

现代铸造合金及其熔炼技术丛书



铸造钛、轴承合金

耿浩然 丁宏升 张景德 陈广立 等编著



化学工业出版社

现代铸造合金及其熔炼技术丛书



铸造钛、轴承合金

耿浩然 丁宏升 张景德 陈广立 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造钛、轴承合金/耿浩然等编著, —北京: 化学工业出版社, 2007. 1

(现代铸造合金及其熔炼技术丛书)

ISBN 978-7-5025-9907-2

I. 铸… II. 耿… III. ①铸造合金: 钛合金②轴承合金 IV. TG13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 004880 号

责任编辑: 任文斗

文字编辑: 陈 喆

责任校对: 周梦华

装帧设计: 尹琳琳

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 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 323 千字 2007 年 2 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: 29.00 元

版权所有 违者必究



铸造钛、轴承合金



《现代铸造合金及其熔炼技术丛书》

编辑委员会

顾问：贾 均 马家骥 王执福

主任：耿浩然

副主任：滕新营 李长龙 丁宏升

委员：（按汉语拼音排列）

陈广立 陈俊华 陈瑞润 丁宏升 耿浩然 郭忠全 惠林海

吉蕾蕾 李长龙 李 辉 李永生 刘 玲 刘 鹏 刘亚妹

吕振宇 孙 宾 孙春静 陶珍东 滕新营 王 彬 王 飞

王桂青 王桂珍 王吉岱 王 瑞 王守仁 王 艳 王致明

徐福松 杨中喜 张 芬 张景德 章希胜 赵秀阳 赵忠魁

化学工业出版社铸造类图书

书 名	定价/元
铸件质量控制及检验	29
金属压铸模设计技巧与实例	58
实用电铸技术	45
实用铸件重力成形技术	40
实用铸件外力成形技术	42
压铸工艺及模具设计	22
有色金属熔炼与铸锭	35
职业技能鉴定培训读本(高级工)-铸造工	28
职业技能鉴定培训读本(中级工)-铸造工	28
中国材料工程大典(第 18 卷)-材料铸造成形工程(上)	170
中国材料工程大典(第 19 卷)-材料铸造成形工程(下)	135
铸铁件生产实用技术	38
铸造工	15
铸造锌、铜合金	32
铸钢	38

以上图书由化学工业出版社 机械·电气分社出版。如要以上图书的内容简介和详细目录,或者更多的专业图书信息,请登录 www.cip.com.cn。如要出版新著,请与编辑联系。

地址:北京市东城区青年湖南街 13 号 (100011)

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686)

编辑:010-64519277, 64519270

前言



钛合金材料和铸造滑动轴承合金材料是重要的工程材料之一。随着科学技术的进步和基础理论研究的不断深入,特别是近年来,出现了许多关于钛合金和轴承合金的新技术、新材料和新设备仪器,为研究生产性能、质量优良的钛合金和轴承合金铸件奠定了基础。中国加入 WTO 以后,已经成为国际上重要的金属材料及其铸件的生产出口基地,金属材料产业有了进一步发展,这对铸件质量和性能以及熔炼技术提出了新的和更高的要求,而有关钛合金和轴承合金的技术书籍还十分缺乏。因此,我们编写了这本书,以期推进我国铸造钛合金和滑动轴承合金材料及铸件的研究和生产。

本书涉及的铸造钛合金和滑动轴承合金材料及其熔炼技术是重要而实用的工程技术。汇集了作者多年来科研、教学成果和经验,系统、全面地论述了有关铸造钛合金和滑动轴承合金及其熔炼技术、铸造技术、热处理、质量检测等方面的知识,介绍了国内外该方面最新的研究成果和应用实例,并附有国内外常用合金牌号、化学成分的资料,提供了丰富的来自于试验和生产的数据,加强了实用性,突出了先进性。以适应现代教育、科学技术发展和生产实际的要求。

本书注重理论联系实际,编写中力求深入浅出地阐明有关的基础理论和基本概念,将先进性、科学性与实用性相结合,以充分反映国内外当代铸造钛合金和铸造滑动轴承合金的先进技术及发展趋势,因此,本书既有一定的学术价值,又有重要的工程应用前景。

