

TAI XILIE CONGSHU

• 钛系列丛书 •

主编 莫畏

# 钛选矿

董天颂 编著



Ti



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

钛系列丛书

---

主编 莫 畏

# 钛 选 矿

董天颂 编著

北 京

冶金工业出版社

2009

## 内 容 简 介

本书是《钛系列丛书》中的一本。本书详细介绍钛资源和钛矿选矿,其中首先介绍钛铁矿和金红石矿的选矿概况,论述了原生矿和海滨砂矿的选矿工艺、国内外有关钛选矿厂的矿石性质和所采用的选矿工艺和部分钛矿的试验研究概况;然后介绍钛选矿所使用的设备,尤其是对近几年研制的新设备及新的浮选药剂进行了分析评估;最后对微细粒钛矿物选矿的新技术进行了介绍。

本书可作为钛厂职工的培训用书,也可供从事钛业的科技人员和管理人员使用,还可供大专院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

钛选矿/董天颂编著. —北京:冶金工业出版社,2009. 11  
(钛系列丛书)

ISBN 978-7-5024-5022-9

I. 钛… II. 董… III. 钛矿床—选矿 IV. TD952.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 164799 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@cnmp. com. cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 李 新 版式设计 张 青 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5022-9

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 11 月第 1 版,2009 年 11 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 9.375 印张; 250 千字; 286 页; 1-2000 册

32.00 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)

## 《钛系列丛书》编委会名单

主 编 莫 畏

编 委 莫 畏 张 翥 谢成木 马济民

谢水生 董天颂 杨绍利 盛继孚

罗远辉 贺金字 刘长河 赵云豪

叶镇焜 邓青元 朱祖芳 王群骄

林乐耘 蔡建明 王武育 唐志今

徐斌海 庞克昌 李四清 闫晓东

董鸿超 张树立 吴享南

本分册主编 董天颂

## 《钛系列丛书》前言

钛是一种新金属,钛及钛合金也是一种性能优异的新材料,它被誉为现代金属。

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性能好、耐热性能优良、无磁等一系列特性,获得了广泛的应用。钛的工业化仅有六十余年历史,但已获得了迅速发展。2008年,全世界钛材年产量已达近13万t。

随着国民经济持续、高速发展,我国对钛的需求量迅速增长。2006年我国海绵钛和钛材的年产量均超过万吨,已进入世界产钛大国的行列,且已形成持续发展的态势。2008年我国海绵钛和钛材年产量分别达到4.96万t和2.77万t,名列世界前茅,成为产钛大国。这是件喜忧参半的事,喜的是我国钛工业已经崛起;忧的是钛业的产能已过剩,会影响产品经济效益。它表明钛业市场风险很大,投资应该谨慎。

与美、日、俄等世界产钛强国相比,我国钛业的技术水平仍有差距。我国要成为世界产钛强国还有相当长的路要走。其中,一件重要的基础性的工作是必须提高我国钛业的科研和生产技术水平。

为此,根据钛业技术的发展要求,我们编撰了《钛系列丛书》。这套丛书共9册,是许多专家智慧的结晶,也是为了总结钛业技术发展情况和提高我国钛业国际竞争力,我们做出的力所能及的贡献。

在编写过程中力求理论与实践相结合,做到既有理论论述,也有工艺实践;以工艺实践为重点,保持适当的理论深度和广度,同时在论述中力求做到避虚务实。

该丛书在编写过程中得到了许多同行专家的大力支持,特别是北京有色金属研究总院及其领导给予了大力支持和赞助,在此一并表示谢意。

该丛书涉及的技术领域很宽,而我们的写作水平有限,丛书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者 莫畏

2009年7月

# 前 言

钛具有独特的物理化学性质,因此在国民经济中占有重要地位,并且随着技术和经济的发展,钛的应用范围越来越广。

中国是钛的资源大国,但钛矿的大规模开发却比较晚,直到20世纪80年代对攀枝花地区的钒钛磁铁矿进行综合利用研究后,才使原生钛铁矿资源得到开发利用,钛精矿的产量才大幅度增长。虽然钛矿业发展很快,但钛的矿物原料供应仍满足不了国民经济对钛需求的增长要求。

