.2.6 离子交换铍法·····           | 328 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 11.2.7 萃淋树脂吸附镱法                | 330        |
| 11.2.8 电渗析提镱法                  | 331        |
| 11.2.9 电解镱法                    | 331        |
| 11.2.10 碱浸—置换镱法                | 333        |
| 11.2.11 高压浸煮提镱法                | 335        |
| 11.2.12 电溶氧化提镱法                | 338        |
| 11.2.13 液膜提镱法                  | 340        |
| 11.3 火冶镱                       | 340        |
| 11.3.1 石灰烧结提镱法                 | 340        |
| 11.3.2 高温氧化挥镱法                 | 342        |
| <b>12 稀散金属再生资源回收技术</b>         | <b>343</b> |
| 12.1 再生镓                       | 343        |
| 12.1.1 GaAs 废料硝酸分解—中和沉淀分离      | 343        |
| 12.1.2 GaAs 废料硝酸分解—硫化沉淀分离      | 344        |
| 12.1.3 GaAs 废料氯化分解—蒸馏分离        | 345        |
| 12.1.4 GaAs 真空热分解回收镓和砷         | 345        |
| 12.1.5 从其他废半导体元器件再生回收镓         | 346        |
| 12.1.6 从半导体晶片生产中的切屑、磨料中回收镓、铟、锗 | 346        |
| 12.2 再生铟                       | 346        |
| 12.2.1 从 ITO 废靶材中再生铟           | 346        |
| 12.2.2 从其他含铟废料中再生铟             | 349        |
| 12.3 再生铊                       | 351        |
| 12.4 再生锗                       | 351        |
| 12.4.1 光纤废料中锗的再生回收             | 351        |
| 12.4.2 从半导体生产及废元器件的废料中再生回收锗    | 352        |
| 12.5 再生硒与碲                     | 353        |
| 12.5.1 加碱氧化熔炼分离碲、铋             | 353        |
| 12.5.2 氯盐氧化浸出分离碲、铋             | 355        |
| 12.6 再生铍                       | 355        |
| 12.6.1 从废铂铍催化剂再生铍              | 355        |
| 12.6.2 从钨铍废料中回收铍               | 357        |
| <b>13 高纯稀散金属的制备</b>            | <b>359</b> |
| 13.1 高纯镓的制备                    | 359        |
| 13.1.1 化学处理                    | 359        |
| 13.1.2 电解精炼                    | 360        |

|        |                                         |     |
|--------|-----------------------------------------|-----|
| 13.1.3 | 真空精炼                                    | 361 |
| 13.1.4 | 结晶提纯                                    | 361 |
| 13.1.5 | 其他提纯方法                                  | 364 |
| 13.2   | 高纯钢的制备                                  | 365 |
| 13.2.1 | 粗钢电解前预除杂精炼                              | 365 |
| 13.2.2 | 电解精炼                                    | 366 |
| 13.2.3 | 真空精炼                                    | 367 |
| 13.2.4 | 结晶法精炼                                   | 368 |
| 13.2.5 | InCl 提纯法                                | 369 |
| 13.2.6 | 其他提纯方法                                  | 372 |
| 13.3   | 高纯铈的制备                                  | 372 |
| 13.4   | 高纯锗的制备                                  | 372 |
| 13.4.1 | GeCl <sub>4</sub> 的制取及初步提纯              | 372 |
| 13.4.2 | GeCl <sub>4</sub> 的提纯                   | 373 |
| 13.4.3 | GeCl <sub>4</sub> 水解制取 GeO <sub>2</sub> | 375 |
| 13.4.4 | GeO <sub>2</sub> 氢还原制取金属锗               | 375 |
| 13.4.5 | 锗的区域熔炼与定向结晶                             | 376 |
| 13.4.6 | 制取高纯锗的其他方法及研究方向                         | 377 |
| 13.4.7 | 光纤级高纯 GeCl <sub>4</sub> 的制备             | 378 |
| 13.5   | 高纯硒的制备                                  | 379 |
| 13.5.1 | 粗硒氧化挥发法                                 | 379 |
| 13.5.2 | 真空蒸馏法                                   | 380 |
| 13.5.3 | 区域熔炼法                                   | 381 |
| 13.5.4 | H <sub>2</sub> Se 热分解法                  | 381 |
| 13.6   | 高纯碲的制备                                  | 382 |
| 13.6.1 | TeO <sub>2</sub> 的除杂                    | 382 |
| 13.6.2 | 碲的电解                                    | 383 |
| 13.6.3 | 碲的真空蒸馏                                  | 384 |
| 13.6.4 | 碲的氢化脱硒                                  | 384 |
| 13.6.5 | 磷酸盐熔炼脱除碲中的铅                             | 385 |
| 13.6.6 | 区域熔炼                                    | 385 |
| 13.7   | 高纯铈的制备                                  | 386 |
| 13.7.1 | 高铈酸铵氢还原法                                | 386 |
| 13.7.2 | 高纯二氧化铈氢还原法                              | 387 |
| 13.7.3 | 氧化铈升华提纯氢还原法                             | 387 |
| 13.7.4 | 铈的卤化物热离解法和化学气相沉积法                       | 387 |
| 13.7.5 | 电子束熔炼和区域熔炼法                             | 387 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>14 环境中的分散金属</b> .....    | 388 |
| 14.1 环境中的 SM .....          | 388 |
| 14.1.1 SM 在环境中的分布 .....     | 388 |
| 14.1.2 SM 在人体中的分布 .....     | 388 |
| 14.1.3 SM 在动植物中的分布 .....    | 390 |
| 14.2 SM 毒性与中毒事件 .....       | 392 |
| 14.2.1 镓中毒.....             | 392 |
| 14.2.2 铟中毒.....             | 392 |
| 14.2.3 铊中毒.....             | 393 |
| 14.2.4 铋中毒.....             | 393 |
| 14.2.5 铷中毒.....             | 393 |
| 14.2.6 铯中毒.....             | 394 |
| 14.2.7 铕中毒.....             | 394 |
| 14.3 环境中 SM 的允许量 .....      | 394 |
| 14.3.1 空气中允许 SM 的质量浓度 ..... | 395 |
| 14.3.2 水中 SM 允许量 .....      | 395 |
| 14.3.3 中国需注视铊.....          | 396 |
| <b>附录 SM 产品标准</b> .....     | 397 |
| <b>参考文献</b> .....           | 403 |