本书可作为大专院校的材料科学与工程专业、铸造专业、金属材料工程专业和材料成形与控制等专业的教材或参考书,可供设计与科研单位、各部门中从事该专业的科技人员和工作者使用或参考。

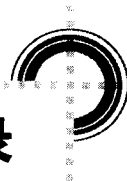
本书的第 1~4 章由哈尔滨工业大学的丁宏升和陈瑞润编写,第 5 章、第 6 章由济南大学的耿浩然、孙春静和陈广立编写,第 7 章由山东大学的张景德编写。全书由耿浩然策划、修改和统稿。参加本书编写和整理的还有滕新营、王守仁、王艳、周国荣、刘玲、陶珍东、杨中喜、王飞、惠林海、王彬、王桂珍、郭华、王致明、徐福松、李永生、耿亚伦、刘军、杨洁、罗亮、张永、刘晨光等。

本书在编写和出版的过程中,得到了编者所在单位济南大学、哈尔滨工业大学和山东大学领导和同事们的关心指导与大力支持,谨致衷心感谢!

由于编者学识水平所限,书中不足之处在所难免,竭诚希望读者不吝批评指正。

编著者

2007 年 1 月于济南



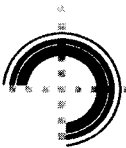
目 录

第 1 篇 钛合金及其熔炼技术

第 1 章 铸造钛合金	3
1.1 概述	3
1.2 钛的基本性质	4
1.2.1 钛的物理性质	4
1.2.2 钛的化学性质	7
1.2.3 钛的力学性质	9
1.3 钛的合金化	11
1.3.1 合金化原理	11
1.3.2 合金元素的相稳定化	14
1.3.3 合金元素对钛的性能的影响	17
1.3.4 铸造钛合金的分类	21
1.4 工业用铸造纯钛及钛合金	25
1.4.1 概述	25
1.4.2 国外的铸造钛合金	26
1.4.3 国内的铸造钛合金	27
1.4.4 工业用铸造钛合金的力学性能	28
1.5 铸造钛合金的凝固特点	35
1.5.1 钛合金的结晶特点	35
1.5.2 钛合金的流动充填性	37
1.5.3 钛合金的凝固收缩行为	39
1.6 铸造钛合金的应用概况	41
第 2 章 钛合金的熔铸技术	44
2.1 概述	44
2.2 钛合金熔体的特点	44
2.2.1 钛熔体的黏度和表面张力	44
2.2.2 钛熔体的活度及活度系数	46
2.3 钛合金熔炼过程一般原理	50
2.3.1 真空脱气	51
2.3.2 真空挥发	52
2.4 钛合金熔铸技术特点及熔炼工艺	53
2.4.1 真空自耗电电极电弧熔炼	54
2.4.2 真空自耗电电极凝壳熔炼	57
2.4.3 电子束熔炼	59
2.4.4 等离子弧熔炼	62
2.4.5 水冷铜坩埚感应熔炼	63
2.5 钛合金铸造工艺	66
2.6 几种铸造钛合金的水冷铜坩埚熔铸技术	69
2.6.1 试验及测试方法	69
2.6.2 钛合金凝固冷却曲线分析	70
2.6.3 钛合金的凝固冷却行为及组织分析	72
第 3 章 铸造钛合金的热处理和表面处理	78
3.1 钛合金的相转变	78
3.1.1 同素异构转变	78
3.1.2 相转变特点	79
3.2 铸造钛合金热处理	83
3.2.1 热处理分类	83
3.2.2 热处理工艺和效果	84
3.3 铸造钛合金的表面处理	99
3.3.1 氮化处理	99
3.3.2 硼化处理	99
3.3.3 渗碳处理	99
3.3.4 渗金属处理	100
3.3.5 渗氧处理	100
3.3.6 电镀和化学镀	100
3.3.7 热喷涂技术	100

