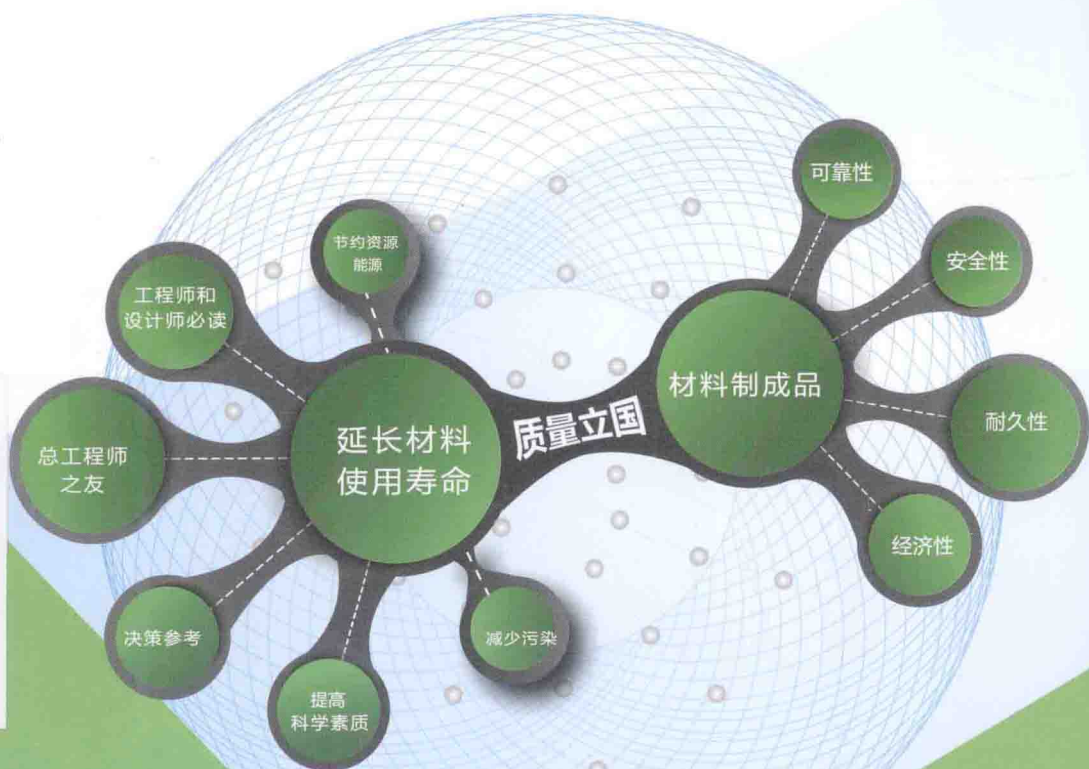




材料延寿与可持续发展

钛合金 选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
林翠 杜楠 编 著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

钛合金 选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
林翠 杜楠 编 著



化学工业出版社

本书是《材料延寿与可持续发展》丛书之一，首次从材料选用和延长使用寿命的角度对钛合金材料进行论述。重点阐述针对提高钛合金制品的抗腐蚀性能、摩擦磨损性能以及疲劳与腐蚀疲劳性能的选材设计、结构设计和表面处理方法，探讨影响钛合金使用寿命的主要因素以及预防和控制措施，总结钛合金的再制造方法和研究现状。

本书可供从事有色金属应用技术开发、工业设备设计和制造的工程技术人员参考，也可供冶金、材料、工业设备等专业的高校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

钛合金选用与设计/林翠, 杜楠编著. —北京: 化学工业出版社, 2014. 7
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-20717-3

I. ①钛… II. ①林…②杜… III. ①钛合金-设计
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 100331 号

责任编辑: 段志兵 王清颢

责任校对: 宋 玮

文字编辑: 颜克俭

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 14½ 字数 272 千字 2014 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干勇 肖纪美

委员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周廉		

《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干勇

主任（总主编）：

李金桂 张启富

副主任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张炼 朱文德 李晓刚

编委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜楠	干勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙辉
陶春虎	王钧	王一建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张津
张炼	张启富	张晓云	赵晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办公室：袁训华 张雪华

《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

丨 总序言 丨

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展。”

这实际上是涉及到我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损磨蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士
中国工程院院士

Handwritten signature in black ink, reading '师昌绪' (Shi Changju).

