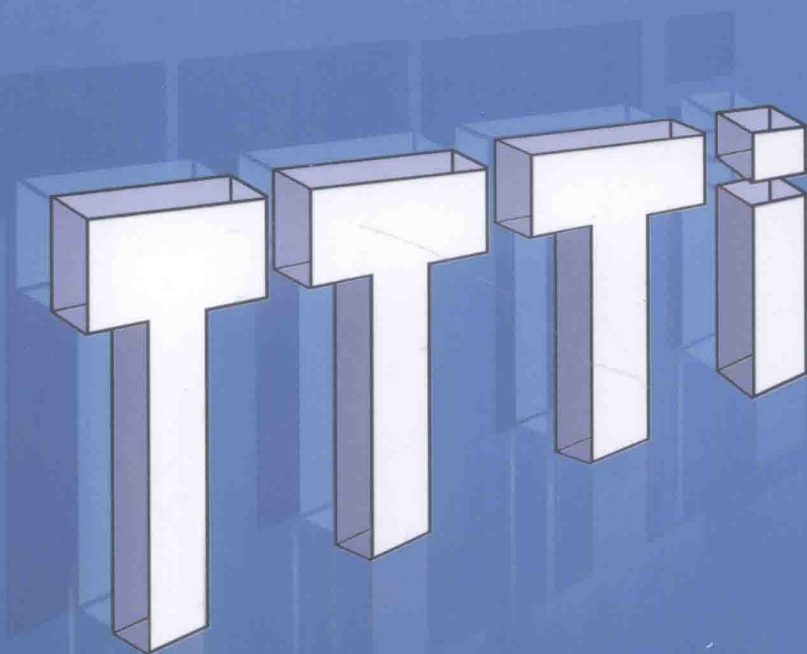


钛基材料制造

Titanium Based Material Manufacture

杨保祥 胡鸿飞 何金勇 张桂芳 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

钛基材料制造

Titanium Based Material Manufacture

杨保祥 胡鸿飞 何金勇 张桂芳 编著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 简 介

本书比较全面、系统、深入地介绍了钛产业发展要素的构成及钛基材料制造的特点,分析阐述了钛资源状况、不同类型资源提钛工艺、不同时期钛提取应用发展、不同地域钛产业发展配置、钛制品的内生演化以及应用延伸要求,其主要内容包括钛基础、钛制品制造、钛制品应用、钛产业发展及钛基材料制造有关的数据等。

本书适用以下人员参考阅读:围绕钛资源、技术装备、产品、环境和市场展开竞争合作的专家学者,钛专业生产厂的专业技术和科技管理人员,钛制品的专业销售推广人员,钛相关行业技术决策咨询机构人员,钛产业相关地区的政府经济规划和科技管理人员,科研院所的教学研究设计人员,有关专业的大专院校师生等。

图书在版编目(CIP)数据

钛基材料制造/杨保祥等编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5024-6803-3

I. ①钛… II. ①杨… III. ①钛基合金—金属材料
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 003310 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 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6803-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版, 2015 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 38.5 印张; 936 千字; 598 页

120.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 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

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

钛产业发展以技术理论突破为引导,高新技术产品为目标,资源—技术—市场—环境互动为动力,体现了技术能力本位建设的重要性。钛产业发展经历了发现、发明、专业认知、技术成熟和市场成熟五个阶段,不同的发展阶段拥有各种差异和不平衡,发现的茫然、发明遭遇的低专业认知、技术成熟和市场成熟的不同步、产业要素互动的不深刻、政治经济军事在钛产业发展中的拦腰式竞争以及全球范围竞争合作领域的变迁使钛产业发展走出了一条不平凡而又充满传奇之路。

钛产品以典型特殊性能著称,应用以国家部门为核心进行有限度的扩散,部分产品技术被设置禁区。随着钛产品制备技术的成熟发展和全球政治经济社会发展一体化进程的加快,钛产品正在从单一形态走向多元化,从独特性能向多功能转化,强化应用功能和性能的产品设计赋予,形成了形状、性能和功能性统一的复合体,逐步提高专业性,精确对接不同领域的产业产品需求。

20 世纪 40 年代钛的工业化制造使钛一跃成为新型结构材料、装饰材料和功能材料的代表,加速了航空航天事业的迅速发展,实现了人类历史发展时空的跨越与转换,改变了科学探索发现的重心,承载并放飞了人类遨游太空的梦想。钛工业在较长一段时间里是由国家军事单位主导的,单一军事用途强化了钛技术发展的国家使命,钛产品技术的军事工业应用使军事对抗的空间和方式发生质的改变,促进了国家间竞争的良性互动,并且使竞争的方式趋于理性,将国家化的竞争进一步引向外空间,增加了技术、经济、军事和社会发展的多元考量。世界经济社会发展和技术进步给钛工业提供了钛产品技术转移的机会,钛产品技术由单一军事用途转变为军民的共同功能开发,钛的军事民用的多用途和多功能应用交织放大了钛合金应用性能的拓展,使钛与卫星、航天、航空、冶金、建筑、化工、电力、电子、海洋、造船、体育、轻工、机械、装