3.3.8	气相沉积	100	中的应用	101
3.3.9	离子注入	100	3.4.1 Ti153 合金的组织转变及 强化原理	101
3.3.10	表面氧化	101	3.4.2 热处理时的组织变化	103
3.3.11	激光表面合金化	101	3.4.3 热处理后材料的性能变化 ..	108
3.4	热处理工艺在铸造 Ti153 合金			
第 4 章 钛合金铸件的质量控制		113		
4.1	钛合金铸件与铸型的界面反应 ..	113	4.2.2 缩孔(缩松)缺陷	121
4.1.1	钛合金与铸型界面反应的 研究概述	113	4.2.3 裂纹缺陷	122
4.1.2	钛合金铸件与铸型界面反 应的影响因素分析	118	4.2.4 夹杂与粘砂缺陷	123
4.2	钛合金常见铸造缺陷	120	4.2.5 其他铸造缺陷	123
4.2.1	气孔缺陷	121	4.3 钛合金铸件的整理与质量检查 ..	124
			4.3.1 钛合金铸件的整理	125
			4.3.2 钛合金铸件的校正与检查 ..	131
第 2 篇 轴承合金及其熔炼技术				
第 5 章 锡基和铅基轴承合金		135		
5.1	概述	135	5.4.1 质量检验项目和方法	153
5.2	合金分类	137	5.4.2 金相检验	154
5.2.1	锡基轴承合金	137	5.4.3 铸造缺陷分析	154
5.2.2	铅基轴承合金	140	5.5 回收	157
5.3	熔铸工艺	146	5.5.1 锡的回收	157
5.4	质量检验和铸造缺陷分析	153	5.5.2 铅的回收	158
第 6 章 铝基轴承合金		163		
6.1	概述	163	6.2.5 其他铝基轴承合金	173
6.2	合金分类	164	6.3 铝基轴承合金的制备方法及 设备	175
6.2.1	铝锑轴承合金	164	6.3.1 制备方法	175
6.2.2	铝锡轴承合金	166	6.3.2 熔炼工艺及设备	176
6.2.3	铝硅轴承合金	170	6.4 铝基轴承合金的发展展望	182
6.2.4	铝铅轴承合金	172		
第 7 章 铜铅轴承合金		184		
7.1	概述	184	7.3.1 铜铅合金质量检验	195
7.2	合金分类	188	7.3.2 镀层质量检测	196
7.2.1	粉末冶金铜铅轴承合金	188	7.3.3 缺陷分析	196
7.2.2	铸造铜铅轴承合金	189	7.4 表面处理	199
7.2.3	合金元素对金相组织的 影响	194	7.4.1 铅锡合金层的电镀	200
7.2.4	强化铅青铜 H-116	194	7.4.2 铅铜合金层的电镀	203
7.3	质量检验及缺陷分析	195	7.4.3 国外镀层材料	203
			7.4.4 镀层的发展	204
参考文献		206		

1 篇



第 1 章

铸造钛合金

1.1 概述

钛在地壳中的蕴藏量很大,仅次于铁、铝、镁,位列金属元素的第四位。钛元素于 1791 年被英国牧师、业余矿物学家格内戈尔 (William Gregor) 在黑色的磁铁矿砂 [分子式 $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{TiO}_3$] 中首先发现,1795 年德国化学家克拉普洛斯 (M. H. Klaproth) 通过对金红石 (分子式 TiO_2) 的分析,鉴定出这是由一种新元素构成的氧化物,并将其命名为 TITAN,取“大地之子”之意。但由于钛是一种高化学活性的金属,与氧的结合力非常强,很难从矿物中提取,直到 1910 年才首次提炼成功。1940 年卢森堡科学家克劳尔 (W. J. Kroll) 用钠和镁成功地还原了 TiCl_4 ,首次在工业条件下制得了海绵纯钛,从此拉开了钛的工业化生产和应用的序幕。