本书介绍了有关钛铁矿和金红石矿的选矿概况,分别论述了原生矿和海滨砂矿的选矿工艺,介绍了国内外有关钛选矿厂,特别是攀枝花矿的矿石性质和所采用的选矿工艺,以及部分钛矿的试验研究概况。

本书还介绍了钛选矿所使用的设备以及近几年研制的新设备及新的浮选药剂,并通过基本选矿原理的论述,对这些新设备和新药剂的特性进行评估。

微细粒钛矿物的回收一直是世界级选矿难题,与其他矿物的微细泥选矿一样,微细泥的钛矿选矿也引起了世界各国选矿工作者的重视。尽管这些工作多数还处于实验室研究阶段,但可以使我们拓宽思路,开阔视野。为此本书对微细粒钛矿物的选矿技术发展也进行了介绍,以供参考。

在本书的编写中,梁冬云教授、刘进、张莉莉、李波工

程师给予了大力帮助,在此深表感谢。本书中还参考其他同行的一些研究成果和数据,在此对他们一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中若有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者 董天颂

2009 年 7 月于广州

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                   | 1  |
| 1.1 钛的基本性质和用途 .....          | 1  |
| 1.1.1 钛的性质 .....             | 1  |
| 1.1.2 钛及钛合金的应用 .....         | 2  |
| 1.1.3 钛的化合物及其应用 .....        | 3  |
| 1.2 我国钛矿业的发展 .....           | 4  |
| 2 钛矿物和钛资源 .....              | 6  |
| 2.1 钛矿物 .....                | 6  |
| 2.2 钛资源 .....                | 7  |
| 2.2.1 世界钛资源 .....            | 7  |
| 2.2.2 我国钛资源 .....            | 13 |
| 2.2.3 钛精矿产量、进出口情况及质量标准 ..... | 22 |
| 3 钛的选矿方法、原理、设备及浮选药剂 .....    | 26 |
| 3.1 重选法 .....                | 26 |
| 3.1.1 重选原理 .....             | 26 |
| 3.1.2 主要重选设备及特点 .....        | 31 |
| 3.2 磁选法 .....                | 79 |
| 3.2.1 矿物的磁性 .....            | 79 |
| 3.2.2 磁选过程 .....             | 81 |
| 3.2.3 磁力 .....               | 82 |
| 3.2.4 磁场 .....               | 82 |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 3.2.5 磁选机在选钛上的应用 .....     | 88  |
| 3.3 电选法 .....              | 91  |
| 3.3.1 矿物电性 .....           | 92  |
| 3.3.2 矿物带电方式 .....         | 94  |
| 3.3.3 电选分选过程 .....         | 95  |
| 3.3.4 电选机在选钛上的应用 .....     | 96  |
| 3.4 浮选法 .....              | 100 |
| 3.4.1 浮选原理 .....           | 100 |
| 3.4.2 钛浮选主要浮选药剂及浮选工艺 ..... | 103 |
| 3.4.3 浮选机 .....            | 132 |
| 4 钛铁矿的选矿 .....             | 134 |
| 4.1 钛铁矿砂矿的采矿 .....         | 134 |
| 4.1.1 水力机械化开采法 .....       | 134 |
| 4.1.2 机械开采法 .....          | 134 |
| 4.1.3 采砂船开采法 .....         | 135 |
| 4.2 钛铁矿的选矿工艺 .....         | 139 |
| 4.2.1 钛铁矿原生矿的选矿 .....      | 140 |
| 4.2.2 钛铁矿砂矿的选矿 .....       | 141 |
| 4.3 钛铁矿选矿实例 .....          | 142 |
| 4.3.1 攀枝花选钛厂 .....         | 142 |
| 4.3.2 太和选矿厂 .....          | 159 |
| 4.3.3 双塔山选矿厂 .....         | 164 |
| 4.3.4 黑山铁矿选矿厂 .....        | 171 |
| 4.3.5 广东兴宁霞岚钒钛铁矿 .....     | 179 |
| 4.3.6 海南万宁乌场钛矿 .....       | 183 |
| 4.3.7 海南南港钛矿 .....         | 190 |
| 4.3.8 广西北海选矿厂 .....        | 194 |
| 4.3.9 海南沙老钛矿 .....         | 197 |
| 4.3.10 云南武定钛矿 .....        | 199 |