饰和医疗等领域结合，改变了现代人类社会的生活方式和世界经济发展模式。

20 世纪 20 年代的硫酸法钛白和 50 年代的氯化钛白的工业化制造催生了一场颜料革命，实现了无机颜料高纯度和高稳定性的统一，改变了人们对无机颜料的传统性认识，给无机颜料提供了一种具有良好着色力、遮盖力和稳定性优异的高纯度无机颜料化合物选择，呈现给人类一个绚丽多彩的世界。钛白正在改变和改造涂料、油漆、造纸、化纤、油墨、橡胶加工、化工、电子和食品工业的发展，技术进步和经济社会发展促进了钛产业发展的精品化和高附加值化，带动钛矿开发、能源、设备集成和金属加工发展，直接改变了世界经济发展的地理布局。

作者潜心研究钛提取应用技术已近 30 年，一直关心关注钛产业的创新发展，钛是作者科研经历最丰富的领域之一，在攀枝花的工作经历使作者有幸见证了中国钛提取应用产业技术发展的艰辛和成长辉煌。岁月似水，钒钛如歌，20 世纪 60 年代国家重点发展钒钛资源得天独厚的攀枝花。较长时间里国家高度重视，部门高效协调，坚持大矿大开大利用，铁钒钛均衡开发升华资源价值链，全国动员技术配套支持，全产业链发展，集群化创新，产业链互动，成就功能钒钛和精致钢铁。钒钛影响、改变了中国攀枝花，攀枝花影响、改变了世界钒钛经济地理分布，具献特色工程结构材料和功能材料，正在影响世界高新技术的发展进程。

有关钛的文献书籍比较多，有关专家学者从不同角度描述钛，这些书籍我们大多拜读过，受益匪浅。我 1985 年进入攀钢从事钒钛研究，接触了许多与钒钛有关的人和事，经过二十多年的研究、学习和积累，对钛的认识视角不断发生变化，希望通过记录我们从事钒钛研发和产业实践的经验，撰写一本适合钒钛研究和钒钛产业发展的书，权当参考资料，更好地为钒钛产业的产品高端化和高新技术化服务。

何金勇是攀枝花市银江金勇工贸有限责任公司的董事长，我们的合作伙伴，一直致力于钛铁合金生产应用技术的深度研究与示范，生产出金红石型 80TiFe，攀枝花市银江金勇工贸有限责任公司 40TiFe、50TiFe 和 80TiFe 企业标准已上升为国家标准；胡鸿飞是攀枝花钢铁研究院和四川钒钛产业技术研究院

副院长、国家钒钛资源综合利用重点实验室主任，长期从事钒钛产业技术研究开发和科技创新管理，曾经率队攻关，成功解决中国氯化钛白氧化反应器长周期运行问题，受到业界好评；张桂芳博士是昆明理工大学的教授，也是我们的合作伙伴，致力于钒钛磁铁矿冶炼技术的教学研究，基础理论研究造诣较深，提供了大量的模型数据参考，增加了本书的关联性认识。

本书包括4个篇章，第1篇钛基础篇，第2篇钛制造篇，第3篇钛应用篇，第4篇钛产业发展篇，附录给出了与钛制造有关的数据。第1篇按照钛的性质、钛的化合物、钛资源和提钛矿物等进行谋篇布局。第2篇则按照不同矿物、不同工艺和不同类别产品进行重点分析，通过不同原料基础和工艺递进生产优质钛产品。第3篇以钛白、钛金属及其合金产品为重点，突出钛的结构、装饰和功能应用，特别是各类实用钛合金，以钛系合金为重点突出钛的钢铁和有色金属合金的应用特性；以钛系化合物突出功能材料特性。第4篇则展现在一个地区内一个大产业链的集中发展，着眼特色资源的分类利用，把握钛技术与产业的结合基础，展现攀枝花钛产业全方位发展历程，见证中国钛产业的创新发展与壮大。附录主要强调关联性认识。

本书旨在建立产业框架，提供一个全面的专业索引，按照钛产业重点发展要素进行布局，大了解，小认识，深内涵，广覆盖，使研究、产业和学术各取所需。

本书成书过程参考较多资料，部分来自科研报告、期刊和书籍，部分为内部资料，部分则来自网络，也有部分来自老师、同仁的传承。有关钛的研究综述类文章较多，相互引证印证，本书有时通过多层次分析形成印象结论，这里对被引用和参考的文献的作者和献身钛技术研究的同仁表示感谢和敬意。参考文献部分如有疏漏，敬请包涵。由于时间限制以及学术水平有限，部分资料年代跨度较大，外文资料译文有多个版本，印证考据难度较大，特别是初期钛资源的稀缺性和应用领域的敏感性，导致业界出现一些复杂的认识，因此书中难免有疏忽不当之处，敬请读者不吝指正。各位专家教授同仁如对书中观点持不同意见，我们愿意一起探讨。

