

新材料新工艺新技术丛书



# 轻量化材料技术

QINGLIANGHUA CAILIAO JISHU

主编 唐 磊 杜仕国

执行主编 张玉龙 石 磊

副主编 李世刚 杨守平 许劲松 普朝光 郝英华



国防工业出版社

National Defense Industry Press

新材料新工艺新技术丛书

# 轻量化材料技术

主 编 唐 磊 杜仕国  
执行主编 张玉龙 石 磊  
副 主 编 李世刚 杨守平  
许劲松 普朝光

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

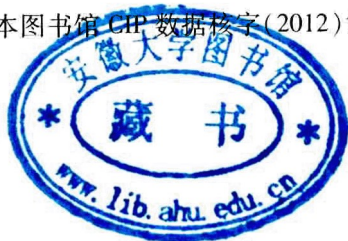
本书重点介绍了铝及其合金、镁及其合金、钛及其合金、结构陶瓷、树脂基复合材料、工程塑料的主要品种、性能、成型工艺与工艺条件、应用等内容。且按照简介、性能、成型工艺与工艺条件、应用的编写格式详细地介绍每一种轻量化材料。它是材料研究、装备与产品设计、生产加工、管理营销和教学人员等必读必备之书,也可作为教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

轻量化材料技术/唐磊,杜仕国主编. —北京:  
国防工业出版社,2014.1  
(新材料新工艺新技术丛书)  
ISBN 978-7-118-08583-9

I. ①轻… II. ①唐… ②杜… III. ①轻型-材料技术 IV. ①TB39

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第288169号



※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 29¼ 字数 711千字

2014年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 本书编委会

主 编 唐 磊 杜仕国

执行主编 张玉龙 石 磊

副 主 编 李世刚 杨守平 许劲松 普朝光

编 委 (排名不分先后)

孔祥海	马 源	王四清	王国义	王敏芳	王 超
王建江	石 磊	厉 宁	刘乃环	刘向平	刘志成
刘宝玉	刘朝辉	许劲松	齐 昕	朱洪立	孙英富
孙德强	闫惠兰	任 滨	陈跃如	汪业福	杨守平
杜仕国	李旭东	李迎春	李宏伟	李 丽	李树虎
李 萍	李桂变	李桂群	杨 耘	杨振强	杨晓冬
张文栓	张玉龙	张用兵	张冬梅	张宝东	张德琪
张 蕾	邵颖惠	吴建全	周 力	周敏华	官周国
段金栋	郝英华	姚春臣	赵媛媛	郭 毅	姜 萍
唐 华	唐 磊	陶文斌	盖敏慧	窦 鹏	黄晓霞
黄 晖	崔 英	曹根顺	普朝光	路香兰	潘士兵
穆卫军	薛维宝	戴均平	刘忠刚		

# 前 言

轻量化材料指可使装备质量减小的一类结构材料体系,对装备与设备质量的减小是以结构钢为基准而言的。装备与设备的轻量化对民用或地面装备(设备)的作用显得不十分显著,而对军用武器装备和航天航空装备,则意义十分重大。不仅可消除无效的载荷,而且可以大幅度提高武器装备及航天航空装备的机动性、灵活性,确保火力和防护性。国内外均投巨资于装备轻量化方面,做了大量而富有成效的研究。绝大多数研究成果已经投入应用,产生了明显的军事效益,展示出光明的发展前景。

为了普及轻量化材料的基础知识,推广并宣传轻量化材料技术应用与研究成果,中国兵工学会科技出版工作委员会、非金属材料专业委员会和山东兵工学会组织编写了本书。全书共7章,较为详细地介绍了铝及其合金、镁及其合金、钛及其合金、结构陶瓷、树脂基复合材料和工程塑料主要品种、性能、成型工艺与工艺条件及应用等内容。且按照简介、性能、成型工艺与工艺条件、应用的编写格式详细地介绍每一种轻量化材料。它是材料研究、装备与产品设计、生产加工、管理营销和教学人员等必读必备之书,也可作为教材使用。

本书突出实用性、先进性和可操作性,理论叙述从简,侧重于实用数据与实例说明问题,结构层次清晰严谨、语言流畅、信息量大、数据可靠,具有中等文化程度而无专业知识人员亦可读懂学会。若本书的出版发行能对我国装备特别是武器装备的轻量化研究有一定的促进作用,作者将感到无比欣慰。