|          |                                |            |
|----------|--------------------------------|------------|
| 4.3.11   | 芬兰奥坦马基选矿厂 .....                | 202        |
| 4.3.12   | 美国麦金太尔选矿厂 .....                | 205        |
| 4.3.13   | 加拿大索雷尔选矿厂 .....                | 207        |
| 4.3.14   | 挪威泰坦尼亚选矿厂 .....                | 209        |
| 4.3.15   | 澳大利亚联合矿产公司埃巴尔选矿厂 .....         | 212        |
| 4.3.16   | 澳大利亚西澳砂矿公司凯佩尔选矿厂 .....         | 213        |
| 4.3.17   | 澳大利亚西部钛矿公司选矿厂 .....            | 215        |
| 4.3.18   | 印度特拉凡科尔选矿厂 .....               | 217        |
| <b>5</b> | <b>金红石的选矿 .....</b>            | <b>221</b> |
| 5.1      | 金红石砂矿的矿石特性 .....               | 221        |
| 5.2      | 金红石砂矿的选矿工艺 .....               | 224        |
| 5.3      | 金红石脉矿的矿石特性 .....               | 226        |
| 5.4      | 金红石脉矿的选矿工艺 .....               | 227        |
| 5.5      | 金红石矿的选矿实例 .....                | 229        |
| 5.5.1    | 广东东里浅海砂矿 .....                 | 229        |
| 5.5.2    | 湖北枣阳金红石矿 .....                 | 230        |
| 5.5.3    | 山西代县碾子沟金红石矿 .....              | 235        |
| 5.5.4    | 陕西商南金红石矿 .....                 | 236        |
| 5.5.5    | 河南方城金红石矿 .....                 | 238        |
| 5.5.6    | 河南西峡金红石矿 .....                 | 241        |
| 5.5.7    | 四川会东新山金红石矿 .....               | 241        |
| 5.5.8    | 澳大利亚纳勒库帕选矿厂 .....              | 242        |
| 5.5.9    | 澳大利亚昆士兰钛矿公司采选厂 .....           | 242        |
| 5.5.10   | 塞拉利昂金红石公司采选厂 .....             | 245        |
| <b>6</b> | <b>钙钛矿的选矿和高炉渣的综合利用概况 .....</b> | <b>248</b> |
| 6.1      | 钙钛矿性质和资源 .....                 | 248        |
| 6.2      | 钙钛矿的选矿 .....                   | 249        |
| 6.2.1    | 天然钙钛矿的选矿 .....                 | 249        |

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 6.2.2 高炉渣——人造钙钛矿的选矿 .....              | 252 |
| 6.3 钒钛磁铁矿冶炼新工艺的研究 .....                | 259 |
| 7 微细粒钛矿物选矿的新技术 .....                   | 261 |
| 7.1 微细粒钛矿物的常规浮选行为和回收方法 .....           | 261 |
| 7.2 微细粒钛矿物的回收新技术 .....                 | 262 |
| 7.2.1 微细粒钛铁矿自载体浮选 .....                | 262 |
| 7.2.2 微细粒钛铁矿的选择性絮凝和疏水絮凝<br>浮选的研究 ..... | 266 |
| 7.2.3 微细粒钛铁矿选择性球团分选法 .....             | 274 |
| 7.2.4 金红石絮凝新药剂的研究 .....                | 275 |
| 7.2.5 用异相凝结法分离亚微米级的颗粒混合物 .....         | 278 |
| 7.3 国内外钛选矿的新技术及发展动向 .....              | 281 |
| 参考文献 .....                             | 285 |