本书撰写过程凝聚了一批人的创新积累和共识，我们不评价过去学者的观

点，也不讨论其对产业发展的影响，仅用现在的一个视角审视钛基材料制造业的发展。攀枝花钢铁研究院的朱胜友、缪辉俊、王怀斌、牛茂江、杨仰军、陈永、程晓哲、宋国菊、锡淦、赵青娥、周玉昌、弓丽霞、杜剑桥、陈新红、李礼、伍良英、董雅君、王彦华、宁雄显、刘锦燕、周艾然、孙茂、陈祝春、李龙、李军、何安西、穆宏波、潘平、陆平、刘森林、穆天柱、路瑞芳、任亚平、罗志强、王斌、吴键春、马维平、张继东、沈小小、杨小琴、李良、王建鑫、张苏新、黄家旭、李开华、叶恩东和韩可喜等专家从专业角度给予了专业经验借鉴以及保密审查，杜明、郭继科、何翠芬、刘娟、李开华、陈亚非、吴轩、李亮、李庆、李凯茂、肖军、张兴勇、邓斌、赵三超、朱福兴、杨梦西和董艳华等提供了专业的图表；西安建筑科技大学朱军教授，陕西理工学院李雷权教授，荣大公司章荣会教授，攀钢景海都高工，攀枝花学院杨绍利教授，攀枝花市钒钛产业协会彭天柱、张祖光和郑谟，四川钒钛产业技术研究院罗昌轶、张雪峰、罗涛、曾志勇和张茂斌高工，攀枝花市银江金勇工贸有限责任公司蒲芝明、何源、何霞和蒲小丽等，攀枝花市老年科技工作者协会聂仲清、邹京发、苟帮云和何富本高工等也对成书做出了贡献。十分感谢为我们提供资料、论证、论据、校正、制图、审阅以及关心支持的业界朋友们！

本书适合以下人员参考：围绕钛资源、技术装备、产品、环境和市场展开竞争合作的专家学者；钛专业生产厂的专业技术和科技管理人员；钛制品的专业销售推广人员；钛相关行业技术决策咨询机构人员；钛产业相关地区的政府经济规划和科技管理人员；大专院校和科研院所的师生及研究设计人员。

杨保祥

2015年1月于攀枝花

目 录

✧第1篇 钛 基 础✧

1 绪论	1	2.3.3 钛与 HF 和氟化物	13
2 钛及其化合物	6	2.3.4 钛与 HCl 和氯化物	13
2.1 钛	6	2.3.5 钛与硫酸和硫化氢	13
2.1.1 钛的基本性质	6	2.3.6 钛与硝酸和王水	14
2.1.2 钛的同位素	7	2.4 钛的化合物	14
2.2 钛的性能	7	2.4.1 钛的无机化合物	14
2.2.1 纯钛的分类	7	2.4.2 钛的有机化合物	32
2.2.2 钛的强度	7	2.5 钛的生物特性	35
2.2.3 钛的化学活性	7	2.5.1 放电等离子烧结工艺	35
2.2.4 钛的热性能	8	2.5.2 粉末注射成型技术	36
2.2.5 钛的可塑性	8	2.5.3 Ti 合金-生物陶瓷复合 材料的研发	36
2.2.6 钛的低温性能	8	3 钛资源	37
2.2.7 钛的耐蚀性能	8	3.1 钛的地球化学	37
2.2.8 钛的耐热性	8	3.2 钛矿的成矿特点	39
2.2.9 纯钛性能	8	3.3 重要钛矿床	42
2.2.10 重要的含钒钛合金	9	3.3.1 钒钛磁铁矿岩矿床	42
2.2.11 钛合金形成元素	10	3.3.2 钛铁矿砂矿床	47
2.2.12 钛的典型金属间化合物	10	3.3.3 金红石岩矿床	50
2.2.13 钛的不反应元素	11	3.3.4 其他	51
2.2.14 钛的结合杂质及其影响	11	3.4 钛矿物	51
2.2.15 热氢处理	12	3.4.1 钛铁矿	53
2.2.16 工业化制钛方法	12	3.4.2 钛磁铁矿	54
2.2.17 在研制钛方法	12	3.4.3 白钛石	54
2.2.18 可能的制钛途径	12	3.4.4 金红石	54
2.3 钛的化学性质	13	3.4.5 钙钛矿	55
2.3.1 化学反应	13	3.4.6 锐钛矿	55
2.3.2 其他形式的化学反应	13	3.4.7 板钛矿	55