由于水平有限,文中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 简介 .....	1
1.1.1 基本概念与范畴 .....	1
1.1.2 主要品种与分类 .....	1
1.2 轻金属的特性与应用 .....	1
1.2.1 铝 .....	1
1.2.2 镁 .....	4
1.2.3 钛 .....	4
1.3 陶瓷的特性与应用 .....	5
1.3.1 陶瓷的结构与性能 .....	5
1.3.2 陶瓷的表面性能 .....	6
1.3.3 陶瓷基材的力学性能 .....	7
1.3.4 陶瓷的电性能 .....	10
1.3.5 热学性质 .....	13
1.3.6 光学性质 .....	14
1.3.7 磁学性质 .....	15
1.3.8 耦合性质 .....	15
1.4 树脂基复合材料与工程塑料的特点 .....	15
<b>第 2 章 铝及其合金</b> .....	17
2.1 概述 .....	17
2.1.1 简介 .....	17
2.1.2 制备方法 .....	17
2.1.3 铝合金及产品 .....	18
2.1.4 铝及其合金的加工特性 .....	21
2.1.5 铝及其合金的应用 .....	22
2.1.6 铝及其合金的研究进展 .....	29
2.2 铝及铝合金的性能数据 .....	31
2.2.1 简介与分类 .....	31
2.2.2 变形铝及铝合金 .....	32
2.2.3 铸造铝合金 .....	55
2.2.4 压铸铝合金 .....	69
2.2.5 铝及铝合金的选用 .....	71

<b>第3章 镁及其合金</b> .....	73
3.1 概述 .....	73
3.1.1 简介 .....	73
3.1.2 制备方法 .....	74
3.1.3 镁及其合金的性能 .....	75
3.1.4 镁及其合金的应用 .....	83
3.1.5 镁及其合金的研究进展 .....	101
3.2 镁及其合金的性能数据 .....	103
3.2.1 镁的牌号 .....	104
3.2.2 镁合金的物理冶金特性 .....	104
3.2.3 合金元素在镁合金中的作用 .....	109
3.2.4 镁及镁合金牌号表示方法 .....	111
3.2.5 加工镁及镁合金牌号和化学成分 .....	112
3.2.6 加工镁合金的制品及其力学性能 .....	113
3.2.7 重熔用镁锭及铸造镁合金的牌号、化学成分和力学性能 .....	116
3.2.8 镁及镁合金的性能特点和用途 .....	119
<b>第4章 钛及其合金</b> .....	122
4.1 概述 .....	122
4.1.1 简介 .....	122
4.1.2 钛合金的分类 .....	122
4.1.3 钛的基本特性 .....	122
4.1.4 钛的制备方法、工艺特点及影响因素 .....	127
4.1.5 钛及其合金的应用领域 .....	130
4.1.6 钛及其合金的研究进展 .....	135
4.2 钛及其合金的性能数据 .....	137
4.2.1 钛及其合金的术语牌号和表示方法 .....	137
4.2.2 海绵钛和冶金用二氧化钛 .....	138
4.2.3 加工钛及其合金 .....	138
4.2.4 铸造钛及其合金 .....	138
<b>第5章 结构陶瓷</b> .....	146
5.1 简介 .....	146
5.1.1 结构陶瓷的概念、特性与应用 .....	146
5.1.2 结构陶瓷的制备 .....	149
5.1.3 结构陶瓷的加工处理 .....	156
5.1.4 结构陶瓷的应用 .....	157
5.2 氧化物陶瓷 .....	158
5.2.1 氧化铝 .....	158
5.2.2 氧化锆陶瓷 .....	168
5.3 氮化物陶瓷 .....	172

