

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Ti

中国有色金属丛书

中国有色金属工业协会组织编写

# 钛及难熔金属 真空熔炼

马宏声 编著

Nonferrous Metals



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



# 钛及难熔金属真空熔炼

中国有色金属工业协会组织编写

马宏声 编著

 中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

---

图书在版编目(CIP)数据

钛及难熔金属真空熔炼/马宏声编著. —长沙:中南大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5487-0199-6

I. 钛... II. 马... III. ①钛-真空熔炼②难熔稀有金属-真空熔炼 IV. ①TF823②TF841

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 017169 号

---

钛及难熔金属真空熔炼

马宏声 编著

- 
- ☐责任编辑 田荣璋  
☐责任印制 文桂武  
☐出版发行 中南大学出版社  
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083  
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482  
☐印 装 长沙利君漾印刷厂
- 

- ☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 14 ☐字数 346 千字  
☐版 次 2010 年 12 月第 1 版 ☐2010 年 12 月第 1 次印刷  
☐书 号 ISBN 978-7-5487-0199-6  
☐定 价 49.00 元
- 

图书出现印装问题,请与经销商调换

中国有色金属丛书  
**NMS 编委会**

---

**主任:**

康 义

中国有色金属工业协会

**常务副主任:**

黄伯云

中南大学

**副主任:**

熊维平

中国铝业公司

罗 涛

中国有色矿业集团有限公司

李福利

中国五矿集团公司

李贻煌

江西铜业集团公司

杨志强

金川集团有限公司

韦江宏

铜陵有色金属集团控股有限公司

何仁春

湖南有色金属控股集团有限公司

董 英

云南冶金集团总公司

孙永贵

西部矿业股份有限公司

余德辉

中国电力投资集团公司

屠海令

北京有色金属研究总院

张水鉴

中金岭南有色金属股份有限公司

张学信

信发集团有限公司

宋作文

南山集团有限公司

雷 毅

云南锡业集团有限公司

黄晓平

陕西有色金属控股集团有限公司

王京彬

有色金属矿产地质调查中心

尚福山

中国有色金属工业协会

文献军

中国有色金属工业协会

**委员(以姓氏笔划排序):**

马世光

中国有色金属工业协会加工工业分会

马宝平

中国有色金属工业协会铝业分会

王再云

中铝山东分公司

王吉位

中国有色金属工业协会再生金属分会

王华俊

中国有色金属工业协会

王向东

中国有色金属工业协会钛锆铅分会

王树琪

中条山有色金属集团有限公司

|     |                    |
|-----|--------------------|
| 王海东 | 中南大学出版社            |
| 乐维宁 | 中铝国际沈阳铝镁设计研究院      |
| 许健  | 中冶葫芦岛有色金属集团有限公司    |
| 刘同高 | 厦门钨业集团有限公司         |
| 刘良先 | 中国钨业协会             |
| 刘柏禄 | 赣州有色冶金研究所          |
| 刘继军 | 荏平华信铝业有限公司         |
| 李宁  | 兰州铝业股份有限公司         |
| 李凤轶 | 西南铝业(集团)有限责任公司     |
| 李阳通 | 柳州华锡集团有限责任公司       |
| 李沛兴 | 白银有色金属股份有限公司       |
| 李旺兴 | 中铝郑州研究院            |
| 杨超  | 云南铜业(集团)有限公司       |
| 杨文浩 | 甘肃稀土集团有限责任公司       |
| 杨安国 | 河南豫光金铅集团有限责任公司     |
| 杨龄益 | 锡矿山闪星锡业有限责任公司      |
| 吴跃武 | 洛阳有色金属加工设计研究院      |
| 吴锈钢 | 中国有色金属工业协会镁业分会     |
| 邱冠周 | 中南大学               |
| 冷正旭 | 中铝山西分公司            |
| 汪汉臣 | 宝钛集团有限公司           |
| 宋玉芳 | 江西钨业集团有限公司         |
| 张麟  | 大冶有色金属有限公司         |
| 张创奇 | 宁夏东方有色金属集团有限公司     |
| 张洪国 | 中国有色金属工业协会         |
| 张洪恩 | 河南中孚实业股份有限公司       |
| 张培良 | 山东丛林集团有限公司         |
| 陆志方 | 中国有色工程有限公司         |
| 陈成秀 | 厦门厦顺铝箔有限公司         |
| 武建强 | 中铝广西分公司            |
| 周江  | 东北轻合金有限责任公司        |
| 赵波  | 中国有色金属工业协会         |
| 赵翠青 | 中国有色金属工业协会         |
| 胡长平 | 中国有色金属工业协会         |
| 钟卫佳 | 中铝洛阳铜业有限公司         |
| 钟晓云 | 江西稀有稀土金属钨业集团公司     |
| 段玉贤 | 洛阳栾川钼业集团有限责任公司     |
| 胥力  | 遵义钛厂               |
| 黄河  | 中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司 |
| 黄粮成 | 中铝国际贵阳铝镁设计研究院      |
| 蒋开喜 | 北京矿冶研究总院           |
| 傅少武 | 株洲冶炼集团有限责任公司       |
| 瞿向东 | 中铝广西分公司            |