I 总前言 I

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料寿命”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

“材料延寿与可持续发展”丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”科学、和谐发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士
中国工程院副院长



I 前言 I

钛合金具有优良的综合性能，是一种新型的、很有发展潜力和应用前景的结构材料。近年来，世界钛工业和钛材加工技术得到了飞速发展，海绵钛、变形钛合金和钛合金加工材的生产和消费都达到了很高的水平，在航空航天领域、舰艇及兵器等军品制造中的应用日益广泛，在汽车、化学和能源等行业也有着巨大的应用潜力。尽管钛合金在我国的储量比较丰富，但人们无节制地开采和使用，使这种有色金属材料面临耗竭的危机。

本书从促进钛合金可持续发展的角度出发，全面地介绍钛合金的基本性能和目前的储量、在各领域中的使用量，钛合金在航空航天、船舶、化工、汽车、医疗、体育、生活领域的使用情况以及在这些领域应用时的选材原则，钛合金在各种环境中的腐蚀性能、摩擦磨损性能以及疲劳与腐蚀疲劳性能，提高抗腐蚀性能、摩擦磨损性能以及疲劳与腐蚀疲劳性能的选材设计、结构设计和表面处理方法，探讨影响钛合金使用寿命的主要因素以及预防和控制措施，从而延长钛合金材料的使用寿命，提高材料制成品的可靠性、安全性和耐久性。从目前提倡的“再制造、再循环、再利用”的角度出发，总结了钛合金的再制造方法和研究现状，国内外钛合金废料的产生、分类、利用现状、回收利用方法、制品在各领域的使用年限及再利用情况，并提出我国钛废料回收利用存在的问题以及今后发展我国钛废料回收利用的思路和建议，通过回收利用，尽可能地减少可耗竭资源的消耗。

希望本书能为钛合金材料构件的工程设计师、制造工程师、使用维护、维修和管理工程师提供参考，从而达到提高他们所设计、制造产品的可靠性、安全性和耐久性，达到延长材料使用寿命的目的，为国家有效地节约资源、能源，支持可持续发展。

本书由南昌航空大学林翠、杜楠编写。在本书的编写过程中，中航工业北京航空材料研究院李金桂研究员提供了许多建议和支持，在此深表感谢！

限于时间和资料收集阅读等原因，本书存在一些不妥和疏漏之处在所难免，若读者发现，请及时赐教与指正。

编著者

目录

第1章 钛的性能与钛资源

- 1.1 钛的简介 /001
- 1.2 基本性能 /002
 - 1.2.1 热学性质 /003
 - 1.2.2 电学性质 /004
 - 1.2.3 力学性质 /004
 - 1.2.4 化学性质 /005
- 1.3 钛资源现状 /006
 - 1.3.1 当前钛储量 /006
 - 1.3.2 钛合金在各领域中的使用量 /007
- 参考文献 /010

第2章 钛合金的种类

- 2.1 钛合金牌号及应用领域 /012
- 2.2 航空航天用钛合金 /015
 - 2.2.1 航空工业 /015
 - 2.2.2 航天工业 /025
- 2.3 船舶用钛合金 /028
 - 2.3.1 核潜艇 /029
 - 2.3.2 深潜器 /030
 - 2.3.3 舰船动力装置 /030
 - 2.3.4 民用船舶 /031
 - 2.3.5 船舶工业中钛合金的选择 /031
- 2.4 化工用钛合金 /033
 - 2.4.1 基本化工 /034
 - 2.4.2 石油炼制 /037
 - 2.4.3 石油化工 /038
 - 2.4.4 化学工业中钛合金的选择 /039
- 2.5 汽车用钛合金 /039
 - 2.5.1 发动机 /041
 - 2.5.2 排气管及消音器 /042
 - 2.5.3 阀门座圈 /042
 - 2.5.4 弹簧 /043