5.3.1	氮化铝陶瓷 .....	172
5.3.2	氮化硅陶瓷 .....	177
5.3.3	BN 瓷 .....	179
5.3.4	其他氮化物陶瓷的性能 .....	182
5.4	碳化物陶瓷 .....	185
5.4.1	碳化硅陶瓷 .....	185
5.4.2	层状陶瓷 $Ti_3SiC_2$ 陶瓷 .....	188
5.4.3	碳化硼陶瓷 .....	191
5.4.4	碳化锆陶瓷 .....	193
5.4.5	碳化铬陶瓷 .....	194
5.4.6	碳化钨陶瓷 .....	195
5.4.7	其他碳化物陶瓷 .....	196
5.5	硼化物陶瓷 .....	200
5.6	硅化物陶瓷基体 .....	204
第 6 章	树脂基复合材料 .....	208
6.1	玻璃纤维及其树脂基复合材料 .....	208
6.1.1	玻璃纤维 .....	208
6.1.2	玻璃纤维增强树脂基复合材料 .....	216
6.2	碳纤维与石墨纤维及其树脂基复合材料 .....	254
6.2.1	碳纤维和石墨纤维 .....	254
6.2.2	碳纤维与石墨纤维增强树脂基复合材料 .....	262
6.3	芳纶及其树脂基复合材料 .....	275
6.3.1	全芳香族聚酰胺纤维及其树脂基复合材料 .....	276
6.3.2	芳纶共聚纤维 .....	287
6.3.3	其他芳纶及其树脂基复合材料 .....	289
6.4	超拉伸聚乙烯纤维及其树脂基复合材料 .....	296
6.4.1	超拉伸聚乙烯纤维 .....	296
6.4.2	超拉伸聚乙烯纤维增强树脂基复合材料 .....	299
6.5	无机纤维及其树脂基复合材料 .....	300
6.5.1	硼纤维及其树脂基复合材料 .....	300
6.5.2	碳化硅纤维及其树脂基复合材料 .....	304
6.5.3	氧化铝纤维及其树脂基复合材料 .....	307
6.5.4	高硅氧纤维与石英纤维及其树脂基复合材料 .....	310
6.6	晶须及其树脂基复合材料 .....	313
6.6.1	晶须 .....	313
6.6.2	晶须增强树脂基复合材料 .....	314
6.6.3	钛酸钾晶须及其树脂基复合材料 .....	316
6.7	混杂与超混杂纤维增强树脂基复合材料 .....	318
6.7.1	混杂纤维及其树脂基复合材料 .....	318



6.7.2	超混杂纤维增强树脂基复合材料	324
6.8	新型纤维及其复合材料	324
6.8.1	聚苯并双噁唑纤维	324
6.8.2	超级蛋白纤维/生物钢——蜘蛛丝	327
第7章	工程塑料	330
7.1	聚酰胺	330
7.1.1	聚酰胺简介	330
7.1.2	聚酰胺结构与性能	330
7.1.3	聚酰胺的成型加工	345
7.1.4	聚酰胺的应用	346
7.2	聚碳酸酯	346
7.2.1	聚碳酸酯简介	346
7.2.2	聚碳酸酯的性能	347
7.2.3	聚碳酸酯的成型加工与工艺条件	360
7.2.4	聚碳酸酯的应用	362
7.3	聚甲醛	363
7.3.1	聚甲醛简介	363
7.3.2	聚甲醛的性能	364
7.3.3	聚甲醛的成型加工与工艺条件	368
7.3.4	聚甲醛的应用	370
7.4	热塑性聚酯	370
7.4.1	热塑性聚酯简介	370
7.4.2	热塑性聚酯的性能	371
7.4.3	热塑性聚酯的成型加工与工艺条件	384
7.4.4	热塑性聚酯的应用	386
7.5	改性聚苯醚	386
7.5.1	改性聚苯醚简介	386
7.5.2	改性聚苯醚的性能	387
7.5.3	改性聚苯醚成型加工	390
7.5.4	聚苯醚及改性聚苯醚的应用	391
7.6	聚四氟乙烯	392
7.6.1	聚四氟乙烯简介	392
7.6.2	聚四氟乙烯的性能特点	393
7.6.3	聚四氟乙烯的成型加工	398
7.6.4	聚四氟乙烯的应用	399
7.7	聚酰亚胺	399
7.7.1	聚酰亚胺简介	399
7.7.2	热固性聚酰亚胺	400
7.7.3	热塑性聚酰亚胺塑料	406

7.7.4	改性聚酰亚胺	415
7.7.5	双马来酰亚胺	420
7.8	聚苯硫醚	426
7.8.1	简介	426
7.8.2	聚苯硫醚树脂性能	426
7.8.3	聚苯硫醚的加工成型工艺	430
7.8.4	聚苯硫醚的应用	431
7.9	聚砜类塑料	431
7.9.1	聚砜(双酚 A 聚砜)	432
7.9.2	聚醚砜	436
7.9.3	聚芳砜	439
7.10	聚醚醚酮	443
7.10.1	简介	443
7.10.2	性能	443
7.10.3	成型工艺方法与工艺条件	445
7.10.4	应用	445
7.11	聚芳酯	446
7.11.1	聚芳酯树脂	446
7.11.2	聚芳酯合金	448
7.11.3	聚芳酯成型加工方法与工艺条件	452
7.11.4	聚芳酯应用	452
7.12	液晶聚合物	452
7.12.1	简介	452
7.12.2	LCP 的性能	453
7.12.3	工艺条件	454
7.12.4	应用	455
	参考文献	456

