



国外优秀科技著作出版专项基金资助

钛与钛合金

[德] C. 莱茵斯 M. 皮特尔斯 编
陈振华 等译

Edited by
Christoph Leyens and Manfred Peters

WILEY-VCH

Titanium and Titanium Alloys

Fundamentals and Applications



DGM

Chemical Industry Press



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心



国外优秀科技著作出版专项基金资助

钛与钛合金

[德] C. 莱茵斯 M. 皮特尔斯 编
陈振华 等译



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

钛与钛合金/[德]莱茵斯 (Leyens, C.), [德]
皮特尔斯 (Peters, M.) 编; 陈振华等译. —北京:
化学工业出版社, 2005. 1

书名原文: Titanium and Titanium Alloys

ISBN 7-5025-6408-X

I. 钛… II. ①莱…②皮…③陈… III. ①钛-
铸造②钛合金-铸造 IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 127397 号

Titanium and Titanium Alloys/Edited by C. Leyens and M. Peters

ISBN 3-527-30534-3

Copyright ©2003 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

本书中文简体字版由 Wiley-VCH 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-2888

钛与钛合金

[德] C. 莱茵斯 M. 皮特尔斯 编

陈振华 等译

责任编辑: 丁尚林 陶艳玲

责任校对: 郑捷

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 28 字数 495 千字

2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6408-X/TG·15

定价: 58.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

国外优秀科技著作出版专项基金

FUND FOR FOREIGN BOOKS OF
EXCELLENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY
(FFBEST)

管理委员会名单

名誉主任：成思危 全国人大常委会副委员长
主任委员：谭竹洲 中国石油和化学工业协会会长
副主任委员：李学勇 王心芳 阎三忠 曹湘洪
潘德润 朱静华 王印海 龚七一
俸培宗 魏 然

委 员 (按姓氏笔画顺序排列)：

王子镐	王光建	王行愚	申长雨
冯 霄	冯孝庭	朱家骅	刘振武
杨晋庆	李 彬	李伯耿	李静海
吴剑华	辛华基	汪世宏	欧阳平凯
赵学明	洪定一	徐静安	黄少烈
曹 光	盛连喜	葛 雄	焦 奎
曾宝强	戴猷元		

秘 书 长：魏 然

副 秘 书 长：徐 宇

中国石油天然气集团公司协助出版

前 言

1791 年,受人尊敬的英国矿物学家和化学家 William Gregor 首次发现了钛元素的存在。四年以后,德国柏林化学家 Martin Klaproth 独立地分解出了氧化钛。希腊神话中 Uranos 和 Gaia 的孩子们 Titan 兄弟的故事赋予了 Martin Klaproth 灵感,将其命名为钛 (Titanium, Ti)。Titan 兄弟遭到他们父亲的极端憎恨,被监禁在地壳中, Martin Klaproth 以此来形容提炼钛矿石的困难程度。确实,后人花了一百多年的时间才分解出纯金属钛。早期的钛合金,包括目前使用最广泛的 Ti-6Al-4V 合金,是在 20 世纪 40 年代晚期由美国开发出来的。现在,人们已经开发出了大量的钛合金,从而开辟了轻合金在许多工业领域中得以广泛应用的新局面。

钛及钛合金主要由于其比强度高和抗腐蚀性能优异而表现突出,且密度仅为钢和镍基超合金的一半左右。这些性能是钛及钛合金早期能够成功地应用于航空工业和化学工业中的原因。在其他领域内,例如建筑、化工、医药、能源、深海和近海应用、运动休闲以及交通运输等,钛的应用量也正在逐渐增大。

本书可供研究、开发、生产和设计部门中希望熟悉钛及钛合金的学生、材料科学工作者、工程师和技术人员阅读与参考。本书内容包括冶金背景、力学性能、氧化特性、氧化防护、制备与加工以及各类传统的和新型的应用领域。除了钛及传统钛合金外,本书还深入地介绍了钛铝化合物和钛基复合材料。本书详细叙述了钛及钛合金在航空航天和非航空航天领域中的各种应用。此外,本书每章后附有大量的参考文献以便于读者进一步了解本书所阐述的每一个独立的主题。

C. Leyens, M. Peters
2003 年 6 月于科隆

译者前言

钛及钛合金是极其重要的轻质结构材料，在航空、航天、车辆工程、生物医学工程等领域具有非常重要的应用价值和广阔的应用前景，长期以来一直是材料领域的研究热点。国际上每年都有大量的关于钛材料的研究论文发表，并且各种论文集和技术报告也非常多。