3.5 工业矿物	56	3.6.1 国内资源分布	58
3.6 资源分布	58	3.6.2 国外资源分布	60

✧第2篇 钛 制 造✧

4 钛材料制造技术——

钛精矿	63	4.5.6 电选	98
4.1 钛矿选别基础	63	4.6 选矿药剂	99
4.1.1 粗选	64	4.6.1 黄药	99
4.1.2 重力选矿	64	4.6.2 起泡剂	100
4.1.3 浮选	64	4.6.3 调整剂	100
4.1.4 磁选	65	4.6.4 抑制剂	100
4.1.5 电选	65	4.6.5 活化剂	101
4.2 钛铁矿的矿石性质	66	4.6.6 介质 pH 值调整剂	101
4.2.1 海滨砂矿的矿石性质	66	4.7 钛精矿标准	102
4.2.2 钛铁矿风化壳或残坡积 砂矿的矿石性质	68	4.7.1 中国钛精矿行业标准 YB 4031—91	102
4.2.3 岩矿钛铁矿性质	71	4.7.2 世界各地钛铁矿精矿 的化学组成	103
4.3 钛铁矿选矿	75	4.7.3 钛精矿质量标准 YB/T 4031—2006	103
4.3.1 砂矿钛铁矿选矿	75	4.7.4 上海、株洲电焊条厂 对钛铁精矿质量要求	104
4.3.2 钛原生矿（脉矿）的 选矿	86	5 钛材料制造技术——	
4.3.3 钛铁矿岩矿	86	天然金红石	105
4.4 典型选矿厂	90	5.1 天然金红石	105
4.4.1 中国攀枝花典型选矿厂	90	5.1.1 金红石矿物特征	105
4.4.2 中国承德典型选矿厂	90	5.1.2 天然金红石产品特征	106
4.4.3 美国麦金太尔选矿厂	90	5.2 金红石矿床的分类及其主要 地质特征	106
4.4.4 芬兰奥坦麦基选矿厂	91	5.2.1 变质类矿床	107
4.4.5 俄罗斯卡奇卡纳尔 选矿厂	91	5.2.2 与侵入岩有关的矿床	109
4.4.6 新西兰试验选矿厂	91	5.2.3 沉积类矿床	111
4.5 钛铁矿选矿设备	92	5.2.4 碱性岩风化型矿床	112
4.5.1 筛分分级设备	92	5.3 金红石矿物选矿特性及其 工艺要求	113
4.5.2 洗矿	94	5.3.1 金红石砂矿的选矿特性 及其工艺要求	113
4.5.3 重选	95		
4.5.4 强磁选	96		
4.5.5 浮选	97		

5.3.2 金红石脉矿特点及选矿 工艺选择	115	6.3.6 典型工艺	139
5.5 典型金红石选矿	116	6.4 人造金红石标准 YS/T 299—2010	141
5.5.1 山西代县碾子沟 金红石矿	116	6.4.1 人造金红石 (Artificial rutile) 说明	141
5.5.2 四川会东新山 金红石矿	117	6.4.2 人造金红石	141
5.5.3 湖北枣阳金红石矿	117	7 钛材料制造技术—— 钛渣	144
5.5.4 陕西商南金红石矿	117	7.1 钛渣及其分类	144
5.5.5 江苏等地金红石矿	117	7.1.1 定性分类	144
5.5.6 河南方城金红石矿	118	7.1.2 定位分类	145
5.6 国内外天然金红石矿物 质量及用途	118	7.2 钛渣冶炼技术	146
5.6.1 国内外天然金红石 矿物质量	118	7.2.1 钛渣冶炼技术特征	147
5.6.2 金红石矿产品用途 及特点	119	7.2.2 钛渣冶炼原理	149
6 钛材料制造技术—— 人造富钛原料	120	7.2.3 炉料系统配置要求	150
6.1 人造金红石	120	7.2.4 电控系统要求	153
6.1.1 ILuka 还原锈蚀法	120	7.2.5 挂渣保护	153
6.1.2 盐酸浸出法	123	7.2.6 操作制度	154
6.1.3 硫酸浸出法	124	7.3 钛渣冶炼设备	155
6.1.4 稀盐酸常压流态化 浸出法	126	7.3.1 电炉选择	155
6.1.5 UGS 升级钛渣法	126	7.3.2 电极选择	163
6.1.6 碱处理法	128	7.3.3 耐火材料选择	167
6.1.7 氯化处理	130	7.3.4 原料及配上料系统	169
6.2 中国人造金红石生产实践	130	7.3.5 电炉辅助系统	169
6.2.1 盐酸法人造金红石	130	7.3.6 成品加工系统	170
6.2.2 还原磨选富钛料	132	7.3.7 钛渣冶炼操作制度	170
6.3 主要原料	135	7.4 典型钛渣冶炼技术	171
6.3.1 主要钛原料	135	7.4.1 Rio Tinto 钛铁公司 (QIT) 矩形电炉熔炼 钛渣技术	172
6.3.2 辅助原料	136	7.4.2 乌克兰半密闭圆形电炉 熔炼钛渣技术	175
6.3.3 工业燃料	138	7.4.3 乌克兰输出 25MV·A 圆形半密闭电炉熔炼 技术	175
6.3.4 典型设备配置	139	7.4.4 国内矩形电炉熔炼钛渣 技术	176
6.3.5 重要厂家	139		