# 第 1 章 概 述

## 1.1 简 介

### 1.1.1 基本概念与范畴

轻量化材料是指那些能使装备,特别是武器及航空航天装备减轻重量的材料体系。这种重量的减轻主要是以结构钢为基准,在同等体积上,可大幅度地消除装备的无效载荷,从而提高装备的机动性、灵活性。其中主要包括可作为结构材料的轻金属、结构陶瓷、树脂基复合材料、工程塑料与结构泡沫塑料等。

### 1.1.2 主要品种与分类

(1) 轻金属。用量较大的轻金属主要有铝及其合金、镁及其合金与钛及其合金等。

(2) 结构陶瓷。主要有氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷和金刚石等。

(3) 树脂基复合材料。主要有可作为结构材料的玻璃纤维增强树脂基复合材料,碳纤维增强树脂基复合材料,芳纶纤维增强树脂基复合材料,超拉伸聚乙烯纤维增强树脂基复合材料,陶瓷纤维增强树脂基复合材料,晶须增强树脂基复合材料,金属纤维增强树脂基复合材料,混杂或超混杂树脂基复合材料,PBO 纤维及其复合材料等。其中树脂基体以热固性树脂为主,热塑性树脂为辅。

(4) 工程塑料。主要是指聚酰胺、聚碳酸酯、聚甲醛、热塑性聚酯、改性聚苯醚、聚四氟乙烯、聚酰亚胺、聚苯硫醚、聚砜、聚醚砜、聚芳砜、聚醚醚酮、聚芳酯与液晶聚合物等。

## 1.2 轻金属的特性与应用

### 1.2.1 铝

铝的密度约为  $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ,比强度大、耐腐蚀性好,导电、导热。铝还没有铁磁性,反光能力大、塑性大。铝及其合金易加工或铸造成各种零件。铝的物理性能见表 1-1,力学性能见表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 纯铝的物理性能

物理性能	高纯铝 $w(\text{Al}) = 99.996\%$	工业纯铝 $w(\text{Al}) = 99.5\%$
原子序数	13	
相对原子质量	26.9815	
晶格常数( $20^\circ\text{C}$ )/m	$4.0494 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-10}$

(续)

物理性能	高纯铝 $w(\text{Al}) = 99.996\%$	工业纯铝 $w(\text{Al}) = 99.5\%$
密度(20℃)/(kg/m <sup>3</sup> )	2698	2710
(700℃)/(kg/m <sup>3</sup> )		2373
熔点/℃	660.24	约650
沸点/℃	2060	
熔解热/(J/kg)	$3.961 \times 10^5$	$3.894 \times 10^5$
燃烧热/(J/kg)	$3.094 \times 10^7$	$3.108 \times 10^7$
凝固体积收缩率/%		6.6
比热容(100℃)/[J/(kg·℃)]	934.92	964.74
热导率(25℃)/[W/(m·℃)]	235.2	222.6(O状态)
线膨胀系数(20℃~100℃)/[μm/(m·℃)]	24.58	23.5
(100℃~300℃)/[μm/(m·℃)]	25.45	25.6
弹性模量/GPa		70
剪切模量/GPa		2625
声音传播速度/(m/s)		约4900
电导率/(S/m)	64.94	59(O状态) 57(H状态)
电阻率(20℃)/μΩ·m	0.0267(O状态)	0.02922(O状态) 0.3002(H状态)
电阻温度系数/[ (μΩ·m)/℃ ]	0.1	0.1
体积磁化率	$6.27 \times 10^{-7}$	$6.26 \times 10^{-7}$
磁导率/(H/m)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
反射率( $\lambda = 2500 \times 10^{-10}\text{m}$ )/%		87
( $\lambda = 5000 \times 10^{-10}\text{m}$ )/%		90
( $\lambda = 2500 \times 10^{-10}\text{m}$ )/%		97
折射率(白光)		0.78~1.48
吸收率(白光)		2.85~3.92

表 1-2 工业纯铝的室温力学性能

状态	弹性模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	剪切强度 /MPa	硬度 (HBS)	疲劳强度 /MPa
冷轧	71	27	0.31	100	150	6	60	—	32	42~63
退火	71	27	5	50	80	35	80	5.5	25	35