中国有色金属丛书

CNMS

学术委员会

**主任:**

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

**常务副主任:**

黄伯云 院士 中南大学

**副主任(按姓氏笔划排序):**

|     |    |                |
|-----|----|----------------|
| 于润沧 | 院士 | 中国有色工程有限公司     |
| 古德生 | 院士 | 中南大学           |
| 左铁镞 | 院士 | 北京工业大学         |
| 刘业翔 | 院士 | 中南大学           |
| 孙传尧 | 院士 | 北京矿冶研究院        |
| 李东英 | 院士 | 北京有色金属研究总院     |
| 邱定蕃 | 院士 | 北京矿冶研究院        |
| 何季麟 | 院士 | 宁夏东方有色金属集团有限公司 |
| 何继善 | 院士 | 中南大学           |
| 汪旭光 | 院士 | 北京矿冶研究院        |
| 张文海 | 院士 | 南昌有色冶金设计研究院    |
| 张国成 | 院士 | 北京有色金属研究总院     |
| 陈景  | 院士 | 昆明贵金属研究所       |
| 金展鹏 | 院士 | 中南大学           |
| 周廉  | 院士 | 西北有色金属研究院      |
| 钟掘  | 院士 | 中南大学           |
| 黄培云 | 院士 | 中南大学           |
| 曾苏民 | 院士 | 西南铝加工厂         |
| 戴永年 | 院士 | 昆明理工大学         |

**委员(按姓氏笔划排序):**

|     |                |
|-----|----------------|
| 卜长海 | 厦门厦顺铝箔有限公司     |
| 于家华 | 遵义钛厂           |
| 马保平 | 金堆城钼业集团有限公司    |
| 王辉  | 株洲冶炼集团有限责任公司   |
| 王斌  | 洛阳栾川钼业集团有限责任公司 |