# 1 绪 论

钛是第二次世界大战后登上世界工业大舞台的优质轻型耐蚀结构材料、新型功能材料和重要的生物工程材料,被誉为仅次于铁、铝的正在崛起的现代金属。它具有储氢、超导、耐热、耐低温、形状记忆、弹性好和高阻等特殊功能,对国防、国民经济建设和社会发展具有极其重要的战略意义。世界各国的发展实践表明,先进的钛工业是综合国力的重要标志。

## 1.1 钛的基本性质和用途

### 1.1.1 钛的性质

钛在元素周期表中的序数为 22,原子核由 22 个质子和 20 ~ 32 个中子组成。钛的最高化学价为四价。

钛的熔点为  $1668^{\circ}\text{C}$ ,比铁的熔点高  $118^{\circ}\text{C}$ ,是轻金属中的高熔点金属。钛的密度为  $4.51\text{ g/cm}^3$ ,仅为铁的 57.4%。纯钛的电阻率和热导率与奥氏体不锈钢大致相当。钛的比容与奥氏体不锈钢相似,但由于密度小,则热容小,容易加热也容易冷却。

纯净的钛是银白色金属,具有银灰光泽。高纯钛具有良好的可塑性,但当有杂质时会变得脆而硬。

在室温时钛不与氯气、稀硫酸、稀盐酸和硝酸作用,但能被氢氟酸、磷酸、熔融碱侵蚀,很容易溶解于 HF 和 HCl 或 HF 和  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的混合溶液中。

钛是一种非常活泼的金属,其平衡电位很低,在介质中的热力学腐蚀倾向大,但实际上钛在许多介质中很稳定,包括在氧化性、中性和弱还原性介质中。这是因为钛和氧的亲合力很大,在空气中或含氧介质中,钛表面生成一层致密的、附着力强、惰性大的氧

化膜,保护钛基本不被腐蚀。该膜即使由于机械磨损也会很快自愈或再生。这表明了钛是具有强烈钝化倾向的金属。在 315℃ 以下钛的氧化膜始终保持这一特性。钛最突出的性能是对海水的抗腐蚀性很强,其抗腐蚀性能甚至比白金还好。

虽然纯钛的强度较低,但钛合金的强度很高,如常用的钛合金 Ti-6Al-4V 的强度达到了一般高强度钢的水平。钛合金的密度小,因此钛合金的比强度高。

钛合金的弹性模量不高,但由于它同时具有弹性模量低和屈服强度高的特征,所以适合用作弹簧材料,在弹性相同的情况下,钛弹簧的质量仅为普通弹簧的 28%,而且耐腐蚀。

钛合金的高温和低温性能优良。在高温下,钛合金仍能保持良好的力学性能,其耐热性远高于铝合金,且工作温度范围较宽,目前新型耐热钛合金的工作温度可达 550 ~ 600℃。在低温下,钛合金的强度反而比在常温时增加,且具有良好的韧性。

钛是无磁性金属,在很强的磁环境中也不会被磁化。

钛具有形状记忆特性,钛镍合金是种很好的形状记忆材料。

钛具有吸氢特性。钛及钛铁合金是很好的储氢储能材料。

钛合金具有超导性能,钛镍合金是很好的低温超导材料。

钛具有低阻尼性,声波和振动在钛中衰减很慢。

### 1.1.2 钛及钛合金的应用

钛及其合金由于具有很多优点,因此被称为“太空金属”、“海洋金属”。又因其在 20 世纪 50 年代初才开始工业化,人们又把它称作“21 世纪金属”、“新金属”。钛及其合金在国民经济各领域,特别是高技术领域已得到越来越广泛的应用。

在世界钛市场上,钛用于军事方面占 16%、商用飞机占 40%、一般工业占 34%、消费品占 10% 左右。自美国“911”事件以来,尽管商用航空市场钛的用量有所下降,但在该领域中钛的用量仍占主导地位。