表 1-3 工业纯铝的低温性能

材料	状态	试验温度/℃	抗拉强度/MPa	伸长率/%
厚 15mm 板材	退火	20	80	36
		-70	105	43
		-196	175	51

铝的化学活泼性很高,20℃时其标准电位为-1.69V,易与空气中的氧形成一层牢固且致密的氧化膜,膜厚为5nm~10nm,铝的标准电位提高到-0.5V,所以铝在大气中是耐蚀的。铝的耐蚀性取决于氧化膜在该介质中的稳定性。铝在水中的耐蚀性主要取决于水温、水质和铝的纯度。在水温低于50℃时,随水质和铝纯度的提高,铝的耐蚀性提高。如果水中含有少量

活性离子,如  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  等,铝的耐蚀性急剧下降。铝在酸或碱介质中的耐蚀性比较见表 1-4。

表 1-4 铝在酸或碱介质中的耐蚀性比较

介 质	耐蚀性	介 质	耐蚀性
海水	弱	浓硝酸、浓乙酸	好
氨气、硫气体	好	碱、氨水、石灰水	不好
氟、氯、溴、碘	不好	有机酸	略弱
盐酸、氢氟酸、稀乙酸	不好	稀硝酸	较好
硫酸、磷酸、亚硫酸	好		

铝的基本特征及主要应用领域见表 1-5。

表 1-5 铝的基本特征及主要应用领域

基本特性	主要特点	主要应用领域
质量小	铝的密度约为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ , 铝制品或用铝制造的物品质量小, 可以节省搬运费用和加工费用	用于制造飞机、轨道车辆、汽车、船舶、桥梁、高层建筑和质量小的容器等
强度好	铝的比强度高, 并可添加合金元素制成铝合金, 热处理后得到很高的强度	用于制造桥梁、飞机、压力容器、集装箱、建筑结构和五金等
易加工	铝具有良好的延展性, 易于挤出形状复杂的中空型材并适于拉伸加工及其他各种冷热塑性成型	受力结构部件框架, 一般用品及各种容器、光学仪器及其他形状复杂的精密零件
美观、适于各种表面处理	铝及其合金表面有氧化膜, 呈银白色, 相当美观。氧化处理不仅可使表面膜更牢固, 而且可以通过染色和涂刷等方法制造出各种颜色和光泽	建筑用壁板、器具装饰、装饰品、标牌、门窗、幕墙、汽车和飞机蒙皮、仪表外壳及室内装饰材料
耐蚀性好, 耐气候性好	由于表面有致密的氧化膜保护, 很多物质对它不产生腐蚀作用, 选择不同的铝合金, 在工业地区、海岸地区使用, 也有优良的耐蚀性	门板、车辆、船舶外部覆盖材料、厨房器具、化学装置、屋顶瓦板、电动洗衣机、海水淡化、石油化工、材料、化学药品包装
耐化学药品	与硝酸、冰乙酸、过氧化氢等化学药品不反应, 有非常好的耐药性	用于化学装置、酸和化学药品的包装
导热性好, 导电性好	导热、导电性仅次于铜, 为钢铁的 3 倍~4 倍	电线、母线接头、锅、电饭锅、热交换器、汽车散热器、电子元件等
对光、热和电的反射能力好	对光的反射率高, 抛光率为 70%, 高纯铝经电解抛光后为 94%。铝对热辐射和电波也有良好的反射能力	照明器具、反射镜、屋顶瓦板、抛物面天线、冷库、投光器、冷暖器的隔热材料
无磁性	铝是非磁性体	船上用的罗盘、天线、操舵室的器具等
无毒	铝本身无毒性。由于表面光滑、容易清洗, 细菌不易停留繁殖	食具、食品包装、鱼罐、鱼仓、医疗器械、食品容器
吸声性	铝是声音的非传播体, 有吸收声波的性能	用于室内天棚板
耐低温	铝在低温时, 其强度反而增加, 无脆性, 是理想的低温装置材料	冷库、极地用车、氧及氢的生产装置

## 1.2.2 镁

镁的原子序数为 12, 相对原子质量为 24.32。25℃ 时, 镁为密排六方晶格, 晶格常数为  $a = 0.3202\text{nm}$ ,  $c = 0.5199\text{nm}$ ,  $c/a = 1.6237$ 。镁的密度约为  $1.7\text{g/cm}^3$ , 比强度和比刚度大, 能承受大的冲击载荷。镁还具有良好的切削加工和抛光性能。镁的物理性能见表 1-6, 力学性能见表 1-7。