- 2.5.5 制动装置 /044
- 2.5.6 汽车工业中钛合金的选择 /044
- 2.6 医疗领域用钛合金 /044
 - 2.6.1 人体植入物 /045
 - 2.6.2 手术器械 /046
 - 2.6.3 医疗领域中钛合金的选择 /047
- 2.7 体育领域用钛合金 /047
- 2.8 生活用品钛合金 /050
- 2.9 形状记忆钛合金 /052
- 参考文献 /055

第3章 钛合金的环境适应性及选用设计

- 3.1 钛合金构件在使用环境中的耐腐蚀性能 /058
 - 3.1.1 大气环境 /058
 - 3.1.2 海水环境 /058
 - 3.1.3 工业环境 /060
 - 3.1.4 高温环境 /076
 - 3.1.5 人体环境 /077
- 3.2 在各种腐蚀环境中的选材 /079
- 3.3 在各种腐蚀环境中钛合金构件的结构设计 /084
 - 3.3.1 点蚀 /085
 - 3.3.2 缝隙腐蚀 /086
 - 3.3.3 电偶腐蚀 /088
- 3.4 钛合金耐蚀性表面处理 /090
 - 3.4.1 热氧化 /090
 - 3.4.2 贵金属镀层 /090
- 3.5 钛合金表面生物活性涂层 /091
 - 3.5.1 单一羟基磷灰石涂层 /091
 - 3.5.2 复合涂层 /091
 - 3.5.3 梯度涂层 /092
 - 3.5.4 纳米涂层 /093
- 参考文献 /094

第4章 钛合金的耐磨性及选用设计

- 4.1 钛合金的摩擦磨损性能 /097
- 4.2 钛合金耐磨性的提高 /097
 - 4.2.1 渗镀 /098
 - 4.2.2 阳极氧化 /104

- 4.2.3 微弧氧化 /107
- 4.2.4 激光熔覆 /110
- 4.2.5 激光表面合金化 /119
- 4.2.6 离子注入 /120
- 4.2.7 电镀和化学镀 /122

参考文献 /129

第5章 钛合金的疲劳性能及选用设计

- 5.1 钛合金的氢脆 /138
 - 5.1.1 吸氢的途径和氢化物的形成 /138
 - 5.1.2 氢脆的影响因素 /139
- 5.2 钛合金的断裂韧性 /143
 - 5.2.1 显微组织的影响 /144
 - 5.2.2 合金成分的影响 /144
 - 5.2.3 热处理的影响 /144
- 5.3 钛合金的疲劳性能 /145
 - 5.3.1 显微组织对高周疲劳 (HCF) 强度的影响 /145
 - 5.3.2 晶体学织构对高周疲劳 (HCF) 强度的影响 /149
 - 5.3.3 平均应力对高周疲劳 (HCF) 强度的影响 /150
 - 5.3.4 表面强化对高周疲劳 (HCF) 强度的影响 /150
 - 5.3.5 再结晶对高周疲劳 (HCF) 强度的影响 /151
 - 5.3.6 钛合金在人体环境中的腐蚀疲劳 /154
- 5.4 钛合金氢脆的防止 /155
- 5.5 钛合金构件抗疲劳结构设计 /157
 - 5.5.1 钛合金构件抗疲劳选材 /158
 - 5.5.2 钛合金构件抗疲劳设计 /158

参考文献 /159

第6章 钛合金的再制造工程

- 6.1 再制造表面工程技术 /165
 - 6.1.1 纳米复合电刷镀 /165
 - 6.1.2 微/纳米等离子喷涂 /169
- 6.2 激光再制造技术 /172
 - 6.2.1 激光熔覆 /172
 - 6.2.2 激光快速成形修复 /177
- 6.3 自修复技术 /180
 - 6.3.1 微/纳米摩擦损伤自修复 /180
 - 6.3.2 矿物微粉摩擦磨损修复 /181