20 世纪 50 年代初期,钛及其合金开始用于飞机结构,当时只是用作后机身中的隔热板、导风罩、机尾罩等非承力构件。20 世纪 60 年代,钛合金的使用部位从后机身向中机身扩展,代替结构钢制造部分隔框、梁、襟翼滑轨等重要承力构件。军用飞机中的钛用量,迅速发展到了占飞机结构质量的 20%~25%。20 世纪 70 年代,钛合金的应用又从军用飞机扩展到民用飞机,一些亚音速客机和直升机上的钛合金用量越来越多。例如,一架波音 747 飞机的钛合金用量达到 3640kg。随着飞机结构中碳纤维复合材料的扩大应用,钛合金就成为制造各种紧固件最理想的材料,因为钛合金与碳纤维复合材料有着非常好的相容性,具有接近的电极电位特性和线胀系数。由于发动机推重比不断提高,压气机的出口温度已经上升到 500~600℃,选用钛合金代替耐热不锈钢制造高压压气机盘件和叶片,不仅可以减轻结构重量,还可以显著降低因离心力作用而产生的拉应力。目前,在一些先进的航空发动机中,钛合金的用量一般占结构质量的 20%~30%,主要用于制造压气机和风扇的盘件和叶片、压气机机体、中介机匣、外涵道壳体、轴承壳体、尾喷口调节器等。

与钢、铁等金属材料比较,钛及钛合金具有密度较小、比强度高、工作温度范围宽、耐介质腐蚀和良好的生物相容性能,在航空、航天、军事、民用等各个领域已经得到了广泛应用。同时,针对这一有重要应用潜力的材料,国内外就其合金体系、加工制备和合金的应用等方面开展了大量的、不间断的研究和开发工作,其中有关熔炼、加工和成形技术方面始终受到人们的关注。钛及钛合金零件虽然可以采用机械加工、锻造、焊接和粉末冶金等多种方法加工制造,然而由于钛的化学活性高、热容量较大和导热性差等特点,导致了钛的加工性

进入 20 世纪 50 年代, 以美国矿业局为代表的研究和生产机构对钛及钛合金的铸造技术进行了深入研究, 开发了适合于钛及钛合金的熔炼和铸造工艺, 这为钛及钛合金的低成本加工和成形开辟了新的道路。由于采用铸造成形的方法可以直接制造形状复杂的零件, 免去了大量的后续加工工序, 因此提高了材料的利用率, 并降低了加工制造成本。据统计, 一般钛合金锻件的材料利用率仅为 10%~15%, 而普通钛合金铸件的材料利用率为 45%, 对于精密铸造件则高达 75%~90%, 由此可以看出铸造钛及钛合金的巨大潜力。如图 1.1 所示是钛合金铸件在航空航天发动机上的使用量与锻件的比较情况, 从中可以看出, 钛合金铸件具有明显的增长趋势, 将逐步达到与钛合金锻件使用量相当的水平。尤其是铸造钛合金在民用领域的应用, 例如采用精密铸造可以大量生产高尔夫球杆头, 这推动了铸造钛合金的应用和发展。以我国为例, 国内的铸造钛合金的生产总值近年增长了十几倍, 钛合金及其铸造正处于快速发展阶段。

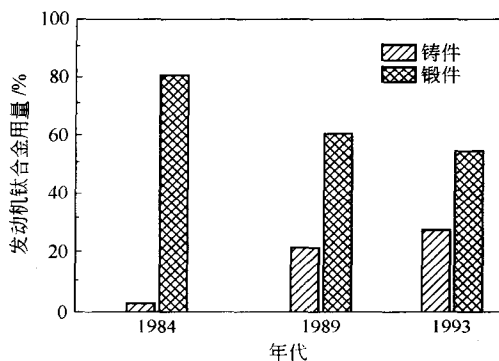


图 1.1 钛合金铸件在航空航天发动机上的使用量与锻件的比较情况

金属钛位于元素周期表中的第四周期副族，与锆、铪、铌、钽同属一族元素。钛的原子序数是 22，原子核由 22 个质子和 20~32 个中子组成，原子核半径为 $5 \times 10^{-15} \text{ m}$ 。钛的原子核外电子结构排列形式为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$ ，由于钛的 4s 和 3d 电子的电离势均小于 50eV，而 3p 电子的电离势均大于 100eV，因此钛很容易失去外层的四个电子，对外表现为正四价的离子。钛的原子量为 47.90，同位素的原子量为 46，47，48，49，50。化学纯钛的基本性质见表 1.1。