表 1-6 镁的物理性能

相对原子质量	密度 /( $\text{g/cm}^3$ )	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 /[ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ]	线膨胀系数 /[ $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ]
24.312	1.738	650	1107	102.5	25.2
电阻率 / $\text{n}\Omega \cdot \text{m}$	电导率 /% IACS	热导率 /[ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ]		燃烧热 /( $\text{kJ/kg}$ )	熔化热 /( $\text{kJ/kg}$ )
44.5	38.6	155.5		25020	368

表 1-7 纯镁的力学性能

状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	伸长率 /%	断面收缩 率/%	硬度(HB)
铸态	11.5	2.5	45	8	9	30
加工状态	20.0	9.0	45	11.5	12.5	36

镁的标准电位为  $-2.363\text{V}$ , 是电负性很强的金属, 其耐蚀性极差。镁很容易与空气中的氧化合, 生成一层很薄的氧化膜 ( $\text{MgO}$ )。由于这种氧化膜多孔疏松, 因此其保护作用很差。镁在各种介质中的耐蚀性见表 1-8。为了防止镁的腐蚀, 在储存使用之前, 需要采用适当的防腐措施, 如进行表面氧化、涂油或涂漆保护。

表 1-8 镁在各种介质中的耐蚀性

介质	耐蚀性	介质	耐蚀性
淡水、海水、潮湿大气	腐蚀破坏	甲醚、乙醚、丙酮	不腐蚀
有机酸及其盐	强烈腐蚀破坏	石油、汽油、煤油	不腐蚀
无机酸及其盐(不包括氟酸)	强烈腐蚀破坏	芳香族化合物(苯、酚、萘等)	不腐蚀
氨溶液、氢氧化铵	强烈腐蚀破坏	氢氧化钠溶液	不腐蚀
甲醛、乙醛、三氯乙醛	腐蚀破坏	干燥空气	不腐蚀
无水乙醇	不腐蚀		

## 1.2.3 钛

钛的密度约为  $4.5\text{g/cm}^3$ , 比强度大, 低温和高温性能好, 有优良的耐蚀性。钛的物理性能见表 1-9, 力学性能见表 1-10。

表 1-9 钛的物理性能

相对原子质量	密度 /( $\text{g/cm}^3$ )	熔点 /℃	沸点 /℃	比热容 /[ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ]	线膨胀系数 /[ $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ]	电阻率 / $\text{n}\Omega \cdot \text{m}$	电导率 % IACS	热导率 /[ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ]	晶体结构
47.9	4.507	$1668 \pm 10$	3260	522.3	10.2	420	—	11.4	密排六方

表 1-10 钛的力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长 率/%	硬度(HV)	拉伸弹性 模量/GPa
235	140	54	60~74	106

(1) 钛及其合金具有一系列突出的优点。

① 钛的密度小、比强度高。钛的相对密度为 4.5, 介于铝(2.7)和铁(7.6)之间, 但比强度高于铝和铁。

② 钛合金的耐热性比铝高得多, 其工作温度范围宽, 如耐热钛合金的工作温度可达 500℃, 低温钛合金则在 -253℃ 还能保持良好的塑性。如能克服 550℃ 以上的氧化污染问题, 钛合金的使用温度还能进一步提高。

③ 钛及其合金具有优良的耐蚀性, 特别是在海水和海洋大气中抗蚀性极高。

(2) 钛及其合金的主要缺点如下。

① 钛的导热性差, 只有铁的 1/5, 铝的 1/13, 摩擦系数大( $\mu = 0.42$ ), 抗磨性也较差, 故在切削加工时, 易使工件及刀具温度升高, 造成粘刀, 降低刀具寿命, 故切削加工性差。