参考文献 /182

第7章 钛合金的循环利用

- 7.1 国外废钛的利用 /186
 - 7.1.1 废钛的产生 /187
 - 7.1.2 废钛的分类 /188
 - 7.1.3 利用现状 /188
 - 7.1.4 钛制品在各领域的使用年限及再利用情况 /189
 - 7.2 国外废钛利用技术 /190
 - 7.2.1 真空自耗电弧熔炼法 /190
 - 7.2.2 真空非自耗电弧熔炼法 /191
 - 7.2.3 真空等离子束熔炼法 /192
 - 7.2.4 电子束熔炼法 /193
 - 7.2.5 粉末冶金法 /194
 - 7.2.6 感应熔炼法 /194
 - 7.2.7 提取冶金法 /194
 - 7.3 再生钛合金的生产和应用 /195
 - 7.4 中国钛废料的利用 /197
 - 7.4.1 钛废料的利用现状 /197
 - 7.4.2 块状钛废料的回收处理 /198
 - 7.4.3 屑状钛废料的处理 /204
 - 7.4.4 中国钛废料回收利用存在的问题与建议 /206
- 参考文献 /207
- 索引 /210

第1章

钛的性能与钛资源

1.1 钛的简介

钛在地球上储量丰富，其特性包括密度低、比强度高、耐腐蚀、耐热、工作温度范围较宽、储氢、超导、高阻尼、形状记忆和超弹等，目前已成为结构材料、新型功能材料和重要生物材料的首选^[1~3]。

(1) 比强度高

钛合金的比强度（强度/密度）远大于其他金属结构材料，可制造出单位强度高、刚性好、质轻的零部件。

(2) 热强度高

使用温度比铝合金高几百度，钛合金在 150~500℃ 范围内仍有很高的比强度，而铝合金在 150℃ 时，比强度明显下降，所以钛合金的工作温度可达 500℃，而铝合金则在 200℃ 以下。

(3) 抗蚀性好

由于钛表面会自动形成一层稳定性好、结合力强的氧化膜，因此钛合金在碱溶液、大多数有机酸溶液、无机盐溶液和氧化性介质中有很好的耐蚀性。

(4) 低温性能好

钛合金在低温和超低温下，仍能保持其力学性能。因此，钛合金也是一种重要的低温结构材料。

(5) 特殊功能

钛与铌、镍、铁能形成具有突出物理功能与生物机能的材料，如铌钛系超导合金、钛镍系形状记忆合金以及钛铁系储氢合金。

1789 年英国化学家和矿物爱好者格雷戈尔（William Gregor）在黑磁铁矿砂中发现了钛元素。1795 年德国化学家克拉普鲁斯（Martin Heinrich Klaproth）在金红石矿物中也发现了该物质，并以古希腊的泰坦神（Titans）给其命名为 Titanium。在自然界中，钛主要以二氧化钛和钛酸盐形态的矿物存在，因此 18 世纪末期到 19 世纪初期，各国科学者尝试采用不同方法从矿物中提取钛，但直到 1910 年美国亨特才在实验室中用钠还原法制得了高温下可变形的含氧量低的

钛，它已发展成为目前工业上制取钛的一种方法，1940年克劳尔用镁还原四氯化钛制备出纯钛，为今后工业化生产提供了可能。20世纪50年代，钛的生产开始走向工业化，并由于钛的一些重要特性使其逐渐引起了世界各国的关心，为航空、航天、航海及近代生产技术带来了新面貌。

钛合金是以钛为基体加入铝、锡、钼、锰等合金元素组成的合金。第一个实用钛合金是1954年美国研制成功的Ti-6Al-4V合金，由于它的耐热性、强度、塑性、韧性、成型性、可焊性、耐蚀性和生物相容性均较好，成为钛合金工业中的王牌合金，该合金使用量已占全部钛合金的75%~85%。20世纪50~60年代，主要是发展航空发动机用的高温钛合金和机体用的结构钛合金，70年代开发出一批耐蚀钛合金，80年代以来，耐蚀钛合金和高强钛合金得到进一步发展。耐热钛合金已从50年代的400℃提升到了90年代的600~650℃。Ti₃Al和TiAl基合金的出现使钛在发动机的使用部位正由发动机的冷端向发动机的热端推进。目前为止中国研究的钛合金有近50种，已列入国家标准的钛及钛合金牌号有近30个。20世纪30年代以来，中国的钛合金已由纯仿制过渡到创制与仿制相结合的阶段。Ti-31、Ti-55、Ti-75等合金是中国自行开发和设计的钛合金。中国目前钛合金研究大体与国外接近，但是与发达国家相比，无论在生产规模上还是在发展速度上仍存在较大差距。