金属钛在 $(882.5 \pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 发生同素异形转变, 转变温度以下的晶体结构为密排六方结构, 称为 α 相, 转变温度以上的晶体结构为体心立方结构, 称为 β 相。同素异形转变温度通常要受到钛的间隙元素和置换元素的影响而发生变化, 因此取决于钛的纯度。图 1.2 分别显示了 α -Ti 和 β -Ti 的晶胞结构, 其中 α 相的晶格参数为: $a=0.2951\text{nm}$, $c=0.4684\text{nm}$, 晶

表 1.1 化学纯钛的基本性质

原子序数	22	比热容(25℃)	$0.518\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
原子量	47.90	热导率	$15.5\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
原子体积	$1.8 \times 10^{-26}\text{m}^3$	熔化潜热	$322\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
正四价离子半径	0.132nm	比密度	4.51
第一电离能	$661\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	硬度	70~74HRB
热中子吸收断面	$5.6\text{barns} \cdot \text{atom}^{-1}$	弹性模量	$10270 \times 10^7\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
晶体结构	α -Ti:密排六方[$\leq(882.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$] β -Ti:体心立方[$\geq(882.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$]	泊松比	0.41
		摩擦因数	0.8
颜色	深灰色	线胀系数	$8.64 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$
密度	$4.51 \times 10^3\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	电导率	3%IACS(以铜 100%计)
熔点	$(1668 \pm 4)^\circ\text{C}$	电阻率	$47.8 \times 10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$
固液相线	1725℃	电阻温度系数	$0.0026^\circ\text{C}^{-1}$
沸点	3260℃		

格常数比 $c/a=1.5874$ ，而理想晶格常数比为 1.633； β 相的晶格参数为： $a=0.3282\text{nm}$ 。 α -Ti 与 β -Ti 之间转换的相变体积变化大约为 $\pm 5.5\%$ ，晶型转变潜热大约为 $3.688\sim 3.975\text{kJ/mol}$ 。如图 1.2(a) 中还示出钛的 α 相的三个原子密排面，包括： (0002) 晶面，也称做基面； $\{1010\}$ 晶面族，这样的晶面有三个，称做棱柱面； $\{1011\}$ 晶面族，也称棱锥面，这样的晶面有六个。 a_1 、 a_2 、 a_3 三个晶轴代表 $\langle 1120 \rangle$ 晶向指数系。如图 1.2(b) 所示，它表示了钛的高温体心立方 β 相的晶体结构特征， (110) 晶面代表了原子密排面 $\{110\}$ 晶面族的其中一个变体情况，而这样的晶面一共有六个，其共有四个密排晶向，同属 $\langle 111 \rangle$ 晶向指数系。