② 钛的弹性模量低, 影响构件刚度, 也使细长构件的使用受到限制。

③ 钛的化学性质活泼, 极易受氢、氧、氮的污染, 难以冶炼和加工, 生产成本低。

在 550℃ 以上, 钛的化学性质活泼, 能与氢、氧、氮等气体强烈反应, 造成污染, 使其性能急剧降低。

钛的细小切屑和钛尘在空气中易燃烧。钛在氮气中加热也能发生燃烧, 故生产中对钛加热或焊接时, 宜用氩气作为保护气体, 而不采用氮气。

钛在海水、大气和蒸汽中抗蚀性极好, 在各种浓度硝酸、铬酸中很稳定, 温度升高时, 发生很慢的反性。纯钛在碱溶液( $\text{NH}_4\text{OH}$ 、 $\text{KOH}$ 、 $\text{NaOH}$ ) 和大多数的有机酸及化合物中的抗蚀性很高。氢氟酸、浓硫酸、盐酸、正磷酸以及几种热的浓有机酸、氧化铝溶液能腐蚀钛。钛的腐蚀性能突出的特点是不发生局部腐蚀和晶间腐蚀, 一般为均匀腐蚀。

## 1.3 陶瓷的特性与应用

### 1.3.1 陶瓷的结构与性能

陶瓷的结构与性能见表 1-11。

表 1-11 陶瓷的结构与性能

类别	名称	说明
晶体结构	晶相	晶相就是指陶瓷的晶体结构。晶相为某些化合物或固溶体, 是陶瓷的主要组成相。陶瓷是多相多晶体材料, 其物理化学性能主要由主晶相决定。例如, 刚玉瓷之所以具有强度高、耐高温、抗腐蚀、电性能好等优良性能, 主要是其主晶相( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、刚玉型)的晶体结构紧密、离子键结合强大的缘故
	玻璃相	玻璃相是一种非晶态的低熔点固体相, 它的作用主要是: 将分散的晶相黏结在一起, 降低烧成温度, 抑制晶体长大及充填气孔空隙。但是, 玻璃相的力学强度比晶相低, 热稳定性差, 在较低的温度下就开始软化, 而且往往带有一些金属离子而降低陶瓷的绝缘性能。工业陶瓷要控制玻璃相的数量, 一般为 20%~40%

(续)

类别	名称	说明
晶体结构	气相	气相是指陶瓷组织结构中的气孔。陶瓷中往往存在许多气孔,体积占5%~10%,主要是由于原材料和工艺方面的原因造成的。较大的气孔往往是裂纹形成的原因,因而,会降低陶瓷的力学性能。另外,陶瓷的介电损耗也因之增大,并造成介电强度下降。因而应尽量降低其气孔率。但在某些情况下,如用做保温的陶瓷制品和化工用的过滤陶瓷等,则需要有控制地增加气孔量
性能	力学性能	结合键和晶体构造决定了陶瓷具有很高的抗压强度和硬度,而抗拉强度和抗剪强度则很低。陶瓷的实际断裂强度比理论断裂强度小得多,一般差2个~3个数量级,主要原因是内部存在许多不同大小、形状和分布的裂纹。由于陶瓷的塑性变形能力极差,所以受力时在裂纹尖端容易产生很高的应力集中,并且材料的抵抗裂纹扩展能力很低,在应力峰值超过一定的大小时,裂纹很快扩展,发生脆性断裂
	热性能	陶瓷的熔点高,大多在2000℃以上。有很高的抗氧化性,高温强度高,抗蠕变能力强,适宜用做高温材料。陶瓷的热膨胀系数较小,一般热导率也较低。陶瓷的抗热振能力较差。抗热振性是材料在温度急剧变化时抵抗破坏的能力,陶瓷在温度变化较大时容易破坏,使用时要加以注意
	化学性能	陶瓷的组织结构非常稳定,不但在室温下不会氧化,即使在1000℃以上的高温下也不会氧化。由于陶瓷具有稳定的化学结构,因而对酸、碱、盐类以及熔融的有色金属均有较强的抵抗能力。陶瓷化学稳定性高的这一特点,也是它在工业上能得到广泛应用的原因之一。但在某些情况下,如高温熔盐、氧化渣、液态金属等也会使某些陶瓷受到腐蚀破坏,使用上也要注意
	其他性能	陶瓷晶体中没有自由电子,所以一般都有很好的绝缘性,少数陶瓷具有半导体性质。陶瓷可以在电子工业中制作器件。 某些陶瓷具有特殊的光学性能,如用做固体器材、光导纤维、光储存材料等

### 1.3.2 陶瓷的表面性能

陶瓷的表面性能、表面粗糙度和曲度不仅与原料的细度有很大的关系,而且还与工艺方法有重要的关系,因此,表面粗糙度是对表面微观结构的度量标准,而曲度是对平直度偏差的衡量标准。总而言之,陶瓷原料细度越小,其表面就越光滑。