德国航空航天中心 C. Leyens 和 M. Peters 主编的《钛和钛合金》一书是目前国际上有关钛及钛合金研究的最新著作。全书共分为 19 个章节，全面而系统地介绍了目前国际上钛及钛合金的最新研究成果。本书覆盖了钛材料的相关基础理论，基本性能，制备、加工和成形技术，后续处理技术以及在各种工业领域中的应用等方面，并对各方面的科学问题进行了精辟的论述，内容十分丰富。本著作的突出特点是各个章节由来自不同研究机构的专家撰写，学术观点新颖，可读性强。书中附有大量的图表，数据翔实，可供读者参考。此外，每章后附有大量的参考文献，为读者进一步深入探讨提供了很大的便利条件。该书对钛材料的研究具有很强的理论指导意义和很高的实际参考价值。本著作适合于高等院校材料专业的师生以及从事钛材料研制、设计工程化的广大科研工作者和工程技术人员参考。

目前，钛产品已经渗透到了航空航天、军工、车辆工程、生物医学工程和日常生活等各个领域。与国外发达国家相比，我国在钛材料研究方面还有很大的差距，因此有必要加强钛材料的研究。国内曾经出版过一些钛材料方面的书籍（包括译著），但是出版年代较早，内容已经陈旧且不够全面。于是，我们产生了翻译该书的念头，相信本书的出版可以填补这一空白。

本书由湖南大学材料科学与工程学院院长陈振华教授组织翻译并担任审校。参加翻译工作的有陈振华（第 1 章）、严红革（第 4、5、6 章）、陈吉华（第 15、16、17、18 章）、王慧敏（第 2、3、19 章）、全亚杰（第 7、8、9、10、11 章）和袁武华（第 12、13、14 章）。陈吉华博士和李落星教授在本书的校稿过程中也做了大量的工作。

由于本书涉及的内容广泛、新颖，译者水平及时间有限，从而难免存在缺点和不足，敬请广大读者批评指正。

译者

2005 年 1 月

内 容 提 要

本书是目前国际上有关钛与钛合金研究的最新著作。书中全面而系统地介绍了钛与钛合金的最新研究成果。内容覆盖了钛材料的相关基础理论,基本性能,制备、加工和成形技术,后续处理技术以及在各种工业领域中的应用等,并对各方面的科学问题进行了精辟的论述。

本书的突出特点是各个章节由来自不同研究机构的专家撰写。书中附有大量的图表,数据翔实,对钛材料的研究具有很强的理论指导意义和很高的参考价值。可供从事钛材料研制、设计、应用的科研与工程技术人员参考。

目 录

第 1 章 钛及钛合金的组织 and 性能	1
1.1 引言	1
1.2 钛的冶金学	3
1.2.1 晶体结构	3
1.2.2 塑性变形	4
1.2.3 β/α 转变	5
1.2.4 扩散	6
1.3 钛合金的分类	7
1.4 金相试样制备	10
1.5 钛合金的显微组织	11
1.6 钛合金的性能	15
1.7 钛的合金化元素	16
1.8 传统钛合金	17
1.8.1 α 合金	17
1.8.2 近 α 合金	19
1.8.3 $\alpha+\beta$ 合金	19
1.8.4 亚稳态 β 合金	20
1.9 钛合金的织构	20
1.10 钛合金的力学性能	22
1.10.1 强度	23
1.10.2 刚性	25
1.10.3 高温强度	26
1.10.4 损伤容限性和疲劳	28
1.11 参考文献与进一步阅读	30
第 2 章 β 钛合金	32
2.1 引言	32
2.2 冶金和加工工艺	33
2.3 力学性能	36
2.3.1 拉伸性能	36

2.3.2	断裂韧性	40
2.3.3	疲劳 (HCF)	43
2.3.4	疲劳裂纹扩展 (FCP)	46
2.4	应用	48
2.5	参考文献与进一步阅读	49
第3章	有序斜方晶系钛铝化合物：具有高损伤容限性能的金属间化合物	52
3.1	引言	52
3.2	物理冶金：晶体结构、相平衡和合金化学成分	55
3.3	有序斜方晶系钛铝化合物的性能	57
3.3.1	物理性能	57
3.3.2	显微组织	58
3.3.3	力学性能	60
3.4	氧化和环境脆化	69
3.5	结束语	74
3.6	参考文献与进一步阅读	75
第4章	γ 钛铝化合物：合金设计及性能	79
4.1	引言	79
4.2	γ -钛铝化合物的组成	80
4.3	相变及显微组织	83
4.4	变形的微观机制	86
4.4.1	滑移和孪生系统	86
4.4.2	位错增殖	89
4.4.3	孪晶形核	93
4.4.4	滑移阻力和位错可动性	94
4.5	力学性能	99
4.5.1	晶粒细化	100
4.5.2	合金成分的作用	101
4.5.3	添加 Nb 后产生的固溶效应	102
4.5.4	沉淀强化	104
4.5.5	抗蠕变性	107
4.5.6	裂纹扩展和断裂韧性	112
4.5.7	疲劳行为	115
4.6	基本工艺情况	117