7.4.5 南非密闭圆形电炉熔炼 钛渣技术	177	8.1.10 水解	200
7.4.6 小型钛渣电炉冶炼适用 技术参数选择与经济 技术指标	177	8.1.11 钛液的早期水解及影响 钛液稳定性的因素	206
7.5 强化冶炼措施分析	178	8.1.12 过滤洗涤	208
7.5.1 提高极心圆功率密度	178	8.1.13 盐处理	210
7.5.2 提高极心圆面积功率 密度	179	8.1.14 煅烧	217
7.5.3 增大电极电流密度	179	8.1.15 提高钛白白度的措施	218
7.6 钛铁矿预处理冶炼钛渣	180	8.1.16 物料平衡	219
7.6.1 钛精矿球团冶炼高钛渣 试验	180	8.1.17 硫酸法钛白工艺特点	219
7.6.2 攀枝花钛精矿氧化焙烧— 密闭电炉冶炼钛渣 半工业试验	181	8.1.18 钛白包膜	220
7.6.3 攀枝花钛精矿预还原— 密闭电炉冶炼钛渣半工业 试验	181	8.1.19 硫酸法钛白工艺发展 趋势	220
7.6.4 深还原钛渣	182	8.2 钛白原料	221
7.7 钛渣质量	183	8.2.1 钛精矿	221
7.7.1 钛渣标准	183	8.2.2 钛渣	224
7.7.2 钛渣测试	183	8.2.3 硫酸	226
7.8 主要钛精矿原料	186	8.2.4 氢氟酸	227
8 钛材料制造技术—— 硫酸法钛白	187	8.2.5 磷酸	227
8.1 硫酸法生产工艺技术	187	8.2.6 纤维素	228
8.1.1 硫酸法生产工艺技术 原理	187	8.2.7 絮凝剂	228
8.1.2 酸解	189	8.2.8 氢氧化钠	229
8.1.3 酸解节约用酸的方法	194	8.2.9 石灰	229
8.1.4 浸取	195	8.2.10 三氧化二锑	229
8.1.5 钛液的还原	195	8.3 硫酸法钛白主要设备	230
8.1.6 钛液除杂与深度净化	196	8.3.1 主体设备	230
8.1.7 沉清/沉降	199	8.3.2 电器设备	233
8.1.8 绿矾回收	200	8.4 硫酸法钛白的技术参数	233
8.1.9 钛液的浓缩	200	9 钛材料制造技术—— 四氯化钛	238
8.1.10 水解	200	9.1 四氯化钛	238
8.1.11 钛液的早期水解及影响 钛液稳定性的因素	206	9.1.1 四氯化钛性质	238
8.1.12 过滤洗涤	208	9.1.2 安全特性	239
8.1.13 盐处理	210	9.1.3 急救措施	239
8.1.14 煅烧	217	9.2 四氯化钛生产工艺技术 原理	239
8.1.15 提高钛白白度的措施	218	9.2.1 TiO_2 直接氯化	239
8.1.16 物料平衡	219	9.2.2 TiO_2 加碳氯化	240
8.1.17 硫酸法钛白工艺特点	219		
8.1.18 钛白包膜	220		
8.1.19 硫酸法钛白工艺发展 趋势	220		
8.2 钛白原料	221		
8.2.1 钛精矿	221		
8.2.2 钛渣	224		
8.2.3 硫酸	226		
8.2.4 氢氟酸	227		
8.2.5 磷酸	227		
8.2.6 纤维素	228		
8.2.7 絮凝剂	228		
8.2.8 氢氧化钠	229		
8.2.9 石灰	229		
8.2.10 三氧化二锑	229		
8.3 硫酸法钛白主要设备	230		
8.3.1 主体设备	230		
8.3.2 电器设备	233		
8.4 硫酸法钛白的技术参数	233		