由于不同国家的工业基础不同,钛在各领域中所占比例也不

同。如美国在航空领域中所用钛占总钛的 50% 以上,而日本在航空领域所用钛仅占 5%,在电厂和热交换器方面所用钛则占 44% 左右。

经过 60 多年全世界各国不断地开拓钛的应用领域,已经在航天航空工业、军事武器工业、海洋工程、舰船、热能工程、化工和石化工业、冶金工业、汽车工业、建筑业、医疗及日常生活业等领域获得了广泛的应用。

而且,钛的许多特殊功能被开发,使钛成为有优异特性的功能材料。常见的钛的功能材料有耐腐蚀材料、形状记忆材料、超导材料、储氢材料等。

目前全世界海绵钛和钛材产量连年持续增长。但是,随着大型飞机订货量等因素不断变化,每年的需要量也随之变化。所以钛也是有风险的金属。

2008 年,全世界年产海绵钛约 17.3 万 t、钛材近 13 万 t。我国已成为世界产钛大国,2008 年我国年产海绵钛 4.96 万 t(产能已达 7.1 万 t)、钛材 2.77 万 t。

### 1.1.3 钛的化合物及其应用

钛的重要化合物有:二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )、四氯化钛( $\text{TiCl}_4$ )、偏钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )。

其中,二氧化钛是最重要的钛化合物,俗称“钛白”。它在油漆、塑料中有广泛的应用,是最好的白色颜料。但它属于化工产品。

四氯化钛是钛和钛白的中间产品,单独的用途很少。

偏钛酸钡是开发的钛化合物新的用途,它是陶瓷制品的重要原料。

在钛业中应用最多的是钛白,它占了约 90% 的钛矿资源;其次是金属钛,约占 5%。因此,钛业中最重要的产品是钛白和钛,其他产品所占钛矿资源很少。

2005 年世界钛白粉产量已达 522 万 t。2007 年我国钛白粉产量已达 100 万 t。

## 1.2 我国钛矿业的发展

我国钛矿业的发展是伴随钛白和钛金属行业的发展而进行的。

海滨砂矿生产从1964年开始建设国营矿山。钛铁矿原生矿的选钛厂是从1959年开始,首先在河北承德双塔山铁矿建成了选钛厂。1980年建成了四川攀枝花选钛厂,年产5万t钛铁矿精矿,主要从选铁尾矿中回收钛铁矿。

1980年以前,我国的钛原料主要从海滨砂矿中取得,每年约生产13万t钛精矿。1980年以后,钛原料的供应已从海滨砂矿转变到原生钛矿。四川攀枝花的选钛厂经过27年的不断扩产和技术攻关,目前的产量可达30万t/a。在此期间,全国其他地区的原生钛矿也相继得到开发和利用。

目前全国约有80多家钛选矿厂,其中除攀枝花选钛厂之外,其他选钛厂多为中、小型选钛厂,这些小选钛厂的技术指标还较低。

经过多年努力,我国的钛选矿技术有了长足的发展,一些高效的采选新设备、新工艺和新的浮选药剂不断出现,并在生产中得到应用。如在海滨砂矿的选矿中,出现了采用干采干运及圆锥选矿机与螺旋选矿机为主体设备的移动式选矿厂;在原生钛铁矿的选矿工艺中成功地应用了湿式高梯度磁选机;多种细粒钛铁矿的有效浮选药剂的问世,使钛的选矿指标有了明显的提高。

我国的原生钛矿包括原生钛铁矿和金红石矿,其存在着矿品位低、粒度细、矿石性质复杂等缺点,因而选矿指标仍然比较低。原生钛铁矿选矿厂的选矿回收率仅有26%~40%,原生金红石矿选矿厂的回收率也只有35%~50%。提高钛选矿技术指标仍然任重而道远,很多技术难题还需要去攻克,如微细泥中的钛铁矿的有效捕收剂的研究和细泥选矿新工艺的研究等都还没有实质性的突破。

我国原生金红石矿的选矿研究才刚刚起步,选矿工艺需要优

化,选矿设备要向有效处理细粒矿方向发展。浮选药剂应具有选择性强、价廉等特点。

可以预料,随着科学和技术的发展以及钛工业的发展,钛的选矿技术一定会取得更大的进步。