4.6.1 铸锭制备	118
4.6.2 铸造	119
4.6.3 热加工过程中的动态再结晶	120
4.6.4 热加工工艺路线研究的进展	123
4.7 结论	128
4.8 致谢	129
4.9 参考文献与进一步阅读	129
第5章 钛合金的疲劳	136
5.1 引言	136
5.2 显微组织的影响	136
5.2.1 商业纯钛, α 合金	137
5.2.2 近 α 和 $\alpha+\beta$ 合金	140
5.2.3 β 合金	145
5.3 晶体学织构对疲劳寿命的影响	150
5.4 平均应力对疲劳寿命的影响	151
5.5 机械表面处理的影响	152
5.6 热加工表面处理的影响	155
5.6.1 α 合金	155
5.6.2 近 α 和 $\alpha+\beta$ 合金	155
5.6.3 β 合金	157
5.7 钛铝化合物	158
5.8 复合材料	159
5.9 小结	161
5.10 参考文献与进一步阅读	161
第6章 钛合金和钛铝化合物的氧化与防护	165
6.1 引言	165
6.2 金属氧化的基础	166
6.2.1 氧化反应热力学	167
6.2.2 氧化动力学	168
6.2.3 合金的氧化	172
6.3 钛合金和钛铝化合物的氧化行为	175
6.3.1 氧化皮的形成	175
6.3.2 合金表面层以下区域中非金属元素的溶解	185

6.4	提高抗氧化性的措施	188
6.4.1	合金元素	188
6.4.2	预氧化	190
6.4.3	涂层	190
6.5	小结和展望	197
6.6	参考文献与进一步阅读	197
第7章	钛及钛合金——从原材料到半成品	205
7.1	引言	205
7.2	海绵钛	205
7.3	从海绵到锭坯	208
7.4	钛、钛合金及特种合金	210
7.5	半成品加工	212
7.6	应用	214
7.7	回收	216
7.8	小结和展望	217
第8章	钛合金的加工	218
8.1	引言	218
8.2	钛合金的机加工	218
8.3	铸造	220
8.4	焊接	222
8.4.1	熔化焊	223
8.4.2	摩擦焊	224
8.4.3	电子束焊	224
8.4.4	激光束焊	224
8.4.5	点焊	225
8.4.6	焊接结构的性能	225
8.5	超塑性成形/扩散连接	227
8.6	粉末冶金	229
8.7	参考文献与进一步阅读	231
第9章	钛的熔模铸造	233
9.1	钛	233
9.2	铸造合金	233

9.3	熔炼系统	234
9.4	造型材料	234
9.5	铸件设计	235
9.6	精加工	235
9.6.1	酸洗 (化学蚀刻)	235
9.6.2	热等静压 (HIP)	236
9.6.3	焊接	236
9.7	铸件实例	236
第 10 章	钛及钛合金的超塑性成形与扩散连接	240
10.1	引言	240
10.2	超塑性	242
10.3	扩散连接	245
10.4	SPF 工艺	246
10.5	SPF 材料研究以确定参数	247
10.6	SPF 加工	249
10.7	SPF 构件实例	249
10.8	SPF 成形压力	250
10.9	SPF/DB 加工	251
10.10	SPF/DB 结构和构件	252
10.11	小结	253
10.12	参考文献与进一步阅读	253
第 11 章	钛的锻造	254
11.1	引言	254
11.2	常规性能和应用	254
11.3	钛合金的热加工	258
11.3.1	锻造坯的加工	258
11.3.2	锻造	259
11.3.3	热处理	260
11.4	工艺设计	261
11.4.1	几何要求	261
11.4.2	锻件和锻造设备	262
11.4.3	锻件的加工参数	262
11.4.4	有限元模拟	264

11.5	工艺优化和应用实例	265
11.6	参考文献与进一步阅读	267
第 12 章	连续纤维增强钛基复合材料：制备、性能和应用	268
12.1	引言	268
12.2	制备工艺	269
12.3	性能	273
12.3.1	强度和刚性	273
12.3.2	蠕变性能	275
12.3.3	疲劳性能	277
12.3.4	TMCs 的各向异性	279
12.3.5	残余热应力	281
12.4	TMCs 的尺寸与设计	285
12.5	材料模型	286
12.6	应用	287
12.7	小结和展望	289
12.8	参考文献与进一步阅读	289
第 13 章	钛合金在航空航天领域中的应用	292
13.1	引言	292
13.2	钛合金在飞机中的应用	293
13.2.1	飞机机架	294
13.2.2	燃气涡轮发动机	297
13.2.3	直升机	302
13.3	太空应用	303
13.4	参考文献与进一步阅读	305
第 14 章	γ(TiAl) 基合金的生产、加工和应用	307
14.1	引言	307
14.2	γ (TiAl) 基合金的成分	308
14.3	通过热处理调整显微组织	311
14.4	γ (TiAl) 基合金的加工	315
14.4.1	铸锭的生产	315
14.4.2	粉末生产和压制	317
14.4.3	热加工	320