1.2 基本性能

钛位于元素周期表中第ⅣB族第四长周期中，原子序数为22，相对原子质量为47.90，钛原子的22个外层电子在各电子层上的分布为1s²2s²2p⁶3s²3p⁶3d²4s²，属于过渡金属。钛的外观呈银灰色，具有光泽。

钛具有两种同素异构体，在882.5℃以下稳定存在的为α-Ti，密排六方晶格(hcp)结构；而在882.5℃与熔点之间稳定存在的为β-Ti，具有体心立方晶格(bcc)结构。密排六方α-Ti和体心立方β-Ti的晶胞示意图1-1。α-Ti的点阵常数(20℃)为a=0.2950nm，c=0.4683nm，c/a=1.587；β-Ti的点阵常数在20℃为a=0.3282nm，在900℃为a=0.3306nm^[4,5]。

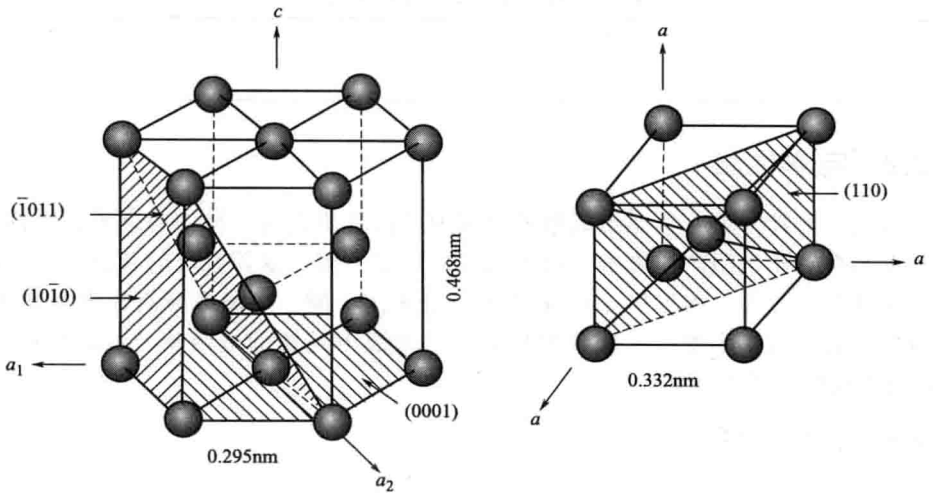
钛的密度小，只相当于钢的57%，是钢的一半多一点，不到铝的2倍，不同温度下钛的密度见表1-1。钛的密度高于铝、镁而低于铁、铜、镍，如表1-2所列。

表 1-1 不同温度下钛的密度

温度/℃	20	870	900
密度/(g/cm ³)	4.51	4.35	4.32

表 1-2 钛与其他金属密度和比强度的比较

项目	钛(合金)	铁	铝(合金)	镁(合金)	高强度钢
密度/(g/cm ³)	4.5	7.87	2.7	1.74	—
比强度	(29)	—	(21)	(16)	23

图 1-1 密排六方 α -Ti (hcp) 和体心立方 β -Ti (bcc) 的晶胞示意

1.2.1 热学性质

钛的熔点是 $(1668 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，属于难熔金属，在常压下钛的沸点为 3260°C 。但钛和钛合金的线胀系数和比热容比较低，导热性较差，纯钛的热导率、线胀系数和比热容分别见表 1-3~表 1-5。各种钛合金的热导率比钛的热导率约下降 50%。表 1-6 给出了钛与其他金属热导率的比较，钛的热导率大约是铝及铝合金热导率的 1/13、是钢的 1/5、铜的 1/25^[6]。

表 1-3 纯钛的热导率

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600
$\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	19.3	18.9	18.4	18.0	18.0	18.0	18.0

表 1-4 纯钛的比热容

$\theta/^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600
$c/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	503	545	566	587	628	670

表 1-5 纯钛的线胀系数

$\theta/^\circ\text{C}$	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700
$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	8.2	8.6	8.8	9.1	9.3	9.5	9.6
$\theta/^\circ\text{C}$	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	600~700	
$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	8.9	9.3	9.8	10.2	10.4	10.5	