|     |                 |
|-----|-----------------|
| 王林生 | 赣州有色冶金研究所       |
| 尹晓辉 | 西南铝业(集团)有限责任公司  |
| 邓吉牛 | 西部矿业股份有限公司      |
| 吕新宇 | 东北轻合金有限责任公司     |
| 任必军 | 伊川电力集团          |
| 刘江浩 | 江西铜业集团公司        |
| 刘劲波 | 洛阳有色金属加工设计研究院   |
| 刘昌俊 | 中铝山东分公司         |
| 刘侦德 | 中金岭南有色金属股份有限公司  |
| 刘保伟 | 中铝广西分公司         |
| 刘海石 | 山东南山集团有限公司      |
| 刘祥民 | 中铝股份有限公司        |
| 许新强 | 中条山有色金属集团有限公司   |
| 苏家宏 | 柳州华锡集团有限责任公司    |
| 李宏磊 | 中铝洛阳铜业有限公司      |
| 李尚勇 | 金川集团有限公司        |
| 李金鹏 | 中铝国际沈阳铝镁设计研究院   |
| 李桂生 | 江西稀有稀土金属钨业集团公司  |
| 吴连成 | 青铜峡铝业集团有限公司     |
| 沈南山 | 云南铜业(集团)公司      |
| 张一宪 | 湖南有色金属控股集团有限公司  |
| 张占明 | 中铝山西分公司         |
| 张晓国 | 河南豫光金铅集团有限责任公司  |
| 邵武  | 铜陵有色金属(集团)公司    |
| 苗广礼 | 甘肃稀土集团有限责任公司    |
| 周基校 | 江西钨业集团有限公司      |
| 郑莆  | 中铝国际贵阳铝镁设计研究院   |
| 赵庆云 | 中铝郑州研究院         |
| 战凯  | 北京矿冶研究总院        |
| 钟景明 | 宁夏东方有色金属集团有限公司  |
| 俞德庆 | 云南冶金集团总公司       |
| 钱文连 | 厦门钨业集团有限公司      |
| 高顺  | 宝钛集团有限公司        |
| 高文翔 | 云南锡业集团有限责任公司    |
| 郭天立 | 中冶葫芦岛有色金属集团有限公司 |
| 梁学民 | 河南中孚实业股份有限公司    |
| 廖明  | 白银有色金属股份有限公司    |
| 翟保金 | 大冶有色金属有限公司      |
| 熊柏青 | 北京有色金属研究总院      |
| 颜学柏 | 陕西有色金属控股集团有限公司  |
| 戴云俊 | 锡矿山闪星锑业有限责任公司   |
| 黎云  | 中铝贵州分公司         |

# 总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康翔

2009 年 3 月

# 序

---

瞻顾人类历史，人类文明的进展无不与金属材料的使用联系在一起。6000年前人类开始使用青铜器，人类历史就进入了青铜器时代。4000年前人类会使用铁器，而发展到铁器时代。可见金属材料的开发和应用具有划时代的意义。以后随着人类社会进步，越来越多新的金属材料不断地进入人类生活。如锌的应用有500多年的历史，当今被广泛应用的轻巧耐用的铝合金，仅有100年的历史。每种金属材料的应用，都会给人类文明的发展做出重要的贡献。

当今社会是科学技术高度发达，社会财富极为丰富，人类高度文明的新时代。人们日常应用的金属材料有千万种之多，它们有的以钢筋铁骨构建成高楼大厦、公路桥梁；有的身轻如燕飞向蓝天和宇宙；有的深潜海底，遨游五大洋；有的载着我们东来西往；有的在我们身边，随时传递美好的信息。所以说能源、材料和信息科学是当代科技的三大支柱。

钛是金属材料族群中的一支新秀，钛合金具有低密度、高比强度和比模量、高熔点、耐腐蚀、在高温时依然可以维持较高的强度和刚度，并有良好的抗蠕变性和抗氧化能力，是最具有潜力的新一代高温结构材料，广泛地应用于航空、航天、舰船、石油化工、生物工程等领域，因此被誉为“太空金属”和“海洋金属”。难熔金属均属于稀有金属，它们具有高熔点、高密度、高温强度、高硬度和耐酸碱腐蚀以及优秀的核性能等一系列特殊性能，是高温领域中任何其他材料所不能替代的。因此在航空航天、核工业、军事工业及冶金等领域有广泛的用途，都是重要的战略物资。钛和难熔金属的生产、储备及应用在一定程度上可以反映出一个国家的科学技术发展水平和综合国力。

我国钛及难熔金属材料的生产，全国解放以后是从零起步，经过60年的艰苦奋斗，已取得了辉煌的成就。到今天已形成完整的科研生产体系，基本保证了军事国防和科技发展的需求。

钛及难熔金属的共同特点是熔点高，化学活性强，纯度要求高，所以真空熔炼是最合适的生产方法。

虽然早在1905年鲍顿就利用自耗电极和水冷铜坩埚，在低压氩气的保护下熔炼金属钽获得成功，但是真正用于生产还是在20世纪50年代以后，所以真空熔炼还是一种“年轻”的正在发展的生产方法。真空熔炼最早只有真空自耗熔炼、