14.4.4	锻造	321
14.4.5	一次挤压和多次挤压	324
14.4.6	板材和箔材的轧制	325
14.4.7	超塑性成形	327
14.5	后续加工	330
14.5.1	连接	330
14.5.2	机加工	331
14.6	需求、部件、测试和应用	332
14.6.1	燃气涡轮发动机	332
14.6.2	航空	333
14.6.3	汽车发动机	335
14.7	结束语	337
14.8	参考文献与进一步阅读	338

第 15 章 钛及钛合金在非航空航天领域中的应用 343

15.1	引言	343
15.2	化学工业、加工业和发电工业	343
15.2.1	热交换器和冷凝器	344
15.2.2	容器和仪表制造业	344
15.2.3	尺寸稳定的阳极——提炼冶金	346
15.2.4	石油化工炼油厂	346
15.2.5	烟道气体脱硫	346
15.2.6	蒸汽涡轮机叶片	347
15.2.7	其他应用	348
15.3	在海洋和近海中的应用	348
15.4	汽车工业	350
15.5	建筑业	353
15.6	体育和休闲用品	355
15.6.1	高尔夫球	355
15.6.2	网球拍、棒球拍和台球弹击杆	356
15.6.3	自行车：不仅仅局限于车架	356
15.6.4	潜水呼吸用具	358
15.6.5	探险和出游用品	358
15.6.6	刀具	358
15.6.7	冬季运动用品	359

15.6.8 多种体育用品	359
15.7 医学应用	360
15.8 牙科植入物	363
15.9 首饰和时尚用品	363
15.10 乐器	365
15.11 光学工业	366
15.12 信息技术	366
15.13 安全与防护	366
15.14 参考文献与进一步阅读	368
第 16 章 钛及钛合金的医学应用	369
16.1 引言	369
16.2 各种生物医用金属材料的比较	369
16.2.1 抗蚀性	369
16.2.2 生物相容性	371
16.2.3 生物黏附性(骨骼融合性)	372
16.2.4 力学性能、加工性能和适用性	375
16.3 合适的钛基复合材料实例	376
16.3.1 具有特殊力学性能的钛材料的结构性表面	376
16.3.2 具有特殊生物学性能的 Ti/陶瓷复合材料	380
16.3.3 具有特殊物理性能的 Ti/陶瓷复合材料	383
16.3.4 抗磨损性得到改善的 Ti/陶瓷复合材料	385
16.4 参考文献与进一步阅读	391
第 17 章 钛在牙科领域中的应用	393
17.1 引言	393
17.2 牙科用钛及钛合金的相关临床特性	393
17.2.1 抗蚀性	393
17.2.2 生物相容性	395
17.2.3 物理性能	395
17.3 钛及钛合金在牙科中的应用	397
17.3.1 正牙学	397
17.3.2 修复学	398
17.3.3 植牙学	400
17.4 牙科实验室中钛的加工	401

17.4.1	牙科用钛的熔炼与铸造技术	401
17.4.2	CAD/CAM 技术	402
17.5	小结	402
17.6	参考文献与进一步阅读	403
第 18 章	钛在汽车制造领域中的应用	404
18.1	引言	404
18.2	钛在汽车制造领域中的潜在应用	405
18.2.1	性能	405
18.2.2	潜在的应用	407
18.3	钛制悬架	410
18.4	排气系统	413
18.5	结论	415
18.6	参考文献与进一步阅读	416
第 19 章	钛合金在近海中的应用	417
19.1	引言	417
19.2	材料和对材料的要求	417
19.2.1	在近海中应用的钛材料	417
19.2.2	海水腐蚀	418
19.2.3	在油和气体环境中的腐蚀	418
19.2.4	应力腐蚀开裂 (SCC)	419
19.2.5	电偶腐蚀	419
19.2.6	疲劳	421
19.3	加工	422
19.3.1	焊接	422
19.3.2	冷成形	422
19.3.3	渗氮	424
19.4	应用	424
19.4.1	海水系统	425
19.4.2	热交换器	425
19.4.3	次氯酸盐系统	426
19.4.4	升降管管道	426
19.4.5	升降管楔形应力接头	427
19.4.6	海底系统	427

19.5	货源和成本	427
19.5.1	交货	427
19.5.2	成本	427
19.6	标准	428
19.7	结论	428
19.8	参考文献与进一步阅读	429