9.2.3 氯化理论氯气消耗 计算	243	10.1.3 其他还原方法	304
9.3 粗四氯化钛生产工艺	243	10.2 钛金属工业生产方法	305
9.3.1 配料	245	10.2.1 Na 还原法	306
9.3.2 氯化	245	10.2.2 Mg 还原法	308
9.3.3 精制	245	10.2.3 海绵钛工业发展趋势 ...	312
9.4 粗四氯化钛的精制	246	10.3 海绵钛质量影响因素	313
9.4.1 粗四氯化钛中的杂质 分类和性质	246	10.3.1 加料速度	313
9.4.2 杂质在四氯化钛中的 溶解度	247	10.3.2 温度影响	314
9.4.3 精制的原理和方法	248	10.3.3 压力影响	315
9.4.4 精制工艺流程	253	10.3.4 产品质量控制	315
9.4.5 精制设备	255	10.3.5 工艺过程控制异常	315
9.4.6 技术操作	258	10.4 主要生产原料	315
9.5 典型粗四氯化钛制备流程	260	10.4.1 金属镁	315
9.5.1 沸腾氯化	260	10.4.2 金属钠	317
9.5.2 熔盐氯化	271	10.4.3 氯气	317
9.5.3 多级快速氯化	276	10.5 海绵钛	318
9.5.4 高温碳化—低温氯化	277	10.5.1 GB/T 2524—2002 中 规定的产品化学成分 及硬度	318
9.6 “三废”处理处置	279	10.5.2 日本住友钛公司的 海绵钛质量标准	318
9.6.1 废气处理	280	10.5.3 东邦钛公司海绵钛 成分	319
9.6.2 废渣处理	281	10.5.4 Avisma 海绵钛产品的 化学成分与布氏硬度 ...	319
9.6.3 废水处理	281	10.5.5 Ustkamenogorsk 的海绵钛 化学成分	320
9.6.4 回收处置	282	10.5.6 中国海绵钛国家标准 GB/T 2524—2002	320
9.7 四氯化钛生产原料	283	10.6 遵义钛业公司海绵钛产品 标准	321
9.7.1 主要钛原料	283	10.6.1 粒度	321
9.7.2 石油焦	288	10.6.2 外观	321
9.7.3 氯气	289	10.6.3 包装	322
9.7.4 四氯化钛精制原料	291		
9.8 四氯化钛标准	294		
9.9 四氯化钛非典型应用	295		
9.10 沸腾氯化技术的发展	296		
10 钛材料制造技术—— 海绵钛	299	11 钛材料制造技术—— 氯化法钛白	323
10.1 制钛方法	299	11.1 氯化法生产技术	323
10.1.1 氧化钛还原法	299	11.1.1 液相水解法	323
10.1.2 卤化钛还原法	301		

11.1.2 气相水解法	323	11.9.3 氧气	344
11.1.3 气相氧化法	325	11.9.4 氯化钾	345
11.2 气相氧化反应及热力学		11.9.5 氮气	345
数据	326	11.10 氯化钛白厂的建设规范	
11.2.1 热力学数据	326	及要求	345
11.2.2 TiCl_4 气相反应的			
动力学	327	12 钛材料制造技术——	
11.3 气相氧化主要设备功能	328	钛白后处理	347
11.3.1 四氯化钛预热器	328	12.1 钛白后处理技术发展背景	347
11.3.2 氧气预热器	328	12.1.1 晶格缺陷修补	348
11.3.3 三氯化铝发生器	329	12.1.2 遮盖力提升	348
11.3.4 氧化反应器	331	12.2 包核钛白的生产技术原理	349
11.4 TiCl_4 氧化影响因素	335	12.2.1 物理法生产原理及	
11.4.1 反应温度	335	其缺陷	349
11.4.2 反应时间	335	12.2.2 化学法生产包核钛白	
11.4.3 晶型转化剂的作用	336	的原理	350
11.4.4 晶粒细化剂加入	337	12.2.3 化学物理综合法生产	
11.4.5 对装置的技术要求	337	原理	350
11.5 二氧化钛 (中间半成品)		12.2.4 影响包核钛白质量的	
脱氯	338	因素	351
11.5.1 干法脱氯	338	12.2.5 包覆剂的选择	351
11.5.2 湿法脱氯	339	12.2.6 包覆配方和工艺	352
11.6 氧化尾气的循环使用	340	12.3 包膜钛白产品分类	352
11.7 钛白后处理	341	12.3.1 通用型钛白	352
11.7.1 湿磨	341	12.3.2 高耐候性钛白	352
11.7.2 无机物包膜与干燥	341	12.3.3 颜料体积浓度高的	
11.7.3 有机包膜与气流粉碎	341	涂料钛白	352
11.7.4 产品包装	342	12.4 包膜钛白生产方法概述	352
11.8 主要原料消耗及技术经济		12.4.1 无机包膜	353
指标	342	12.4.2 有机包膜	356
11.8.1 原料掺混 90% TiO_2		12.4.3 影响钛白遮盖力的	
或更高含量	342	因素	357
11.8.2 排出废料	342	12.5 重要钛白包膜产品	358
11.8.3 氯化钛白典型消耗		12.6 提高钛白遮盖力的途径	359
指标	342	12.6.1 钛白粉的遮盖力	359
11.9 氯化钛白原料	343	12.6.2 产生多孔包覆的	
11.9.1 铝粉	343	条件控制	360
11.9.2 甲苯	344	12.6.3 国外相关专利简介	361