电子束熔炼和等离子熔炼，近年来由于真空获得技术的进步，以及新技术新工艺对新材料的需求，推动了真空熔炼技术的发展。出现了组合冷坩埚感应熔炼技术，冷坩埚磁悬浮熔炼技术和钛的冷床熔炼技术。这些新技术的出现，又使真空熔炼技术提高到一个新水平。

今后随着国民经济和高新技术的飞跃发展，对于各种金属材料需求量会越来越大，品种会越来越多，钛和难熔金属的生产必将会有更大的发展，真空熔炼技术也必将会得到更加广泛的应用和发展，

《钛及难熔金属真空熔炼》一书，全面系统地介绍了各种真空熔炼方法的工作原理、设备结构、工艺流程及各种生产工艺实例。该书系统全面，内容翔实，简明易懂，可做本专业的工程技术人员、高校学生、熟练技术工人和工程管理人员的参考书，也可作为岗位技术教育的专业教材。

周 廉

# 前 言

---

今年我们迎来了中华人民共和国建国 60 周年，同时也是中国有色金属加工工业发生、发展的 60 年。在这 60 年里中国有色金属加工工业和新中国一起发展壮大。中国的有色金属加工工业，从无到有，从小到大，如今已经发展成为世界上有色金属加工材的生产大国，主要有色金属加工材的产能和产量都位居世界前列，这是让国人骄傲的一件事。众所周知，有色金属材料是国家的重要的战略物资，而有色金属中钛及难熔金属更是航空航天、国防科技不可缺少的重要金属材料，新中国成立以来钛及难熔金属材料的生产同样也得到了飞跃的发展，基本满足了我国军工和航天航空工业的需要。今后随着我国科学技术和工业生产的不断进步，钛及难熔金属的生产必将会有更大的发展。

真空熔炼是真空冶金的一个重要分支，真空熔炼在我国起步较晚但发展很快，它是生产活性金属及难熔金属材料不可缺少的重要工序。由于真空熔炼是在非常压下的一种特殊熔炼方法，所用的设备复杂、工艺操作技术含量高，所以这一环节对材料的品质和性能影响很大，一直是钛及难熔金属生产中的技术关键。近年来真空熔炼的技术发展很快，先进的技术设备不断涌现，工艺方法不断更新。目前我国还没有一部系统完整地阐述真空熔炼的技术图书，根据钛及难熔金属生产发展的需要，作者在近年授课讲稿的基础上编写了此书。本书全面系统地阐述了真空熔炼的技术及其原理，同时，也介绍了近年来出现的新工艺和新方法。供相关专业的学生及工程技术人员学习参考。

本书共分 12 章，第 1 章为真空熔炼的技术基础，主要分为两部分，第一部分是真空的获得，即初步介绍一些真空技术的基础知识；第二部分是介绍一些真空熔炼的物理化学基础理论知识。第 2 章到第 6 章分别介绍了钛及难熔金属常用的各种真空熔炼方法包括真空感应熔炼、真空电弧熔炼、电子束熔炼、等离子熔炼、冷床(冷坩埚)熔炼等的工作原理、设备结构和技术特性。因为真空电弧熔炼目前仍是钛及难熔金属的最重要的生产方法，所以本书把真空电弧熔炼作为重点做了较全面系统的阐述。第 7 章至第 11 章分别介绍了钛和各种难熔金属及其合金的真空熔炼工艺特点和工艺实例。第 12 章介绍了真空熔炼过程中的生产安全与防护。

本书在编写过程中受到中国工程院周廉院士的关注和帮助，西北有色金属研究院张英明博士，北京航空材料研究院郝孟一高工，洛阳有色金属加工设计研究院卫晏华总师提供了一些相关资料。另外东北大学的温景林教授、崔建忠教授、丁桦教授，中国有色金属加工工业协会王碧文副秘书长给予了许多帮助。本书成稿后请孙树滋教授作了全面审阅，特别应指出的是经田荣璋主审后，引起书稿结构性的改变，在此一并感谢。