可以用光学或电子两种表面光度仪分别测量陶瓷的表面粗糙度。电子式测量仪检测表面粗糙度的方法是使用电子表面光度仪。测量时,沿陶瓷表面移动电子表面光度仪的微型触点测头,就可以测得陶瓷的表面粗糙度。微型触点测头有两种连接方式:一种是测头与压电晶体连接;另一种是测头与一小块磁体连接,该磁体可以在线圈内移动,压电晶体或线圈上产生的感应电压与被测陶瓷基体的细度成正比,为了使大多数测量范围的读数准确,微型触点测头的分辨率必须是25.4nm。光学表面光度计是利用光学原理进行表面粗糙度测量的,测量时,使激光二极管或其他光源产生的相干光对准被测陶瓷的表面,粗糙陶瓷基体表面的偏向角会产生干涉特性图,通过对干涉特性图的计算,便可以获得陶瓷表面的粗糙度。光学表面光度计比电子表面光度仪的分辨率高,故此,光学表面光度计用于测量表面粗糙度非常低的物体;通常情况下,电子表面光度仪被广泛地用于制造业和试验室中表面粗糙度的检测。

测量陶瓷表面的曲度时,首先应该测量陶瓷基体的厚度;然后,将被测基体置于一对平行板之间,调节平行板之间的距离;最后计算曲度;陶瓷基体能够通过的最小距离减去基体的厚度,用最小距离除以陶瓷基体的最大尺寸便得到曲度。关于曲度的变化可以概括如下。



- (1) 厚度大的陶瓷基体比厚度小的陶瓷基体的曲度小。
- (2) 正方形的陶瓷基体比长方形的陶瓷基体的曲度小。
- (3) 粉末模压成型方法生产的陶瓷基体比薄型片材成型方法生产的陶瓷基体的曲度小。

### 1.3.3 陶瓷基材的力学性能

陶瓷材料的力学性能在很大程度上受经常发生的原子间键的影响,软金属会因晶格位移机理而产生位错过程,相对而言,陶瓷材料很少发生这种情况。此外,陶瓷几乎不发生塑性变形破坏,基本上也不具有抵抗断裂的性能。

#### 1. 弹性模量

在陶瓷材料应用方面,温度膨胀系数(TCE)具有重要的意义。当材料样品有一个端面需要固定时,应该考虑该固定端面应与另外一种温度膨胀系数较小的材料进行黏结。

表 1-12 列出了陶瓷材料的弹性模量和其他力学性能。

表 1-12 陶瓷的力学性能

材料	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	抗压强度 /GPa	断裂模量 /MPa	挠曲强度 /MPa	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )
氧化铝(99%)	370	500	2.6	386	352	3.98
氧化铝(96%)	344	172	2.26	341	331	3.92
氧化铍(99.5%)	345	138	1.55	233	235	2.87
氮化硼(常态)	43	2410	6.525	800	53.1	1.92
氮化铝	300	310	2.0	300	269	3.27
碳化硅	407	197	4.4	470	515	3.10
金刚石(IIA型)	1000	1200	11.0	340	1000	3.02

各种常见材料的弹性模量和硬度见表 1-13,几种典型陶瓷的弹性模量和强度见表 1-14。

表 1-13 各种常见材料的弹性模量和硬度

材料	弹性模量/MPa	硬度(HV)	材料	弹性模量/MPa	硬度(HV)
橡胶	6.9	很低	钢	207	300~800
塑料	1380	约 17	氧化铝	400	约 1500
镁合金	41300	30~40	碳化钛	390	约 3000
铝合金	72300	约 170	金刚石	1171	6000~10000

表 1-14 几种典型陶瓷的弹性模量和强度

陶瓷	弹性模量 /GPa	强度 /MPa	陶瓷	弹性模量 /GPa	强度 /MPa
滑石瓷	69	138	烧结尖晶石(约 5% 气孔率)	237.9	90
莫来石瓷	69	69	烧结碳化钛(约 5% 气孔率)	310.3	1103
氧化硅玻璃	72.4	107	烧结硅化钼(约 5% 气孔率)	406.9	690
氧化铝瓷(90%~95% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	365.5	345	热压碳化硼(约 5% 气孔率)	289.7	345
烧结氧化铝(约 5% 气孔率)	365.5	34.5~207	热压氮化硼(约 5% 气孔率)	82.8	48~103

弹性模量对组织(包括晶粒大小和晶体形态等)不敏感,但受气孔率的影响很大。气孔降低材料的弹性模量;温度的升高也使其降低。