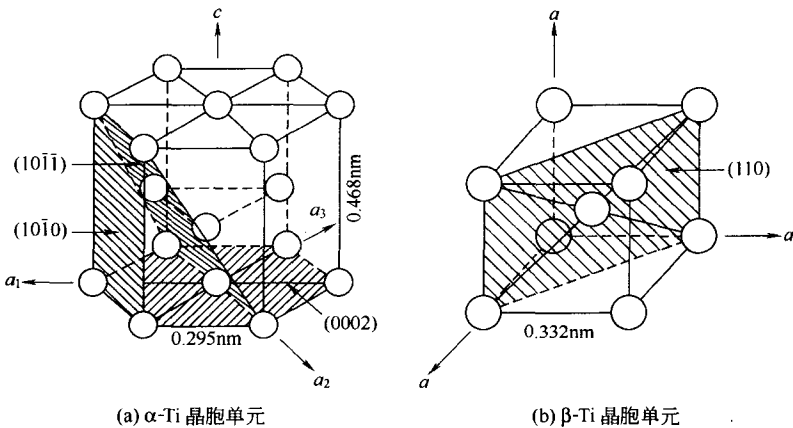


图 1.2 钛的两种晶体结构

人们通常喜欢将钛与铁、镍、铜、铝等应用上比较重要的结构金属材料进行比较，以说明钛的物理性质特点，见表 1.2。

从表 1.2 可以看出，钛与铁、镍、铝、铜等这些有代表性的金属比较，其物理性能特点如下。

表 1.2 钛和其他金属材料的物理性能比较

材料类别	钛(工业纯)	镁	铝	铁	铜	镍	钽	锆	1Cr18Ni9Ti 不锈钢	1Cr18Ni 12Mo2Ti 不锈钢
密度(20℃)/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	4500	1700	2700	7900	8960	8900	16600	6500	7900	7920
熔点/℃	1668	650	660	1535	1083	1455	2996	1830	1400~1425	1370~1400
比热容(20℃)/ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	0.527	1.003	0.895	0.460	0.385	0.439	0.151 (0℃)	0.280	0.502	0.502
电阻率(25℃)/ $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	56	4.3	2.8	9.7	1.7	6.8	12.4	45	72	—
热导率(25℃)/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	17	146	237	84	393	83	54	22	16(100℃)	20(100℃)
线胀系数(25℃)/ $10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$	8.5	26.0	22.9	11.7	16.5	13.5	6.5	5.2	16.6(20~ 100℃)	16.1(20~ 100℃)
弹性模量/ $10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	10850	4360	7210	20000	11200	21000	18900	7910	20300	20300

① 钛的熔点为 $(1668 \pm 4)^\circ\text{C}$ ，比铁、镍高出 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 左右，比铝高出 1000°C ，这保证了钛所具有的耐热性。

② 钛的密度在同素异构转变之前，室温 $\alpha\text{-Ti}$ 的密度为 $4506 \sim 4516 \text{kg/m}^3$ ，同素异构转变之后 $\beta\text{-Ti}$ 在 900°C 时的密度约为 4320kg/m^3 ，熔化时钛的密度约为 4110kg/m^3 ，与铝相比，钛的密度约升高 40%，但大大低于铁或者镍的密度，这保证了钛具有减轻结构重量的能力。

③ 钛的热导率较低，从室温 20°C 的 $16.3 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 逐渐升高到中温 500°C 的 $18.0 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，但这个数值只有铁的 1/5，铝的 1/14，相当于不锈钢的热导率。热导率低导致钛在机加工时热量过分集中在刀尖部分，发生粘刀甚至刀具损毁现象，对冷加工不利，但对于钛铸造而言，由于减少了热量随铸型、冒口等的散失，可以改善金属液的流动等铸造性能，这保证了钛具有较好的热加工性能。

④ 钛的线胀系数比铁、镍均小，而且线胀系数是各向异性的。 $\alpha\text{-Ti}$ 的单晶在 0°C 时， a 轴方向为 $7.34 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ ， c 轴方向为 $8.9 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ 。温度从室温升高到 300°C ，其平均线胀系数为 $8.2 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ 。与铁、镍材料比较，其在加热和冷却时不会引起大的热应力，因此可以保持形状稳定和尺寸精度，这保证钛材料具有较好的热处理性能。

⑤ 钛的比热容比铝、镁等轻质金属低一些，室温时为 $527 \text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，只有铝的 60%，与铁、镍的水平相当，但大于铜的比热容，且符合通常的规律，即随着温度的升高而增加。

⑥ 钛的弹性模量较低，只达到了 110GPa 左右，虽然超过了铝、镁，但只有铁、镍的 50% 左右，当要求较高的结构刚度时，钛材料的使用会受到一定限制，但将钛用于医学植入件时，由于其弹性模量与人体的骨骼极为接近，因此是一种很好的骨骼损伤修补替代品。

⑦ 钛的导电能力较低，电导率相当于铜的 3.1%，近似于不锈钢，而且当钛含有杂质时，电导率还会降低，例如化学纯钛的电阻率约为 $47.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，而工业纯钛的电阻率则为 $56.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，这是因为杂质电子是任意分布的，它们所产生的额外散射会影响到钛中传导电子的传输，从而使导电性下降。钛的导电性还会随着同素异构转变的发生而变化，当温度从室温增加到 $\alpha\text{-Ti}$ 的相变温度时，电阻率逐渐升高到 $190 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，在 $\alpha\text{-Ti} \rightleftharpoons \beta\text{-Ti}$ 转变温度，电阻率稍微下降，达到 $160 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 左右，然后随温度略有上升。钛的电导率低，使得钛不利于涡流型的感应加热。