限于作者水平，书中疏漏和错误之处，请同行专家和读者批评指正。

作 者  
2009 年 8 月

# 目 录



|                       |    |
|-----------------------|----|
| 绪 言                   | 1  |
| 第 1 章 真空熔炼的技术基础       | 3  |
| 1.1 真空的获得             | 3  |
| 1.1.1 概述              | 3  |
| 1.1.2 真空泵             | 3  |
| 1.1.3 真空测量            | 13 |
| 1.1.4 真空系统            | 20 |
| 1.2 真空熔炼的热力学和动力学基础    | 25 |
| 1.2.1 金属氧化的热力学        | 25 |
| 1.2.2 金属氧化的动力学        | 29 |
| 1.2.3 压力对化学反应平衡的影响    | 31 |
| 1.3 脱氧                | 31 |
| 1.3.1 碳脱氧             | 32 |
| 1.3.2 氢脱氧             | 32 |
| 1.3.3 活性金属脱氧          | 33 |
| 1.3.4 金属和非金属成分的挥发脱氧   | 33 |
| 1.4 脱气                | 34 |
| 1.4.1 气体的溶解度          | 34 |
| 1.4.2 压力对气体溶解的影响      | 34 |
| 1.5 化合物的分解            | 35 |
| 1.6 金属的挥发             | 36 |
| 1.6.1 金属挥发的热力学        | 36 |
| 1.6.2 金属挥发的动力学        | 38 |
| 1.7 真空下耐火材料与金属熔体的相互作用 | 40 |
| 第 2 章 真空感应熔炼          | 42 |
| 2.1 概述                | 42 |
| 2.2 感应电炉的工作原理         | 42 |
| 2.2.1 感应加热原理          | 42 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| 2.2.2 交流电效应              | 44        |
| 2.3 真空感应炉                | 47        |
| 2.3.1 真空感应炉的炉体结构         | 47        |
| 2.3.2 真空感应炉的坩埚           | 48        |
| 2.3.3 真空感应炉的真空系统         | 51        |
| 2.3.4 真空感应炉用电源           | 52        |
| 2.4 真空感应水冷铜坩埚凝壳炉熔炼 (ISM) | 54        |
| 2.4.1 真空组合水冷铜坩埚感应凝壳炉的开发  | 54        |
| 2.4.2 组合水冷铜坩埚感应熔炼工作原理    | 55        |
| 2.4.3 组合水冷铜坩埚感应凝壳炉的特点    | 57        |
| 2.4.4 组合水冷铜坩埚感应凝壳炉熔炼     | 58        |
| 2.4.5 冷坩埚感应熔炼的冶金效果       | 60        |
| 2.5 磁悬浮感应熔炼              | 61        |
| 2.5.1 磁悬浮感应熔炼炉的工作原理      | 61        |
| 2.5.2 磁悬浮感应电炉的结构和浇铸方式    | 63        |
| 2.5.3 磁悬浮感应电炉的特点         | 65        |
| <b>第3章 真空电弧熔炼</b>        | <b>67</b> |
| 3.1 概述                   | 67        |
| 3.2 电子发射和气体电离            | 67        |
| 3.3 真空电弧形成与电弧结构          | 68        |
| 3.3.1 阴极区                | 69        |
| 3.3.2 弧柱区                | 69        |
| 3.3.3 阳极区                | 70        |
| 3.4 电弧的特性                | 70        |
| 3.4.1 电弧中的电压降            | 70        |
| 3.4.2 电弧的稳定性             | 72        |
| 3.4.3 电弧的温度场             | 75        |
| 3.5 真空自耗电弧炉              | 75        |
| 3.5.1 炉室                 | 77        |
| 3.5.2 坩埚及其冷却系统           | 77        |
| 3.5.3 电极杆及其传动装置          | 88        |
| 3.5.4 电极传动的自动控制          | 91        |
| 3.5.5 自耗炉电源              | 93        |
| 3.5.6 自耗炉真空系统            | 94        |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 3.5.7 观察装置               | 95         |
| 3.6 真空自耗电极电弧熔炼(VAR)的冶金过程 | 96         |
| 3.6.1 坩埚比                | 98         |
| 3.6.2 真空                 | 100        |