12.6.4	典型包膜工艺方法	362	14.4.2	安全稳定性数据	385
12.6.5	珠光云母钛	363	14.5	碳氮化钛应用	385
13	钛材料制造技术——		14.5.1	含钛特殊钢	385
	钛铁	365	14.5.2	磨料用途	386
13.1	铝热法钛铁冶炼工艺	365	14.5.3	陶瓷用途	386
13.1.1	铝热还原原理	365	14.5.4	硬质合金	386
13.1.2	工艺流程	367	14.5.5	高温冶金用途	386
13.1.3	配料计算	368	14.5.6	钛在表面技术中	
13.1.4	配热计算	369		的应用	387
13.1.5	钛铁生产技术经济指标的		15	钛材料制造技术——	
	影响因素	369		纳米钛白	389
13.1.6	铝热法实践	370	15.1	纳米钛白	389
13.1.7	电铝热法实践	371	15.2	纳米钛白制造方法	390
13.2	电硅热法冶炼钛硅铁合金	371	15.2.1	气相法制备纳米	
13.2.1	电硅热法冶炼钛硅铁合金			钛白粉	390
	技术原理	371	15.2.2	液相法制备纳米	
13.2.2	钛硅铁合金实践	371		钛白粉	390
13.3	合成法钛铁冶炼工艺	377	15.2.3	固相法合成纳米	
13.4	铝硅钛合金	377		钛白粉	392
14	钛材料制造技术——		15.2.4	表面改性工艺	393
	碳氮化钛	379	15.3	纳米钛白应用功能特性	393
14.1	碳氮化钛	379	15.3.1	颜料特性	393
14.1.1	制备方法	379	15.3.2	杀菌功能	394
14.1.2	基本技术原理	381	15.3.3	防紫外线功能	395
14.1.3	碳化钛生产工艺	383	15.3.4	光催化功能	395
14.2	碳化钛的应用性质	383	15.3.5	综合作用	397
14.2.1	物性数据	384	15.3.6	防雾及自清洁功能	397
14.2.2	毒理学数据	384	15.3.7	二氧化钛纳米材料	
14.2.3	计算化学数据	384		紫外线吸收特性的	
14.2.4	安全稳定性数据	384		应用	398
14.3	氮化钛应用性质	384	15.3.8	抗菌剂	398
14.3.1	物性数据	384	15.4	化妆品	399
14.3.2	计算化学数据	385	15.5	典型纳米钛白	400
14.3.3	安全稳定性数据	385	16	钛材料制造技术——	
14.4	TiCN 应用性质	385		钛粉末	403
14.4.1	物性数据	385	16.1	钛粉的生产	403

16.1.1	TiCl ₄ 金属热还原法	403
16.1.2	TiO ₂ 金属热还原	404
16.1.3	电解法	404
16.1.4	熔融雾化法	404
16.1.5	机械合金化法	405
16.1.6	氢化脱氢法生产钛粉	405
16.2	钛粉成分和牌号	406

16.2.1	钛粉成分及牌号	406
16.2.2	钛粉对环境的影响	409
16.3	钛粉的应用	409
16.3.1	钛粉在粉末冶金中的 应用	410
16.3.2	钛粉在铝合金生产中 的应用	411

✽第3篇 钛应用✽

17 钛制品应用特性——

钛白制品性质与延伸应用 413

17.1	钛白的物理性能	413
17.2	特殊物理性能	413
17.2.1	相对密度	413
17.2.2	熔点和沸点	414
17.2.3	介电常数	414
17.2.4	电导率	414
17.2.5	硬度	414
17.2.6	吸湿性	414
17.2.7	热稳定性	414
17.2.8	粒度	414
17.3	晶体性质	415
17.4	化学性质	415
17.4.1	特殊化学反应	415
17.4.2	应急处理	416
17.5	光学性质	416
17.5.1	折射率	416
17.5.2	散射力	417
17.5.3	光泽度	418
17.5.4	耐候性	418
17.5.5	光色互变现象	418
17.6	颜料性能	418
17.6.1	遮盖力	418
17.6.2	着色力和消色力	419
17.6.3	白度	419
17.6.4	吸油量	420

17.6.5	分散性	420
17.7	二氧化钛应用	420
17.7.1	涂料工业	421
17.7.2	塑料工业	421
17.7.3	造纸工业	421
17.7.4	油墨用钛白	421
17.7.5	纺织化纤用钛白	421
17.7.6	橡胶用钛白	422
17.7.7	日用化妆用钛白	422
17.7.8	其他用途钛白	422
17.8	钛白标准	422
17.8.1	钛白性能指标	422
17.8.2	二氧化钛颜料的国家标准 GB/T 1706—2006	423
17.8.3	日本工业标准 JIS K1409— 1994 化学纤维用钛白粉 标准	424
17.8.4	搪瓷、陶瓷用钛白粉 的技术指标	424
17.8.5	电焊条钛白粉的技术 指标	425
17.8.6	食品中使用的钛白粉 产品标准	425
17.8.7	电容器用钛白粉的 技术指标	426
17.8.8	显像管用钛白粉的 技术指标	426