另外，钛的导磁性接近非金属材料，磁导率 μ 仅为 1.00004H/m ，属于非导磁体，这是

由于钛是顺磁物质，磁化率很小，因此钛的磁化处理较为困难。

工业纯钛的物理性能与化学纯钛基本相同，只是电导率和热导率对杂质较为敏感。

1.2.2 钛的化学性质

钛是一种化学活性很高的金属，这是由于钛的原子半径较大，亚层和外层有未充满的电子，因此极易与外界物质发生反应，特别是在高温状态下能同氧、氮、氢、碳、硫、卤族元素等发生反应而使自身受到污染。钛尘在空气中能发生强烈的爆炸，即使在氮气中加热也能发生燃烧，在室温即能大量吸收氢气，特别是在 500℃ 以上吸气能力更强。钛在熔融状态下还会与除氧化钛以外的几乎所有坩埚或者铸型材料发生反应。

通常将钛同外界物质的化学反应归纳为如下几方面：

- ① 钛与卤族和氧族元素作用会生成共价键或者离子键化合物；
- ② 钛与过渡元素、氢、铍、硼族、碳族和氮族元素作用会生成金属间化合物和有限固溶体；
- ③ 钛与锆、铪、钒族、铬族、铀元素作用会生成无限固溶体；
- ④ 钛与惰性气体、碱金属、碱土金属、稀土元素（除铪以外）、铜、钽等不发生反应或基本上不发生反应。

钛是一种耐大多数化学介质腐蚀的金属。纯钛在大多数介质中，特别是在中性、氧化性和海水等介质中有极高的抗蚀性。在海水中的抗蚀性比铝、不锈钢和镍还要高；在稀释的硝酸、硫酸、盐酸及其混合酸中有着良好的耐腐蚀性，但在浓酸及热的有机浓酸中，耐腐蚀性不佳。以下重点分析钛在空气和腐蚀性化学介质中的化学性质。

1.2.2.1 钛的氧化、氮化和氢化

钛在室温至 500℃ 以下的空气中发生氧化时能形成稳定致密的氧化膜，生成的氧化膜成分为 TiO_2 、 TiO 、 Ti_2O_3 ，还可能含有 Ti_3O_2 、 Ti_3O_5 ，其氧化膜致密度 $\alpha_{\text{Ti}_2\text{O}_3} = 1.46$ ，大于 1，因此氧化膜能阻止氧向基体中扩散，使其不发生继续氧化，所以纯钛在 500℃ 以下可以长期工作。在 538℃ 以下，钛的氧化符合抛物线规律，但温度高于 550℃，氧会迅速穿透氧化层继续氧化。氧的扩散是通过所生成的表面氧化膜在钛中溶解开始的，氧向金属的内部晶格扩散，扩散的速度取决于氧化物的溶解速度。当温度继续升高达到 700℃ 以后，氧化膜不仅仅发生溶解现象，而且开始变得疏松、开裂和破碎，因此空气中的氧不断与未氧化的钛表面接触，氧化反应变得剧烈，氧化膜完全失去了保护作用，表 1.3 是不同温度下钛在空气中加热 30min 的氧化膜厚度。另外，通过对氧化膜颜色的鉴别也可以大致判断钛的氧化温度，表 1.4 列出了钛在不同温度下的氧化膜颜色。

表 1.3 不同温度下钛在空气中加热 30min 的氧化膜厚度

温度/℃	320~540	650	700	760
氧化膜厚度/mm	极薄	0.005	0.008	0.025

表 1.4 钛在不同温度下的氧化膜颜色

温度/℃	200	300	400	500	600	700~800	900
颜色	银白色	淡黄色	金黄色	蓝色	紫色	红灰色	灰色