| 3.6.3 漏气率                | 100        |
| 3.6.4 熔炼电压和电流            | 100        |
| 3.6.5 搅拌电流               | 102        |
| 3.7 真空非自耗电极电弧熔炼          | 103        |
| <b>第4章 电子束熔炼</b>         | <b>106</b> |
| 4.1 概述                   | 106        |
| 4.2 电子束炉熔炼的特点            | 106        |
| 4.3 电子束熔炼的基本原理           | 108        |
| 4.3.1 电子束炉工作的基本原理        | 108        |
| 4.3.2 电子束发生器             | 109        |
| 4.3.3 电子束熔炼的净化(提纯)作用     | 112        |
| 4.4 电子束炉                 | 114        |
| 4.5 电子束熔炼工艺参数            | 117        |
| 4.5.1 熔炼功率               | 117        |
| 4.5.2 加速电压与功率密度          | 119        |
| 4.5.3 熔化速度、送料速度和热效率      | 120        |
| 4.6 钎的电子束熔炼              | 121        |
| 4.7 钽、铌的电子束熔炼            | 122        |
| 4.7.1 钽、铌电子束熔炼的冶金反应      | 122        |
| 4.7.2 钽、铌电子束熔炼工艺         | 123        |
| 4.7.3 铸锭组织               | 124        |
| <b>第5章 等离子熔炼</b>         | <b>125</b> |
| 5.1 概述                   | 125        |
| 5.2 等离子枪及工作原理            | 125        |
| 5.3 等离子炉的类型              | 127        |
| 5.3.1 等离子电弧炉(PAF)        | 128        |
| 5.3.2 等离子感应炉(PIF)        | 129        |
| 5.3.3 等离子电弧重熔炉(PAR)      | 130        |
| 5.3.4 等离子电子束熔炼炉(PEB)     | 130        |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>第6章 凝壳熔炼</b>        | <b>133</b> |
| 6.1 概述                 | 133        |
| 6.2 凝壳炉的结构与特点          | 133        |
| 6.3 凝壳炉的坩埚             | 136        |
| 6.3.1 石墨坩埚             | 136        |
| 6.3.2 水冷铜坩埚            | 136        |
| 6.3.3 离心铸造装置           | 138        |
| 6.4 国产凝壳炉工艺参数          | 139        |
| <b>第7章 钛及钛合金真空自耗熔炼</b> | <b>140</b> |
| 7.1 概述                 | 140        |
| 7.2 钛真空自耗熔炼的基本工艺流程     | 142        |
| 7.2.1 炉料准备             | 142        |
| 7.2.3 自耗电极的压制          | 147        |
| 7.2.4 真空自耗熔炼过程         | 153        |
| 7.3 钛合金真空自耗熔炼的冶金效果     | 157        |
| 7.3.1 蒸发净化             | 157        |
| 7.3.2 分解净化             | 158        |
| 7.4 真空自耗熔炼的铸锭组织        | 160        |
| 7.5 钛合金真空自耗熔炼铸锭的冶金缺陷   | 160        |
| 7.5.1 偏析               | 162        |
| 7.5.2 夹杂               | 165        |
| <b>第8章 钛合金的冷床熔炼</b>    | <b>168</b> |
| 8.1 概述                 | 168        |
| 8.2 钛合金冶金缺陷对使用性能的影响    | 168        |
| 8.3 真空自耗熔炼对消除钛合金缺陷的局限性 | 169        |
| 8.4 冷床熔炼的工作原理          | 170        |
| 8.5 电子束冷床炉             | 171        |
| 8.6 等离子冷床炉             | 174        |
| 8.7 冷床熔炼技术的特点          | 177        |
| 8.8 冷床熔炼技术的应用          | 178        |
| <b>第9章 锆、钨合金真空熔炼</b>   | <b>182</b> |
| 9.1 概述                 | 182        |
| 9.2 锆的真空自耗熔炼           | 182        |
| 9.3 钨的电子束熔炼            | 183        |