18 钛制品应用特性——

钛合金	428
18.1 钛的性质	428
18.2 钛合金的分类	428
18.2.1 高温钛合金	429
18.2.2 高强钛合金	429
18.2.3 中强钛合金	430
18.2.4 低强高塑性钛合金	430
18.2.5 铸造钛合金	430
18.3 钛及其合金的加工应用性能	431
18.3.1 比强度高	431
18.3.2 强度高	431
18.3.3 热强度高	431
18.3.4 抗蚀性好	432
18.3.5 低温性能好	432
18.3.6 弹性模量低	432
18.3.7 导热系数小	432
18.3.8 抗拉强度与其屈服强度接近	432
18.3.9 无磁性、无毒	433
18.3.10 抗阻尼性能强	433
18.3.11 耐热性能好	433
18.3.12 吸气性能	433
18.3.13 化学活性大	433
18.4 钛合金	433
18.4.1 合金化	434
18.4.2 α 钛合金	434
18.4.3 β 钛合金	434
18.4.4 $\alpha + \beta$ 钛合金	434
18.4.5 热处理	436
18.4.6 切削特点	437
18.5 钛合金制品	438
18.5.1 高温钛合金	439
18.5.2 钛铝化合物为基的钛合金	439

18.5.3 高强高韧 β 型钛合金 ...	440
18.5.4 阻燃钛合金	440
18.5.5 医用钛合金	440
18.5.6 钛镍合金	441
18.5.7 超导功能	441
18.5.8 贮氢功能	441
18.6 钛的合金应用	441
18.6.1 钛医疗器械	442
18.6.2 航空航天用钛	442
18.6.3 现代军事工业用钛	443
18.6.4 体育用钛	446
18.6.5 化学工业用钛	447
18.6.6 轻工业用钛	447
18.6.7 日常生活中用钛	447
18.6.8 有色金属工业用钛	448
18.6.9 海洋事业用钛	448
18.6.10 交通运输用钛	449
18.6.11 钛的建筑业应用	449
18.6.12 装饰材料	450

19 钛制品应用特性——

钛系催化剂	451
19.1 烟气脱硝工艺	451
19.1.1 相关化学反应	452
19.1.2 非选择性催化还原工艺	452
19.1.3 选择性催化还原	453
19.1.4 SCR 工艺采用的催化剂	453
19.1.5 催化剂的维护	461
19.2 有机聚合钛催化剂	461
19.2.1 选择性聚合	462
19.2.2 有机合成催化剂选择	462
19.2.3 催化机理	462
19.2.4 茂金属催化剂	463
19.2.5 钛硅分子筛催化剂	464

19.2.6	Ziegler - Natta 催化剂	464	20.6.3	连续热轧法	486
19.3	光催化剂	466	20.6.4	钛钢复合板应用	486
19.3.1	TiO ₂ 的光催化结构		20.6.5	质量问题	486
	基础	466	20.6.6	防治措施	486
19.3.2	光催化机理	467	20.6.7	钛钢复合板标准	487
19.3.3	提高 TiO ₂ 光催化剂				
	活性的途径	468	21	钛制品应用特性——	
19.3.4	TiO ₂ 光催化剂的			钛加工	488
	载体	469	21.1	钛材料加工	488
19.3.5	光催化剂制备	470	21.1.1	塑性加工	488
20	钛制品应用特性——		21.1.2	锻造	488
	钛在钢铁中的应用	471	21.1.3	挤压成型	489
20.1	钢铁产品分类	471	21.1.4	板材、带材、箔材	
20.2	钢中的主要元素及其			轧制	489
	影响	472	21.1.5	管材轧制	490
20.2.1	钢中的主要元素	472	21.1.6	型材轧制	490
20.2.2	合金元素在钢中的		21.1.7	拉伸	490
	作用	472	21.2	熔炼与铸锭	490
20.3	钛在钢铁中的作用机理	475	21.2.1	真空自耗电弧炉	
20.3.1	钛在钢铁中的作用	475		熔炼法	490
20.3.2	Ti(C, N) 控制基体		21.2.2	冷炉床熔炼法	491
	晶粒长大	476	21.2	钛锭锻造	492
20.3.3	TiC 沉淀析出强化	478	21.3	钛铸造	493
20.3.4	固溶钛及应变诱导析出		21.4	粉末冶金	494
	的 TiC 阻止形变奥氏体		21.5	钛板带生产	494
	再结晶	480	21.5.1	轧制	494
20.3.5	TiN 促进晶内铁素体		21.5.2	精整处理	496
	形成	481	21.6	国外钛加工	499
20.3.6	钛固定非金属元素	482	21.6.1	日本	499
20.3.7	钛对钢的韧性的		21.6.2	美国	502
	影响	483	21.6.3	俄罗斯	503
20.4	含钛钢种	484	21.7	中国钛加工	505
20.5	离子注入技术	485	21.7.1	宝钛 - 酒钢 - 太钢	505
20.6	钛钢复合板	485	21.7.2	宝特	506
20.6.1	爆炸复合法	485	21.7.3	湘投金天 - 涟钢	507
20.6.2	厚板轧制法	486	21.7.4	云钛 - 昆钢	507
			21.7.5	攀长钢钛业分公司	508